

# Procjena rizika podlokavanja mostova u uvjetima klimatskih promjena

Ivan Ćosić<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Neven Kuspilić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geokon-Zagreb d.d., [ivan.cosic@geokon.hr](mailto:ivan.cosic@geokon.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, [kuspa@grad.hr](mailto:kuspa@grad.hr)

## Sažetak

Mostovi su za svog projektnog vijeka izloženi promjenama u koritu vodotoka nastalih kao posljedica prirodnih erozijskih procesa uvjetovanih režimom tečenja. Promjene klime utječu na promjenu hidrološko-hidrauličkog režima vodotoka. Proces podlokavanja u izravnoj je ovisnosti o režimu tečenja i hidrauličkim parametrima toka vodotoka. Razvojem podlokavanja narušava se funkcionalnost i sigurnost mosta, što može dovesti do šteta i urušavanja. U ovom radu promatrana je veza klimatskih promjena, procesa podlokavanja i rizika podlokavanja koji bi određene klimatske promjene mogle prouzročiti.

*Gljučne riječi: podlokavanje oko mostova, rizik od podlokavanja, klimatski modeli, lokalna erozija, modeli rizika*

## Bridge scour risk assessment in climate change conditions

### Abstract

During their design life bridges are exposed to riverbed changes, which are caused by natural erosion processes influenced by variable flow regime conditions. Climate changes influence hydrological conditions at the river basin and hydraulic parameters of flow, which are directly linked to scour development processes. Scour leads to bridge instability, which can result in bridge damage and failure. The goal of this paper is to show the relationship between the climate change, bridge scour, and the effects of climate change on scour risk.

*Key words: bridge scour, scour risk, climate change, risk models, climate models*

## 1 Uvod

Klimatske promjene, na neizravan način, u određenoj mjeri utječu na erozijske procese u vodotocima, djelujući na hidrološki režim vodotoka. Povećanjem količina oborina povećava se otjecanje na slivu, što u konačnici rezultira većim vodostajima i protocima vodotoka. Isto tako, smanjenjem količine oborina dolazi do smanjenja razina vodostaja i protoka u vodotoku. U uvjetima velikovodnih događaja hidraulički parametri toka, brzina i turbulencija imaju veće vrijednosti, te je erozivno djelovanje vodotoka veće. Pojava lokalne erozije stupova mosta i upornjaka, proces podlokavanja, u izravnoj je korelaciji s parametrima toka te u konačnici i s hidrološkim prilikama vodotoka. Same građevine na vodotocima, ponajprije mostovi, projektirane su kako bi bile otporne na djelovanje vode, međutim njihova stabilnost, u projektnom vijeku građevine, može biti ugrožena zbog erozijskih procesa u koritu vodotoka. Budući da je projektni vijek građevine poput mosta i preko 100 godina, u navedenom razdoblju mogu se očekivati značajnije promjene početnih projektnih uvjeta, poput promjene dubine korita, ali i promjene klime te time i hidrološkoga režima vodotoka. Dubina za koju se snizi razina dna korita ispod svoga prirodnog stanja naziva se dubina erozije, odnosno u slučaju podlokavanja, dubina podlokavanja [1]. Brojna istraživanja provedena u Sjedinjenim Američkim Državama pokazuju kako je podlokavanje primarni uzročnik otkazivanja mosne konstrukcije, s prosječnom godišnjom stopom od 22 mosta koja su urušena ili zatvorena zbog znatnih deformacija [2]. Uzimajući u obzir sve veći značaj mostova i prateće infrastrukture u današnjem društvu, primijenjen je model rizika kako bi se procijenilo stanje ugroze u ekonomskom pogledu. U ovom radu nastojat će se povezati aktualne klimatske promjene s procesom podlokavanja te predstaviti modele procjene rizika podlokavanja u uvjetima tih promjena. Uzimajući u obzir aktualne klimatske modele koji iskazuju promjene klime, vezujući ih s metodama proračuna podlokavanja i vjerojatnošću pojave hidroloških događaja određenih povratnih perioda, nastojat će se procijeniti utjecaj tih promjena na rizik podlokavanja u novim klimatskim uvjetima. Ovaj rad predstavlja samo pregled i prijedlog moguće metodologije povezivanja navedenih pojava i procesa te u daljnjim radovima zahtijeva konkretnije povezivanje klimatskih promjena i njihovoga utjecaja na rizik od podlokavanja mostova.

## 2 Stanje znanja – pregled istraživanja

### 2.1 Postojeći klimatski modeli

Atmosfera je fluid u kojem vladaju fizikalni zakoni hidrodinamike i termodinamike, koji se mogu opisati matematičkim nelinearnim diferencijalnim jednadžbama [3]. Sustav tih diferencijalnih jednadžbi predstavlja klimatski model. Klimatski se modeli općenito dijele na globalne i regionalne. Globalni klimatski modeli (eng. *Global Climate Model*

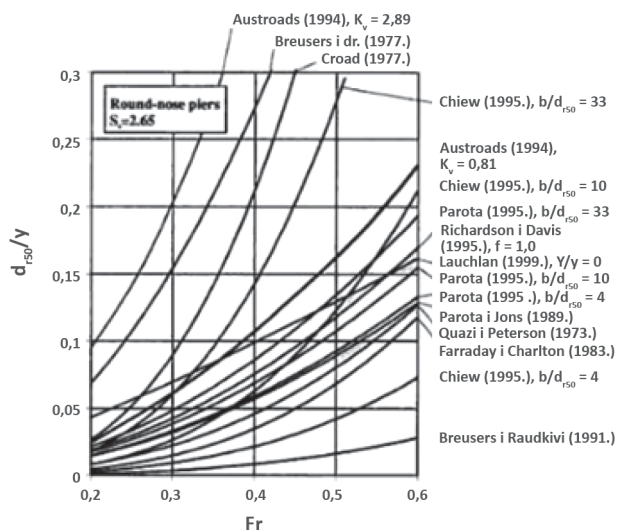
- GCM) prate klimu i promjene klime na globalnoj razini te daju rubne uvjete manjim, regionalnim modelima (eng. *Regional Climate Model* - RCM). Zbog razmjerno grube rezolucije (150 - 250 km) GCM su neprikladni za istraživanje klime i klimatskih varijacija na lokalnim i regionalnim skalama [4]. Regionalni klimatski modeli (RCM) pokrivaju manje područje te su finije horizontalne rezolucije (10 - 50 km), čime se omogućavaju detaljniji izračuni klimatskih parametara [5]. Uz klimatske modele, za simulacije klime u bliskoj budućnosti nužno je odabrati i klimatske scenarije, što uglavnom podrazumijeva scenarije emisije stakleničkih plinova, uzimajući u obzir pretpostavke o budućem gospodarskom, demografskom, socijalnom i tehnološkom razvoju na globalnoj i regionalnoj razini. U ovom se radu neće ulaziti u samu problematiku klimatskih modela, nego će se za razmatranja rabiti podaci dobiveni iz aktualnih klimatskih modela.

## 2.2 Metodologije proračuna podlokavanja

Problem lokalnoga podlokavanja stupova i upornjaka mosta znatno se proučavao u proteklom stoljeću te su objavljene brojne publikacije na tu temu. Većinom su to provedena ispitivanja na laboratorijskim modelima, pa su podaci, izrazi i veličine odgovarajuće empirijskim podacima koje je određeni postupak proučavanja pokazao. U praksi, proces podlokavanja, kao i sva problematika vezana za pronos nanosa, teško je mjerljiv, što je vidljivo iz izraza za proračun dubina podlokavanja, a posebice pri dimenzioniranju zaštite od podlokavanja, kada raspon dobivenih vrijednosti može znatno odstupati. Proteklih nekoliko desetljeća, objavljeni su brojni značajni radovi na temu lokalnog podlokavanja [6]. Pregled izraza dan je u tablici 1.

**Tablica 1. Pregled nekih od metoda i formula za izračun dubine podlokavanja ( $y$ ) ili potrebnog promjera zrna zaštite od podlokavanja ( $d_{r50}$ )**

Metoda	Formula	Izraz
Quazi i Peterson (1973.)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{0,85}{(S_s - 1)^{1,25}} Fr^{2,5} [\text{cm}]$	(1)
Breusers i dr. (1977.)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{2,83}{(S_s - 1)} Fr^2 [\text{cm}]$	(2)
Farraday i Charlton (1983.)	$\frac{d_{r50}}{y} = 0,547 Fr^3 [\text{cm}]$	(3)
Breusers i Raudkivi (1991.)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{0,278}{(S_s - 1)^{1,5}} Fr^2 [\text{cm}]$	(4)
Austroads (1994.)	$\frac{d_{r50}}{y} = \frac{0,58 K_p K_v}{(S_s - 1)^{1,5}} Fr^2 [\text{cm}]$	(5)
Legenda: $y$ – dubina podlokavanja [m], $d_{r50}$ – srednje zrno obloge [mm], $S_s$ – specifična težina kamena za riprap, $Fr$ – Froudeov broj, $K_p$ – faktor oblika stupa, $K_v$ – faktor brzine toka		



Slika 1. Usporedba rezultata metoda određivanja zrna zaštitne riprap obloge [6]

Prema slici 1., vidljiv je znatan raspon mogućih rezultata, barem prema izrazima (1) – (5); uočljivo je kako su veličine koje se rabe u proračunu iste, a i sam je oblik izraza gotovo istovjetan, no pripadajuće konstante daju drugačije rezultate. Metoda (jednadžbe) koje se rabe za proračun su brojne. Najčešće upotrebljavane metode za proračun dubine podlokavanja oko stupova mosta jesu CSU metoda (Colorado State University) te Froehlichova metoda, dok se za upornjake najčešće rabe Froehlichova metoda s nešto drugačijim izrazom nego za stupove te metoda HIRE (FHWA 2001 – Federal Highway Administration, SAD) [7].

## 2.3 Modeli rizika

Općenita definicija rizika u hidrološkom smislu iz Direktive 2007/60/EZ (Europski parlament i Vijeće, 2007) Europskoga parlamenta i vijeća definira poplavni rizik kao umnožak vjerojatnosti pojave, njezine učestalosti i štete koju ta pojava uzrokuje. To znači da je poplavni rizik ekonomska kategorija, odnosno da je jedinica mjere novčana [8]. Isto načelo definicije rizika može se primijeniti i na rizik od podlokavanja. Matematički gledano, rizik je definiran kao [9, 10]

$$Rizik = P_e(PP) \cdot NSV \quad (6)$$

gdje su:

$P_e(PP)$  – vjerojatnost pojave određenoga projektnog povratnog perioda

$NSV$  – neto sadašnja vrijednost troškova gubitka stabilnosti (tj. suma troškova ponovne izgradnje, oštećenja,...).

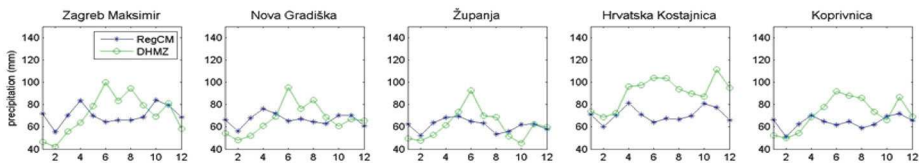
Iz područja procjene rizika na temelju izraza (6) razvijeni su brojni modeli prilagođeni pojedinim problemima kako bi što bolje opisali faktore rizika za promatrana područja, poput rizika od poplava, od urušavanja, od terorističkih akcija te brojni drugi. Za područje procjene rizika od podlokavanja srodni modeli rizika su modeli poplavnih rizika, budući da se promatra vrijednost vjerojatnosti pojave određenih hidroloških događaja, dok je neto sadašnja vrijednost nešto drugačija, te se ona u modelima rizika od podlokavanja odnosi na most kao građevinu te promet i infrastrukturu koja je vezana na promatrani most.

### 3 Korelacija procesa podlokavanja i klimatskih promjena

U Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ-u) radilo se na razvoju regionalnoga klimatskog modela RegCM3 kojim se simulira sadašnja klima, u razdoblju od 1961. - 1990. godine te klima u bliskoj budućnosti, u razdoblju 2011. - 2040. godine [11]. Rezultati regionalnoga klimatskog modela upotrijebljenog za domenu iznad Europe utemeljeni su na rubnim uvjetima globalnog klimatskog modela EH5OM. Za simulaciju buduće klime upotrijebljen je IPCC klimatski scenarij A2, koji je izrazito nepovoljan, koji uključuje visoke koncentracije stakleničkih plinova i karakterizira svijet velike heterogenosti sa stalnim povećanjem svjetske populacije [12]. Rezultati toga modela pokazuju povećanje količina oborina i otjecanja u jesenskom periodu, naročito na području istočne Hrvatske.



Slika 2. Usporedni prikaz površinskoga otjecanja za mjerene podatke (zeleno, linija s kružićima) i rezultate simulacije modela (plavo, linija s točkama)



Slika 3. Usporedni prikaz količina oborina za mjerene podatke (zeleno, linija s kružićima) i rezultate simulacije modela (plavo, linija s točkama)

Ono što povezuje klimatske modele i proces podlokavanja upravo su vodostaj i protok, odnosno brzina tečenja, za određeni hidrološki događaj. To je vidljivo iz izraza za proračun podlokavanja oko stupa mosta, prema CSU metodi, koju upotrebljava i FHWA, u priručniku HEC-18 [7]:

$$\frac{y}{y_1} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left[ \frac{b}{y_1} \right]^{-0.65} Fr^{0.43} \quad (7)$$

gdje su:

$y$  – dubina podlokavanja [m]

$y_1$  – dubina u profilu uzvodno od stupa mosta [m]

$b$  – širina stupa [m]

$Fr$  – Froudeov broj,  $Fr = \frac{v_{sr}^2}{gy_1}$

$v_{sr}$  – srednja brzina uzvodno [m/s],  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

$K_1, K_2, K_3, K_4$  – faktori korekcije

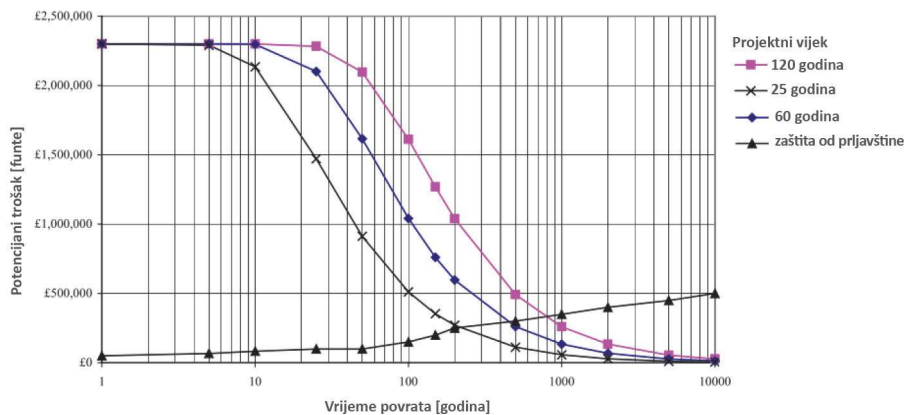
Najveći učinak podlokavanja događa se za vrijeme velikovodnih događaja, kada su brzine i vodostaji najveći, a time je i djelovanje vode na pokretanje čestica nanosa također najveće te je proces erozije najizraženiji. Za svaki specifičan slučaj nužno je odrediti koje vodostaje i protoke trebamo promatrati. Statističkom analizom zapisa hidroloških podataka određuju se hidrološki događaji određenih povratnih perioda, s pripadajućom vjerojatnošću pojavljivanja. Primjenjujući upravo simulacije klimatskih modela treba analizirati simulirane vodostaje i protoke za buduće razdoblje kako bi se moglo na temelju tako dobivenih značajnih vodostaja i protoka odrediti dubine podlokavanja, a u konačnici i odgovarajući rizik.

## 4 Analiza modela rizika

Prema izrazu (6), rizik predstavlja kombinaciju vjerojatnosti pojavljivanja događaja određenoga povratnog perioda i vrijednosti štete koju taj događaj uzrokuje. Kako bi se moglo pristupiti izračunu rizika, nužno je odrediti vjerojatnosti pojavljivanja određenih događaja. Za to postoji više statističkih postupaka. Ipak, za procjenu rizika od podlokavanja nije dovoljno samo odrediti vjerojatnost pojave određenoga hidrološkog događaja, nego taj podatak dovesti u korelaciju s odabranim ili postojećim projektnim vijekom građevine, kako bi procjena tog rizika imala smisla [8]. Upotreba optimalnoga povratnog razdoblja za projektiranje zaštite od podlokavanja može se dobiti kombiniranjem vrijednosti povratnog perioda za projektiranje zaštite od podlokavanja s vrijednošću štete za pojedino vrijeme projektnoga vijeka građevine. Za odabrani projektirani vijek građevine nužno je odrediti vrijednosti povratnih perioda projektirane zaštite s odgovarajućim troškovima. Kada se te dvije krivulje prikažu na zajedničkom grafu, na mjestu njihovog presjecišta očitao bi se optimalan povratni period za dimenzioniranje zaštite od podlokavanja [10], kako je prikazano na slici 4.

**Tablica 2. Vjerojatnost pojave događaja projektnog povratnog perioda jednom u vremenu projektnog vijeka uporabe građevine [8]**

Projektni povratni period [god]	Projektni vijek uporabe građevine [god]						
	2	10	50	100	200	500	1000
2	0,750	0,999	1	1	1	1	1
10	0,190	0,651	0,995	1	1	1	1
50	0,040	0,183	0,636	0,867	0,982	0,999	0,999
100	0,020	0,096	0,395	0,634	0,866	0,993	0,999
200	0,010	0,049	0,222	0,394	0,633	0,918	0,993
500	0,004	0,020	0,095	0,181	0,330	0,632	0,865
1000	0,002	0,010	0,049	0,095	0,181	0,394	0,632

**Slika 4. Odnos rizika rušenja prema cijeni zaštite od podlokavanja [10]**

Povećavajući odabrani projektni vijek građevine, povećavamo i vjerojatnost pojave kritičnoga hidrološkog događaja, što u konačnici dovodi do zaključka kako je nužno razmotriti ekonomske dobiti ili gubitke u pogledu dimenzioniranja zaštite od podlokavanja u odnosu na možebitnu štetu do koje bi došlo ako te zaštite ne bi bilo. Za izračun samoga rizika od podlokavanja FHWA rabi HYRISK, računalni program koji se bazira na podacima iz baze mostova, u kojoj su sadržani svi podaci o pojedinom mostu, njegovo prometno opterećenje, ugroženost od podlokavanja, dubina i položaj temelja te brojni drugi parametri:

$$R = KP_A \left\{ (C_1 WL_b M) + (C_2 DAd) + \left[ C_3 O \left( 1 - \frac{T}{100} \right) + C_4 \frac{T}{100} \right] \frac{DA d}{S} \right\} \quad (8)$$

gdje su:

- R – rizik [US \$]
- K – faktor korekcije
- P<sub>A</sub> – godišnja vjerojatnost otkazivanja zbog podlokavanja [1/god]
- C<sub>1</sub> – troškovi obnove
- W – širina rasponske konstrukcije [m]
- L<sub>b</sub> – duljina mosta [m]
- M – multiplikator cijene zamjene mosta
- C<sub>2</sub> – jedinična cijena vozila [US \$/km]
- D – duljina obilaska [m]
- A – prosječan broj vozila dnevno [vozilo/dan]
- d – trajanje obilaska [dan]
- C<sub>3</sub> – jedinična cijena vremena po čovjeku [US \$/h]
- O – broj putnika po vozilu [osoba/vozilu]
- T – prosječni dnevni udio kamiona [%]
- C<sub>4</sub> – jedinična cijena po kamionu [US \$/h]
- S – prosječna brzina na obilasku [km/h].

Na temelju podataka iz baze mostova, računa se rizik od podlokavanja koji predstavlja kombinaciju korektivnih faktora, godišnje vjerojatnosti otkazivanja na podlokavanje te cijene, koja uključuje stavke troškova sanacije i rekonstrukcije, troškova održavanja, vremenskih troškova zastoja te u najgorem scenariju trošak, odnosno cijenu ljudskih života [13, 14]. Kako bi se mogao izračunati rizik od podlokavanja po ovoj metodi, potrebno je poznavati brojne parametre i napraviti opsežne i sustavne analize mostova, a ne samo hidroloških događaja.

## 5 Zaključak i rasprava

U ovom radu prikazani su odnosi klimatskih modela kojima se simuliraju klimatske promjene, procesa podlokavanja te rizika podlokavanja za mostove. Promjene klime su općeprihvaćena činjenica. Smjer promjene klime, a time i njezinih hidroloških parametara, ovisi o modelu klime koji se promatra, tako da te promjene mogu biti u smjeru povećanja ili smanjenja oborina, ovisno i o prostornom području koje se razmatra. Za područje Republike Hrvatske, poglavito sliv rijeke Save, uočljive su određene promjene u hidrološkim ciklusima, sa sve češćim pojavama vodnih ekstrema. Kako bi na te izazove mogli adekvatno odgovoriti, nužno je uzeti u obzir te promjene i inkorporirati ih u poznate i priznate modele proračuna dubina podlokavanja te izračuna modela rizika od podlokavanja. Sam proces podlokavanja, kako je



spomenuto, najznačajniji je faktor ugroze mostova na vodotocima, a samim time što se odvija pod vodom i najizraženiji je za vrijeme velikovodnih događaja, nije ga jednostavno mjeriti i kontinuirano pratiti. Uzevši u obzir modele rizika, taj bi se problem trebao aktualizirati te u određenu ruku i racionalizirati. Naime, provedbom cjelokupne analize rizika mostova na podlokavanje, određen je i redoslijed i prioritetnost, ali i cijena određenih djelovanja kako bi mostovi zadržali svoju funkcionalnost i uporabivost. Prilikom analize rizika od podlokavanja, ključno je odabrati povratni period za koji podlokavanje ima najizraženiju vrijednost te na taj povratni period dimenzionirati zaštitu. Kao zaključak na ovaj rad nameće se potreba za aktualiziranjem pitanja podlokavanja oko mostova, za sustavan i cjelovit pristup kako bi se sve eventualne štete, izazvane klimatskim promjenama, umanjile ili izbjegle.

## Literatura

- [1] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D.: Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova; Influence of riverbed degradation on bridge safety, *Sabor Hrvatskih graditelja* 2012., pp. 795–806, 2012.
- [2] Briaud, J.L., Gardoni, P., Yao, C.: Statistical, Risk, and Reliability Analyses of Bridge Scour, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 140 (2014) 2, 04013011
- [3] Branković, Č.: Klima i klimatske promjene, *Matematičko-fizički list*, 3 (2015), pp. 152–162.
- [4] Branković, Č., Srnc, L., Patar, M., Güttler, I.: Klimatsko modeliranje u DHMZ-u, Hrvatsko meteorološko društvo, Zagreb, 2014.
- [5] Güttler, I.: Očekivani scenariji klimatskih promjena na području istočne Slavonije, *CroAdapt radionica: Istočna Slavonija kao model regija*, 2015.
- [6] Bruce W. Melville, S.E.C.: *Bridge Scour*. Water Resources Publications LLC, 2000.
- [7] Department of Transport and Main Roads - Queensland Government Australia, Bridge Scour Manual, 2003.
- [8] Kuspilić, N., Gilja, G., Ocvirk, E.: Izračun vjerojatnosti pojave poplavnog događaja i njegovog utjecaja na poplavni rizik, *Hrvatske vode na investicijskom valu - 6. Hrvatska Konferencija o vodama*, pp. 584–592, 2015.
- [9] Kuspilić, N.: Postupci zaštite od voda - skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [10] Mockett, I.D., Simm, J.: *Risk Levels in Coastal and River Engineering: A Guidance Framework for Design*, E14 4JD. London: Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd, 2002.

- [11] Trninić, D., Bošnjak, T.: Dugoročne promjene prosječnih godišnjih protoka, *Hrvatske vode*, 80 (2012), pp. 223–230.
- [12] Güttler, I., Trninić, D., Bošnjak, T., Srnec, L., Patarčić, M., Branković, Č.: Potential near future runoff changes in Croatia, *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena/ Croatian waters facing the challenge of climate changes*, 2011, pp. 65–75.
- [13] Yanmaz, A.M., Apaydin, M.: Bridge Scour Risk Assessment and Countermeasure Design, *J. Perform. Constr. Facil.*, 26 (2012) 4, pp. 499–506.
- [14] Khelifa, A., Garrow, L.A., Higgins, M.J., Meyer, M.D.: Impacts of Climate Change on Scour-Vulnerable Bridges: Assessment Based on HYRISK, *J. Infrastruct. Syst.*, 19 (2013) 2, pp. 138–146.