

Primljen / Received: 30.3.2023.

Ispravljen / Corrected: 21.7.2023.

Prihvaćen / Accepted: 23.8.2023.

Dostupno online / Available online: 10.10.2023.

Utjecaj klimatskih promjena na trajnost mostova i druge infrastrukture

Autori:



Petra Milić, mag.ing.aedif.
BBR Adria, Hrvatska
petramilic7@gmail.com



Doc.dr.sc. **Marija Kušter Marić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
marija.kuster.maric@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju

Pregledni rad

Petra Milić, Marija Kušter Marić

Utjecaj klimatskih promjena na trajnost mostova i druge infrastrukture

Klimatske promjene imaju značajan utjecaj na konstrukcije koji će u budućnosti biti još veći, naročito za mostove i drugu stratešku infrastrukturu dužeg uporabnog vijeka izloženu agresivnom okolišu. U radu je prikazana projekcija klimatskih promjena u Hrvatskoj za razdoblje do 2040. odnosno 2070. godine s mogućim posljedicama na mostove i druge građevine. Kroz pregled rezultata znanstvenih istraživanja prikazan je utjecaj klimatskih promjena na trajnost i seizmički kapacitet betonskih konstrukcija te na djelovanja na građevine. Istraživanje utjecaja klimatskih promjena na konstrukcije i njihovo bolje razumijevanje omogućit će i razvijanje prilagodbe na buduće uvjete, ne samo pri projektiranju novih konstrukcija, već i za adekvatno održavanje postojećih, kao i postupke pri sanacijama, renovacijama i sl.

Ključne riječi:

klimatske promjene, trajnost konstrukcija, seizmički kapacitet, korozija armature

Subject review

Petra Milić, Marija Kušter Marić

Climate change effect on durability of bridges and other infrastructure

Climate change has significant impacts on structures, which will continue to increase in the future, particularly bridges and other strategic infrastructure with longer service life exposed to aggressive environments. In this paper, a projection of climate change for Croatia for periods up to 2040 and up to 2070 is presented with potential impacts on bridges and other structures. By reviewing scientific research results, the impact of climate change on the durability and seismic capacity of concrete structures as well as effects on loads on structures is presented. Research into and a better understanding of the effects of climate change on structures will enable the development of adaptation measures to future conditions, not only in the design of new structures, but also in the appropriate maintenance of existing structures, as well as in procedures for rehabilitation, renovation, etc.

Key words:

climate change, durability of structures, seismic capacity, reinforcement corrosion

1. Uvod

U ljeto 2021. godine zabilježena je najveća temperatura u Europi otkad postoje mjerenja (Floridija, Italija: 48,8 °C dana 11.8.2021.) [1]. Rekordne temperature, i do 50°C, bilježene su i u Kanadi, uz veliki broj ljudskih žrtava. Ljeto 2022. bilo je najtoplije ikada u Europi [2]. Afrički kontinent je proživljavao najveći period suše u zadnjih 40 godina, a iz istog razloga mnoge države svijeta uvodile su restriktivne mjere korištenja vode [3]. Za Veliku Britaniju prvi je put izdano crveno upozorenje tijekom toplinskog vala, a zbog ekstremnih temperatura zabilježene su i deformacije željezničkih tračnica [1]. S druge strane, države srednje Europe pogodile su razorne poplave prouzročivši štete i uništenja velikih razmjera. S velikim poplavama borile su se i Kina i Indija, kao i Pakistan u kolovozu 2022. Hrvatska, Turska, Španjolska, SAD, Kanada i Rusija svjedočile su požarima katastrofalnih razmjera, dok su na Antarktici mjerene rekordne temperature i količine kiše [3].

Navedeno je tek dio zabilježenih pojava u posljednje dvije godine koje potvrđuju ozbiljnost i nemogućnost negiranja klimatskih promjena. Ekstremni vremenski uvjeti bit će u budućnosti sve češći, rizik od prirodnih katastrofa postao je trajan, a intenzitet i učestalost nastavit će se povećavati. Republika Hrvatska je među tri najranjivije države Europske unije s procijenjenim najvećim udjelom šteta od ekstremnih vremenskih i klimatskih događaja u odnosu na bruto nacionalni proizvod [4]. Početkom kolovoza 2021. Međuvladin panel o klimatskim promjenama (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change) objavio je najnoviji, šesti po redu, izvještaj o klimatskim promjenama. Upozoravaju da smo vrlo blizu scenarija bez povratka kada je riječ o globalnom zatopljenju. Pozvali su na hitno djelovanje te poručili da dosadašnji postupci i nivoi prilagodbe nisu dovoljni [5].

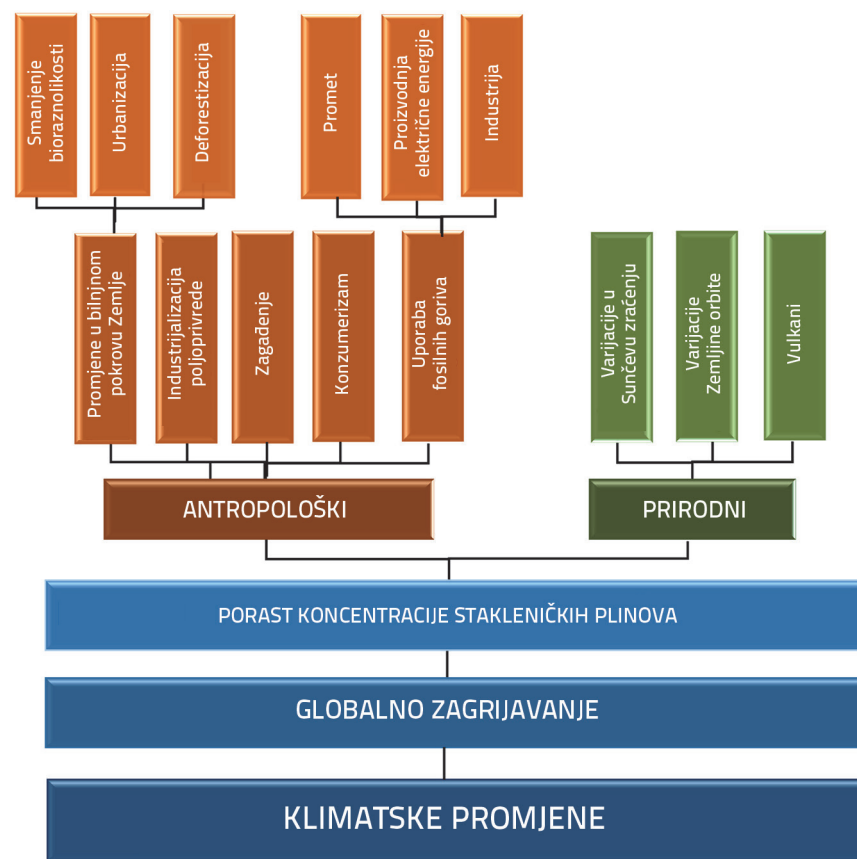
Prilagodba klimatskim promjenama je predviđanje negativnih učinaka klimatskih promjena i poduzimanje odgovarajućih mjera s ciljem sprječavanja ili umanjivanja potencijalnih šteta uzrokovanih klimatskim promjenama [4]. Postojeće, a i buduće građevine svakako će osjetiti utjecaj klimatskih promjena. Kako bi prilagodba konstrukcija bila moguća, potrebno je istražiti utjecaj klimatskih promjena na građevine. Njihov učinak se može očitovati kroz promjene svojstava postojećih konstrukcija, smanjujući nosivost i pouzdanost te kroz promjenu vanjskih djelovanja na konstrukcije. Primjerice, promjene koncentracije ugljikovog

dioksida, temperature i relativne vlažnosti utječu na procese korozije, koja je najčešći uzrok oštećenja armiranobetonskih konstrukcija. Mostovi su inženjerske građevine posebno izložene klimi i utjecajima iz okoliša te time potencijalno i pod velikom opasnosti. U ovom radu bit će prikazana projekcija klimatskih promjena u Hrvatskoj za razdoblje do 2070. s potencijalnim utjecajem na konstrukcije. Prikazat će se utjecaj klimatskih promjena na vanjska djelovanja kao i utjecaj na karakteristike materijala, kapaciteta i uporabljivosti konstrukcija s posebnim osvrtom na koroziju armature i seizmički kapacitet.

2. Projekcija klimatskih promjena u Hrvatskoj za razdoblje do 2040. odnosno 2070.

2.1. Klima i klimatske promjene

Klimatske promjene se nedvojbeno događaju i značajna su prijetnja 21. stoljeća. Posljednja tri desetljeća bila su sukcesivno najtoplija od 1850. Temperatura oceana je narasla, područja većeg saliniteta postala su slanija, a područjima manjega saliniteta dodatno se smanjio salinitet. Od 1901. do 2010. globalna razina mora je narasla za 0,19 m [6]. Toplinski valovi su učestaliji, kao i obilne padaline. Tijekom posljednja dva desetljeća ledeni pokrivači Grenlanda i Antarktike gube masu, ledenjaci se nastavljaju smanjivati.



Slika 1. Uzroci klimatskih promjena

Uzroci klimatskih promjena mogu se podijeliti na prirodne i antropološke (slika 1.). Prirodni uzroci su varijacije u Sunčevu zračenju, Zemljinoj orbiti i vulkanske erupcije, međutim, prirodni uzroci nemaju velik učinak na klimu u promatranim razdobljima od 100 do 200 godina. Prema [7], znanost sa 95 % sigurnosti tvrdi da je ljudska aktivnost dominantan uzrok globalnog zatopljenja od sredine 20. stoljeća. Štoviše, iako još uvijek nije službeno potvrđeno, znanstvenici godine 2000. prvi put iznose pojam antropocena kao novo geološko razdoblje Zemlje od druge polovine 20. st. Glavne karakteristike antropocena su ubrzanje stope erozije i sedimentacije, kemijski poremećaji ciklusa ugljika, dušika, klimatske promjene te velike promjene u biosferi [8].

Dominantan faktor mijenjanja Zemljine energijske ravnoteže su staklenički plinovi koji apsorbiraju dugovalno zračenje sa Zemljine površine. Dio tog zračenja usmjeren natrag prema Zemlji pridonosi zagrijavanju donjih dijelova atmosfere i Zemljine površine. Ovaj efekt je poznat kao efekt staklenika. Neki od stakleničkih plinova nastaju prirodno, međutim, povećanje njihove koncentracije u zadnjih 250 godina je uglavnom posljedica ljudskih utjecaja, primarno potrošnjom fosilnih goriva [9]. Ljudski utjecaj se očituje i u mijenjanju Zemljine površine. Primjerice, deforestacija (uklanjanje šuma) smanjuje skladište ugljika u vegetaciji, povećava ugljikov dioksid u atmosferi te mijenja refleksijsku moć površine, brzinu evapotranspiracije te emisije energije [7, 9].

2.2. Prilagodba klimatskim promjenama

Međuvladin panel o klimatskim promjenama (IPCC) nastao je 1988. na poticaj organizacija Ujedinjenih naroda (UN). Cilj IPCC-a je prikupiti i sažeti znanstvene podatke o klimatskim promjenama. Podaci se objavljuju u izvještajima koji prolaze kroz stroge postupke revizije te mogu poslužiti kao temelj pri razvijanju klimatskih politika.

Međunarodna borba protiv klimatskih promjena počinje 1992. godine kada je potpisana Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change), a 1997. potpisan je prvi sporazum o emisiji stakleničkih plinova, Kyotski protokol.

Republika Hrvatska (RH) je među tri najosjetljivije države Europske unije s najvećim udjelom šteta od ekstremnih vremenskih i klimatskih događaja u odnosu na bruto nacionalni proizvod [10]. Kao stranka UNFCCC-a, Hrvatska podnosi periodična izvješća kojima među ostalim izvješćuje i o prilagodbi klimatskim promjenama. Strategiju prilagodbe klimatskim promjenama u Hrvatskoj [11] za razdoblje do 2040. s pogledom na 2070. godinu donio je Hrvatski sabor na sjednici 7. travnja 2020. Strategija je donesena na temelju Zelene i Bijele knjige [10, 12] koje su izradili stručnjaci iz područja klimatskog modeliranja, vodnih i morskih resursa, hidrologije, poljoprivrede, šumarstva, bioraznolikosti, ribarstva, turizma, prostornog planiranja i upravljanja obalnim područjem, graditeljstva, zdravstva i upravljanja rizicima. U strategiji je definirano ukupno

80 mjera za 10 sektora te 3 opće mjere visoke važnosti. U tablici 1. izdvojene su mjere po sektorima za koje su mjerodavne institucije Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine (MPGI), Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture (MMPI) ili sveučilišta (S), a relevantne su za cjelokupnu infrastrukturu odnosno područje graditeljstva.

Dakle, dugoročni cilj Strategije prilagodbe jest smanjenje ranjivosti društvenih i prirodnih sustava na negativne utjecaje klimatskih promjena, odnosno jačanje njihove otpornosti i sposobnosti oporavka od tih utjecaja.

Najveći dio mjera strategije prilagodbe čine tzv. nestrukturane mjere, mjere s naglaskom na ojačanje svijesti i znanja o klimatskim promjenama, praćenju rizika i potrebi prilagodbe. Tek manji dio mjera čine strukturne mjere koje bi obuhvaćale izgradnju objekata za smanjenje utjecaja te druge tehničke zahvate koje bi blisko obuhvaćale područje graditeljstva. Takve mjere su u najvećem broju vezane za sektore hidrologije, upravljanje vodnim i morskim resursima te područje prostornog planiranja.

Veliku opasnost za društvo i gospodarstvo obuhvaćaju rizici vezani za poplave i ekstremne hidrološke prilike koje donose klimatske promjene. Vezano za područje graditeljstva to svakako obuhvaća jačanje kapaciteta za izgradnju, rekonstrukciju i dogradnju sustava za zaštitu od štetnog djelovanja vode. Konkretno, to obuhvaća izgradnju, rekonstrukciju i dogradnju zaštitnih nasipa, pragova, brana, sustava retencija i akumulacija te drugih hidrotehničkih objekata i sustava zaštite od štetnog djelovanja. Jačanje zaštite od štetnih djelovanja podizanja razine mora na infrastrukturu obuhvaća primjerice rekonstrukciju vodnokomunalne infrastrukture, dislociranje vodozahvata i sl. Zbog posljedica nepovoljnih hidroloških prilika, ističe se i potreba smanjenja gubitaka u vodoopskrbi, jačanje sustava odvodnje, kao i izgradnja sustava pročišćavanja voda. Mjere prilagodbe ne obuhvaćaju samo izgradnju i jačanje, već i izrade projekata sanacije posebno ugroženih objekata, posebno važnih objekata, kulturnih dobara i sl.

Strategija upućuje na izgradnju "zelene infrastrukture" te njeno uklapanje u prostorno planiranje. Zelena infrastruktura obuhvaća primjenu prirodnih rješenja za niz ekoloških, gospodarskih i društvenih izazova. Primjerice, to se odnosi na uređenje dionica vodnih tokova te na osiguranje prirodnih nizinskih prostora za kontrolirano plavljenje i redukciju velikih voda.

Također, pridaje se važnost provedbi antierozivnih mjera pri obradi tla kao i jačanju apsorpcijske sposobnosti zemljišta za prihvatanje viška vode. Krčenje šuma je jedan od najvećih uzročnika povećanja koncentracija stakleničkih plinova. Posljedično, prostorno planiranje i prenamjena zemljišta ima veliku ulogu pri prilagodbi klimatskim promjenama [11].

Kao što je spomenuto, najveći broj mjera odnosi se na tzv. "nestrukturane" mjere. Razlog tomu je što prilagodbu klimatskim promjenama treba promišljati na iznimno dugi rok uz velike razine neizvjesnosti. Stoga treba raditi na podizanju svijesti, istraživanju i stvaranju dobrih podatkovnih podloga kako bi se mogla adekvatno analizirati situacija te odlučiti o poduzimanju potrebnih mjera i

Tablica 1. Mjere strategije Republike Hrvatske za prilagodbu klimatskim promjenama relevantne za graditeljstvo (prilagođeno prema [11])

Oznaka mjere		Naziv mjere	Mjerodavne institucije		
			MPGI	MMPI	S
Vodni resursi	HM-01	Provedba nestrukturnih mjera zaštite od štetnog djelovanja voda i zaštite voda pri pojavama ekstremnih hidroloških prilika čije je povećanje intenziteta i učestalosti pojave uvjetovano klimatskim promjenama			
	HM-03	Jačanje stručnih, istraživačkih i upravljačkih kapaciteta za ocjenu pojavnosti i rizika negativnih utjecaja klimatskih promjena i prilagodbu slatkovodnih i morskih vodnih sustava u postojećim i budućim klimatskim prilikama	✓		✓
	HM-04	Jačanje kapaciteta nadležnih institucija za djelovanje pri pojavama ekstremnih hidroloških prilika	✓		
	HM-05	Smanjenje štetnih posljedica na obalnu vodno-komunalnu infrastrukturu i probalne vodne resurse uzrokovane podizanjem razine mora zbog klimatskih promjena (nestrukturane mjere)	✓	✓	
	HM-06	Jačanje otpornosti urbanih područja na antropogene pritiske uvjetovane klimatskim promjenama	✓		
Bio-raznolikost	B-07	Unaprjeđenje održivog upravljanja i smanjenje antropogenog utjecaja na (do)prirodne ekosustave, staništa i divlje vrste ponajprije mjerama održivog razvoja primjenom rješenja temeljenih na prirodi	✓		
Energetika	E-03	Jačanje otpornosti postojećih kapaciteta za proizvodnju električne i toplinske energije	✓		
Turizam	T-04	Jačanje otpornosti turističke infrastrukture na različite vremenske ekstreme	✓	✓	✓
Zdravlje	ZD-06	Povećanje broja sigurnih točaka u slučaju ekstremnih meteoroloških uvjeta	✓		
	ZD-07	Jačanje sustava praćenja alergeni vrsta		✓	✓
Prostorno planiranje i uređenje	PP-01	Jačanje baza znanja i sustava praćenja i ocjenjivanja	✓		✓
	PP-02	Jačanje stručnih i institucionalnih kapaciteta stručnih dionika u sustavu prostornog uređenja i planiranja	✓		✓
	PP-03	Integracija mjera prilagodbe u sustav prostornog uređenja i planiranja	✓		✓
	PP-04	Jačanje osviještenosti i senzibiliziranje javnosti i donositelja odluka na svim razinama	✓		✓
	PP-05	Priprema programa i projekata sanacije	✓	✓	✓
Upravljanje rizicima	UR-02	Multisektorska i sektorska procjena rizika za različite scenarije prijetnji/rizika povezanih s klimatskim promjenama	✓	✓	✓
Opće mjere	KM-01	Jačanje stručnih i tehničkih kapaciteta za provedbu istraživačkih i primijenjenih, kao i operativnih aktivnosti, koje uključuju područje klimatskog modeliranja i prediktivnih tehnologija za predviđanje vremenskih i okolišnih uvjeta i povezanih upozorenja na opasne uvjete, te analize i interpretacije opaženih i očekivanih klimatskih promjena i njima uzrokovanih opasnih vremenskih pojava		✓	✓
	OM-01	Povećanje razine znanja i kapaciteta za praćenje utjecaja klimatskih promjena, procjene rizika i prilagodbe klimatskim promjenama			✓
	RP-01	Razvoj pokazatelja učinaka provedbe strategija prilagodbe			✓

pravodobnom reagiranju. To uključuje, promjerice, određivanje poplavnih zona, prirodnih retencijskih područja, provedbu analiza ranjivosti, monitoring podzemnih voda i dr.

Manji broj strukturnih mjera vezanih za građevinarstvo opravdava se činjenicom što u izradi Strategije Republike Hrvatske za prilagodbu klimatskim promjenama nisu sudjelovali stručnjaci iz područja građevinarstva. Upravo iz tog razloga građevinski sektor, kako u Hrvatskoj tako i u svijetu, mora sustavno promišljati o utjecajima klimatskih promjena na građevine te posljedično na mjere prilagodbe i smanjenja utjecaja klimatskih promjena.

Prema svjetskoj građevinskoj praksi i znanstvenim rezultatima, kao odgovor utjecaja klimatskih promjena na građevine nameće se težnja za trajnijim konstrukcijama, koje su otpornije na vremenske neprilike, a s druge strane trajnije građevine isključuju češće cikluse rušenja i građenja, odnosno smanjuju potrošnju materijala i povećanje ugljikovog otiska. U tu je svrhu potrebno razviti i odgovarajuće i precizne sustave monitoringa i održavanja samih građevina, jer klimatske promjene imaju i niz posljedica na sigurnost i trajnost konstrukcija što će biti detaljnije prikazano u idućim poglavljima.

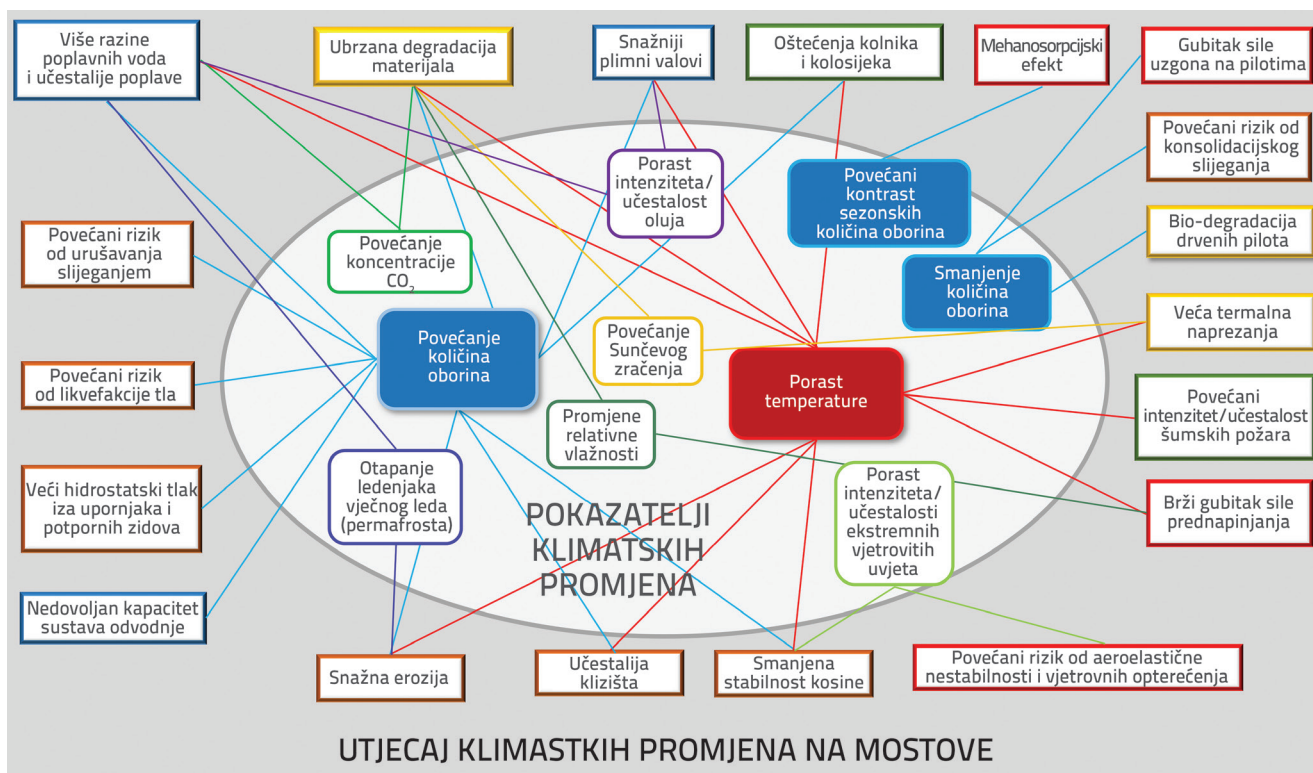
2.3. Projekcija klimatskih promjena u Republici Hrvatskoj

Za klimatske simulacije u okviru izrade Strategije prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj korišten je regionalni klimatski model RegCM4. Sadašnja "povijesna" klima pokriva razdoblje od 1971. do 2000. te čini referentno razdoblje označeno kao P0. Promjena klimatskih varijabli u odnosu na referentnu klimu prikazana je i razmatrana za dva vremenska razdoblja: 2011. do 2040. tj. P1 (neposredna budućnost) i 2041. do 2070., tj. P2 (klima sredine 21. stoljeća) [13]. Dva klimatska scenarija razmatrana u okviru izrade Strategije prilagodbe Republike Hrvatske, RCP4.5 i RCP8.5, predstavljaju: budućnost u kojoj je predviđeno poduzimanje mjera smanjenja i prilagodbe gdje koncentracije stakleničkih plinova rastu do 2040., a zatim se smanjuju (RCP4.5), te budućnost u kojoj se ne predviđa poduzimanje značajnijih mjera smanjenja i prilagodbe, dakle, kontinuirano povećanje koncentracije stakleničkih plinova (RCP8.5) [12].

Prema [12], za optimističan scenarij RCP4.5, na području Republike Hrvatske predviđa se manji porast ukupne količine oborina za zimu i proljeće, a smanjenje za jesen i ljetno uz povećanje broja sušnih razdoblja. Opažanja tijekom razdoblja 1961. do 2010. već pokazuju trend porasta temperatura zraka na čitavom području Hrvatske. Do 2040. godine očekuje se gotovo jednoličan porast srednjih godišnjih vrijednosti temperature zraka sa daljnjim povećanjem do 2070. Porast maksimalne temperature zraka mogao bi do 2070. dosegnuti i 2,3°C. Najveći porast minimalne temperature

je zimi, i to u najhladnijem području, Gorskom kotaru. Porast broja vrućih dana u većem dijelu Hrvatske je između 6 i 8 dana, a do 2070. nastavlja rasti i do 12 dana, što bi za gorske predjele bilo gotovo udvostručenje broja vrućih dana. Očekuje se smanjenje maksimalne brzine vjetra u zimskom razdoblju i to na području najjačega vjetra referentne klime. Povećat će se evapotranspiracija, a vlažnost tla smanjiti. Vrijednosti vlažnosti zraka rast će kroz cijelu godinu, najviše ljeti na Jadranu. Smanjenje snježnog pokrivača za područje Gorskog kotara iznosi oko 50 % referentne vrijednosti. Procjene porasta razine mora nisu dobivene RegCM modelom, već su rezultati preuzeti iz IPCC AR5 i doneseni zaključcima na temelju istraživanja domaćih autora i praćenja dosadašnjeg kretanja promjena srednje razine Jadranskog mora. Prema rezultatima globalnih modela, do sredine 21. stoljeća očekivani porast globalne srednje razine mora uz RCP4.5 jest 19 do 33 cm, a uz RCP8.5 jest 22 do 38 cm. Međutim, treba naglasiti da su uz ove procjene vezane znatne neizvjesnosti, na koje nailazimo već i u izračunu razine mora za povijesnu klimu. Detaljnije projekcije klimatskih parametara za Republiku Hrvatsku prema scenariju RCP4.5 s mogućim utjecajima pojedinih klimatskih promjena na infrastrukturu, naročito mostove, prikazane su u tablici 2.

Klimatske promjene dovest će do učestalijih ili intenzivnijih pojava koje uzrokuju oštećenja i predstavljaju direktnu opasnost za konstrukciju. Uzrokovat će veća opterećenja na konstrukciju, ali imat će i utjecaj na karakteristike materijala, uporabljivost i sigurnost konstrukcije kao i na geomehaničke prilike. Na slici 2. prikazani su utjecaji klimatskih promjena na mostove s pripadajućim uzročnicima.



Slika 2. Utjecaj klimatskih promjena na mostove [14]

Tablica 2. Projekcije klimatskih parametara za Republiku Hrvatsku prema scenariju RCP4.5 u odnosu na razdoblje 1971. – 2000. (prilagođeno prema [12])

Klimatološki parametar	Projekcije buduće klime prema scenariju RCP4.5 u odnosu na razdoblje 1971. – 2000. godine dobivene klimatskim modeliranjem		Mogući utjecaj na infrastrukturu
	2011. – 2040.	2041. – 2070.	
Oborine	Malo smanjenje srednje godišnje količine (osim manji porast u sjeverozapadnoj Hrvatskoj)	Daljnji trend smanjenja srednje godišnje količine (do 5 %), osim u sjeverozapadnim dijelovima RH	Smanjenje količine oborina: gubitak sile uzgona na pilotima, bio-degradacija drvenih pilota, veći rizik od konsolidacijskog slijeganja
	Sezonska ukupna količina: zima i proljeće u većini Hrvatske manji porast (5–10 %), ljeto i jesen smanjenje (najviše 5–10 % u južnoj Lici i sjevernoj Dalmaciji)	Sezonska ukupna količina: do 10 % smanjenja (gorje i sjeverna Dalmacija) osim zimi (povećanje 5 do 10 % sjeverna Hrvatska)	Povećani kontrast sezonskih količina oborina: Mehanosorpcijski efekt
	Smanjenje broja kišnih razdoblja (osim u središnjoj Hrvatskoj manji porast). Povećanje sušnog razdoblja.	Povećanje sušnog razdoblja.	Povećanje količina oborina: više razine poplavnih voda i učestalije poplave, povećani rizik od likvefakcije tla urušavanja slijeganjem, veći hidrostatički tlak iza upornjaka i potpornih zidova, nedovoljan kapacitet sustava odvodnje, snažnija erozija i plimni valovi, učestalija klizišta, oštećenja kolnika/ željeznica, ubrzana degradacija materijala, manja stabilnost kosine
Površinsko otjecanje	Bez većih promjena osim u gorju i zaleđu Dalmacije smanjenje do 10 %	Smanjenje otjecanja u cijeloj Hrvatskoj (osobito u proljeće)	Gubitak sile uzgona na pilotima, bio-degradacija drvenih pilota, veći rizik od konsolidacijskog slijeganja
Evapotranspiracija	Povećanje u proljeće i ljeti 5 – 10 % (vanjski otoci i zapadna Istra > 10 %)	Povećanje do 10 % za veći dio Hrvatske te do 15 % na obali i zaleđu i do 20 % na vanjskim otocima	Gubitak sile uzgona na pilotima, bio-degradacija drvenih pilota, veći rizik od konsolidacijskog slijeganja
Temperatura zraka	Srednja: porast 1 – 1,4 °C (sve sezone, cijela Hrvatska)	Srednja: porast 1,5–2,2 °C (sve sezone, cijela Hrvatska – naročito kontinent)	Veća termalna naprežanja, povećani intenzitet/ učestalost šumskih požara, brži gubitak sile prednapinjanja, smanjena stabilnost kosine, učestalija klizišta, snažnija erozija i plimni valovi, više razine poplavnih voda i učestalije poplave, ubrzana degradacija materijala, oštećenja kolnika i željeznica
	Maksimalna: porast u svim sezonama 1 – 1,5 °C	Maksimalna: porast do 2,2 °C u ljetu (do 2,3 °C na otocima)	
	Minimalna: najveći porast zimi 1,2 – 1,4 °C	Minimalna: najveći porast na kontinentu zimi 2,1 – 2,4 °C, a 1,8 – 2 °C primorski krajevi	
Sunčevo zračenje	Ljeto i jesen porast, proljeće porast u sjevernoj, a smanjenje u zapadnoj Hrvatskoj; zimi smanjenje u cijeloj Hrvatskoj	Porast u svim sezonama osim zimi (najveći porast u gorskoj i središnjoj Hrvatskoj)	Veća termalna naprežanja, ubrzana degradacija materijala
Snježni pokrov	Smanjenje (najveće u Gorskom kotaru, do 50 %)	Daljnje smanjenje (naročito planinski krajevi)	Snažnija erozija, više razine poplavnih voda i učestalije poplave
Vlažnost zraka	Porast cijele godine (najviše ljeti na Jadranu)	Porast cijele godine (najviše ljeti na Jadranu)	Brži gubitak sile prednapinjanja, ubrzana degradacija materijala
Vlažnost tla	Smanjenje u sjevernoj Hrvatskoj	Smanjenje u cijeloj Hrvatskoj (najviše ljeti i ujesen)	Gubitak sile uzgona na pilotima, bio-degradacija drvenih pilota, veći rizik od konsolidacijskog slijeganja, mehanosorpcijski efekt
Ekstremni vremenski uvjeti	Dani s Tmax > +30 °C	Povećanje od 6 do 8 dana (referentno razdoblje: 15 – 25 dana godišnje)	Do 12 dana više od referentnog razdoblja
	Dani s Tmin < -10 °C	Daljnje smanjenje i porast Tmin vrijednosti (1,2 – 1,4 °C)	Daljnje smanjenje
	Noći s Tmin ≥ +20 °C	U porastu	U porastu
Vjetar	Srednja brzina na 10 m	Ljeti i ujesen na Jadranu porast do 20 – 25 %	Zima i proljeće uglavnom bez promjene, no trend jačanja ljeti i ujesen na Jadranu
	Maks. brzina na 10 m	Smanjenje zimi na južnom Jadranu i zaleđu Dalmacije	Smanjenje sve sezone osim ljeti. Najveće smanjenje zimi na južnom Jadranu
Srednja razina mora	2046. – 2065.: 19 – 33 cm (IPCC AR5)	2081. – 2100.: 32 – 65 cm	Degradacija materijala (korozija armiranobetonskih i čeličnih konstrukcija), snažnija erozija i plimni valovi, više razine poplavnih voda i učestalije poplave

Posljedice klimatskih promjena na konstrukcije očituju se u svim granama građevinske djelatnosti, od hidrotehnike, geotehnike, nosivih konstrukcija, do građevnih materijala te organizacije građenja i upravljanje građevinama.

Promjene u intenzitetu i količini oborina te promjene temperature primjetno su najznačajniji znakovi klimatskih promjena, a ujedno i uzročnici s najvećim brojem negativnih posljedica na konstrukcije. Najnepovoljniji učinak povećanja količine i intenziteta oborina uslijed klimatskih promjena su više razine poplavnih voda i učestalije poplave, što dovodi do većeg rizika od urušavanja konstrukcija uslijed podlokavanja stupova, odnosno oštećenja i/ili urušavanja stupova i prometnica uslijed aktiviranja klizišta, erozije i likvefakcija tla. Ostali učinci promjena količine oborina djeluju na uporabljivost i trajnost konstrukcije, odnosno dovode do degradacije materijala, nedovoljnog kapaciteta sustava odvodnje te oštećenja kolnika i željeznica.

S obzirom na to da se mnogi mostovi nalaze u blizini ili iznad vodotoka, posebno su osjetljivi na opasnosti od poplava, pri čemu se ističe hidraulički rizik od podlokavanja. Podlokavanje uzrokuje eroziju tla oko stupova mostova. To dovodi do veće površine izloženosti stupa hidrodinamičkim silama [15]. Prema [15], najveća dubina podlokavanja se ostvaruje tijekom poplave. Podlokavanje i erozija su i danas među najčešćim uzrocima kolapsa mostova. U kombinaciji s ostalim opterećenjima i/ili izvanrednim situacijama te klimatskim promjenama, taj rizik nastavlja rasti te može imati katastrofalne posljedice [16-18]. Izloženost riziku od podlokavanja mosta zahtijeva integraciju sustava ranog upozoravanja na poplave i upravljanje infrastrukturom, te uključivanje hidrauličke komponente u preglede mostova.

Klimatske promjene uzrokuju promjene i u podzemnim vodama i geomehaničkim postavkama. Promjene u podzemnim vodama uzrokuju promjene čvrstoće tla što povećava rizik od pojave klizišta te smanjuje stabilnost kosine. Uz seizmičku aktivnost, najčešći uzroci nastanka klizišta su upravo ekstremni vremenski uvjeti, velike količine oborina i poplave. Smanjenoj stabilnosti kosine mogu doprinijeti i pojačana vjetrovna opterećenja ubrzavajući eroziju terena [19].

Povećanje ili smanjenje razine podzemnih voda uzrokuje slijeganje ili podizanje površine tla te za konstrukcije posebno problematično, diferencijalno slijeganje tla. Zasićenje vodom kod pojedinih slučajeva uzrokuje urušavanje slijeganjem jer voda slabi unutarnje veze između čestica te dolazi do gubitka stabilnosti. Ovo se pokazalo posebno značajnim na umjetnim terenima. Kod seizmički aktivnih područja, likvefakcija tla povezana je sa smanjenjem razine podzemne vode [18].

Utjecaj klimatskih promjena se očituje i na dubokim temeljima, pilotima. Naime, slijeganje tla oko pilota izaziva tzv. negativno trenje po plaštu što, povećavajući naprezanje u pilotima, može dovesti do kolapsa. Uz to, ako se radi o drvenim pilotima, smanjenje podzemne vode dovodi do izloženosti gornjeg dijela pilota aerobnim uvjetima te omogućuje degradaciju materijala [18, 19].

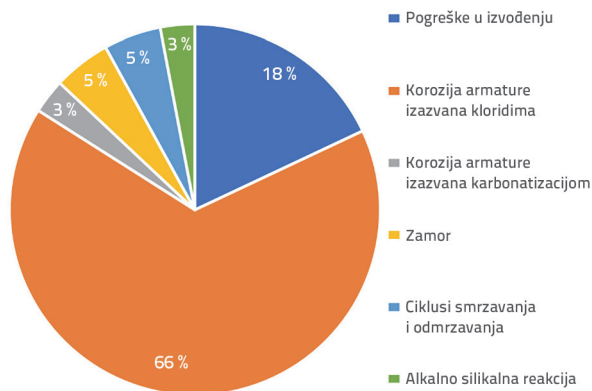
Sljedeći najznačajniji indikator klimatskih promjena je povećanje temperature zraka. Norme za projektiranje mostova daju široki

raspon temperaturnog opterećenja koji se uzima u obzir pri proračunu nosivosti konstrukcije te stabilnost mosta neće biti ugrožena. Međutim, povišenje temperature negativno utječe na trajnost i uporabivost infrastrukture. Primjerice, jedna od direktnih posljedica globalnog zagrijavanja je izvijanje tračnica uslijed temperaturnih ekstrema čime je infrastruktura neuporabljiva za vrijeme toplinskih valova. Nadalje, visoke temperature mogu utjecati i na dinamiku građenja, posebice kod čeličnih mostova, no mogu uzrokovati i raspucavanje betona uslijed prekomjernih naprezanja. Česte i velike oscilacije temperaturnih naprezanja povećavaju rizik od pukotina i oštećenja te mogu znatno skratiti uporabljivost konstrukcije, posebice onih u agresivnom okolišu.

Povećanje temperature i relativne vlažnosti ima značajan učinak na trajnost armiranobetonskih mostova što je detaljnije prikazano u idućem poglavlju. Budući da sve veći udio betonskih konstrukcija čine prednapete betonske konstrukcije, a posebno mostova, vrlo je značajan i utjecaj koji klimatske promjene imaju na smanjenje sile prednapinjanja. Dugotrajni gubitci sile prednapinjanja su usko vezani za skupljanje i puzanje betona koje je pod utjecajem uvjeta okoliša. Promjene relativne vlažnosti, uz povećanje temperature povećavaju puzanje i skupljanje betona, što može dovesti do velikih deformacija, a na više desetaka slučajeva je uslijed velikih deformacija zabilježeno znatno smanjenje sile prednapinjanja, i do 50 % [19, 20].

3. Utjecaj klimatskih promjena na trajnost betonskih konstrukcija

Prema slici 2., čak pet pokazatelja klimatskih promjena (povećanje koncentracije CO₂, povećanje količine oborina, promjena relativne vlažnosti, povećanje Sučevog zračenja, porast temperature) utječe na ubranu degradaciju materijala konstrukcija. Navedene posljedice dobivaju na značenju uzme li se u obzir činjenica da je degradacija materijala već sada jedan od najčešćih razloga oštećenja, propadanja, smanjenja trajanja i otkazivanja konstrukcija, a posebno mostova (slika 3.) [13]. Naime, najčešći materijali suvremenih konstrukcija su armirani beton, čelik, prednapeti beton, drvo ili pak opeka. Kod mostogradnje uvelike prednjače armirani ili prednapeti beton koji čine više od 85 % mostova na državnim cestama Republike Hrvatske [21]. Mostovi, kao inženjerske građevine, imaju zahtijevani uporabni vijek i do 100 godina, što je u betonskim konstrukcijama često problematično ostvariti. Betonske konstrukcije, koje su podložne mehaničkom naprezanju, ali i uvjetima agresivnog okoliša, nisu trajne te bez pravilnog projektiranja trajnosti i održavanja građevine ne mogu zadovoljiti predviđeni uporabni vijek [22]. Prema [23], dotrajavanje materijala pokazalo se kao glavni uzrok otkazivanja za otprilike 15 % kod više od 600 analiziranih mostova, a pritom su najveći uzročnici korozija armature u betonu te starost i atmosferski utjecaji. Slični rezultati su dobiveni prema [24], kao što je prikazano na slici 3.

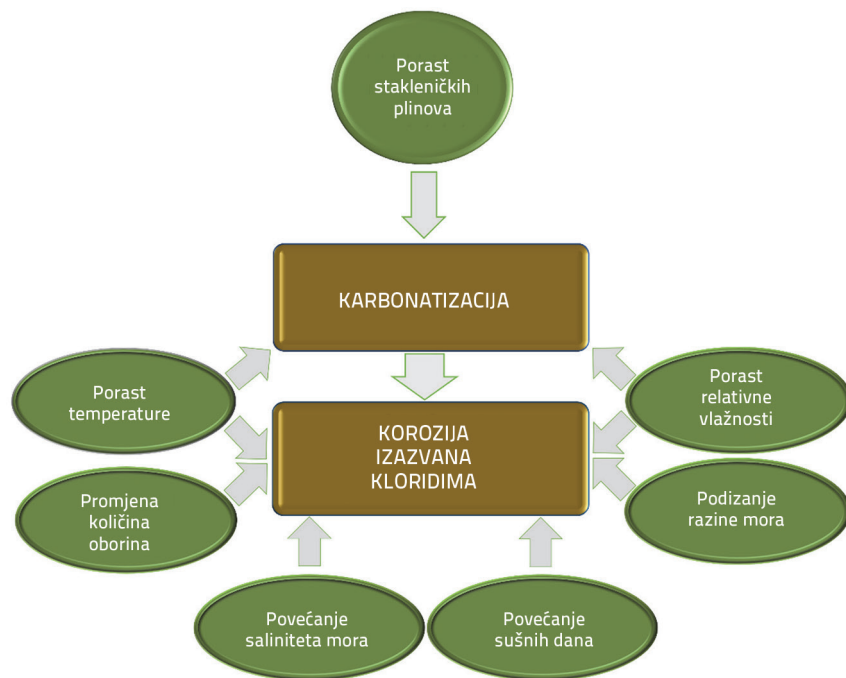


Slika 3. Uzroci propadanja betonskih konstrukcija, prema [13]

Prema pojedinim statističkim pokazateljima, oštećenja od korozije čine više od 80 % svih oštećenja armiranobetonskih konstrukcija [25], a sanacije pritom također čine i značajan ekonomski trošak. Korozija djeluje negativno na betonsku konstrukciju kroz nekoliko mehanizama, uzrokuje gubitak dijela poprečnog presjeka čelične šipke, smanjuje prionjivost armature i betona te zbog toga što su produkti korozije znatno većeg volumena od početnog volumena armature, dolazi do velikih naprezanja, i otvaranja pukotina. Tada pukotine otvaraju put agresivnim tvarima do armature te dodatno ubrzavaju proces korozije [25, 26].

3.1. Utjecaj klimatskih promjena na koroziju

Procesi karbonatizacije i prodora klorida pod utjecajem su klimatskih čimbenika. Među najistaknutijima su temperatura i relativna vlažnost.



Slika 4. Utjecaj klimatskih promjena na koroziju armature u betonu

Koeficijent difuzije ugljikovog dioksida pri procesu karbonatizacije raste s povećanjem temperature. Ispunjenost pora vodom usporava proces karbonatizacije jer CO₂ (općenito plinovi) ima mali koeficijent difuzije u vodi, a ioni klorida ponašaju se suprotno pri povećanju vlažnosti [27]. Pokazano je da je karbonatizacija najveća za vrijednosti relativne vlažnosti od 50 % do 70 %, jer se pri većoj relativnoj vlažnosti koeficijent difuzije ugljikovog dioksida znatno smanjuje, a pri manjim vrijednostima nema dovoljno vlažnosti za proces karbonatizacije [28]. Prisutnost klorida iz okoliša mijenja se promjenom količine oborina, saliniteta mora, duljim vrućim i suhim periodima, a također i podizanjem razine mora što dovodi do veće i dugotrajnije prisutnosti klorida na površini konstrukcije (slika 4.). Nadalje, promjene temperature i relativne vlažnosti utječu na procese difuzije, konvekcije, migracije, apsorpcije i termodifuzije, kojima se događa prodor klorida u materijal [29]. Također postoje dokazi da karbonatizacija betona ubrzava prodor klorida, što znači da je i korozija kloridima pod indirektnim utjecajem koncentracije CO₂ [28].

Utjecaji klimatskih promjena na koroziju betona tema su brojnih istraživanja. Yoon i dr. [30] provedli su jedno od prvih istraživanja koje je potvrdilo da povećanje koncentracije CO₂ utječe na karbonatizaciju. Rezultati Wang i dr. [28] pokazuju da pri projiciranim promjenama koncentracije ugljikovog dioksida (CO₂) i temperature do 2100., vjerojatnost oštećenja nakon prvih 20 do 30 godina uporabnog vijeka raste 20 do 40 %. U usporedbi sa referentnim scenarijem (bez rasta koncentracije ugljikovog dioksida) vjerojatnost oštećenja raste i do 460 %. U 2100., za područje Kine rezultati predviđaju povećanje dubine karbonatizacije do čak 50 % za najrigorozniji scenarij u usporedbi s 2000. godinom, ali predviđanja pokazuju povećanje do 18 % i za srednji scenarij RCP4.5 [31]. Što se tiče korozije izazvane prodorom klorida, istraživanje na mostovima u Kini predviđa povećanje koncentracije klorida pri armaturi za 6 do 15 % [32]. Ovisno o mogućim scenarijima i uvjetima izloženosti moguće je smanjenje životnog vijeka zbog prodora klorida za 2 % do 18 % [30-33]. Khatami [34] je pokazala da se promjenom temperature, relativne vlažnosti i površinske koncentracije klorida vrijeme inicijacije korozije smanjuje do 39 %, a povećanje širine pukotina do 29 %. Rezultati su prikazani u usporedbi s referentnim scenarijem gdje klimatske promjene nisu uzete u obzir. Općenito, pokazalo se da je karbonatizacija osjetljivija na projicirane promjene klime od procesa prodora klorida. Prema istraživanju na području Francuske, karbonatizacija je osjetljivija na razine relativne vlažnosti nego na promjene

temperature [35]. Također se zaključuje da je zaštitni sloj betona najznačajniji tijekom ispitivanja pouzdanosti konstrukcije, tj. da ima znatno veći utjecaj od ostalih parametara kao što su poroznost, koeficijent difuzije, permeabilnost koji svi imaju sličan red veličine utjecaja. Na području Bostona, postojeći zaštitni sloj bi bio nedovoljan već za sljedećih pedesetak godina. Za koroziju izazvanu kloridima bio bi premašen (2055.) i prije nego za koroziju karbonatizacijom (2077.) [36]. Također, pokazalo se da zaštitni sloj ima najveći utjecaj na vjerojatnosti oštećenja, dok tlačna čvrstoća betona ima zanemariv utjecaj [37]. Prema [38], ako se promatra prodor klorida u beton uzimajući u obzir nekoliko scenarija klimatskih promjena, vrijeme inicijacije korozije, odnosno vrijeme za dostizanje kritične koncentracije klorida na razini armature se smanjuje od 13 % do 31 % u usporedbi s referentnim scenarijem bez klimatskih promjena. Treba napomenuti da ovdje spomenuti modeli za prodor klorida u beton ne uzimaju u obzir procese sušenja i vlaženja betona što je zapravo jedna od glavnih obilježja i postojećih vremenskih uvjeta, ali i projekcija klimatskih promjena. Prema [39], pokazuje se da uključivanjem sezonskih procesa sušenja i vlaženja betona te posipavanja soli za odležavanje samo u zimskim mjesecima u numeričke modele, vrijeme depasivacije se smanjuje čak za 60 % u odnosu na numeričke modele koji ne uzimaju u proračun cikluse sušenja i vlaženja te neravnomjerne raspodjele klorida na površini tijekom godine. Također, treba imati na umu da su razine CO₂ u urbanim i razvijenim sredinama oko 14 % veće od srednjih globalnih vrijednosti koje iznosi IPCC [37].

3.2. Utjecaj korozije na seizmičku otpornost građevina

Seizmičko projektiranje zasad ne pretpostavlja mijenjanje seizmičke otpornosti konstrukcije tijekom vremena, ono se smatra konstantnim tijekom trajanja konstrukcije [40, 41]. Dakle, ne uzima u obzir djelovanje okoliša na građevine, degradaciju materijala, utjecaj prethodnih potresa ili oštećenja [42]. To znači da se izjednačuje seizmički kapacitet konstrukcije na početku uporabnog vijeka, nekorodirane i neoštećene, s konstrukcijom koja je pri kraju uporabnog vijeka, pod dugogodišnjim utjecajem korozije i klime te ostalih uvjeta iz okoliša, oštećenja i slično. S aspekta seizmičkog projektiranja, posljedica korozije je smanjenje kapaciteta nosivosti i deformabilnosti te smanjenje sposobnosti disipacije energije, promjene dinamičkih svojstava konstrukcije, duktilnosti te mehanizama kolapsa [26, 27, 30, 43]. Naime, direktna posljedica formiranja korozijskih utjecaja je smanjenje poprečnog presjeka armature, kao i smanjenje duktilnosti armaturnih šipki [44-47]. Manji poprečni presjek armature smanjuje kapacitet nosivosti konstrukcije, tj. smanjuje konstrukcijsku nosivost na savijanje, posmik, kao i otpornost na zamor. Također, uz smanjenje duktilnosti armaturnih šipki djeluje na krutost konstrukcije, preraspodjelu unutarnjih sila te ograničava nosivost statički neodređenog sustava [48, 49]. Točkasta korozija može znatno smanjiti poprečni presjek armature, što ugrožava nosivost i čvrstoću na zamor te može

dovesti do krtog loma kabela za prednapinjanje od čelika visoke čvrstoće [50]. Opasnost lokalne korozije se očituje i u tome što razina (dubina) oštećenosti može znatno uznapredovati prije nego što su znakovi vidljivi na površini betona [24].

Daljnji volumni rast korozijskih produkata, koji je znatno veći od početnog volumena armature, uzrokuje dodatna naprezanja u betonu što dovodi do raspucavanja, pa i odlamanja betona. To za posljedicu ima smanjenje poprečnog presjeka i zaštitnog sloja betona. Ako se odlamanje betona događa na tlačnoj strani poprečnog presjeka betona, smanjuje se krak unutarnjih sila, a time i moment savijanja. Raspucavanje i odlamanje betona u zoni armaturnih šipki dovodi do smanjenja prionjivosti između betona i armature te do smanjenja otpornosti na posmik. Raspucavanje betona u vlačnoj zoni znači da je dosegnuta vlačna čvrstoća betona te će svako dodatno vlačno naprezanje dovesti do širenja postojećih ili stvaranja novih pukotina u betonu [49]. Raspucani beton smanjuje zaštitu armature te omogućava lakši i direktniji prolaz agresivnih tvari do armature, dugoročno smanjujući kapacitet konstrukcije, a ovisno o smjeru pukotina mogu utjecati i na krutost i raspodjelu unutarnjih sila u konstrukciji [49-51].

Rezultati provedenih istraživanja utjecaja korozije na seizmički kapacitet potvrđuje činjenicu da pretpostavka s početka, konstantan kapacitet konstrukcije tijekom uporabe nije ispravna, a posebno nije na strani sigurnosti. Važnost tih rezultata raste znajući da danas postoji i znatan broj konstrukcija izloženih potresima koje su projektirane prije suvremenih seizmičkih normi te kao takve, uz dodatnu degradaciju materijala tijekom vremena, predstavljaju opasnost [52]. Najčešća metoda pri ocjenjivanju postojećih mostova je vizualni pregled kojim je koroziju armature moguće detektirati tek kada je ona već uznapredovala [53]. Dizaj i suradnici [52] razvili su model za predviđanje preostalog kapaciteta korodiranih armiranobetonskih konstrukcija. Povezali su gubitak poprečnog presjeka, kao mjeru korozije, te pripadajuće širine pukotine s preostalim kapacitetom. Tako je dana poveznica vizualno uočljivog oštećenja s preostalim kapacitetom konstrukcije u tom trenutku, što dodaje na važnosti vizualnog pregleda građevine. Rezultati pokazuju da korozija mijenja mehanizam loma s duktilnog (tečenje armature) na krti lom (drobljenje betona) koji je uvijek manje poželjan. To potvrđuju i autori u [54], padom duktilnosti padaju i vrijednosti kapaciteta konstrukcije s obzirom na vršno ubrzanje tla, kao i odgovarajući povratni period potresa. Usporedbom vrijednosti za nekorodiranu i korodiranu konstrukciju zabilježen je manji kapacitet u pogledu vršnog ubrzanje tla i do 93 %, a povratni period, koji za nekorodiranu konstrukciju iznosi 968 godina, u najstrožim varijantama pada na 232 godine. Općenito korozija ima veći utjecaj na smanjenje duktilnosti nego na smanjenje fleksijskog kapaciteta. Prema [52] zanemarivanjem negativnih utjecaja okoliša i klime tijekom trajanja konstrukcije znatno se podcjenjuje vjerojatnost otkazivanja konstrukcije. Primjerice, za vršno ubrzanje tla $a_g = 1,0g$ vjerojatnost otkazivanja konstrukcije raste sa 20 % na 50 %, ako se uzmu u obzir negativni utjecaji klime i okoliša.

Mostovi se nalaze u izrazito agresivnom okolišu, često je to morski okoliš s kloridima, a kao dijelovi prometne infrastrukture prisutne su i soli za odmrzavanje. Pritom, negativnom utjecaju iz okoliša je izložena cijela konstrukcija i svi njezini dijelovi. Utjecaj agresivnog maritimnog okoliša na seizmički kapacitet opisan je u istraživanju [55] na tri mosta u Japanu, sa različitim seizmičkim hazardom te različitom izloženosti kloridima. Nakon 50 godina izloženosti, najveće vjerojatnosti kolapsa je pokazao most najbliži obali, iako ima najmanji seizmički hazard. Također, ovi rezultati su uspoređeni s rezultatima uz zanemarivanje utjecaja okoliša, čime je pokazano da je promjena seizmičkog kapaciteta konstrukcije uzrokovana upravo velikim utjecajem maritimnog okoliša.

Kao i za ostale konstrukcije, korozija utječe na duktilnost mostova. Prema [56], kod korodiranog elementa drobljenje betona se događa pri znatno manjim deformacijama. Za gubitak mase zbog korozije od 20 %, te vrijednosti padaju i do 80 %. Istraživanja [57-60] pokazuju slične rezultate utjecaja degradacije materijala na seizmičko ponašanje mostova, smanjenje duktilnosti s povećanjem korozije, manji kapacitet, općenito povećanje vjerojatnosti kolapsa s vremenom, tj. razvitkom korozije.

Prema [60], zaključuje se kako za manje vršne akceleracije tla (< 0,1 g) utjecaj korozije može biti zanemaren. Za veće vršne akceleracije, smanjenje kapaciteta za korodirane i nekorodirane mostove nije preveliko do otprilike 25. godine uporabljivosti. Međutim, sa daljnjim starenjem mosta vjerojatnost kolapsa pod korozijom sve se znatnije razlikuje od onog pri početku uporabe. Treba napomenuti da je u ovim istraživanjima utjecaj korozije uglavnom predočen primarno kroz gubitak površine poprečnog presjeka armature. Između ostalog, smanjenje prionjivosti između betona i čelika, kao i točkasta korozija često nisu uključeni u modele. Uz ove, i druge nesigurnosti u usporedbi s realnim stanjem, postoji mogućnost i nepovoljnijih stvarnih rezultata od onih dobivenih prikazanim istraživanjima.

Utjecaj korozije armature u betonu na smanjenje nosivosti konstrukcije, pa time i seizmičku otpornost, jest izazov čak i bez uključivanja klimatskih promjena. Na primjerima velikih jadranskih mostova izloženih morskoj soli te mostovima u planinskom području izloženih solima za odleđivanje pokazano

je da aktivna faza korozije u kojoj dolazi do značajnog smanjenja promjera šipke armature nastupa već za 15 do 20 godina [41, 61-64]. Dakle, i bez uzimanja u obzir klimatske promjene, osigurati trajnost konstrukcija te spriječiti odnosno usporiti procese prodora agresivnih tvari i aktivne korozije jest izazov koji još nije u potpunosti riješen kako za nove tako ni za postojeće konstrukcije. S druge strane klimatske promjene mogu dodatno ubrzati proces korozije te time smanjiti trajnost, ali i nosivost konstrukcija.

4. Utjecaj klimatskih promjena na djelovanja na konstrukcije

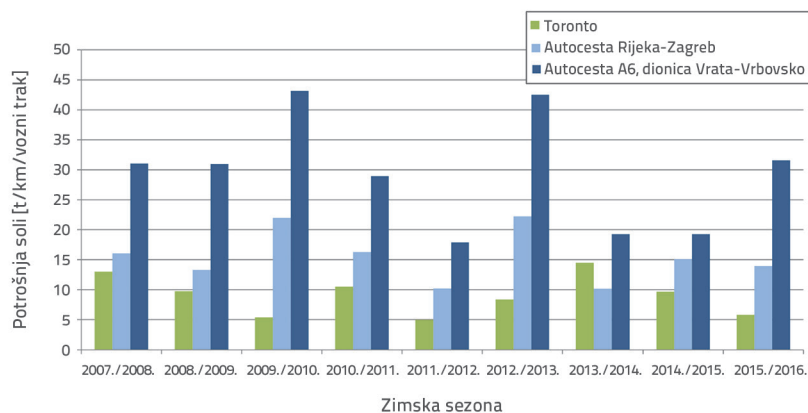
Građevine su pod direktnim utjecajem okoliša, atmosferilija i vremenskih (ne)prilika, a klimatska djelovanja imaju velik udio u opterećenju na konstrukcije. Klimatskim promjenama mijenjat će se i pojedina djelovanja na konstrukcije. To se može očitovati u promjenama intenziteta opterećenja, primjerice, povećanje temperature, intenziteta padalina, brzine vjehra, ali i kroz povećanje učestalosti ekstremnih vremenskih prilika kao što su poplave, toplinski valovi i ekstremni vjetrovi.

Neke od tih posljedica možda će biti i povoljnije s aspekta opterećenja na konstrukcije. Prema [65], vrijednosti opterećenja snijegom za Norvešku u periodu 2070 do 2100., mogla bi biti smanjena u većem dijelu zemlje. Ipak, za manji dio u unutrašnjosti države predviđa se povećanje tog opterećenja. Slično je i na području cijele Europe. Dok se za alpska i područja Karpata procjenjuje smanjenje visine i površine snijega, za područje Mediterana, Apeninskog poluotoka, Velike Britanije i Švedske predviđa se povećanje snježnog opterećenja. Međutim, iako je ponegdje moguće smanjenje godišnjih maksimalnih vrijednosti snježnog pokrivača, mogu se očekivati češći događaji ekstremnih padalina, posebno u višim planinskim područjima [66].

Kad je riječ o mostovima, ekstremni snježni uvjeti u mnogome smanjuju prohodnost, odnosno dostupnost prometnice i mostova te trajnost konstrukcije. Primjerice, snježna mečava krajem veljače 2023. prouzročila je posvemašnji prekid cestovnog prometa između obalne i kontinentalne Hrvatske (slika 5.a). Tijekom 24 sata u Gospiću je palo 47 cm snijega, a na zimskoj dionici autoceste utrošeno je 3300 tona soli za odleđivanje [66, 67].



Slika 5. a) Viadukt Zečeve Drage tijekom snježne mečave krajem veljače 2023.; b) Poplava rive i građevina uslijed visoke plime u Starigradu na Hvaru u kolovozu 2020.



Slika 6. Sezonska potrošnja soli za odleđivanje po kilometru voznoga traka na hrvatskim i kanadskim prometnicama, prema [63]

Istraživanjem o potrošnji soli za odleđivanje na hrvatskim i kanadskim prometnicama došlo se do zanimljivog rezultata: na autocesti Rijeka – Zagreb, a naročito na zimskoj dionici Vrata – Vrbovsko, potrošnja soli je veća nego na gradskoj autocesti u Torontu (slika 6). [63]. Valja napomenuti da je potrošnja soli na slici 6. iskazana po voznom traku i po kilometru dužine prometnice kako bi se podaci mogli direktno uspoređivati. Na temelju podataka od 10 godina ne može se donijeti zaključak o trendu potrošnje soli za odleđivanje, a za dulje razdoblje podaci nisu dostupni. Nadalje, na hrvatskim cestama i autocestama primjenjuje se prilično konzervativni pristup o velikoj potrošnji soli za odleđivanje kako bi se omogućila sigurnost putnika u zimskim mjesecima [62], što je jedan od razloga zašto je potrošnja soli u planinskim krajevima Hrvatske veća nego u Torontu. Međutim, iako klimatske promjene donose općenito toplije vrijeme i manje snijega, u planinskim krajevima to znači i češće izmjene ciklusa smrzavanja i odmrzavanja zbog kojih se potrošnja soli ne smanjuje. Sam ciklus smrzavanja i odmrzavanja utječe na degenerativne procese u betonskim konstrukcijama, najčešće u obliku pukotina, a obilno posipavanje solima za odleđivanje povećava rizik od korozije armature u betonu.

Jedan od najviše primjetnih utjecaja klimatskih promjena, kako u Hrvatskoj, tako i u Europi jesu poplave. Već se zaključuje kako se ekstremni događaji s povratnim periodom od 100 godina i sada događaju puno češće od tog, pa čak i svakih nekoliko godina [65, 68]. Naime, predviđa se da će do 2080. godine događaji s trenutnim stogodišnjim povratnim periodom imati tridesetogodišnji povratni period. Također, osim povećanja učestalosti, očekuje se i povećanje intenziteta takvih događaja. Treba napomenuti da na poplave utječu brojni čimbenici, primjerice, urbanizacija i povećanje (gustoće) naseljenosti znatno povećaju rizik od poplava. Promjene oborine imaju utjecaja i na rizik od podlokavanja mostova. Prema [69], na području Velike Britanije, ovisno o lokaciji i drugim parametrima, podlokavanje mostova moglo bi se povećati od 5 % do 50 % do 2080. godine. Povećanja temperature, očekivanih srednjih vrijednosti, kao i ekstremnih događaja (npr. intenzivniji i dulji toplinski valovi) može dovesti do niza posljedica, od oštećenja kolnika i željeznica

pa do učestalijih i intenzivnijih šumskih požara. Istraživanje [70] je pokazalo da povećanje srednje temperature od 2,9 °C do 2100. može rezultirati smanjenjem uporabnog vijeka detalja mosta i do 25 godina zbog problema umornosti. Povećanje razine mora kao posljedica klimatskih promjena pridonosi povećanju mnogih rizika. Veća razina mora povećava vjerojatnost poplava, a tsunami koji je posljedica tektonskih zbivanja, u kombinaciji s većom razinom mora može imati iznimno katastrofalne posljedice, pa ovaj učinak svakako zaslužuje detaljnije istraživanje. Za vrijednosti povećavanja razine mora vežu se mnoge

nesigurnosti te su lokacijski vrlo regionalno karakteristične zbog čega su od velike važnosti lokalna predviđanja budućih stanja. Prema pojedinim predviđanjima, za područje Mediterana ono iznosi od 9,8 do 25,6 cm [65]. Plavljenje rive i obalnih građevina već je sada prisutno na jadranskoj obali uslijed visokih plima i jakog juga (slika 5.b). Iako postojeće, takve pojave ne utječu na stabilnost i nosivost konstrukcija, ali imaju jak utjecaj na trajnost i uporabivost građevina.

Općenito, iz ovih projekcija vidljiv je mogući značajan utjecaj klimatskih promjena na (klimatska) opterećenja. Pritom će značajan utjecaj na konstrukcije imati povećanje učestalosti i intenziteta ekstremnih vremenskih uvjeta. Potrebno je naglasiti kako je zasad teško procijeniti nove karakteristične vrijednosti opterećenja zbog nedostatka podataka u vremenskoj i prostornoj razdiobi. Daljnja istraživanja dovest će i do smanjenja nesigurnosti vezana za modeliranja klime i klimatskih promjena, koja su još uvijek osjetno prisutna. Naime, prognoziranje promjena vjetrovnog opterećenja sadrži još uvijek znatne nesigurnosti, prije svega zbog nedovoljnog znanja i podataka iz dosadašnjih opažanja, koja su i uvelike lokacijski karakteristična, slično kao i za razinu mora. Međutim, prema Europskom odboru za normizaciju (CEN) može se očekivati povećanje ekstremnih vjetrovnih oluja za sjevernu Europu i sjeverni dio srednje Europe. Zbog toga CEN zahtijeva kontinuirano razvijanje i praćenje smjernica za klimatska djelovanja, minimalno svakih 15 godina, te naglašava da su potrebne daljnje spoznaje kako bi se ograničile nesigurnosti, i one statičke naravi i one pri modeliranju.

5. Zaključak

Istraživanje utjecaja klimatskih promjena na konstrukcije i njihovo bolje razumijevanje omogućit će i razvijanje prilagodbe na buduće uvjete, ne samo pri projektiranju novih konstrukcija, već i za adekvatno održavanje postojećih, kao i postupke pri sanacijama, renovacijama i sl.

Prema navedenom u ovom radu, očito je da klimatske promjene imaju višestruki utjecaj na mostove i druge konstrukcije. Osim promjene intenziteta, učestalosti i vrste vanjskih opterećenja

na konstrukciju uzrokuju i promjene karakteristika materijala, unutarnjih procesa u materijalima, njihovo ubrzanje ili usporavanje i sl. Može se reći da klimatske promjene djeluju negativno na konstrukcije u dva smjera. Osim što zahtijevaju veće vrijednosti kapaciteta konstrukcije zbog negativnijih djelovanja od onih za koju su projektirana, istodobno taj postojeći kapacitet nosivosti dodatno smanjuju jer djeluju na karakteristike materijala, primjerice ubrzavaju procese degradacije. Iz tih razloga, klimatske promjene trebaju biti uzete u obzir pri projektiranju, oblikovanju i održavanju novih i postojećih konstrukcija.

S ciljem utvrđivanja što preciznijih budućih uvjeta i omogućavanja adekvatnog odgovora konstrukcija na njih, a uzimajući u obzir da je modeliranje klime regionalno osjetljivo, potrebna su daljnja unaprjeđenja kako modeliranja klime tako i projektiranja i sustava održavanja građevina. Nadalje, dugotrajna procedura izrade standarda dodatno utječe na sporst donošenja normi koje uzimaju u obzir klimatske promjene.

Do uvođenja normi koje će uzeti u obzir klimatske promjene preporučuje se tzv. eksplicitni pristup projektiranju. To je projektiranje prema ponašanju konstrukcije koji obuhvaća i modele degradacije s procesima i varijablama ovisnim o vremenu. Prema sadašnjim normama u RH [71, 72], proračun

trajnosti obuhvaća tek implicitni (opisni) postupak koji rezultira određenim zahtjevima na projektiranje, izvođenje i održavanje konstrukcije: primjerice, zahtijevane vrijednosti vodocementnog omjera, minimalnog zaštitnog sloja, način i raspored pregleda konstrukcije, radove održavanja i dr. Te veličine ponajprije proizlaze iz iskustva iz prakse. Ispunjavanjem ovih zahtjeva trajnost konstrukcije se smatra zadovoljenom. Norma HRN EN 206 [73] navodi tek pojedine slučajeve kada bi eksplicitno projektiranje moglo biti adekvatno, kao što su konstrukcije sa zahtjevnim uporabnim rokom znatno različitim od 50 godina te konstrukcije u posebno agresivnim okolišima. Primjer takvih inženjerskih konstrukcija velike važnosti upravo su mostovi. Proračun trajnosti tada mora obuhvaćati modele svih relevantnih mehanizama degradacije kalibriranih na uvjetima u uporabi [28]. Takvi sveobuhvatni modeli mehanizama degradacije daju preciznije zahtjeve za projektiranje i izvedbu konstrukcija te omogućuju unaprjeđenje postupka održavanja što bi rezultiralo pouzdanijim konstrukcijama, kao i smanjenjem troškova tijekom trajanja konstrukcije. Međutim, detaljnija uporaba modela za proračun uporabnog vijeka konstrukcija (razina složenosti, vrste degradacijskih mehanizama, postupak verifikacije, itd.) zasad nije razjašnjena u postojećim normama.

LITERATURA

- [1] BBC News, [bbc.com](https://www.bbc.com), 27.07.2022.
- [2] The Copernicus Climate Change Service (C3S), Copernicus, 18.2.2023,
- [3] WMO - World Meteorological Organization, <https://public.wmo.int/en>, 29.08.2021.
- [4] DOOR - Društvo za oblikovanje održivog razvoja, <https://door.hr/>, 29.08.2021.
- [5] IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/>, 14.7.2021.
- [6] Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., et al.: Introduction. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- [7] Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. et al.: Summary for Policymakers.. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, Cambridge, IPCC, 2013
- [8] Subcommission on Quaternary Stratigraphy (SQS), Anthropocene Working Group, <http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/>, 14.07.2022
- [9] Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al.: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, IPCC, 2007
- [10] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike: Radna verzija Strategije prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu (Zelena knjiga) (poglavlje), Jačanje kapaciteta Ministarstva zaštite okoliša i energetike za prilagodbu klimatskim promjenama te priprema Nacrta strategije prilagodbe klimatskim promjenama, mr.sc. Trumbić I., Zagreb, 2017
- [11] Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu. Zagreb: Narodne novine d.d., NN 46/2020
- [12] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike: Nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu (Bijela knjiga), Jačanje kapaciteta Ministarstva zaštite okoliša i energetike za prilagodbu klimatskim promjenama te priprema Nacrta strategije prilagodbe klimatskim promjenama, mr.sc. Trumbić I., Zagreb, 2017
- [13] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike: Rezultati klimatskog modeliranja na sustavu HPC Velebit za potrebe izrade nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama Republike Hrvatske do 2040. s pogledom na 2070. i Akcijskog plana (Poglavlje), Jačanje kapaciteta Ministarstva zaštite okoliša i energetike za prilagodbu klimatskim promjenama te priprema Nacrta strategije prilagodbe klimatskim promjenama, dr.sc. Branković Č., Zagreb, 2017 .
- [14] Kušter Marić, M., Mandić Ivanković, A., Srbić, M. et al.: Utjecaj klimatskih promjena na mostove u morskom i planinskom okolišu, 8. sabor hrvatskih graditelja, Vodice, 2021.
- [15] Harasti, A., Gilja, G., Potočki, K., Lacko, M.: Scour at Bridge Piers Protected by the Riprap Sloping Structure: A Review. Water 2021, 13, 3606. <https://doi.org/10.3390/w13243606>

- [16] Bačić, M., Kovačević, S.M., Librić, L. et al.: Utjecaj klimatskih promjena na sustav zaštite od poplava: primjer projekta oVERFLOW, 8. sabor hrvatskih graditelja, Vodice, 2021.
- [17] Kosić, M., Prendergast, L.J., Anžlin, A.: Analysis of the response of a roadway bridge under extreme flooding-related events: Scour and debris-loading, *Engineering Structures*, 279 (2023), 115607, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115607>.
- [18] Toll, D.G., Abedin, Z., Buma, J. et al.: The impact of changes in the water table and soil moisture on structural stability of buildings and foundation systems: systematic review CEE10-005 (SR90), 2012, Technical Report. Collaboration for Environmental Evidence.
- [19] Nasr, A.E., Björnsson, I. et al: Bridges in a changing climate: a study of the potential impacts of climate change on bridges and their possible adaptations, *Structure and Infrastructure Engineering*, 16 (2020) 4, pp. 738-749, <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1670215>
- [20] Bažant, Z.P., Hubler, M.H., Yu, Q.: Pervasiveness of excessive segmental bridge deflections: Wake-up call for creep. *ACI Structural Journal*, 108 (2011) 6, pp. 766–774.
- [21] Puž, G., Radić, J., Tenžera, D.: Visual inspection in evaluation of bridge condition, *GRAĐEVINAR*, 64 (2012) 9, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.718.2012>
- [22] Stipanović Oslaković, I., Bjegović, D., Mikulić, D.: Matematički modeli za proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija, *GRAĐEVINAR*, 59 (2007) 9
- [23] Milić, I., Mandić Ivanković, A., Syrkov, A., Skokandić, D.: Bridge failures, forensic structural engineering and recommendations for design of robust structures, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 7, pp. 717-736, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3234.2021>
- [24] RILEM 2022: Benchmarking Chloride Ingress Models on Real-life Case Studies—Marine Submerged and Road Sprayed Concrete Structures, Koenders E., Imamoto K., Soive A., Springer Cham. 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96422-1>
- [25] Cairns, J., Plizzari, G.A., Du, Y., et al.: Mechanical Properties of Corrosion-Damaged Reinforcement, *ACI Materials Journal*, 102 (4), pp. 256–264, 2005.
- [26] Francišković, J.: Corrosion protection in reinforced-concrete structures, *GRAĐEVINAR*, 56 (2004) 12
- [27] Böhni, H.: Corrosion in reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2005.
- [28] Wang, X., Stewart, M.G., Nguyen, M.: Impact of climate change on corrosion and damage to concrete infrastructure in Australia. *Climatic Change* 110 (2012), pp. 941–957. doi: 10.1007/s10584-011-0124-7
- [29] Nguyen, P., Bastidas-Arteaga, E., Amiri et al.: An Efficient Chloride Ingress Model for Long-Term Lifetime Assessment of Reinforced Concrete Structures Under Realistic climate and Exposure Conditions, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 11 (2017) pp. 199–213, doi: 10.1007/s40069-017-0185-8
- [30] Yoon, I., Copurouglu, O., Park, K.: Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete, *Atmospheric environment*, 41 (2007) 34, pp. 7274–7285, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.05.028
- [31] Peng, L., Stewart, M.G.: Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China. *Struct Infrastruct Eng.*, 12 (2016) 4, pp. 499–516.
- [32] Xie, H.B., Wang, Y.F., Gong, J. et al.: Effect of Global Warming on Chloride Ion Erosion Risks for Offshore RC Bridges in China. *KSCE Journal of Civil Engineering* 22 (2018) 9, pp.3600–3606 doi: 10.1007/s12205-018-1547-8
- [33] Gao, X., Wang, X.: Impacts of Global Warming and Sea Level Rise on Service Life of Chloride-Exposed Concrete Structures, *Sustainability*, 9 (2017) 3, pp. 460; doi:10.3390/su9030460
- [34] Khatami, D.: Impact of climate conditions on deteriorating reinforced concrete bridges in the US Midwest region, *J. Perform. Constr. Facil.*, 35 (2021) 1. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001528
- [35] Larrard, T., Bastidas-Arteaga, E., Duprat, F et al. Effects of climate variations and global warming on the durability of RC structures subjected to carbonation, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 31 (2014) 2, pp. 153-164. doi: 10.1080/10286608.2014.913033
- [36] Saha, M., Eckelman, M.J.: Urban scale mapping of concrete degradation from projected climate change. *Urban Climate*, 9 (2014) pp. 101-114, doi: 10.1016/j.uclim.2014.07.007
- [37] Orcesi, A., O'Connor, A., Bastidas-Arteaga, E., et al.: Investigating the Effects of Climate Change on Material Properties and Structural Performance, *Structural Engineering International*, 32 (2022) 4, pp. 577-588, doi: 10.1080/10168664.2022.2107468
- [38] Bastidas-Arteaga, E., Schoefs, F., Stewart, M.G., Wang, X.: Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach, *Engineering Structures*. 51 (2013), pp. 259–266.
- [39] Kušter Marić, M., Ožbolt, J., Balabanić, G., et al.: Chloride Transport in Cracked Concrete Subjected to Wetting – Drying Cycles: Numerical Simulations and Measurements on Bridges Exposed to DE-Icing Salts. *Front. Built Environ.* 6 (2020) :561897. doi: 10.3389/fbuil.2020.561897
- [40] Titi, A., Biondini, F.: Probabilistic seismic assessment of multistory precast concrete frames exposed to corrosion, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12 (2014) 6, pp. 2665–2681, doi:10.1007/s10518-014-9620-2
- [41] Skokandić, D., Vlašić, A., Kušter Marić, M., Srbić, M., Mandić Ivanković, A.: Seismic Assessment and retrofitting of Existing Road Bridges; State of the Art Review, *Materials*, 15 (2022) 7, 2523,23 doi:10.3390/ma15072523
- [42] Karapetrou, S., Manakou, M., Bindi, D., Petrovic B., Pitolakis, K.: Time-building specific seismic vulnerability assessment of a hospital RC building using field monitoring data, *Engineering Structures*, 112 (2016), pp. 114-132, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.01.009
- [43] Sousa, M.L., Dimova, S., Athanasopoulou, A., et al.: Expected implications of climate change on the corrosion of structures, EUR 30303 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-20782-5, doi:10.2760/05229, JRC121312
- [44] fib Task Group Bond Models: Bond of Reinforcement in Concrete – State-of-art report, fib Bulletin 10 (2000), Lausanne, International Federation for Structural Concrete, doi:10.35789/fib.BULL.0010
- [45] Cairns, J., Plizzari, G.A., Du, Y. et al.: Mechanical properties of corrosion-damaged reinforcement, *ACI Materials Journal*, 102 (2005) 4, pp. 256-264.
- [46] Du, Y.G., Clark, L.A., Chan, A.H.C.: Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars, *Magazine of Concrete Research*, 57 (2005) 7, pp. 407-419.
- [47] Du, Y.G.; Clark, L.A., Chan, A.H.C.: Residual capacity of corroded reinforcing bars, *Magazine of Concrete Research*, 57 (2005) 3. pp. 135-147.
- [48] Rodriguez, J., Ortega, L.M., Casal, J.: Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement, *Construction and Building Materials*, 11 (1997) 4, pp. 239-248.

- [49] Zandi Hanjari, K.: Structural Behaviour of Deteriorated Concrete Structures. PhD thesis. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology – Department of Civil and Environmental Engineering – Division of Structural Engineering, Concrete Structures, 2010
- [50] Kušter Marić, M.: Service life prediction of reinforced concrete bridges exposed to chlorides. PhD thesis, University of Zagreb, Croatia, 2013.
- [51] Kušter Marić, M., Radić, J., Ožbolt, J. et al.: Analysis on durability of reinforced concrete bridges in maritime environment, Annual 2015 of the Croatian Academy of Engineering, 22 (2016), pp. 57-78.
- [52] Afsar Dizaj, E., Madandoust, R., Kashani, M.M.: Modelling the effect of corrosion on failure modes of RC columns subject to lateral seismic loading, Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering, 2018.
- [53] Kušter Marić, M., Mandić Ivanković, A., Vlašić, A., Bleiziffer, J., Sribić, M., Skokandić, D.: Assessment of reinforcement corrosion and concrete damage on bridges using non-destructive testing, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 10, pp. 843-862, <https://doi.org/10.14256/JCE.2724.2019>
- [54] Karapetrou, S.T., Fotopoulou, S.D., Pitilakis, K.D.: Seismic Vulnerability of RC Buildings under the Effect of Aging, Procedia Environmental Sciences, 38 (2017), pp. 461-468, doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.137
- [55] Akiyama, M., Frangopol, D.M., Matsuzaki, H.: Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards, Earthquake Engng Struct. Dyn. 2011; 40:1671-1687. DOI: 10.1002/eqe.1108
- [56] Biondini, F., Camnasio, E., Palermo, A.: Lifetime seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion, Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 10 (2014) 7, pp. 880-900, doi:10.1080/15732479.2012.761248
- [57] Afsar Dizaj, E., Kashani, M.M.: Numerical investigation of the influence of cross-sectional shape and corrosion damage on failure mechanisms of RC bridge piers under earthquake loading. Bull Earthquake Eng ,18 (2020), pp. 4939-4961, doi:10.1007/s10518-020-00883-3
- [58] Cheng, H., Li, H.N., Yang, Y.B. et al.: Seismic fragility analysis of deteriorating RC bridge columns with time-variant capacity index. Bull Earthquake Eng 17 (2019), pp. 4247-4267, doi:10.1007/s10518-019-00628-x
- [59] Zanini, M.A., Pellegrino, C., Morbin, R. et al.: Seismic vulnerability of bridges in transport networks subjected to environmental deterioration, Bull Earthquake Eng, 11 (2013), pp- 561-579, doi:10.1007/s10518-012-9400-9
- [60] Deng, P., Zhang, C., Shiling, P., Jin, Z.: Modeling the Impact of Corrosion on Seismic Performance of Multi-Span Simply-Supported Bridges, Construction and Building Materials, 185 (2018), pp. 193-205. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.015
- [61] Kušter Marić, M.; Ožbolt, J., Balabanić, G.: Reinforced concrete bridge exposed to extreme maritime environmental conditions and mechanical damage: Measurements and numerical simulation, Engineering structures, 205 (2020), 110078, 12 doi:10.1016/j.engstruct.2019.110078
- [62] Kušter Marić, M., Ožbolt, J., Balabanić, G., et al.: Chloride Transport in Cracked Concrete Subjected to Wetting – Drying Cycles: Numerical Simulations and Measurements on Bridges Exposed to DE-Icing Salts. Front. Built Environ. 6 (2020) :561897. doi: 10.3389/fbuil.2020.561897
- [63] Kušter Marić, M., Mandić Ivanković, A., Vlašić, A. et al.: Assessment of reinforcement corrosion and concrete damage on bridges using non-destructive testing, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 10, pp. 843-862, doi: 10.14256/JCE.2724.2019
- [64] Kušter Marić, M., Ivanković, A.M., Sribić, M., et al.: Assessment of Performance Indicators of a Large-Span Reinforced Concrete Arch Bridge in a Multi-Hazard Environment" Buildings 12, no. 7: 1046. <https://doi.org/10.3390/buildings12071046>
- [65] Orcesi A., O'Connor A.: Diamantidis D. et al., Investigating the Effects of Climate Change on Structural Actions, Structural Engineering International, 32 (2022) 4, pp.563-576 doi:10.1080/10168664.2022.2098894
- [66] DHMZ, meteo.hr, 28.2.2023.
- [67] Hrvatske autoceste, hac.hr, 28.2.2023.
- [68] Forzieri, G., Bianchi, A., Marin Herrera, M.A., et al.: Resilience of large investments and critical infrastructures in Europe to climate change. Joint Research Centre (European Commission); 2015. p. 175. ISSN 1831-9424. ISBN 978-92-79-54003-5. DOI: 10.2788/171858.
- [69] DEFRA. Annual report. ISBN, 9781474146265; 2016.
- [70] Farreras-Alcover, I., Chryssanthopoulos, M.K., Andersen, J.E.: Data-based models for fatigue reliability of orthotropic steel bridge decks based on temperature, traffic and strain monitoring. International Journal of Fatigue. 95 (2017), pp.104-119, doi:10.1016/j.ijfatigue.2016.09.019
- [71] HRN EN 1990:2011 Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija (EN 1990:2002+A12005/AC:2010)
- [72] HRN EN 1992-1-1:2013 Eurokod: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2010) Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2013
- [73] HRN EN 206-1:2021 Beton: Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A2:2021), Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2021