

UPRAVLJANJE I ODRŽAVANJE SISTEMA ZA ODVODNJAVANJE POSLE REKONSTRUKCIJE MOSTA GAZELA PREKO REKE SAVE U BEOGRADU

Jovan Despotović^{1,2}, Aleksandar Đukić^{1,2}, Jasna Plavšić¹, Zoran Mišković¹, Branislav Babić¹, Ognjen Govedarica¹, Dragutin Pavlović¹

¹ Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet; ² UNESCO Međunarodni istraživačko-obrazovni centar za urbanu hidrologiju (IRTCUD)

Rezime: Rad prikazuje projekat sistema za odvodnjavanje mosta Gazela preko reke Save u Beogradu prilikom njegove rekonstrukcije i naknadna iskustva vezana za ocenu efikasnosti ovog sistema. Most je prvobitno bio izgrađen bez sistema za odvodnjavanje sa direktnim ispuštanjem zagađenog oticaja u reku i na okolni teren, što je predstavljalo rizik po konstrukciju i kvalitet površinskih i podzemnih voda u zaštićenoj zoni vodosnabdevanja. Rekonstrukcija mosta je obuhvatila i izgradnju sistema za efikasno zahvatanje, kanalisanje i odvođenje voda, uz prečišćavanje, zadržavanje i kontrolisanu infiltraciju prečišćenih voda. Retenziono-infiltracioni objekat sa prečišćavanjem prvog talasa zagađenog oticaja omogućava delimično ponovno korišćenje atmosferskih voda za navodnjavanje i zalivanje, uz posredno prihranjivanje podzemnih voda. Sa druge strane, dinamičko ispitivanje konstrukcije mosta pod opterećenjem i potom modeliranje deformacija pokazalo je da ugibi mosta mogu značajno da utiču na efikasnost odvodnjavanja promenom nagiba cevi a time i uslova tečenja uz povećani rizik od taloženja nanosa u cevima. Obilazak mosta pokazao je degradaciju sistema za odvodnjavanje, što naglašava važnost održavanja za obezbeđenje funkcionalnosti sistema, posebno u cilju sprečavanja zapušavanja slivnika i cevi. U radu se ističe potreba za integrisanim pristupom u projektovanju kojim se uzimaju u obzir saobraćajni, hidraulički, konstruktivni i ekološki aspekti, dok prikazani rezultati ukazuju na praktičan put za održivo upravljanje atmosferskim vodama na mostovima, posebno u osetljivim gradskim i hidrogeološkim sredinama.

Ključne reči: odvodnjavanje; atmosferske vode; kanalisanje; ugibi; korišćenje vode.

MANAGING AND MAINTAINING STORMWATER DRAINAGE SYSTEM OF THE REVITALISED GAZELA BRIDGE OVER THE SAVA RIVER IN BELGRADE

Jovan Despotović^{1,2}, Aleksandar Đukić^{1,2}, Jasna Plavšić¹, Zoran Mišković¹, Branislav Babić¹, Ognjen Govedarica¹, Dragutin Pavlović¹

¹ University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering; ² UNESCO International Research and Training Center on Urban Drainage (IRTCUD)

Abstract: The paper presents the design of the drainage system of the Gazela Bridge over the Sava River in Belgrade during its reconstruction and subsequent experiences related to the assessment of the system's efficiency. The bridge was originally built without a drainage system with direct discharge of polluted runoff into the river and the surrounding terrain, which posed a risk to the structure and the quality of surface and groundwater in the protected water supply zone. The reconstruction of the bridge also included the construction of a system for efficient water collection and conveyance, combined with treatment, retention and controlled infiltration. The retention-infiltration facility including the first flush treatment enables partial reuse of stormwater for irrigation and watering, indirectly recharging groundwater. On the other hand, dynamic testing of the bridge structure under load and subsequent deformation modelling showed that bridge deflections can significantly affect the efficiency of drainage by changing the pipeline slope and thus the flow conditions, with an increased risk of sediment deposition in the pipes. A bridge inspection revealed degradation of the drainage system, highlighting the importance of maintenance to ensure the functionality of the system, especially to prevent clogging of culverts and pipes. The paper highlights the need for an integrated design approach that considers traffic, hydraulic, structural and environmental aspects, while the presented results indicate a practical path for sustainable stormwater management on bridges, especially in sensitive urban and hydrogeological environments.

Keywords: drainage, stormwater, bridge deflection, water reuse.

1. UVOD

Sistemi za odvodnjavanje kolovoza mosta primarno su projektovani da osiguraju brzo sakupljanje i kanalisanje atmosferskog oticaja, čime se održava bezbednost saobraćaja. Svako sakupljanje ili zadržavanje vode na

¹ Autor zadužen za korespondenciju: jdespotovic@grf.bg.ac.rs

kolovozu je neprihvatljivo, posebno u nepovoljnim uslovima kao što su niske temperature, sneg i vetar, kada se može značajno povećati rizik od nezgoda.

Sistemi za odvodnjavanje mosta predstavljaju mogućnost za kontrolisano prikupljanje i ispuštanje atmosferskih voda. Međutim, njihovo projektovanje zahteva usklađivanje mnogobrojnih, često suprotstavljenih kriterijuma koji se odnose na konstruktivni sistem, hidrauličke performanse, bezbednost saobraćaja, estetske zahteve i zaštitu životne sredine. Tipičan sistem za odvodnjavanje mosta sastoji se od slivnika, spojnih cevi, kolektora, okana za reviziju i ispusnih objekata, koji su često dopunjeni retenzionim, infiltracionim i uređajima za prečišćavanje. Iz estetskih razloga, kanalizacioni cevovodi se obično postavljaju paralelno sa ivicama mostovske konstrukcije i čvrsto se sidre korišćenjem čeličnih ili betonskih elemenata raspoređenih u vertikalnoj, horizontalnoj ili kosoj konfiguraciji. S druge strane, njihovo projektovanje mora uzeti u obzir ne samo hidraulički kapacitet već i konstruktivna pomeranja. Konstruktivne deformacije usled saobraćajnog opterećenja i temperaturnih promena mogu s vremenom menjati nagibe cevi, smanjujući hidrauličku efikasnost i podsticati taloženje nanosa. Hidrološko projektovanje sistema za odvodnjavanje mosta počiva na kratkotrajnim kišama velikih intenziteta sa obližnjih kišomernih stanica, zadate verovatnoće pojave ili povratnih perioda. Pravilna analiza kiša mora da uključi trajanja od 5 minuta do kritičnog trajanja merodavnog za ceo sistem odvodnjavanja i prečišćavanja. Nepravilan izbor merodavnih padavina može dovesti do značajnog potcenjivanja maksimalnih protoka i nefunkcionalnog kanalizacionog sistema. Za ovaj most i pripadajuću saobraćajnicu merodavni povratni period kiše za kanalisanje kišnog oticaja iznosi 10 godina (više reči o tome kasnije).

Mostovi koji se nalaze u urbanim ili prigradskim sredinama često se nalaze unutar zona zaštite izvorišta sistema za vodosnabdevanje ili u blizini osetljivih vodnih tela. To nameće stroge regulatorne zahteve u pogledu kvaliteta oticaja, posebno uzimajući u obzir zagađujuće materije koje potiču od saobraćaja i sredstava za odmrzavanje. Savremeni sistemi odvodnjavanja stoga obično sadrže elemente za prečišćavanje oticaja i sisteme za praćenje radi kontrole opterećenja zagađujućim materijama.

Zbog svega navedenog, pri projektovanju mostovi moraju biti tretirani kao visoko integrisani sistemi. Ovaj rad opisuje rekonstrukciju sistema za odvodnjavanje mosta Gazela preko reke Save u Beogradu, uključujući i sistem prikupljanja, prečišćavanja i ponovnog korišćenja atmosferskih voda za različite potencijalne namene (čišćenje ulica, navodnjavanje zelenih površina...). U radu se takođe analizira uticaj deformacija konstrukcije mosta na funkcionisanje sistema za odvodnjavanje, čime se opisuju saznanja relevantna za buduće projektovanje, izgradnju i upravljanje mostovima.

2. PROJEKAT KANALISANJA NA MOSTU GAZELA

Most Gazela preko reke Save u Beogradu (slika 1) jedan je od najopterećenijih saobraćajnih objekata u regionu, sa dnevnim saobraćajnim obimom od skoro 200.000 vozila, uključujući teška višeosovinska vozila i autobuse. Ovakav intenzitet korišćenja mosta nameće značajne zahteve kako za konstruktivni sistem, tako i za prateću infrastrukturu, posebno za sistem odvodnjavanja mosta. Kada je izgrađen 1970-ih godina, most prvobitno nije imao nikakav sistem odvođenja atmosferskih voda. Oticaj je ispuštan direktno kroz otvore na kolovozu u reku Savu ili na okolno tlo i obale reke, uključujući i površine unutar zaštićene zone vodosnabdevanja. To je rezultovalo nekontrolisanom infiltracijom oticaja koji sadrži zagađenje od saobraćaja i hemikalije za odmrzavanje u podzemlje i u konstruktivne elemente, što je dovelo do ubrzane korozije i degradacije materijala.

Kompleks mosta se sastoji od pristupnih objekata na levoj (692 m) i desnoj (1.584 m) obali i centralnog čeličnog raspona (469 m), sa ukupnom dužinom od 2.745 m. Ukupna nepropusna površina kolovoza mosta iznosi oko 65.000 m², što ga čini zatvorenim slivom bez mogućnosti prirodne infiltracije ili površinskog zadržavanja oticaja.

Tokom decenija eksploatacije, povećano saobraćajno opterećenje (posebno pre završetka obilaznice E-70/E-75 oko Beograda) dovelo je do ubranog propadanja konstrukcije. Korozija uzrokovana vodom, sredstvima za odmrzavanje i zagađenjem, degradirala je i čelične i armirano-betonske elemente (slika 2). Stoga je između 2013. i 2014. godine sprovedena sveobuhvatna rekonstrukcija mosta u kojoj su, po prvi put, postavljeni jasni projektni kriterijumi zasnovani na kišama povratnog perioda 10 godina i primeni potpuno integrisanog sistema za sakupljanje, odvođenje, prečišćavanje i ispuštanje oticaja [1], [2], [3].

Zbog lokacije mosta u osetljivoj hidrogeološkoj sredini, odnosno u aluvijalnoj izdani reke Save koja služi kao izvoriste beogradskog sistema snabdevanja vodom, ispuštanje kišnog oticaja podleže strogim ekološkim ograničenjima. Rekonstrukcija sistema odvodnjavanja stoga nije bila samo tehnička neophodnost za konstruktivnu i saobraćajnu bezbednost, već i važna intervencija za zaštitu kvaliteta podzemnih voda i omogućavanje kontrolisanog upravljanja atmosferskim vodama.



Slika 1. Most Gazela preko reke Save u Beogradu: pogled na centralni čelični deo mosta iz vazduha (gore) i pogled sa reke sa usidrenim cevovodom sa donje strane čelične konstrukcije (dole).

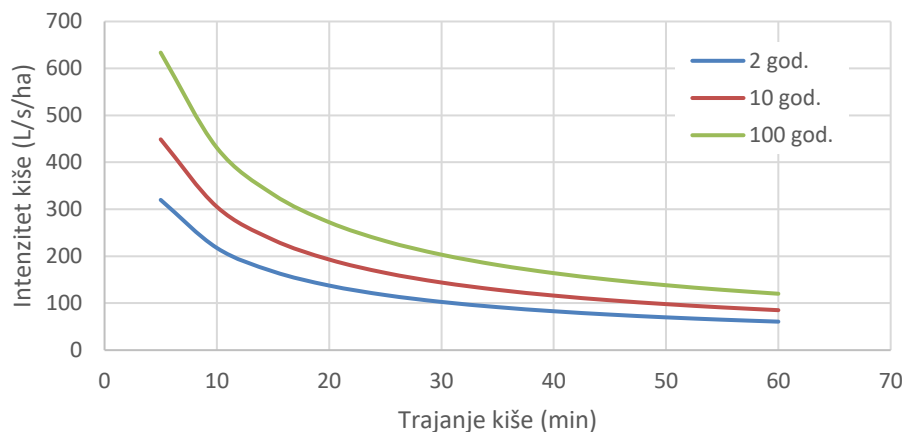


Slika 2. Pre rekonstrukcije: ispuštanje vode sa kolovoza kroz otvore kratkim cevima (levo) i korozija na čeličnoj konstrukciji centralnog raspona (desno) posle gotovo 6 decenija korišćenja mosta Gazela.

2.1. Projektovanje i izgradnja savremenog sistema za odvodnjavanje

Sistem za odvodnjavanje projektovan je na osnovu kiše povratnog perioda 10 godina, za koju kompletan oticaj mora biti zahvaćen sistemom odvodnjavanja. Korišćeni su intenziteti kratkotrajnih kiša od 5 do 60 minuta sa meteorološke stanice Beograd-Opervatorija (slika 3). Napominje se da neki projektanti pogrešno biraju kiše dužeg trajanja sa nižim intenzitetima, što dovodi do potcenjivanja maksimalnih oticaja i posledično nekontrolisanog zadržavanja površinskog oticaja na kolovozu [4], [5]. Oticaj je analiziran korišćenjem racionalne metode [6] i modela EPA SWMM [7] sa koeficijentom oticaja 1.0, što odgovara potpuno nepropusnim uslovima na mostu.

Posebna pažnja posvećena je slivnicima za zahvatanje površinskog oticaja. Efikasno sakupljanje oticaja slivnicima na mostovima je od suštinskog značaja, jer zadržavanje i širenje oticaja na kolovozu nije dozvoljeno ni na kraće vreme ni na manjim površinama [8], [9]. Radi maksimalne efikasnosti zahvatanja površinskog oticaja odabrane su kombinovane slivničke rešetke, jednim delom na kolovozu, a drugim u ivičnjaku ([2], [10]) dok je kapacitet slivnika testiran u laboratoriji ([8], [11], [12]). Širenje toka po kolovozu ograničeno je na najviše 4 m (oko 1/3 širine saobraćajne trake), što dovodi do prosečnog razmaka između slivnika od oko 11 m [3]. Slika 4a prikazuje ugradnju dvostrukih slivnika neposredno uzvodno od dilatacionih spojeva, dok slika 4b prikazuje isto mesto u proleće 2025. godine sa oštećenim slivnicima i dilatacionim spojnica.



Slika 3. Zavisnost intenziteta kiše od povratnog perioda i trajanja kiše na kišomernoj stanici Beograd-Opervatorija.



(a)



(b)

Slika 4. a) Dvostruki slivnici postavljeni neposredno uzvodno od dilatacione spojnice u okviru rekonstrukcije mosta 2012. godine. (b) Oštećeni i deformisani slivnici i deformisana dilatacija na kolovozu i na trotoaru mosta.

Niz slivnika je povezan kratkim cevima (videti kasnije sliku 10) na kanalizacione kolektore prečnika 300 mm, koji su postavljeni paralelno sa ivicom mostovske konstrukcije i sidreni za nju vertikalno i horizontalno (slika 5). Ovakvo postavljanje služi estetskim zahtevima, jer vidljive kanalizacione cevi moraju biti paralelne ivicama i biti ujednačene veličine tj. prečnika duž pojedinih deonica. Za razliku od konvencionalnih gradskih sistema odvodnjavanja, mostovski sistemi su podložni vertikalnim i, u manjoj meri, horizontalnim pomeranjima zbog torzije i ugiba. Da bi se to uzelo u obzir, cevi moraju biti obešene ili čvrsto montirane korišćenjem fleksibilnih nosača, sidara i dilatacionih spojeva (videti sliku 5).



Slika 5. Kanalizacione cevi Ø300 su postavljene paralelno sa ivicama konstrukcije, definišući podužne nagibe cevi, kao i položaj cevi u poprečnom preseku konstrukcije mosta.

Deformacije konstrukcije uzrokovane saobraćajnim opterećenjem i temperaturnim promenama mogu uticati na gotovo sve komponente sistema odvodnjavanja. Kanalizacione cevi su podložne uzdužnim promenama, tj. skraćivanju i produžavanju na spojevima, koje se moraju kompenzovati dilatacionim spojnica, dok veze cevi treba da dozvoljavaju manja ugaona prilagođavanja na pomeranja konstrukcije. Vertikalne deformacije menjaju „poravnanje” cevovoda i nagibe, čime se smanjuje brzina tečenja vode i povećava rizik od taloženja

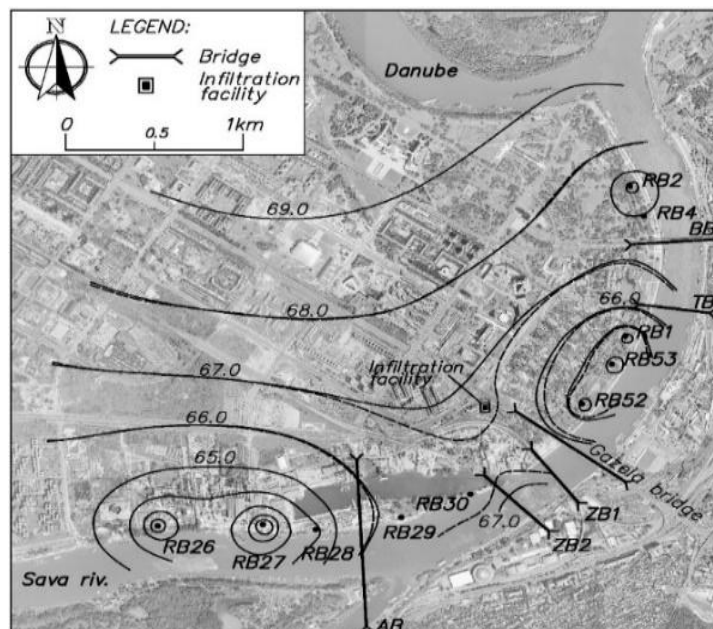
suspendovanog i vučenog sadržaja u cevima. Ako vremenom dođe do trajne deformacije konstrukcije, to može drastično da poremeti konfiguraciju cevovoda, smanji efikasnost odvodnjavanja i ugrozi sposobnost sistema da ispuni projektne kriterijume [2].

2.2. Retenziranje i prikupljanje atmosferskih voda

Zbog ograničenog kapaciteta postojećeg kanalizacionog sistema, koji treba da primi vodu iz mostovskog sistema, u rekonstrukciju mosta Gazela uključen je koncept prikupljanja atmosferskih voda (*rainfall harvesting*) koji obuhvata njihovo retenziranje, infiltraciju i ponovno korišćenje. Za korišćenje atmosferskog oticaja neophodno je njegovo prethodno prečišćavanje, kako bi se kvalitet vode uskladio sa nacionalnim propisima koji regulišu zone zaštite vode za piće, kupanje i ekološki zaštićena područja, kao i sa zahtevima Okvirne direktive o vodama EU [13].

Oticaj sa mosta ispušta se u kanalizacioni sistem na 9 mesta. Veći deo oticaja (oko 1.400 L/s) usmerava se u beogradski kanalizacioni sistem, dok se manji deo prečišćava i infiltrira u tlo odakle prihranjuje podzemne vode. Na levoj obali Save ispuštanje u kanalizaciju je ograničeno na 180 L/s, dok se višak vode usmerava u objekat za retenziranje i infiltraciju. Objekat prima vodu sa nepropusnih površina od oko 30.000 m² i ima zapreminu za akumulisanje vode od oko 200 m³, sa maksimalnim dotokom od 630 L/s. Prvi talas oticaja (*first flush*) koji sadrži najviše zagađenja prečišćava se korišćenjem 30 Stormfilter® jedinica ukupnog kapaciteta 60 L/s. Pored toga, predviđena je SWERM® jedinica za preusmeravanje visoko zagađenog oticaja (npr. u slučaju havarija ili saobraćajnih nezgoda) u nepropusni betonski rezervoar. Procenjeno je da se godišnje može prosečno prikupiti oko 15.000 do 20.000 m³ prečišćenog kišnog oticaja koji se može koristiti za razne namene, kao što je pranje u gradu – ulica, trgova, fasada, ili navodnjavanje zelenih površina.

Objekat za infiltraciju kišnog oticaja nalazi se na levoj obali reke Save, u okviru novobeogradske aluvijalne ravni. Sadašnji nivo terena, koji se kreće između 75,5 i 77,0 m.n.m., rezultat je nasipanja peskom (u sloju debljine oko 6 m) izvršenog tokom 1960-ih godina na prvobitno močvarnom terenu na ušću Save i Dunava. Hidrogeološka analiza je pokazala da se na ovom lokalitetu nalaze aluvijalne naslage debljine do 30 m, koje se primarno sastoje od veoma finih do srednje crnastih peskova, prašinih peskova i peskovitih glina, ispod kojih leže tercijarni glineni sedimenti niske propusnosti. Iz tog razloga, tlo na ovom mestu ima visok infiltracioni kapacitet i hidraulički je povezano sa Savom i Dunavom.

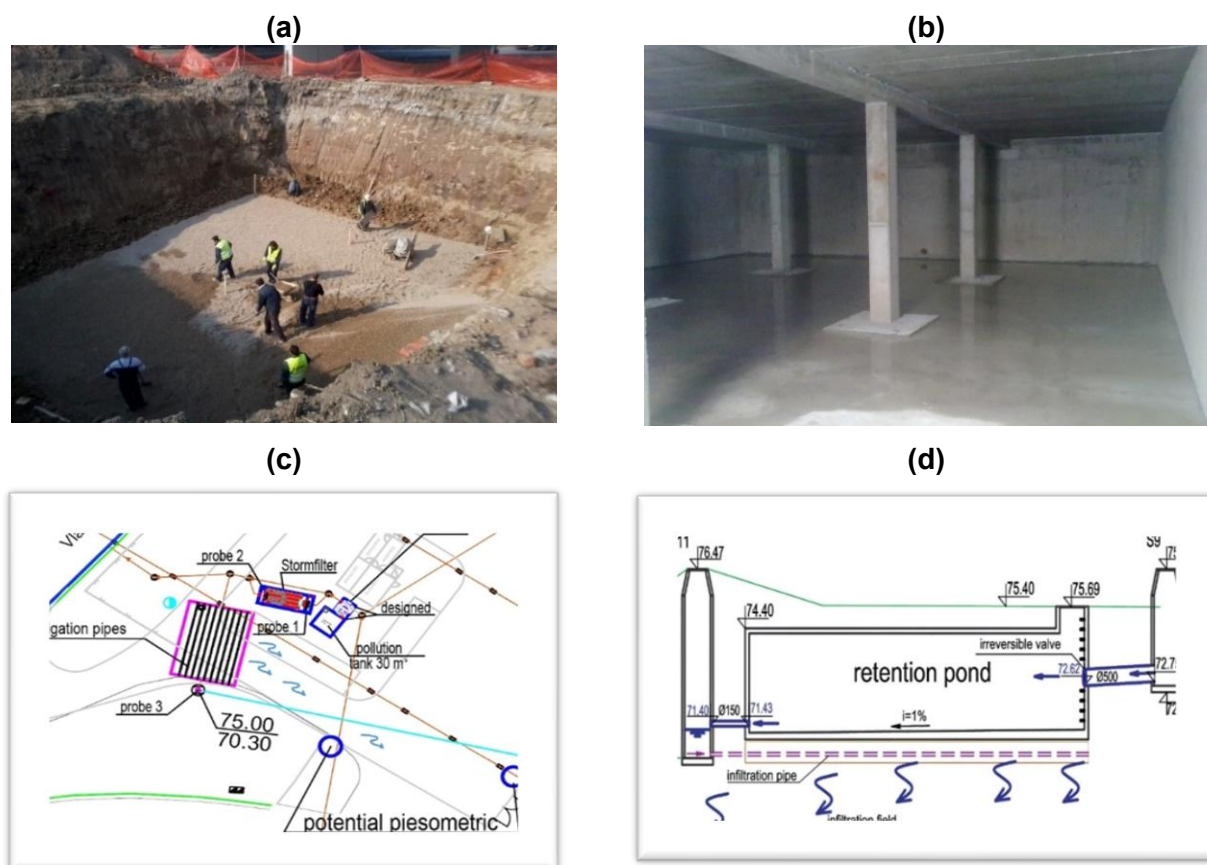


Slika 6. Režim podzemnih voda u području mosta i sistema za prečišćavanje i infiltraciju kanalisanih voda; isprekidana linija označava modeliran nivo podzemnih voda pri prosečnom upuštanju od 10 L/s.

Objekat za infiltraciju je projektovan za nominalni kapacitet od 10 L/s, ali se pod povoljnim uslovima ovaj kapacitet može povećati do 20 L/s. Retenziona zapremina projektovana je da se isprazni za oko 10 sati pod standardnim radnim i hidrogeološkim uslovima. Za procenu uticaja infiltracije na bunare beogradskog vodovodnog sistema koji se nalaze duž reke Save (slika 6) sprovedeno je modeliranje podzemnih voda, za koje su korišćeni i rezultati testova crpljenja i traserskih merenja [2], [14]. Rezultati su pokazali da je uticaj na širu zonu vodosnabdevanja veoma mali i da je samo jedan bunar pod tim uticajem, pri čemu je vreme

putovanja trasera bilo duže od 12 meseci. Na osnovu svega je zaključeno da je sistem hidraulički izvodljiv, uz neophodan monitoring za praćenje efekata.

Na slici 7a prikazana je fotografija nastala tokom zemljanih radova na izgradnji podzemnog retenzionog objekta, a na slici 7b prikazan je završeni betonski retenzioni bazen nakon zadržavanja jednog talasa kišnog oticaja. Na slikama 7c i 7d date su situacija i podužni presek objekta prema projektnoj dokumentaciji. Na slici 7b ne vide se naslage nanosa iz kanalizacionog sistema, potvrđujući efikasnost Stormfilter® sistema koji integriše taloženje i filtraciju vode [14], [15]. Sistem uključuje i SWERM® jedinicu koja služi kao alarmna instalacija za preusmeravanje toka u slučaju ekstremnog zagađenja, što je tehnologija već primenjivana na autoputu *Pademontana* u Italiji i na dva mosta u Srbiji. Pored toga, sistem ima i pijeziometarske bušotine za kontinuirano praćenje kvaliteta podzemnih voda.



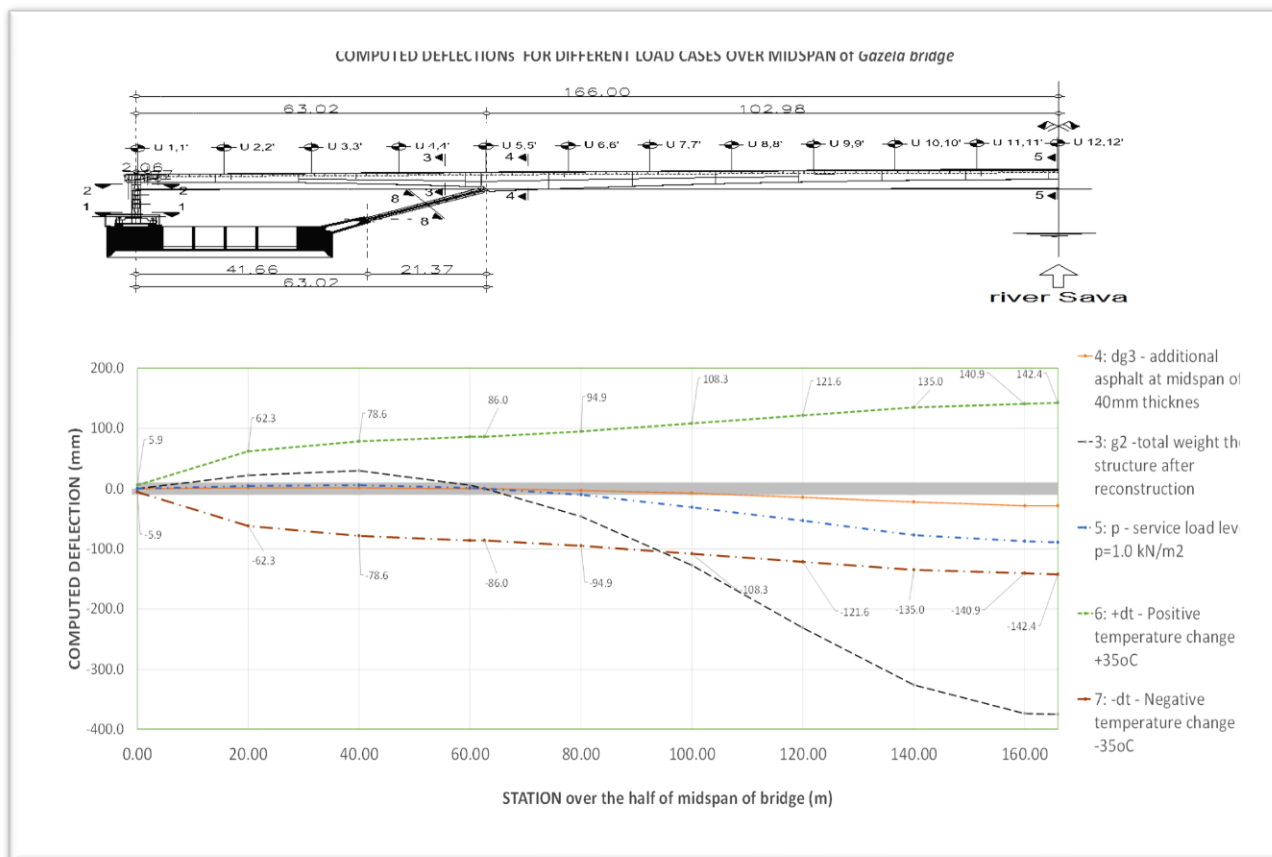
Slika 7. *Objekat za retenziranje i infiltraciju prečišćenog oticaja kanalisnog sa mosta: (a) za vreme zemljanih radova, (b) izgled betonske podzemne retenzije, (c) situacija sistema za prečišćavanje sa pijeziometrima za monitoring, (d) podužni presek retenzije.*

S obzirom da se na ovoj lokaciji nalaze velike asfaltirane površine za skladištenje građevinske opreme i materijala za odmrzavanje kolovoza (so, hemikalije, rizla), zbog rizika od zagađenja oticaja neophodan je neprekidan monitoring kvaliteta vode. Stormfilter® sistem sa SWERM® jedinicom opremljen je sondama za praćenje kvaliteta oticaja, što omogućava brz odgovor na eventualna incidentna zagađenja preusmeravanjem tokova u okno za zagađenje pored Stormfilter® komore. Kvalitet vode se prati i u dva bunara sa odgovarajućim sondama.

Primarna funkcija kontrolisane infiltracije atmosferskih voda je da služi kao dodatni izvor vode za navodnjavanje gradskih površina. S druge strane, budući da kapacitet beogradskog izvorišta postepeno opada usled zastarevanja infrastrukture i kolmiranja korita reke, kontrolisana infiltracija predstavlja potencijalni dopunski mehanizam punjenja izdani podzemnih voda, pod uslovom da kvalitet vode nije ugrožen. Zbog osetljivosti podzemnih voda, svi predviđeni uticaji moraju biti verifikovani kroz dugoročni monitoring. Buduće analize bi zato trebalo da uzmu u obzir i kombinovane efekte urbanizacije i klimatskih promena na režim podzemnih voda i pouzdanost vodosnabdevanja.

3. UGIB MOSTA I FUNKCIONISANJE ODVODNJAVANJA KOLOVOZA MOSTA

Ispitivanje konstrukcije mosta sprovedeno je pre, tokom i posle rekonstrukcije, korišćenjem višestrukih kombinacija opterećenja za procenu ključnih uticaja. Ova ispitivanja poslužila su kao osnova za razvoj modela ugiba mosta pod različitim uslovima opterećenja i temperature. Slika 8 ilustruje modelovane oblike ugiba pri reprezentativnim scenarijima opterećenja i temperature. Rezultati pokazuju da je amplituda vertikalnog kretanja u temenu centralnog čeličnog raspona nakon rekonstrukcije značajno smanjena sa više od 50 cm na oko ± 14 cm.



Slika 8. Rezultati modeliranja pojave ugiba mosta Gazela na bazi terenskih merenja odgovarajućim teretom i pod datim uslovima na levoj polovini mosta gledajući niz reku Savu.

Ovi rezultati primenjeni su za ponovnu procenu hidrauličkih performansi sistema odvodnjavanja, sa naglaskom na kapacitet tečenja i uslove transporta nanosa unutar cevi. Ugib mosta utiče na odvodnjavanje na dva načina: (1) lokalnim smanjenjem nagiba kolovoza na mostu, čime se smanjuje brzina površinskog tečenja i povećava dubina sloja oticaja tokom kiše, i (2) smanjenjem nagiba drenažnih cevi, a time i smanjenjem brzina tečenja u cevima, što doprinosi taloženju nanosa unutar cevi.

Analizom su identifikovane kritične deonice sistema odvodnjavanja gde sistem za odvodnjavanje ima smanjene performanse, ili prestaje da funkcioniše u određenim uslovima. Ostvarivanje adekvatnih brzina tečenja u sistemu za odvodnjavanje je od suštinskog značaja za pouzdano odvođenje atmosferskih voda pri različitim opterećenjima i temperaturnim uslovima zbog sprečavanja taloženja nanosa i potencijalnog začepljenja. Međutim, stalnim pomeranjima konstrukcije, koja se prenose na cevovod zakačen za konstrukciju mosta, menjaju se podužni nagibi i stvaraju nepovoljni hidraulički uslovi.

Uprkos smanjenim ugibima mosta nakon rekonstrukcije, i dalje postoje problemi sa neefikasnim odvođenjem atmosferskih voda na nekim deonicama cevovoda. Značajne promene podužnog nagiba od najviše tačke na sredini raspona mosta prema krajevima centralne čelične konstrukcije utiču na hidrauličke uslove duž sistema. Pri većim ugibima, nagibi cevi od sredine ka krajevima se mogu smanjiti ispod projektovanih granica, zbog čega i brzina tečenja može postati nedovoljna za efikasan transport nanosa, povećavajući time rizik od taloženja nanosa u cevima.

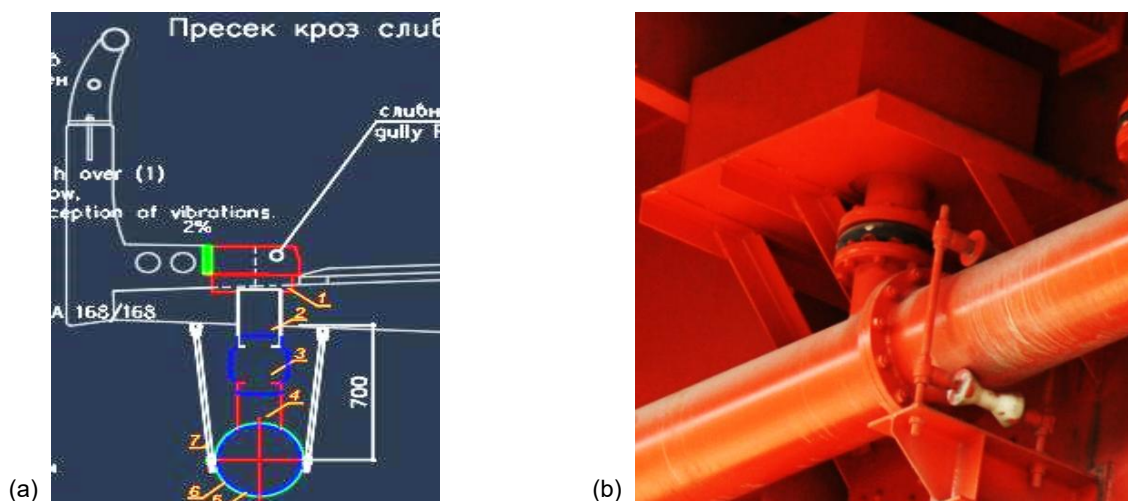
Pored veličine ugiba, utvrđeno je da trajanje nepovoljnih položaja konstrukcije (tj. smanjenih nagiba cevovoda) značajno utiče na efikasnost odvodnjavanja. S obzirom na periodičnu prirodu opterećenja mosta i temperaturnih varijacija, za potpunu procenu uticaja na efikasnost sistema odvodnjavanja potrebni su dodatni monitoring i sveobuhvatna analiza ponašanja konstrukcije mosta pri različitim kišnim epizodama.

Skoriji obilazak mosta potvrdio je da sistem odvodnjavanja nije u potpunosti efikasan usled pogoršanih operativnih uslova. Veliki broj slivnika na najvišoj tački mosta bio je začepljen ili mehanički oštećen (slika 9), što drastično smanjuje efikasnost sakupljanja kišnog oticaja. Posledica toga je da nizvodni delovi cevovoda ne primaju protok vode dovoljan za efikasan transport nanosa, što dovodi do taloženja nanosa i delimičnih začepljenja.

Za poboljšanje funkcionisanja sistema za odvodnjavanje mosta preporučuju se bar dve osnovne mere: znatno češća inspekcija i praćenje stanja, čišćenje slivnika i ostalih komponenata sistema pod visokim pritiskom, kao i revizija konfiguracije slivnik – cev u kritičnim (spojnim) elementima (slika 10).



Slika 9. Zapušeni i deformisani slivnici i dilatacija na najvišem centralnom delu mosta Gazela koji se najviše ugiba i gde su uslovi za slivanje vode promenljivi i praktično „neregularni”.



Slika 10. (a) Presek instaliranog kombinovanog slivnika sa taložnikom (1), ispust - veza (2), vezna guma (3), kanalizaciona cev Ø300 (5), i ankeri (6,7). (b) Alternativna konfiguracija postavljanja kanalizacione cevi Ø300 na rolerima ispod čeličnog dela mosta.

3. ZAKLJUČCI

Projektovanje i izgradnja sistema za odvodnjavanje mostova predstavljaju složen multidisciplinarni zadatak koji mora da uskladi hidrauličke performanse, ponašanje mostovske konstrukcije, bezbednost saobraćaja i zaštitu životne sredine. Rešenje primenjeno prilikom rekonstrukcije mosta Gazela pokazuje da se efikasno upravljanje atmosferskim vodama može postići integrisanim pristupom koji kombinuje efikasno sakupljanje oticaja, kanalisanje, prečišćavanje, retenziranje i kontrolisano korišćenje kanalisanih voda.

Rekonstruisani i dograđeni kanalizacioni sistem mosta Gazela značajno je unapredio prethodno stanje, u kome je oticaj nekontrolisano ispuštan sa konstruktivnih elemenata mosta. Novo rešenje je osmišljeno da poveća bezbednost saobraćaja, štiti elemente konstrukcije od propadanja usled slivanja vode i smanji ekološke rizike uvođenjem komponenti za prečišćavanje i monitoring kvaliteta vode. Pored toga, projektovani sistem

omogućava korišćenje dela prikupljenih atmosferskih voda i tako doprinosi održivom upravljanju gradskim vodama.

Sprovedene analize ističu važnu interakciju između deformacija mostovske konstrukcije i hidrauličkog funkcionisanja sistema za odvodnjavanje. Ugibi mosta pod uticajem saobraćajnog opterećenja i temperaturnih promena mogu povremeno da promene nagibe cevi i uslove tečenja, čime se smanjuje efikasnost sistema i povećava rizik od taloženja nanosa. Ovi efekti moraju biti eksplicitno razmatrani kako u projektovanju, tako i u eksploataciji.

Pouzdanost funkcionisanje sistema kanisanja površinskog oticaja najviše zavisi od redovnih inspekcija i održavanja. Zapušavanje i deformisanje slivnika, kao i mehanička oštećenja, posebno su identifikovani kao kritični faktori smanjenja efikasnosti odvodnjavanja, što naglašava potrebu za sistematskim praćenjem stanja sistema i pravovremenim intervencijama.

U budućim projektima odvodnjavanja mostova treba usvojiti potpuno integrisana rešenja koja uzimaju u obzir hidrauličke, konstruktivne, ekološke i operativne zahteve. Iskustvo stečeno na mostu Gazela ukazuje na značaj interdisciplinarnе saradnje između hidrotehničkih, konstruktivnih i saobraćajnih inženjera, kao i potrebu za kontinuiranim monitoringom u cilju adaptivnog upravljanja u promenljivim urbanim i klimatskim uslovima.

Ovaj rad je jedan u nizu radova koji su objavljeni sa sličnom temom (npr. [16]) kako bi se naglasila ova veoma zapostavljena oblast građevinarstva u kojoj je neophodno da se spoje najbolja iskustva i znanja navedenih struka u cilju postizanja održivih rešenja na saobraćajnicama u Srbiji.

Literatura

- [1] Despotović J., Desbordes M., Vukmirović V. (1995) Rainfall data analysis for alternative solutions of urban storm drainage systems. 2nd International Conference on Innovative Technologies in Urban Storm Drainage NOVATECH, Lyon, GRAIE, Eds. M. Desbordes, B. Chocat, pp.47-58.
- [2] Despotović J., Josipović S., Ivančević N., Živanović V., Dulić P. and Nikoletić S. (2010) Glavni projekat sistema odvodnjavanja i prečišćavanja atmosfernih voda na mostu Gazela preko reke Save na deonici auto-puta E75 kroz Beograd. Mostprojekt Co., Cekibeo Co. i Građevinski fakultet, Beograd.
- [3] Despotović J., Plavšić J., Živanović V., Josipović S., Velović N., Jakovljević N., Ivančević N., Dulić P. (2012) Design and construction of the storm water drainage and treatment system for the Gazela Bridge in Belgrade, 9th International Conference on Urban Drainage Modelling, Eds. D. Prodanovic, J. Plavsic, pp. 241-242.
- [4] Petrović J. and Despotović J. (1998) Historical rainfall for urban storm drainage design. Water Science and Technology, 37(11), 105-111.
- [5] Despotović J., Plavšić J., Djukić A., Todorović A., Petrović M. (2019) Bridge drainage and treatment system for storm water pollution control and harvesting – A case study of the Gazela bridge at the Sava River in Belgrade, Int. Conf. Danube Bridges, Vienna, Austria.
- [6] Despotović, J. (2009) Kanisanje kišnih voda (na srpskom), Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Beograd, ISBN 978-86-7518-075-3.
- [7] US EPA (2004) Storm Water Management Model – SWMM 5.0, Water Supply and Water Resource Division, Office of R&D, National Risk Management Research Lab., Cincinnati, OH, 45268.
- [8] Despotović J., Stefanović N., Pavlović D. and Plavšić J. (2005) Inefficiency of urban storm inlets as a source of urban floods. Water Science and Technology, 51(2), 139-145.
- [9] UKWIR (2023) 23/SW/01/27 – Modelling Sewer Inlet Capacity Restrictions. Prepared by HR Wallingford and University of Sheffield. UK Water Industry Research Ltd., London, UK, ISBN 978-1-84057-990-1.
- [10] Despotović J., Plavšić J., Jaćimović N. (2008) Surface runoff and safety factors for the vehicle and pedestrian street traffic, 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK, pp. 1-8.
- [11] Despotović J., Tomanović A., Batinić B. (1990) Hydraulic explanation and modeling of the capacity of the urban storm drainage gutter pavement grate inlets, 5th Int. Conf. Urban Storm Drainage, Osaka, Japan, pp. 975-980.
- [12] Despotović J., Jaćimović N., Plavšić J. (2004) Modern technologies for placing the SELECTA inlets in downtown Belgrade, International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management NOVATECH, Eds. M. Desbordes, B. Chocat, GRAIE, Lyon, pp.507-512.
- [13] Malgrat P., Villaneuva A. and Suñer D. (2005) Influence of the new European Directives on the urban drainage system. Proc. 10th International Conference on Urban Drainage, Eds. E. Eriksson et al., on CD-ROM (8 pages).
- [14] Despotović J., Jaćimović N., Plavšić J., Pavlović D., Todorović A. (2019) Rainfall-runoff control from bridge structures and its interaction with bank filtration system: The case study of the Gazelle bridge

in Belgrade, Neobjavljeno.

- [15] Despotović J., Plavšić J., Živanović V., Jakovljević N. (2013) The storm water drainage and treatment systems at the Gazela bridge in Belgrade, Serbia - A case study, International Conference on Modern Technologies in Urban Drainage NOVATECH, Lyon.
- [16] Despotović J., Đukić A., Plavšić J., Mišković Z., Babić B., Govedarica O. (2026) Stormwater harvesting from the Gazela bridge in Belgrade, Serbia: Design, implementation and performance assessment, IX IAHR Europe Congress, Lulea, Sweden, 9-12 June.