

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josip Martan

ZAVRŠNI RAD

**UTJECAJ POTRESA NA MREŽE
VODOOPSKRBE I ODVODNJE**

Mentor: prof. dr. sc. Ivan Halkijević

Zagreb, 2023.

SADRŽAJ RADA

SADRŽAJ RADA.....	i-ii
POPIS SLIKA.....	iii
POPIS TABLICA.....	iv
SAŽETAK.....	v-vi
1. Uvod.....	1
2. Metodologija procjene broja oštećenja na vodoopskrbnoj i kanalizacijskoj mreži.....	4
2.1. Osnovne pretpostavke i karakteristike funkcije ranjivosti	4
2.2. Funkcije ranjivosti za cjevovodne mreže u ovisnosti o obliku deformacije tla.....	6
2.3. Metodologije.....	7
2.3.1. Katayama i suradnici (1975.).....	9
2.3.2. Eguchi i suradnici (1981. i 1983.)	9
2.3.3. Berenberg (1989.).....	10
2.3.4. O'Rourke i Ayala (1993.) i Honegger i Eguchi (1992.)	10
2.3.5. Eidinger (2001.).....	11
2.3.6. M O'Rourke (2003.).....	13
2.3.7. T. O'Rourke i suradnici (2014.).....	15
2.3.8. Usporedba funkcija ranjivosti.....	15
3. Procjena broja oštećenja za Grad Petrinju.....	17
3.1. Mogućnost primjene izloženih funkcija ranjivosti za slučaj seizmičkog događaja na području Grada Petrinje	17
3.2. ALA metoda	18
3.3. HAZUS metoda	19
3.4. Honegger-Eguchijava metoda	19
3.5. Parametri seizmičke pobude za područje Grada Petrinje	20

3.6. Procjena oštećenja na postojećoj vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe Grada Petrinje	23
4. Zaključak	29
Literatura	30

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema vodoopskrbnog sustava	1
Slika 2. Gubitak vode kroz rupice i pukotine u cijevi	2
Slika 3. A. Dopušteni pomak rasjeda u odnosu na duljinu bez sidra u kontinuiranoj cijevi (O'Rourke 2003.) i B. Dopušteni pomak rasjeda u odnosu na kut presjeka cijevi i rasjeda u cijevi podijeljenoj na segmente (O'Rourke 2003.)	14
Slika 4. Grafički prikaz usporedbe broja oštećenja cjevovodne mreže prema najkorištenijim funkcijama ranjivosti	16
Slika 5. Lokacije mjernih stanica	22

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sažetak funkcija ranjivosti cjevovoda za učinke podrhtavanja tla prema korištenim podacima o seizmičkim događajima	8
Tablica 2. Vrijednosti koeficijenta K_1 i K_2 prema Eidingerovoj metodi uz nadopunu drugih autora	12
Tablica 3. Podaci seizmičkih mjernih stanica Grada Zagreba s vrijednostima parametara PGA, PGV i PGD na temelju zapisa akcelerograma za seizmički događaj magnitude $M_L=6,2$ od 29. prosinca 2020.....	21
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 najveće izmjerene vrijednosti PGV i PGD	23
Tablica 5. 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.....	24
Tablica 6. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed privremenih deformacija tla prema HAZUS metodi za najveće izmjerene vrijednosti PGV.....	24
Tablica 7. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed privremenih deformacija tla prema HAZUS metodi za procijenjene vrijednosti PGV.....	25
Tablica 8. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed trajnih deformacija tla prema Honegger-Eguchiyevoj metodi za najveće izmjerene vrijednosti PGD	25
Tablica 9. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed trajnih deformacija tla prema Honegger-Eguchiyevoj metodi za procijenjene vrijednosti PGD.....	26
Tablica 10. Raspodjela procijenjenog broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik s procjenom ukupnog troška sanacije	28

SAŽETAK

U ovom radu predstavljen je utjecaj potresa na mreže vodoopskrbe i odvodnje. U uvodnom dijelu dano je objašnjenje za što se sve sustav vodoopskrbe i odvodnje koristi, od kojih dijelova se sastoji i koji se dijelovi promatraju u ovom radu. Naveden je i utjecaj i posljedice djelovanja potresa na te promatrane dijelove sustava. Analizirane su najčešće korištene funkcije ranjivosti koje daju procjenu broja oštećenja promatranog sustava.

Neke od analiziranih funkcija ranjivosti dodatno su analizirane i upotrebljene za procjenu oštećenja mreže vodoopskrbe i odvodnje Grada Petrinje kojeg je 29. prosinca 2020. zadesio potres magnitude Mw 6,4. U proračunu su analizirani osnovni seizmički podaci i fizikalno-mehaničke karakteristike cjevovodne mreže i pojašnjeno je kako su se ti podaci u proračunu prilagodili vrijednostima kako bi dali vrijednosti najbliže onim stvarnim.

Proračunom je procijenjena vrijednosti oštećenja prikazana u obliku broja oštećenja po kilometru dužine mreže i dana je procjena ukupnog troška sanacije. Na kraju su dane i neke preporuke kako izbjeći značajna oštećenja od potresa na mreže vodoopskrbe i odvodnje.

Ključne riječi: potres, mreža vodoopskrbe i odvodnje, funkcija ranjivosti, grad Petrinja, seizmički podaci

ABSTRACT

This paper presents the impact of earthquakes on water supply and drainage networks. In the introductory part, an explanation is given for what the water supply and drainage system is used for, what parts it consists of, and which parts are observed in this paper. The impact and consequences of earthquakes on these observed parts of the system are also listed. The most commonly used vulnerability functions, which provide an estimate of the number of damage to the observed system, were analyzed.

Some of the analyzed vulnerability functions were additionally analyzed and used to assess the damage to the water supply and drainage networks of the City of Petrinja, which suffered an earthquake of Mw 6.4 on December 29, 2020. Furthermore, the basic seismic data and physical-mechanical characteristics of the pipeline network were analyzed and it was explained how these data were adjusted to the values in the calculation in order to give the values closest to the real ones.

The calculation estimated the value of the damage shown in the form of the number of damages per kilometer of the network length and gave an estimate of the total cost of rehabilitation. At the end, some recommendations were given on how to avoid significant earthquake damage to water supply and drainage networks.

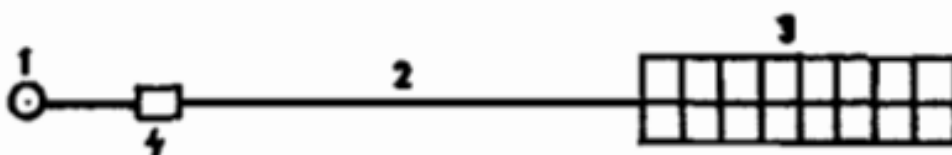
Keywords: earthquake, water supply and drainage network, vulnerability function, city of Petrinja, seismic data

1. Uvod

Voda je osnovna potreba svakog čovjeka i od iznimne je važnosti za svakodnevno funkcioniranje kućanstava i svih grana gospodarstva. Voda se primarno upotrebljava za piće, pripremu hrane, polijevanje, pranje, industrijske svrhe, energetiku, gašenje požara, rekreaciju i sport. Svestranost i svugdje prisutnost korištenja vode dokazuju koliko je ona bitna i da bi bez nje, pa i na kratak period, stupanj komfora i sigurnost građana bio ugrožen.

Vodom manipuliramo složenim sustavom vodoopskrbe i odvodne.

Vodoopskrbni sustav ima funkciju prijenosa vode od mjesta vodozahvata do potrošnih mjesta preko sustava koji se sastoji od vodozahvata, crpne stanice, uređaja za kondicioniranje vode, vodospreme i vodoopskrbne mreže. Na slici 1. prikazana je shema vodoopskrbnog sustava gdje je s brojem 1 prikazan vodozahvat, s 2 dovodni cjevovod, a s 3 cjevovodna mreža. Sustav odvodnje ima funkciju sakupljanja, odvođenja, pročišćivanja i ispuštanja otpadnih voda. Sastoji se od kanalizacijske mreže, građevina kanalizacijske mreže, uređaja za pročišćivanje otpadnih voda i ispusta. Zajedno sustav vodoopskrbe i odvodnje zadovoljavaju čovjekove potrebe za vodom na što ekonomičniji i kvalitetniji način.

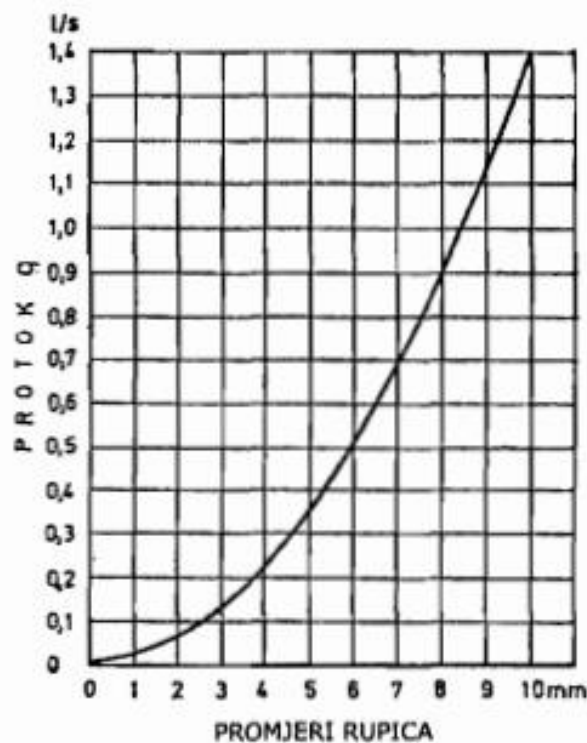


Slika 1. Shema vodoopskrbnog sustava

U slučaju potresa, iznenadnog otpuštanja nakupine potencijalne elastične energije iz Zemljine kore u obliku seizmičkih valova, dolazi do gibanja i ubravanja tla u kratkom vremenskom periodu koji se manifestiraju kao podrhtavanju površine tla. Taj kratak, ali razoran događaj pogađa veliki broj ljudi na zahvaćenom području, kao i građevine tog područja. Osim što se nakon seizmičkih događaja, pogotovo onih razornih, opažaju oštećenja na nadzemnim građevinama, znatne posljedice ostavlja i na sustavima pod zemljom kao što su u velikoj većini cjevovodi koji čine sustav vodoopskrbe i odvodnje.

Spomenuti sustav se nalaza (u većini slučajeva) u neposrednom dodiru s tlom koje podrhtava. Time se prenose dodatna naprezanja i deformacije na sustave vodoopskrbe i odvodnje. Potresi sa svojim negativnim utjecajem na sustav vodoopskrbe i odvodnje mogu prouzročiti ekonomske gubitke isporučitelja i potrošača, ekonomske gubitke industrije, zarazne bolesti povezane s isporukom ili ispuštanjem u okoliš nehigijenske vode, nedovoljne količine i protoke vode potrebe za obranu od požara.

Na slici 2. može se vidjeti (opažanjem smanjenja isporučenog protoka) koliko se vode izgubi zbog manjih pukotina ili rupa u cjevovodnoj mreži gdje se voda nalazi pod tlakom od 38 bara.



Slika 2. Gubitak vode kroz rupice i pukotine u cijevi

Dodatno, o jačini i karakteristikama potresa ovisi broj i veličina oštećena na mreži. Ona se mogu manifestirati kao puknuća duž dionica mreže, puknuća i odvajanje spojeva, te kao gubitak funkcionalnosti cijelog ili dijela sustava. Za pravilno projektiranje mreže osim karakteristika seizmičkog događaja potrebno je sagledati i osnovne tehničke karakteristike cjevovoda promatrane mreže.

Različiti autori u korelaciju s potresom dovode različite tehničke parametre mreže kao što su: materijal cjevovoda, promjer cjevovoda, starost cjevovoda, vrsta spojeva i veznog

sredstva na mreži, tehnologiju gradnje, uvjete posteljice cjevovoda i uporišta cjevovoda na zavojima mreže.

Uz to uzimaju u obzir i geomehaničke karakteristike i kemijsku agresivnost okolnog tla, razinu podzemne vode i prodore u zidovima okana i komora i izvedbu potpornih blokova u njima. Ti parametri uzimaju se u obzir kako bi se mogli dovesti u vezu s jačinom potresa i procijenjenom veličinom i obujmom šteta koji je on prouzročio.

Zbog izravnog utjecaja potresa na mrežu vodoopskrbe i odvodnje mnogi autori su izradili razne metodologije kako bi se procijenio broj oštećenja na mreži nakon potresa. Neke metodologije bit će spomenute u ovom radu kao i primjena nekih na procjenu broja oštećenja za Grad Petrinju koji je 29. prosinca 2020. zadesio potres magnitude M_w 6,4. Uz to valja naglasiti kako se metodologije odnose samo na procjenu oštećenja cjevovodne mreže koja čini dio mreže vodoopskrbe i odvodnje.

2. Metodologija procjene broja oštećenja na vodoopskrbnoj i kanalizacijskoj mreži

2.1. Osnovne pretpostavke i karakteristike funkcije ranjivosti

Većina metodologija veže se na primjenu funkcija ranjivosti (koje se još nazivaju i funkcije krhkosti ili funkcija prouzročene štete). Funkcija ranjivosti označava matematičku funkciju koja dovodi u odnos procjenu stupnja oštećenja ili vjerojatnost prekoračenja graničnog stanja vodoopskrbne mreže i okolišnu pobudu tla koja je uzrokovana potresom.

Parametri potresa koji su relevantni i koriste se u funkcijama ranjivosti su vršna horizontalna brzina tla (eng. Peak Ground Velocity-PGV), vršno horizontalno ubrzanje tla (Peak Ground Acceleration-PGA) i iznos trajne deformacije tla (Peak Ground Displacement-PGD).

Osim parametre potresa, za funkcije ranjivosti potrebno je poznavati i fizikalno-mehaničke karakteristike cjevovoda, kao i karakteristike okoline. Od njih se najviše ističu materijal cjevovoda, promjer cijevi, tip spoja i brtvenog sredstva, starost cjevovoda, tehnika gradnje, kemijska agresivnost i geomehaničke karakteristike okolnog tla, sezonska promjena vanjskih uvjeta, razina podzemne vode, uvjete ležišta cjevovoda, izvedena uporišta na horizontalnim i vertikalnim zavojima, prodori na zidovima okana i komora i izvedba potpornih blokova u njima. Dovodom parametara cjevovoda i okoline sa seizmičkim utjecajem dobiva se funkcija ranjivosti koja najčešće iskazuje broj oštećenja (puknuća i nedopuštenih deformacija) po jedinici duljine cjevovodne mreže.

Funkcija ranjivosti može biti deterministička i vjerojatnosna. Deterministička definira srednji procjenu broja oštećenja, a vjerojatnosna definira srednju vrijednost kao i pogrešku. Prema tome bolja je vjerojatnosna funkcija ranjivosti jer daje bolji uvid u opseg cjelokupne procjene broja oštećenja sustava.

Metodologije procijene broja oštećenja sastoje se od izvoda i primjene izvedene funkcije ranjivosti za dobivanje procjene broja oštećenja nakon potresa na promatranoj mreži ili za potrebe pravilnog protupotresnog projektiranja. Kod procjene broja oštećenja nakon potresa proračun se provodi prema izmjerenim parametrima seizmičke pobude, a za protupotresno projektiranje cjevovodne mreže u proračun se uzima više različitih vrijednosti veličina pobuda tla kako bi se sustav najbolje optimizirao na buduće seizmičke događaje.

U pravilno projektiranje osim poboljšanja samih fizikalno-mehaničkih karakteristika cjevovoda može se zbog nedostatne potresne otpornosti tlocrtno preraspodijeliti, tj. tlocrtno premjestiti dio ili cijeli cjevovodni sustav kako bi najbolje bio geometrijski postavljen na djelovanje seizmičkih valova koji su u modelu definirani vrijednostima pobude tla.

Procjenom oštećenja mreže nakon potresa nastoji se preko izvedenih funkcija ranjivosti dobiti uvid u približan broj oštećenja na mreži kako bi se lakše procijenila šteta i planirala sanacija pogođenog područja.

Funkcija ranjivosti sastoji se od:

- 1.) Prikupljanja osnovnih tehničkih podataka o promatranom sustavu (kao što su: materijal od kojeg je izgrađen sustav, promjer cjevovoda, način spajanja cijevi, starost sustava, stupanj korodiranosti sustava)
- 2.) Prikupljanja seizmičkih parametara (PGV, PGA, PGD) prethodnih seizmičkih aktivnosti za promatrano područje i s njima povezanih stvarno evidentiranih oštećenja na sustavu
- 3.) Statističku analizu utjecaja vrijednosti parametara seizmičke pobude na oštećenje sustava
- 4.) Definiranje funkcija ranjivosti ovisne o seizmičkim parametrima (PGV, PGA, PGD) i o fizikalno-mehaničkim karakteristikama sustava i njegove okolina
- 5.) Definiranje oblika i parametara funkcija ranjivosti za one tehničke karakteristike za koje je utvrđena statistička značajnost

Nadalje, preko funkcija ranjivosti dobiva se tražena procjena oštećenja, a ona se može izraziti kao:

- 1.) Procjena srednjeg stupnja oštećenosti sustava preko funkcija ranjivosti, s procjenom stupnja gubitka funkcionalnosti sustava, ali i procjene nesigurnosti procjene srednjeg stupnja oštećenosti zbog mogućeg korištenja neadekvatne funkcije ranjivosti
- 2.) Procjena ukupne štete na sustavu koji detaljnije daje procjene troškova sanacije i zamjene dijela sustava kao i procijene trajanja cjelokupne sanacije sustava

Procjena oštećenja uvelike ovisi o drugoj infrastrukturi koju je zahvatio potres. Te se zbog nepostojanosti svih relevantnih podataka, za drugu pa i promatranu infrastrukturu, ne može dati točna procjena oštećenosti u vidu procjene ukupne štete na sustavu.

2.2. Funkcije ranjivosti za cjevovodne mreže u ovisnosti o obliku deformacije tla

Oštećenja na cjevovodnoj mreži uslijed seizmičkih djelovanja razlikuju se za podrhtavanje tla i trajnih deformacija tla koje je uzrokovao seizmički događaj. Gdje tijekom seizmičkih događaja na cjevovodni sustav mogu ostaviti posljedice samo privremene deformacije, samo trajne deformacije ili najčešće kombinacija djelovanja privremenih i trajnih deformacija tla.

Podrhtavanje tla označava privremenu deformaciju tla koje nastaju kao posljedica širenja seizmičkih valova različitih veličina i smjerova. Oštećenja na cjevovod uslijed privremenih deformacija uzrokuje relativni pomak između tla i cjevovoda. Seizmički mjerljivi utjecaji koje možemo dovesti u korelaciju s tim pomacima su modificirani Mercallijev intenzitet¹, PGV, PGA, PGD.

Dugotrajne, tj. trajne deformacije tla nastaju kao posljedica rasjeda, likvefakcije, klizišta i različitog slijeganja uslijed konsolidacije nekoherentnih tla².

Kako bi za promatrani sustav mogli procijeniti koji je dominantni utjecaj od dviju promatranih deformacija tla moramo parametre staviti u određeni odnos. U pravilu privremene deformacije uzrokuju manja oštećenja, tj. manja naprezanja i deformacije na cjevovod u usporedbi s trajnim deformacijama. Ipak, treba uzeti u obzir i da privremene deformacije utječu na znatno veći dio ukupne cjevovodne mreže od trajnih deformacija pa samim time u većini slučajeva uzrokuju i sveukupno veću financijsku štetu na cjevovodnoj mreži.

Dobar primjer gdje je trajna deformacija tla bila dominantno odgovorna za štetu prouzročenu na cjevovod tijekom potresa je potres koji je pogodio područje San Fernanda 1971. godine. Za to područje autor Eguchi (1982.) ocijenio je oštećenje cjevovoda pomoću nezavisno izvedene funkcije ranjivosti. Usporedio je štetu na cjevovodu uzrokovanu puknućem, slomom i podrhtavanjem tla. Zaključio je da se gotovo polovica ukupnih oštećenja dogodila na lokaliziranim mjestima područja gdje su uočena puknuća i slom tla koje ukazuju na većinski utjecaj trajnih deformacija tla.

¹ Modificirani Mercallijev intenzitet je ljestvica seizmičkog intenziteta koja se dobiva tako da se mjeri učinak potresa na građevinske strukture i stanovnike potresom pogođenog područja

² Konsolidacijsko slijeganje nekoherentnih tla je smanjenje volumena kod krupnozrnih tla (pijeska i šljunka) uzrokovano istjecanjem viška vode iz pora tla

U većini slučajeva privremene deformacije uzrokuju veću sveukupnu štetu, to se dogodilo i na sljedećem primjeru. Seizmički događaj s epicentrom u Michoacanu 1985. godine. zahvatio je vodoopskrbni sustav Mexico Cityja. Ayala i O'Rourke su 1989. izvijestili da za područje Mexico Cityja nije bilo likvefakcije tla³ koja je glavni pokazatelj da su za prouzročenu štetu bile odgovorne trajne deformacije tla, a da su za oštećenja vodovodnog sustava tog područja primarno bili odgovorni pomaci tijekom seizmičkog događaja, tj. oštećenja su pripisali primarnim deformacijama tla.

2.3. Metodologije

U svom radu Iain Tromans je 2004. usporedio ukupno sedamnaest studija koje povezuju oštećenja cjevovoda s učincima podrhtavanja tla iz podataka prikupljenih iz poznatih seizmičkih događaja. U Tablici 1. navedene su magnitude s oznakom M_w , osim ako nije drugačije navedeno, za navedena zahvaćena područja s navedenim datumom seizmičkog događaja. Nadalje, studije koje su označene sivom bojom predstavljaju funkcije ranjivosti, dok dvije studije koje su označene bijelom bojom pokazuju raspon promatranih podataka, ali ne definiraju funkcije ranjivosti. Zasipljeni podaci u tablici označavaju broj korištenih podataka iz određenog seizmičkog događaja te su ti brojevi, tj. neovisni podaci seizmičkih događaja navedeni samo tamo gdje su poznati. Tako za ALA⁴ studiju, GDp označava da su za to područje uzeti podaci koji su naknadno bili izbačeni zbog krivih mjera učinka trajnih deformacija tla. Isto tako za ALA studiju, a-s označava podatke koji su uzeti u studiji, ali su isključeni zbog pojave naknadnog potresa slične magnitude kao glavni potres. To je dovelo do poteškoća u povezivanju šteta s konkretnim seizmičkim događajem. Magnitude tih naknadnih seizmičkih događaja, koji su magnitudom približni glavnom seizmičkom događaju, navedeni su u zagradama pored vrijednosti magnitude glavnog događaja.

³ Likvefakcija tla je česta pojava kod seizmičkih događaja. Događa se kada potres svojim cikličkim i brzim opterećenjem nanosi pritisak na tlo. Zbog tog pritiska voda iz tla želi izaći, ali za to nije prošlo dovoljno vremena. To dovodi do smanjenja efektivnih naprežanja u tlu. Kada se na kraju izjednače hidrostatski pritisak i ukupno naprežanje u tlu, tlo gubi krutost i posmičnu čvrstoću što dovodi do potencijalnog slijeganja tla.

⁴ eng. ALA- The American Lifelines Alliance

Tablica 1. Sažetak funkcija ranjivosti cjevovoda za učinke podrhtavanja tla prema korištenim podacima o seizmičkim događajima

Event ID	Date	Earthquake Name	Country	Magnitude	Katayama et al. (1975)	Isoyama & Katayama (1982)	Eguchi (1983)	Barenberg (1988)	Ballantyne et al. (1990)	Eguchi (1991)	ASCE/CLEE (1991)	O'Rourke et al. (1991)	Hamada (1991)	Tiedemann (1992)	O'Rourke & Ayala (1993) [HAZUS]	Eidinger (1995, 1998)	Kitaura & Miyajima (1996)	Hwang & Lin (1997)	O'Rourke et al. (1998)	Isoyama et al. (2000)	ALA (2001)
1	18-Apr-06	San Francisco	US	7.9																	
2	01-Sep-23	Kanto	Japan	7.9 (M _{JMW})	2						2			1							2
3	11-Mar-33	Long Beach	US	6.5																	1
4	28-Jun-48	Fukui	Japan	7.1 (M _{JMW})	1						1										GD _p
5	13-Apr-49	S Puget Sound	US	6.7																	2
6	16-Jun-64	Niigata	Japan	7.5 (M _{JMW})	1						1			1			1				1
7	29-Apr-65	Puget Sound	US	6.5 (M _L)				1							1						2
8	16-May-68	Tokachi-oki	Japan	7.9 (M _{JMW})	11 (9)						8										GD _p
9	01-Oct-69	Santa Rosa	US	5.6 [5.7] (M _L)			1	1	1	1					1						a-s
10	09-Feb-71	San Fernando	US	6.6	19			3			19			2	2	2					13
11	23-Dec-72	Managua	Nicaragua	6.3	3 (1)		1			1	1										GD _p
12	28-Jul-76	Tangshan	China	7.6 (M _L)										2							
13	12-Jun-78	Miyagiken-oki	Japan	7.4 (M _{JMW})									1								
14	15-Oct-79	Imperial Valley	US	6.5																	1
15	02-May-83	Coalinga	US	6.4							1				2	1					1
16	26-May-83	Nihonkai-chubu	Japan	7.7 (M _{JMW})									3								
17	19-Sep-85	Michoacan	Mexico	8 [7.5]											3	5					a-s
18	01-Oct-87	Whittier	US	5.9 [5.3]																	a-s
19	25-Apr-89	Tlahuac	Mexico	6.9 (M _L)																	1
20	18-Oct-89	Loma Prieta	US	7										1		9	5				13
21	28-Dec-94	Sanriku Haruka-oki	Japan	7.7													1				
22	17-Jan-94	Northridge	US	6.7																	35
23	16-Jan-95	Hyogoken-nambu	Japan	6.9																	19
					6	1	4	3	6	4	7	7	2	7	6	7	5	15	4	1	12
					TOTAL NO. EARTHQUAKES																

Navedena tablica govori nam o opsežnosti metodologija koje su razvili različiti autori, te će se neke od njih pobliže objasniti u ovom radu.

2.3.1. Katayama i suradnici (1975.)

Katayama i suradnici su 1975. godine među prvima predstavili vezu između seizmičkih parametara i oštećenosti cjevovoda. Upotrebljavali su PGA i deformacije tla, s napomenom da nisu razlikovali privremene i trajne deformacije tla. Tu korelaciju su kasnije korigirali Patelunas i suradnici (1977.) i Erel i suradnici (1977.) i prikladno je prikazali u logaritamskom mjerilu.

2.3.2. Eguchi i suradnici (1981. i 1983.)

Eguchi i suradnici su 1981. i 1983. godine među prvima povezali koeficijent popravaka cjevovoda sa stupnjem Mercallijevog intenziteta. Uz to su preporučili da se samo oštećenja od propagacije koreliraju sa stupnjem Mercallijevog intenziteta. Korelaciju su još dodatno razvili za različite vrste cjevovoda, kao što su cjevovodi od lijevanog željeza i zavarene željezne cijevi sa zrakom zavarenim spojevima.

Za razvitak njihove korelacije oštećenosti cjevovoda sa stupnjem Mercallijevog intenziteta široko su korištene podloge koje uključuju velike količine stručnog znanja i postojećih podataka u obliku stupnja Mercallijevog intenziteta o šteti za potrese u Sjedinjenim Američkim Državama.

Međutim, njihova metodologija imala je značajne neizvjesnosti. Te neizvjesnosti vidljive su u pogledu da je stupanj Mercallijevog intenziteta subjektivna mjera seizmičkog intenziteta i da je površinski opseg danog Mercallijevog intenziteta proizvod subjektivne prosude u vezi pokrivenosti. Budući da je koeficijent popravaka cjevovoda, tj. stupanj oštećenosti cjevovoda vezan za stupanj Mercallijevog intenziteta koji je neizvjestan i subjektivan, i on sam postaje subjektivan, nepraktičan i nesiguran za primjenu.

2.3.3. Berenberg (1989.)

Berenberg je 1989. preporučio da se oštećenja cjevovoda dovedu u korelaciju s privremenim deformacijama tla, kao što je vršna horizontalna brzina ili naprezanje tla izazvano brzinom u području podrhtavanja niskog intenziteta, i trajnim deformacijama na mjestima gdje su relativno visoke razine trajne deformacije uzrokovane površinskim rasjedima, likvefakcijom i drugim uzrocima. Time je podijelio utjecaj na oštećenost cjevovoda od širenja seizmičkih valova, tj. primarne deformacije i trajne deformacije tla.

Dodatno, za područje pogođena privremenom deformacijom tla napravio je odnos brzine popravka s obzirom na maksimalnu horizontalnu brzinu tla. Iako je Berenbergova metoda često bila korištena, te je bila smatrana jednom od najboljih podloga toga vremena, njegova metoda nije bila prikladna za seizmičke događaje veće magnitude.

2.3.4. O'Rourke i Ayala (1993.) i Honegger i Eguchi (1992.)

O'Rourke i Ayala su 1993. godine proširili metodologiju koju je dao Berenberg 1989. godine. Poboljšali su metodu na temelju podloga dobivenih iz dva seizmička događaja na području Meksika i jednog potresa u Sjedinjenim Američkim Državama.

Za razliku od Berenbergove metode promatrano područje funkcije ranjivosti O'Rourke i Ayala (1993.) činile su cijevi od sivog lijeva, azbestcementni cjevovodi i betonski i prednapeti betonski cilindrični cjevovodi velikih promjera (većih od 500 mm).

Svojom doprinosom metodologiji uključili su dodatne cjevovode različitih materijala (u većini krutih materijala) i različitih promjera (od 80 do 1800 mm). U svojoj analizi iz 1999. FEMA⁵ je usvojila O'Rourke i Ayala metodologiju i nazvala je HAZUS⁶.

Honegger i Eguchijeva metoda razvijena je 1992. i predstavlja metodu razvijenu na temelju četiri velika seizmička događaja: Kanto (1923.), San Fernando (1971.), Tangshan (1976.) i Michaoacan (1985.).

Pomoću metode su definirali utjecaj trajnih deformacija tla na oštećenja mreže vodoopskrbe. Metoda je izrađena na temelju promjera cjevovoda od 100 do 1200 mm izrađenog od

⁵ eng. FEMA- Federal Emergency Management Agency

⁶ eng. HAZUS- Methodology for Estimating Potential Losses from Disaster

lijevanog željeza, betona, prednapetog betona i čelika. Nažalost za metodu nije poznat broj i veličina cjevovodne mreže kao ni broj oštećenja na mreži.

HAZUS-MH (2012.) poboljšana je verzija HAZUS (1999.) koja se koristi kao kompjuterski program. HAZUS-MH (2012.) koristi isti sustav funkcija ranjivosti za cjevovode oštećene djelovanjima primarnih deformacija tla prema O'Rourke i Ayala metodi, a za cjevovode okružene tlima podložnim likvefakciji koristi metodologiju Honeggera i Eguchija iz 1992.

Funkcija ranjivosti se zasniva na broju oštećenja cjevovodne mreže po kilometru dužnom mreže, a računa se prema izrazima:

$$R = 0,0001 * K * PGV^{2,25} \quad (1)$$

$$R = P_L * K * PGD^{0,56} \quad (2)$$

Gdje P_L predstavlja vjerojatnost likvefakcije, K predstavlja koeficijent koji ovisno o deformacijskom ponašanju cijevnog materija (poprima vrijednosti od 0,3 do 1,0), PGV predstavlja vršnu horizontalnu brzinu tla koja se uvrštava u cm/s, a PGD predstavlja iznos trajnih deformacija tla.

Prva (1) jednadžba temelji se na brojnim promatranim oštećenjima cjevovoda od azbestcementsa, betona, lijevanog željeza i prednapete betonske cijevi. S promjerima od 80 do 1800 mm i maksimalno postignutom brzinom kretanja tla od $PGV = 50$ cm/s.

2.3.5. Eidinger (2001.)

Eidinger je 2001. godine u svom radu predložio korištenje dvije funkcije ranjivosti. Prva se koristi za prolazak seizmičkih valova kroz tlo bez likvefakcije, tj. primarne deformacije tla. Druga se koristi za utjecaj trajnih deformacija tla, tj. kod tla gdje je prisutna likvefakcija ili klizanje.

Funkcije ranjivosti definirao je jednadžbama gdje (3) predstavlja jednadžbu za primarne, a (5) za upotrebu trajnih deformacija tla. Te jednadžbe predstavljaju prosječan broj popravaka na 100 (m) cjevovodne mreže povezanih s vjerojatnošću neprekoračenja koja je rezultat prolaska seizmičkih valova kroz tlo i likvefakcijom tla.

Jednadžbe su dane izrazima:

$$R_w(PGV, p) = K_1 * 0,00187 * PGV * \exp(1,15 * \phi^{-1}(p)) \quad (3)$$

$$R_w(PGV) = K_1 * 0,003623 * PGV \quad (4)$$

$$R_1(PGD, p) = K_2 * 1,06 * PGD * \exp(0,74 * \phi^{-1}(p)) \quad (5)$$

$$R_1(PGD) = K_2 * 1,39 * PGD^{0,319} \quad (6)$$

Izrazima $\exp(\beta * \phi^{-1}(p))$ u jednadžbama (3) i (5) se postiže da se u izraze uvedu nesigurnosti i logaritamsko normalno raspodijeljeno uvjetovane vrijednosti PGV i PGD.

Uz Jednadžbe (3) i (5) vežu se i jednadžbe (4) i (6) koje predstavljaju srednju (prosječnu) vrijednosti broja oštećenja cjevovoda.

Dodatno, autor uvodi i koeficijente K_1 i K_2 kojima se uzima u obzir materijal cjevovoda i spojeva, korozivnost tla i promjer cjevovoda. Vrijednosti su prikazane u Tablici 2. koja je još dodatno nadopunjena s vrijednostima drugih autora koji su naknadno obradili i nadopunili Eidingerovu funkciju ranjivosti.

Tablica 2. Vrijednosti koeficijentata K_1 i K_2 prema Eidingerovoj metodi uz nadopunu drugih autora

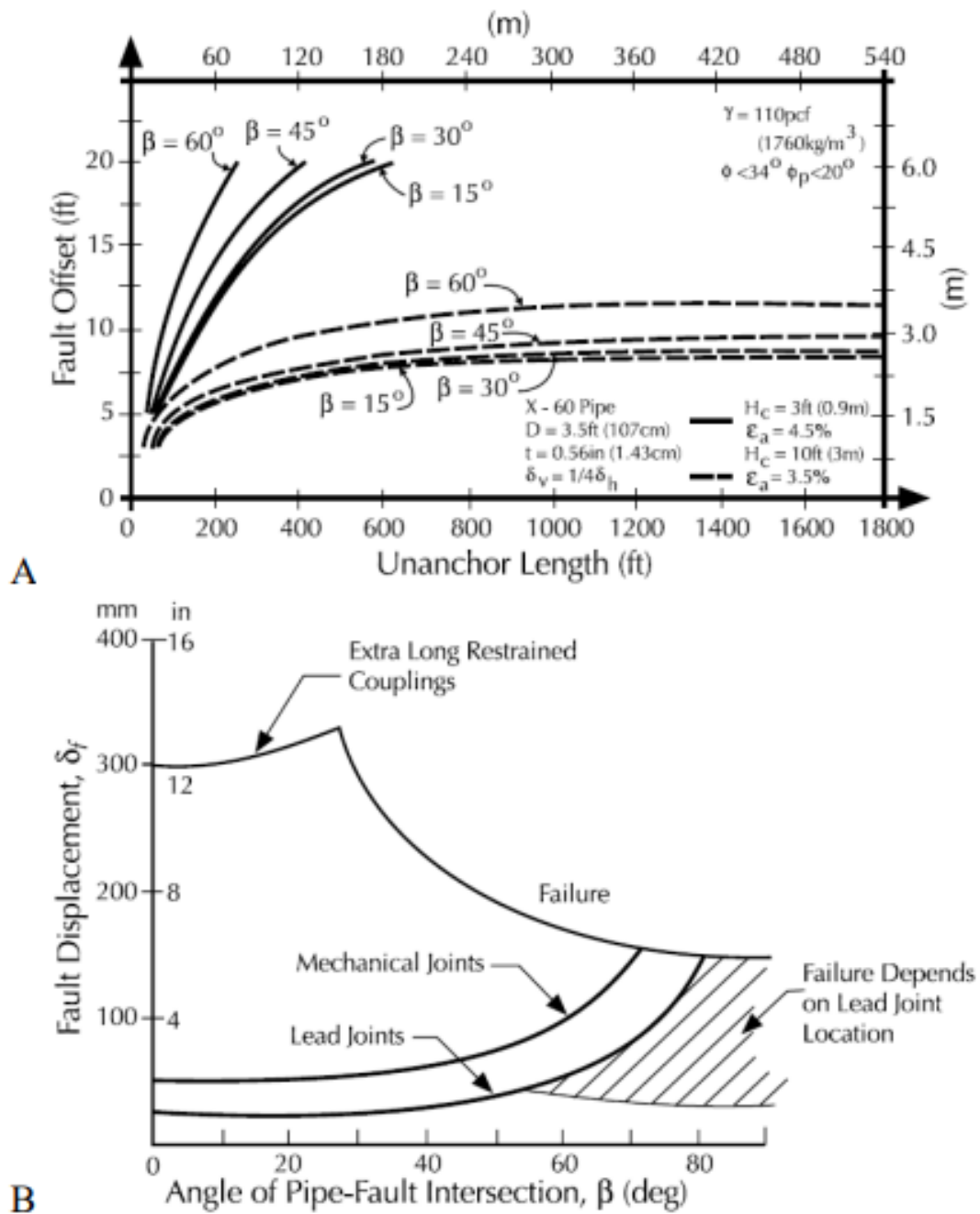
Materijal	Spoj	Tlo	Promjer	K_1	K_2
Sivi lijev	cement	sva tla	≤ DN 300	1,0	1,0
	cement	korozivno	≤ DN 300	1,4	1,0
	cement	nekorozivno	≤ DN 300	0,7	1,0
	gumena brtva	sva tla	≤ DN 300	0,8	0,8
	mehaničke spojnice	sva tla	≤ DN 300	0,7	0,7
Čelik	zavareni preklop	sva tla	≤ DN 300	0,6	0,15
	zavareni preklop	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

2.3.6. M O'Rourke (2003.)

O'Rourke je ustanovio da ne postoji nikakav empirijski odnos između vjerojatnosti oštećenosti cjevovoda i greške u vidu proračuna njegovog pomaka. Uzeo je razvijene analitičke metode koje dovode u odnos naprezanja i pomake ili deformacije cjevovoda koji prelaze rasjede. Uz njih razmatrao je dva uvjeta koja ovise o geometriji cjevovoda na mjestima prijelaza rasjeda, a to su: kombinacija savijanja i aksijalne napetosti, te kombinacija savijanja i aksijalne kompresije.

Za radove prethodnih autora ilustrirao je odnos između fiksnih točaka cjevovoda (mjesto na kojima je cjevovod usidren s obje strane rasjeda) i kuta β koji predstavlja kut između rasjeda i cjevovoda. Taj ilustrirani odnos daje još neke dodatne informacije na temelju materijala i promjera cijevi.

U svojem radu nudi analitički izraz koji stavlja u odnos pomak rasjeda i geometriju križanja rasjeda. Taj izraz razvijen je za cijevi podijeljene na segmente gdje pomak dovodi cijev u stanje napetosti.



Slika 3. A. Dopušteni pomak rasjeda u odnosu na duljinu bez sidra u kontinuiranoj cijevi (O'Rourke 2003.) i B. Dopušteni pomak rasjeda u odnosu na kut presjeka cijevi i rasjeda u cijevi podijeljenoj na segmente (O'Rourke 2003.)

2.3.7. T. O'Rourke i suradnici (2014.)

O'Rourke i suradnici su 2014. godine razvili funkciju ranjivosti koja daje pretpostavljeni broj oštećenja cjevovodne mreže po kilometru (km) mreže. Funkciju su razvili za cjevovode od azbestcementsa ili lijevanog željeza koji su izloženi djelovanju privremenih deformacija tla. Svoju funkciju razvili su na podacima dobivenih iz dva potresa na području Christchurch-a gdje je većina cjevovoda bila izrađena od azbestcementsa, ali i lijevanog željeza, PVC-a⁷, modificiranog PVC-a i drugih materijala. Podaci za podlogu potresa prikazani su u obliku PGV-a sa zabilježenim vrijednostima između 10 i 80 cm/s. Funkcije ranjivosti predstavljene su s jednadžbama:

$$\log_{10}(R_{AC}) = 2,83 * \log_{10}(GMPGV) - 5 \quad (7)$$

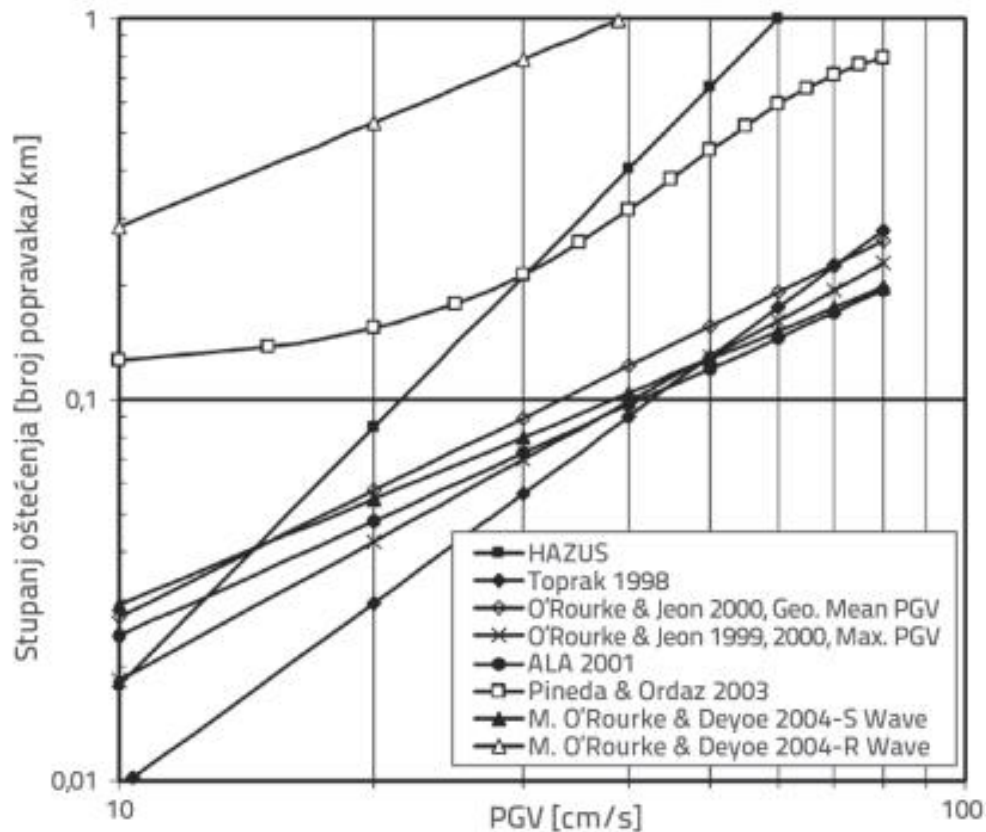
$$\log_{10}(R_{CI}) = 2,38 * \log_{10}(GMPGV) - 4,52 \quad (8)$$

U tim jednadžbama (7) i (8) R_{AC} predstavlja broj oštećenja po kilometru (km) cjevovoda od azbestcementsa, a R_{CI} broj oštećenja po kilometru (km) na cjevovodu od lijevanog željeza. $GMPGV$ je srednja vrijednost od dvije vršne horizontalne brzine tla (PGV) dobivenih iz svih relevantnih seizmičkih mjerenja.

2.3.8. Usporedba funkcija ranjivosti

Prethodne funkcije ranjivosti jedne su od najkorištenijih u svjetskoj praksi. Ovdje će se razmotriti one koje koriste funkcije ranjivosti s obzirom na privremene deformacije tla. Njihova usporedba prikazana je grafičkim prikazom na slici 4. Uspoređuju se na temelju broja oštećenja cjevovodne mreže po kilometru (km) i seizmičkog parametra PGV (cm/s).

⁷ PVC- polivinil klorid ili plastika



Slika 4. Grafički prikaz usporedbe broja oštećenja cjevovodne mreže prema najkorištenijim funkcijama ranjivosti

Iz slike 4. može se zaključiti da najbolje rezultate za utjecaj privremenih deformacija tla na sustav daju funkcije ranjivosti koje za različite vrijednosti PGV-a poprimaju približno slične vrijednosti stupnja oštećenosti.

Funkcije ranjivosti koje previše odskakuju od ostalih su metode Pinede i Ordaza (2003.), O'Rourke i Deyoe (2004. za Rayleighove valove) i Toprak (1998.). Njihovo odstupanje uočljivo je već i kod manjih vrijednosti PGV-a.

3. Procjena broja oštećenja za Grad Petrinju

3.1. Mogućnost primjene izloženih funkcija ranjivosti za slučaj seizmičkog događaja na području Grada Petrinje

Svaka od prethodno prezentiranih funkcija ranjivosti izrađena je na temelju poznatih seizmičkih događaja i poznatih parametara cjevovoda i njegove neposredne okolina. Samim time je svaka od tih funkcija ranjivosti jedinstvena i za primjenu nekih od njih za područje Grada Petrinje potrebno je procijeniti njihovu kompatibilnost.

Problematika s kojom su se susreli autori jest da za promatrano područje nije bilo puno dostupnih informacija. Imali su mali broj adekvatnih informacija povezanih s odabirom kompatibilne funkcije ranjivosti i to u pogledu relativno malog broja analiziranih prethodnih potresa i s njima povezanih oštećenja na vodoopskrbnoj mreži.

Zaključeno je da korelacija između broja nastalih oštećenja cjevovoda i procijenjenih seizmičkih parametara, kao što je Mercalli-Cancani-Siebergova⁸ (MCS) ljestvica, nije dovoljna. To je zaključeno na temelju toga što je intenzitet prema MCS ljestvici subjektivna mjera seizmičkog događaja na subjektivno prosuđenom zahvaćenom području seizmičke pobude tla. Zbog toga su funkcije ranjivosti koje se dovode u korelaciju s MCS ljestvicom zanemarene u promatranom radu.

Nadalje, odabrano je da se PGV uzme kao glavni parametar, preko kojeg će se uzimati u obzir pobuda tla, za kompatibilne funkcije ranjivosti. To je odabrano zato što PGV ima bolji pokazatelj oštećenja cjevovoda u korelaciji s deformacijama tla u odnosu na PGA. Uz to PGV u odnosu na PGA pokazuje bolji odziv tla u funkciji vremena te je zbog toga kompatibilniji za upotrebu u determinističkim modelima.

Od podataka na razini fizikalno-mehaničkih karakteristika cjevovoda poznate su samo materijal, vrsta spoja i promjer cjevovoda. Iz tog razloga metode koje uključuju druge parametre kao što su starost cjevovoda, uvjete tla ili tlačne uvjete neće biti razmatrani.

Uz sve navedeno, Europska komisija u skladu s dokumentima *Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety*

⁸ Mercalli-Cancani_Siebergova ljestvica ili modificirana Mercallijeva ljestvica

Gain preporučuje procjenu oštećenja na naftovodima prema ALA metodi, a procjenu oštećenja vodoopskrbnih cjevovoda prema HAZUS te Honegger-Eguchijevoj metodi.

Sa svime prethodno spomenutim, ustanovljeno je da za promatrano područje najbolje odgovaraju ALA, HAZUS i Honegger-Eguchijeva metoda. Te će se naknadno u ovom radu razmotriti procjene oštećenja na vodoopskrbnu mrežu prema tim metodama.

U sljedećim podcjelinama radi boljeg razumijevanja upotrebe spomenutih metoda dodatno će biti objašnjene zajedno sa funkcijama koje su korištene.

3.2. ALA metoda

ALA metoda ujedno je i modificirana Eguchijeva metoda iz 2001. godine. Spomenutom modifikacijom ALA metoda sastoji se od funkcija ranjivosti koje su razvijene u korelaciji s vršnom brzinom tla, cijevnim materijalom i promjerom cjevovoda, trajnim deformacijama tla i korozivnosti tla.

ALA metoda definirana je sljedećim funkcijama ranjivosti:

$$R_p = K_1 * 0,002416 * PGV \quad (9)$$

$$R_t = K_2 * 2,5831 * PGD^{0,309} \quad (10)$$

U tim funkcijama R_p predstavlja prosječan broj oštećenja po kilometru (km) vodoopskrbne mreže uslijed privremenih deformacija tla, a R_t predstavlja prosječan broj oštećenja po kilometru (km) vodoopskrbne mreže uslijed trajnih deformacija tla. PGV označava vršnu horizontalnu brzinu tla izraženu u cm/s, a PGD označava trajno pomicanje tla nakon seizmičkog događaja izraženu u m. K_1 i K_2 označavaju koeficijente preko kojih se uzimaju u obzir cijevni materijal, korozivnost tla i promjer cjevovoda. Vrijednosti koeficijenata vidljivi su u Tablici 2.

3.3. HAZUS metoda

HAZUS metoda ili O'Rourke i Ayala metoda detaljnije je objašnjena u 2. poglavlju ovog rada, a ovdje će biti objašnjena korištena funkcija ranjivosti sa svojim parametrima.

Ovom metodom daje se procjena oštećenja za vodoopskrbnu mrežu na koju utječu privremene deformacije tla uslijed seizmičkih djelovanja. Funkcija ranjivosti već je prethodno spomenuta u 2. poglavlju pod HAZUS-MH metodom, ali zbog upotrebe samo dijela te metode ovdje će se ponoviti funkcija ranjivosti i njezini parametri korišteni za procjenu oštećenja na području Petrinje.

Funkcija ranjivosti dana je izrazom:

$$R_p = K_3 * 0,0001 * PGV^{2,25} \quad (11)$$

U izrazu (11) R_p predstavlja procijenjeni broj oštećenja cjevovodne mreže po kilometru cjevovodne mreže nastalih uslijed privremenih deformacija tla i izražava se u 1/km. PGV predstavlja vršnu horizontalnu brzinu tla u cm/s, dok K_3 predstavlja koeficijent koji uzima u obzir deformacijska svojstva cijevnog materijala. Za krute cjevovodne materijale kao što su sivi lijev, azbest beton i beton poprima vrijednost 1,0. Dok, za elastične cijevne materijale kao što su nodularni lijev, polivinil-klorid i čelik poprima vrijednost 0,3.

3.4. Honegger-Eguchijava metoda

Honegger-Eguchijava metoda prethodno je detaljnije opisana u 2. poglavlju ovog rada, a ovdje će se samo detaljnije predstaviti funkcija ranjivosti koja se koristila u izradi procjene oštećenja cjevovoda nakon potresa na području Grada Petrinje.

Ova metoda koristi se za procjenu oštećenja cjevovoda nastalih djelovanjem trajnih deformacija tla.

Funkcija ranjivosti dana je izrazom:

$$R_t = K_3 * 7,821 * PGD^{0,56} \quad (12)$$

U izrazu (12) R_t predstavlja procijenjeni broj oštećenja cjevovoda po kilometru cjevovodne mreže nastalih uslijed trajnih deformacija tla i izražava se u 1/km. PGD označava trajno

pomicanje tla nakon potresa u cm, dok se koeficijent K_3 poklapa sa HAZUS metodom koja je prethodno objašnjena.

3.5. Parametri seizmičke pobude za područje Grada Petrinje

Kao podloge za izradu procjene oštećenja na cjevovodnoj mreži uz korištenje odabranih funkcija ranjivosti i navedenih parametara materijala potrebne su i seizmički podaci promatranih seizmičkih događaja.

U radu se promatra utjecaj potresa koji su se dogodili 28. i 29. prosinca 2020. na području grada Petrinje. Podatke o tim seizmičkim događajima i podatke koji su korišteni za izradu ovog rada objavila je seizmička služba Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog Fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Ti podaci prikazani su u tablici 3. Iz tablice je uočljivo da ne postoje podaci zabilježeni točno na području epicentra već su obrađeni podaci s mjernih postaja u Čerkezovcu i Zagrebu. Lokacije mjernih stanica i njihova udaljenost mogu se vidjeti na slici 3., ali i u tablici 3. Potres koji se dogodio 29.12.2020 bio većeg intenziteta od onih koji su mu prethodili tako da će se u ovom radu njegovi parametri uz modifikaciju uzeti kao mjerodavni.

Tablica 3. Podaci seizmičkih mjernih stanica Grada Zagreba s vrijednostima parametara PGA, PGV i PGD na temelju zapisa akceleroograma za seizmički događaj magnitude $M_L=6,2$ od 29. prosinca 2020.

Mjerna stanica	Geo. širina j [°N]	Geo. dužina l [°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 ²]	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	8,490	4,214
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	6,399	2,954
Zagreb 3	45,914	16,103	0,264	57,795	Z	122,490	3,574	0,664
					N	243,165	9,586	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	6,234	2,870
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	7,483	2,508
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



Slika 5. Lokacije mjernih stanica

Bliže epicentru veća je amplituda potresnih valova, te su oni u blizini epicentra razorniji. Samim time što se više udaljavamo od epicentra valovi su manjih amplituda i potres slabije djeluje. Iz razloga izostanka seizmičkih podataka s lokacije bliže epicentru dobiveni seizmički podaci u Zagrebu i u Čerkezovcu morali su se korigirati kako bi što više odgovarali pravim vrijednostima koje su djelovale na cjevovodni sustav.

Tako su uzete najveće vrijednosti PGV, PGA i PGD na svim izmjerenim stanicama Grada Zagreba i parametri PGV i PGD su udvostručeni. Ovo je moguće napraviti na osnovi saznanja mnogih autora da razlika od dva do tri stupnja Rihterove ljestvice odgovara najmanje dvostrukim vrijednostima PGV, PGA i PGD.

Za potrebe izrade svog rada *Procjena oštećenja na vodoopskrbnim mrežama uslijed seizmičkih događaja primjenom funkcija ranjivosti*, autori su procijenjena oštećenja dobili preko najveće izmjerene vrijednosti PGV od 9,6 cm/s, tj. pretpostavljene vrijednosti od 19,2 cm/s i najveće izmjerene vrijednosti PGD od 4,2 cm, tj. pretpostavljenih 8,4 cm.

3.6. Procjena oštećenja na postojećoj vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe Grada Petrinje

Sve prethodno navedeno (u 3. poglavlju) uzeto je u obzir tijekom izrane procjene oštećenja na postojećoj vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje. Podloge koje su uzete u obzir su prethodno navedene najveće izmjerene i pretpostavljene vrijednosti PGV i PGD koje su dobivene na temelju mjernih stanica na području Zagreba.

Uz to uzete su i funkcije ranjivosti prema ALA metodi, HAZUS metodi i Honegger-Eguchijevoj metodi, a navedena oštećenja podijeljena su za različite materijale cjevovoda i njihovu duljinu.

Podaci ispitivanja prikazani su u tablicama 4.-9. Gdje tablice 4., 6. i 8. prikazuju rješenja za najveće izmjerene vrijednosti PGV i PGD, a tablice 5., 7. i 9. prikazuju rješenja za pretpostavljene vrijednosti PGV i PGD.

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 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
Lijeivano željezo – sivi lijev (SL)	21,8	0,8	0,8	0,019	3,266	0	71
Lijeivano željezo – nodularni lijev (NL)	20,0	0,5	0,5	0,012	2,041	0	41
					$\Sigma =$	3	1 130

Tablica 5. 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

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
Lijeveno željezo – sivi lijev (SL)	21,8	0,8	0,8	0,037	3,756	1	82
Lijeveno željezo – nodularni lijev (NL)	20,0	0,5	0,5	0,023	2,347	0	47
					$\Sigma =$	9	1 299

Tablica 6. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed privremenih deformacija tla prema HAZUS 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
			$\Sigma =$	2

Tablica 7. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed privremenih deformacija tla prema HAZUS metodi za procijenjene vrijednosti PGV

Materijal	Duljina [km]	HAZUS (O'Rourke - Ayala)*		
		K_3 [1]	R_p [1/km]	R_p [1]
PEHD	210.5	0.3	0.023	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
			$\Sigma =$	12

Tablica 8. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed trajnih deformacija tla prema Honneger-Eguchijevoj metodi za najveće izmjerene vrijednosti PGD

Materijal	Duljina [km]	Honneger - 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
			$\Sigma =$	2,670

Tablica 9. 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

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
			$\Sigma =$	3,936

U tablicama se uz krajnje količine oštećenja na vodoopskrbnoj mreži navode i vrijednosti koje su uzete u obzir na temelju karakteristika cjevovoda. Tako su za ALA metodu uz odgovarajući materijal cjevovoda navedeni i koeficijenti K_1 i K_2 koji se uzimaju u proračun funkcija ranjivosti, a za HAZUS i Honegger-Eguchijevu metodu naveden je koeficijent K_3 .

Pomoću svih navedenih parametara dobivene su vrijednosti pretpostavljenog broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži po kilometru (km) dužine cjevovoda. Te vrijednosti su za krajnje rješenje pomnožene sa stvarnom duljinom cjevovodne mreže kako bi se dobio konačan pretpostavljeni broj oštećenja na mreži. Za sami kraj sumirane su vrijednosti pretpostavljenog broja oštećenja na vodoopskrbnim mrežama za cjevovode različitih materijala. Time je dobivena pretpostavljena brojčana vrijednost sveukupnog oštećenja od potresa na području Petrinje za svaku od tri navedenih funkcija ranjivosti.

Analiziranjem podataka zaključeno je da se kod ALA metode za procjenu broja oštećenja primjenom pretpostavljenih vrijednosti PGV i PGD, u odnosu na primjenu izmjerenih vrijednosti, imaju manji utjecaj na povećanje ukupnog broja oštećenja cjevovoda. Uz to primjenom pretpostavljenih vrijednosti PGV i PGD dobiva se podjednako povećanje broja oštećenja za cjevovode od krutih i elastičnih materijala. Uporaba pretpostavljenih vrijednosti PGV i PGD u ALA metodi daje 15% veći broj pretpostavljenih oštećenja od onih gdje su upotrebene izmjerene vrijednosti.

Vidljivo je i da je oštećenost mala tijekom privremenih deformacija tla. Ta pojava rezultat je toga da se materijal od kojeg je izgrađena većina mreže proučavanog područja sastoji od cjevovoda koji su izrađeni od materijala koji se u metodi smatraju da su elastični pa samim tome imaju bolja svojstva tijekom privremenih deformacija okolnog tla. Najveći dio promatrane mreže izrađen je od PE⁹ cijevi čija vrijednost K_3 pokazuje trostruko veću seizmičku otpornost od cijevi sivog lijeva ili azbestcementnih cijevi.

Prema Honegger-Eguchi jevoj metodi vidljivo je da su trajne deformacije tla uzrok oštećenja cjevovoda i da su sveukupno u stanju prouzročiti od 2670 oštećenja za konzervativni pristup do 3936 oštećenja za pristup s upotrebom pretpostavljenih seizmičkih parametara. Od toga oko 85-90 % čine oštećenja koja zahtijevaju zemljane radove, a svega 10-15 % oštećenja javljaju se u obliku oštećenja na mreži koja će se moći sanirati izravno, pomoću zasunskih okana ili drugih komora kao što su regulacijska okna, mjerna okna i dr.

ALA metoda daje široku procijenjeni broja oštećenja na cjevovodu. Tako se za pristup gdje su se koristile izmjerene vrijednosti seizmičkih parametara navodi 1100 novonastalih oštećenja nakon promatranog seizmičkog događaja, a tamo gdje su korištene pretpostavljene vrijednosti seizmičkih parametara navodi se 4000 novonastalih oštećenja.

Dakle, proračunom je dobiveno da se prema ALA metodi mogu javiti od 1000 do 4000 oštećenja. Gdje se kao oštećenja promatraju sva oštećenja koja osim puknuća cjevovoda uključuju i diferencijalne pomake na mjestu spojeva, manja puknuća, oštećenja na kućnim priključcima te oštećenja na zasunskim oknima i u njima.

Zaključeno je da se broj oštećenja uzima prema ALA metodi i to u vidu 3800 novonastalih oštećenja na postojećoj vodoopskrbnoj mreži nakon potresa 29. prosinca 2020. godine na području Petrinje. Pretpostavljena brojka novonastalih oštećenja bliža je proračunatoj gornjoj granici zato što su uz sami potres najvećeg intenziteta koji se dogodio 29. prosinca 2020. uzeti u obzir i potresi koji su bili nižeg, ali ne i zanemarivog intenziteta koji su se javili dan prije ili na isti dan glavnog seizmičkog događaja. Spomenuti potresi bili su magnitude 5,0, 4,7 i 4,1.

⁹ PE- polietilen, najčešće korišten plastični materijal na svijetu

Tablica 10. 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
Σ =	3 800		28 074 400

Od 3800 novonastalih oštećenja procjenjuje se da će oko 90% oštećenja trebati sanaciju koja zahtijeva zemljane radove, a da će ostatak moći biti saniran izravnim postupcima. Nadalje, radom je pretpostavljeno da će se oko 40% oštećenja dogoditi na opskrbnim i tranzitnim cjevovodima i pripadnim zasunskim oknima (oko 1520 oštećenja), a da će se oko 60% oštećenja dogoditi na kućnim priključcima (oko 2280 oštećenja).

Kod oštećenja opskrbnih i tranzitnih cjevovoda procjenjuje se da će se 15% oštećenja manifestirati kao manja istjecanja za koje ne postoji ekonomska opravdanost za sanacijom. Kod oštećenosti mreže procjenjuje se da će 10% oštećenja biti na zasunskim oknima, od kojih će 25% oštećenih okana (oko 38) izgubiti svoju funkciju i trebat će novu izgradnju, a 75% oštećenih okana bit će moguće sanirati unutar zasunskog okna.

Navedena oštećenja sistematizirana su u Tablici 10. u kojoj su uz sami broj oštećenja navedeni i troškovi sanacije. Iz prikazane tablice vidljivo je da se nakon potresa 29. prosinca 2020. na području Petrinje oštetila vodoopskrbna mreža, s pretpostavljenih 3800 novih oštećenja za čiju sanaciju se pretpostavlja trošak od 28 milijuna kuna (cca. 3,73 milijuna eura).

Kako je već i ranije spomenuto, dana procjena broja oštećenja i pretpostavljeni troškovi sanacije nakon potresa 28. i 29. prosinca 2020. koji su zadesili Petrinju izrađeni su za pojedinačna točkasta oštećenja vodoopskrbe (opskrbe i tranzitne) mreže uz uporabu prethodno predstavljenih funkcija ranjivosti. Isto tako u proračun nisu uzete u obzir druge građevine vodoopskrbnog sustava koje su oštećene prethodno spomenutim seizmičkim događajima. Isto tako, u proračun nisu uračunati troškovi sanacije ili rekonstrukcije dijelova mreže za koje se zaključilo da trebaju sanaciju naknadnim pregledom ili prethodnim poznavanjem stanja oštećenosti.

4. Zaključak

Sustav vodoopskrbe i odvodnje od iznimne je važnosti za područje grada Petrinje i njene stanovnike. Promatrani sustavi sastoje se od niza elemenata od kojih svaki ima svoju specifičnu funkciju. Ti elementi, pogotovo cijevi, većinski se nalaze ispod zemlje i u izravnom su kontaktu s tlom i time su značajno ugroženi u slučaju potresa.

Seizmički događaji koji su se dogodili 28. i 29. prosinca 2020. na području Petrinje značajno su oštetili sustav vodoopskrbe i odvodnje. Radi boljeg uvida u sveukupnu štetu koju je izazvao taj događaj autori rada *Procjena oštećenja na vodoopskrbnim mrežama uslijed seizmičkih događaja primjenom funkcija ranjivosti* su dali procjenu oštećenja vodoopskrbnih sustava u slučaju seizmičkog događaja primjenom funkcija ranjivosti.

Njihova analiza temeljena je na funkcijama ranjivosti drugih autora koje su prikazane u poglavlju 2. Eliminacijom na temelju modificiranih seizmičkih parametara i fizikalno-mehaničkih karakteristika cjevovoda, uz preporuku Europske komisije autori prethodno spomenutog rada došli su do zaključka da će za procjenu oštećenja koristiti funkcije ranjivosti prema ALA metodi, HAZUS metodi i Honegger-Eguchijevoj metodi. Preko tih metoda i poznavanjem parametara cjevovoda i pretpostavljanjem seizmičkih parametara procijenili su da je za sanaciju pretpostavljenih 3800 novonastalih oštećenja potrebna investicija od 28 milijuna kuna (cca. 3,73 milijuna eura).

Iz navedenog se zaključuje da seizmički događaji značajno oštećuju mreže vodoopskrbe i odvodnje i da bi se njima trebalo posvetiti veća pažnja da do značajnih oštećenja ne dođe.

Značajna oštećenja u budućnosti se mogu izbjeći prikupljanjem podataka o prethodnim seizmičkim događajima i njihovim utjecajem na sustav vodoopskrbe i odvodnje uz poznavanje karakteristika cjevovoda i okolnog tla. Ti podaci doveli bi do boljih i točnijih parametara funkcije ranjivosti, a funkcijom ranjivosti dala bi se točnija procjena oštećenja koja bi dovela do bolje organizacije sanacije ili do prethodno boljeg projektiranja sustava čime bi se smanjila oštećenja nastala na vodoopskrbnoj i kanalizacijskoj mreži uslijed seizmičkih događaja.

Literatura

- [1] Halkijević I., Vouk D., Posavčić H., Mostečak H.: *Procjena oštećenja na vodoopskrbnim mrežama uslijed seizmičkih događaja primjenom funkcija ranjivosti*, Građevinar, (2001.), <https://hrcak.srce.hr/file/380903> , 26.8.2023.
- [2] Keith A. Porter: *Damage and Restoration of Water Supply Systems in an Earthquake Sequence*, Structural Engineering and Structural Mechanics Program 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 , 26.8.2023.
- [3] Vuković Ž.: *Opskrba vodom i odvodnja*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, zavod za hirotehniku, (2013.), <https://dokumen.tips/documents/opskrba-vodom-i-odvodnja-1-m2.html> , 26.8.2023.
- [4] Tromans I.: *Behaviour of buried water supply pipelines in earthquake zones*, Department of Civil and Environmental Engineering Imperial College of Science, Technology and Medicine London, (2004.), https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/california_waterfix/exhibits/docs/dd_jardins/DDJ-152_tromans.pdf , 26.8.2023.
- [5] Toprak S.: *Estimation of Earthquake Damage to Buried Pipelines Caused by Ground Shaking*, Natural Hazards, (2007.), https://www.researchgate.net/publication/226844920_Estimation_of_Earthquake_Damage_to_Buried_Pipelines_Caused_by_Ground_Shaking , 26.8.2023.
- [6] Radonić M.: *Vodovod i kanalizacija u zgradama*, Croatiaknjiga, Zagreb, (2003.), <https://dokumen.tips/documents/m-radonic-vodovod-i-kanalizacija-u-zgradama.html?page=1> , 27.8.2023.