

Podvodni pregled stupova mostova i korita vodotoka

Autori:

Prof.dr.sc. Neven Kuspilić

Gordon Gilja

doc.dr.sc. Damir Bekić

Krunoslav Zubčić

Prof.dr.sc. **Neven Kuspilić**, dipl.ing.građ.

Gordon Gilja, dipl.ing.građ.

doc.dr.sc. **Damir Bekić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za hidrotehniku

Kačićeva 26, Zagreb

Krunoslav Zubčić, arheolog

Hrvatski restauratorski zavod

Odjel za podvodnu arheologiju

Cvijete Zuzorić 43, Zagreb

I. Uvod

Mostovi čiji dio konstrukcije zadire u protočni profil vodotoka, ili u zonu utjecaja voda iz vodotoka, izloženi su dodatnoj opasnosti. Ona se može očitovati u djelovanju voda na samu konstrukciju, djelovanju plutajućeg nanosa (naplavina) na konstrukciju te na promjene geometrije korita vodotoka i okolnog tla zbog djelovanja voda. Brojni su primjeri rušenja i oštećivanja mostova u svijetu zbog navedenih djelovanja voda. Statistički gledano, u mirnodopskim uvjetima, upravo je voda daleko najzastupljeniji čimbenik rušenja mostova (Tablica 1). Istraživanjem provedenim na više od petsto slučajeva oštećenja mostova u SAD-u u periodu od 1989. do 2000. godine [1] ustanovljeno je da je su poplavne vode i podlokavanja konstrukcija uzrok rušenja u gotovo 53% slučajeva. U istome radu napravljena je usporedba sa sličnim istraživanjima provedenim za rušenja mostova koja su se dogodila u periodima 1977.–1981. i 1982.–1988., gdje je potvrđen sličan trend uzroka.

Djelovanje vode na konstrukciju ubraja se u grupu slučajnih djelovanja te se kao takvo uzima u račun pri projektiranju. Međutim, svjedoci smo stalnih promjena u klimi, pa time i promjena u pojavnosti velikih voda u vodotoku, što mostove stavlja u nove uvjete djelovanja. Što su stariji mostovi, to su značajnije promjene okolišnih uvjeta u odnosu na one koji su određivali projektne kriterije. Nadalje, plutajući nanos u kombinaciji s hidrološkim promjenama stvaraju dodatne poteškoće i dodatna opterećenja na konstrukcije mostova (slika 1). Sve to predstavlja poseban problem koji ne treba zanemariti, ali je izvan predmeta ovoga rada. To su promjene koje su “vidljive okom” i stoga ih je jednostavnije pratiti.

Promjene u koritu vodotoka, kao posljedica njegove prirode i erozijskih procesa uvjetovanih antropogenim djelovanjem i djelovanjem promjena u vodnom režimu te režimu nanosa, nisu lako vidljive (ako i jesu, onda ih mogu prepoznati samo stručnjaci koji se bave tom specijalnosti). Ono što se ne vidi uvijek predstavlja najveći problem jer kada se nevidljive promjene pokažu već je kasno zbog nastale štete. To su slučajevi kada posljedice ukažu na postojanje uzroka. Dakle, kako bismo mogli spriječiti oštećenje dijelova konstrukcije mostova, ili njihovo rušenje, moramo redovito i stručno pratiti promjene u koritu vodotoka te ocijeniti mogu li uočene promjene biti uzrok potencijalne opasnosti za konstrukciju.

Uz redovito praćenje promjena u koritu vodotoka potrebno je pratiti i podvodne dijelove konstrukcije, stupove i upornjake. Prema našim iskustvima, podvodni dijelovi nekih starijih temelja stupova mostova su zbog promjene u koritu vodotoka oštećeni. Uglavnom se to odnosi na mostove čiji su stupovi temeljeni na kesonima s čeličnom oplatom koja se nekada nalazila u tlu, a zbog degradacije dna korita vodotoka sada se nalaze pod izravnim djelovanjem vode. Kada se govori o podvodnom pregledu, onda se treba termin “podvodni” uzeti relativno. Naime, zbog oscilacija vode u vodotoku dio se korita i konstrukcije nalazi stalno pod vodom, a dio povremeno. Kada se govori o podvodnom pregledu, smatra se pregled cijelog korita i dijela konstrukcije, i to ne samo onih dijelova koji su povremeno potopljeni već i šire – dijelova koji su pod utjecajem vode. To je područje gdje se, na primjer, zbog promjena razina vode mogu pojaviti klizanja obale, zatim zbog pojave valova desiti erozija obale, zbog nagomilavanja leda ili naplavina poremetiti strujna slika koja bi uzrokovala dodatnu eroziju korita i slično. Jasno je da je pregled dijela korita i konstrukcije mosta koji su stalno pod vodom najsofženiji, no ne smije se odvojiti od ostalih dijelova koji su pod utjecajem voda.



Slika 1. Primjeri nagomilanog plutajućeg nanosa na stupovima

Cjelovito praćenje promjena u koritu vodotoka ima više komponenti. Ono se sastoji od geodetskih, hidroloških, hidrauličkih i vizualnih elemenata. Možemo reći da se radi o četiri vrste “projektantskih podloga”. Njihovo objedinjenje i tumačenje rezultata složen je specijalistički postupak čiji rezultat mora dati ispravnu procjenu o opasnosti od pojave neželjenih promjena koje bi mogle ugroziti konstrukciju mosta. Također, vrlo je važno u uzdužnom smislu pregledati dovoljno dugu dionicu korita vodotoka, reprezentativnu za zaključivanje o procesima koji se zbivaju u zoni mosta.

Tablica 1. Analiza 143 slučaja gubitka stabilnosti mostova u periodu 1877-1975; od 86 rušenja od 1961.g. 55% je uzrokovano utjecajem voda [2].

Uzrok gubitka stabilnosti mosta	Broj havarija	Udio [%]
Neprikladna izvedba konstrukcije ili privremenih radova	12	8
Nepovoljan odabir konstrukcije	5	3
Primjena nepovoljnih materijala ili tehnologije gradnje	22	15
Vjetar	4	3
Potres	11	8
Poplava	70	49
Zamor materijala	4	3
Korozija	1	1
Preopterećenje ili nesreća	14	10
Ukupni broj havarija	143	100

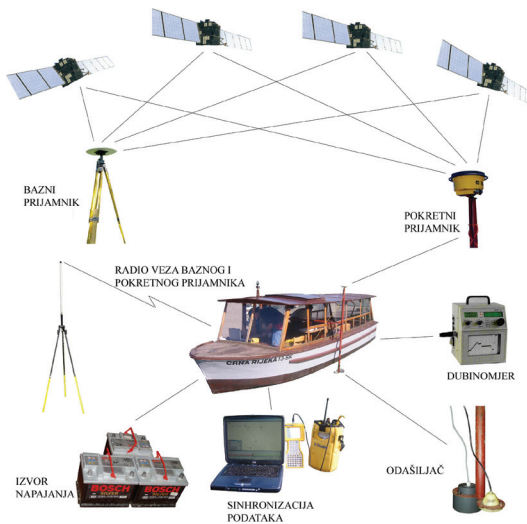
2. Geodetska mjerenja

Geodetskim snimanjem riječne dionice u blizini mosta se utvrđuje stanje morfologije dna korita rijeke u zoni mosta. Ono obuhvaća hidrografsku izmjeru korita vodotoka i

terestričku izmjeru obalne linije i inundacijskog pojasa. Obuhvat geodetskih snimanja podijeljen je prema svrsi na dva područja.

1. Šire područje vodotoka: snima se metodom poprečnih profila koji obuhvaćaju podvodno snimanje korita, pokosa obala glavnog korita i inundacija. Pojas se pruža na udaljenost 5 – 10 širina vodotoka uzvodno i isto toliko nizvodno od mosta;
2. Detaljno snimanje mostovskog profila: snima se kao mreža točaka čija gustoća osigurava izradu pouzdanog prostornog prikaza cijele plohe dna korita. Pojas obuhvaća prostor ispod mosta, a pruža se 10 - 25 m uzvodno i nizvodno od mostovskog profila (poprečno na vodotok i paralelno s mostom).

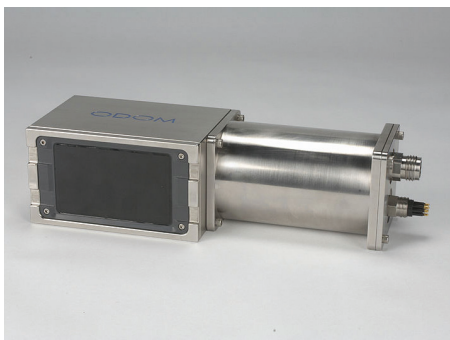
Hydrografska mjerenja se rade pomoću GPS-RTK uređaja koji daje podatke o apsolutnom položaju u prostoru akustičkog dubinomjera (ehosondera) smještenog na brodici, koji mjeri batimetriju dna u svom relativnom koordinatnom sustavu. Kako bi se ti uređaji mogli koristiti u realnom vremenu, potrebno ih je upariti - vremenski sinkronizirati razmjenu podataka iz oba uređaja kako bi se izmjerenoj relativnoj dubini u nekom trenutku mogao pridružiti podatak o apsolutnom položaju dubinomjera u prostoru. Također je potrebno odmjeriti horizontalni i vertikalni odmak leće transducera na dubinomjeru od GPS antene kako bi se mogao georeferencirati podatak o točki korita. Brodica se tijekom snimanja kreće vodotokom uz rotaciju oko svih triju osi: uzdužne (bočno lujljanje - *roll*), poprečne (posrtanje - *pitch*) i vertikalne (skretanje - *yaw*). Te rotacije uzrokuju promjenu u međusobnom odnosu GPS antene i leće dubinomjera te ih je stoga potrebno poznavati kako bi se kompenzirao njihov utjecaj na mjerenja. Te rotacije se mjere upotrebom senzora kutnog pomaka (*motion sensor*), a njegovi rezultati se također moraju vremenski upariti s ostalim mjerenjima (slika 2).



Slika 2. Uparivanje GPS/RTK i akustičkih uređaja

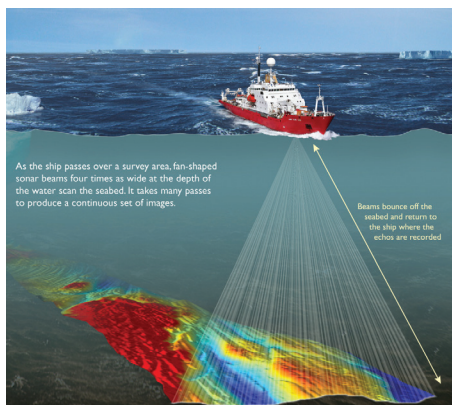
Svi prikupljeni podaci obrađuju se kroz softverske pakete kako bi se u realnom vremenu transformirali u zajednički koordinatni sustav te realizirali kao točan podatak o položaju mjerene točke.

Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu mjeri batimetriju koristeći višesnopni dubinomjer ODOM ES3-M, GPS-RTK sustav za pozicioniranje, TSS DMS 25 senzor kutnog pomaka, CRESCENTVS100 uređaj za određivanje azimuta kretanja te digibar I200 uređaja za određivanje brzine zvuka u vodi povezane u sustav (slika 3, [3]). Višesnopni dubinomjer ODOM ES3 koristi snop od 420 akustičkih zraka raspoređenih lepezasto čime se dobiva vrlo detaljno snimljeno područje interesa. Naime, radi se o najmodernijoj metodi snimanja područja prekrivenih vodenom površinom.



Slika 3. Višesnopni dubinomjer ODOM ES3-M

Multibeam ODOM ES3 koristi snop od 420 akustičkih zraka, svaka širine do 3° u smjeru i okomito na smjer putanje plovila, koje se šire vodom u obliku lepeze (slika 4) od uređaja do dna. Signal se potom odbija od dna i vraća u aktivne senzore primopredajnika koji koriste zvučnu energiju signala, pritom bilježeći podatke o položaju krute granice unutar vodotoka.

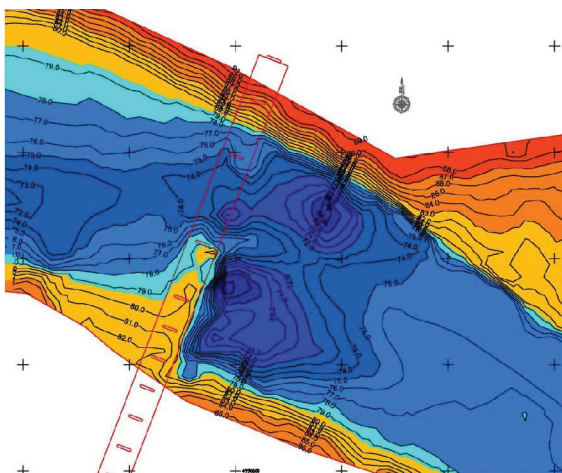


Slika 4. Prikaz snopa emitiranih akustičkih zraka prilikom snimanja

Prijeđeni put signala računa se sljedećom jednačbom:

$$l = \frac{t}{2} \cdot v \text{ [m]}, \quad (1)$$

gdje su: l - prijeđeni put akustičke zrake [m], t - vrijeme [s], v - brzina zvuka kroz vodu mjerena za svaki odašlani snop zraka pomoću digibar uređaja [m/s]. Širina pramena zraka koje odašilje multibeam ovisi o dubini vode, s maksimalnom vrijednošću od 80 m pri dubini vode 60 m i kutu pramena od 120° . Zvučni signal se šalje u pravilnim vremenskim razmacima i bilježi kontinuirano u smjeru putanje plovila. Rezultat mjerenja višesnopnim dubinomjerom su batimetrijske karte snimljenog područja velike rezolucije (slika 5). Ovako prikupljeni podaci daju pouzdaniji prikaz batimetrije korita u odnosu na klasično snimanje metodom poprečnih profila - snimljene su sve neravnine u koritu bez obzira na njihovu lokalnu pojavu.

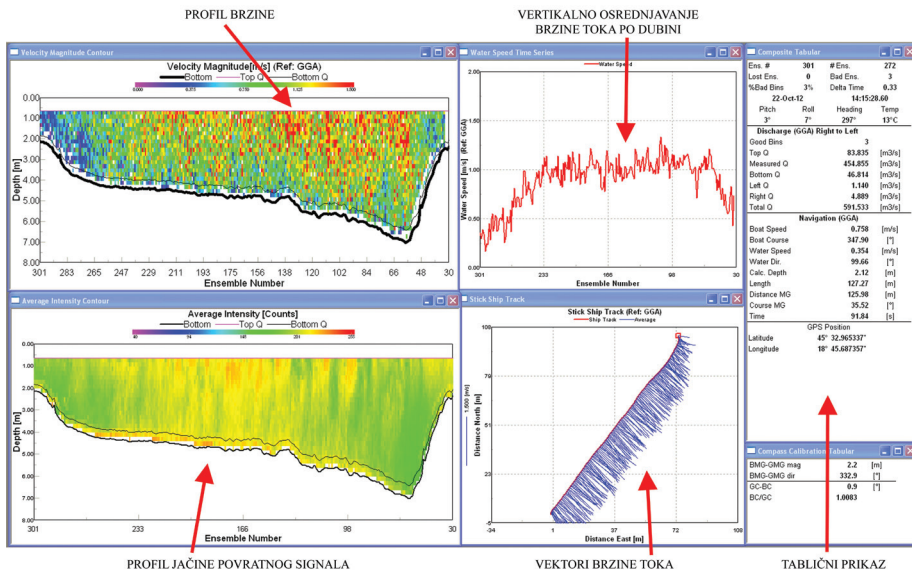


Slika 5. Batimetrija korita rijeke Save

Na prikazanom snimku batimetrije rijeke vidljive su pojave četiri kaverne neposredno uz most kao posljedica poremećenog polja strujanja vode. Zbog izrazito lokalne pojave tih kaverni, postoji velika vjerojatnost da ih se previdi prilikom snimanja metodom poprečnih profila. S druge strane, batimetrija snimljena gustom mrežom točaka pruža iscrpnu bazu podataka za analizu: moguće je ravninom presjeći plohu na beskonačno mnogo mjesta i na taj način dobiti profil korita. Ovakvi proizvoljni presjeci na promatranoj dionici koriste se u svrhu usporedbe geometrije profila s povijesnim podacima, a preko plohe korita moguće je detaljno izračunati opseg zemljanih radova prilikom izgradnje regulacijskih građevina ili drugih zahvata u koritu vodotoka.

3. Hidrološka i hidraulička mjerenja

Hidrološka i hidraulička mjerenja služe za prikupljanje informacija o vodnom režimu, prije svega hidrološkom i hidrauličkom. Prikupljanje podataka koji opisuju vodni režim u osnovi se provodi kontinuiranim opažanjem vodostaja na vodomjernim postajama koji se upotpunjavaju mjerenjem protoka u diskretnim vremenskim trenucima. Kontinuirano prikupljanje tih podataka od velike je važnosti za opis hidrološkog režima - pomoću njih je moguće utvrditi tijek globalnih morfoloških promjena na vodotoku. Hidrotehničke građevine i zahvati su najčešće lokalnog karaktera, te promjene u vodnom režimu koje uzrokuju nije moguće opaziti mjerenjima koja se obavljaju na vodomjernim postajama. Lokalne promjene u režimu tečenja opažaju se mjerenjem profila brzine pomoću akustičkog strujomjera - Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Pri mjerenjima je korišten akustički strujomjer tipa RDI Workhorse Rio Grande, frekvencije 1200 kHz, koji služi za mjerenje vektora struja u moru, rijekama ili jezerima.



Slika 6. Sučelje računalnog programa za prikupljanje podataka u realnom vremenu

ADCP radi na principu Dopplerovog efekta - odašilje zvučne signale na određenoj fiksnoj frekvenciji i prima povratni odjek dobiven od raspršivača zvuka u vodi prilikom čega opaža promjene u frekvenciji početnog zvučnog signala. Raspršivači zvuka su bilo koje čestice suspenzije ili planktona koji odbijaju zvuk natrag prema ADCP-u, a nalaze se svuda u vodi i u prosjeku se kreću istom horizontalnom brzinom kao i voda - što je i najvažnija pretpostavka prilikom mjerenja jer ADCP zapravo mjeri brzinu tih raspršivača zvuka. Snimljeni profil brzine opisan je mrežom ćelija (slika 6) čije se

dimenzije unaprijed zadaju u ovisnosti o uvjetima na mikrolokaciji - salinitetu, gustoći, temperaturi, valovima, itd. Vertikalni stupac vode dijeli se na niz jednako širokih slojeva unutar kojih se usrednjavaju svi pripadajući podaci reflektirani od raspršivača zvuka. Sumiranjem srednje brzine za svaku ćeliju s njenom pripadajućom površinom dobiva se podatak o ukupnom protoku kroz živi presjek. Protok se računa integracijom strujne slike po površini profila, a dan je jednadžbom [4, 5]

$$Q = \int_0^T \int_0^D \left| \vec{v}_w \right| \left| \vec{v}_b \right| \sin \theta \cdot dz dt \quad (2)$$

gdje su: Q - ukupni protok kroz živi presjek [m^3/s], T - vrijeme proteklo tijekom prikupljanja podataka [s], D - ukupna dubina [m], $|\vec{v}_w|$ - kvazitrenutačni vektor brzine toka za ćeliju [m/s], $|\vec{v}_b|$ - vektor brzine brodice [m/s], θ - kut između vektora brzine toka i brodice [$^\circ$], dz - diferencijal dubine po vertikali, dt - diferencijal vremena. Za pozicioniranje brodice u prostoru u softver za prikupljanje podataka moguće je upariti RTK GPS uređaj. Prilikom snimanja na rijekama i moru strujomjer je postavljen na boku brodice (slika 7a), a pri snimanju manjih vodotoka i kanala postavlja se na povlačno plovilo - trimaran (slika 7b).

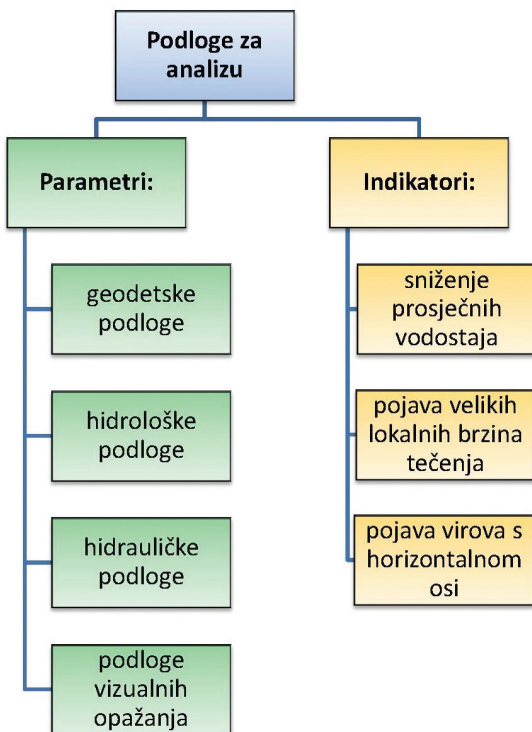


Slika 7. Položaj strujomjera na plovilu za mjerenje: (a) na rijekama i moru; (b) na manjim vodotocima

Rezultati mjerenja služe za određivanje lokalnog polja strujanja i kalibraciju modela koji se koriste za opisivanje karakterističnih hidroloških i hidrauličkih parametara na dionici. Poznavanje hidraulike u mostovskom profilu korita nužno je kada most koji će biti izgrađen svojim gabaritima zadire u glavno korito ili pregrađuje inundaciju. Kada su elementi mosta smješteni unutar riječnog korita, tj. mostovski otvor je uži od prirodnog korita rijeke, dolazi do suženja prirodnog protjecajnog profila što izaziva uspor i izdizanje razine vode uzvodno u odnosu na prirodno stanje. Stoga dolazi do povećanja brzine tečenja u mostovskom profilu. Često je to povećanje brzine tečenja dovoljno da pokrene čestice materijala iz korita i uzrokuje eroziju u blizini temelja mosta ili da uzrokuje oštećenja na samoj konstrukciji [6]. U slučaju kada se mjerenjem hidroloških i hidrauličkih parametara toka na dionici pokaže da postoji opasnost od oštećenja konstrukcije, pristupa se podvodnom vizualnom pregledu elemenata građevina u vodi.

4. Ronilački pregled

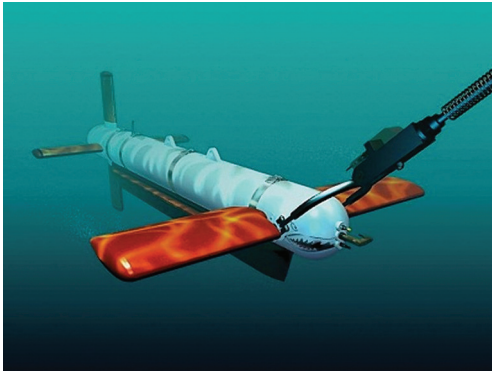
Geodetska, hidrološka i hidraulička mjerenja su neizostavna i nezamislivo je donositi ikakve zaključke bez rezultata mjerenja koji ih podupiru. Mjerenja rezultiraju bazom podataka s izmjerenim vrijednostima bitnih parametara na temelju kojih se donose zaključci o stanju morfologije i vodnog režima. Važno je istaknuti da određivanje utjecaja koje tok ima na korito i stupove nije jednoznačno određeno mjerljivim parametrima kao što su karakteristični protoci, brzina toka ili posmično naprezanje. Veliki utjecaj na razinu opterećenja oko građevina ima lokalno polje strujanja, tj. turbulencija. Djelovanje lokalnog polja brzine ispire reške između elemenata od kojih su građeni temelji građevine, nagriža čelične elemente i mijenja oblik korita – što u konačnici rezultira novim opterećenjima na građevinu. Na temelju indikatora i iskustva inženjeri mogu donijeti zaključke o djelovanju na građevine, no nije moguće sa sigurnošću utvrditi razmjer oštećenja koja nastaju kao posljedica djelovanja [7-9]. Kada se na temelju indikatora procijeni da bi građevina mogla biti oštećena, pristupa se podvodnom vizualnom pregledu koji će rezultirati video i fotodokumentacijom – koji pripadaju pod parametre i njima se nedvojbeno utvrđuje stanje građevine pod vodom (slika 8).



Slika 8. Podjela podloga za analizu

Ronilac se koristi opremom otvorenog kruga disanja uz upotrebu maske za cijelo lice, a na nižim temperaturama vode ima i suho ronilačko odijelo. Oprema za videosnimanje sastoji se od digitalne kamere koja ima mogućnost snimanja u HD kvaliteti Canon SX210 IS i podvodnog kućišta sa širokokutnim objektivom i podvodnom rasvjetom 2 x 30 W. Prilikom određivanja dubine predmeta ili oštećenja na snimci, ronilac upotjebljava ronilački dubinomjer. Zbog nemogućnosti plivanja u jakoj struji, ronilac je konopom povezan s plovilom na površini i komunicira pomoću ultrazvučnog telefona. Kretanje ronioca prilikom snimanja unaprijed je dogovoreno i minimalno se korigira na samom mjestu, ovisno o uvjetima pod vodom. Prvo se površinskim pregledom stupa iznad vode pokušavaju utvrditi vidljiva oštećenja i predvidjeti stanje stupa u podvodnom dijelu. Najpovoljnije mjesto za zaranjanje određuje se ovisno o brzini vode, količini naplavljenog nanosa oko stupa i geometriji stupa. Nakon toga slijedi zaron i vizualni pregled pojedinih dijelova stupa, odnosno temelja, čelične oplata kesona te riječnog dna, pri čemu se posebna pažnja usmjerava na moguća mjesta potkopavanja kesona ili na temeljne stope. Na kraju slijedi pregled dna gdje se pokušava utvrditi nagib terena, sastav i krupnoća riječnog nanosa. Ponekad zbog izuzetno jake struje, na pojedinim mjestima i naplavljenog granja koje onemogućuje kretanje, nije moguće obaviti vizualni pregled dijela stupa.

Pri vizualnom pregledu može se upotrijebiti i sidescan sonar koji snima kontinuirane podvodne fotografije (slika 16). Sidescan sonar ili sonar s bočnim motrenjem (skeniranjem) jest uređaj za dvodimenzionalno snimanje površine riječnog dna. Uređaj emitira bočno u odnosu na kretanje broda dva uska ultrazvučna vala u obliku lepeze na frekvencijama 455 i 800 kHz. Lijeva i desna strana snimke odvojena je uskim pojasom koji predstavlja polje neposredno ispod sonara na kojem uređaj mjeri samo dubinu. Sonar snima samo predmete na površini dna, pri čemu je prikaz predmeta kao na klasičnoj fotografiji, uz mogućnost određivanja osnovnih dimenzija i pozicije. Širina je snimanja pri nižoj frekvenciji i nižoj rezoluciji 100 metara sa svake strane, odnosno ukupno 200 metara. Snimanjem na višoj frekvenciji dobiva se detaljniji prikaz u boljoj rezoluciji, ali s manjom ukupnom širinom snimanja. Širina snimanja usko je povezana s veličinom objekata na riječnom dnu, a kod ovog modela sonara i s dubinom rijeke, jer je sonda sonara fiksirana na trup plovila. Uređaj posjeduje svoju memoriju i DGPS tako da su snimljeni podaci georeferencirani. Naknadnom obradom u računalnom programu moguće je izdvojiti detaljnije podatke i prikaze objekata snimljenih na dnu ili lijepljenje snimljenih podataka na geografsku kartu ili zračnu fotografiju. Pomoću podataka o dubini snimljenoj neposredno ispod sonara može se izraditi batimetrijska karta i djelomično utvrditi tvrdoća i sastav površine dna. Kvaliteta snimljenih podataka ovisi o nekoliko faktora, a to su: dubina odnosno vodostaj, količina krupnih disperziranih čestica u vodi, turbulencije i brzina vode (jer je potrebno jednoliko i pravilno kretanje plovila), visina iznad dna i položaj iz kojega se snima objekt na riječnom dnu. Za pregled stupova i riječnog dna upotrijebljen je Sidescan sonar Humminbird I179c SI Combo (slika 9).



Slika 9. Prikaz sidescan sonarnog uređaja

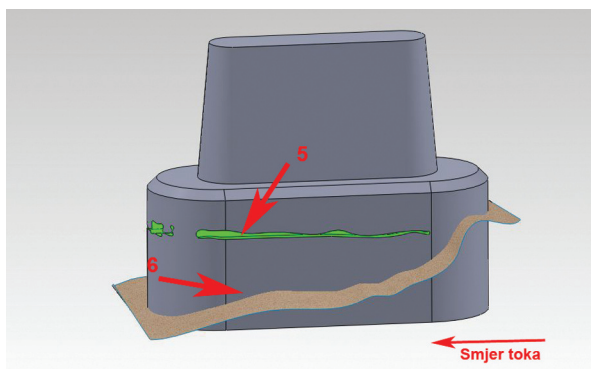
Ograničenja koja otežavaju ili onemogućuju ronilački pregled je visoki i promjenjiv vodostaj, loša vidljivost, temperatura i količina naplavina. Prilikom rasta vodostaja dolazi do jačeg zamućenja vode i veće količine naplavljenog granja, ponekad i od nekoliko metara veličine, stoga treba izbjegavati taj period. Vidljivost je u rijekama uobičajeno loša što znači od 3 metra do tek nekoliko centimetara. Stoga bi ronilački vizualni pregled trebalo obaviti prilikom najnižega vodostaja ljeti, a za snimanje sidescan sonarom povoljniji je nešto viši vodostaj. Biranje najpovoljnijega trenutka za obavljanje vizualnog pregleda bitan je čimbenik o kojem najviše ovisi kvaliteta vizualnog pregleda. No, dosadašnja iskustva pokazuju da je često vrijeme ronilačkog pregleda određivano krajem fiskalne godine, a ne najpovoljnijim uvjetima za ronjenje.

5. Primjeri iz prakse

U nastavku se navode primjeri vizualnih pregleda sedam mostova u Hrvatskoj čiju je analizu izradio Zavod za hidrotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu [10]. Na tim primjerima evidentirane su promjene, odnosno oštećenja, na temeljima i stupovima mostova koje su posljedica djelovanja vode.

5.1. Most sa značajnim oštećenjem gornje konstrukcije temeljne stope

Stupovi mosta izgrađeni su od armiranog betona. Leže na temeljnoj stopi koja je građena od pravilno klesanih kamenih blokova u mortu. Kameni blokovi temeljne stope su postavljeni unutar čelične oplate kesona.



Slika 10. Shema stupa s položajem podvodnih fotografija na lijevoj strani

Oplata čeličnog kesona je na vrhu temeljne stope zalivena betonom. Uslijed djelovanja vode i leda, oplata čeličnog kesona i zaštitni sloj betona uništeni su na većem dijelu temeljne stope pa je tu došlo do najvećih oštećenja. Oštećenje A nalazi se dva metra ispod vrha temeljne stope na lijevoj, nizvodnoj i desnoj strani stupa (slika 11).



Slika 11. Lijeva strana stupa: a) oštećenje se pruža cijelom njegovom duljinom; b) detalj

Oštećenjem je najviše zahvaćen prvi red klesanog kamenja, a na nekoliko mjesta nedostaju i cijeli blokovi. Najdublja izmjerena pukotina nalazi se na lijevoj strani stupa, a duboka je 80 cm (slika 12) dok je ostatak pukotina između kamenih blokova prosječne dubine između 50 i 60 cm. Dimenzije kamenih blokova koji nedostaju su oko 50 x 35 x 30 cm.



Slika 12. Nizvodna strana stupa: a) nedostaje nekoliko kamenih blokova; b) najdublja pukotina

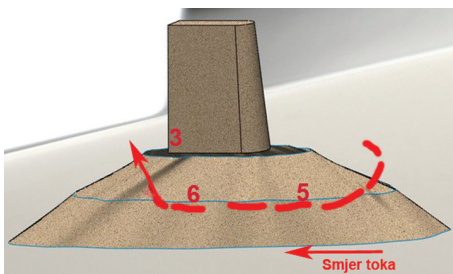
Očekivano se pretpostavlja da se oštećenje nalazi i na uzvodnoj strani stupa na kojoj se skuplja veća količina plutajućeg nanosa (slika 13). Plutajući nanos nakuplja se 30 m u širinu i 3 m u visinu.



Slika 13. Desna strana stupa, također je vidljivo oštećenje i gomilanje plutajućeg nanosa

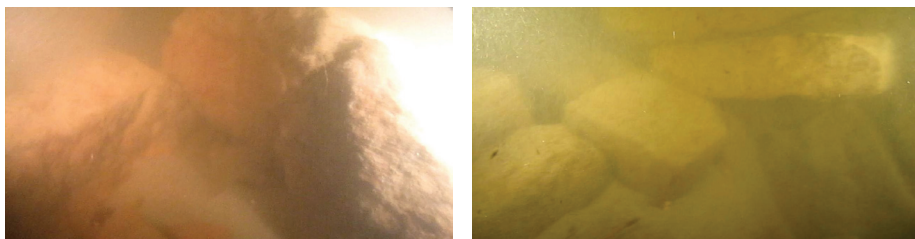
5.2. Most sa zaštitom temelja stupa kamenim nabačajem

Usljed niskog vodostaja rijeke, cijela konstrukcija stupa više od kamenog nabačaja nalazila se izvan vode. Donji dio stupa građen je od pravilno tesanih kamenih blokova a nakon toga ostatak konstrukcije građen je od armiranog betona.

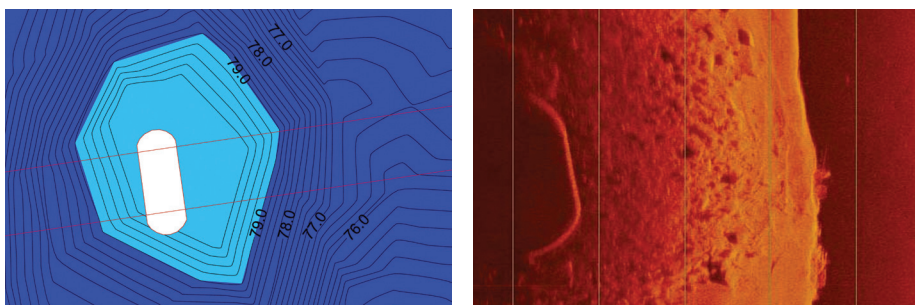


Slika 14. Smjer kretanja i položaj fotografija 3, 5 i 6

Na stupu su uočena tri oštećenja, slika 14. Prvo veće oštećenje nalazi se na donjem dijelu lijevog nizvodnog ugla stupa. Radi se o oštećenju kamenih klesanih blokova, dimenzija 0.8 x 1 m. Drugo oštećenje nalazi se na rubu armiranobetonske ploče ispod ležaja mosta na nizvodnoj strani. Na rubnom dijelu ploče vidljiva je čelična armatura, dimenzije 40 x 30 x 20 cm. Treće oštećenje na lijevom uglu uzvodne strane predstavlja kavernu ispod zadnjeg kutnog kamenog bloka i iznad temeljne stope mosta.



Slika 15. a) Foto 6 - Krupni kameni nabačaj iz nasipa; b) Ostaci cigle u kamenom nabačaju



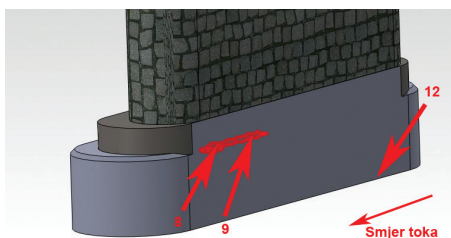
Slika 16. Snimak korita oko stupa: a) ploha iz geodetskog snimka; b) fotografija sidescan sonara

5.3. Primjer oštećenja rekonstruirane temeljne stope

5.3.1. Stup S2

Vanjski plašt stupa izveden je od grublje tesanih kamenih blokova poredanih u pravilne redove sa širim betonskim fugama, a temeljna stopa građena je od betona. Na stupu su uočene neke nepravilnosti u građi temeljne stope. Stup se ne nalazi na sredini temeljne stope nego je pomaknut na njen lijevi rub, slika 17. Ovakva konstrukcija je posljedica izgradnje novih stupova dograđivanjem na temelje starih srušenih stupova.

Na vrhu stepenice uz desnu stranu stupa vidljiva je čelična armatura, oštećenje A, slika 18. Cijela gornja površina stepenice jako je erodirana, s dubinom erozije na nekim mjestima od 15 do 20 cm.

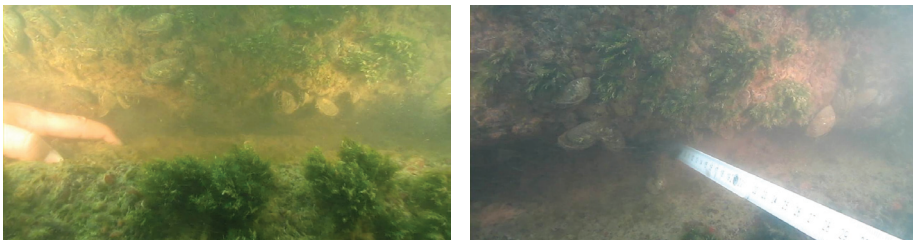


Slika 17. Lijeva strana stupa i stepenica na temeljnoj stopi, položaj fotografija 8, 9, 12



Slika 18. a) Foto 12 - ostatak čelične oplate kesona uz lijevu stranu stupa; b) Oštećenje A na rubu dubljev proširenja temeljne stope na desnoj strani stupa - vidljiva je armatura

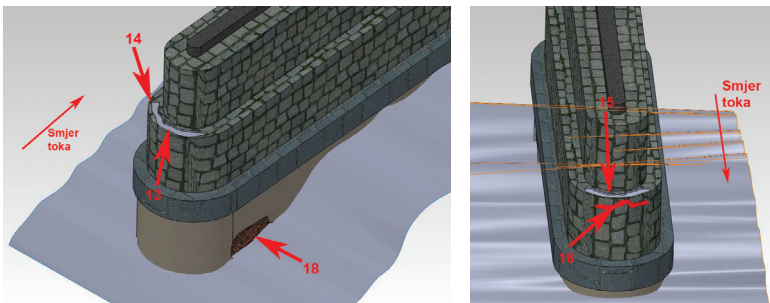
Oštećenje B nalazi se na dubini 1.4 m pri kraju lijeve strane stupa. Radi se o dugačkoj uskoj pukotini dimenzija oko 200 x 15 cm i dubine do 20 cm (slika 19). Na dnu lijeve strane temeljne stope stupa pronađen je ostatak čelične oplate kesona.



Slika 19. a) Foto 8 - oštećenje B na lijevoj strani stupa; b) Foto 9 - maksimalna dubina oštećenja B je 20 cm

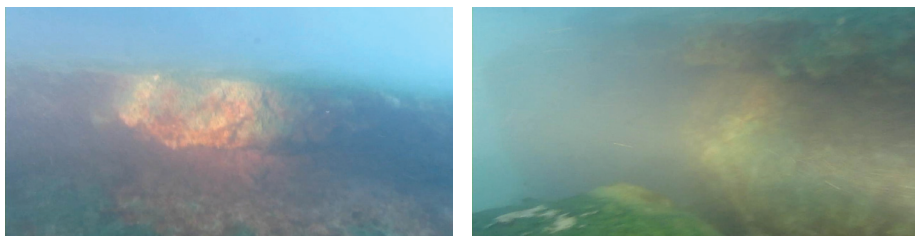
5.3.2. Stup S4

Stup S4 je izveden na temelju starog srušenog stupa. Dva značajnija i slična oštećenja A i B nalaze se na uzvodnoj i nizvodnoj strani gornje površine prvog proširenja temeljne stope, neposredno ispod površine (slika 20).



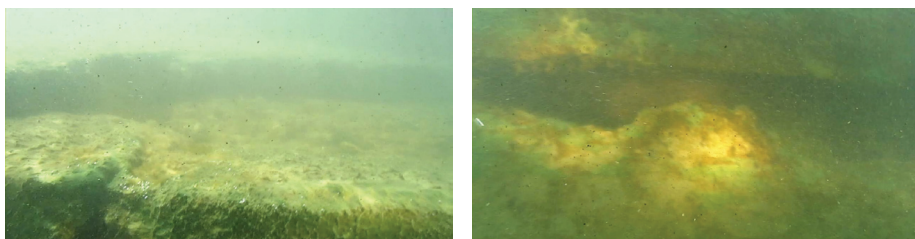
Slika 20. a) Uzvodna strana stupa i položaj fotografija 13, 14 i 18 (oštećenje A); b) Nizvodna strana stupa oštećenje B, položaj fotografija 15 i 16

Na oštećenju A nedostaje gornji sloj betona stoga su kameni blokovi izloženi vodenoj struji. Na lijevoj strani oštećenje je nešto dublje (30 cm) od prosjeka (20 cm). Površina oštećenja je oko 3 m², slika 21.



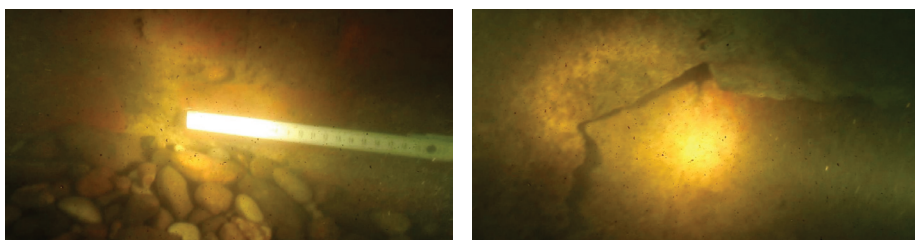
Slika 21. Oštećenje A: a) Foto 13 - na gornjoj površini drugog proširenja; b) Foto 14 - (lijeva strana)

Slično oštećenje nalazi se na nizvodnoj strani stupa - oštećenje B. Gornji sloj oštećenog betona nešto je tanji (cca 15 cm), ali se ispod njega se nalazi manja pukotina veličine oko 100 x 20 x 30 cm. Gornja površina oštećenja je oko 2 m², slika 22.



Slika 22. Oštećenje B: a) Foto 15 - gornja površina drugog proširenja; b) Foto 16 - nastavak oštećenja neposredno ispod gornje površine drugog proširenja

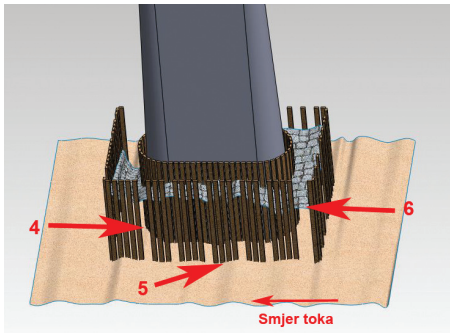
Na početku desne strane uz dno uočen je dio ispune građen od opeke koji se vidi kroz pukotinu u čeličnoj oplati kesona (slika 20a, slika 23).



Slika 23. a) Foto 18 - početak desne strane stupa uz dno dio zida građen je od opeke; b) Foto 19 - pukotina u oplati čeličnog kesona na lijevoj strani stupa

5.4. Primjer mosta sa zaštitom stupa od drvenih talpi

Most ima samo jedan stup u vodotoku. Stup mosta je betonski, a u svrhu zaštite od riječne struje okružen je s dva reda drvenih talpi. Prvi red drvenih talpi nalazi se od 30 do 50 cm uz betonski stup. Drugi red se nalazi dva metra od unutrašnjeg reda drvenih talpi. Dimenzije stupaca su oko 25 x 15 cm i visine do 5 m, slika 24.



Slika 24. Lijeva strana stupa i položaj fotografija 4, 5, 6

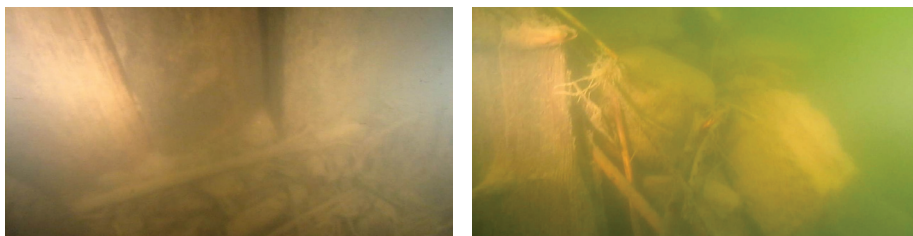
Prostor između dva reda drvenih talpi ispunjen je krupnim lomljenim kamenjem do dubine od približno jedan metar. Na površini lomljenog kamenja nalazi se sloj finog mulja, organskog materijala ili masne gline, ovisno o izloženosti riječnoj struji. Drvene talpe su se tijekom vremena uslijed riječne struje pomaknule i iskrivile tako da više ne čine pravilne redove. Raspadanje i pomicanje drvenih talpi u dogledno će se vrijeme ubrzavati, što pokazuju ukazuju fotografije. Očuvanost i pravilnost drvenih talpi znatno je bolja pri dnu stupova nego na vrhu. Veće i najnovije oštećenje A nalazi se na vanjskom prstenu talpi, na nizvodnom kraju desne strane stupa. Na tom mjestu nedostaju drvene talpe u duljini od 2 m, zbog čekaga je došlo do ispadanja krupnog lomljenog kamenja iz zapune između dva prstena drvenih talpi, slika 25.



Slika 25. a) Foto 3 - nizvodna strana drvenog prstena s nanosom granja i sedimenta; b) Foto 4 - lijeva strana stupa, na mjestima gdje nedostaju drvene talpe vidljiva je kamena ispuna

Uzvodna strana većim dijelom je jače oštećena posebno na uglovima - oštećenje B, slika 26. Unutrašnji prsten drvenih talpi nešto je bolje sačuvan jer je manje izložen riječnoj struji.

Najbolje je sačuvana nizvodna strana vanjskog prstena drvenih talpi zbog deponiranja nanosa iza njega. Tijekom pregleda mosta nije bila vidljiva betonska struktura stupa mosta koja se nalazi zaklonjena iza sloja drvenih talpi i ispune od krupno lomljenog kamena.



Slika 26. a) Foto 5 - spoj dna i bolje sačuvanih drvenih talpi na lijevoj strani stupa; b) Foto 6 - lijevi oštećeni ugao uzvodne strane, oštećenje B

Brzina propadanja drvene zaštitne konstrukcije i kamene ispune vidljiva je na dvije fotografije snimljene u razmaku od samo 10 mjeseci (slika 27).

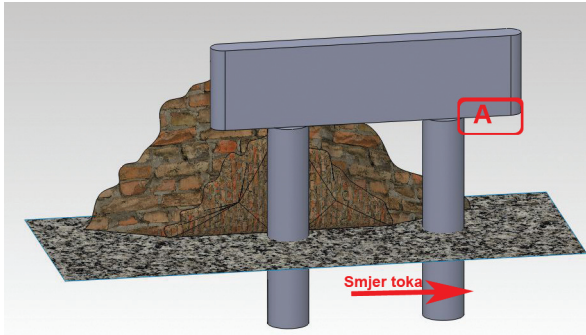


Slika 27. Drvene talpe snimljene na dan: a) 2. 9. 2010.; b) 2. 7. 2011.

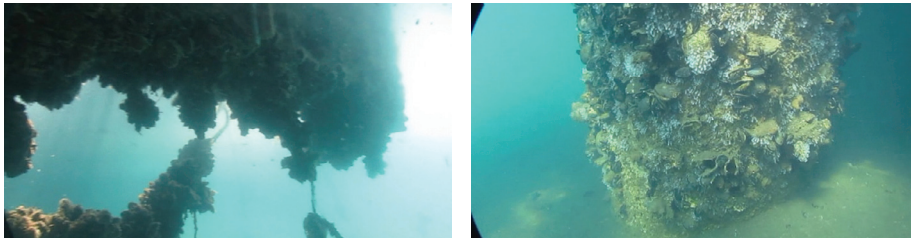
5.5. Most s betonskim stupovima i naglavnom gredom

Naglavna greda lijevog stupa mosta povezuje dva betonska stupa promjera oko 800 mm. Podvodni dio konstrukcije mosta prekriven je gustim obraštajem školjki i morskih algi. Uzvodni stup sa lijeve strane prema upornjaku u potpunosti je zatrpan krupno lomljenim kamenom.

Oštećenje A nalazi se na donjem dijelu grede (slika 28), gdje je vidljivo nekoliko savinutih armaturnih žica. Dubina oštećenja ne prelazi 5 do 10 cm. Detaljno snimanje oštećenja moguće je jedino nakon detaljnog odstranjivanja morskog obraštaja, slika 29.



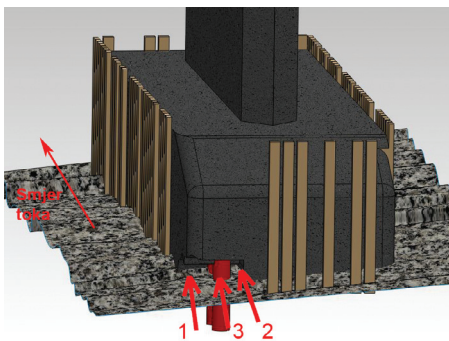
Slika 28. Pozicija oštećenja A



Slika 29. a) Foto 1 - oštećenje A pogled nizvodno; b) Foto 4 - dno nizvodnog stupa

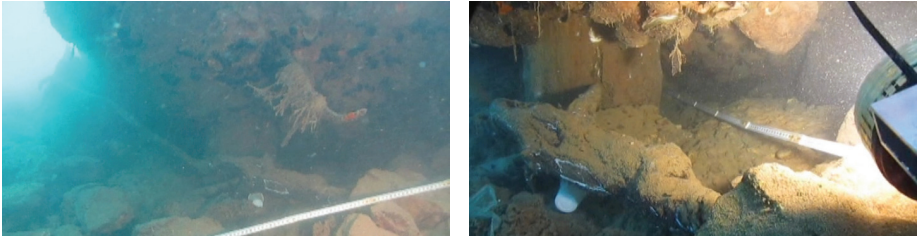
5.6. Most na pilotima s naglavnom gredom

Betonski stup sa zakošenom uzvodnom i nizvodnom stranom naglavne grede temeljen je na pilotima, slika 30.



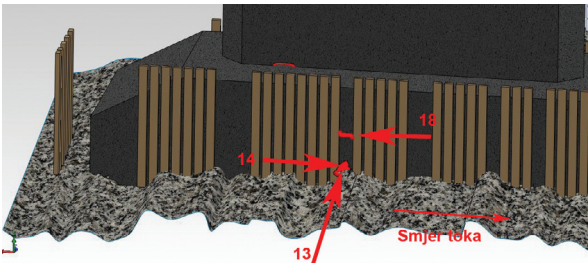
Slika 30. Položaj oštećenja A i fotografija 1, 2, 3 na uzvodnoj strani

Na stupu je uočeno jedno veće oštećenje i dva manja. Oštećenje A nalazi se na uzvodnoj strani ispod lijevog ugla temeljne stope, slika 31. Radi se o većem oštećenju dimenzija 140 cm na uzvodnoj strani i 120 cm na bočnoj strani i visine 70 cm. Izmjerena dubina oštećenja je 140 cm, a unutar oštećenja vidljiva su tri betonska pilota, ulazni dio prekriven je krupnim lomljenim kamenom. Strop oštećenja postupno pada prema sredini stupa i prelazi u usku pukotinu, stoga smatramo da je dubina potkopavanja i veća nego što je izmjerena. Zbog položaja i dimenzija oštećenja, proces potkopavanja će se tijekom vremena ubrzavati.

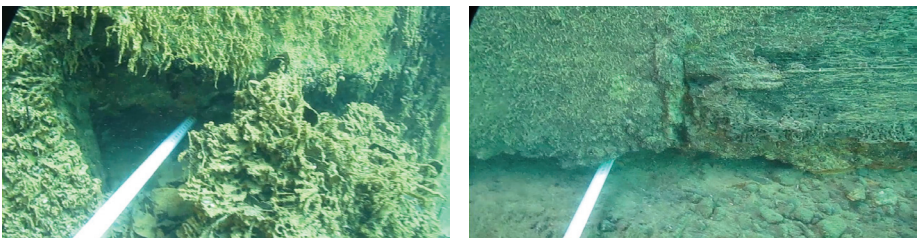


Slika 31. Oštećenje A: a) Foto 1 - pogled na oštećenje nizvodno; b) Foto 3 - mjerenje dubine oštećenja i drugi betonski pilot

Oštećenja E i F nalazi se u blizini desnog uzvodnog ugla temeljne stope, slika 32 i 33. Radi se o manjoj pukotini dimenzija 40 cm širine, 30 cm visine i 20 cm dubine, koja je nastala uslijed erodiranja betona. Vodni tok zasad još nije potkopao temeljnu stopu stupa, što je moguće u dogledno vrijeme.



Slika 32. Položaj oštećenja E i F te fotografija 13, 14, 18

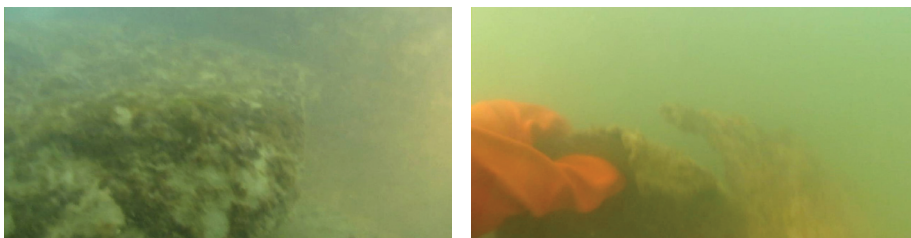


Slika 33. a) Foto 14 - oštećenje E nalazi uz dno temeljne stope, dubina kaverne 30 cm; b) Foto 18 - oštećenje F maksimalna izmjerena dubina kaverne je 20 cm

5.7. Primjer stupova mosta temeljenih na kesonima s čeličnom oplatom

5.7.1. Stup S2

Na uzvodnoj strani vidljivo je oštećenje pokrovnog sloja temeljne stope od tijela stupa do početka čelične oplata kesona, slika 34. Taj pokrovni sloj temeljne stope oštećen je na 80 posto površine oko stupa (kao i na drugim stupovima). Rub čelične oplata kesona koji se nalazio iznad temeljne stope deformiran je i uništen oko cijelog stupa u visini od 10 do 40 cm (kao i na drugim stupovima).



Slika 34. a) Uzvodna strana stupa iznad vode; b) Oštećen pokrovni sloj temeljne stope između stupa i čelične oplata kesona

Na početku lijeve strane stupa uočeno je veće oštećenje čelične oplata kesona (slika 35) od početka do dubine od 2 m - odvojena je od temeljne stope koja je građena od klesanih kamenih blokova. Vidljivo je da je došlo do pomicanja nekoliko kamenih blokova ispune prvog reda, a na nižim redovima do proširenja reški između blokova, slika 36. Na površini čelične oplata kesona vidljivi su znakovi dublje korozije. Prisutna su i manja oštećenja gornjeg ruba čelične oplata kesona i pokrovnog sloja temeljne stope.



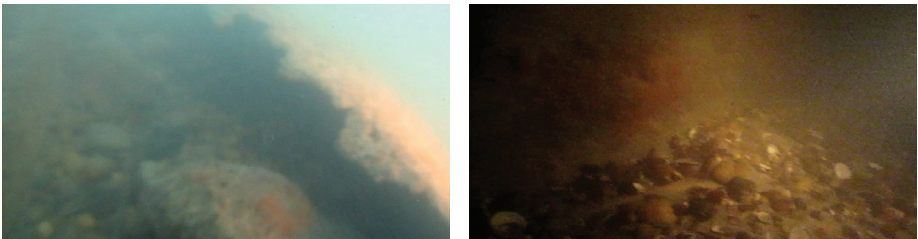
Slika 35. Čelična oplata kesona: a) Uz pješčano dno; b) Korodirana površina sa spojem od zakovica



Slika 36. a) Odvojena čelična oplata kesona od temeljne stope na početku lijeve strane; b) Proširene reške između kamenih blokova ispune temeljne stope nakon odvajanja čelične oplata kesona

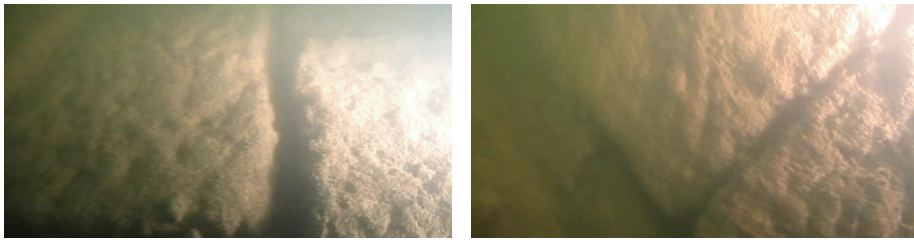
5.7.2. Stup S6

Dno uz lijevu stranu prekriveno je krupnim lomljenim kamenom i šljunkom. Manja oštećenja uočena su na pokrovnom sloju temeljne stope na nizvodnom kraju lijeve strane stupa, slika 37. Osim oštećene površine, rub je čelične oplata kesona deformiran i uništen. Uz desnu stranu stupa dubine su u prosjeku od 6.9 do 7.6 m. Dno je prekriveno krupnim kamenom i šljunkom. Nizvodna strana zasipana je pijeskom i sitnim granjem, a dubina je 4.3 m.



Slika 37. a) Savinuti rub završetka čelične oplata kesona na nizvodnoj strani stupa; b) Dno prekriveno šljunkom uz desnu stranu stupa

Osim oštećenog pokrovnog sloja temeljne stope i ruba čelične oplata kesona, na nizvodnom kraju desne strane stupa uočeno je i jedno veće oštećenje. Uslijed uništenja čelične oplata kesona, na dijelu na kojem je nema došlo je do proširenja reški između kamenih blokova ispune temeljne stope, slika 38. Na blokovima nije uočeno pomicanje nego samo proširenje reški koje su sada debljine 3 do 5 cm. Površina nezaštićenog dijela temeljne stope je oko 3 x 1.5 m na dubini od 1 m. Na blokovima stupa mosta iznad oštećenja nisu uočeni tragovi pomicanja ili pukotine. Na samom tijelu stupa vidljivo su isprane reške između kamenih blokova. Na uzvodnoj strani stupa došlo je do gomilanja plutajućeg nanosa - granja i debla.



Slika 38. a) Vidljivo proširenje reški između kamenih blokova ispunje temeljne stope uslijed nedostatka čelične oplata kesona; b) Osim proširenja reški između kamenih blokova, nije uočeno pomicanje blokova

6. Zaključak

Podvodni pregled stupova mostova i korita vodotoka u zoni utjecaja na dijelove konstrukcija mostova imaju dvojaku namjenu: kao prvo, otkrivaju se nepoželjne promjene koje mogu ili jesu opasnost za stabilnost i mehaničku otpornost mosta, a kao drugo, prikupljaju se relevantni podaci za ocjenu potencijalne opasnosti na konstrukciju mosta. Pri tome je potrebno utvrditi sve indikatore i parametre temeljem kojih se može donijeti relevantna ocjena. U grupu indikatora ubraja se na primjer sniženje prosječnih vodostaja u koritu vodotoka, pojava velikih lokalnih brzina tečenja, pojava virova s horizontalnom osi i slično. U grupu parametara ubrajaju se geodetske podloge, hidrološke podloge, hidrauličke podloge i podloge vizualnih opažanja. Današnje metode izrade tih podloga uporabom novih tehnologija omogućuju brzo prikupljanje pouzdanih podataka. Tako je, na primjer, uporabom višesopnog dubinomjera moguće dobiti detaljnu sliku oblika dna korita u široj zoni, a satelitskom vezom izravno dobiti snimljene geodetske podatke transformirane u zajednički koordinatni sustav. Nadalje, akustičnim strujomjerima dobiva se trenutna slika brzine vode u cijelom protočnom profilu vodotoka, koja se opet jednostavno transformira u spomenuti zajednički koordinatni sustav. Kako su vizualni podvodni pregledi otežani zbog velike mutnoće vode, kao pomoć nam služe specijalni uređaji takozvani sidescaneri koji daju oštre obrise podvodnih dijelova. Kompjutorska softverska podrška je pri tome od ključne važnosti. Međutim, pri izradi podloga temeljem kojih se ocjenjuje opasnost od oštećenja, pogotovo ako se koriste navedeni uređaji, treba biti vrlo oprezan, odnosno potrebno je veliko znanje i iskustvo kako bi se izolirali upravo relevantni parametri. Sofisticirana oprema zahtijeva specijalistička znanja, odnosno ono što su nekada mogli raditi tehničari danas su inženjerski poslovi. Prikazani primjeri nepoželjnih promjena na stupovima mostova i korita vodotoka evidentiranih na našim mostovima upozoravaju na nedovoljnu brigu koja se posvećuje tome problemu. Nedopustivo je da nas teška oštećenja mostova uslijed djelovanja voda, kao što se to dogodilo sa željezničkim mostom Jakuševac u Zagrebu, podsjećaju na potrebu stalnog praćenja promjena. To se posebno odnosi na starije mostove, odnosno mostove čije su rekonstrukcije bile takve da su se oslanjale na stare nesansirane temelje.

Literatura

- [1] Wardhana, K., Hadipriono, F., Analysis of Recent Bridge Failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2003, 17, 144-150.
- [2] Smith, D.W., *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 1976, pp. 367-382.
- [3] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D., Impact of morphodynamical changes on the bridge stability: Case study of Jakuševac bridge in Zagreb, in: Sawicki, J. M., Zima, P. (Eds.), *Current events in hydraulic engineering*, Gdansk University of Technology, Gdansk 2011, pp. 112-122.
- [4] Gordon, R. L., RD Instruments, San Diego, California 1996.
- [5] Simpson, M. R., U.S. Geological Survey, Sacramento, California 2001, p. 123.
- [6] Hamill, L., *Bridge Hydraulics*, E & FN Spon, an imprint of Routledge, London and New York 1999.
- [7] Gilja, G., Oskoruš, D., Kuspilić, N., *BALWOIS Conference on Water Observation and Information System for Decision Support*, Ohrid, Republic of Macedonia 2010, pp. 123-124.
- [8] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G., Praćenje morfodinamičkih promjena korita vodotoka u zoni stupova mostova, in: Lakušić, S. (Ed.), *Prometnice - nove tehnologije i materijali*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, Zagreb 2010, pp. 69-112.
- [9] Kuspilić, N., Bekić, D., McKeogh, E., Gilja, G., *Proceedings of the First International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2010)*, Opatija, Croatia 2010.
- [10] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D., in: Lakušić, S. (Ed.), *SABOR HRVATSKIH GRADITELJA 2012 Graditeljstvo - poluga razvoja*, Hrvatski savez građevinskih inženjera Zagreb, Cavtat, Croatia 2012, pp. 795-806
- [11] Bekić, D., Carević, D., Gilja, G., Kuspilić, N., in: Biondić, D. (Ed.), *Peta hrvatska konferencija o vodama - Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena*, Opatija, Hrvatska, 2011.

