

Mogući pristup analizi procesa podlokavanja oko stupova mostova nastalih pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara

Kovačević, Martina; Potočki, Kristina

Source / Izvornik: **7. simpozij doktorskog studija građevinarstva 2021. : zbornik radova, 2021, 45 - 58**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2021.02>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:602659>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-09**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Mogući pristup analizi procesa podlokavanja oko stupova mostova nastalih pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara

Martina Kovačević¹, doc.dr.sc. Kristina Potočki²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, martina.kovacevic@grad.unizg.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kristina.potocki@grad.unizg.hr

Sažetak

Promjene u hidrološkom režimu, nastale pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara, omogućuju bolje poimanje hidrauličkih i geomorfoloških procesa u rijekama. Varijabilnost protoka i karakteristike poplavnih valova intenziviraju erozijske procese u rijekama i utječu na podlokavanje oko stupova mosta, što rezultira smanjenjem njihove sigurnosti. Cilj ovog rada je dati pregled literature mogućeg pristupa analizi procesa podlokavanja pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta i prikaz u te svrhe korištenih znanstvenih metoda s opisom onih koje će biti primjenjivane za buduće istraživanje. Također, postavlja se temelj za daljnje istraživanje povezano s R3PEAT projektom ("Remote Real-time Riprap Protection Erosion Assessment on large rivers"), podržanog od strane Hrvatske zaklade za znanost, koji istražuje utjecaj hidroloških procesa na erozijske procese oko mostova, koji prelaze preko velikih nizinskih rijeka u Hrvatskoj.

Ključne riječi: hidrološki i meteorološki parametri, podlokavanje, mostovi, R3PEAT projekt

Possible approach for evaluation of scour depth around bridges based on hydrological and meteorological parameters

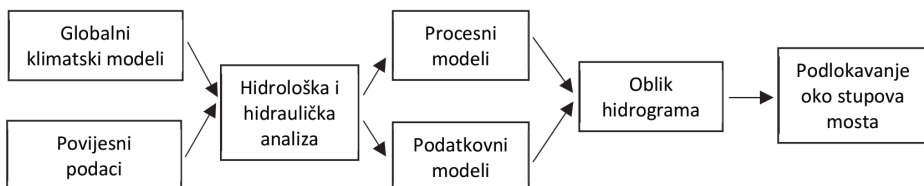
Abstract

The analysis of changes in the hydrological regime under the influence of hydrological and meteorological parameters allows a better understanding of hydraulic and geomorphological processes in rivers. The variability of discharge and characteristics of flood waves can lead to increased erosion of the riverbed and scouring in the vicinity of bridges, resulting in a reduction in the safety of infrastructure. The aim of this paper is to provide a literature review of the possible modelling approach for the scour analysis under the influence of hydrological and meteorological parameters on the scour around bridges and an overview of applied scientific methods with an emphasis on the ones that will be used for future research. Furthermore, a foundation is laid for future work associated with the R3PEAT ("Remote Real-time Riprap Protection Erosion Assessment on large rivers") project, supported by Croatian Science Foundation, investigating the influences of these hydrological processes on bed erosion around the construction of bridges crossing large rivers in Croatia.

Key words: hydrological and meteorological parameters, scouring, bridges, R3PEAT project

1 Uvod

Klimatske promjene ogledaju se u sve češćim i intenzivnijim promjenama u režimu voda i nanosa rijeka te posredno utječu na procese erozije u riječnom koritu. Mostovi, čiji su elementi pod utjecajem rijeka, izloženi su lokalnoj eroziji koja može dovesti do njihovog rušenja. Povećanje učestalosti i intenziteta poplava otežava ispravnu procjenu rizika oštećenja mostova uzrokovanih čimbenicima povezanim s poplavama [1]. Poplave intenziviraju eroziju riječnoga dna i podlokavanje, čime bitno narušavaju stabilnost mosta [2]. Strujna slika tečenja u vodotocima je pod utjecajem različitih faktora, poput količine oborina i karakteristika slivnog područja kao što su pokrov i površina. Uslijed toga, detaljna analiza dugoročnih utjecaja i rizika od poplava na životni vijek mostova i drugih prometnica, zbog svoje kompleksnosti, nije uvijek ekonomski isplativa. Iako ponekad financijski zahtjevna, analiza utjecaja djelovanja klimatskih promjena na prometnu infrastrukturu je od iznimne važnosti za njezinu stabilnost, što stvara potrebu za provođenjem sveobuhvatne statističke analize koja nije toliko računalno zahtjevna za provedbu [1]. Primjena metoda obrade podataka (npr. statističke metode, metode strojnog učenja i prema potrebi dodatne analize u vremensko-frekvencijskoj domeni) može se koristiti za usporedbu tako obrađenih klimatskih podataka prilagođenih s globalne na lokalnu razinu sa stvarnim podacima o vodotoku na pojedinoj lokaciji [3]. Ovakav pristup uzima u obzir utjecaje iz različitih globalnih klimatskih modela i scenarija emisije stakleničkih plinova na oštećenja uzrokovana poplavama, dok tradicionalni pristupi ne uzimaju u obzir posljedice klimatskih promjena i hidrološke karakteristike vodnih valova, što može dovesti do krive procjene utjecaja na budući rizik lokalne erozije korita i razvoja podlokavanja u blizini mostova [1]. Utjecaj na podlokavanje oko stupova mosta, osim poznatih hidroloških varijabli poput vodostaja i brzine toka [4], imaju volumen, trajanje i oblik hidrograma [5, 6], odnosno oblik vodnih valova [7]. Shodno tome, u sklopu rada prikazana su prethodna istraživanja na temu utjecaja hidroloških i klimatskih parametara na podlokavanje oko stupova mosta primjenom nekoliko znanstvenih metoda i modela, koji su pregledom literature ocijenjeni kao prikladni s obzirom na njihovu kompleksnost, popularnost, potrebu za podacima i sl. Također, opisane su temeljne metode i određen je smjer budućeg istraživačkog rada, koji je grafički prikazan na slici 1.



Slika 1. Dijagram toka istraživanja utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta

2 Pregled prethodnih istraživanja

Procjenu utjecaja klimatskih promjena na rizik od podlokavanja stupova mostova pod utjecajem poplava analizirali su Yang i Frangopol [8] primjenom *top-down* pristupa. Temelji se na globalnim klimatskim modelima i budućim klimatskim scenarijima. Geoprostorni podaci prikupljeni iz nekoliko baza podataka korišteni su za hidrološko modeliranje pomoću alata Soil & Water Assessment Tool (SWAT). Također, predložena je nova metoda za određivanje dubine temelja mosta koristeći informacije iz američke baze podataka National Bridge Inventory (US NBI). Kombinirajući rezultate hidroloških i klimatskih analiza koje utječu na vodne valove i procijenjene dubine temelja mosta, dugoročni regionalni rizik od podlokavanja kod mostova se može odrediti uključujući različite globalne klimatske modele i predviđanja. Klimatsko modeliranje na temelju globalnih klimatskih modela i tehnika statističkog skaliranja, ovisno o različitim klimatskim scenarijima, može prikazati buduće klimatske podatke. Postoje nesigurnosti prilikom korištenja raznih globalnih klimatskih modela zbog odabira klimatskih scenarija, čiji odabir rezultira potencijalno velikim razlikama u konačnim troškovima i kumulativnom riziku prilikom analize rizika od podlokavanja oko stupova mosta, pa se treba oprezno pristupiti tom području [9]. Hidrološko modeliranje omogućuje fizikalnu ekstrapolaciju podataka o protocima temeljenu na budućim temperaturama i oborinama dobivenih iz globalnih klimatskih modela. Također, hidrološko modeliranje može zamijeniti nepostojeće podatke o protoku na područjima gdje nema mjernih postaja. Da bismo analizirali rizik od podlokavanja povezan s predviđanjima o protoku potrebno je dobiti podatke o temeljima mosta, konkretno njihovoj dubini. Potrebni podaci dobiveni su iz US NBI. Postoje nedoumice o korištenju različitih klimatskih modela u sva tri odabrana buduća scenarija, no rezultati pokazuju da kod poplava koje rezultiraju podlokavanjem, klimatske promjene više utječu na frekvenciju poplava nego na intenzitet podlokavanja.

Khandelov i Solimanov [1] pristup podrazumijeva preuzimanje podataka s globalnih klimatskih modela proučavanog područja i njihovo adekvatno skaliranje na regionalnu razinu pomoću analogne metode Bias Correction Constructed Analogs (BCCA). U svrhu provođenja hidrološkog modeliranja poplavnih događaja koriste hibridni konceptualni alat IHACRES, koji povezuje podatke o oborinama, temperaturi i protoku dobivene iz globalnih klimatskih modela te na temelju budućih podataka o oborinama i temperaturi predviđa buduće dnevne protoke. Stacionarnost parametara uzeta je kao polazišna pretpostavka za analizu, a Khandel i Soliman za analizu nestacionarnih parametara predlažu metodologije drugih autora [10, 11]. Predviđanje vremenskog razvoja podlokavanja oko stupova mosta nastalog zbog erozijskog djelovanja protoka pod utjecajem klimatskih promjena provedeno je Monte Carlo simulacijama na modelu pripremljenom u programskom jeziku MATLAB. Zaključeno

je da vremenski razvoj erozijskih procesa (podlokavanja) oko mosta ovisi o odabranom klimatskom scenariju te je u budućim analizama potrebno usporediti sve potencijalne klimatske scenarije kako bi se adekvatno kvantificirao rizik od urušavanja mosta uvjetovanog poplavnim događajima.

Khandel i Soliman [12] paralelno predstavljaju okvir za dugoročno upravljanje mostovima temeljen na metodi dubokog učenja uzimajući u obzir utjecaj klimatskih promjena. Ulazni podaci za modeliranje su 15-godišnji zapisi o temperaturi i oborinama na 30 meteoroloških postaja, koji služe kao trening podaci za metodu neuronskih mreža (NN1) kako bi se uspostavio odnos između navedenih ulaznih parametara i podataka o protoku, dobivenih skaliranjem s globalnih na regionalne klimatske modele. Pomoću metode konačnih elemenata, koristeći OpenSees finite element (FE) softver, generiran je set podataka za treniranje druge neuronske mreže (NN2). Preliminarni podaci pokazuju da NN2 može ubrzati Monte Carlo simulaciju, nakon koje se može nastaviti računanje krivulja vjerojatnosti oštećenja mosta pod utjecajem poplava i njihovih posljedica.

Pristup dugoročnom upravljanju mostovima temeljen na trendovima poplavnih događaja pod utjecajem različitih klimatskih scenarija prikazan je na primjeru mosta na rijeci Lehigh u Pennsylvaniji [13]. Ulazni podaci preuzeti su s Max Planck Institute for Meteorology—Earth System Model—Low Resolution (MPI-ESM-LR) modela zbog njegove sličnosti sa stvarnim uvjetima. Provedena je statistička prilagodba podataka s globalnog klimatskog modela na rezoluciju 14-14 km, nakon koje je provedeno hidrološko modeliranje pomoću SWAT alata. Dubina podlokavanja oko stupova mosta empirijski je određena pomoću Hydraulic Engineering Circular (HEC-18) jednadžbi kako bi se procijenila stabilnost mosta pod utjecajem događaja povezanih s klimatskim promjenama. Zaključeno je da se dugoročni utjecaj poplavnih događaja, koji se manifestira podlokavanjem, može znatno ublažiti kratkotrajnim rješenjima poput riprap obloge te provođenjem precizne regionalne analize za svaki promatrani most.

Bento i dr. [14] predstavljaju metodologiju za procjenu rizika stabilnosti od podlokavanja temelja mosta u tri koraka. Prvi korak predstavlja statistička analiza maksimalnih godišnjih protoka i analiza frekvencije poplavnih događaja, uzimajući u obzir vršni protok i povratni period. Statistička analiza provedena je određivanjem teorijskih i empirijskih vjerojatnosti razdiobe podataka te konačnim odabirom modificirane metode aritmetičke sredine (MM method). Analiza frekvencije poplavnih događaja provedena je korištenjem dostupnog MATLAB koda. Nadalje, pomoću Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) softvera određene su hidrauličke varijable protoka (dubina i brzine) na lokaciji mosta, koje su uz ostale potrebne varijable (vrsta materijala, dimenzije mosta, maksimalna dubina podlokavanja oko stupova mosta) korištene za modeliranje u HEC-RAS Scour modelu te uspoređene s empirijskim izrazima. Modeliranjem dobiveni rezultati iskorišteni su za određivanje

rizika od podlokavanja na stabilnost mosta. Zaključeno je da se predložena metodologija može koristiti za redovitu inspekciju mostova te da je moguće korištenje sofisticiranijih modela za njezinu kalibraciju, konkretno korištenjem Computational Fluid Dynamics (CFD) softverskih alata.

Sintetički vodni valovi predstavljaju opis karakterističnih statističkih parametara i uvjeta tečenja dobivenih na temelju nizova mjenjenih povijesnih vodnih valova i mogu se odrediti raznim metodama u vremenskoj i frekvencijskoj domeni [3, 15]. Važan su hidraulički rubni uvjet u svrhu modeliranja uvjeta tečenja i provođenja morfoloških procjena kod kojih dolazi do lokalne erozije i podlokavanja u riječnom koritu. Pomoću statističke analize povijesnih podataka o vodnim valovima stvaraju se sintetički hidrogrami sezonskih vodnih valova s okvirnim brojem poplavnih valova za velike riječne slivove. Sintetički hidrogrami sezonskih vodnih valova koriste se u različite svrhe, poput procjene hidrauličkih uvjeta do kojih dolazi te lokalne erozije i podlokavanja u blizini mostova [16]. Pregledom literature iz metodologije analize hidroloških i meteoroloških parametara vodnih valova izdvojeno je nekoliko radova prikazanih u tablici 1. s obzirom na tip modela, korištene hidrološke i meteorološke varijable i veličinu vremenskog koraka.

Tablica 1. Pregled literature u području utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta

Primjena	Hidrološke i meteorološke varijable	Autori (godina)	Vremenski korak	Procesni model	Podatkovni model
Vjerojatnost urušavanja mosta	Protok	Khandel, O., Soliman, M. (2019) [1]	Godišnji	-	IHACRES
Upravljanje mostovima	Temperatura Oborine Protok	Khandel, O., Soliman, M. (2019) [12]	Dnevni	-	Neuronske mreže
Rizik podlokavanja oko mosta	Temperatura Oborine Protok	Yang, D. Y., Frangopol, D. M. (2019) [8]	Dnevni	SWAT	-
Upravljanje mostovima	Temperatura Oborine	Liu, L., et al. (2020) [13]	Dnevni	SWAT	-
Rizik podlokavanja oko mosta	Protok	Bento, A. M., et al. (2020) [14]	Dnevni	HEC-RAS	Statističke metode
Proračunski rizik podlokavanja oko mosta	Protok	Tubaldi, E., et al. (2017) [17]	Dnevni	HEC-RAS	-
Proračunski rizik podlokavanja oko mosta	Protok	Kallias, A. N., Imam, B. (2016) [18]	Godišnji	-	WINFAP-FEH 3
Proračunski rizik podlokavanja oko mosta	Protok	F. C. K. Ting, et al. (2011) [19]	Godišnji	-	Statističke metode

Definiranje karakterističnih vodnih valova na nizinskim rijekama te njihova veza s klimatskim indikatorima omogućila bi dodatnu informaciju u kratkotrajnom razdoblju u svrhu ranog uzbunjivanja te za procjenu rizika rušenja mostova uslijed podlokavanja u dugom razdoblju i time poboljšala upravljanje sigurnošću mostova. Istraživanjima procesa erozije oko stupova mosta s izvedenom riprap zaštitom i dubine podlokavanja, koji su glavni razlog urušavanja mostova, bavi se projekt R3PEAT (UIP-2019-04-4046), nastao kao nastavak dosadašnjih istraživanja.

3 Znanstvene metode

3.1 Procesni modeli

Procesni hidrološki modeli predstavljaju matematički idealiziran prikaz stvarnih procesa na slivu uključujući u proračun načela fizikalnih procesa. Njihovo korištenje ne zahtijeva toliko duge nizove ulaznih podataka za kalibraciju kao što je to kod podatkovnih modela, već velik broj varijabli koje opisuju fizikalne karakteristike sliva [20]. U praksi se koristi veći broj procesnih hidroloških modela poput: TOPMODEL, Institute of Hydrology Distributed Model (IHDM), Hydrologic Research Center Distributed Hydrologic Model (HRCDHM), Semi-Distributed Physically based Hydrologic Model using Remote Sensing and GIS (DPHM-RS), TOPNET, SWAT i dr.

Procesni hidraulički modeli za svoje korištenje zahtijevaju dovoljnu količinu podataka o geometriji vodotoka i okolnog terena, s preciznim opisom parametara u svrhu točnog predviđanja protoka i vodostaja nizvodno [21]. Između ostalog, u svrhu analize poplavnih događaja koriste se HEC-RAS, MIKE11, MIKE FLOOD i InfoWORKS, a HEC-RAS predstavlja jedan od najčešćih hidrauličkih modela za analizu poplavnih događaja [22, 23]. Budući da su SWAT i HEC-RAS u ovom pregledu literature detektirani kao odabrani pristup za opis hidrološko-hidrauličkih procesa, slijedi njihov bliži prikaz.

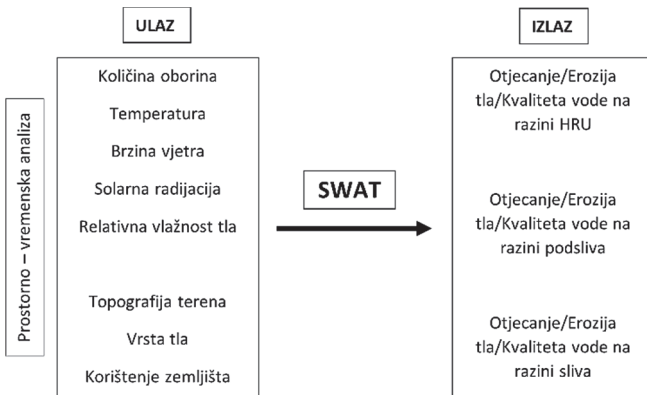
3.1.1 SWAT

SWAT [24, 25] predstavlja jedan od najkorištenijih procesnih modela za hidrološko modeliranje na razini sliva. Razvijen je u svrhu procjene utjecaja poljoprivrednih mjera na stanje vode i sedimenta u velikim riječnim slivovima. Model funkcionira na principu diskretizacije slivnog područja na manje jedinice (podslivove) te dodatnom podjelom podslivova na podjedinice - HRU (Hydrological Response Units), koji predstavljaju jedinstvenu kombinaciju podataka o vrsti tla, korištenju zemljišta i nagibu terena. Za simulaciju hidrološkog ciklusa SWAT koristi jednadžbu vodne bilance:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

gdje je SW_t ukupna zapremina vode na dan t [mm], SW_0 početna zapremina vode na dan i [mm], R_{day} ukupna količina oborine na dan i [mm], Q_{surf} količina površinskog otjecanja na dan i [mm], E_o iznos potencijalne evapotranspiracije na dan i [mm], W_{seep} količina procjeđivanja na dan i [mm] te Q_{gw} koji predstavlja povratni tok podzemnih voda na dan i [mm].

Modeliranje pomoću SWAT modela iziskuje detaljnu analizu promatranog područja, koja uključuje procesuiranje ulaznih podataka o oborinama, temperaturi, brzini vjetra, solarnoj radijaciji, relativnoj vlažnosti tla, korištenju zemljišta, vrsti tla i topografiji terena (slika 2).



Slika 2. Prikaz ulaznih i izlaznih varijabli hidrološkog modela SWAT

3.1.2 HEC-RAS

HEC-RAS [26] je računalni program inženjerskog odjela američke vojske (U.S. Army Corp of Engineers) razvijen u svrhu proračuna razine vodnog lica pri stacionarnom ili nestacionarnom tečenju u prirodnim i umjetnim vodotocima, pronosa nanosa, analize temperature i kvalitete vode. Jednodimenzionalnim HEC-RAS hidrauličkim modelom određuju se profili razina vodnog lica i brzina toka u svim čvorovima vodotoka uz poznavanje ulaznih podataka o protoku, hrapavosti kanala, rubnim uvjetima, promjenama u geometriji kanala na promatranom dionici i sl. Profili razina vodnog lica računaju se od najnižvodnijeg čvora *Backward standard step* metodom primijenjenom na jednodimenzionalnu jednadžbu energije [27]:

$$H = Z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

gdje je H vrijednost energetske linije, Z visina iznad nulte ravnine, p tlak u točki [Pa], γ specifična težina vode [kN/m^3], α Coriolisov koeficijent korekcije kinetičke energije, v prosječna brzina toka [m/s] te g koji predstavlja akceleraciju sile teže [m/s^2].

Dvodimenzionalni HEC-RAS hidraulički model temelji se na rješavanju dvodimenzionalnih Saint-Venantovih jednadžbi ili difuznih jednadžbi koristeći algoritam implicitne metode konačnih volumena [28] na setu ulaznih podataka, koji se sastoji od diskretizirane proračunske mreže koja opisuje geometriju terena, rubnih uvjeta na uzvodnoj i nizvodnoj granici promatranog područja i odabira koeficijenta hrapavosti korita. HEC-RAS model za modeliranje zahtijeva veći broj ulaznih parametara kako bi se minimiziralo odstupanje od stvarnih procesa u prirodi. Ovisno o raspoloživosti podataka, može biti veoma primjenjiv alat za modeliranje utjecaja hidroloških veličina poput protoka i vodostaja, koje direktno utječu na podlokavanje oko stupova mosta.

3.2 Podatkovni modeli

Podatkovni ili empirijski hidrološki modeli temelje se na rješavanju matematičkih jednadžbi koje opisuju ulazne i izlazne podatke, zanemarujući analizu fizikalnih procesa na slivu. Iako su rezultati modela primjenjivi samo unutar promatranih granica modela, prednost im je što s obzirom na jednostavnu primjenu daju zadovoljavajuće rezultate analize. Primjeri podatkovnih hidroloških modela su metoda jediničnog hidrograma, statističke metode koje koriste regresijske i korelacijske modele te hidroinformatičke metode poput neuronskih mreža i metode neizrazite (fuzzy) logike [29]. U nastavku su opisane metode neuronskih mreža i statističke metode, koje su detektirane kao metode korištene u literaturi vezanoj za područje utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta (tablica 1), čija se upotreba očekuje tijekom daljnjeg istraživanja.

3.2.1 Neuronske mreže

Umjetne neuronske mreže temelje se na biološkim neuronskim mrežama, a sastaje se od skupa umjetnih neurona, čiji rezultat ovisi o procesu učenja kojim mreža stječe znanje o rješavanju određenog problema sadržanog u intenzitetu međuneuronskih veza. Primjenom nadziranog učenja za poznate ulazne vrijednosti i tražene izlazne vrijednosti parametri se korigiraju tako da se svakom iteracijom minimizira pogreška.

Sustavni pristup formiranju modela neuronskih mreža za hidrološka predviđanja započinje određivanjem izlaznih varijabli, koraka računanja i ulaznih varijabli. Prikladan oblik podataka za modeliranje neuronskih mreža podrazumijeva transformaciju podataka standardizacijom ili skaliranjem, nakon čega se skup podataka dijeli na podskupove za kalibraciju, testiranje i validaciju. Prije identifikacije sustava (pode-

šavanje strukture, kalibracija i validacija modela) potrebno je izabrati arhitekturu neuronske mreže, od kojih su najpoznatije: višeslojni perceptron (MLP), neuronske mreže s prijenosnom funkcijom radijalne baze (engl. Radial Basis Function, RBF), samoorganizirajuće mape (SOM), GRNN (engl. Generalized Regression Neural Networks), RNN (engl. Recurrent Neural Networks), SVM (engl. Support Vector Machines), TNN (engl. Temporal Neural Networks) te neuro-fuzzy, a MLP predstavlja najčešće korištenu arhitekturu za modeliranje hidroloških sustava. Konačno, potrebno je kvalitativno ocijeniti model ispitivanjem generalizacijskih svojstava mreže prije afirmacije mreže kao neuronskog modela pomoću: apsolutnih mjera (srednja kvadratna pogreška (MSE), korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE), srednja apsolutna pogreška (MAE), potencijalna pogreška (PE), i dr.), relativnih mjera (Pearsonov koeficijent (r), koeficijent određenosti (R^2), koeficijent učinkovitosti (CE), indeks podudarnosti (D), i dr.) te posebnih mjera (PI (eng. Persistence index), PBIAS (eng. Percent bias) i RSR (eng. RMSE to standard deviation ratio), i dr.) [30].

Hidrološko modeliranje neuronskim mrežama funkcionira na principu preslikavanja vektora ulaznih podataka (oborine, temperatura) u izlaz (protok) bez analize složenih procesa koji uvjetuju izlazne podatke.

3.2.2 Statističke metode

Pristup se temelji na primjeni metode ekstrema (engl. Extreme Value Analysis – EVA), kojom se može proučavati ekstremne događaje na godišnjoj razini (engl. Annual Maxima – AM) ili metodom prekoračenja praga (engl. Peak Over Threshold – POT). Analiza ekstrema najčešće se provodi u kombinaciji s prilagodbom teorijskih funkcija distribucije kako bi se odredila učestalost pojavljivanja promatrane varijable (povratni period). Najčešće korištene teorijske funkcije distribucije u modeliranju ekstrema su: Generalized extreme values (GEV), Gumbel (G), Log normal (LN), Pearson type 3 (P3), Log Pearson type 3 (LP3) i Generalized logistics (GL) [31]. Na odabranoj teorijskoj funkciji distribucije potrebno je provesti testove prilagodbe podacima u svrhu bolje preciznosti rezultata. U svrhu analize utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta, statistički pristup je prikladan zbog svoje jednostavnosti, no odabir konkretne statističke metode analize ulaznih podataka, prikladne funkcije distribucije i testa prikladnosti može bitno utjecati na konačne rezultate, što povlači problem subjektivnosti prilikom analize podataka.

3.3 Karakteristike prikazanih metoda

Daljnijim istraživanjem pokušat će se odgovoriti na pitanja utjecaja pojedinačnog poplavnog vala ili nekoliko uzastopnih vodnih valova manjeg intenziteta na intenzitet podlokavanja, definiranja veze između hidroloških parametara vodnih valova i erozije korita i utjecaja klimatskih promjena na karakteristike vodnih valova primjenjujući odabrane statističke metode, metode znanosti o podacima te metode numeričkog modeliranja za verifikaciju rezultata. U svrhu pripreme za buduće istraživanje u tablici 2 prikazane su karakteristike prethodno opisanih metoda, temeljene na proučavanju literature vezane uz utjecaj hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta pod utjecajem klimatskih promjena [1, 12, 13, 18], tehničkoj dokumentaciji SWAT modela [25], preglednog rada na temu hidroloških modela [29] i doktorskog rada o predviđanju hidrološkog dotoka pomoću umjetnih neuronskih mreža [30]. Karakteristike opisane u tablici 2 su klasificirane kao korisne i priložene kao doprinos budućem istraživanju, koje je predviđeno na području velikih nizinskih rijeka u Republici Hrvatskoj. Opisani modeli zasnovani na podacima (poglavlje 3.2), prilikom modeliranja u takvim uvjetima, ne uzimaju u obzir složene procese na slivu, poput infiltracije, evapotranspiracije, i sl. S druge strane, procesni modeli (poglavlje 3.1.) prevladavaju navedene nedostatke, no nedostupnost različitih ulaznih parametara (morfološki, hidrološki, meteorološki, i sl.) i pojava nereprezentativnih vremenskih serija podataka (manje od 30 godina dnevnih zapisa) onemogućava njihovo funkcioniranje. Proučavajući karakteristike predloženih znanstvenih metoda u svrhu modeliranja utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta možemo zaključiti da bi za potrebe modeliranja na pilot mostovima u budućem istraživanju bilo poželjno kombinirati nekoliko pristupa (ovisno o dostupnosti ulaznih podataka).

Tablica 2. Usporedba predloženih znanstvenih metoda za istraživanje utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta

Karakteristike metoda	Literatura	PROCESNI MODELI		PODATKOVNI MODELI	
		SWAT	HEC - RAS	Neuronske mreže	Statističke metode
Velika količina različitih ulaznih parametara	[1, 18, 25, 30]	+	+	+/-	-
Dugi nizovi ulaznih podataka	[25, 30]	-	-	+	+
Veća računalna zahtjevnost	[1, 25, 29]	+	+	-	-
Zahtjev za prostorno distribuiranim ulaznim podacima	[13, 25, 29, 30]	+	+	-	-
Mogućnost primjene modela na drugom slivu	[25, 29]	+	+	-	-
Modeliranje neizučениh slivova	[25, 29]	+	+	+/-	-
Veća subjektivnost u odabiru koraka analize a na rezultate hidrološko-hidrauličkih procesa	[1, 12, 30]	-	-	+/-	+

* Oznake „+“ i „-“ u tablici predstavljaju istinitost tvrdnje (karakteristike metoda) za pojedini model

4 Zaključak

Analiza promjena u hidrološkom režimu, intenzitetu i frekvenciji kratkotrajnih poplavnih događaja omogućuje bolji uvid u hidrauličke i geomorfološke procese u rijekama. Promjene u karakteristikama vodnih valova i varijacije intenziteta protoka mogu pojačati eroziju riječnog dna i umanjiti sigurnost izgrađene infrastrukture poput mostova preko rijeka.

U ovom radu prikazan je pregled literature mogućeg pristupa analizi procesa podlokavanja pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta, zajedno s korištenim znanstvenim metodama od kojih su detaljnije opisane one koje su detektirane kao mogući pristup za buduće istraživanje. Također, prikazan je osvrt na karakteristike opisanih znanstvenih metoda klasificiranih kao korisne za potrebe budućeg istraživanja na konkretnim podacima.

Buduća istraživanja orijentirat će se na primjenu opisanih znanstvenih metoda na dostupne podatke za nekoliko vodomjernih postaja u Republici Hrvatskoj, što će pridonijeti R3PEAT projektu boljom definicijom ulaznih hidrauličkih parametara, na način da se definira model koji povezuje utjecaj klimatskih promjena i karakteristike vodnih valova s procesima lokalne erozije korita i razvoja kaverni u neposrednoj blizini mostova.

Zahvala

Istraživanja prikazana u ovom radu provedena su u okviru projekata „Daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu” (R3PEAT, UIP-2019-04-4046) i „Projekt razvoja karijera mladih istraživača - izobrazba novih doktora znanosti” (DOK-2020-01), koje financira Hrvatska zaklada za znanost.

Literatura

- [1] Khandel, O., Soliman, M.: Integrated Framework for Quantifying the Effect of Climate Change on the Risk of Bridge Failure Due to Floods and Flood-Induced Scour, *Journal of Bridge Engineering* 24 (2019) 9.
- [2] Cook, W., Barr, P. J., Halling, M. W.: Bridge failure rate, *Journal of Performance of Constructed Facilities* 29 (2015) 3.
- [3] Kovačević, M., Potočki, K.: Application of Continuous Wavelet Transform for Analysis of Discharge and Precipitation Variability on the Three Stations in the Sava River Basin, *Fifth International Workshop on Data Science, Zagreb, Croatia, 2020*.
- [4] Dalvand, R., Komasi, M.: Evaluation of nonparametric tree models for predicting the scour depth of bridge piers, *Ukrainian Journal of Ecology*, 9 (2019) 3.
- [5] Ting, F. C., Larsen, R. J., Jones, A. L.: Hydrographs and Estimates of Scour Depth Excess for Pier Scour Prediction: Use for Ungauged Streams with Scour Rate in Cohesive Soils Method, *Transportation research record*, 2262 (2011) 1, pp. 193-199.
- [6] Maroni, A., Tubaldi, E., Val, D. V., McDonald, H., Zonta, D.: Using Bayesian networks for the assessment of underwater scour for road and railway bridges, *Structural Health Monitoring*, 2020.
- [7] Kovačević, M., Potočki, K., Gilja, G.: The analysis of streamflow variability and flood wave characteristics on the two lowland rivers in Croatia, *EGU General Assembly 2021*, Vienna, 2021.
- [8] Yang, D. Y., Frangopol, D. M.: Physics-based assessment of climate change impact on long-term regional bridge scour risk using hydrologic modeling: Application to Lehigh river watershed, *Journal of Bridge Engineering* 24 (2019) 11.
- [9] Piontek, F., Müller, C., Pugh, T. A., Clark, D. B., Deryng, D., Elliott, J., ..., Schellnhuber, H. J.: Multisectoral climate impact hotspots in a warming world, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (2014) 9, pp. 3233-3238.
- [10] Wallner, M., Haberlandt, U.: Non-stationary hydrological model parameters: a framework based on SOM-B, *Hydrological Processes*, 29 (2015) 14, pp. 3145-3161.

- [11] Pathiraja, S., Marshall, L., Sharma, A., Moradkhani, H.: Hydrologic modeling in dynamic catchments: A data assimilation Approach, *Water Resources Research* 52 (2016) 5, pp. 3350–3372.
- [12] Khandel, O., Soliman, M.: Deep learning based framework for long-term management of bridges considering climate change effects, *In Proceeding of 2019 IABSE Congress*, New York, 2019.
- [13] Liu, L., Yang, D. Y., Frangopol, D. M.: Network-level risk-based framework for optimal bridge adaptation management considering scour and climate change, *Journal of Infrastructure Systems* 26 (2020) 1.
- [14] Bento, A. M., Gomes, A., Viseu, T., Couto, L., Pêgo, J. P.: Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations, *Engineering Structures* 223 (2020).
- [15] Potočki, K., Gilja, G., & Kunštek, D.: An overview of the applications of wavelet transform for discharge and suspended sediment analysis, *Technical Gazette* 24 (2017) 5, pp. 1561-1569.
- [16] Karmaker, T., Dutta, S.: Generation of synthetic seasonal hydrographs for a large river basin, *Journal of hydrology* 381 (2010) 3-4, pp. 287-296.
- [17] Tubaldi, E., Macorini, L., Izzuddin, B. A., Manes, C., Laio, F.: A framework for probabilistic assessment of clear-water scour around bridge piers, *Structural safety*, 69 (2017), pp. 11-22.
- [18] Kallias, A. N., Imam, B.: Probabilistic assessment of local scour in bridge piers under changing environmental conditions, *Structure and Infrastructure Engineering*, 12 (2016) 9, pp. 1228-1241.
- [19] Ting, F. C., Larsen, R. J., Jones, A. L.: Hydrographs and Estimates of Scour Depth Excess for Pier Scour Prediction: Use for Ungauged Streams with Scour Rate in Cohesive Soils Method, *Transportation research record*, 2262 (2011) 1, pp. 193-199.
- [20] Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'connell, P. E., Rasmussen, J.: An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of hydrology*, 87 (1986) 1-2, pp. 61-77.
- [21] Gichamo, T. Z., Popescu, I., Jonoski, A., Solomatine, D.: River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling, *Environmental Modelling & Software*, 31 (2012), pp. 37-46.
- [22] Alaghmand, S., bin Abdullah, R., Abustan, I., Eslamian, S.: Comparison between capabilities of HEC-RAS and MIKE11 hydraulic models in river flood risk modelling (a case study of Sungai Kayu Ara River basin, Malaysia), *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2 (2012) 3, pp. 270-291.

- [23] Carling, P., Villanueva, I., Herget, J., Wright, N., Borodavko, P., Morvan, H.: Unsteady 1D and 2D hydraulic models with ice dam break for Quaternary megaflood, Altai Mountains, southern Siberia. *Global and Planetary Change*, 70 (2010) 1-4, pp. 24-34.
- [24] Williams, J. R., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Gassman, P. W., Green, C. H.: History of model development at Temple, Texas, *Hydrological Sciences Journal* 53 (2008) 5, pp. 948–960, 2008.
- [25] Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009, *Texas Water Resources Institute*, 2011.
- [26] Brunner, G. W.: HEC-RAS river analysis system 2D modeling user's manual, *US Army Corps of Engineers—Hydrologic Engineering Center*, pp. 1-171, 2016.
- [27] U.S. Army Corps of Engineers: HEC-DSS User's Guide and Utility Program Manuals, *Hydrologic Engineering Center*, Davis CA, 1990.
- [28] Brunner, G. W., & CEIWR-HHT.: Benchmarking of the HEC-RAS Two-Dimensional Hydraulic Modeling Capabilities, *US Army Corps of Engineers—Hydrologic Engineering Center*, 2018.
- [29] Devia, G. K., Ganasri, B. P., Dwarakish, G. S.: A review on hydrological models, *Aquatic Procedia*, 4 (2015), pp. 1001-1007.
- [30] Matić, P.: Short-term Inflow Prediction Using Artificial Neural Network, University of Split, Croatia, 2014.
- [31] Morlot, M., Brilly, M., Šraj, M.: Characterisation of the floods in the Danube River basin through flood frequency and seasonality analysis, *Acta hydrotechnica* 32 (2019) 57, pp. 73-89.