

Primljen / Received: 8.12.2023.

Ispravljen / Corrected: 28.6.2024.

Prihvaćen / Accepted: 20.1.2025.

Dostupno online / Available online: 10.5.2025.

# Pregled utjecajnih čimbenika na trajnost prednapete betonske kružne cijevi

## Autori:

Mr.sc. **Yuan Li**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Tianjin, Kina

Fakultet za precizno inženjerstvo i optoelektroniku  
Zavod za modernu tehnologiju akustične detekcije  
[tddtd16@outlook.com](mailto:tddtd16@outlook.com)Izv.prof.dr.sc. **Hao Feng**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Tianjin, Kina

Fakultet za precizno inženjerstvo i optoelektroniku  
Zavod za modernu tehnologiju akustične detekcije  
[fenghao@tju.edu.cn](mailto:fenghao@tju.edu.cn)Izv.prof.dr.sc. **Zhou Sha**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Tianjin, Kina

Fakultet za precizno inženjerstvo i optoelektroniku  
Zavod za modernu tehnologiju akustične detekcije  
[shazhou@tju.edu.cn](mailto:shazhou@tju.edu.cn)

Autor za korespondenciju

Stručni rad

**Yuan Li, Hao Feng, Zhou Sha**

## Pregled utjecajnih čimbenika na trajnost prednapete betonske kružne cijevi

Prednapeta betonska kružna cijev (PCCP) kompozitna je cijev koja se sastoji od betonske jezgre, čeličnog cilindra protiv istjecanja, prednapetih čeličnih žica i zaštitnog sloja od morta. Nesreće koje uključuju PCCP mogu imati negativne posljedice na opskrbu vodom i industrijsku proizvodnju. Zato istraživanje i analiza čimbenika koji utječu na trajnost PCCP-a imaju veliku znanstvenu i praktičnu vrijednost. Ono istraživačima pružaju sveobuhvatniju perspektivu o vijeku trajanja i trajnosti PCCP-a. Ovaj rad sustavno sažima i klasificira čimbenike koji utječu na trajnost PCCP-a poput kemijske erozije, proizvodnih pogrešaka, nepravilne ugradnje i loših radnih uvjeta. Ključni čimbenici i procesi koji određuju trajnost PCCP-a analizirani su u sklopu tih četiriju aspekata. Ovaj rad završava preporukama za povećanje trajnosti PCCP-a. To upućuje na potrebu za prikladnijim dodatcima za beton, poboljšanjem sastava površinskih premaza na cjevovodima, istraživanjem uzdužnih naprezanja u PCCP-ovima te provođenjem nerazornih ispitivanja PCCP-ova.

### Ključne riječi:

prednapeta betonska kružna cijev, kemijska erozija, pogreške u proizvodnji, nepravilna ugradnja, loši radni uvjet

Professional paper

**Yuan Li, Hao Feng, Zhou Sha**

## Review of influencing factors of prestressed concrete cylinder pipe durability

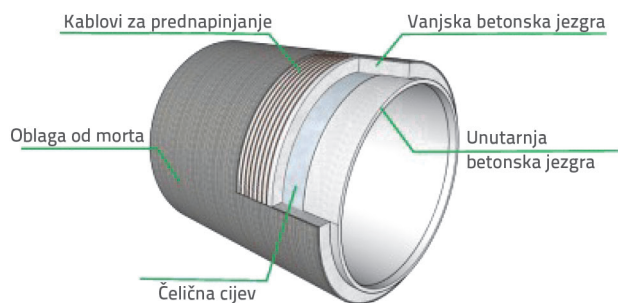
A prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) is a composite conduit comprising a concrete core, an anti-seepage steel cylinder, prestressed steel wires, and a mortar protective layer. Accidents involving PCCPs can have adverse effects on water supply and industrial production. Therefore, exploring and analysing the factors influencing the durability of PCCPs has significant scientific and practical value. This provides researchers with a more comprehensive perspective on the lifespan and durability of PCCP. This paper systematically summarises and categorises the factors affecting PCCP durability, including chemical erosion, manufacturing defects, improper installation, and poor operational conditions. The main factors and processes influencing PCCP durability are delineated from these four aspects. This paper concludes with recommendations for enhancing PCCP durability. This suggests the need for more suitable concrete additives, improving the composition of the surface coatings on pipelines, researching the longitudinal stress of PCCPs, and conducting non-destructive testing on PCCPs.

### Key words:

prestressed concrete cylinder pipe, chemical erosion, manufacturing defects, improper installation, poor operational conditions

## 1. Uvod

Prednapeta betonska kružna cijev (eng. *prestressed concrete cylinder pipe* - PCCP) potječe iz 1894., kada je Aime Bonna, osnivač francuske tvrtke *Bonna*, izumio betonske cijevi s čeličnim cilindrima bez prednapetih žica [1]. Godine 1939. društvo *Bonna Pipelines* unaprijedilo je konstrukciju uvođenjem prednapetih čeličnih žica te je tako nastala prednapregnuta betonska kružna cijev (PCCP). Tijekom godina PCCP se razvijao, što je rezultiralo prednapregnutim betonskim kružnim cijevima s unutrašnjom oblogom (PCCPL), ponajprije za cijevi srednje veličine, i ukopanim prednapregnutim betonskim kružnim cijevima (PCCPE) za veće promjere. PCCP trenutačno je ključan i visokokvalitetan materijal za prijenos vode pod pritiskom, koji se široko primjenjuje u projektima preusmjeravanja vode. PCCP jest materijal za kompozitne cijevi koji se sastoji od nepropusnoga čeličnog cilindra, betonske jezgre, prednapetih čeličnih žica i zaštitnog sloja od morta, a prikazan je na slici 1. Ovisno o vrsti spoja PCCP-a može se podijeliti na PCCPL i PCCPE.



Slika 1. Struktura PCCP-a

Kao materijal za prijenos vode pod tlakom PCCP se ističe brojnim prednostima [1] poput optimirane strukture, velike tlačne čvrstoće, iznimne otpornosti na koroziju, izvrsnih brtvenih svojstava i prilagodljivosti različitim uvjetima tla. Zato je PCCP često ključan u opskrbi vodom urbanog stanovništva. Međutim, u slučaju puknuća PCCP cijevi mogu nastati negativni učinci po normalan tijek opskrbe i svakodnevni život ljudi. Zato je važno istražiti čimbenike koji utječu na trajnost PCCP-a. Temeljitiya analiza trajnosti PCCP-a može se postići sustavnim i cjelovitim sažimanjem tih čimbenika. To je korisno za smanjenje ili potpuno izbjegavanje rizika od pucanja PCCP-a na sustavan način te znatno utječe na opće dobro.

Čimbenici koji utječu na trajnost PCCP-a navedeni su u tablici 1. na temelju sažetka i klasifikacije podataka prikupljenih tijekom istraživanja. U tablici su navedene i informacije o kemijskoj koroziji, proizvodnim pogreškama, nepravilnoj ugradnji i lošim radnim uvjetima.

Referentni rad [1] uglavnom se bavi povijesti razvoja PCCP-a. Referentni radovi [2-40] istraživali su utjecaj kemijske korozije na trajnost PCCP-a, pri čemu su razgradnja sumporne kiseline, korozija karbonata i korozija kloridnih iona tri glavne vrste kemijske korozije. Razgradnja sumporne kiseline i korozija karbonata mogu uzrokovati širenje betona, njegovo

omekšavanje i zakiseljavanje, što dovodi do pucanja, smanjenja čvrstoće i otežanog formiranja pasivnog filma. Korozija kloridnih iona može uzrokovati koroziju armature i čelične cijevi, što može dovesti do pucanja žica i odvajanja morta od čelične cijevi.

Tablica 1. Čimbenici koji utječu na trajnost PCCP-a

| Čimbenici            | Vrste                                 |
|----------------------|---------------------------------------|
| Kemijska korozija    | Sulfatna agresivnost                  |
|                      | Korozija karbonata                    |
|                      | Korozija kloridnih iona               |
| Greške u proizvodnji | Nestandardne čelične žice             |
|                      | Nestandardne čelične cijevi           |
|                      | Neispravne vrste cijevi               |
|                      | Nedovoljno ograničenje potiska        |
| Neispravna ugradnja  | Ugradnja podloge, nosača              |
|                      | Niža kvaliteta morta                  |
|                      | Nepoštivanje zahtjeva                 |
| Loši radni uvjeti    | Oštećenja uzrokovana trećim stranama  |
|                      | Problemi povezani s unutarnjim tlakom |
|                      | Zračni džepovi                        |

Referentni radovi [41-55] istraživali su učinke pogrešaka u proizvodnji na trajnost PCCP-a. Utvrđena su četiri glavna proizvodna nedostatka: nestandardne prednapete čelične žice, nestandardne čelične cijevi, pogrešan odabir vrste cijevi i nedovoljna ograničenja potiska. Nestandardne čelične žice za prednapinjanje mogu imati probleme poput štetnog starenja uzrokovanog naprezanjem i vodikove krhkosti, što može dovesti do pucanja žica i mogućih nesreća uslijed pucanja cijevi. Nestandardne čelične cijevi imaju smanjenu otpornost na pritisak i povećanu sklonost pucanju betona. Neispravan odabir vrste cijevi može dovesti do tlakova koji premašuju projektne vrijednosti, što može uzrokovati nesreće. Nedovoljno ograničenje potiska može uzrokovati obodne pukotine, kidanje čelične cijevi i otvaranje spojeva.

Referentni radovi [56-64] istraživali su utjecaj nepravilne ugradnje na trajnost PCCP-a. Neadekvatna podloga, loša ugradnja nosača, nedostatak morta ili loša kvaliteta morta te nepoštivanje projektnih zahtjeva osnovni su primjeri nepravilnih ugradnja. Neadekvatna podloga i loša ugradnja nosača mogu uzrokovati prekomjerno naprezanje u betonu, što dovodi do pucanja morta i izlaganja čeličnih žica opasnostima od pasivizacije i korozije. Nedostatak morta ili loša kvaliteta morta uzrokovat će nedostatak odgovarajuće zaštite za PCCP-ove, što će dovesti do smanjenja njihove trajnosti. Nepoštivanje projektnih vrijednosti može dovesti do pogoršanja okoliša za PCCP.

Referentni radovi [65-79] istraživali su učinak loših radnih uvjeta na trajnost PCCP-a. Oštećenja koja su uzrokovale treće

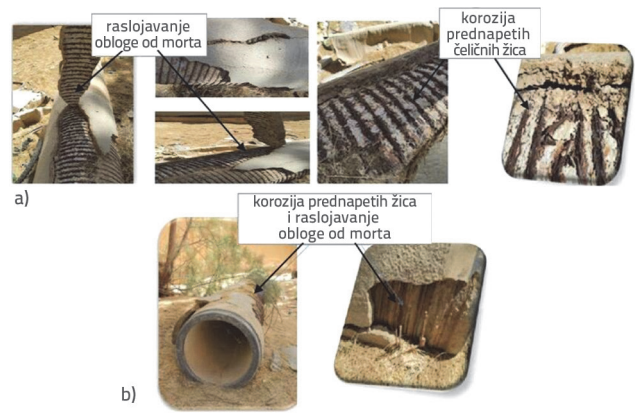
strane, problemi povezani s unutarnjim tlakom i zračni džepovi bili su glavni nepovoljni radni uvjeti. Nekontrolirani iskop može uzrokovati nenamjerno curenje, prekomjerna vanjska opterećenja te bušenje ili probijanje stijenke cijevi zbog oštećenja koja su uzrokovale treće strane, što izravno vodi do oštećivanja PCCP-a. Problemi povezani s unutarnjim tlakom uglavnom se odnose na česte promjene unutarnjeg i vanjskog tlaka u PCCP cijevima, što može dovesti do nesreća uslijed pucanja cijevi. Zračni džepovi odnose se na nemogućnost ispuštanja ispušnih plinova; nakupljaju se pri vrhu cijevi, kondenziraju i lijepe za stijenku cijevi, što uzrokuje koroziju i skraćuje životni vijek PCCP-a.

Ovaj rad objedinjuje podatke iz istraživanja iz međunarodnih izvora. Integriranjem nalaza istraživanja iz različitih područja, uključujući dimenzioniranje PCCP-a, proizvodnju i ugradnju, operativno održavanje i materijale, autori su saželi čimbenike koji utječu na trajnost PCCP-a. Naposljetku su dane preporuke za unapređenje trajnosti PCCP-a, s težištem na poboljšanju dodatka za beton i materijala za premazivanje cijevi. Osim toga predloženo je istraživanje uzdužnog naprezanja PCCP-a i izvođenje ispitivanja bez razaranja. Cilj je tih preporuka pružiti drugim znanstvenicima smjernice za istraživanje trajnosti PCCP-a.

## 2. Kemijska korozija

Kemijska korozija ključan je faktor u istraživanju čimbenika koji utječu na trajnost PCCP-a. Prema statističkim podacima, od 1943. do 1990. 82,1 % slučajeva oštećivanja PCCP-a bilo

je povezano s korozijom [2]. Ferkous i sur. [3] te Ma i sur. [4] istraživali su ugljičnu koroziju i koroziju čelika X80 pod različitim ekstraktima tla i premazima te uočili da kemijska svojstva tla i lokalnog okoliša ispod premaza znatno utječu na koroziju. Wang [5] proučavao je opadanje učinkovitosti organskih premaza uzrokovano UV degradacijom, simulirajući okolišne uvjete. Ta istraživanja pokazuju da kemijska erozija nije povezana samo sa svojstvima samog materijala, već je znatna pod utjecajem vanjskih okolišnih čimbenika. Tijekom upotrebe PCCP je podložan trima vrstama korozije: sulfatnoj agresivnosti, koroziji karbonata i koroziji kloridnih iona [6]. Na slici 2. [7] prikazana je korozija PCCP-a i njegovih prednapetih čeličnih žica. U tablici 2. sažeti su glavni sadržaji istraživanja kemijske erozije.



Slika 2. Korozija PCCP-a i prednapetih čeličnih žica [7]

Tablica 2. Referentni radovi koji se bave kemijskom korozijom

| Literatura                                          | Analizirani čimbenici koji utječu na trajnost                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zhang, Q.J. (2015.). [2]                            | Od 1943. do 1990., 82,1 % slučajeva loma PCCP-a bilo je izazvano korozijom. Postoji šest oblika korozije: reakcija karbonatizacije, korozija kloridnih iona, sulfatna agresivnost, korozija uzrokovana kiselim kišom, korozija uzrokovana otapanjem i oštećenje uslijed smrzavanja i odmrzavanja.                                                                                                                                                                                           |
| Ferkous i sur. (2022.) [3]<br>Ma i sur. (2020.) [4] | Istražena je ugljična korozija i korozija čelika X80 pod različitim ekstraktima tla i premazima. Utvrđeno je da kemijska svojstva tla i lokalnog okruženja ispod premaza znatno utječu na koroziju.                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Ma i sur. (2022.) [5]                               | Razgradnja organskih premaza uzrokovana UV degradacijom ispitana je simuliranjem okolišnih uvjeta. To istraživanje otkrilo je da kemijska erozija ne ovisi samo o svojstvima materijala, već je također pod znatnim utjecajem vanjskih okolišnih čimbenika.                                                                                                                                                                                                                                 |
| Hassi, S. (2021.) [6]                               | Istraženi su uzroci jake korozije i oštećenja PCCP-a u projektu cjevovoda za prijenos vode u Agadiru. Istraživanje je pokazalo da je korozija čelične žice ponajprije uzrokovana kloridima, uz nedostatke u proizvodnji i učinak hidrauličkog udara koji je dodatno pogoršao štetu.                                                                                                                                                                                                         |
| Hassi, S. (2021.) [7]                               | Analizirana je izvedba PCCP-ova primijenjenih u sjeveroistočnome Maroku. Utvrđeno je da su glavni uzroci oštećenja korozija žice uzrokovana kloridima, učinak hidrauličkog udara i nedostaci u proizvodnji. Istraživanje je pokazalo da bi trebalo upotrebljavati cement otporan na kloride i sulfate kako bi se poboljšala trajnost cijevi u tome kemijskom okruženju.                                                                                                                     |
| Hassi, S. (2020.) [8]                               | Uzorci su natopljeni u otopini NaCl masenog udjela od 9,5 mas. % i kompozitnoj otopini masenog udjela od 9,5 mas. % NaCl i 34 mas. % Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> kako bi se simuliralo najagresivnije okruženje s desne strane marokanskog plinovoda. Mikrostruktura premaza od morta i armaturnog čelika određena je elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom (EIS). Dobiven je model elektrokemijskog ekvivalenta prema Dongu koji je usklađen s eksperimentalnim rezultatima. |

Tablica 2. Referentni radovi koji se bave kemijskom korozijom- nastavak

| Literatura                         | Analizirani čimbenici koji utječu na trajnost                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cui i sur. (2020.) [9]             | Mikrobiološki poticana korozija (MIC) dupleksnoga nehrđajućeg čelika 2205 (DSS) uzrokovana bakterijama koje reduciraju sulfate (SRB) ispitana je primjenom karakterizacije visoke razlučivosti. Bakterije koje reduciraju sulfate uzrokovale su jaku lokalnu koroziju 2205 DSS-a.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Liu i sur. (2019.) [10]            | U prisutnosti SRB-a, mehanizam korozije ugljičnog čelika u sedimentima proučen je pomoću površinske analize, mjerenja gubitka težine i elektrokemijskih ispitivanja. Rezultati su pokazali da bakterije koje reduciraju sulfate znatno ubrzavaju opću i lokalnu koroziju u sedimentima.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Jana, D., Lewis, R.A. (2004.) [11] | Pokusima je analizirana otpornost morta na koroziju u različitim kiselim uvjetima, a rezultati su pokazali da kiseline mogu znatno smanjiti čvrstoću i trajnost morta.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Thiebaut, Y. (2018.) [12]          | Odgođeno nastajanje etringita (DEF) jest oštećenje uzrokovano sulfatima koje utječe na građevinske konstrukcije. Ta kemijska reakcija događa se unutar betonske matrice elementa, uzrokujući uništavanje betona i rastezanje armaturnih šipki.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Nixon, R.A. (2022.) [13]           | Podzemne vode s velikim udjelom sulfata također će uzrokovati širenje i degradaciju sloja od morta, čime će prednapetu čeličnu žicu izložiti korozivnim uvjetima. Tlo niskog pH i podzemna voda potiču koroziju prednapete čelične žice.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Leach, D.G. (2022.) [14]           | Detaljno je prikazana studija slučaja analize kvara cjevovoda za proizvedenu vodu pod utjecajem mikrobiološke korozije (MIC).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Kiliswa, M.W. (2019.) [15]         | Uspoređivane su brzine korozije betonskih mješavina na bazi portlandskog cementa i kalcijeva aluminatnog cementa (CAC). Što je udio amorfnog AHx u betonskoj matrici CAC-a veći, to je jača sposobnost neutraliziranja štetnog djelovanja kiseline.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Qiu i sur. (2022.) [16]            | Ispitivani su propusnost i mikroskopsko snimanje gruboga poroznog betona s različitim udjelom cementa u otopini sumporne kiseline. Također je ispitan utjecaj sumporne kiseline na propusnost grubo poroznog betona. Pružene su informacije o mogućim učincima djelovanja sulfata na svojstva betona. Smanjenjem pH-vrijednosti otopine sumporne kiseline i povećanjem udjela cementa smanjuje se propusnost grubo poroznog betona, što pospješuje proces hidratacije i korozije cementa.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Fu i sur. (2022.) [17]             | Ispitan je utjecaj sastava betona na ponašanje betona vrlo visokih svojstava (UHPC) pri skupljanju uslijed sušenja. Stupanj utjecaja omjera vode i veziva, čeličnih vlakana, superplastifikatora, silicijeva dioksida i količine letećeg pepela na ponašanje UHPC-a pri skupljanju uslijed sušenja procijenjen je analizom korelacije sive entropije, pri čemu je utvrđeno da mali vodovezivni omjer te velik udio letećeg pepela doprinose ublažavanju skupljanja UHPC-a uslijed sušenja. Dodavanje superplastifikatora i silicijske prašine pogoršalo je skupljanje nakon sušenja.                                                                                                                                                       |
| Wang i sur. (2023.) [18]           | Istraživani su učinci različitih mješovitih konstrukcijskih parametara na svojstva tlačno lijevanog betona (CCC). Metode ugradnje betona poput tlačenja mogu poboljšati gustoću betona.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Zhang i sur. (2019.) [19]          | S povećanjem koncentracije otopine natrijeva sulfata pogoršanje fizikalno-mehaničkih svojstava betona postaje izraženije. Pri niskoj koncentraciji otopine natrijeva sulfata dolazi do kemijske erozije betona, dok pri visokoj koncentraciji dolazi do fizikalne erozije betona.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Zhang i sur. (2023.) [20]          | Koncentracija sulfata utječe na proces prijenosa sulfata unutar betona. Što je veća koncentracija, veća je brzina prijenosa sulfata i jača je erozija.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Liang, Y.S. (2013.) [21]           | Glavni čimbenici korozije unutarnje stijenske PCCP-a su CO <sub>2</sub> (stvaranje karbonatizacije CaCO <sub>3</sub> ), magnezijeva sol (Mg(OH) <sub>2</sub> (nema cementirajuća svojstva), sulfat (izmjenjuje se s cementnim hidratom i tvori ekspanzivni etringit i gips, što dovodi do pucanja) i sol klora (koja povećava topljivost Ca(OH) <sub>2</sub> , stvarajući korozivne baterije, smanjujući pH-vrijednost i uništavajući pasivni film).                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| He, Q.K. (2015.) [22]              | Beton, s obzirom na svoju poroznu strukturu, dopušta ulazak raznih tvari koje kroz pore dolaze u dodir s Ca(OH) <sub>2</sub> , što može uzrokovati ozbiljno oštećenje betonskih konstrukcija. Reakcija vode i CO <sub>2</sub> dovodi do stvaranja većeg volumena CaCO <sub>3</sub> , što izaziva širenje i nastanak pukotina. Magnezij (Mg <sup>2+</sup> ) u slano-alkalnome tlu reagira s Ca(OH) <sub>2</sub> , stvarajući Mg(OH) <sub>2</sub> koji nema učinak gela, što može dodatno oštetiti beton.                                                                                                                                                                                                                                    |
| Zhao, M.Y. (2011.) [23]            | Niska koncentracija kloridnih iona sprječava otapanje silikata i aluminata, čime sprječava proces hidratacije. S druge strane visoka koncentracija kloridnih iona ubrzava otapanje kalcijevih iona i potiče hidrataciju. Vanjski kloridni ioni mogu uništiti pasivni film na površini čelične šipke, a da se pritom ne troše.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Wang, X.D. (2014.) [24]            | Specifični pokazatelji korozije tla jesu sadržaj vode u tlu, otpornost tla, ukupni sadržaj soli u tlu i pH-vrijednost.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Chu, X.Y. (2012.) [25]             | U radu analizirani su uvjeti korozije u projektima vodoprivrede i prijenosa vode: korozija betona i korozija čelične konstrukcije. Korozija betona: karbonatizacija: Ca(OH) <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → CaCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O; sulfat napada trikalcijev aluminat u betonu i uništava beton i mort. Kiselo tlo. Korozija čeličnih struktura: karbonatizacija smanjuje pH-vrijednost i uništava pasivni film; kontakt kloridnih iona s površinom čelika potiče reakciju korozije Fe → Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup> → 4OH <sup>-</sup> ; korozija smanjuje vlačnu čvrstoću čelične žice, a produkti korozije dodatno uzrokuju pucanje i oštećivanje betona. |

Tablica 2. Referentni radovi koji se bave kemijskom korozijom - nastavak

| Literatura                    | Analizirani čimbenici koji utječu na trajnost                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Podhajecky, A.L. (2023.) [26] | Istraživani su učinci početne vlažnosti na ponašanje betona pri puzanju i skupljanju pod različitim uvjetima vlažnosti. Rezultati su pokazali da početna vlažnost znatno utječe na ponašanje betona u smislu deformacija, osobito pod uvjetima ciklične vlažnosti.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Wang i sur. (2021.) [27]      | Povećanje temperature može ubrzati proces karbonatizacije betona. Osobito u prisutnosti tekuće vode, brzina karbonatizacije može se znatno povećati u kratkome vremenskom razdoblju (npr. jedan sat).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Xu i sur. (2022.) [28]        | Povećanje temperature može ubrzati proces karbonatizacije betona. Relativna vlažnost i koncentracija CO <sub>2</sub> također su važni čimbenici koji utječu na brzinu karbonatizacije. Odnos između relativne vlažnosti i dubine karbonatizacije kvadratna je funkcija, a odnos između koncentracije CO <sub>2</sub> i dubine karbonatizacije jest polinomska funkcija.                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Liu i sur. (2020.) [29]       | Predložen je model predviđanja dubine karbonatizacije, uključujući okolišne čimbenike i betonskih dijelova. Rezultati su pokazali da između temperature i dubine karbonatizacije postoji eksponencijalna veza, dok relativna vlažnost i koncentracija CO <sub>2</sub> također znatno utječu na brzinu karbonatizacije.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Lee, H.M. (2018.) [30]        | Prodiranje atmosferskog CO <sub>2</sub> u beton smanjuje njegovu bazičnost, čime se uništava zaštitni sloj oko čelične šipke, što dovodi do korozije.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Fang i sur. (2022.) [31]      | Metoda ubrzanog ispitivanja na koroziju primijenjena je za usporedbu makroskopskih mehaničkih svojstava i degradacije izgleda različitih betona u trima vrstama kompozitnih otopina soli. Rezultati su pokazali da visoka koncentracija mješovite soli negativno utječe na svojstva betona, dok cementni materijal izravno utječe na čvrstoću i trajnost betona.                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Yuan i sur. (2022.) [32]      | UHPC pomiješan sa silicijskom prašinom i letećim pepelom pokazao je bolju stabilnost u vodi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Li i sur. (2022.) [33]        | UHPC pripremljen sa superplastifikatorom polikarboksilne kiseline imao je veliku tlačnu čvrstoću i izvrsnu otpornost na koroziju.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Cui i sur. (2023.) [34]       | Erozija izazvana kloridnim ionima u hladnim područjima posebno je složena i podložna utjecaju brojnih čimbenika. Erozija uzrokovana kloridnim ionima ubrzava koroziju čeličnih šipki, što je ključni čimbenik skraćivanja trajnosti.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Liu i sur. (2022.) [35]       | Kloridni ioni smanjuju koncentraciju Cr i Ni, slabe elektronegativnost unutarnjeg filma i olakšavaju prodiranje kloridnih iona, čime uništavaju pasivni film. Prema tim podacima, kloridni ioni mogu smanjiti zaštitna svojstva pasivnih filmova mijenjajući njihov sastav i strukturu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Wang i sur. (2022.) [36]      | Iako je pH-vrijednost u magnezij-kalijevu fosfatnom cementu (MKPC) znatno niža od one u običnome fosfatnom cementu (PC), otpornost na koroziju ugljičnog čelika znatno je bolja, a kritična vrijednost klora u MKPC-u nekoliko je puta veća u odnosu na PC. To dokazuje da, iako kloridni ioni imaju razarajući učinak na pasivni film, drugi okolišni čimbenici poput pH-vrijednosti također mogu utjecati na korozijski učinak kloridnih iona.                                                                                                                                                                                  |
| Liu i sur. (2022.) [37]       | Zbog sinergijske razgradnje kloridnih i fosfatnih iona prethodno pasivni ugljični čelik pokazivat će izraženiju jamičastu koroziju.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Zhang i sur. (2021.) [38]     | Tijekom namakanja litij-ionskih baterija korozija se pojačava s povećanjem potencijala, koncentracije NaCl i vremena namakanja.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Du i sur. (2023) [39]         | Nakon stvaranja „korozijske baterije“ korozija obično uključuje reakcije koje se javljaju na sučelju između elektrode i elektrolita. Korozija baterije povezana je s otapanjem/pasivizacijom materijala za elektrode i otapanjem/oksidacijom/pasivizacijom kolektorske tekućine.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Hu, Y. (2023.) [40]           | Prodiranje klorida smatra se glavnim uzrokom korozije čelika tijekom uporabe PCCP-a. Razvijen je vremenski ovisan model trenutačnoga koeficijenta difuzije kloridnih iona i površinske koncentracije kloridnih iona u betonu njegovanome zaparivanjem, uzimajući u obzir utjecaj starosti betona tijekom njege i vremena izlaganja. Na temelju toga razvijen je model difuzije kloridnih iona, koji u obzir uzima utjecaj duljine njege betona, vremena izlaganja, vremenski ovisne koeficijente difuzije kloridnih iona i vremenski ovisne površinske koncentracije kloridnih iona, što je ključno za procjenu trajnosti PCCP-a. |

## 2.1. Sulfatna agresivnost

Sulfatna agresivnost ključni je aspekt u istraživanju trajnosti PCCP-a i smatra se složenim i vrlo štetnim oblikom degradacije uzrokovane vodom, koja ozbiljno utječe na okoliš. Ioni sulfata prisutni su u tlu i mogu razgraditi organsku tvar, podzemne vode, morsku vodu i industrijske otpadne vode [7, 8]. Oni reagiraju s produktima hidratacije cementa, što dovodi do

širenja, pucanja i propadanja betona, čime se smanjuju njegova čvrstoća i kohezija. U nekim su slučajevima ta svojstva potpuno izgubljena.

Sulfatna agresivnost u betonu uključuje složene fizikalne i kemijske procese [5]. Cjelokupni proces može se sažeti na sljedeći način:

- Sulfatni ioni iz okoliša ulaze u beton i kemijski reagiraju s određenim komponentama očvrsluloga cementnoga

kamena, što dovodi do stvaranja netopivih minerala soli [9, 10]. Ti minerali soli apsorbiraju molekule vode, što uzrokuje povećanje volumena i pucanje betona.

- Reakcija sulfatnih iona s cementom također dovodi do ispiranja ili razgradnje komponenti poput kalcijeva hidroksida (CH) i kalcijeva silikatnoga hidrata (C-S-H) unutar očvrsnule cementne paste, što uzrokuje smanjenje ili potpuni gubitak čvrstoće i kohezije betona [11].

Tijekom degradacije, kada je koncentracija sulfatnih iona u otopini veća od 1000 mg/L, a kapilarne pore cementne paste postanu zasićene otopinom kalcijeva hidroksida, stvara se etringit i talože kristali gipsa [12]. Etringit ima igličastu kristalnu strukturu i radijalno se širi na čvrstim površinama, čime povećava volumen čvrste faze. Taj radijalni rast stvara znatna unutarnja naprezanja uslijed međusobnog tlaka, što na kraju dovodi do propadanja betonske konstrukcije [12, 13]. Kristali gipsa taloženi unutar cementne paste dalje se pretvaraju u dihidrat gipsa, što povećava volumena za 1,24 puta. To povećanje stvara znatna naprezanja, što dovodi do uništavanja cementa [13].

Analizirana je mikrobno inducirana korozija (MIC) uzrokovana bakterijama koje reduciraju sulfate (SRB) na cjevovodima [14]. Studija slučaja uključivala je jaku koroziju vodovodnog sustava na naftnome polju, koja je dovela do njegova kvara u samo sedam mjeseci. Tim za ispitivanje uočio je da su teške bijele naslage (sumnjivi mikrobni biofilm) bile izravno povezane sa slomom uslijed korozije, a željezni karbonati i željezni sulfidi uočeni su ispod crnih ljuski. Ti nalazi upućuju na to da bakterije koje reduciraju sulfate i drugi anaerobni mikroorganizmi igraju važnu ulogu u koroziji cjevovoda.

### 2.1.1. Unutarnji uzroci sulfatne agresivnosti

Otpornost betona na djelovanje sulfata uvelike ovisi o mineralnome sastavu i udjelu cementnoga klinkera, pri čemu ključnu ulogu ima udio  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , koji najviše utječu na njegovu otpornost na djelovanje sulfata [15]. Spoj  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  kemijski reagira, pri čemu nastaje kalcijev hidroksid i talože se kristali gipsa, što u konačnici dovodi do degradacije betona.  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  također kemijski reagira, pri čemu nastaju kristali kalcijeva sulfoaluminata i uništava se beton.

Gustoća betona također utječe na njegovu otpornost na degradaciju. Beton velike gustoće odlikuje se smanjenom poroznošću, što otežava prodor agresivnih otopina i time općenito doprinosi većoj čvrstoći betona [16]. Čimbenici koji utječu na gustoću betona jesu sastav mješavine, tehnika miješanja betona i zbijanje betona. Dobro usklađen omjer osnovnih materijala u mješavini (cement, pijesak, agregat i voda) povećava gustoću betona. Primjenom odgovarajućih metoda fizičkog miješanja i osiguravanjem odgovarajućeg vremena

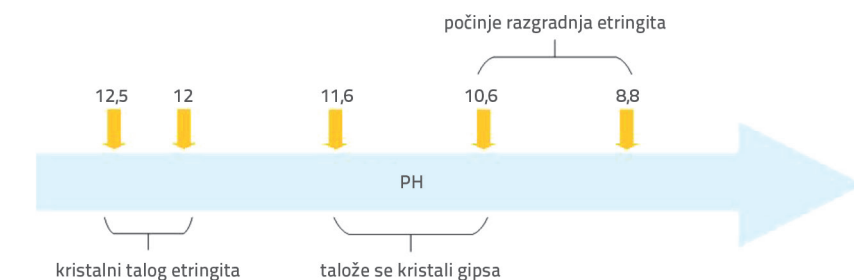
miješanja [18] mogu se poboljšati robusnost i stabilnost betona. Pravilnim odabirom frekvencije i amplitude vibracija pri zbijanju betona [18] može se učinkovito zbiti beton i postići veća gustoća.

### 2.1.2. Vanjski uzroci degradacije sulfata

Koncentracija sulfatnih iona u okolišu može znatno utjecati na otpornost betona na sulfatnu degradaciju [19, 20]. Kada je koncentracija sulfatnih iona manja od 400 ppm, ne dolazi do znatnih oštećenja betona. Blaga oštećenja nastaju pri koncentracijama sulfatnih iona u rasponu od 400 do 1200 ppm, a umjerena oštećenja pri koncentracijama od 1200 do 2000 ppm. Ozbiljna oštećenja mogu nastati kada koncentracija sulfatnih iona prelazi 2000 ppm, a mogu doseći i do 5000 ppm. Istodobno prisustvo sulfatnih i magnezijevih iona u nagrizajućim otopinama ubrzava proces razgradnje [21, 22]. Kada otopina sadržava samo magnezijeve ione bez sulfatnih iona, tada dolazi do razgradnje magnezijeve soli, što dovodi do stvaranja  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ima nisku topljivost i slabo je vezan rastresit materijal. To može začepiti kapilarne pore, spriječiti difuziju otopina i zaustaviti proces degradacije magnezijevom soli. Ako su ioni sulfata i magnezija prisutni zajedno, to dovodi do ispiranja  $\text{MgSO}_4$ , oštećenja nalik kristalizaciji, što rezultira kontinuiranom difuzijom otopina i progresivnom degradacijom betona.

Koegzistencija sulfatnih i kloridnih iona u otopini može usporiti degradaciju. Kada sulfatni i kloridni ioni u otopini postoje istodobno, brzina prodiranja kloridnih iona veća je od one sulfatnih iona. Kod površinskog betona stvaranje etringita u cementnoj pasti prethodi reakciji sa sulfatnim ionima [9–12], dok reakcija s kloridnim ionima nastupa tek nakon smanjenja sulfatnih iona [23]. Kloridni ioni prvo prodiru u unutrašnjost betona, a zatim se podvrgavaju ionskoj izmjeni s hidroksidnim ionima. Kada je koncentracija klorida visoka, tada klorid može reagirati s hidratima kalcijeva aluminata, stvarajući kalcijev kloroaluminat, što smanjuje količinu kristala etringita i usporava proces razgradnje.

pH-vrijednost otopine [24] utječe na brzinu razgradnje. Kao što je to prikazano na slici 3., kada je pH-vrijednost između 12 i 12,5, tada taloženje kristala etringita postaje intenzivnije, čime se ubrzava proces razgradnje. Kada je pH-vrijednost između 10,6 i 11,6, tada dolazi do taloženja kristala gipsa, što dodatno ubrzava proces razgradnje. Kada je pH-vrijednost između 8,8 i 10,6, tada počinje razgradnja etringita, što dovodi do usporavanja brzine razgradnje.



Slika 3. pH-vrijednosti imaju različite učinke na razgradnju sulfata

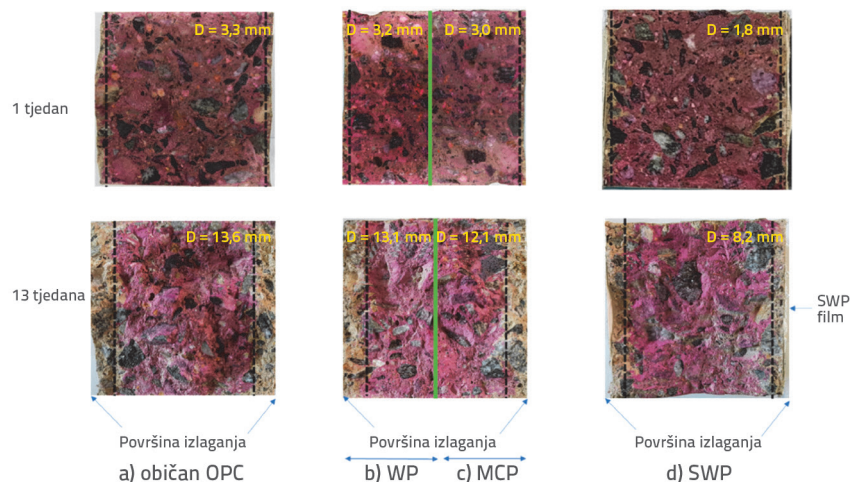
## 2.2. Korozija karbonata

Proces u kojemu ugljični dioksid ulazi u beton i reagira s alkalnim tvarima poput kalcijeva hidroksida, uzrokujući kiselobaznu neutralizaciju, poznat je kao karbonatizacija betona. U podzemnim cjevovodima karbonatizacija ponajprije uključuje reakciju karbonatizacije u betonu, pri čemu ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ) reagira s alkalnim tvarima u betonu poput  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i produkata hidratacije cementa (npr. C-S-H), pri čemu nastaje  $\text{CaCO}_3$ . Ta reakcija smanjuje pH-vrijednost betona, čime slabi njegov zaštitni učinak na unutarnju čeličnu armaturu, što posljedično dovodi do korozije čelika. Beton je alkalni, a karbonatizacija smanjuje njegovu

pH-vrijednost na otprilike 10. Kao rezultat toga beton gubi svoju sposobnost zaštite čelične armature, a pasivni film na njezinoj površini postaje ugrožen [21]. Nakon što dođe do depasivacije čelika u uvjetima blago alkalne ili kisele okoline, uz prisutnost vlage i kisika, čelik počinje podlijetati koroziji. U PCPP strukturama i jezgra betona i sloj morta stvaraju alkalno okruženje koje štiti prednapete čelične žice i cilindre od korozije. Zato, ako dođe do karbonatizacije jezgre betona i sloja morta [25], čime se gubi alkalno zaštitno okruženje za čelične žice i cilindre, to može dovesti do gubitka prednapinjanja u čeličnim žicama. Taj gubitak prednapinjanja može uzrokovati pucanje žica i oštećenje cijevi, što je ozbiljan sigurnosni rizik.

Beton ima strukturu s kapilarnim porama, koja se sastoji od različitih komponenti [22]. Te komponente uključuju zračne šupljine koje se zadržavaju tijekom formiranja betona, kapilarne pore unutar cementne paste, pore gela te sitne pore na granici između cementne paste i agregata. Također, uslijed skupljanja cementne paste tijekom sušenja i temperaturnih promjena mogu nastati male pukotine. U prirodnome okruženju ugljični dioksid prvo prodire u unutrašnjost betona [21], ispunjavajući zračne šupljine i kapilare. Zatim se otapa u tekućini unutar kapilara i reagira s produktima hidratacije cementa poput kalcijeva hidroksida, trikalcijeva silikata i dikalcijeva silikata. Ta reakcija dovodi do stvaranja kalcijeva karbonata.

Brzina i opseg karbonatizacije betona ponajprije ovise o brzini difuzije ugljičnog dioksida [27-29] i njegovoj reaktivnosti s komponentama betona. Na brzinu difuzije ugljičnog dioksida utječu gustoća betona, koncentracija ugljičnog dioksida u okolišu, temperatura okoliša, vlažnost zraka i drugi uvjeti [28, 29]. Ti utjecajni čimbenici mogu se podijeliti na unutarnje i vanjske. Kontinuirane promjene u vlažnosti okoliša [26] poput prijelaza iz vlažnog u suho stanje i obratno ključne su za pokretanje i tijek reakcija karbonatizacije. Ako je beton dulje uronjen u vodu, karbonatizacija se neće dogoditi.



Slika 4. Mjerenje dubine karbonatizacije za: a) obični portlandski cement (OPC); b) WP; c) MCP; d) SWP [30] (Napomena: slike nisu na skali)

Što se tiče istraživanja vezanih uz karbonatizacijsku eroziju, Lee i sur. [30] raspravljali su o utjecaju korozije izazvane karbonatizacijom na čelične šipke u betonu. Izveli su laboratorijske eksperimente ubrzane karbonatizacije, upotrijebili različite materijale za završnu obradu [vodene boje (WP), višebojne boje (MCP) i svilene tapete (SWP)] za obradu betonskih uzoraka te mjerili dubinu i koeficijent karbonatizacije. Na slici 4. prikazan je fizički izgled betona nakon ispitivanja karbonatizacije pri različitim vremenskim intervalima za različite završne materijale upotrebom 1 % fenolftaleina. Istraživanje je pokazalo da infiltracija atmosferskoga ugljičnog dioksida u beton smanjuje njegovu bazičnost, što dovodi do razgradnje zaštitnog filma oko čeličnih šipki, što uzrokuje koroziju. U istraživanju primijenjeni su različiti materijali za završnu obradu kako bi se smanjio utjecaj karbonatizacije. Istraživanjem na terenu i ubzanom eksperimentalnom usporedbom utvrđeno je da primjena SWP-a kao materijala za završnu obradu može učinkovito smanjiti prodiranje  $\text{CO}_2$ . Čak ni nakon stotinu godina karbonatizacija ne bi dosegla razinu na kojoj se nalazi armatura.

### 2.2.1. Unutarnji uzroci korozije od karbonatizacije

Što je veći vodocementni omjer, to je viši stupanj karbonatne erozije [16]. U određenoj mjeri vodocementni omjer određuje gustoću betona. Kada je vodocementni omjer veći, tada će očvrtnuli beton imati više pora, što povećava dodirnu površinu između betona i ugljičnog dioksida u zraku. Također, povećava se sposobnost difuzije ugljičnog dioksida u beton, što rezultira intenzivnijom erozijom.

Što je udio cementa veći, to je manji opseg korozije uslijed karbonatizacije [31]. Količina upotrijebljenog cementa utječe na gustoću betona. Kada se upotrebljava više cementa, tada beton postaje gušći, s manje unutarnjih pora. Zato se površina

kontakta između betona i ugljičnog dioksida smanjuje, što dovodi do manje razine karbonatizacije. Štoviše, veći udio cementa dovodi do veće alkalnosti u poroznoj otopini, jer cement ima veći udio alkalnih tvari. Ta viša pH-vrijednost [16] u otopini s porama smanjuje koncentraciju taloženja kalcijeva karbonata koji nastaje uslijed djelomične karbonatizacije, čime se povećava gustoća betona i smanjuje erozija uzrokovana karbonatizacijom.

Primjena dodataka betonu može utjecati na otpornost betona na karbonatnu eroziju [8, 32]. Dodaci koji se upotrebljavaju uključuju leteći pepeo, zgoru i silicijsku prašinu. Oni imaju znatne udjele aktivnih tvari koje mogu djelomično zamijeniti cement tijekom hidratacije. Te tvari reagiraju s ugljičnim dioksidom prisutnim u produktima hidratacije cementa. To ne samo da smanjuje udio cementa, već i povećava lužnatost betona, učinkovito se odupirući koroziji uzrokovanoj karbonatizacijom. Dodaci betonu također sudjeluju u sekundarnoj reakciji hidratacije cementa, stvarajući produkte hidratacije koji mogu ispuniti unutarnje pore betona, čime se poboljšava njegov cjelokupni integritet.

Dodaci mogu utjecati na otpornost betona na karbonacijsku koroziju [33]. Kada se visokokvalitetni dodaci primjenjuju u kombinaciji s kompatibilnim cementom, tada mogu smanjiti potrebu za vodom u betonu, a istodobno povećati njegovu ukupnu gustoću. Time se smanjuje opseg karbonatizacijskih reakcija.

### 2.2.2. Vanjski uzroci korozije od karbonatizacije

Vlažnost znatno utječe na brzinu karbonatizacije. Relativna vlažnost zraka [28, 29] ima ključnu ulogu u određivanju brzine difuzije ugljičnog dioksida unutar betona. Kada je razina vlage unutar betona visoka, ona ograničava prodor ugljičnog dioksida iz zraka, čime se smanjuje dodirna površina između ugljičnog dioksida i betona. Posljedično, brzina karbonatizacije usporava se.

Promjene u temperaturi također znatno utječu na karbonatizaciju betona [27-29]. Prema fizikalnim principima, viša temperatura povećava brzinu migracije iona, što ubrzava prodiranje ugljičnog dioksida unutar betona. Općenito, brzina reakcije udvostručuje se za svakih 10 °C povećanja. Prema nekim teorijama, viša temperatura smanjuje topljivost ugljičnog dioksida.

Proizvodnja betona znatno utječe na njegovu otpornost na karbonatizaciju. Čimbenici poput temeljitog i ravnomjernog miješanja [18], učinkovitog zbijanja [18] i odgovarajućih uvjeta njege [26] mogu povećati gustoću betona, što poboljšava njegovu otpornost na karbonatizaciju. Te mjere mogu smanjiti pojavu pukotina, šupljina i poroznosti u betonu, čime se smanjuje rizik od karbonatizacije. Uvjeti njege utječu na formiranje produkata hidratacije i određuju veličinu unutarnjih pora u betonu. Općenito, beton podvrgnut njezi zaparivanjem može imati 1,5 puta veću brzinu karbonatizacije u odnosu na beton koji je očvrsnuo prirodnim putem.

### 2.3. Kloridna korozija

Kloridni ioni uzrokuju degradaciju betona [6], a mogu oštetiti pasivni film, doprinijeti formiranju "korozijske ćelije", djelovati kao anodna depolarizacija te, zahvaljujući svojoj električnoj vodljivosti, ubrzati proces degradacije.

Kloridni ioni oštećuju pasivni film [34-37]. U cementnoj suspenziji s pH-vrijednosti između 12 i 13, na površini zatvorene čelične armature u visokoalkalnome okruženju stvara se gusto zbijeni pasivni film, koji se sastoji uglavnom od  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  oksida. Kada je pH-vrijednost visoka, tada pasivni film ostaje stabilan, no ako pH-vrijednost padne ispod 10, dolazi do njegova razaranja i onemogućava se stvaranje novoga zaštitnog sloja. Kada veliki broj kloridnih iona prodre u beton i dođe u dodir s površinom čelične armature, tada se adsorbiraju na pasivni film, što uzrokuje brzo snižavanje pH-vrijednosti ispod 4. To razaranje pasivnog filma omogućava stvaranje korozivne hrđe (kristali  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) pod utjecajem vode i kisika.

Kloridni ioni sudjeluju u stvaranju "korozijske ćelije" [38, 39]. Zbog prisutnosti kloridnih iona oštećuju se dijelovi pasivnog filma na površini čelične armature. Oštećeni dijelovi otkrivaju željeznu bazu, pri čemu nastaje razlika u električnome potencijalu između tih dijelova i neoštećenog dijela pasivnog filma. Kloridni ioni odlikuju se električnom vodljivošću i doprinose stvaranju ionskih puteva. Istodobno željezna baza služi kao anoda i podliježe koroziji, dok pasivni film djeluje kao katoda. To u konačnici uzrokuje stvaranje "korozijske ćelije". Tijekom početnih faza korozije površina prekrivena neoštećenim pasivnim filmom puno je veća od one koja je izložena željeznoj bazi. Kao rezultat nastaje konfiguracija baterije s manjom anodom i većom katodom, što dovodi do visoke brzine korozije anode.

Kloridni ioni pokazuju učinak anodne depolarizacije [34, 39]. Kloridni ioni ne samo da potiču stvaranje "korozijske ćelije" na površini čelične armature, već i ubrzavaju proces elektrokemijske ćelije. Kada željezna matrica erodira kao anoda [25], tada atomi željeza sudjeluju u kemijskim reakcijama, pri čemu nastaju ioni dvovalentnog željeza. Ioni dvovalentnog željeza reagiraju s ionima klorida, stvarajući  $\text{FeCl}_2$ , čime se sprječava nakupljanje iona dvovalentnog željeza na anodi i time ubrzava anodna korozija. Taj se proces naziva anodni učinak depolarizacije, u kojemu kloridni ioni igraju ulogu u prijenosu iona dvovalentnog željeza i ne troše se, čime se slobodnim kloridnim ionima omogućuje da opetovano sudjeluju u koroziji.

Jedan slučaj kloridne korozije [6] prijavljen je 2016. kada su vlasti u Agadiru otkrile brojne pukotine na PCCP-u uslijed velike korozije prednapetih čeličnih žica i hidrauličkog udara, osobito u cjevovodu za vodovode P3 kao što je to prikazano na slici 5. Glavni razlog loma PCCP-a bila je korozija prednapete čelične žice uzrokovana kloridnim ionima. Udio klorida u mortu premašio je prag korozije (0,04 % mase betona ili 0,2 % mase cementa), što je dovelo do korozije prednapetih čeličnih žica. Istraživanje je također pokazalo da erozivna svojstva tla i visok udio kloridnih iona u novome sloju morta u PCCP-u upućuju na to da je mort bio onečišćen tijekom miješanja.



Slika 5. Raspuknuta PCCP cijev [6]

### 2.3.1. Unutarnji uzroci kloridne korozije

Korozija armiranobetonskih konstrukcija uzrokovana kloridnim ionima uključuje prodiranje i difuziju tih iona u beton različitim putovima. Kada koncentracija kloridnih iona na površini armature dosegne kritičnu vrijednost, tada može poremetiti pasivni film na površini armature, što dovodi do korozije armature. To uzrokuje rano oštećivanje strukture i skraćuje njezinu trajnost.

Kloridni ioni imaju snažan učinak depasivacije [34–37]. Kada kloridni ioni prodru u beton i dođu do površine prednapetih čeličnih žica ili čeličnih cilindara, tada se adsorbiraju u lokalni pasivni film i ubrzo u tome dijelu snižavaju pH-vrijednost ispod 4, čime se prekida pasivni film na površini čelika. Osim toga, zbog nejednolikosti betona, oštećivanje pasivacijskog filma uzrokovano kloridnim ionima obično se događa u lokaliziranim područjima, čime se u tim regijama izlaže željezna matrica. To stvara potencijalnu razliku u odnosu na netaknute dijelove pasivnog filma, gdje željezna matrica djeluje kao anoda u korozijskoj ćeliji, dok veći dijelovi pasivnog filma djeluju kao katoda. Kao rezultat toga djelovanje korozijskih ćelija uzrokuje stvaranje korozijskih jama na površini čelika. Budući da veliko katodno područje odgovara malome anodnom području, područje korozije i jamice ubrzano se šire.

Kloridni ioni ne samo da pokreću korozijske ćelije na čeličnoj površini, već i ubrzavaju napredovanje elektrokemijskih reakcija [39]. Razlog jest taj što kloridni ioni mogu kontinuirano prenositi anodne proizvode, održavajući ili čak povećavajući razliku potencijala, što pospješuje anodne procese. Kloridni se ioni ne iscrpljuju u tome procesu [25], pa svaki put kada prodru u beton, ponovno izazivaju

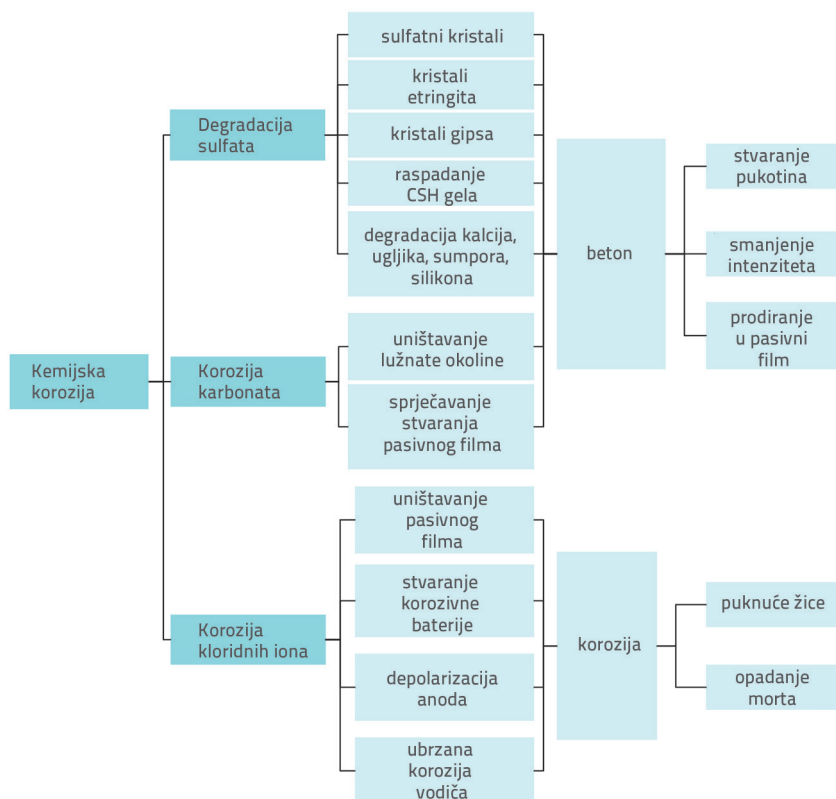
korozivni učinak, što je također svojstvo oštećenja izazvanih kloridnim ionima.

Jedan od ključnih elemenata korozivnih ćelija jest prisutnost ionskih puteva [38, 39]. Kloridni ioni u betonu pojačavaju te ionske puteve, smanjujući omski otpor između anode i katode, čime povećavaju učinkovitost korozijskih ćelija i ubrzavaju proces elektrokemijske korozije.

Ukratko, kloridni ioni ne samo da ometaju pasivni film na površini metala, već i ubrzavaju elektrokemijsku koroziju čelika, što pokazuje da su kloridni ioni ozbiljna prijetnja trajnosti konstrukcija.

### 2.3.2. Vanjski uzroci kloridne korozije

Kloridne soli prisutne su u mnogim okruženjima, osobito u obalnim područjima, slano-alkalnim regijama i zimskim područjima, gdje se sol primjenjuje za odleđivanje. U tim regijama visok udio kloridnih iona zajedno s kiselim tlom [23, 24] doprinosi ubrzanju korozije armiranobetonskih i čeličnih konstrukcija u zgradama i infrastrukturi [40]. Osim toga suvremene metode obrade i pročišćavanja vode često primjenjuju sredstva na bazi klora kao što su izbjeljivači, klorni plin ili klorov dioksid za dezinfekciju i pročišćavanje vodenih izvora. To dovodi do visoke koncentracije kloridnih iona u pročišćenoj vodi, što je ozbiljan rizik za trajnost PCCP-ova, koji se široko primjenjuju u urbanim i industrijskim vodoopskrbnim sustavima. Na slici 6. sažeti su prethodno navedeni procesi kemijske erozije.



Slika 6. Kemijska erozija PCCP-a

### 3. Greške u proizvodnji

Na trajnost PCCP-a ne utječu samo okolišni uvjeti, nego i proces proizvodnje. Neodgovarajući odabir materijala, neodgovarajuća kvaliteta materijala ili dimenzije te nepravilno izvlačenje prednapetih čeličnih žica tijekom proizvodnje mogu utjecati na trajnost PCCP-a. Prema pregledu i sažetku literature, čimbenici koji utječu na trajnost PCCP-a tijekom proizvodnje uključuju nestandardnu kvalitetu žica za prednapinjanje, neusklađene čelične cijevi (cilindre), pogrešan odabir vrsta cijevi i nedovoljno ograničenje potiska. Među tim čimbenicima najvažniji čimbenik koji doprinosi pogreškama u proizvodnji jest loša kvaliteta žica za prednapinjanje. U tablici 3. sažeti su ključni rezultati istraživanja na temelju pregleda relevantne literature. Među njima radovi [41-49] bavili su se kvalitetom prednapete čelične žice, radovi [50-52] kvalitetom

čelične cijevi, rad [53] proučavao je odabir tipa cjevovoda, a radovi [54, 55] ograničenje potiska.

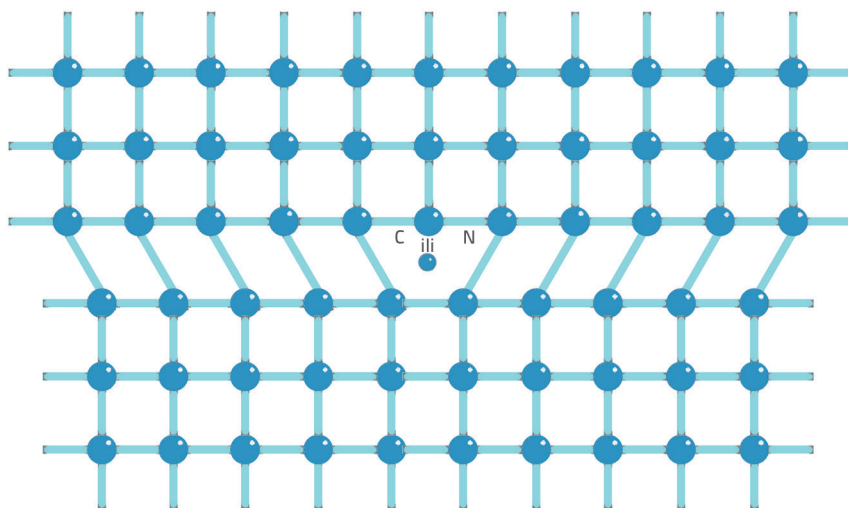
#### 3.1. Nestandardna kvaliteta žica za prednapinjanje

Prema statističkim podacima iz službenog *Izvešća o lomu prednapete betonske kružne cijevi* [41] Američke zaklade za istraživanje vodovoda (engl. *American Water Works Association Research Foundation*), od 317 potvrđenih slučajeva puknuća cijevi 230 slučajeva odnosilo se na puknuća žica za prednapinjanje IV. stupnja, što čini 70,7 % ukupnih slučajeva loma cijevi. To dokazuje da je kvaliteta prednapetih žica presudan čimbenik u određivanju trajnosti PCCP-a.

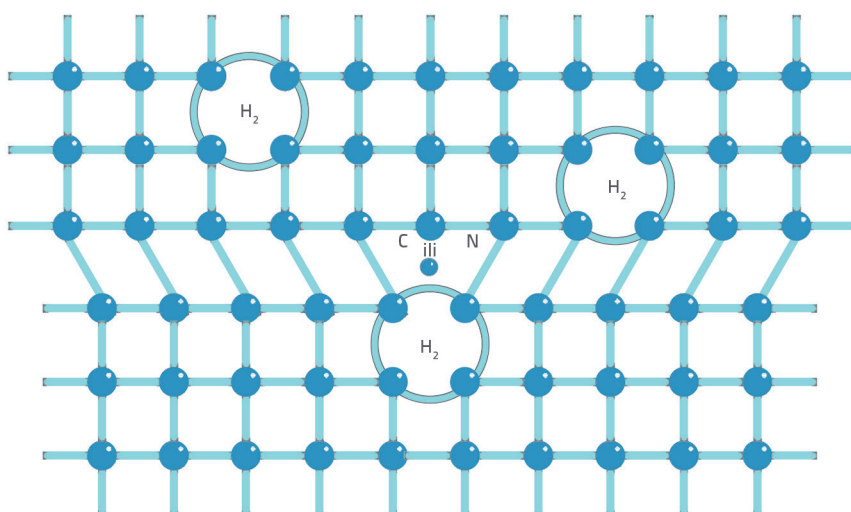
Žice za prednapinjanje omotane su oko betonske jezgre PCCP-a, što betonu jezgre omogućava da podnese pritisak, dok PCCP može izdržati znatna unutarnja i vanjska opterećenja. Kada je

Tablica 3. Referentni radovi o tvorničkim nedostacima

| Literatura                   | Čimbenici koji utječu na trajnost                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Li, J. (2018) [41]           | Glavni uzrok eksplozije u cijevi upotreba je IV. prednapete čelične žice (otvrdnjavanje naprezanjem uslijed starenja, vodikova krhkost). Ostali uzroci uključuju nepravilne utore, hidraulički udar, oštećenja koja je prouzročio čovjek i opterećenja izazvana vozilima. |
| Berrami, K. (2021) [42]      | Elektrokemijskom analizom dokazano je da primjena letećeg pepela može znatno poboljšati otpornost betona na koroziju, usporiti lomljenje žice te produljiti životni vijek cjevovoda.                                                                                      |
| Li, Y. (2022) [43]           | Sposobnost praćenja stanja strukture cjevovoda može se poboljšati ugradnjom optičkih senzora u PCCP, koji omogućuju otkrivanje i lociranje prekinutih žica u cjevovodima u stvarnome vremenu.                                                                             |
| Zarghamee, M. S. (2019) [44] | Kombinacija tehnologija BIM i GIS može znatno unaprijediti kvalitetu i učinkovitost gradnje, poboljšati kvalitetu prednapetih čeličnih žica te smanjiti konstruktivne pogreške i troškove.                                                                                |
| Driscoll, M.R. (2015) [45]   | Kombinacija tehnologija BIM i GIS može poboljšati učinkovitost integracije podataka i nadzora u stvarnome vremenu, unaprijediti kvalitetu prednapetih čeličnih žica te učinkovito predvidjeti i rješavati probleme u građevinskim projektima.                             |
| Goldstein, W. (2009) [46]    | Glavni problem PCCP-a jest povećana krhkost prednapetih čeličnih žica, što je uglavnom uzrokovano fenomenom vodikove krtosti i erozijom uzrokovanom kiselim podzemnim vodama.                                                                                             |
| Acosta, P. (2019) [47]       | Kombinacija tehnologija BIM i GIS pruža prednosti u integraciji podataka, u praćenju u stvarnome vremenu i predviđanju potencijalnih problema.                                                                                                                            |
| Brzozowski, C. (2011) [48]   | Upotreba cijevi od polietilena visoke gustoće (HDPE) za popravak PCCP-ova bez potrebe za iskopom, kao odgovor na iznenadna puknuća uzrokovana vodikovom krhkosti, pokazala se kao najisplativija metoda, čime se ostvaruje znatna ušteda novca.                           |
| Tantaeen, D. (2022) [49]     | Rad ističe primjenu naprednih tehnika pregleda poput elektromagnetskog pregleda za prepoznavanje i prioritizaciju popravaka dijelova cjevovoda koji imaju problema zbog loma prednapetih čeličnih žica, čime se sprječavaju katastrofalni ishodi.                         |
| Zhai, K. (2021) [50]         | Analizirana su mehanička svojstva PCCP-ova ojačanih polimerom armiranim ugljikovim vlaknima (CFRP). Rezultati su pokazali da tehnologija CFRP može znatno poboljšati nosivost PCCP-a i produljiti njegovu trajnost.                                                       |
| Eskridge, F. (2001) [51]     | Predlaže jedinstvenu metodu projektiranja za procjenu i optimiranje učinkovitosti različitih vrsta obloga za popravak bez potrebe za iskopom.                                                                                                                             |
| Nardini, P. (2016) [52]      | U istraživanju primijenjene su napredne tehnike detekcije poput elektromagnetske detekcije i praćenja akustičnih emisija kako bi se identificirala problematična mjesta u cjevovodu i omogućila pravodobna sanacija.                                                      |
| Donaldson, F. H. (2006) [53] | Pomoću studija slučaja rad je analizirao različite čimbenike, uključujući topografiju, uvjete tla, postojeću infrastrukturu i zahtjeve zaštite okoliša. Prikazana je sustavna metoda za procjenu i optimiranje trasiranja vodovodnih cijevi.                              |
| Engindeniz, M. (2015) [54]   | Jedinstven program procjene stanja i održavanja.                                                                                                                                                                                                                          |
| Brzozowski, C. (2014) [55]   | Primjenom naprednih tehnologija za otkrivanje propuštanja i sustava upravljanja uspješno je smanjen gubitak vode te poboljšana učinkovitost i pouzdanost cjevovodnog sustava.                                                                                             |



Slika 7. Rešetka uslijed štetnog naprezanja prednapete čelične žice



Slika 8. Atomi vodika prodiru u strukturu prednapete žičane rešetke

PCCP pod tlakom, žice za prednapinjanje pomažu apsorbirati unutarnji tlak vode i zato kvaliteta žica izravno utječe na vijek trajanja PCCP-a. Kvaliteta žica ogleda se u procesu proizvodnje. Racionalnim odabirom agregata i kontroliranjem reakcija alkalnih agregata može se osigurati kvaliteta žice [42, 43], čime se učinkovito poboljšava trajnost PCCP-a.

### 3.1.1. Analiza razloga

Izravni uzroci nekvalitetnih žica za prednapinjanje jesu štetno starenje uslijed naprezanja i vodikova krhkost [44–49]. Starenje uslijed štetnog naprezanja: Tijekom proizvodnje žica za prednapinjanje, ako monoatomske atome dušika (N) ili ugljika (C) migriraju u željeznu ravninsku strukturu i vežu se na dislokacijskim rešetkama, dolazi do fenomena poznatog kao "starenje uslijed štetnog naprezanja". Pri iskrivljenoj planarnoj strukturi željeza klizanje iskrivljene rešetke omogućuje željezu

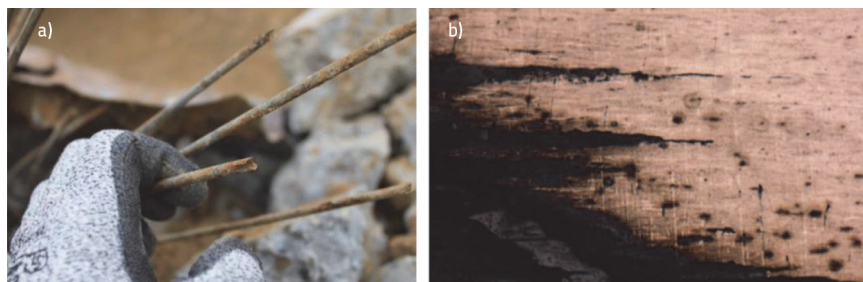
ili čeliku da stekne dobru žilavost, visoku čvrstoću i otpornost na lom. Međutim, tijekom proizvodnje žica za prednapinjanje, ako se žica prebrzo isteže, a temperatura se poveća na 316 – 371 °C bez nedovoljnog hlađenja, atomi ugljika (C) i dušika (N) mogu migrirati u strukturu željeza i blokirati dislokacije, što je prikazano na slici 7. To blokiranje dislokacija onemogućava njihovo klizanje, što dovodi do smanjene duktilnosti materijala, istezanja i skupljanja, čime žica postaje krhka i podložna lomu. Osim toga, iako ta struktura često pokazuje visoku vlačnu čvrstoću, tijekom izvlačenja postaje podložnija vodikovoj krhkosti zbog pojave te krhkosti pri visokim temperaturama i velikim brzinama.

Vodikova krhkost: Vodikova krhkost u žicama za prednapinjanje uglavnom je posljedica ulaska i vezivanja atoma vodika, koji uzrokuju pritisak na njihove mikrostrukture, što je prikazano na slici 8. Taj pritisak nastaje stvaranjem molekula vodika uslijed vezivanja atoma vodika, što izaziva pritisak rastezanjem na mikrostrukturu žice, čime se u konačnici povećava njezina sklonost krhkosti. Tu teoriju potvrdilo je više istraživačkih institucija, uključujući Battelle Memorial Institute of Columbus u Ohiju u SAD-u i Atomic Energy u Kanadi. Tri su glavna izvora vodikovih atoma odgovorna za vodikovu krhkost u katodnim sustavima za sprječavanje korozije: opća hrđa uzrokovana korozijom, elektrokemijska korozija i oslobađanje napona. Zato,

a kako bi se spriječila vodikova krhkost tijekom proizvodnje PCCP-a, neophodno je primijeniti stroge mjere kontrole, uključujući visokokvalitetne procese proizvodnje žice i pažljivo upravljanje temperaturom tijekom njezina izvlačenja. Osim toga moraju se poduzeti mjere za smanjenje ili blokiranje izvora vodikovih atoma. Također, ključno je strogo se pridržavati propisa navedenih u AWWA301-99 i ASTM A648, uz odgovarajuća ispitivanja i preglede, kako bi se osigurala kvaliteta žice koja mora udovoljavati svim standardima i koja se može primjenjivati samo kada ispunjava potrebne kriterije.

### 3.2. Čelične cijevi koje ne udovoljavaju standardima

Upotreba čeličnih cijevi koje ne udovoljavaju standardima također može negativno utjecati na trajnost PCCP-a, uključujući nepravilne radijuse čeličnih cilindara i neadekvatne specifikacije cilindara.



Slika 9. Prednapete žice na terenu i u laboratoriju [52]: a) Površina loma krte žice uočena na korodiranim žicama; b) Uzdužna pucanja i korozija usmjerena duž osi žice

Ako se nakon zavarivanja čeličnih cijevi za PCCP ne upotrebljava specijalizirana oprema za ispravljanje luka čelične cijevi na spoju preklopa [50] te se umjesto toga provodi samo ručno unutarnje hidrauličko ispitivanje tlaka, postoji rizik od pucanja cijevi. Princip je sljedeći. Nakon što se cjevovod počne koristiti, radijalni hidraulički tlak koji djeluje na unutarnju stijenu čelične cijevi ravnomjerno raspoređuje obodne sile u svim smjerovima. Međutim, zbog nepravilne, nekrugne geometrije čelične cijevi, pod utjecajem kombiniranih unutarnjih hidrauličkih i obodnih sila, čelična cijev prilagođava svoju zakrivljenost, što uzrokuje pomak i deformaciju u nekrugnim točkama. Ta deformacija stvara koncentraciju vlačnog naprezanja u vanjskome betonu čelične cijevi, što dovodi do vlačnog pucanja betona. Kako se šire pukotine, vlaga iz tla počinje prodirati u beton, čime se dodatno ubrzava korozija žica unutar čeličnog cilindra. Ti čimbenici na kraju dovode do pucanja betona, korozije žice i loma.

Upotreba čeličnih cijevi koje ne udovoljavaju odgovarajućim standardima [51], osobito kada debljina čelične cijevi nije u skladu sa zahtjevima, može dovesti do izloženosti PCCP-a unutarnjim i vanjskim pritiscima koji premašuju njegov sigurnosni prag. Takvi uvjeti mogu dovesti do pucanja cijevi. Klasičan je primjer slučaj iz 2015. kada je vodovodna služba doline Santa Clara (*Santa Clara Valley Water District – SCVWD*) otkrila puknuće u 2. presjeku cjevovoda Santa Clara na stanici 12+17 (cjevovod 126). Puknuće je bilo djelomično uzrokovano nepravilnom upotrebom 18-inčne čelične cijevi umjesto predviđenoga 16-inčne, što je dovelo do pucanja cijevi u nekim segmentima PCCP-a [52]. Na slici 9. [52] prikazano je stanje prednapete čelične žice u puknutoj cijevi.

### 3.3. Pogrešan odabir vrste cijevi

Odabir pogrešne vrste cijevi također može dovesti do pucanja cijevi u PCCP-u. Razlog je taj što različite vrste cjevovoda imaju različite količine žica za prednapinjanje, a odabir cjevovoda koji nije u skladu s propisanim standardima

može uzrokovati tlakove koji premašuju dopuštene granice, što može rezultirati ozbiljnim nezgodama. U 2006. u okrugu Baltimore, u američkoj saveznoj državi Maryland [53] provedena je procjena 48-inčnog PCCP cjevovoda smještenog na aveniji Kenilworth Avenue. Prije nego što je obavljen pregled, utvrđena su dva curenja kod toga 48-inčnog PCCP-a, a glavni dio sustava za prijenos vode pretrpio je dva velika puknuća. To je ozbiljno oštetilo cestu i okolne kuće, što je pak dovelo do zatvaranja glavne ceste Kenilworth Drive te do obustave nastave u lokalnim školama.



Slika 10. Oštećeni PCCP [53]

Na slici 10. [53] prikazan je oštećeni PCCP na kojemu su vidljive jasno uočljive pukotine u prevlaci (oblozi od morta), uz mrlje nastale uslijed korozije, dok su svi kabeli za prednapinjanje uništeni. Jedan od čimbenika koji je tome doprinio bila je upotreba tipa cjevovoda klase A za cjevovode 51 i 63 umjesto specificiranog tipa klase C. Elektromagnetsko ispitivanje i analiza provedena na mjestu nesreće pokazali su da pod radnim tlakom od 118 psi svaki dio cijevi s čak šest uzastopnih puknuća žica uzrokuje pucanje betonske jezgre cjevovoda klase A.



Slika 11. Greške u proizvodnji PCCP-a

Tablica 4. Referentni radovi koji se bave tematikom neispravne ugradnje

| Literatura                  | Uzroci oštećenja cijevi                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hassi, S. (2022.) [56]      | Glavni uzroci oštećivanja cijevi uključuju pogreške tijekom ugradnje, koroziju žice izazvanu kloridima te učinke hidrauličkog udara.                                                                                               |
| Shenkiryk, M. (2014.) [57]  | Izazovi povezani s oblogama i nosačima pojavljuju se tijekom izgradnje i provedbe projekata procjene stanja cjevovoda velikog promjera.                                                                                            |
| Marshall, J. (2014.) [58]   | Terenskim ispitivanjima i numeričkim simulacijama prikazani su učinci osnovnih uvjeta na performanse cjevovoda te su predložene odgovarajuće mjere za poboljšanje kako bi se osigurala dugoročna pouzdanost i sigurnost cjevovoda. |
| Gossett, M. D. (2012.) [59] | Eksperimentalnim i teorijskim istraživanjima analiziran je utjecaj duljine pukotine na otpornosti na razaranje PCCP-a. Uočeno je da otpornost na razaranje cjevovoda znatno opada povećanjem duljine pukotine.                     |
| WSSC Water (2009.) [60]     | Razlog je puknuća vodovodne cijevi nepravilna ugradnja. Istraživanje je pokazalo da vodovodne cijevi nisu bile postavljene prema standardnim specifikacijama, što je dovelo do konstrukcijske nestabilnosti i kasnijeg pucanja.    |
| Crook, J. (2009.) [61]      | U ovom je radu prikazana primjena horizontalno usmjerenog bušenja (HDD) za postavljanje cjevovoda u složenim geološkim uvjetima, čime se smanjuje negativan utjecaj na okoliš i poboljšava učinkovitost izgradnje.                 |
| Hassi, S. (2022.) [62]      | Glavni uzroci oštećivanja cijevi obuhvaćaju pogreške tijekom ugradnje, koroziju žice izazvanu kloridima te učinke hidrauličkog udara poput nejednačene debljine premaza.                                                           |
| Crook, J.M. (2010.) [63]    | Detaljno se raspravlja o primjerima primjene HDD-a u složenim geološkim uvjetima, osobito u izgradnji infrastrukture velikih razmjera poput zračnih luka.                                                                          |
| Chen, J. (2007.) [64]       | Loša kvaliteta gradnje i neispravni temelji dovode do neravnomjernog slijeganja.                                                                                                                                                   |

3.4. Nedovoljno ograničenje potiska

Današnji cjevovodi, posebno oni ugrađeni u meko tlo, mogu biti osjetljivi na oštećenja povezana s potiskom kao što su obodne pukotine, pucanje čeličnog cilindra i otvaranje spojeva [54, 55]. Ti problemi mogu dovesti do kvarova i ubrzane degradacije. Strukturne procjene koje se oslanjaju na betonske potisne blokove za osiguranje stabilnosti pokazuju da cjevovodi u blizini zavoja često imaju periferne pukotine s tragovima korozije. To znači da, ako dođe do pomicanja potisnog bloka na zavoju, debljina čeličnog cilindra nije dovoljna da izdrži uzdužno naprezanje. Zato je pri sanaciji tog cjevovoda potrebno obratiti pozornost ne samo na obodne učinke, već i na potisak. U budućnosti bi sličnim cjevovodima u blizini zavoja, posebno za nestanka struje, trebalo posvetiti veću pozornost. Na slici 11. sažete su prethodno navedeni nedostaci u proizvodnji.

4. Neispravna ugradnja

Na ugradnju PCCP-a znatno utječe gradnja, tijekom koje se često pojavljuju poteškoće poput nepravilnih građevinskih postupaka, nedovoljno zbijenog materijala za nasipavanje, zanemarivanja zaštite od poplava i loše kvalitete morta [56]. Svi ti čimbenici negativno utječu na sigurnost i trajnost PCCP-a. Na temelju sažetka i analize literature ključni čimbenici koji utječu na trajnost PCCP-a tijekom ugradnje uključuju neodgovarajuću podlogu i lošu ugradnju nosača, nedostatak morta ili njegovu lošu kvalitetu te nepoštivanje projektnih zahtjeva. U tablici 4.

sažeto je prikazan primarni sadržaj istraživanja rada na temu neispravne ugradnje. Konkretno, referentni radovi [57-60] bavili su se temama u vezi s ugradnjom podloga i potpora, referentni radovi [61-63] izazovima koji se odnose na mort, a rad [64] istraživao je izgradnju prema konstrukcijskim zahtjevima.

4.1. Neodgovarajuća podloga i loša ugradnja

Podloga koja nije u skladu sa standardom stvara dodatna naprezanja na beton, što uzrokuje pucanje morta [57] i povećava rizik od pasivizacije i korozije žica. U ekstremnim uvjetima kao što je postavljanje cjevovoda izravno na stijene [58] može doći do koncentriranog opterećenja na cjevovod, što znatno pogoršava lom cjevovoda. S druge strane visokokvalitetna podloga može znatno smanjiti konstrukcijske zahtjeve za čvrstoćom cjevovoda. Tipičan primjer tog problema zabilježen je 5. veljače 1999., kada je u segmentu od 24 stope glavne vodovodne linije promjera 96 inča vodoopskrbnog sustava Tucsona došlo do jakog curenja [57], pri čemu je stambena područja poplavilo 38 milijuna galona vode. Na slici 12. [57] prikazan je oštećeni PCCP. Analizom je utvrđeno da je uzrok nesreće bilo postavljanje glinenih brana oko cjevovoda za preusmjeravanje vode iz rova prema van, što je dovelo do loših uvjeta podloge. Loša ugradnja nosača također može uzrokovati nesreće na PCCP-ovima, a razlozi za neodgovarajuću potporu [59] uključuju prekomjernu dubinu pokrova izvan okvira projekta, široke roveve koji uzrokuju manju projektiranu dubinu pokrova, nedovoljnu gustoću i zbijenost tla,



Slika 12. Početak loma cijevi promjera 96 inča [57]



Slika 13. Dio na kojemu je došlo do oštećenja cijevi [63]

zanemarivanje opterećenja jakim snijegom te upotrebu materijala neprikladnih za podlogu (velike organske čestice). Jedan od većih incidenata zabilježen je 23. prosinca 2008. kada je PCCP promjera 66 inča puknuo u 8500 bloku ceste River Road, u Bethesda, u Marylandu [60]. Analizom je utvrđeno da je uzrok pucanja bila nepravilna ugradnja npodloge izvedene još 1965. Tijekom postavljanja izvođač nije uklonio kamenu masu u skladu sa zahtjevima niti je osigurao jednoliku i kontinuiranu nosivost cjevovoda dodavanjem odgovarajućeg materijala na dno rova. Umjesto toga cjevovod je položen izravno na kamenje, što je dovelo do nedostatne potpore, pojave pukotina i korozije.

#### 4.2. Nedostatak morta ili slabija kvaliteta morta

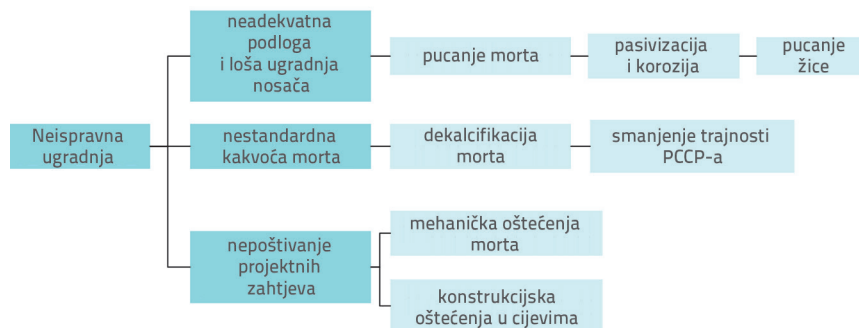
Ako spoj segmenata cijevi nije odgovarajuće zaštićen mortnim premazom [61] ili ako zbog nepravilnog miješanja morta prije ugradnje dođe do njegove dekalifikacije [62], može se smanjiti trajnost PCCP-a. Primjer takvog oštećenja zabilježen je na 48-inčnome PCCP-u ispod glavne državne autoceste u južnome dijelu Houstona, u Teksasu [63]. Na slici 13. [63] prikazan je segment cijevi koji je puknuo na vrhu, pri čemu je snažan tok vode isprao tlo ispod kolnika južnog traka ceste Alameda Road, uzrokujući ozbiljna oštećenja na prometnici. Analiza uzroka pokazala je da su uz mehanička oštećenja cjevovoda te materijale podloge i ugradnju koji nisu u skladu sa standardima ključni čimbenici bili nedostatak zaštite mortom na vanjskim spojevima cijevi te slaba ili nepostojeća zaštita unutarnjih spojeva.

#### 4.3. Nepoštivanje projektnih zahtjeva

PCCP zahtijeva precizne korake izgradnje i strogo pridržavanje smjernica za ugradnju jer nepravilni postupci izgradnje mogu negativno

utjecati na okružje. Naprimjer, nakon iskopavanja ispušnih bunara i postavljanja čeličnih cijevi potrebno je odmah izvesti daljnje radove poput pripreme podloge za armiranje betonskog ventila, postavljanja armature, ugradnje oplata i betoniranja zidova bunara. Ako se ti koraci odgode, postoji rizik od prodora vode, što može uzrokovati plutanje cijevi. Osim toga loša izvedba radova može rezultirati mehaničkim oštećenjima morta i konstrukcijskim oštećenjima cjevovoda. Na slici 14. sažeto je prikazana neispravna ugradnja PCCP-a. Naprimjer, glavni uzroci curenja koja su se dogodila u gradu Linyi, Dezhou i u sklopu projekta preusmjeravanja vode Dawenkou u gradu Tai'anu [64] u Kini bili su loša kvaliteta izvedbe radova i nepridržavanje građevinskih standarda. Konkretni razlozi bili su sljedeći:

- temelji: u područjima sa stjenovitom i glinenom podlogom u Linyiju i Tai'anu, umjesto da rov iskopaju dublje i ispune pijeskom kako bi se postigla predviđena razina, izvođači radova nisu poštovali te smjernice te je došlo do neravnomjernog slijeganja tla;
- plutajuće cijevi: uobičajene u uvjetima podzemnih voda i cijevi velikog promjera neodgovarajuće zatrpavanje ili zbijanje, dovodi do toga da je ukupna težina tla i cijevi manja od uzgona podzemne vode, što pak uzrokuje plutanje cijevi, problema koji često nastaje zbog neujednačenog zbijanja tla s obje strane cjevovoda, što dovodi do znatnoga kutnog pomaka na spojevima i rezultira ispadanjem brtve;



Slika 14. Neispravna ugradnja PCCP-a

Tablica 5. Referentni radovi koji se bave lošim radnim uvjetima

| Literatura                     | Čimbenici koji utječu na trajnost                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vidal, E. (2022.) [65]         | Raspravlja o predviđanju puknuća cjevovoda pomoću strojnog učenja. Taj pristup upotrebljava povijesne podatke za procjenu vjerojatnosti loma cjevovoda, a osmišljen je kako bi poboljšao strategije održavanja i smanjio zastoje u infrastrukturi.                                                                                                                                                                                                                         |
| Yao, Y. (2009.) [66]           | Tijekom geoloških istraživanja geotehnička tvrtka bušila je stijenu cijevi od 1,7 m od kraja spojnice cijevi, što je uzrokovalo ozbiljna oštećenja i curenje vode.                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Chen, Q.F. (2010.) [67]        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Bass, B.J. (2012.) [68]        | Stupanj korozije i loma znatno utječe na čvrstoću i trajnost cijevi. Preporučuju se poboljšane mjere nadzora i održavanja kao što su to redoviti pregledi i odgovarajući tretmani zaštite kako bi se smanjio rizik od loma.                                                                                                                                                                                                                                                |
| Ojdrovic, R. (2022.) [69]      | Istaknuta je važnost odabira materijala za cijevi, konstrukcijskog integriteta i dugoročne trajnosti. Dani su primjeri koji ilustriraju kako optimirati dizajn cjevovoda kako bi se poboljšali njegova nosivost i trajnost te smanjio rizik od loma.                                                                                                                                                                                                                       |
| Henry, G. (2021.) [70]         | U ovom su radu provedena 124 ispitivanja betonskih blokova koji su postavljeni u suhome stanju kako bi se ispitali učinci tlačne čvrstoće i metoda obrade međupovršine na strukturna svojstva betonskih blokova. Rezultati pokazuju da primjena optimirane metode obrade sučelja može znatno poboljšati tlačna svojstva betonskih blokova.                                                                                                                                 |
| Zarghamee, M.S. (2006.) [71]   | Razmatraju se metode i izazovi primjene HDD-a u morskome rezervatu Biscayne Bay.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Donnally, S. (2019.) [72]      | Istraživanje je bilo usmjereno na primjenu naprednih mikroskopskih tehnika i računalnih simulacija za analizu i predviđanje ponašanja te svojstava materijala u različitim uvjetima. Taj sveobuhvatni pristup omogućava dublje razumijevanje mikroskopskih mehanizama materijala, što vodi k optimiranju njihovog dizajna i primjene.                                                                                                                                      |
| Stroebele, A. (2010.) [73]     | Planiranje infrastrukture cjevovoda i inovativne tehnologije primijenjene u projektu poput primjene prednapetih betonskih cijevi razmatra se radi poboljšanja trajnosti i učinkovitosti sustava.                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Henderson, M.C. (2010.) [74]   | Analizirani su podaci prikupljeni tijekom pregleda te su predložene strategije za prevođenje tih podataka u učinkovit dizajn. U radu istaknuti su važni čimbenici poput čvrstoće, utjecaja na okoliš i zahtjeva za održavanjem.                                                                                                                                                                                                                                            |
| Sauer, J. (2009.) [75]         | Razmatra se primjena zračnih vrećica i tehnika za otkrivanje curenja za procjenu stanja tlačnih cjevovoda. Rezultati istraživanja pokazuju da te tehnologije mogu znatno unaprijediti učinkovitost i sigurnost u održavanju cjevovoda.                                                                                                                                                                                                                                     |
| Mak, G. (2011.) [76]           | U tome radu prikazana je izgradnja sifona za prelivanje ispod rijeke Santa Clara primjenom tehnologije mikrotuneliranja.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Santana, M.B. (2009.) [77]     | Polaganje podzemnih kabela u prometnim okružjima zračnih luka kako bi se izbjegle smetnje na površini primjenom moderne tehnologije usmjerenog bušenja.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Yurcich, R. (2021.) [78]       | Istraživanje je bilo usmjereno na učinkovitost različitih tehnika armiranja, uključujući kombinaciju temeljnih stupova i geosintetike, primjenjujući numeričke simulacije i eksperimentalne analize. Te tehnike mogu znatno smanjiti slijeganje nasipa i poboljšati stabilnost konstrukcije.                                                                                                                                                                               |
| Pozos-Estrada, O. (2016.) [79] | Istraživanja su pokazala da PCCP puca uslijed prisutnosti zračnih vrećica nakon nestanka struje u sustavu pumpi. Simulacija hidrauličkih prijelaza u različitim scenarijima potvrdila je da mali volumen zračne vrećice izravno uzrokuje pucanje PCCP-a. Hidraulički model također je primijenjen za analizu utjecaja zračnog jastuka na visokoj točki cjevovoda, čime je dokazano da mali volumen zračnog jastuka znatno povećava vršni tlak, što rezultira lomom cijevi. |

c) mehaničko nasipavanje: izvođač radova nije primijenio propisane metode zatrpavanja, zbog čega je cjevovod oštećen.

5. Loši radni uvjeti

Loši radni uvjeti mogu smanjiti trajnost PCCP-a. Prema literaturi, glavni čimbenici koji utječu na loše radne uvjete PCCP-a uključuju oštećenja izazvana trećim stranama, probleme s unutarnjim tlakom i stvaranje zračnih jastuka. U tablici 5. sažeto je prikazan primarni sadržaj radova na temu loših radnih uvjeta. Konkretno,

radovi [65-70] bavili su se temama vezanima uz oštećenja uzrokovana trećim stranama, radovi [71-75] istraživali su probleme povezane s unutarnjim tlakom, dok su radovi [76-79] analizirali izazove vezane uz zračne džepove.

5.1. Oštećenja koja su uzrokovala treće strane

Oštećenja uzrokovana trećim stranama odnose se na oštećenja koja su prouzročili fizičke osobe ili subjekti i koja nisu povezana s PCCP-ovima i često su nasumične i neizvjesne prirode. To može uključivati čimbenike kao što su

nepropisno i nepravilno iskopavanje koje rezultira slučajnim curenjem, prekomjerna vanjska opterećenja [65] i bušenje ili probijanje stijenke cijevi [66-69]. Naprimjer, godine 2007. tijekom pregleda u Houstonu, u Teksasu primijećeno je da je napuknuo PCCP vodovod na dijelu cijevi MK#242 [70]. Ispitivanjem je otkriveno da je glavni uzrok štete bilo oštećenje koje je uzrokovala treća strana. Naime, taj je dio cijevi postavljen samo dvije stope ispod cijevi za oborinsku vodu, a konstrukcija cijevi za oborinsku vodu uzrokovala je pukotine u dijelu PCCP-a.

## 5.2. Problemi povezani s unutarnjim tlakom

Nagle promjene unutarnjeg i vanjskog tlaka mogu uzrokovati lom PCCP-a. Znatne promjene u tlaku mogu uzrokovati mnogi čimbenici, uključujući:

- Automatsko upravljanje ventilima cjevovoda mjeracem vremena [71], ako je brojač pogreškom postavljen na zadanu vrijednost od 1 minute i nije ispravno prilagođen tijekom rada, dovodi do prebrzog zatvaranja ventila, što uzrokuje znatne promjene u tlaku unutar cjevovoda i naposljetku oštećivanje cijevi.
- Iznenadni prekidi napona iz vanjskih izvora uzrokuju prestanak rada pumpe [72], što dovodi do gubitka tlaka unutar cjevovoda. Kada se napon ponovno uspostavi, dolazi do promjena u tlaku, što dovodi do nesreća.
- Tijekom ponovnog punjenja nakon održavanja vodoopskrbe unutar cjevovoda dolazi do znatnih promjena u tlaku uslijed učinaka hidrauličkog udara [73].
- Ograničenje upotrebe sustava raspršivanja koji uzrokuje promjene u tlaku unutar vodoopskrbnog sustava [74], čime se stvara dodatni pritisak na stare cjevovode.
- Visoke brzine protoka u sustavima rashladne vode elektrana uz učestala otvaranja i zatvaranja ventila mogu dovesti do velikih promjena u tlaku unutar cjevovoda, što može oštetiti cijevi [75].

## 5.3. Zračni džepovi

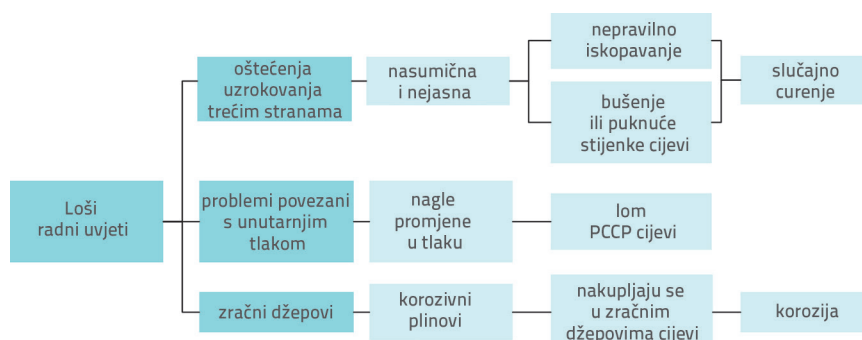
Osim u cjevovodima za vodoopskrbu PCCP-ovi se često upotrebljavaju i u cjevovodima za otpadne vode. Tijekom transporta otpadnih voda mogu se oslobađati korozivni plinovi poput sumporovodika, uzrokovani čimbenicima kao što su temperatura i brzina protoka. Pod uobičajenim se okolnostima ti plinovi ispuštaju kroz ventile za ispuštanje zraka PCCP-a. Međutim, ako su ti ventili oštećeni i onemogućuju ispuštanje plinova, mogu se nakupljati u zračnim džepovima na vrhu cijevi. Nakon

kondenzacije plinovi se mogu zalijepiti za unutarnje stijenke cijevi i uzrokovati njihovu koroziju [76-79], što može negativno utjecati na dugovječnost i trajnost PCCP-a.

Naprimjer, godine 1999. došlo je do loma segmenta cjevovoda za opadne vode promjera 1350 mm u Regini, u Saskatchewanu, u Kanadi. [76]. Rezultati unutarnjeg pregleda provedenog u 2008. pokazali su da je uzrok nesreće neodgovarajući dizajn unutarnjeg toka cjevovoda. Poremećaj uvjeta protoka doveo je do prelaska iz superkritičnog u subkritični režim, što je uzrokovalo turbulencije. Cjevovodom je prolazila otpadna voda s velikim udjelom sumporovodika, a u turbulentnim uvjetima ubrzan je prelazak sumporovodika iz tekućeg u plinovito stanje. To je dovelo do znatnog nakupljanja sumporovodika na vrhu cijevi, što je pak uzrokovalo koroziju unutarnje betonske površine cijevi, a na kraju i puknuće cjevovoda. Na slici 15. [76] prikazani su površinska korozija i izloženi agregati, a na slici 16. sažeti su prethodno navedeni loši radni uvjeti.



Slika 15. Površinska korozija i izloženi agregati [76]



Slika 16. Loši radni uvjeti PCCP-a

## 6. Zaključak

PCCP je temeljna i ključna komponenta vodoopskrbnih sustava, a njegova trajnost usko je povezana s kvalitetom i stabilnosti vodoopskrbe. Na trajnost PCCP-a utječe nekoliko čimbenika: kemijska korozija, uključujući sulfatnu agresivnost, karbonatizacija i prodiranje kloridnih iona, proizvodni nedostaci, uključujući nestandardne čelične žice za prednapinjanje, neprikladne čelične cijevi, pogrešan odabir vrste PCCP cijevi i nedovoljno ograničenje potiska, neispravna ugradnja, koja uključuje lošu podlogu, nedostatak morta ili lošu kakvoću morta te nepridržavanje projektnih specifikacija, i operativne probleme kao što su oštećenja koja su uzrokovala treće strane, zračni džepovi i problemi s unutarnjim tlakom.

Detaljno istraživanje čimbenika koji utječu na trajnost PCCP-a pokazuje da je PCCP vrlo učinkovit cjevovod za prijenos vode velikog promjera. Kako bi se povećala trajnost PCCP-a, trebalo bi poboljšati materijale, ugradnju i održavanje.

Što se tiče materijala, sastav cementnoga klinkera može se prilagoditi, naprimjer, smanjenjem udjela  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  te povećanjem gustoće betona kako bi se učinkovitije spriječio pucanje uzrokovano sulfatnom degradacijom. Kontroliranje vodocementnog omjera i upotreba odgovarajućih dodataka može poboljšati otpornost na karbonatizaciju i usporiti taj proces. Osim toga upotreba visokokvalitetnih antikoroziivnih premaza i primjena dodataka protiv prodiranja klorida u beton mogu učinkovito zaštititi armaturu i prednapete čelične žice. Proizvodnja prednapetih čeličnih žica treba biti strogo kontrolirana kako bi se spriječili vodikova krhkost i štetno starenje uslijed naprezanja, čime se osigurava kvaliteta žica. Za proizvodnju čeličnih cilindara treba primjenjivati odgovarajuće specifikacije i jednolike radijuse luka kako bi se izbjegli rani lomovi uzrokovani neodgovarajućim specifikacijama ili problemima povezanim s kvalitetom zavarivanja.

Tijekom ugradnje potrebno je osigurati odgovarajuću kvalitetu podloge i potpore kako bi se spriječila konstrukcijska oštećenja uzrokovana lošom ugradnjom.

Održavanje PCCP-ova treba uključivati pojačane mjere praćenja i zaštite kako bi se spriječila šteta od vanjskih čimbenika poput građevinskih iskopa i teških vozila. Ispravno upravljanje

unutarnjim i vanjskim promjenama u tlaku u cjevovodu može spriječiti pucanje uzrokovano naglim promjenama tlaka. Redovite provjere i održavanje zračnih ventila neophodni su za sprječavanje nakupljanja korozivnih plinova na vrhu cjevovoda, čime se omogućuje neometano ispuštanje plinova.

U primjeni čimbenici koji utječu na trajnost PCCP-a složeni su i opsežni, a neka ključna tehnička područja i dalje zahtijevaju daljnja istraživanja.

PCCP-ovi često gube svoju trajnost u kiselim uvjetima. U beton bi trebalo dodati odgovarajuće dodatke koji će blokirati ili odgoditi prodiranje kiselih tvari, čime će se povećati njegova otpornost na kiselu eroziju. Također treba istražiti legure čeličnih žica kako bi se utvrdile optimalne metode za prednapete strukture, a kako bi se poboljšala njihova otpornost na koroziju i vodikovu krhkost. S obzirom na radno okruženje cjevovoda, potrebno je unaprijediti sastav površinskih premaza unutar cijevi i izvan njih. Zbog vrlo lužnate prirode betona potrebno je osigurati otpornost na lužine. Na temelju otpornosti na lužine trebali bi se upotrebljavati materijali s boljom adhezijom i većom razinom otpornosti na koroziju poput epoksidnih premaza. To površinu cjevovoda čini manje osjetljivom na koroziju, čime se produljuje njegova trajnost.

Zavoji u PCCP-ovima izloženi su velikim uzdužnim naprezanjima. Trebalo bi provesti detaljnija istraživanja o najvećemu uzdužnom naprezanju u zavojsima pod različitim specifikacijama cjevovoda, kutovima savijanja i tekućinama te uspostaviti odgovarajuće modele. To pruža teorijsku potporu za iduća istraživanja novih konstrukcija PCCP-a.

U praktičnoj primjeni PCCP-ovi mogu naići na poteškoće poput loma prednapetih čeličnih žica, promjena u unutarnjemu tlaku i curenja na stijenka cijevi. Preporučuje se ispitivanje PCCP-a bez razaranja. Također, na PCCP treba biti postavljeno distribucijsko optičko vlakno kako bi se razvili odgovarajući modeli, a podaci s optičkog vlakna trebaju se upotrijebiti za praćenje operativnog statusa cjevovoda.

## Zahvala

Ovo istraživanje podržao je program *National Key Program of Science and Technology* u Kini (2022YFC3203802).

## LITERATURA

- [1] Dinges, T.: The history of prestressed concrete: 1888 to 1963, 2009.
- [2] Zhang, Q.J.: Analysis of corrosion and protection of PCCP, *Water conservancy construction and management*, (2015) 6, pp. 73-75
- [3] Ferkous, H., Delimi, A., Kahlouche, A., Boulechar, C., Djellali, S., Belakhdar, A., Benguerba, Y.: Electrochemical and computational approaches of polymer coating on carbon steel X52 in different soil extracts, *Polymers*, 14 (2022) 16, p. 3288
- [4] Ma, H., Zhao, B., Liu, Z., Du, C., Shou, B.: Local chemistry-electrochemistry and stress corrosion susceptibility of X80 steel below disbonded coating in acidic soil environment under cathodic protection, *Construction and Building Materials*, 243 (2020), p. 118203
- [5] Ma, X.Z., Meng, L.D., Cao, X.K., Zhang, X.X., Dong, Z.H.: Investigation on the initial atmospheric corrosion of mild steel in a simulated environment of industrial coastland by thin electrical resistance and electrochemical sensors, *Corrosion Science*, 204 (2022), Paper 110389

- [6] Hassi, S., Ebn Touhami, M., Ejbouh, A., Berrami, K., Boujad, A., Ech-chebab, A.: Case study of the performance of prestressed concrete cylinder pipes in Northeastern Morocco, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12 (2021) 2, Paper 05021001, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000534](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000534)
- [7] Hassi, S., Ejbouh, A., Ebn Touhami, M., Berrami, K., Ech-chebab, A., Boujad, A.: Performance of prestressed concrete cylinder pipe in North Africa: Case study of the water transmission systems in the Tafilalet region of Morocco, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12 (2021) 2, Paper 05021002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000519](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000519)
- [8] Hassi, S., Touhami, M. E., Boujad, A., & Benqilou, H.: Assessing the effect of mineral admixtures on the durability of Prestressed Concrete Cylinder Pipe (PCCP) by means of electrochemical impedance spectroscopy, *Construction and Building Materials*, 262 (2020), Paper 120925, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120925>
- [9] Cui, L.Y., Liu, Z.Y., Xu, D. K., Hu, P., Shao, J.M., Du, C.W., Li, X.G.: The study of microbiologically influenced corrosion of 2205 duplex stainless steel based on high-resolution characterization, *Corrosion Science*, 174 (2020), Paper 108842
- [10] Liu, H., Meng, G., Li, W., Gu, T., Liu, H.: Microbiologically influenced corrosion of carbon steel beneath a deposit in CO<sub>2</sub>-saturated formation water containing *Desulfotomaculum nigrificans*, *Frontiers in microbiology*, 10 (2019), Paper 1298
- [11] Jana, D., Lewis, R.A.: Acid attack on PCCP mortar coating, *Pipeline Engineering and Construction: What's on the Horizon?*, (2004), pp. 1-10, [https://doi.org/10.1061/40745\(146\)30](https://doi.org/10.1061/40745(146)30)
- [12] Thiebaut, Y., Multon, S., Sellier, A., Lacarrière, L., Boutillon, L., Belili, D., Hadji, S.: Effects of stress on concrete expansion due to delayed ettringite formation, *Construction and Building Materials*, 183 (2018), pp. 626-641, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.172>
- [13] Nixon, R.A.: Conducting precast concrete cylinder pipe condition assessment by matching corrosion damage mechanisms to diagnostic methods, *IAMPP CORROSION, AMPP*, 2022., Paper D041S045R003
- [14] Leach, D.G., Wang, W., Yan, C., Mattis, D., MacLeod, R., Wei, W.: Molecular deep dive into oilfield microbiologically influenced corrosion: A detailed case study of MIC failure analysis in an unconventional asset, *AMPP CORROSION, AMPP*, 2022., Paper D031S027R002
- [15] Kiliswa, M.W., Scrivener, K.L., Alexander, M.G.: The corrosion rate and microstructure of Portland cement and calcium aluminate cement-based concrete mixtures in outfall sewers: A comparative study, *Cement and Concrete Research*, 124 (2019), Paper 105818, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105818>
- [16] Peitao, Q., Lianying, Z., Yan, L., Bing, L., Jiong, Z., Chao, M., Xiaoxi, B., Yang, Y.: Permeability evolution model of coarse porous concrete under sulphuric acid corrosion, *Construction and building materials*, 326 (2022), pp. 126475-126475
- [17] Dabao, F., Chang, X., Song, X., Chao, Z., Xiaojuan, J.: Effect of concrete composition on drying shrinkage behavior of ultra-high performance concrete, *Journal of Building Engineering*, 62 (2022).
- [18] Xun, W., Muhammad Junaid, M., Yu-Fei, W.: Effect of mix design parameters on the behavior of compression cast concrete, *Journal of Building Engineering*, 76 (2023), pp. 107399-107399
- [19] Zhongya, Z., Xiaoguang, J., Wei, L.: Long-term behaviors of concrete under low-concentration sulfate attack subjected to natural variation of environmental climate conditions, *Cement and Concrete Research*, 116 (2019), pp. 217-230
- [20] Ai, Z., Yong, G., Sen, D., Guangzhi, W., Xin, C., Xu, L., Hebin, L.: Durability effect of nano-SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on cement mortar subjected to sulfate attack under different environments, *Journal of Building Engineering*, 64 (2023), pp. 105642-105642
- [21] Liang, Y.S.: Inner wall corrosion and control method of prestressed steel tube concrete pipe, *Corrosion science and protection technology*, 25 (2013) 4, pp. 339-342
- [22] He, Q.K.: Multiple anti-corrosion measures for prestressed steel tube concrete pipe, *Technology and enterprise*, 24 (2015), Paper 123
- [23] Zhao, M.Y.: Analysis of corrosion mechanism of chloride on prestressed steel tube concrete, *Heilongjiang water science and technology*, (2011) 1, pp. 87-88
- [24] Wang, X.D.: Soil corrosivity evaluation based on regression analysis, *Inner Mongolia petrochemical industry*, 40 (2014) 16, pp. 3-4
- [25] Chu, X.Y.: Corrosion and cathodic protection of prestressed steel tube concrete pipeline in Sanwan water conservancy project, *Corrosion and protection*, 33 (2012) 5, pp. 444-447
- [26] Podhajecky, A.L., Oneschkow, N., Kern, B., Lohaus, L., Müller, H.S., Haist, M.: Influence of initial moisture content on creep and shrinkage of concrete at constant and cyclic ambient humidity, *Materials and Structures*, 56 (2023) 9, Paper 170, <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02254-1>
- [27] Dianchao, W., Takafumi, N., Takahito, N., Yasuhide, H.: Investigation of the carbonation performance of cement-based materials under high temperatures, *Construction and building materials*, (2021), Paper 272
- [28] Zuhua, X., Zhixin, Z., Jiansheng, H., Kaifeng, Y., Guanming, Z., Fuzi, C., Xunyang, C., Wengen, Y., Yaocheng, W.: Effects of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration on carbonation of cement-based materials: A review, *Construction and building materials*, (2022), Paper 346
- [29] Peng, L., Zhiwu, Y., Ying, C.: Carbonation depth model and carbonated acceleration rate of concrete under different environment, *Cement & concrete composites*, (2020), Paper 114
- [30] Lee, H.M., Lee, H.S., Min, S.H., Lim, S., Singh, J.K.: Carbonation-induced corrosion initiation probability of rebars in concrete with/without finishing materials, *Sustainability*, 10 (2018) 10, Paper 3814
- [31] Yu, F., Zhishu, Y., Xinwei, L., Yongjie, X., Xianwen, H.: Durability of reactive powder concrete of drilling shaft and triaxial compression damage constitutive model under composite salt erosion, *Journal of Building Engineering*, 62 (2022).
- [32] Ye, Y., Wenhua, Z., Guowen, S., Yu, W., Fan, W., Yunsheng, Z.: Study on the effect of mineral admixture on the water stability of UHPC under long-term immersion, *Construction and building materials*, 380 (2022), pp. 131276-131276
- [33] Tianyu, L., Xin, S., Fangying, S., Zheng, Z., Dezhi, W., Huiwen, T., Xiaoyan, L., Xunhuan, L., Tengfei, B., Baorong, H.: The mechanism of anticorrosion performance and mechanical property differences between seawater sea-sand and freshwater river-sand ultra-high-performance polymer cement mortar (UHPC), *Polymers*, 14 (2022) 15, pp. 3105-3105
- [34] Hongtao, C., Yi, Z., Dongyuan, K., Zhonglong, L., Shunlong, L.: Chloride ion erosion of pre-stressed concrete bridges in cold regions, *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4 (2023) 1, pp. 1-15
- [35] Wei, L., Baojun, D., Longjun, C., Tianyi, Z., Fan, Y., Yonggang, Z., Hai, L., Weijian, Y., Yipu, S.: Unraveling the effect of chloride ion on the corrosion product film of Cr-Ni-containing steel in tropical marine atmospheric environment, *Corrosion Science*, 209 (2022), pp. 110741-110741

- [36] Danqian, W., Yanfei, Y., Zhichao, X., Tangwei, M., Siyu, Y., Colum, M., Jueshi, Q., Yun, B.: Chloride-induced depassivation and corrosion of mild steel in Magnesium Potassium Phosphate cement, *Corrosion Science*, 206 (2022).
- [37] Yongqi, L., Jinjie, S.: Corrosion resistance of carbon steel in alkaline concrete pore solutions containing phytate and chloride ions, *Corrosion Science*, 205 (2022).
- [38] Lin, Z., Chunpeng, Z., Yujun, L., Jiajia, X., Jinhua, S., Qingsong, W.: Electrochemical performance and thermal stability of Lithium-Ion batteries after immersion, *Corrosion Science*, 184 (2021).
- [39] Pin, D., Dongxu, L., Xiang, C., Hongwei, X., Xin, Q., Dihua, W., Huayi, Y.: Research progress towards the corrosion and protection of electrodes in energy-storage batteries, *Energy storage materials*, 57 (2023), pp. 371-399
- [40] Hu, Y., Hu, S., Li, W., Wang, X.: A time-variant model of chloride diffusion in prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) considering the effects of curing age, *Construction and Building Materials*, 368 (2023), Paper 130411, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130411>
- [41] Li, J.: Failure depth analysis of foreign PCCP pipe applications and suggestions for domestic application, *Water conservancy planning and design*, 4 (2018), pp. 69-74
- [42] Berrami, K., Ech-chebab, A., Galai, M., Ejbouh, A., Hassi, S., Benqlilou, H., Touhami, M.E.: Evaluation of fly ash effect on the durability of prestressed concrete cylindrical pipe in aggressive soil by electrochemical method, *Chemical Data Collections*, 32 (2021), Paper 100656, <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2021.100656>
- [43] Li, Y., Sun, K., Si, Z., Chen, F., Tao, L., Li, K., Zhou, H.: Monitoring and identification of wire breaks in prestressed concrete cylinder pipe based on distributed fiber optic acoustic sensing, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, (2022), pp. 1-12, <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00605-0>
- [44] Zarghamee, M.S., Moharrami, M., Jalber, C., Gehrig, J.: A study of life extension of two prestressed concrete cylinder pipelines, *Pipelines*, (2019), pp. 522-534, <https://doi.org/10.1061/9780784482490.056>
- [45] Driscoll, M.R., Hussam, T.N.: Minimizing the risk of catastrophic failure of PCCP in the City of Baltimore, *Pipelines*, (2015), pp. 1608-1619, <https://doi.org/10.1061/9780784479360.148>
- [46] Goldstein, W.: WSSC endangers us by failing to confront the PCCP problem, *Maryland Politics Watch*, 2009., <http://maryland-politics.blogspot.com/2009/01/wssc-endangers-us-byfailing-to.html>, [16.3.2024.]
- [47] Acosta, P., Nardini, P.D., Ojdrovic, R.P., Pridmore, A.: Not failing on my watch: Tucson water's proactive approach to pipeline reliability, *Pipelines*, (2019), pp. 257-264, <https://doi.org/10.1061/9780784482490.027>
- [48] Brzozowski, C.: Prestressed Pipe Deterioration Prompts Large Utility to Seek Effective, Cost-efficient Approach, <https://waterfm.com/prestressed-pipe-deterioration-prompts-large-utility-to-seek-effective-costefficient-approach/>, [16.3.2024.]
- [49] Tantaean, D., Brown, K.: Case Study-Major PCCP Failures in the West, their causes, and why they wouldn't happen today, *Pipelines*, 2022., pp. 102-111, <https://doi.org/10.1061/9780784484272.013>
- [50] Zhai, K., Fang, H., Guo, C., Fu, B., Ni, P., Ma, H., Wang, F.: Mechanical properties of CFRP-strengthened prestressed concrete cylinder pipe based on multi-field coupling, *Thin-Walled Structures*, 162 (2021), Paper 107629, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107629>
- [51] Eskridge, F., Parkins, P.: Design and construction of a parallel 64-inch water transmission main, *Pipelines: Advances in Pipelines Engineering and Construction*, (2001), pp. 1-5, [https://doi.org/10.1061/40574\(2001\)63](https://doi.org/10.1061/40574(2001)63)
- [52] Nardini, P., Ojdrovic, R., Pridmore, A.: Silicon Valley mid-summer emergency: Santa Clara addresses the peak-demand repair of a 96-inch pipeline, *Pipelines*, (2016), pp. 1810-1819, <https://doi.org/10.1061/9780784479957.168>
- [53] Donaldson, F.H., Dilego, T.J., Higgins, M.S., Padewski, E.A., Peluso, J.S.: Assessing and managing PCCP water transmission mains, Baltimore County, Maryland-A Case Study, *Pipelines: Service to the Owner*, (2006), pp. 1-8, [https://doi.org/10.1061/40854\(211\)9](https://doi.org/10.1061/40854(211)9)
- [54] Engindeniz, M., Zarghamee, M., Crosby, K., Cluff, B.: A repair program to minimize failure risk of highly distressed PCCP circulating water lines, *Pipelines*, (2015), pp. 978-988, <https://doi.org/10.1061/9780784479360.090>
- [55] Brzozowski, C.: Prestressed Pipe Deterioration Prompts Large Utility to Seek Effective, Cost-efficient approach, [https://www.tpomag.com/editorial/2014/05/clamping\\_down\\_on\\_leaks\\_wso](https://www.tpomag.com/editorial/2014/05/clamping_down_on_leaks_wso), [17.3.2024.]
- [56] Hassi, S., Ebn Touhami, M., Menu, B., Benqlilou, H., Ejbouh, A.: Case study of the performance of prestressed concrete cylinder pipes in Northeastern Morocco, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 13 (2022) 2, pp. 05022002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000636)
- [57] Shenkiryk, M., Klein, B., Stroebele, A., Franchuk, S.: Tucson Water's homegrown condition assessment of PCCP, *Pipelines: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability*, (2014), pp. 146-158, <https://doi.org/10.1061/9780784413692.013>
- [58] Marshall, J., Fisk, P.S., Fontaine, L.E.: Detecting the effects of inadequate PCCP bedding, *Pipelines: From underground to the forefront of innovation and sustainability*, (2014), pp. 175-184, <https://doi.org/10.1061/9780784413692.016>
- [59] Gossett, M.D., Bell, G.E., Fox, S.R., Bushdiecker, K.R., Pousard, Jr, R.: PCCP condition assessment methodology: What is right for you?, *Pipelines: Innovations in design, construction, operations, and maintenance, doing more with less*, (2012), pp. 339-344, <https://doi.org/10.1061/9780784412480.031>
- [60] WSSC Water: Forensic analysis links river road water main rupture to improper installation 44 years ago, <https://www.wsscwater.com/news/2015/january/forensic-analysis-links-river-road-water-main-rupture-improper-installation-44>, [17.3.2024.]
- [61] Crook, J., Henry, G.J.: The need to proceed: Condition assessment of 60-Inch PCCP in Houston, Texas, *Pipelines: Infrastructure's Hidden Assets*, (2009), pp. 151-159, [https://doi.org/10.1061/41069\(360\)15](https://doi.org/10.1061/41069(360)15)
- [62] Hassi, S., Ebn Touhami, M., Menu, B., Benqlilou, H., Ejbouh, A.: Case study of the performance of prestressed concrete cylinder pipes in Northeastern Morocco, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 13 (2022) 2, pp. 05022002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000636)
- [63] Crook, J.M., Henry, G.: An unexpected Christmas present: Failure of a 48-inch waterline, *Pipelines: Climbing new peaks to infrastructure reliability: Renew, rehab, and reinvest*, (2010), pp. 558-565, [https://doi.org/10.1061/41138\(386\)54](https://doi.org/10.1061/41138(386)54)
- [64] Chen, J.: Several problems in the design and construction of large diameter prestressed reinforced concrete pipeline water transmission project, *Journal of Shandong Agricultural University: Natural science edition*, 38 (2007) 2, pp. 304-306

- [65] Vidal, E., Khorsha, G., Afshar, M., Zhao, K.: Keeping an eye and an ear on the big inch, *Pipelines*, (2022), pp. 247-257, <https://doi.org/10.1061/9780784484289.029>
- [66] Yao, Y.: Local drilling damage repair of large size prestressed steel tube concrete pipe, *Shanxi water resources*, 25 (2009) 3, pp. 52-53
- [67] Chen, Q.F.: Emergency repair treatment of PCCP pipeline accident in yellow diversion section, *Science and technology information development and economy*, 12 (2010), pp. 219-220
- [68] Bass, B.J., Ojdovic, R.P., Haemmerle, B.M.: Repair of a punctured 48: diameter prestressed concrete cylinder pipe on a sixty degree slope, *Pipelines: Innovations in design, construction, operations, and maintenance - doing more with less*, (2012), pp. 816-826, <https://doi.org/10.1061/9780784412480.075>
- [69] Ojdovic, R., Garg, P.: Emergency reconstruction of failed pipes, *Pipelines*, (2022), pp. 19-26, <https://doi.org/10.1061/9780784484296.003>
- [70] Henry, G., Larsen, M., Sekhon, S.: Minimizing Shut Down during Repair of PCCP, *Pipelines*, (2021), pp. 407-415, <https://doi.org/10.1061/9780784483626.045>
- [71] Zarghamee, M.S., Ojdovic, R.P.: Some lessons learned from failure of a pipeline, *Pipelines: Service to the Owner*, (2006), pp. 1-9, [https://doi.org/10.1061/40854\(211\)37](https://doi.org/10.1061/40854(211)37)
- [72] Donnally, S., Caldwell, J., King, T., Wood, B.: Changing gears in the Motor City: A case study on Great Lakes Water Authority's shift to proactive pipe management, *Pipelines*, (2019), pp. 207-213, <https://doi.org/10.1061/9780784482483.023>
- [73] Stroebele, A., Bell, G.E., Paulson, P.O.: PCCP damage during depressurization/pressurization cycles, *Pipelines 2010: Climbing new peaks to infrastructure reliability: renew, rehab, and reinvest*, (2010), pp. 701-710, [https://doi.org/10.1061/41138\(386\)68](https://doi.org/10.1061/41138(386)68)
- [74] Henderson, M.C., Lattu, L.K., Sukuru, S.: The logistics of large diameter waterline shutdowns, *Pipelines: Climbing new peaks to infrastructure reliability: renew, rehab, and reinvest*, (2010), pp. 1554-1563, [https://doi.org/10.1061/41138\(386\)151](https://doi.org/10.1061/41138(386)151)
- [75] Sauer, J., Farnsworth, D., Schwartz, P., Jorgenson, R., Stong, T.: Assessment of economic risk in the repair and replacement of prestressed concrete cylinder pipe used in the circulating water system at Great River Energy's Coal Creek Station, *Pipelines: Infrastructure's hidden assets*, (2009), pp. 1226-1231, [https://doi.org/10.1061/41069\(360\)115](https://doi.org/10.1061/41069(360)115)
- [76] Mak, G.: Internal PCCP force main deterioration-Analysis and rehabilitation, *Pipelines: A Sound conduit for sharing solutions*, (2011), pp. 395-404, [https://doi.org/10.1061/41187\(420\)37](https://doi.org/10.1061/41187(420)37)
- [77] Santana, M.B., Padewski, E.A.: Getting the most out of a test pit program for a preliminary investigation on the Puerto Nuevo effluent pipeline, *Pipelines: Infrastructure's hidden assets*, (2009), pp. 316-327, [https://doi.org/10.1061/41069\(360\)30](https://doi.org/10.1061/41069(360)30)
- [78] Yurcich, R., Cernic, E., Caughlin, D., Ojdovic, R.: Emergent rehabilitation of a critically deteriorated force main for New Castle County, Delaware, *Pipelines*, (2009), pp. 103-111, <https://doi.org/10.1061/9780784483626.012>
- [79] Pozos-Estrada, O., Sánchez-Huerta, A., Breña-Naranjo, J.A., Pedrozo-Acuña, A.: Failure analysis of a water supply pumping pipeline system, *Water*, 8 (2016) 9, Paper. 395, <https://doi.org/10.3390/w8090395>