

doc. dr. sc. Gordon Gilja, dipl. ing. građ.
 prof. dr. sc. Neven Kuspilić, dipl. ing. građ.
 doc. dr. sc. Damir Bekić, dipl. ing. građ.
 Krunoslav Zubčić, dipl. ing. arh.

PRISTUP FORENZIČNOG INŽENJERSTVA PRI SPECIJALISTIČKIM PREGLEDIMA DONJEG USTROJA ŽELJEZNIČKIH MOSTOVA NA RIJEKAMA

1. Uvod

Ekonomska vrijednost mosta nadilazi njegovu nazivnu vrijednost, što je posebno izraženo prilikom njegova znatnog oštećenja ili rušenja [1]. U posljednjih 30 godina do otkazivanja stabilnosti mostova najčešće dolazi zbog hidrauličkih djelovanja, između 47 % i 70 % [2, 3, 4], a isti trend uočava se od 19. stoljeća [5, 6, 7]. Usporedba gradiva konstrukcije mostova oštećenih hidrauličkim djelovanjima iz SAD-a pokazuje to da je udio metalnih mostova (> 60 %) najveći, iako je njihov broj u ukupno izgrađenim mostovima znatno manji od betonskih, 30 % prema 65 % [8]. Istraživanje iz Velike Britanije pokazalo je to da je zbog oštećenja mostova povezanih s hidrauličkim djelovanjima 1000 željezničkih mostova potrebno sanirati ili obnoviti [9]. Prosječna starost čeličnih mostova čija je stabilnost otkazala je 64 godine, a mostova sagrađenih od svih ostalih gradiva konstrukcije kraća od 50 godina. Treba napomenuti to da su kao stari definirani čelični mostovi stariji od 60 godina. Navedeni statistički podaci o oštećenjima mostova s gledišta prakse osobito su važni u kontekstu željezničke infrastrukture u Hrvatskoj, gdje se metalne rasponske konstrukcije koriste za željezničke objekte raspona većeg od 25 m [10]. U usporedbi s europskom željezničkom mrežom hrvatska je zastarjela, dotrajala i tehnološki neprilagođena modernim zahtjevima te je više od 60 % ukupne duljine željezničke mreže izvan ciklusa potrebnoga održavanja [11], čemu, među ostalim, doprinose specifični uvjeti u kojima se provode održavanja [12].

Tijekom uporabnoga vijeka mosta neminovno dolazi do promjena u režimu voda i nanosa te posljedično promjenjivih opterećenja na konstrukciju, koja su ionako znatno veća na željezničkim mostovima u odnosu

na cestovne [13]. Prirodne erozijske procese korita koji ugrožavaju stabilnost mostova na rijekama treba sagledati u širem kontekstu jer su uzročnici procesa na području sliva i ne moraju neophodno biti uočljivi u bližoj okolici konstrukcije. U svrhu sveobuhvatnoga sagledavanja problematike podatke o oštećenju konstrukcije mosta treba nadopuniti i podacima o djelovanjima na konstrukciju, što podrazumijeva primjenu forenzičnoga inženjerstva [14].

2. Podvodni pregled mostova unutar sustava gospodarenja mostovima

Analiza stanja korita u okolici izgrađenih mostova uglavnom je propisana unutar sustava gospodarenja mostovima svake države u skladu sa specifičnostima njihove infrastrukture, a u cilju pouzdane kvantifikacije uočenih odstupanja od projektanoga stanja [15]. Ocjena stanja može se dobiti kvantitativno ili kvalitativno na temelju vizualnoga i/ili podvodnoga pregleda uz geodetska, hidrološka, hidraulička i geotehnička mjerenja i istraživanja. Najdetaljniji opis sustava gospodarenja mostovima dostupan je za SAD, gdje su 1971. nastali Državni standardi za pregled mostova (*National Bridge Inspection Standards* – NBIS [16]). NBIS standard definira način ocjenjivanja i učestalost pregleda, osposobljenost inženjera koji ih provode, strukturu izvještaja, sadržaj baze prikupljenih podataka te mjere koje se moraju poduzeti u slučaju utvrđenih oštećenja. Implementacijom NBIS-a pokazalo se to da je provođenje isključivo vizualnoga pregleda mosta, bez popratne morfološke analize režima voda i nanosa vodotoka, nedostavno za procjenu njegova stanja. Baza podataka savezne države New York sadržava podatke o rušenju 102 mosta između 1992. i 2014. koji su vizualno pregledani te je donesena ocjena stanja podvodnog dijela konstrukcije i korita. Kod visokog udjela mostova čiji je uzrok rušenja bilo hidrauličko djelovanje (57 %) stanje korita bilo je ocijenjeno izvrsnim u odnosu na pregledom utvrđenu dubinu podlokavanja. Iz navedenog proizlazi to da ocjene pridružene stanju korita na temelju samo vizualnoga pregleda nisu pouzdane i da precjenjuju stabilnost korita.

Godine 1991. pokrenut je sustav Pontis, čija je primjena rezultirala izdavanjem novoga standarda nazvanog Zajednički raspoznatljivi elementi mosta (*Commonly Recognized (CoRe) Elements*) kao dopune NBIS-u [17]. Njime je uzeto u obzir to da kod ocjene stanja mosta složeno djelovanje toka vode nije moguće obuhvatiti kao jedan čimbenik, nego se uz izravno

djelovanje toka na konstrukciju mora uzeti u obzir i neizravno djelovanje na korito i zaštitne vodne građevine. Zato se hidrauličko djelovanje toka promatra kroz četiri utjecaja: lokalni utjecaj toka na konstrukciju preko kuta naleta toka, globalnu stabilnost korita, eroziju zbog suženja toka i zaštitne (regulacijske) građevine. S morfodinamičkog gledišta prilikom pregleda i ocjene stanja mosta potrebno je uključiti dovoljno dugu dionicu korita vodotoka kako bi ona bila reprezentativna za zaključivanje o procesima u profilu mosta. U nedavno završenome međunarodnom projektu BRIDGE SMS, u kojemu je Građevinski fakultet u Zagrebu aktivno sudjelovao, prikazana je sva složenost ocjene stanja erozije na mreži mostova, a jedan od mogućih pristupa jest kvantitativna ocjena stanja erozije uz standardizaciju pristupa [18].

Održavanje mostova prema važećoj hrvatskoj zakonskoj regulativi mora biti takvo da se tijekom vijeka trajanja očuvaju temeljni zahtjevi za građevinu te unapređuje njihovo ispunjavanje u skladu sa Zakonom o gradnji, Pravilnikom o održavanju građevina i Pravilnikom o održavanju cesta. Iako oba pravilnika izrijeком spominju popravke erozijom ugroženih elemenata konstrukcije te njihovu zaštitu od podlokavanja ili erozije, nije donesen akt koji definira postupke i metodologiju za utvrđivanje stanja korita kao ni norme za ocjenu stanja mostova [19]. Hrvatske željeznice za pregled podvodnoga dijela konstrukcije mosta koriste Pravilnik 315 pod nazivom „Pravilnik o održavanju donjeg stroja pruga jugoslovenskih železnica“ iz 1970. godine [20]. Njime su regulirani održavanje i kontrola stanja mostova i propusta kroz „stalni nadzor, povremeni nadzor te specijalni pregled i ispitivanja u skladu s duhom europske legislative. U sklopu povremenoga nadzora propisano je to da se poslije svake velike vode, a najmanje jedanput na godinu, obalni i riječni stupovi izloženi podlokavanju pregledaju i utvrdi postojanje oštećenja u vidu podlokavanja od erozivne snage vode, zasipanja od bujičnih rijeka i potoka te produbljenja korita i rušenja obala. Pri pregledu obalnih i riječnih stupova, ako postoji sumnja da su pod vodom oštećeni, može se angažirati ronilac i koristiti podvodna kamera. Specijalni pregledi i ispitivanja poduzimaju se najčešće poslije većih elementarnih nepogoda te kada je kod mostova potrebno utvrditi utjecaj promjene sheme opterećenja na stabilnost konstrukcije u odnosu na onu za koju je most prvobitno dimenzioniran.

Cilj je ovog rada istražiti mehanizme potencijalnoga gubitka stabilnosti konstrukcije zbog hidrauličkih djelovanja na željezničke mostove i ocijeniti njihovo stanje. U radu je prikazan pristup forenzičnoga inženjerstva

kod istraživanja mehanizama za niz željezničkih mostova koji uključuje konstrukciju mosta, s mostom povezano stanje korita i inženjerske procjene stanja korita. Prikazani su i opisani (a) metode prikupljanja ulaznih podataka za morfodinamičku analizu s težištem na njihovu podrijetlu, (b) provedba podvodnoga pregleda, (c) postupak ocjene stanja konstrukcije te (d) način dokumentiranja prikupljenih i analiziranih podataka koje treba implementirati u sustav gospodarenja mostovima za osiguranje uporabnoga vijeka konstrukcije. Mehanizmi otkazivanja stabilnosti identificirani su neposredno mjerenjem na terenu ili posredno preko indikatora njihove pojave.

3. Metodologija

Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu u suradnji s HŽ Infrastrukturuom (HŽI) od 2009. provodi monitoring (povremeni nadzor) i specijalistički pregled donjega ustroja mosta na prugama unutar koridora od važnosti za međunarodni prijevoz. U tome kontekstu provedena su hidrografska mjerenja, morfodinamička analiza stabilnosti korita i zaštitnih građevina te podvodni vizualni pregled konstrukcije za 16 mostova. Podaci prikazani u ovome radu preuzeti su iz pojedinačnih elaborata zajednički nazvanih „Hidrografsko snimanje korita u području željezničkih mostova i podvodni vizualni pregled donjeg ustroja mostova“ za specijalističke preglede mostova te „Monitoring korita u području oko mostova“ za monitoring mostova. Aktivnosti obuhvaćene analizom na temelju detaljnoga individualnog pristupa svakome pojedinom mostu jesu:

1. izrada morfodinamičke studije za procjenu opasnosti od velikih voda
2. uspostava teoretskog okvira unutar kojeg se definiraju granični uvjeti za pojavu erozije
3. podvodni vizualni pregled podvodnoga dijela konstrukcije i korita u neposrednoj blizini
4. preporuke za daljnje aktivnosti na temelju prikupljenih podataka i inženjerske procjene.

Morfodinamičkom studijom utvrđuje se lokalni režim voda i nanosa na temelju geodetskih snimanja batimetrije i hidrauličkih mjerenja profila brzina na domeni predmetne dionice. Mjerenja se izvode iz čamca, pri čemu se za snimanje korita koristi kombinacija višesnopnog dubinomjera, ADCP akustičkog strujomjera i sustava za pozicioniranje koji u stvarnome vremenu rezultiraju dubinom korita vodotoka i vektorima brzine vode u mreži točaka. Obuhvat snimanja podijeljen je

prema svrsi na dva područja: (1) šire područje vodotoka koje se snima metodom poprečnih profila u pojasu 5 – 10 širina vodotoka uzvodno i nizvodno od mosta te (2) detaljno područje mostovskoga profila koje se snima mrežom točaka u pojasu 10 – 25 m uzvodno i nizvodno od mostovskoga profila. Osim izravnim mjerenjem relevantni podaci mogu se preuzeti iz javnih servisa čijim je korištenjem moguće odrediti dugoročni režim voda, nanosa i leda predmetne dionice. Podaci prikupljeni mjerenjem i iz vanjskih izvora koriste se za kalibraciju numeričkoga modela kojim se računa razvoj podlokavanja pod različitim hidrauličkim djelovanjima i uz pomoć forenzičnoga inženjerstva kvantificira utjecaj na sigurnost mosta [21]. Rezultat studije mora jasno pokazati karakteristike polja tečenja za karakteristični hidrološki događaj.

Da bi bilo moguće kontinuiranim monitoringom pratiti stanje korita i njegov utjecaj na konstrukciju pojedinoga mosta kao dijela infrastrukture, potrebno je uspostaviti **teoretski okvir** unutar kojega će se provoditi pregled, definirati granični uvjeti za pojavu erozije, ujednačiti način ocjenjivanja i na taj način omogućiti donošenje odluka o prioritizaciji mostova za provođenje mjera sanacije ili rekonstrukcije. Teoretski okvir treba uspostaviti na temelju konfiguracije korita, režima voda i nanosa na predmetnoj dionici vodotoka te karakteristika materijala dna korita. On je preuzet iz strane prakse i kritički analiziran kako bi se mogao primijeniti na usporedive uvjete u Hrvatskoj kao što je opisano u prethodnome radu [22]. Važno je istaknuti to da određivanje utjecaja koje tok ima na korito i stupove nije jednoznačno određeno karakterističnim parametrima kao što su protoci, brzina toka ili posmično naprezanje.

Podvodni vizualni pregled počinje analizom pokazatelja koji su vidljivi na površini građevine, a mogu biti posljedica ozbiljnijih oštećenja konstrukcije. Za podvodni pregled koristi se detaljni vizualni pregled u dosegu dodira uz djelomično čišćenje površine konstrukcije od obraštajnih organizama (razina II.) [23]. Prilikom pregleda mora se obaviti i sondiranje konstrukcije na mjestu potencijalnih pukotina te korita uz elemente radi mjerenja dubine kaverni ili utvrđivanja dubine temelja. Osim nad podvodnim dijelom konstrukcije podvodni pregled se provodi i nad svim dijelovima korita koji pod utjecajem vode mogu promijeniti svoje stanje i time kompromitirati stabilnost konstrukcije kao što su regulacijske i zaštitne vodne građevine.

Na temelju prikupljenih podataka i rezultata morfo-dinamičke analize izrađuju se **inženjerska procjena stanja** korita u zoni mosta i stabilnosti konstrukcije te

preporuke za daljnje aktivnosti na održavanju. U ovome su radu podvodni pregled i analiza stanja konstrukcije provedeni uz primjenu pristupa CoRe elemenata jer su usporedivi s elementima definiranim u HŽI-ovu Pravilniku 315. Budući da tim pravilnikom nisu propisane ocjene stanja konstrukcije, za ocjenjivanje stanja mostova korišten je raspon ocjena istovjetan onima korištenima u NBIS standardu, od nula do devet, gdje je nulom ocijenjen srušen most, a ocjenom devet most u izvrsnome stanju.

4. Rezultati i rasprava

U posljednjemu desetljeću Građevinski fakultet analizirao je niz mostova koji su ključni dio prometne infrastrukture Republike Hrvatske i detektirao zajednička obilježja djelovanja koja negativno utječu na stabilnost mostova. U ovome radu izdvojena su oštećenja za svaku pojedinu kategoriju erozije koja podrazumijevaju potrebu za održavanjem i/ili sanacijom riječnoga korita. Rezultat pregleda i morfo-dinamičke analize su četiri ocjene za svaki most definirane tako da obuhvaćaju usporedive pojave kako bi se izvješća ujednačila za potrebe donošenja odluka: (1) ocjena opasnosti od globalne erozije korita, (2) ocjena opasnosti od lokalne erozije u mostovskome profilu, (3) ocjena stanja regulacijskih građevina te (4) ocjena stanja konstrukcije pod vodom. U provedenim analizama definirani su potencijalni izvori opasnosti po stabilnost konstrukcije za svaki pojedini most, kvantificirana je pojava kaverni od podlokavanja i izračunani su hidraulički uvjeti koji zadovoljavaju stabilnost korita kako bi bili usporedivi s izračunanim opasnostima. Globalna erozija, nestabilnost obala i lateralna migracija korita utvrđena je usporedbom današnje geometrije korita na širemu potezu korita s projektnim stanjem korita ili nekim drugim dostupnim povijesnim podatkom. Na temelju provedenih analiza moguće je uočiti to da za niz mostova postoje zajedničke opasnosti koje ugrožavaju njihovu stabilnost, dok su neke opasnosti specifične za pojedini most zbog njegove konstrukcije, načina temeljenja ili položaja u koritu. Osvrt na uočena i kvantificirana oštećenja na mostovima načinjen je grupiranjem analiziranih oštećenja prema mehanizmima erozije. Za svaku grupu opisana su karakteristična oštećenja i indikatori njihova nastanka. Na 14 od 16 mostova proveden je specijalistički pregled (inicijalna procjena stanja) koji uključuje sve četiri aktivnosti unutar podvodnoga pregleda, dok je na dijelu mostova (na 10 od 16) proveden monitoring koji uključuje podvodni vizualni pregled i praćenje promjena stanja korita u odnosu na specijalistički pregled i prethodne povremene nadzore.

Tablica 1. Popis provedenih pregleda mostova i uočena oštećenja

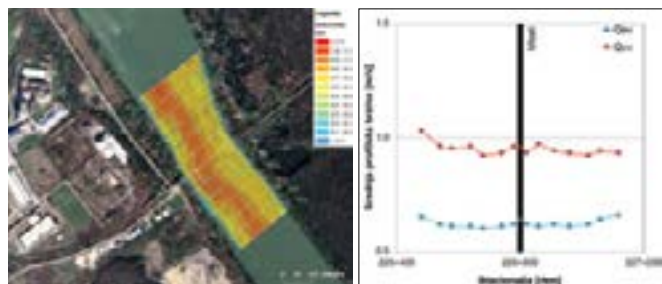
MOST	GODINA PREGLEDA		UOČENA OŠTEĆENJA			
	INICIJALNI (SPECIJALISTIČKI PREGLED)	MONITORING (POVREMENI NADZOR)	GLOBALNA EROZIJA	LOKALNA EROZIJA	REGULACIJSKE GRAĐEVINE	PODVODNI DIO KONSTRUKCIJE
Drava Botovo	2011	/	4	5	N	3
Drava Osijek	2011	2015.	8	6	7	5
Drava Varaždin	2011	2016., 2019.	8	6	8	4
Dunav Erdut	2012	/	8	8	8	6
Kupa Karlovac	2011	2014., 2015.	9	3	6	6
Kupa Sisak	2010	/	9	9	N	8
Kupa Zorkovac	2011	2014., 2015.	9	8	7	6
Mrtvi kanal I	2011	/	9	9	N	6
Rječina I	2011	/	9	9	N	5
Sava Gunja	2012	/	4	9	N	9
Sava Jakuševac	2009	2014., 2015.	2	2	N	8
Sava Jasenovac	2010	2015.	9	9	7	7
Sava Slavonski Šamac	2011	2014., 2015., 2016.	8	3	5	9
Štikada	2011	2014.	9	9	N	5
Strug	/	2016.	9	6	N	8
Una Volinja	/	2015.	9	8	N	8

Regulacijski su radovi na hrvatskim rijekama većim dijelom izvedeni u prvoj polovini 20. stoljeća [24] [25], pri čemu je spriječena lateralna migracija korita kako bi se postigli povoljni uvjeti za plovidbu i korištenje zemljišta. Sprečavanje lateralne migracije posljedično se odražava povećanjem posmičnih naprezanja i koncentracije erozivnoga kapaciteta toka na dno korita. Željeznički mostovi na kojima je evidentirano djelovanje globalne erozije na korito jesu Jakuševac, Gunja, Erdut i Varaždin. Lokalna erozija nastaje kao posljedica lokalnoga polja tečenja s izraženom turbulencijom u okolici stupova, a evidentirana je na svim mostovima u manjemu ili većemu opsegu. Jedna od najraširenijih metoda zaštite stupova od podlokavanja u velikim rijekama jest izvedba kamenoga nabačaja od lomljenoga kamena (tzv. riprap), gdje se u nekim izvedbama sužava profil korita ispod mosta te do erozije korita dolazi nizvodno u obliku odbačene kaverne. Posebno se ističe pojava odbačenih kaverni uz riprap kameni nabačaj kod mostova Erdut, Varaždin, Botovo, Osijek i Jasenovac. Kao i kod odbačenih kaverni, erozija zbog suženja toka posljedica je izvedbe (najčešće regulacijskih) građevina u koritu. Jedan od najpraktičnijih primjera takve pojave jest **most Sava Slavonski Šamac**, gdje pristupna rampa zaostala

od radova na sanaciji mosta uzrokuje eroziju korita i potencijalno ugrožava zaobalje. Većina analiziranih mostova je u vrlo dobrome stanju te na devet mostova (56 %) nije potrebno izvoditi veće radove na sanaciji korita ili podvodnoga dijela konstrukcije. Manji popravci u sklopu redovitoga održavanja na koritu evidentirani su na dva mosta, odnosno njih 13 %. Na pet mostova (31 %) utvrđeno je vrlo loše stanje korita i/ili konstrukcije koje zahtijeva neodgodivu intervenciju i sanaciju: na tri mosta potrebno je sanirati korito i na samo dva mosta konstrukciju. U nastavku opisani su utjecaji svakoga mehanizma na pojedini most te opisani karakteristični uvjeti koji su negativno utjecali na morfodinamičke promjene u koritu.

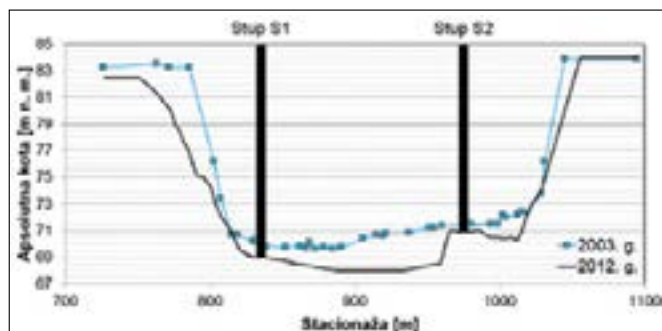
Najveći hrvatski most koji je otkazao zbog djelovanja erozije korita jest **most Sava Jakuševac** preko rijeke Save kod Mičevca, koji je izgrađen 1968. Mehanizmi koji su doveli do gubitka stabilnosti mosta opisani su u nizu ranijih radova: združeno djelovanje uznapredovale globalne erozije korita i lokalnoga podlokavanja stupa mosta rezultiralo je snižavanjem korita uz desni stup mosta od najmanje 10 m [26, 27]. Morfodinamičke promjene korita rijeke Save na zagrebačkome području identificirane su i prikazane u radu [28], prikaz rezultata terenskih mjerenja provedenih neposredno nakon gubitka stabilnosti mosta i metode praćenja stanja korita obrađeni su u radu [29], a procjena maksimalnog erozivnog kapaciteta toka prikazana je u radu [30]. Erozijska rijeke Save nije karakteristična samo za dionicu oko mosta Jakuševac, već je evidentirana i na Savskome mostu [28], mostu Ivanja Reka [31, 32] te na željezničkome mostu Gunja.

Znatna globalna erozija evidentirana je na **mostu Sava Gunja**, rekonstruiranome 1997., a smještenome na ravnoj dionici kojoj prethodi desni zavoj. Nizvodno je korito suženo i u pravcu, pri čemu se matica toka približava desnoj, a manji se sprud formira uz lijevu obalu. Hidrauličkim modelom tečenja utvrđeni su hidrološki i hidraulički parametri toka na promatranom dionici rijeke Save za uvjete srednje i velike vode, pri čemu je srednja profilna brzina 0,62 m/s za Q_{SV} ($Q_{SV} = 1148 \text{ m}^3/\text{s}$) i 0,95 m/s za Q_{VV} ($Q_{VV} = 3440 \text{ m}^3/\text{s}$). Iz rezultata mjerenja polja brzine m02 provedenog pri uvjetima neznatno većima od Q_{SV} ($Q_{m02} = 1210 \text{ m}^3/\text{s}$) vidljivo je to da na širem području mosta nema znatnih razlika u srednjoj brzini toka. Detaljnom analizom polja brzine uočeno je to da se na svim profilima uz desnu obalu pojavljuje pojas brzina veći od 1,0 m/s, a mjestimično i 1,1 m/s. Pri mjerenju m01 i većemu protoku ($Q_{m01} = 1685 \text{ m}^3/\text{s}$), no više nego dvostruko manjemu od Q_{VV} , uočeno je to da se u zoni povećanih brzina javljaju brzine veće od 1,20 m/s, dok je srednja profilna brzina 0,74 m/s. Dno korita na lokaciji mosta sastoji se od mješavine pijeska i šljunka, pri čemu granična brzina za pokretanje nanosa iznosi $v_{gr} = 1,50 \text{ m/s}$.



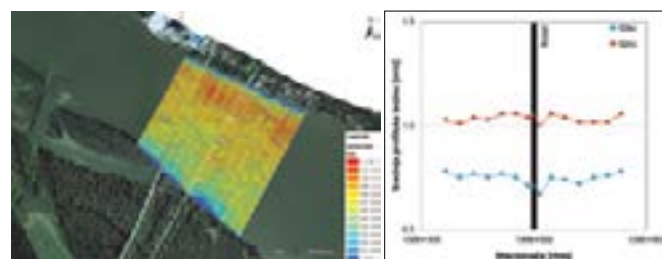
Slika 1. Polje brzine toka oko mosta Gunja za mjerenje m02 (lijevo) i promjena srednje brzine duž toka za karakteristične protoke (desno)

Provedena morfodinamička analiza pokazuje to da lokalno brzina toka premašuje uvjete potrebne za pokretanje nanosa iz korita i pri znatno manjim protocima od Q_{VV} . To da je na toj dionici u pokretu znatan nanos vidljivo je i na podvodnoj videosnimci, na kojoj je jasno vidljivo to da se u suspenziji kreće nanos čija krupnoća upozorava na to da bi to mogao biti koritiformirajući materijal, odnosno materijal iz korita. Postoje još tri pokazatelja koja upozoravaju na mogućnost pojave pokretanja koritiformirajućega materijala: (1) mala krupnoća materijala i mala granična brzina pokretanja, (2) na videosnimci vidljiv je tanki sloj pijeska koji obavija riprap i (3) usporedba poprečnoga profila snimljenog 2003. Usporedba sadašnjega profila korita s povijesnim snimanjem upozorava na pojavu globalne erozije korita između lijeve obale i stupa S2 u iznosu od 2,5 m, što potvrđuje zaključke provedenih analiza. Usporedbom dviju snimki može se uočiti to da je došlo do produbljivanja korita i urušavanja obala koje u sadašnjemu stanju imaju blaži pokos. Širina korita u dnu ostala je ista zbog gomilanja riprapa uz nožicu obale, koja je na taj način djelomično zaštićena od erozije. Zbog lokalnoga rasporeda polja brzine erozija korita napreduje pri protocima većima od Q_{SV} , zbog čega se očekuje kontinuirano snižavanje razine korita tijekom godine. Taj primjer pokazuje važnost analize detaljnoga polja brzine u okolici stupova uz geodetske snimke, a koje su zatim nadopunjene hidrauličkom analizom stabilnosti korita. Na taj način moguće je identificirati lokalne pojave u koritu koje utječu na njegovu stabilnost, a koje nije moguće uočiti analizom pojedinačnih utjecajnih varijabli.



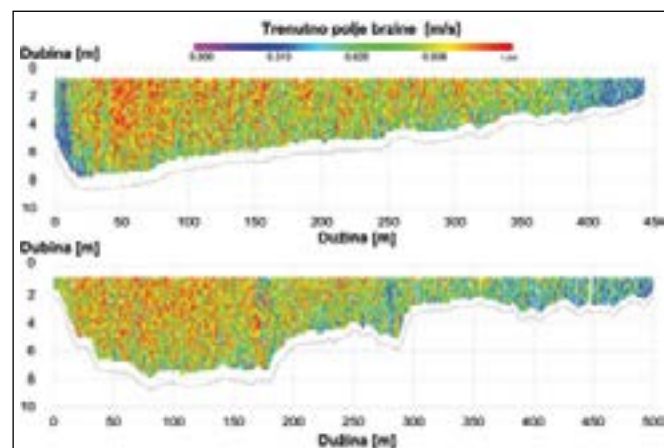
Slika 2. Presjek korita rijeke Save u mostovskome profilu Gunja iz 2003. i 2012., pogled nizvodno

Nasuprot globalnoj eroziji prikazanoj za šljunčana korita, koja je pod znatnim utjecajem antropogenih aktivnosti u pješčanim koritima kakvo je korito Dunava u Hrvatskoj, znatan pronos vučenoga nanosa jest prirodan proces. To je evidentno iz morfodinamičke analize provedene za **most Dunav Erdut**. Na području oko mosta korito ima najveću dubinu između lijeve obale i stupa S5, što koincidira s plovidbenim otvorom i maticom toka. S obzirom na to da je proračunom utvrđeno to da je granična brzina pokretanja materijala iz korita ($v_{gr} = 0,75$ m/s) samo neznatno veća od srednje profilne brzine (0,71 m/s), postoji opasnost od pojave pokretnoga korita u uvjetima srednje vode. Iz polja brzine za mjerenje m02 ($Q_{m02} = 2050$ m³/s) vidljivo je to da u tome području lokalno brzina toka prelazi 1 m/s u uvjetima manjima od srednje vode ($Q_{SV} = 2930$ m³/s).



Slika 3. Polje brzine toka oko mosta Erdut za mjerenje m02 (lijevo) i uzdužni profil srednje brzine duž toka za karakteristične protoke (desno)

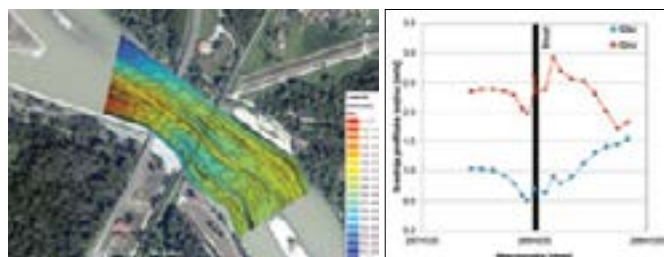
Pod utjecajem lokalnoga polja brzine oblik mostovskoga profila razlikuje se od ostatka dionice: korito je lokalno produbljeno na lokaciji matice uz lijevu obalu te su vidljive kaverne od lokalnoga podlokavanja uz stupove mosta. Razlika u obliku korita uzvodno od mosta i u mostovskome profilu vidljiva je iz snimljenoga trenutnog profila brzine na kojemu je jasna razlika u rasporedu brzine tečenja. U mostovskome profilu koncentracija brzina većih od 1,2 m/s je uz lijevu obalu, dok su na profilu uzvodno one distribuirane po cijelome profilu.



Slika 4. Profil trenutne brzine toka snimljen na ulaznome profilu u dionicu (gore) i na mostovskome profilu (dolje) mosta Erdut za mjerenje m02

Iako je profil korita u mostovskome profilu deformiran pod utjecajem lokalnoga polja tečenja, vidljivo je to da je u jednogodišnjemu razdoblju stabilan, odnosno da nije doživio znatnije promjene od 2011. godine. Navedeno razdoblje za koje su dostupni podaci prekratko je za detaljnu analizu, no upućuje na ravnotežu ulaza i izlaza nanosa na toj dionici, odnosno na to da do deformacije korita dolazi u kraćemu vremenskom razdoblju nakon velikovodnih događaja. Izračunana vrijednost maksimalnoga teorijskog lokalnog podlokavanja u zoni stupova iznosi između $D_{S(LS)} = 4,76$ m (za stup S6) i $D_{S(LS)} = 5,35$ m (za stupove S1 i S2). Za sve stupove stvarne dimenzije kaverni duplo su manjih proporcija od onih dobivenih proračunom (raspon dubina im je od 2 m do 3 m) jer se tijekom malih voda pune nanosom. Kaverne se nisu u cijelosti razvile zbog izvedenoga kamenog nabačaja oko stupova, što je posebno istaknuto kod stupova koji se ne nalaze u polju najjačega strujanja (S1 – S4).

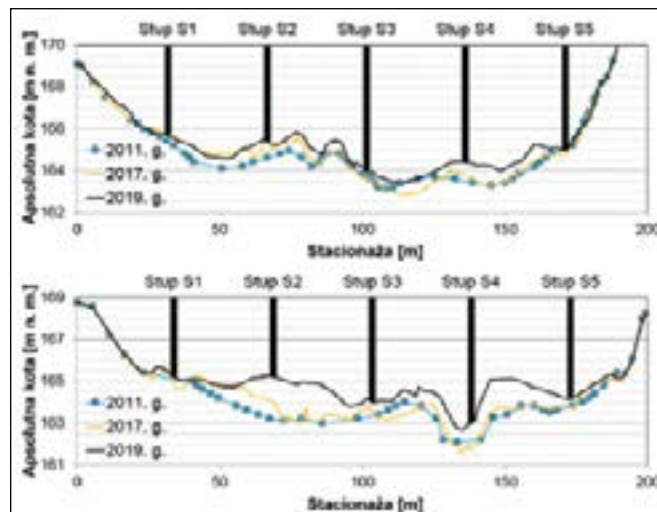
Most Drava Varaždin, kojim pruga premošćuje akumulacijsko jezero Varaždin, hidraulički je sličan mostu Erdut: svih pet njegovih stupova smješteno je u vodotoku, čime je tok razdijeljen kroz šest otvora jednakoga raspona. Specifičnost polja tečenja oko mosta uzrokovana je njegovim položajem na spoju nizvodnoga kraja odvodnoga kanala i staroga korita Drave. Režim voda pod utjecajem je režima rada hidroelektrane, što znači da je glavina toka odvodnim kanalom usmjerena na južni dio mosta uz desnu obalu, dok je na sjevernome dijelu protočnost znatno manja. Iako režim voda u akumulaciji podrazumijeva manje brzine tečenja nego u osnovnom koritu, mjerenjima je potvrđeno to da je srednja brzina toka relativno velika: 1,02 m/s za m01 ($Q_{m01} = 415$ m³/s) i 1,14 m/s za m02 ($Q_{m02} = 495$ m³/s). Te brzine daleko nadmašuju srednje brzine toka rijeke Drave na prirodnim dionicama, gdje se ona kreće oko 0,85 m/s [33]. Prilikom rada hidroelektrane u matici toka uzvodno od mosta javljaju se brzine veće od 1,5 m/s, a posebno zabrinjava režim voda za Q_{VV} (2842 m³/s) kada je prosječna brzina na cijeloj dionici 2,73 m/s. Pri velikim vodama cijelo je korito u pokretu, iako je korito Drave u akumulaciji pretežno šljunčano, što se pokazuje i relativno velikom graničnom brzinom za



Slika 5. Polje brzine toka oko mosta Varaždin za mjerenje m02 (lijevo) i uzdužni profil srednje brzine duž toka za karakteristične protoke (desno)

pokretanje nanosa ($v_{gr} = 2,06$ m/s). Instalirani protok HE-a Varaždin je 500 m³/s, a mjerenje m02, čiji su rezultati prikazani, izvedeno je upravo tijekom rada hidroelektrane.

Na području toga mosta rijeka Drava izrazito je morfodinamički aktivna, što se negativno odražava primarno na funkcionalnost akumulacije i ima izravan utjecaj na podlokavanje u mostovskome profilu. Analiza morfoloških promjena za tri provedena snimanja korita izvedena je usporedbom snimljene batimetrije korita za inicijalnu procjenu stanja i za monitoringe. Znatnih promjena karakterističnoga profila uzvodno od mosta nije bilo u šestogodišnjemu razdoblju nakon inicijalne procjene stanja, dok je u razdoblju između dva monitoringa došlo do znatne globalne promjene korita. Najmanje promjene uočene su na najplićemu dijelu korita između lijeve obale i stupa S2, koji se nalazi u području mirnijega dijela protočnoga profila koji se najviše aktivira tijekom velikih voda, kada glavina toka teče starim koritom rijeke Drave. Do najveće promjene oblika korita došlo je u segmentu između stupa S2 i desne obale, što uključuje i pojas oko stupova S3, S4 i S5. Istovjetan trend prisutan je i na profilu nizvodno od mosta, iako je taloženje nanosa intenzivnije. Prosječna debljina sloja nataloženog nanosa uzvodno od mosta je 1 m, a nizvodno veća od 2 m.



Slika 6. Presjek korita rijeke Drave 15 m uzvodno (gore) i 15 m nizvodno (dolje) od mostovskoga profila iz 2011., 2017. i 2019.

Mostovski profil također pokazuje trend sličan onome uočene za korito izvan njega, no uz manje izraženu količinu istaloženoga nanosa. Stupovi su mosta od podlokavanja zaštićeni kamenim nabačajem, čime je smanjen protočni profil te lokalno povećana brzina toka i turbulencija, što onemogućuje intenzivno taloženje nanosa. Uz nizvodne rubove kamenoga nabačaja stupova S2, S3, S4 i S5 vidljive su odbačene kaverne nastale podlokavanjem. Uzevši u obzir lokalno ubrzanje toka karakteristično zbog istaloženoga nanosa, i pojava

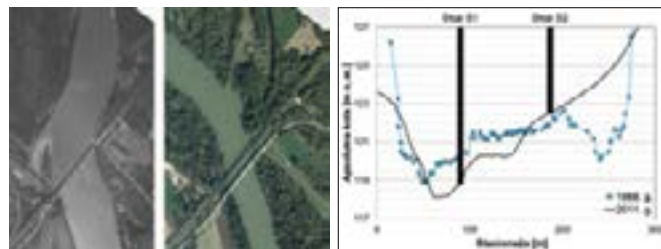
kaverni izraženija je kod stupova S3, S4 i S5, dok je manje izražena kod stupova S1 i S2. Intenzivan pronos nanosa tom dionicom onemogućuje procjenu daljnega razvitka postojećih kaverni, što je također poveznica s mostom Erdut. Nizvodno od mosta dolazi do nagloga širenja korita i usporavanja toka te su uvjeti pogodni za taloženje nanosa zbog smanjenja brzine toka, a neposredno nizvodno od mosta formiran je veliki sprud od istaloženoga nanosa.

Morfološke promjene evidentirane u koritu oko mosta usko su povezane s režimom voda. Kvalitativnom analizom podataka s vodomjernih postaja moguće je utvrditi to da je nailazak velikih voda bio najčešći u razdoblju između dva monitoringa, kada su zabilježene i najveće morfološke promjene u koritu. Ukupno gledajući, od 2017. u pojasu koji obuhvaća korito 15 m uzvodno i nizvodno od mosta evidentirano je ~2000 m³ novoistaloženoga nanosa. U navedenom razdoblju velike vode pojavile su se u rujnu i prosincu 2017. te u svibnju i studenom 2018. godine. U razdoblju od inicijalne procjene stanja do prvoga monitoringa nije zabilježeno dugo trajanje relativno velikih protoka Drave, već samo tri kratkotrajna velikovodna događaja 2012. i 2014. Tijekom nailaska vodnih valova protok starim koritom Drave višestruko je veći od kapaciteta HE-a te u takvim uvjetima dolazi do ispiranja nanosa iz akumulacije kao i erozije staroga korita Drave i pokretanja nanosa iz njega. U nastavku izdvojena je jedna karakteristična lokacija staroga korita Drave pri usporedivome vodostaju (slika 7.) na kojoj su vidljive morfološke promjene u vremenskom razdoblju koje se poklapa s monitoringom mosta Drava Varaždin. Iz usporednog snimka očito je da u kratkome vremenskom razdoblju dolazi do znatnoga pronosa nanosa koritom Drave te da je od 2011. sprud nastao taloženjem koritoformirajućega nanosa prešao kameni prag u koritu te nastavio migraciju nizvodno prema mostu. Zbog složenoga polja strujanja na analiziranoj dionici može se sa sigurnošću utvrditi to da korito nije doseglo svoj konačni morfodinamički razvoj te da se može očekivati daljnje taloženje nanosa.



Slika 7. DOF snimak korita Drave uzvodno od mosta za 2011. (lijevo), 2014./2016. (sredina) i 2017. (desno) – tok rijeke je od vrha prema dnu slike

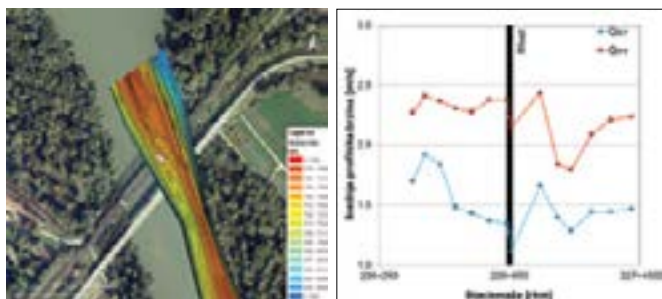
Nedugo nakon obnove **mosta Drava Botovo**, godine 1963. izvedena su aerofotogrametrijska snimanja iz zraka, dostupna na stranici DGU-a. Usporedbom snimaka iz 1968. i 2011. može se vidjeti to da je regulacijskim radovima korito Drave u cijelosti izmijenjeno neposredno na lokaciji mosta, pri čemu je kut naleta toka na konstrukciju značajno promijenjen. Regulacijom korita izmijenjen je režim nanosa koji se odrazio na morfologiju korita: godine 1968. oba stupa mosta nalazila su se duboko u glavnome koritu, dok je 2011. samo stup S1 bio u glavnome koritu. U sadašnjemu stanju rijeka glavnim koritom teče uglavnom između stupa S1 i lijeve obale, dok je u projektnim uvjetima bilo predviđeno između stupova S1 i S2 [34].



Slika 8. Usporedba korita Drave oko mosta Botovo za 1968. i 2011.: DOF snimak (lijevo) i mostovski profil (desno)

I na toj dionici rijeke Drave njezino korito podložno je znatnim morfodinamičkim promjenama. Materijal iz korita pokreće se i u uvjetima srednje i velike vode, pri čemu su brzine toka od 1,50 m/s i 2,22 m/s veće od granične brzine za uzorkovani materijal korita ($v_{gr} = 1,47$ m/s). U takvim uvjetima do globalne erozije dolazi ako je prihrana nanosom s uzvodne dionice manja od kapaciteta korita za pronos nanosa. Navedeni je preduvjet ispunjen jer se uzvodno nalazi niz hidroelektrana koje sprečavaju kontinuitet kretanja nanosa [35]. Pod djelovanjem globalne erozije matica je izmaknuta prema lijevoj obali te se korito lokalno produbilo na tome mjestu i posljedično smanjio protočni profil. Promjena brzine toka duž dionice rijeke Drave prikazana je tlocrtnim prikazom vertikalno usrednjenih brzina (mjerenje m01, $Q_{m01} = 259$ m³/s), u uvjetima nižima od SV ($Q_{SV} = 507$ m³/s), a vidljivo je da se desni stup nalazi u cijelosti izvan dosega toka, dok se između stupa i lijeve obale javlja brzina veća od granične. Zbog položaja stupa S1 uz konkavnu obalu oko njega dolazi do pojave veće brzine tečenja, što pogoduje produbljivanju korita.

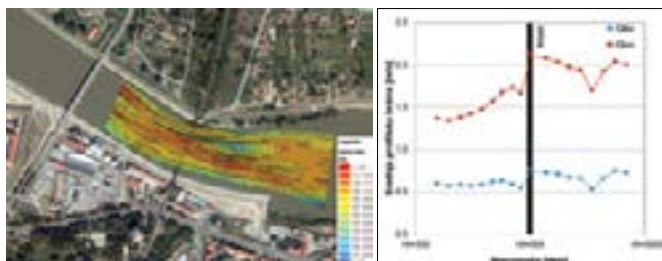
Rezultat hidrauličke analize upućuje na prisutnost globalne erozije koja uvjetuje postojan morfodinamički razvoj korita na toj dionici. Izvedbom kamenoga nabačaja u okolini stupova onemogućen je rad rijeke te je energija toka utrošena na nizvodnome dijelu korita nezaštićenom riprapom. Iz geodetskih snimaka vidljiva je odbačena kaverna uz stup S1, uz nizvodni lijevi brid njegove zaštite od podlokavanja. Izračunana vrijednost



Slika 9. Polje brzine toka oko mosta Botovo za mjerenje m01 (lijevo) i uzdužni profil srednje brzine duž toka za karakteristične protoke (desno)

teorijskoga lokalnog podlokavanja iznosi $D_{S(LS)} = 5,38$ m. Prema provedenim proračunima, kaverna oko stupa S1 nije dosegla svoju konačnu dubinu, što potvrđuje stalnu prisutnost morfodinamičkoga razvoja korita kao i kod prethodnih dvaju mostova. Stabilnost stupa S2 trenutačno nije ugrožena djelovanjem lokalne erozije, ali napredovanje globalne erozije korita bi se u dužemu vremenskom razdoblju moglo negativno odraziti i na njegovu stabilnost.

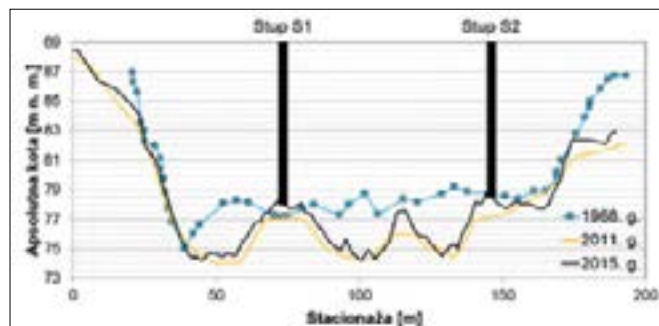
Most Drava Osijek dijeli mnoge sličnosti s mostom Drava Botovo: u pješčanome koritu rijeke Drave smještena su dva stupa mosta, oba zaštićena od erozije kamenim nabačajem koji se proteže u radijusu od 10 m oko njih, te se nizvodno u koritu pojavljuju odbačene kaverne, čija dubina iznosi oko 4 m. Granična brzina toka na toj dionici Drave iznosi $v_{gr} = 0,54$ m/s, što je znatno manje nego u prethodnim primjerima koji se nalaze uzvodnije, gdje je sastav materijala u koritu krupniji. U uvjetima srednje vode u mostovskome profilu pojavljuje se srednja brzina toka $v = 0,7$ m/s, što je potvrđeno i prethodnim ispitivanjima na toj dionici rijeke Drave koja upućuju na stalno kretanje dna u obliku dina, u rasponu protoka od malih do velikih voda [36]. Iz detaljnoga polja strujanja mjerenja m02 u uvjetima srednje vode ($Q_{m02} = 527$ m³/s, $Q_{SV} = 552$ m³/s) vidljivo je to da se uz konkavnu obalu javljaju veće brzine, dok su na konveksnoj manje. Također je vidljivo polje niske brzine u samoj kaverni, što upućuje na pojavu povratnoga strujanja i vrtloga unutar same kaverne. Prirodni je razvoj korita pod utjecajem izvedbe kamenoga nabačaja oko stupa S2, što je vidljivo i na



Slika 10. Polje brzine toka oko mosta Osijek za mjerenje m02 (lijevo) i uzdužni profil srednje brzine duž toka za karakteristične protoke (desno)

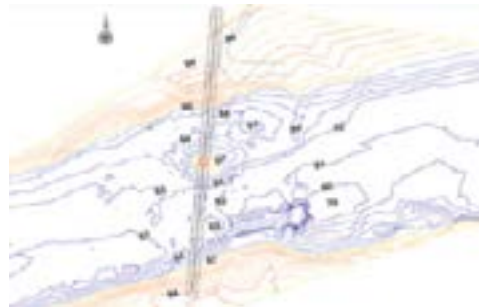
trenutačnome stanju kamenoga nabačaja oko njega. Naime, količina materijala oko stupa S2 znatno je manja nego oko stupa S1, što je posljedica većih brzina u tome pojasu.

Usporedi li se geometrija korita na karakterističnome profilu uzvodno i nizvodno od mosta vidljivo je to da u četverogodišnjemu razdoblju između inicijalnoga pregleda i monitoringa nije došlo do promjena u koti dna korita. Razlika u morfologiji korita nizvodno u odnosu na pravilnu geometriju uzvodno upućuje na djelovanje lokalne erozije zbog izvedbe kamenog nabačaja, dok nepromjenjivost oblika korita od 2011. upućuje na djelomično postizanje ravnotežnoga stanja ulaza i izlaza nanosa iz kaverni.



Slika 11. Presjek korita rijeke Drave 15 m nizvodno od mostovskoga profila iz 1968., 2011. i 2015.

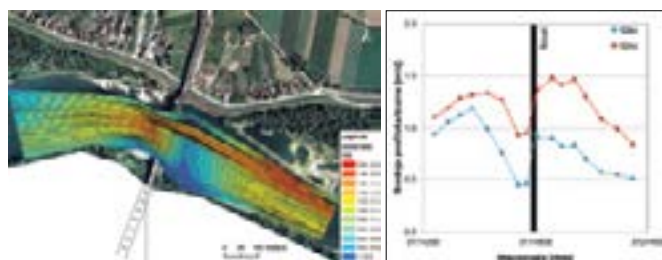
Most Sava Jasenovac se u hidrauličkome smislu vrlo malo razlikuje od prethodna dva: ima jedan stup u koritu zaštićen kamenim nabačajem, dok je drugi ukorijenjen u visoku obalu izvan dosega voda u većemu dijelu godine. Od prethodnih primjera razlikuje se po tome što se nalazi u šljunkovitome, morfodinamički stabilnijemu koritu pod sličnim režimom voda. Analiza morfoloških promjena od inicijalne procjene stanja do monitoringa pokazala je to da na karakterističnim profilima korita uzvodno i nizvodno od mosta nije došlo do promjena korita u petogodišnjemu razdoblju, odnosno profili su u cijelosti zadržali svoj oblik. Na tlocrtnome prikazu detaljne batimetrije korita oko mosta vidljivo je to da je nizvodno od kamenoga nabačaja stupa S2 prema lijevoj obali nastala odbačena kaverna u koritu koja je uzrokovala urušavanje obaloutvrde uz stup S1.



Slika 12. Batimetrija korita rijeke Save u okolini mosta Jasenovac

Razvoj odbačenih kaverni uz riprap kameni nabačaj izveden radi zaštite od podlokavanja česta je pojava na hrvatskim rijekama [37, 38]. Taj primjer, kao i prethodna dva, upućuju na posredne utjecaje koje uzrokuje izvedba kamenoga nabačaja u koritu te na probleme koje uzrokuje na građevinama u neposrednoj blizini mosta. Intenzivna turbulencija koja se razvija oko stupova u vodi postaje još naglašenija upotrebom riprapa, a njezina se energija troši u nizvodnome koritu nezaštićenom kamenim nabačajem. U takvim uvjetima riječno korito koje je globalno stabilno na dionici uzvodno i nizvodno od mostovskoga profila te ne pokazuje trend promjene morfologije može postati lokalno nestabilno nizvodno od mostovskoga profila i na taj način ugroziti stabilnost regulacijskih građevina, nasipa ili drugih mostova u blizini. Potaknuti tom problematikom, istraživači Građevinskog fakulteta prijavili su projekt „Daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu“ (R3PEAT), čiji je cilj istražiti prostorni i vremenski razvoj odbačenih kaverni nastalih zbog izvedbe riprap zaštite od podlokavanja [39, 40].

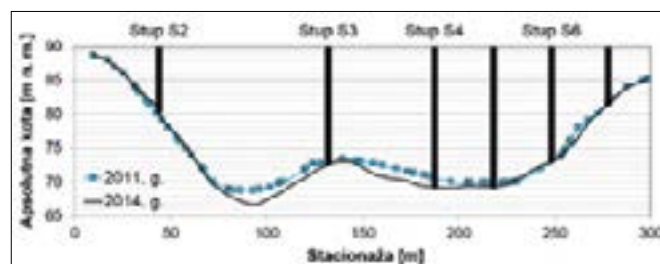
Erozija korita rijeke Save u blizini **mosta Slavonski Šamac** posljedica je rekonstrukcije mosta, koja ne ugrožava konstrukciju izravno, već neizravno preko utjecaja na korito, lijevu obalu i nasip. Za potrebe rekonstrukcije mosta 2000. izvođač radova izveo je pristupnu rampu u koritu od desne obale do stupa S3 kojom je onemogućeno protjecanje malih i srednjih voda kroz sve otvore mosta. Po završetku radova pristupna rampa nije uklonjena te je protočni profil ostao znatno sužen, a glavčina toka usmjerena prema lijevoj obali. Kod pojave velikih voda dolazi do prelijevanja preko kamenoga nabačaja između stupova S4-S8. Prelievanjem dolazi do pojave vodnoga skoka i disipacije energije uz nožicu rampe, što rezultira njezinom erozijom. U uvjetima manjima od srednje vode ($Q_{SV} = 1134 \text{ m}^3/\text{s}$), kakvi su vladali za vrijeme mjerenja m02 ($Q_{m02} = 729 \text{ m}^3/\text{s}$), u matici toka uz lijevu obalu dolazi do pojave brzina većih od granične, dok se u sjeni rampe tok smiruje kao posljedica velike dubine u koritu. Riječno je korito u okolici mosta šljunčano, utvrđena relativno velika granična brzina ($v_{gr} = 2,28$



Slika 13. Polje brzine toka oko mosta Slavonski Šamac za mjerenje m02 (lijevo) i uzdužni profil srednje brzine duž toka za karakteristične protoke (desno)

m/s) te je geometrija korita na karakterističnome profilu uzvodno od mosta bila relativno stabilna tijekom čitavog razdoblja praćenja stanja mosta od 2011.

Zbog navedene kontrakcije toka došlo je do povećanja brzine u mostovskome profilu kroz drugi i treći otvor te uz lijevu obalu rijeke Save u zoni neposredno nizvodno od mosta. Zbog kontrakcije korita dolazi do intenzivne turbulencije, posebno oko stupa S3. U mostovskim otvorima kroz koje je omogućeno neometano protjecanje, između stupova S2-S3 i S3-S4 došlo je do produbljivanja korita koje je 5 m niže od prosječne kota prirodnoga korita. U sadašnjemu stanju utjecaj erozije korita zbog suženja toka na ukupnu dubinu kaverne je zanemariv, odnosno protočni profil dosegao je svoju konačnu dubinu erozije, koja je posljedica suženja toka zbog prisutnosti rampe u koritu. Prvim monitoringom provedenim nakon početne procjene stanja uočeno je to da je na profilu nizvodno od mosta u glavnome koritu uz lijevu obalu došlo do znatnoga produbljenja zbog koncentracije matice toka na tome mjestu. Profil je djelomično promijenio svoj oblik i došlo je do njegova globalnog snižavanja za oko 2 m u trogodišnjemu razdoblju.



Slika 14. Presjek korita rijeke Save nizvodno od mostovskoga profila iz 2011. i 2014.

Monitoringom provedenim 2015. utvrđeno je to da je zbog produbljenja korita došlo do urušavanja regulacijskih građevina (obaloutvrde) na lijevoj obali u profilu mosta i popuštanja nasipa neposredno nizvodno od mosta. Urušavanje obaloutvrde i popuštanje nasipa izravne su posljedice zaprječavanja protočnoga profila rijeke između stupova mosta izgradnjom pristupne rampe, a, srećom, nisu uzrokovale znatnije posljedice po imovinu i stanovništvo. Monitoringom provedenim 2016. utvrđeno je to da su pod vodstvom Hrvatskih voda izvedeni radovi na sanaciji navedenih građevina [41].



Slika 15. Urušena obaloutvrda (lijevo) u mostovskome profilu i nasip (desno) na lijevoj obali (pogled uzvodno).

5. Zaključak

U ovome radu prikazan je pristup forenzičnoga inženjerstva za ocjenu stanja stabilnosti mostova na rijekama na temelju usporedbe erozivnog potencijala toka s evidentiranim promjenama korita na širemu području. Izvori potencijalnih opasnosti na stabilnost konstrukcije definirani su morfodinamičkom analizom, a proračunana hidraulička opterećenja za stabilno korito uspoređena su s izmjerenim opterećenjima. Rezultati analize na 16 željezničkih mostova pokazali su to da je većina mostova u vrlo dobrome stanju, a manje popravke u sklopu redovitoga održavanja potrebno je izvesti za dvama mostovima. Na pet od 16 mostova utvrđeno je vrlo loše stanje korita i/ili konstrukcije koje zahtijeva neodgodivu intervenciju i sanaciju. Podvodni je pregled mostova u stranoj legislativi definiran pravilnicima i smjernicama, dok u Hrvatskoj nisu propisani način ni dinamika pregleda kao ni metode ocjene stanja podvodnoga dijela konstrukcije mosta. Na taj je način rizik od oštećenja i gubitka funkcionalnosti mostova znatno povećan, a gospodarenje mostovima je ograničeno. Prikazani primjeri procjene stanja korita oko mosta upozorili su na to da podaci o vodnome režimu nisu dostatni za pouzdano utvrđivanje razine opasnosti na stabilnost mosta od podlokavanja, već istraživanja treba nadopuniti mjerenjima polja brzine oko mosta kako bi se uočile lokacije nastanka kaverni u koritu. Na temelju rezultata zaključuje se o neophodnosti definiranja metodologije za podvodni pregled i ocjenu stanja mostova na rijekama kako bi se obuhvatili svi potrebni čimbenici utvrđivanja stvarne opasnosti na stabilnost mostova. Posebnu pozornost treba posvetiti stanju korita tijekom nailaska velikih voda i nakon njih, a što smjernice sustava gospodarenja mostova propisuju provođenjem monitoringa nakon svake velike vode.

Literatura:

- [1] Zhang, Y.: Economic Impact of Bridge Damage in A Flood Event (doktorska disertacija), RMIT University, Melbourne, Australia, 2016.
- [2] Imhof, D.: Risk assessment of existing bridge structures (doktorska disertacija), University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, 2004.
- [3] Muñoz Diaz, E.E.; Moreno, F.N.; Mohammadi, J.: Investigation of Common Causes of Bridge Collapse in Colombia, Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 14; Issue. 4; pp. 194-200., 2009.
- [4] Cook, W.: Bridge Failure Rates, Consequences, and Predictive Trends (doktorska disertacija), Utah State University, Logan, Utah, 2014.
- [5] Wardhana, K.; Hadipriono, F.C.: Analysis of Recent Bridge Failures in the United States, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 17; Issue. 3; pp. 144-150., 2003.
- [6] Maddison, B.: Scour failure of bridges, Proceedings of the Institution Civil Engineers - Forensic Engineering, Vol. 165; Issue. FE1; pp. 39-52., 2012.
- [7] Yao, C.; Briaud, J.-L.; Gardoni, P.: Risk Analysis on Bridge Scour Failure, IFCEE 2015, 17–21 March, 2015, San Antonio, Texas, pp. 1936-1945., 2015.
- [8] Lee, G.C.; Mohan, S.B.; Huang, C.; Fard, B.N.: A Study of U.S. Bridge Failures (1980-2012), University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, p. 128, 2013.
- [9] Watson, R.: Hundreds of bridges to undergo scour tests, New Civil Engineer, Vol. 9; pp. 5, 1990.
- [10] Pezer, M.: Metalne i betonske građevine prometne infrastrukture na željezničkoj pruzi M201, na dionici Križevci – Koprivnica – DG, Željeznice 21, Vol. 15; Issue. 4; pp. 19-26., 2016.
- [11] Skrba, D.; Blanda, M.; Bitunjac, I.: Projekt rekonstrukcije željezničkih mostova na željezničkoj pruzi M104 Novska – Vinkovci – Tovarnik – DG, Željeznice 21, Vol. 14; Issue. 1; pp. 7-13., 2015.
- [12] Skrba, D.; Lalić, D.: Sanacija željezničkog mosta Drava Botovo, Željeznice 21, Vol. 16; Issue. 2; pp. 27-33, 2017.
- [13] Pezer, M.: Razlike između željezničkih i cestovnih mostova, Željeznice 21, Vol. 16; Issue. 4; pp. 35-43, 2018.
- [14] Imam, B.M.; Chryssanthopoulos, M.K.: Causes and Consequences of Metallic Bridge Failures, Structural Engineering International, Vol. 22; Issue. 1; pp. 93-98, 2012.
- [15] Cook, W.; Barr, P.J.: Observations and Trends among Collapsed Bridges in New York State, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 31; Issue. 4; pp. 04017011, 2017.
- [16] FHWA: National Bridge Inspection Standards, Federal Register, U.S. Department of Transportation, pp. 74419-74439., 2004.
- [17] NYSDOT: Bridge Inspection Manual, New York State Department of Transportation, New York, pp. 322, 2016.
- [18] Bekić, D.; Kerin, I.; Cahill, P.; Michalis, P.; Laphorne, J.; Šolman, H.; Gilja, G.; Potočki, K.; Pakrashi, V.; McKeogh, E.: BRIDGE SMS - Innovative Solution for Management of Bridges Over Water, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA 2018, 17-19 May, Zadar, Croatia, p. 57-63., 2018.
- [19] Šavor, Z.; Šavor Novak, M.: Postupci ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova, Građevinar, Vol. 67; Issue. 6; pp. 557-572., 2015.
- [20] Građevinska služba ZJŽ: Pravilnik o održavanju donjeg stroja pruga jugoslovenskih železnica, Zavod za novinsko-izdavačku i propagandnu delatnost JŽ, Beograd, 1970.
- [21] Kornel, K.; Kevin, F.: A hybrid approach to forensic study of bridge scour, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Forensic Engineering, Vol. 172; Issue. 1; pp. 27-38., 2019.
- [22] Kuspilić, N.; Gilja, G.: Podvodni pregled mostova, Sabor hrvatskih graditelja 2016: EU i hrvatsko graditeljstvo, 17-18 October, Cavtat, Croatia, p. 287-300, 2016.
- [23] FHWA: Underwater bridge inspection, Office of Bridge Technology, Federal Highway Administration, Washington, D.C., pp. 224, 2010.
- [24] Slukan Altić, M.: Povijest regulacije rijeke Save kod Zagreba i njezine posljedice na izgradnju grada, Hrvatske vode, Vol. 18; Issue. 73; pp. 205-212, 2010.
- [25] Živaković-Kerže, Z.: Tržište i njegov utjecaj na regulaciju Drave i odvodnju slavonsko-dravske nizine (Osvrt na 19. stoljeće), Podravina, Vol. 12; Issue. 24; pp. 97 – 111., 2013.
- [26] Kuspilić, N.; Bekić, D.; Gilja, G.; McKeogh, E.: Monitoring of river channel morphodynamical changes in the zone of bridge piers, First International Conference on Road and Rail

- Infrastructure (CETRA 2010), 17-18 May, Opatija, Croatia, p. 107, 2010.
- [27] Gilja, G.; Kuspilić, N.; Bekić, D.: Impact of morphodynamical changes on the bridge stability: Case study of Jakuševac bridge in Zagreb, (ur. J.M. Sawicki; P. Zima), Gdansk University of Technology, Gdansk, pp. 112-122., 2011.
- [28] Gilja, G.; Oskoruš, D.; Kuspilić, N.: Erosion of the Sava riverbed in Croatia and its foreseeable consequences, BALWOIS Conference on Water Observation and Information System for Decision Support, 25-29 May, Ohrid, Republic of Macedonia, p. ffp-1826(p9), 2010.
- [29] Kuspilić, N.; Gilja, G.; Bekić, D.; Zubčić, K.: Podvodni pregled stupova mostova i korita vodotoka, (ur. S. Lakušić), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 262-286., 2013.
- [30] Kuspilić, N.; Bekić, D.; Gilja, G.: Praćenje morfodinamičkih promjena korita vodotoka u zoni stupova mostova, (ur. S. Lakušić), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, Zagreb, pp. 69-112., 2010.
- [31] Gilja, G.; Kuspilić, N.; Tečić, D.: Morphodynamic impact of scour countermeasures on riverbed topography, 15th International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering, 7-8 September, Primošten, Croatia, p. 176-183, 2017.
- [32] Kuspilić, N.; Gilja, G.: Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova, E-zbornik: elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta, Vol. 8; Issue. 16; pp. 24-38., 2018.
- [33] Gilja, G.; Kuspilić, N.; Golubović, N.: Impact of river training works on the Drava River flow regime, 16th International symposium Water management & hydraulic engineering WMHE 2019, 5-7 September, Skopje, North Macedonia, p. 89-99, 2019.
- [34] Gilja, G.; Kuspilić, N.; Bekić, D.: Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova, Sabor hrvatskih graditelja 2012: Graditeljstvo - poluga razvoja, 2012/11/15-17, Cavtat, Croatia, p. 795-806 2012.
- [35] Grđan, L.; Kereša, Z.: Revitalizacija starih korita rijeke Drave uz izgrađene hidroelektrane, Croatian Hydrologic Society, pp. 177-186., 2003.
- [36] Gilja, G.; Kuspilić, N.; Potočki, K.: Analiza primjenjivosti empirijskih modela za opis karakteristika polja dina, Građevinar, Vol. 69; Issue. 6; pp. 427-436., 2017.
- [37] Cikojević, A.; Gilja, G.; Kuspilić, N.: Sensitivity analysis of empirical equations applicable on bridge piers in sand-bed rivers, 16th International symposium Water management & hydraulic engineering WMHE 2019, 5-7 September, Skopje, North Macedonia, p. 100-108, 2019.
- [38] Cikojević, A.; Gilja, G.: Pristup istraživanju prostornog i vremenskog razvoj odbačene kaverne uz riprap zaštitu od podlokavanja, 5. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 2019/09/09-10, Zagreb, Croatia, p. 59-68, 2019.
- [39] Gilja, G.; Cikojević, A.; Potočki, K.; Varga, M.; Adžaga, N.: Remote Real-time Riprap Protection Erosion Assessment on large rivers, Geophysical Research Abstracts - EGU General Assembly 2020, Vol. 22; EGU2020-1933, 2020.
- [40] Gilja, G.; Cikojević, A.; Potočki, K.; Varga, M.; Adžaga, N.: Daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu, Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi, 7-8 May, Varaždin, Croatia, 2020.
- [41] Hrvatske vode: Plan radova na zaštiti od štetnog djelovanja voda u 2016. godini, VGO za srednju i donju Savu, Zagreb, Slavonski Brod, 2016.

UDK: 625.12

Adrese autora:

doc. dr. sc. Gordon Gilja, dipl. ing. građ.
e-pošta: gordon.gilja@grad.unizg.hr
Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
Fra Andrije Kačića Miošića 26, 10000 Zagreb

prof. dr. sc. Neven Kuspilić, dipl. ing. građ.
e-pošta: neven.kuspilic@grad.unizg.hr
Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
Fra Andrije Kačića Miošića 26, 10000 Zagreb

doc. dr. sc. Damir Bekić, dipl. ing. građ.
e-pošta: damir.bekic@grad.unizg.hr
Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
Fra Andrije Kačića Miošića 26, 10000 Zagreb

Krunoslav Zubčić, dipl. arh.
e-pošta: kzubcic@h-r-z.hr
Hrvatski restauratorski zavod
Cvijete Zuzorić 43, 10000 Zagreb

SAŽETAK

PRISTUP FORENZIČNOG INŽENJERSTVA PRI SPECIJALISTIČKIM PREGLEDIMA DONJEG USTROJA ŽELJEZNIČKIH MOSTOVA NA RIJEKAMA

U svrhu sveobuhvatnoga sagledavanja utjecaja morfodinamičkih promjena na stabilnost mostova na rijekama podatke o oštećenju konstrukcije mosta treba nadopuniti i podacima o djelovanjima na nju. U istraživanju analizirani su mehanizmi potencijalnoga gubitka stabilnosti mostova zbog hidrauličkih djelovanja te je dana ocjena stanja za mostove na željezničkoj infrastrukturi. U radu je prikazan pristup forenzičnoga inženjerstva koji sagledava stanje i inženjersku procjenu stabilnosti mosta i s mostom povezanoga stanja korita. Morfodinamičkom analizom uspoređena su proračunana hidraulička opterećenja s rezultatima terenskih mjerenja, definirane su moguće posljedice hidrauličkih djelovanja na stabilnost mosta te su dane preporuke za daljnje aktivnosti monitoringa, održavanja i/ili sanacije.

Ključne riječi: erozija, pristup forenzičnoga inženjerstva, morfodinamička analiza, specijalistički pregled, monitoring

Kategorizacija: prethodno priopćenje

SUMMARY

FORENSIC ENGINEERING APPROACH DURING SPECIALIST SUBSTRUCTURE INSPECTIONS OF RAILWAY BRIDGES OVER RIVERS

In order to provide a comprehensive perspective of the morphodynamic effects on the stability of bridges over rivers, data on bridge structure damages should also be completed with data on the effects on it. The research analyses mechanisms of potential loss of bridge stability due to hydraulic effects, and a condition assessment is provided for bridges on railway infrastructure. The paper presents a forensic engineering approach which reviews the condition and engineering assessment of bridge stability and river bed morphology associated with the bridge. Morphodynamic analysis provides a comparison of calculated hydraulic loads with field survey results, possible consequences of hydraulic effects on bridge stability are defined, and recommendations are given for further monitoring, maintenance and/or rehabilitation activities.

Key words: scour, forensic engineering approach, morphodynamic analysis, specialist inspection, monitoring

Categorization: preliminary report