

# Korozijski rizik u ostarjelim vodovodima

---

Pavić, Lana

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:941228>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJE I INŽENJERSTVA MATERIJALA

Lana Pavić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Lana Pavić

Predala je izrađen završni rad dana: 6. rujna 2023.

Povjerenstvo u sastavu:

prof. dr. sc. Sanja Martinez, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Jozefina Katić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Igor Sutlović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Igor Dejanović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred  
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 11. rujna 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJE I INŽENJERSTVA MATERIJALA

Lana Pavić

KOROZIJSKI RIZIK U OSTARJELIM VODOVODIMA

Corrosion risk in aged water mains

ZAVRŠNI RAD

Mentor : prof. dr. sc. Sanja Martinez

Članovi ispitnog povjerenstva : prof. dr. sc. Sanja Martinez

prof. dr. sc. Jozefina Katić

prof. dr. sc. Igor Sutlović

Zagreb, rujan 2023.

## SAŽETAK

Korozijski rizik u ostarjelim vodovodima procjenjuje se kako bi se identificirali mehanizmi, procijenila vjerojatnost, posljedice i ukupni rizik oštećenja sustava. Vodovodni su sustavi ključni u osiguravanju osnovnih ljudskih potreba, te stabilnog i sigurnog pristupa pitkoj vodi. Međutim ostarjela vodovodna infrastruktura susreće se sa mnogim problemima, od kojih je glavni i najveći problem korozija. Postoje mnogi oblici korozije vodovodnih cijevi, svaki sa određenim karakteristikama koji se mogu naći na unutarnjoj ili vanjskoj strani cijevi. Ostarjeli vodovodni sustavi često su konstruirani od materijala i prema standardima koji većinom nisu usklađeni s današnjim zahtjevima i uvjetima okoline što dovodi do veće osjetljivosti na koroziju. Oštećujući vodovodnu infrastrukturu korozija uzrokuje mnoge kvarove ali i zdravstvene probleme kod ljudi. Otpadni metali iz ostarjelih cijevi često uzrokuju umor, glavobolje, mučnine te smanjene kognitivne sposobnosti. Zbog sporije obnove vodovodne infrastrukture Amerika se susreće sa problemom olova u vodi, što ponajviše utječe na zdravlje djece. Stare materijale kao što su lijevano željezo, pocinčani čelik i polibutilen zamijenili su moderniji i otporniji materijali poput bakra, PEX-a i PVC-a. Koristeći se različitim metodama zaštite cijevi od korozije povećava se otpornost na koroziju, a time i životni vijek vodovodnih sustava. Najprimjenjivnije metode zaštite su zaštitni premazi i katodna zaštita, iako ni jedna od metoda ne garantira stopostotnu zaštitu. Zamjena ostarjele vodovodne infrastrukture izvodi se najčešće metodom otvorenog rova, no razvojem novih tehnika omogućena je i zamjena tehnologijom bez iskopa. Zahvaljujući novim metodama rješenja problema korozije u ostarjelim vodovodnim sustavima sve se više pažnje predaje što manjem oštećenju okoliša i životnog okruženja ljudi.

**Ključne riječi :** ostarjeli vodovodi, cijevi, korozija, materijali, zaštita

## SUMMARY

Corrosion risk in aged water mains is assessed to identify mechanisms, assess probability, consequences and overall risk of system damage. Water systems are crucial in ensuring basic human needs and stable and safe access to drinking water. However, the aging water infrastructure faces many problems, the main and biggest of which is corrosion. There are many forms of water pipe corrosion, each with specific characteristics that can be found on the inside or outside of the pipe. Old plumbing systems are often constructed from materials and according to standards that are mostly not aligned with today's requirements and environmental conditions, which leads to greater susceptibility to corrosion. By damaging the water supply infrastructure, corrosion causes many malfunctions as well as health problems for people. Waste metals from aged pipes often cause fatigue, headaches, nausea and reduced cognitive abilities. Due to the slower restoration of the water infrastructure, America faces the problem of lead in water, which affects children's health the most. Old materials such as cast iron, galvanized steel and polybutylene have been replaced by more modern and resistant materials such as copper, PEX and PVC. By using different methods of protecting pipes from corrosion, resistance to corrosion increases, and increases the life span of plumbing systems. The most applicable protection methods are protective coatings and cathodic protection, although none of the methods guarantee 100% protection. The replacement of aging water infrastructure is most often carried out using the open trench method, but with the development of new techniques, it is also possible to replace it with technology without excavation. Thanks to new methods of solving the problem of corrosion in aging water systems, more and more attention is being paid to the least possible damage to the environment and people's living environment.

**Keywords:** aged water pipes, pipes, corrosion, materials, protection

## SADRŽAJ

UVOD .....	1
1. UTJECAJ KOROZIJE NA VODOVODNE SUSTAVE .....	2
1.1. Korozijski proces i njegovi uzročnici.....	2
1.2. Znakovi korozije .....	3
2. OBLICI KOROZIJE KARAKTERISTIČNI ZA VODOVODNE SUSTAVE .....	4
2.1. Jednolika korozija .....	4
2.2. Jamičasta korozija.....	4
2.3. Galvanska korozija .....	5
2.4. Korozija u pukotinama .....	6
2.5. Korozija pod mikrobiološkim utjecajem .....	6
3. MATERIJALI CIJEVI VODOVODA .....	8
3.1. Loši učinci olovnih cijevi .....	8
4. OSTARJELI VODOVODI .....	10
4.1. Zastarjeli materijali cijevi .....	10
4.2. Najčešći problemi vezani za ostarjele cijevi .....	11
5. METODE ZAŠTITE VODOVODA OD KOROZIJE .....	13
6. PROCJENA KOROZIJSKOG RIZIKA .....	15
6.1. Opći postupak procjene rizika u ostarjelom vodoopskrbnom sustavu .....	18
6.2. Strategije za smanjenje rizika od korozije .....	20
6.3. Matrica procjene rizika .....	21
7. RJEŠENJA PROBLEMA KOROZIJE OSTARJELIH VODOVODA .....	22
7.1. Cijevi u kućanstvu .....	22
7.2. Vodovodne mreže gradova .....	22
8. ZAKLJUČAK .....	25
LITERATURA.....	26

*Želim se zahvaliti prof. dr. sc. Sanji Martinez na prihvaćenom mentorstvu i ukazanom povjerenju, te na korisnim savjetima i predloženoj literaturi za pisanje ovog završnog rada.*

*Također se želim zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima na podršci i motivaciji tijekom cijelokupnog školovanja.*



## UVOD

Korozija je prirodno pretvaranje metala u stabilniji oblik kao što je njegovo oksidno, hidroksidno ili sulfidno stanje, što dovodi do propadanja materijala. Korozijsko djelovanje ima direktan i indirektan utjecaj na svakodnevni život. Direktan utjecaj je vidljiv skraćivanjem životnog vijeka razne imovine dok se indirektan utjecaj uočava na troškovima koje trpe proizvođači i dobavljači prenoseći ih na potrošače.

Korozija je također glavni uzrok propadanja vodovodnih sustava diljem svijeta. Vodovodni sustavi ključni su u osiguravanju osnovnih potreba ljudi, pružajući stabilan i siguran pristup pitkoj vodi. Međutim, vodovodni sustavi diljem svijeta suočavaju se s izazovom starenja infrastrukture, što može dovesti do brojnih problema, a jedan od najznačajnijih među njima je korozija. Posljedično postaje sve važnije istraživati i razumjeti kako starost utječe na koroziju cijevi i kako se nositi sa mogućim rizicima. Stariji vodovodni sustavi često su izgrađeni s materijalima i standardima koji nisu u potpunosti usklađeni s modernim zahtjevima i uvjetima okoline što može dovesti do veće osjetljivosti na koroziju. Korozijska oštećenja vodovodnih cijevi mogu rezultirati smanjenjem kvalitete vode koja dolazi do potrošača, stoga je razumijevanje i upravljanje korozijskim rizikom u ostarjelim vodovodima od presudne važnosti za očuvanje pouzdanosti i funkcionalnosti vodovodnih sustava te zdravlja korisnika.

Iako se korozija vodovodnih cijevi u potpunosti ne može spriječiti, postoje metode zaštite koje mogu usporiti proces ili ga na neki način izbjeći. Međutim, niti jedna metoda zaštite ne može vječno štiti vodovode od korozijskog utjecaja. Zato se provode periodične inspekcije sustava kojima se mogu detektirati potencijalna oštećenja i koje omogućuju pravovremeno saniranje.

U ovom završnom radu opisivati će korozijski rizik ostarjelih vodovodnih sustava, oblici korozije te faktori koji doprinose koroziji vodovodnih sustava. Također biti će spomenute i tehnike zaštite i metode inspekcije koje se provode za učinkovitiju detekciju oštećenja.

## 1. UTJECAJ KOROZIJE NA VODOVODNE SUSTAVE

Korozija vodovoda javlja se prirodno, zbog postupnog i kontinuiranog utjecaja okoliša na materijale cijevi. Može se odvijati na unutarnjim i vanjskim površinama cijevi [1]. Utjecaj korozije moguć je na metalnim i nemetalnim cijevima, spojevima cijevi, zavarima i površinskim premazima. Do korozije dolazi i kod nemetala, poput keramike ili polimera. Korozija mijenja strukturu, svojstva i kemijski sastav materijala. Na primjer, korodirana cijev gubi bitna svojstva, kao što su mehanička čvrstoća i propusnost za tekućine odnosno vodu. To se svakodnevno zapaža u zahrđalim cijevima i drugim strukturama. Korozija drastično smanjuje vijek trajanja vodovoda, što rezultira velikim financijskim troškovima popravka i zamjene. Uvjeti okoliša koji utječu na nju su kemijski sastav tla (u slučaju ukopanih cijevi), vlažnost okoline, blizina slane vode, turbulencija, brzina i tlak, vrsta transportirane tekućine i djelovanje lutajuće struje, ako postoji.[2]

### 1.1. Korozijski proces i njegovi uzročnici

U većini slučajeva, korozija kao elektrokemijska reakcija počinje s agensom iz okoliša koji na korodirajućem materijalu uzrokuje nastanak anode i katode. Korozijski članak nastaje pojavom elektrolize u prisutnosti elektrolita, zbog nastanka tzv. kisikove ćelije ili galvanskim djelovanjem, u slučaju kontakta različitih metala. Kada se to dogodi, metal u cijevi zapravo gubi elektrone. Oni se prenose s metala na oksidativnu tvar unutar elektrolita. Nastavkom procesa, metal se dalje razgrađuje i to uzrokuje hrđu, curenje i začepljenja.[3]

Korozija vodovoda može biti uzrokovana:

1. Kiselom vodom - voda s niskim pH (<7) može otopiti cijevi iznutra prema van, to je uobičajenih uzrok korozije bakrenih cijevi
2. Vodom bogatom kisikom - može ubrzati oksidaciju i uzrokovati hrđanje metalnih cijevi, s vremenom može dovesti do začepljenja
3. Tvrdom vodom - voda s visokim sadržajem minerala može uzrokovati kalcifikaciju, što može dovesti do nakupljanja minerala i korozije na mjestu nakupljanja

4. Metalima u vodi - voda s određenim metalima u sebi može privlačiti elektrone iz metalnih cjevovoda, uzrokujući koroziju
5. Strujom - neuzemljena električna struja može putovati duž konstrukcije i uzrokovati koroziju
6. Velikim brzinama protjecanja - kada voda kroz cijevi putuje velikim brzinama, osobito topla voda može uzrokovati preuranjenu koroziju[4]

## 1.2. Znakovi korozije

Znakovi korozije na cijevima vodovoda mogu varirati ovisno o tipu korozije, stupnju oštećenja i materijalu cijevi. Mogu se odrediti vizualno, okusom, mirisom ili testiranjem kakvoće vode.[5]

Neki od uobičajenih znakova:

1. Slabiji tlak vode - kada su cijevi korodirane, stvore se naslage na unutrašnjosti pa protok vode može biti ograničen, što rezultira slabijim tlakom vode kod korisnika
2. Talog u vodi - korozija uzrokuje otpuštanje metala iz cijevi u vodu što dovodi do pojave taloga koji može biti obojen i utjecati na kvalitetu i čistoću vode[6]
3. Promjena boje - ako voda ima smeđu ili crvenu nijansu, to je znak da su cijevi zahrđale ili korodirale
4. Miris - voda ispušta neugodan ili smrdljiv miris
5. Okus - voda ima čudan metalni okus jer će uzeti previše minerala, što uzrokuje neugodan okus
6. Česta začepjenja - kada cijev korodira, krhotine naslaga se počinju nakupljati u cijevima, što može biti razlog začepjenja[7]

## 2. OBLICI KOROZIJE KARAKTERISTIČNI ZA VODOVODNE SUSTAVE

Vodovodne sustave zahvaćaju brojni oblici korozije, no neki od najčešćih su: jednolika korozija, jamičasta korozija, galvanska korozija, korozija u pukotinama i korozija pod mikrobiološkim utjecajem.[1]

### 2.1. Jednolika korozija

Jednolika korozija prikazana na slici 1, poznata kao opća korozija, uzrokuje stanjivanje stijenka cijevi i javlja se u obliku jednolikog sloja hrđe. Najčešći je tip korozije te se ravnomjerno širi preko izloženih površina. Taj je oblik korozije u praksi najbezopasniji jer je lako uočljiv što ga čini lakim za detektirati i pratiti.[9]



Slika 1. Primjer jednolike korozije cijevi[10]

### 2.2. Jamičasta korozija

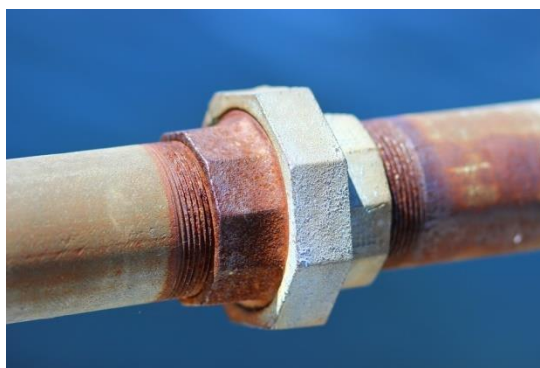
Jamičasta (eng. pitting) korozija prikazana na slici 2, lokalizirana je na malim područjima popuštanja pasivnog filma pod utjecajem agresivnih aniona, najčešće klorida, u vodenim otopinama. Javlja se duž površina gdje postoje abrazije ili inkluzije u osnovnom materijalu, ili kada površina nije pravilno tretirana da izdrži utjecaje okoliša. Događa se vrlo brzo i predstavlja jedan od najopasnijih oblika korozije.[9]



Slika 2. Primjer jamičaste korozije cijevi[12]

### 2.3. Galvanska korozija

Galvanska korozija prikazana na slici 3, naziva se i bimetalna korozija, javlja se kada postoji spoj između dva metalna vodiča ili poluvodiča s kontrastnim elektrokemijskim potencijalima izloženi elektrolitičkoj tekućini. Razlika u potencijalu pokretačka je sila za galvansku koroziju jer struja teče kroz elektrolit prema plemenitijem metalu, dok je manje plemeniti ili aktivni metal podvrgnut galvanskoj koroziji.[9]



Slika 3. Primjer galvanske korozije cijevi[6]

## 2.4. Korozija u pukotinama

Korozija u pukotinama prikazana na slici 4, lokalizirana je korozija koje se javlja na ili neposredno uz spoj. Razmak ili pukotina između spojenog materijala djeluje kao elektrokemijska koncentracijska ćelija. Kloridi se koncentriraju u pukotini te ona postaje osiromašena kisikom i pokazuje niži pH, postajući anoda elektrokemijske reakcije. Sastav materijala, geometrija pukotine i uvjeti okoline važni su čimbenici koji utječu na tu vrstu korozije.[9]



Slika 4. Primjer pukotinske korozije cijevi[8]

## 2.5. Korozija pod mikrobiološkim utjecajem

Korozija pod mikrobiološkim utjecajem (MIC) prikazana na slici 5, uzrokovana je aerobnim ili anaerobnim bakterijama koje dovedu do ubrzanih stopa korozije. Bakterije koje reduciraju sulfate (SRB) uobičajene su anaerobne bakterije koje su odgovorne za većinu slučajeva ubrzane korozije.[9] Te bakterije uzrokuju koroziju na unutrašnjoj strani cijevi.[13]



Slika 5. Primjer korozije cijevi pod mikrobiološkim utjecajem[14]

### 3. MATERIJALI CIJEVI VODOVODA

Vodovodne cijevi obično se izrađuju od čelika, bakra, polivinil klorida (PVC), kloriranog polivinil klorida (CPVC) ili umreženog polietilena (PEX).

Pocinčana čelična cijev, često korištena u starijim kućama, je čelik koji je prevučen cinkovom prevlakom. Zbog rada koji je povezan s rezanjem, narezivanjem navoja i ugradnjom cijevi, sada se ne koristi često. Međutim, još uvijek se može vidjeti u komercijalnim aplikacijama. Općenito, ove cijevi imaju radni vijek od 40 do 50 godina.

Bakrene cijevi koriste se za distribuciju tople i hladne vode u nadzemnim i podzemnim vodovodima. Na bakar mogu utjecati neka tla, pa se za upotrebu ispod zemlje oko njih postavlja zaštitni omotač. Bakreni cjevovod često traje i do 50 godina, ali se starenjem stanjuje, što dovodi do curenja. Zbog povećane cijene bakra i potrebnog dodatnog rada, PEX je uobičajena alternativa koja je danas sve više u upotrebi.

PEX je otporan na visoke i niske temperature, tako da se koristi za vodovode koji prenose toplu i hladnu vodu. Otporniji je od bakra, s vijekom trajanja od 50 godina. Međutim, neke PEX marke utječu na kvalitetu vode, pa čak i cijevi koje prođu testove sigurnosti mogu otpuštati dovoljno kontaminanata koji utječu na okus i miris vode. Do danas je pronađeno više od 150 kontaminanata u vodi koja je tekla kroz PEX cijevi.[15]

PVC je vrsta plastične cijevi koja je široko primjenjiva u vodovodima. Obično se koristi samo za cijevi za hladnu vodu, jer toplina može uzrokovati topljenje plastike. Za vodove tople vode može se koristiti CPVC. PVC i CPVC obično traju 50 do 75 godina, uz mogućnost kvarova.[6]

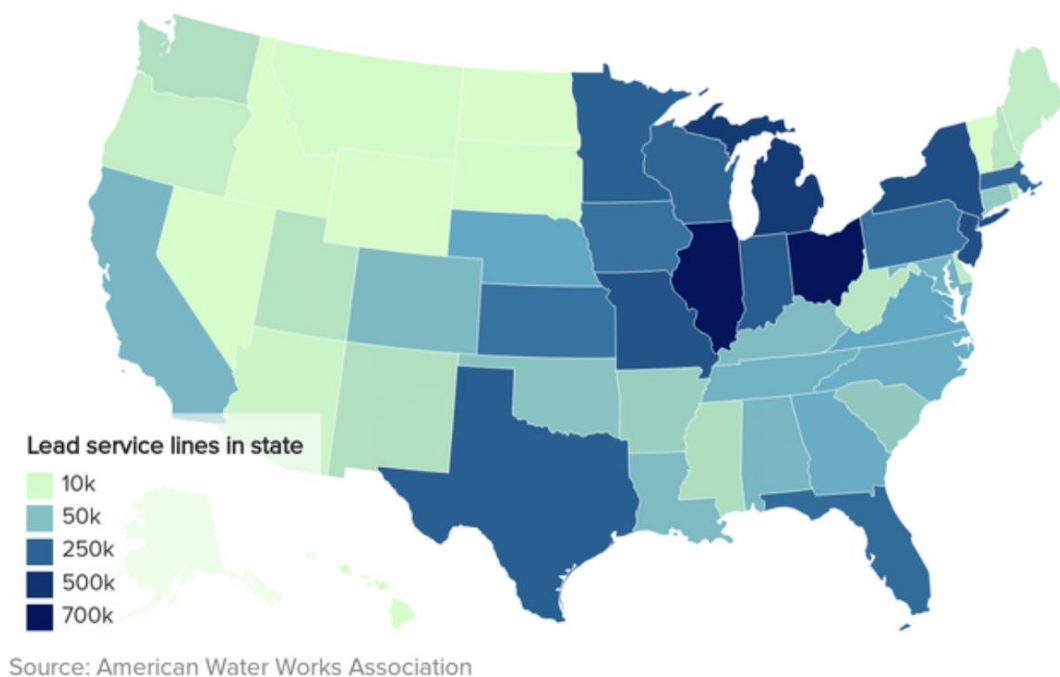
#### 3.1. Loši učinci olovnih cijevi

Olovo može ući u pitku vodu korozijom materijala za vodovod koji sadrže olovo. Ta je reakcija značajnija kada voda ima visoku kiselost ili nizak sadržaj minerala. Olovo se ne možete vidjeti, okusiti ili namirisati u vodi za piće.[16]



Olovne cijevi veliki su problem u SAD-u (slika 6) i donekle u Europi. 2004. godine The Washington Post izvijestio je da su 274 vodovodna poduzeća koja opslužuju 11,5 milijuna potrošača premašila važeći standard Agencije za zaštitu okoliša u prethodne četiri godine i da nekoliko gradova (uključujući Boston, New York i Philadelphiju) nije u skladu sa zahtjevima EPA-e (United States Environmental Protection Agency) za izvješćivanje. Od tada se zamjena olovnih cijevi ubrzala, ali problem nije nestao. Problem je u tome što ne postoji sigurna razina olova za malu djecu. U Washingtonu DC u 90-ima izloženost je bila povezana s 37-postotnim povećanjem smrti fetusa i stotinama slučajeva povišene razine olova u krvi kod male djece. Također je utvrđeno da olovo uzrokuje prosječno smanjenje IQ-a za 4 boda.

U Europi je većina javne vodovodne infrastrukture koja sadrži olovo u potpunosti zamijenjena, ali stare zgrade u Ujedinjenom Kraljevstvu, još uvijek mogu sadržavati olovne cijevi.[5]

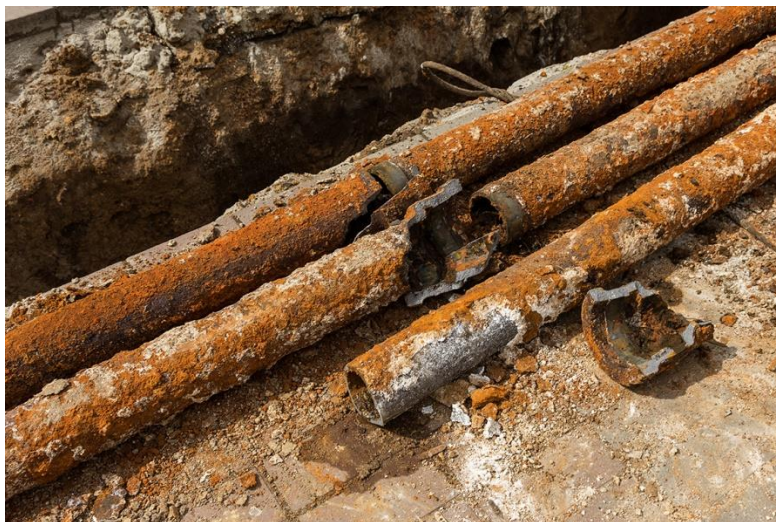


Slika 6. Prikaz broja olovnih vodovodnih cijevi 2018. godine u Americi[17]

## 4. OSTARJELI VODOVODI

Osim što uzrokuje istjecanje dragocjenog resursa (vode), korozija može oštetiti vrijednu imovinu poput armature i cjevovoda, uzrokovati prekid opskrbe vodom i predstavljati opasnost za zdravlje zbog kontaminacije.[18]

Jedan od glavnih razloga propadanja ostarjelih vodovoda su materijali od kojih su izrađeni (slika 7). Cijevi koje su stavljene prije 1980-ih obično su izrađene od čelika ili pocinčanog čelika, a ti materijali s vremenom propadaju. Moderni vodovi za vodu izrađeni su od bakra, koji je otporan na koroziju i vjerojatnije je da će trajati.[19]



Slika 7. Ostarjele vodovodne cijevi[20]

### 4.1. Zastarjeli materijali cijevi

Lijevano željezo najstarija je vrsta materijala koja se koristila za izradu cijevi vodovoda. Bilo je uobičajeno sve do 1960-ih. Vrlo ga je važno zamijeniti jer je velika vjerojatnost da već korodira i ostavlja toksine (kao što je olovo) u vodi.

Pocinčani čelik postao je glavni materijal za izradu cijevi, kako se željezo postupno ukidalo. Čelik se umače u talinu cinka kako bi se izbjegla korozija. Problem nije prevlaka cinka, već olovo i kadmij, dva teška metala koji mogu postojati u prevlaci zbog procesa galvanizacije. Oba su metala nezdrava, a olovo predstavlja posebnu opasnost za malu djecu.[21] Nakon pedeset godina, čelične cijevi počinju korodirati te se sve više metala ispušta u vodu pa ih treba zamijeniti.

Uobičajeni tip plastičnih cijevi koji se koristio tijekom 1980-ih bio je polibutilen. Polibutilen ima tendenciju pucanja pod utjecajem topline, a 1990-ih njegova je uporaba zaustavljena. To je vrsta plastike koju je lako prepoznati jer je tamno sive boje.[22]

#### 4.2. Najčešći problemi vezani za ostarjele cijevi

Korozija - vremenom metalne cijevi mogu korodirati zbog izloženosti kisiku i drugim elementima u zraku ili vodi, to može dovesti do curenja i/ili smanjenja brzine protoka vode kroz cijev, što dovodi do nižeg tlaka vode u instalacijama i uređajima u kućanstvima. Znakovi korozije uključuju promjenu boje na zidovima ili podovima u blizini starih vodovodova, kao i talog boje hrđe koji izlazi kada se otvore slavine.[23]

Sniženi tlak vode - prirodni cink koji se koristi u izradi pocinčanih cijevi, sadrži brojne nečistoće poput olova i željeza. Tijekom desetljeća korištenja, voda koja prolazi kroz cijevi može polako nagrizati stijenke te se naslage željeza i drugih minerala odvajaju od unutrašnjosti cinka i nakupljaju u vodi. Željezo čak može početi hrđati unutar cijevi. Metalni se talog i hrđa počnu nakupljati i taložiti duž stijenki cijevi i time ograničavaju cijelu liniju protoka vode, rezultat toga je smanjeni pritisak vode u kućanstvu. Ako se ne kontrolira može uzrokovati puknuće glavnog vodovoda.

Tvrdoća vode – isti sediment koji uzrokuje sniženje tlaka vode uzrokuje i promjene u tvrdoći vode koja negativno utječe na sve aparate u kućanstvu koji koriste vodu za rad (perilica posuđa, perilica rublja, tuševi i umivaonici). Tvrda voda može uzrokovati korodiranje žrtvene anode brže nego inače, što dovodi do preranog kvara grijača vode na određenim aparatima.

Loš učinak na zdravlje – umor, glavobolje, mučnina, smanjene kognitivne sposobnosti, neki su od simptoma trovanja olovom do kojeg dolazi konzumiranjem vode iz pocinčanih cijevi u kojima je došlo do oslobađanja olova.[24]

## 5. METODE ZAŠTITE VODOVODA OD KOROZIJE

Različiti čimbenici utječu na početak i brzinu korozije vodovodnih sustava. Ovisno o okolišu u kojem se cijevi nalaze ta korozija može zahvatiti vanjsku ili unutrašnju stranu cijevi. Iako ni jedna metoda zaštite nije stopostotnog učinka, može na neki način povećati otpornost cijevi na koroziju.[25]

Neke od najčešćih metoda zaštite su:

1. Čišćenje cjevovoda prije postavljanja – pomoću otopine za čišćenje
2. Održavanje pH razine vode – održavanje na  $\text{pH}=7$
3. Dodatak klora u vodu – klor dodan u vodovode djeluje kao dezinficijens te pomaže ubijanju bakterija koje uzrokuju koroziju
4. Korištenje fosfata – djeluju kao inhibitori korozije i sprječava ispiranje metala iz bakrenih i olovnih cijevi stvarajući netopljivi zaštitni sloj na unutarnjoj stijenci
5. Oblaganje i premazivanje metalnih površina – najčešće korišteni materijali za obloge i premaze su : poliurea, cementni mort, fuzijski epoksid (FBE), emajl ili bitumen od ugljenog katrana, tekući epoksid i poliuretanska obloga/premaz[26]
6. Eliminacija galvanske korozije – izolacija metala i prekid električne veze, odabir materijala s bliskim korozijskim potencijalom, oba metala bi trebala biti premazana kako bi se izbjegla korozija[25]
7. Katodna zaštita (slika 8) - ostvaruje se vanjskim izvorima struje koja se injektira na površinu metala u svrhu izazivanja katodne reakcije uspostavljajući zaštitni potencijal prema okolnom mediju[27]



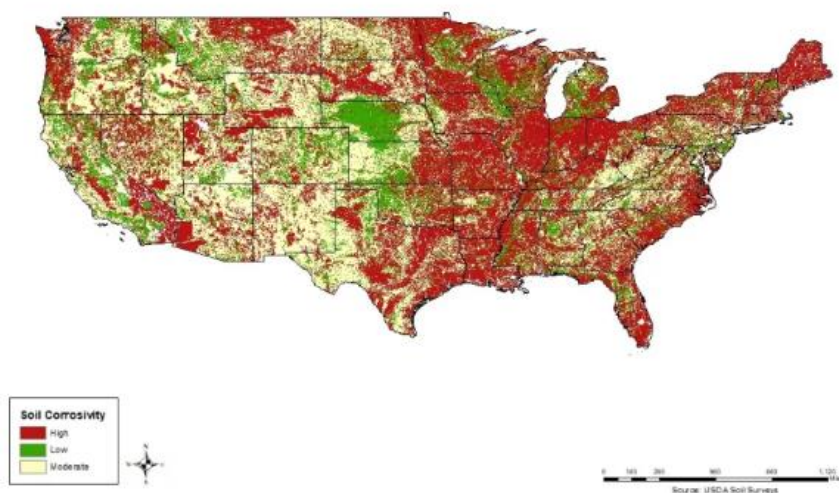
Slika 8. Prikaz katodne zaštite[28]

## 6. PROCJENA KOROZIJSKOG RIZIKA

Procjena korozivnog rizika ključna je aktivnost koja omogućava identifikaciju, analizu i upravljanje potencijalnim prijetnjama korozije. Cilj procjene je razumjeti okolnosti i uvjete pod kojima će se materijali ili strukture izložiti koroziji te odrediti vjerojatnost i ozbiljnost mogućih korozivnih događaja. Proces procjene obuhvaća multidisciplinarni pristup koji uključuje znanja iz raznih područja znanosti kao i inženjerska znanja.[29]

Procjena se sastoji od 3 faze:

1. Faza prethodne procjene - uključuje proučavanje tipova tla u zahvaćenom području, te govori o vjerojatnoj razini i varijacijama u korozivnosti tla koja može utjecati i ubrzati vanjsku ili unutarnju koroziju. Primjer karte korozivnosti tla prikazan je na slici 9.



Slika 9. Primjer karte korozivnosti tla[28]

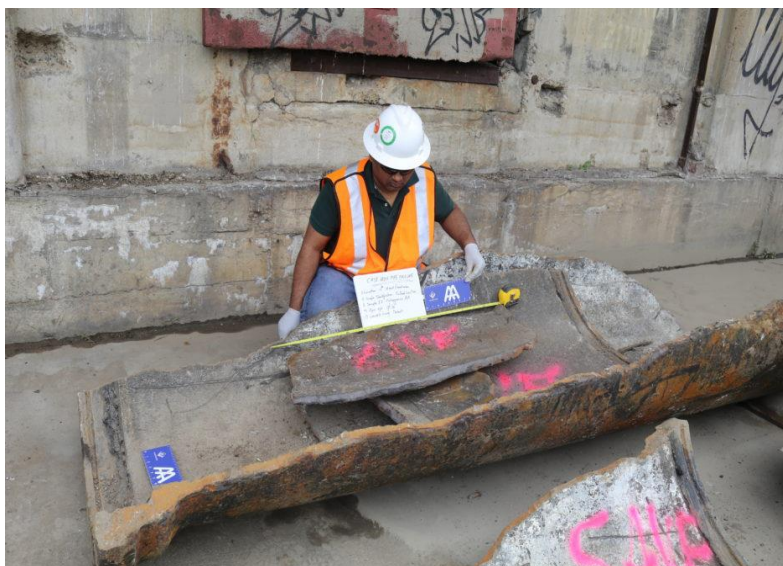
2. Faza neizravne procjene – uključuje pregled i izvješća o kvarovima te prethodnu procjenu a sastoji se od uzimanje uzoraka tla u područjima s većom koncentracijom perforacija cjevovoda, kemijske analiza tla te mjerenja elektrokemijskog potencijala (slika 10) u područjima s većom i nižom koncentracijom perforacija vodovoda



Slika 10. Mjerenje elektrokemijskog potencijala[28]

3. Faza izravne procjene - uključuje procjenu stanja vodovoda ispitivanjem na licu mjesta (slika 11), a sastoji se od izravnog vizualnog promatranja stanja cijevi, s glavnim ciljem utvrđivanja jesu li primarni gubici korozije unutarnji (vodena strana) ili vanjski, fizičkih mjerenja uključujući debljinu stjenke i dubinu jamica, te mjerenja razine grafitizacije (slika 12), što je u osnovi propadanje mikrostrukture lijevanog željeza povezano s korozijom koje ozbiljno slabi cijevi.[27]



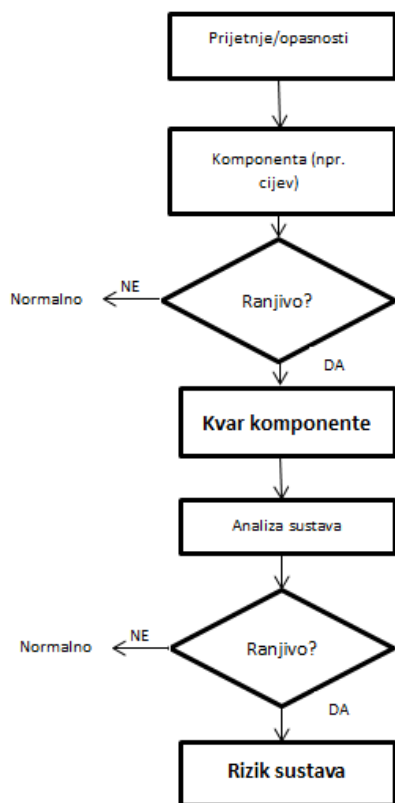


Slika 11. Primjer mjerenja za 3. fazu procjene[27]



Slika 12. Provedba mjerenja grafitizacije[28]

## 6.1. Opći postupak procjene rizika u ostarjelom vodoopskrbnom sustavu



Slika 13. Dijagram općeg postupka procjene korozijskog rizika u ostarjelim vodovodima[29]

Na slici 13 prikazan je Dijagram općeg postupka procjene korozijskog rizika u ostarjelim vodovodima.

Rizici unutar vodoopskrbnog sustava uglavnom se odnose na kvalitetu i/ili količinu vode. Potencijalni faktori koji mogu uzrokovati ove rizike općenito su povezani sa složenim unutarnjim i vanjskim aktivnostima tijekom procesa isporuke vode od izvora do kupaca. Učinkovita procjena rizika stoga zahtijeva razmatranje karakteristika potencijalnih opasnosti i prijetnji, razine rizika komponenti i sveobuhvatno razumijevanje uzročno-posljedičnog odnosa za određeni rizik u sustavu.

Prijetnje i opasnosti:

Prijetnja ili opasnost (eng. threats and hazards) znači rijedak ili ekstreman događaj u prirodnom ili umjetnom smislu, te okoliš koji ima negativne učinke na inženjerske sustave, pa čak i na ljudski život. Kod prepoznavanja opasnosti treba odgovoriti na dva pitanja: ŠTO predstavlja opasnost i TKO je izložen opasnosti. S pojavom više ljudskih utjecaja na infrastrukturu, ljudske aktivnosti sve su više isticane kako bi se dale sveobuhvatnije ocjene rizika. Međutim, u vodoopskrbnim sustavima prijetnje/opasnosti ne moraju nužno biti rijetke ili događaji ekstremnog tipa. Rizik može biti visok čak i ako je opasnost umjerena zbog velike ranjivosti komponenata ili sustava. Također je definiran u matematičkom smislu da znači vjerojatnost pojave puta posljedica.

Ranjivost :

Ranjivost (eng. vulnerability) je definirana kao svojstvo povezano s komponentom, podsustavom ili cjelokupnim vodoopskrbnim sustavom i predstavlja mogućnost utjecaja opasnosti/prijetnji s danim vjerojatnostima i ozbiljnostima. Ovo svojstvo je određeno uvjetima komponente, podsustava ili cjelokupnog vodoopskrbnog sustava, te se mijenja s vremenom i promjenom opasnosti/prijetnji. Analiza ranjivosti je definirana kao jednostavna procjena gdje je izloženost najveća, a kontrola pristupa najslabija.

Kako bi se procijenilo trenutno stanje cijevi u sustavima distribucije vode koristi se hijerarhijski model za procjenu ranjivosti cijevi. Sastoji se od dvije skupine pokazatelja propadanja vodovodne cijevi, tj. fizičkih i ekoloških pokazatelja. Kao fizički pokazatelji razmatraju se osnovna svojstva cijevi, koji uključuju starost, promjer i materijal, a kao čimbenici okoliša, okolno stanje, stanje tla i opterećenje ceste.

Rizik:

Iako svaki inženjerski sustav uvijek uključuje element rizika, definicije rizika jesu malo drugačije u različitim sustavima. Uobičajeni trend je slijediti Lawrenceovu definiciju rizika definirajući ga kao mjeru vjerojatnosti i ozbiljnosti negativnih štetnih učinaka, što prihvaća i ISO. Ova mjera rizika stoga predstavlja kumulativne učinke učestalost i ozbiljnost opasnosti/prijetnje. Predstavlja se kao :

$$\text{Rizik} = \text{Vjerojatnost} \times \text{Ozbiljnost}$$

Vjerojatnost je šansa da će se neki događaj dogoditi, te se procjenjuje pomoću skale od 0 do 1, gde 0 označava da nema šanse da se neki događaj dogodi, a 1 da će se sigurno dogoditi.[35]

Gornja definicija rizika uzima u obzir samo utjecaje prijetnji ili opasnosti. No, prema postupku procjene rizika (Slika 13), ranjivosti imovine također igraju važnu ulogu u uvođenju rizika u vodoopskrbni sustav. Stoga se modificirana definicija rizika formira kao:

$$\text{Rizik} = (\text{Vjerojatnost} \times \text{ozbiljnost}) \times \text{ranjivost}$$

Vjerojatnost i ozbiljnost (eng. likelihood and severity) predstavljaju karakteristike opasnosti ili prijetnje, a ranjivost predstavlja svojstvo imovine koja je pod utjecajem opasnosti ili prijetnje.[29]

Za istu vjerojatnost pojave određene vrste korozije, rizik može varirati ovisno o opsegu posljedica kvara. To ovisi o mediju procesa kojom se rukuje, veličini posude, obujmu zadržavanja, debljini posude, tlaku medija itd. Sukladno tome, ocjena rizika također varira od "niskog" do "visokog". Relativno više pozornosti, u smislu pregleda i zaštite, tada se može usmjeriti prema komponenti većeg rizika. Primjerice, iako postoji velika vjerojatnost da će se određeni oblik korozije pojaviti u procesnoj posudi, rizik može biti nizak ako posljedica kvara nije ozbiljna (na primjer, posuda sadrži hladnu vodu). S druge strane, rizik može biti visok ako je gore navedena posljedica velika (na primjer, ako posuda sadrži vrući zapaljivi plin). [36]

## 6.2. Strategije za smanjenje rizika od korozije

1. Izrađivanje karta korozivnosti tla za vodovode
2. Davanje prioriteta cjevovodima za procjenu rizika od korozije na temelju povijesti korozije, karta, starosti, kritičnosti, materijala i posljedica kvara
3. Provedba neizravne procjene na lokacijama identificiranim prema gore navedenim kriterijima
4. Izravna procjena (iskopavanja i mjerenja fokusa), utvrđivanje prihvatljivih ili neprihvatljivih rizika te inženjerska rješenja
5. Instaliranje ispitnih stanica i senzora za područja visokog rizika od korozije

6. Razvijanje dugoročnog programa održavanja za ublažavanje korozije za  
produživanje životnog vijeka vodovoda i spriječavanje kvarova[27]

6.3. Matrica procjene rizika

Matrica procjene rizika prikazana na slici 14, također poznata kao matrica rizika vjerojatnosti i ozbiljnosti vizualni je alat koji prikazuje potencijalne rizike. Temelji se na dva međusobno povezana čimbenika: vjerojatnosti da će se rizični događaj dogoditi i potencijalnom utjecaju koji će taj događaj imati. Pomaže vizualizirati vjerojatnost u odnosu na ozbiljnost potencijalnog rizika.

Ovisno o vjerojatnosti i ozbiljnosti, rizici se mogu kategorizirati kao visoki, umjereni ili niski. Funkcionira tako da prikazuje različite rizike u obliku grafikona, označenih bojama prema ozbiljnosti: visoki rizici crvenom bojom, umjereni rizici žutom bojom, a niski rizici zelenom bojom. Svaka matrica rizika također ima dvije osi: jednu za mjerenje vjerojatnosti i jednu za mjerenje utjecaja.

Matrica procjene rizika u slučaju ostarjelih vodovoda može pomoći u boljem razumijevanju rizičnog okruženja, pomažući u upravljanju i ublažavanju rizika prije nego što se pojave.[34]

VJEROJATNOST/UTJECAJ	NIZAK UTJECAJ	UMJEREN UTJECAJ	VISOK UTJECAJ
MALO VJEROJATNO	NIZAK RIZIK		
VJEROJATNO		UMJEREN RIZIK	
VISOKO VJEROJATNO			VISOK RIZIK

Slika 14. Matrica procjene rizika[34]

## 7. RJEŠENJA PROBLEMA KOROZIJE OSTARJELIH VODOVODA

### 7.1. Cijevi u kućanstvu

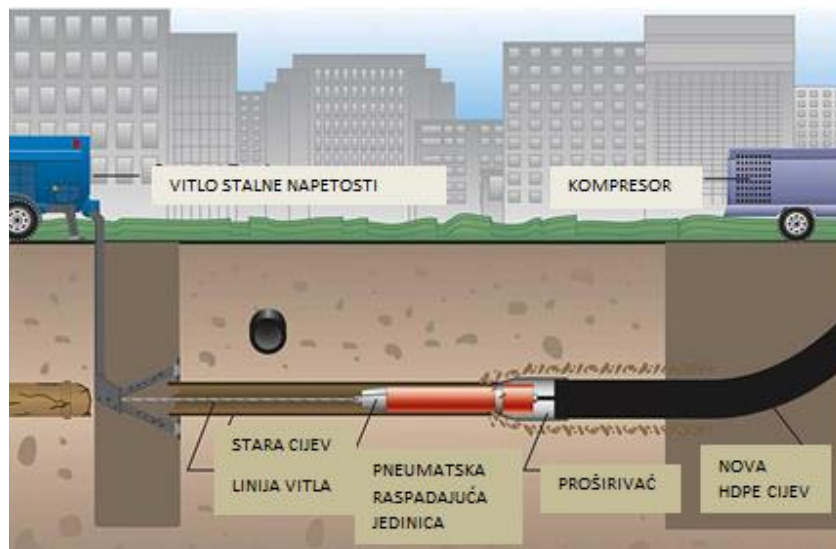
Čišćenje i popravak korodiranih cijevi – cijevi se čiste odgovarajućom otopinom za čišćenje ili abrazivnim materijalom, što uklanja nakupljenu koroziju koja blokira protok vode. Nakon što je cijev očišćena, treba je zabrtviti premazom otpornim na koroziju kako bi se spriječilo daljnje oštećenje.

Zamjena cijevi koje cure – ako vodovodne cijevi cure ili imaju vidljive znakove istrošenosti kao što su pukotine ili rupe, tada ih je potrebno u potpunosti zamijeniti ili zamijeniti samo oštećeni dio. Zamjena zahtijeva izrezivanje oštećenog dijela cijevi i njegovu zamjenu novim materijalima za cijevi poput PVC-a ili PEX-a.[23]

### 7.2. Vodovodne mreže gradova

Gdje je to moguće, cijevi se zamjenjuju tehnologijom bez iskopa, te se time smanjuje utjecaj na stanovnike i lokalni okoliš. To se radi pomoću jedne od dviju metoda:

1. Pucanje cijevi - nove cijevi provlače se kroz postojeći sustav cijevi, te se šire i izazivaju pucanje starih cijevi (slika 14)
2. Usmjereni bušenje - kompjutorski upravljana bušilica buši vodoravno ispod zemlje, te se nove cijevi provlače kroz bušotinu (slika 15)



Slika 15. Prikaz zamjene vodovodnih cijevi metodom 1.[30]



Slika 16. Prikaz zamjene vodovodnih cijevi metodom 2.[31]

Tamo gdje je nepraktično koristiti metode bez iskopa, cijevi se mijenjaju sljedećim metodama:

1. Otvoreni rov - nove cijevi polažu se paralelno s postojećim cijevima u iskopani otvoreni rov, a stare cijevi su napuštene i ostavljaju se u zemlji (slika 16)
2. Podizanje i zamjena - stare cijevi se iskopaju i uklanjaju, a nove cijevi postavljaju na slična mjesta[32]



Slika 17. Metoda otvorenog rova[33]



## 8. ZAKLJUČAK

Ostarjela vodovodna infrastruktura općenito je velik problem u cijelom svijetu. Korozija vodovodnih sustava jedan je od najvećih problema za kojeg rješenja često premašuju i milijune dolara godišnje. Najčešći oblici korozije vodovodnih sustava koji se mogu prepoznati su: jednolika korozija, jamičasta korozija, galvanska korozija, korozija u pukotinama i korozija pod mikrobiološkim utjecajem, te se svaka od njih prepoznaje po drugačijim karakteristikama. Ostarjele cijevi danas se zamjenjuju otpornijim bakrenim i cijevima od PVC-a. Procjene rizika od korozije provode se kako bi se identificirali mehanizmi oštećenja, procjenila vjerojatnost, posljedice i ukupni rizik. Iako je cijevi nemoguće u potpunosti zaštititi od korozije razvijene su mnoge metode zaštite koje produljuju životni vijek vodovodnih sustava. Najčešće se kao metode zaštite koriste premazi i katodna zaštita cijevi. Međutim, oštećenost vodovodne infrastrukture može uzrokovati zdravstvene probleme, a najveći je problem oslobađanje olova u vodu. Olovo je najveći problem u vodovodnoj infrastrukturi Amerike, dok je ona u Europi skoro u potpunosti izmjenjena, pa je uklonjen rizik od štetnog djelovanja olova. Problem korozije ostarjeih vodovodnih sustava danas se rješava zamjenom cijevi tehnologijom bez iskopa čime se smanjuje utjecaj na stanovnike i okoliš, te kada nije moguće koristiti metode bez iskopa, otvorenim rovovima. Tehnologija bez iskopa novija je metoda koja uvelike doprinosi i zaštiti okoliša koja je u današnje vrijeme vrlo važna. Nužno je čim prije napraviti izmjenu starih i korozivnih cijevi zbog velike mogućnosti vrlo negativnog utjecaja na ljudsko zdravlje.

## LITERATURA

- [1] <https://www.ddcoatings.co.uk/2515/what-is-pipeline-corrosion> (pristup 28.srpnja.2023.)
- [2] <https://www.corrosionpedia.com/definition/1202/pipeline-corrosion> (pristup 28.srpnja.2023.)
- [3] <https://polyguard.com/pipeline/blog/pipeline-corrosion-prevention> (pristup 28.srpnja.2023.)
- [4] <https://www.jdservicenow.com/blog/all-about-pipe-corrosion/> (pristup 28.srpnja.2023.)
- [5] <https://tappwater.co/en/water-pipe-corrosion-contaminants-2/> (pristup 28.srpnja.2023.)
- [6] <https://whyrepipe.com/blog/everything-you-need-to-know-about-pipe-corrosion/> (pristup 28.srpnja.2023.)
- [7] <https://marvelseweranddrain.com/blog/6-signs-of-pipe-corrosion/> (pristup 28.srpnja.2023.)
- [8] <https://steelfabservices.com.au/crevice-corrosion/> (pristup 28. srpnja 2023.)
- [9] <https://insights.globalspec.com/article/7265/7-forms-of-piping-corrosion-and-how-to-prevent-them> ( pristup 28. srpnja 2023.)
- [10] <https://www.dynagard.info/pipeline-corrosion-protection-essential-plant/> ( pristup 28. srpnja 2023.)
- [12] [https://www.researchgate.net/figure/Example-of-pitting-corrosion-in-cast-iron-water-mains-8\\_fig3\\_281603098](https://www.researchgate.net/figure/Example-of-pitting-corrosion-in-cast-iron-water-mains-8_fig3_281603098) (pristup 28. srpnja 2023.)
- [13] <https://www.merusonline.com/mic-microbiologically-induced-corrosion/> (pristup 28. srpnja 2023.)
- [14] <https://www.materialsperformance.com/articles/chemical-treatment/2018/04/linking-microbiologically-influenced-corrosion-to-microbiological-activity-using-molecular-microbiological-methods> (pristup 28. srpnja 2023.)

- [15] <https://www.ewg.org/news-insights/news/amid-pipe-wars-researchers-wary-plastic-pipes-leaching-chemicals> (pristup 29.srpnja.2023.)
- [16] <https://www.cdc.gov/nceh/lead/prevention/sources/water.htm> ( pristup 31.srpnja 2023.)
- [17] <https://www.cbsnews.com/news/lead-in-americas-water-systems-is-a-national-problem/> (pristup 31.srpnja. 2023.)
- [18] <https://www.corrosionpedia.com/corrosion-management-in-water-treatment-a-look-at-water-pipeline-corrosion-and-why-its-becoming-a-problem/2/6968> (pristup 1.kolovoza.2023.)
- [19] <https://www.neyerplumbing.com/blog/water-line-service/water-line-dangers-age-and-outdated-materials/> (pristup 2.kolovoza.2023.)
- [20] <https://newsroom.posco.com/en/pumping-water-conservation-steel/> (pristup 3.kolovoza.2023.)
- [21] <https://www.markcarpenterplumbing.com/blog/2018/august/are-there-health-risks-from-old-pipes-/> (pristup 2.kolovoza.2023.)
- [22] <https://www.santafeexpressplumbing.net/blog/uncategorized/old-piping-materials-in-your-home-may-need-to-be-replaced> (pristup 2.kolovoza.2023.)
- [23] <https://dropconnect.com/maintaining-old-plumbing-pipes/> (pristup 2.kolovoza.2023.)
- [24] <https://www.bonney.com/2017/07/the-dangers-of-old-pipes/> (pristup 3.kolovoza.2023.)
- [25] <https://www.zameen.com/blog/preventing-water-corrosion-pipes.html> (pristup 3.kolovoza.2023.)
- [26] I. Juraga, V. Alar, I. Stojanović: Korozija i zaštita premazima, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [27] <https://matergenics.com/water-main-corrosion-risk-assessment/> (pristup 3.kolovoza.2023.)

- [28] <https://matergenicswatermain.com/indirect-and-direct-assessment/> (pristup 6.kolovoza.2023.)
- [29] Huipeng Li: Hierarchical Risk Assessment of Water Supply Systems, Department of Civil and Building Engineering Loughborough University, Loughborough, Leicestershire, March 2007
- [30] <https://www.mckimcreed.com/newsletters/2014/Winter/PipeBursting/> (pristup 6.kolovoza.2023.)
- [31] <https://www.gridtechllc.com/directional-drilling> (pristup 6.kolovoza.2023.)
- [32] <https://www.barwonwater.vic.gov.au/about-us/major-projects/water-mains-replacements> (pristup 6.kolovoza.2023.)
- [33] <https://www.melgaardconstruction.com/trenching> (pristup 6.kolovoza.2023.)
- [34] <https://www.auditboard.com/blog/what-is-a-risk-assessment-matrix/> (pristup 18.kolovoza.2023.)
- [35] INTERNATIONAL SOCIAL SECURITY ASSOCIATION: Vodič za procjenu rizika u malim i srednjim poduzećima
- [36] K. Elaya Perumal: Corrosion Risk Analysis, Risk Based Inspection and a Case Study Concerning a Condensate Pipeline, 2014.