

Senzori kao deo digitalnih blizanaca kanalizacionih sistema: specifičnosti mernih metoda i mogućnosti primene pristupačnih rešenja

Damjan Ivetić
Institut za hidrotehniku i vodno
ekološko inženjerstvo
Građevinski fakultet Univerziteta u
Beogradu
Beograd, Srbija
divetic@grf.bg.ac.rs
0000-0001-7475-6108

Robert Ljubičić
Institut za hidrotehniku i vodno
ekološko inženjerstvo
Građevinski fakultet Univerziteta u
Beogradu
Beograd, Srbija
rljubicic@grf.bg.ac.rs
0000-0002-0218-2843

Jovana Lakičević
Institut za hidrotehniku i vodno
ekološko inženjerstvo
Građevinski fakultet Univerziteta u
Beogradu
Beograd, Srbija
jovanalakicevic99@gmail.com
0009-0000-1879-4863

Ljiljana Brajović
Katedra za matematiku, fiziku i nacrtu
geometriju
Građevinski fakultet Univerziteta u
Beogradu
Beograd, Srbija
brajovic@grf.bg.ac.rs
0000-0002-2265-7308

Miloš Milašinović
Institut za hidrotehniku i vodno
ekološko inženjerstvo
Građevinski fakultet Univerziteta u
Beogradu
Beograd, Srbija
mmilasinoVIC@grf.bg.ac.rs
0000-0002-3296-5224

Abstract— Uloga kanalizacionih sistema, kao dela komunalne infrastrukture, je da bezbedno sprovede upotrebljene i atmosfere vode sa urbanih slivova, bez prekida u radu. Jedan od pristupa koji se razvija poslednjih godina, a koji potencijalno može značajno da unapredi rad ovih sistema je primena digitalnih blizanaca. Sastavni element digitalnih blizanaca je i adekvatno prostorno raspoređena senzorska mreža, koja omogućava praćenje merodavnih hidrauličkih veličina u realnom vremenu. Nažalost, imajući u vidu specifičnosti rada ovih sistema i visoku cenu profesionalne merne opreme, najčešće ovakvih senzora nema dovoljno. U ovom radu je dat osvrt na specifičnosti mernih metoda koje se koriste u kanalizacionim sistemima, odnosno njihovim prednostima i manama. Analizirana su i alternativna rešenja u vidu pristupačnih senzora, gde je posebno apostrofirano rešenje koje se razvija na Institutu za hidrotehniku koje se bazira na primeni videometrijskih metoda. Taksativno su navedeni i posebni uslovi koja sva merna oprema koja se koristi u kanalizaciji, mora da zadovolji.

KLjučne reči—senzori, kanalizacioni sistemi, digitalni blizanci, merenje nivoa vode, merenje protoka vode

I. UVOD

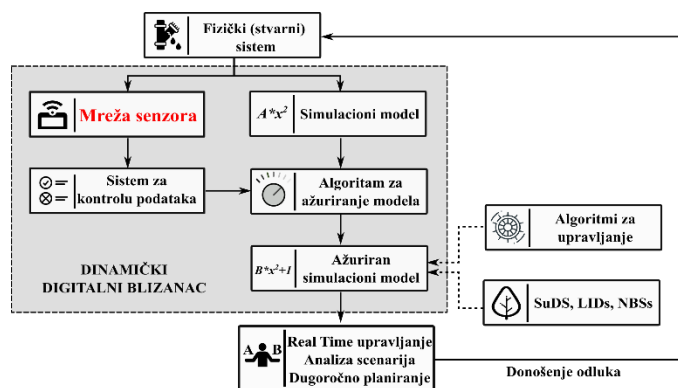
Glavni zadatak kanalizacionih sistema je bezbedno prikupljanje i odvođenje upotrebljenih i atmosferskih voda sa urbanih slivova u obližnji recipijent (vodno telo). Oni bi trebali da funkcionišu 24 sata dnevno, svaki dan u nedelji, bez prekida. Da bi se adekvatno procenio kapacitet postojećih kanalizacionih sistema, identifikovale slabe tačke i predvideli adekvatni koraci za unapređenje i dalji razvoj, neophodne su opsežne i detaljne analize, koje moraju uključiti monitoring rada sistema kao i razvoj, kalibraciju i upotrebu odgovarajućih hidrauličkih modela [1]-[3]. Jedan od modernih pristupa, koji pruža dodatne upravljačke mogućnosti, a sinergijski koristi prednosti monitoringa i kalibrisanih hidrauličkih modela, je razvoj i primena digitalnih blizanaca [4], [5]. Digitalni blizanač je virtuelna replika nekog fizičkog sistema. On integriše različite

podatke o sistemu kao što su merni podaci sa senzora i instrumenata kojima se kontroliše rad sistema, rezultate hidrauličkih modela, vrši asimilaciju podataka i koristi ih za kratkoročne projekcije rada i njegovu kontrolu u realnom vremenu. Iako je ideja da se preko razvijenog digitalnog blizanaca vrši kontrola složenih sistema već primenjena u nekim sferama, kao što su energetika, telekomunikacije, vodovodi itd., u kanalizacionim sistemima je ona tek u povoju. Ključni tehnički izazovi su vezani za specifične, nepovoljne uslove rada sistema, nedovoljnu pokrivenost senzorima (posledično nizak nivo informacija o radu sistema) kao i činjenici da se uglavnom radi o vremensnoj, slabo-dostupnoj infrastrukturi sa niskim stepenom održavanja.

U okviru digitalnog blizanca razlikujemo više povezanih domena kako je prikazano na Sl. 1. Među njima su veoma značajni oni koje čini mreža senzora, koja vrši merenje važnih parametara sistema, kao i deo koji vrši prikupljanje i slanje mernih podataka u realnom vremenu i njihovu obradu [4], [5]. Kanalizacioni sistemi su među onima koji su veoma zahtevni za formiranje digitalnog blizanca zbog velikog broja nestandardnih uslova koje treba da ispune senzori i merni sistemi koji se koriste. Izmereni hidraulički podaci o dubinama, brzinama i protocima na karakterističnim deonicama mreže, u većini slučajeva predstavljaju najpouzdaniji izvor informacija o radu kanalizacionog sistema. Ključan aspekt u obezbeđivanju pouzdanosti izmerenih hidrauličkih podataka je izbor makro (položaj unutar sistema) i mikro (položaj unutar poprečnog preseka kolektora ili specifične građevine) merne lokacije, odgovarajuće merne opreme, kvalitetna montaža i redovno održavanje prema specifičnim zahtevima opreme, odnosno uslovima na samom mernom mestu.

Pri odabiru makro lokacije, obično se vodi računa o reprezentativnosti odnosno značaju dobijenih podataka na tom mestu. Međutim, na terenu, merne lokacije ne mogu uvek da se formiraju na planiranom mestu, već se često lokacija prilagođava prema realnim uslovima, tako da se omogućiti bezbedan pristup,

montaža i što bolji uslovi za rad pojedine merne tehnike. Senzori koji se koriste za formiranje digitalnih blizanaca moraju da budu odabrani tako da mogu da prate dinamiku relevantnih veličina važnih za karakterizaciju sistema, da to merenje bude u realnom vremenu i da se omogući bežični prenos podataka do određenog glavnog čvora ili čvorova senzorske mreže [4].



Sl. 1 Shematski prikaz ključnih elemenata digitalnog blizanca kanalizacionog sistema

II. SENZORI ZA MERENJE HIDRAULIČKIH VELIČINA U KANALIZACIONIM SISTEMIMA

U slučaju kanalizacione mreže najčešće se kao glavne veličine prate nivoi ili dubine vode H (u cevima, šahtovima, rezervoarima i crpilištima) i protok Q [3]. Kao pomoćne veličine mogu se meriti i temperatura T i specifična električna provodnost vode σ koje mogu doprineti korekciji mernih rezultat usled promene spoljnih uslova pri merenju, ali i omogućiti prepoznavanje da li su u pitanju otpadne vode, ili potiču od padavina.

Dok je merenje nivoa vode H , uslovno rečeno, jednostavnije, kod merenja protoka Q postoje određene specifičnosti koje čine ovaj zadatak kompleksnim. S tim u vezi, kod merenja protoka razlikuju se dve situacije [6]: 1.) kada su na mernoj lokaciji hidraulički uslovi takvi da postoji jednoznačna veza između protoka i dubine ($Q = f(H)$); 2.) kada ne postoji jednoznačna veza između dubine i protoka. U situaciji 1.) nakon definisanja jednoznačne relacije $Q = f(H)$, dovoljno je koristiti samo jedno merilo dubine/nivoa H da bi se merio protok Q . Kada to nije ispunjeno 2.), neophodno je koristiti merilo dubine i poznatu geometriju kolektora da bi se odredila površina proticajnog preseka $A(H)$ zajedno sa merilom brzine v kako bi se množenjem površine i brzine došlo do protoka ($Q = A * v$).

A. Merenje nivoa tečnosti

Osnovni principi merenja dubine su hidrostatičko, tj. preko merenja pritiska vodenog stuba, ultrazvučno, radarsko merenje kao i automatskom vizuelizacijom nivoa pomoću graduisane vodomerne letve.

Hidrostatička metoda zahteva postavljanje senzorske glave unutar vode i zasniva se na merenju pritiska vodenog stuba pomoću pijezeorezistivnog senzora koji je povezan sa prohromskom (od nerđajućeg čelika) ili keramičkom membranom. Ovaj senzor se postavlja ili na dno ili na nekoj visini od dna kako bi se smanjilo taloženje čestica od otpadnih materijala preko senzora i obrastanje naslagama organskog porekla. Naročito su pogodni za primenu u cevima i šahtovima

malog prečnika gde nema dovoljno prostora za optimalno postavljanje ultrazvučnog senzora. Nemaju „mrtvu zonu“, pogodni su za kontinualno merenje i imaju malu potrošnju energije. Jednostavno se kalibrišu ali zbog uronjenosti u vodu zahtevaju regularno održavanje. Moguće mesto postavke ovog tipa senzora je obeleženo slovom A, na Sl.2. koja predstavlja skicu jednog hipotetičkog mernog mesta iz više projekcija [6].

Ultrazvučni senzori su naročito pogodni za dugotrajno kontinualno merenje nivoa. Nivo tečnosti se meri preko vremena t koje je potrebno da ultrazvučni talas od predajnika stigne do slobodne površine vode (granica između vode i vazduha) reflektuje se i vrati unazad do prijemnika. Predajnik i prijemnik su obično deo istog senzora, pa se zapravo radi o primopredajniku koji naizmenično radi u jednom, odnosno u drugom režimu. Upravo kao posledica konačnog vremena potrebnog za prelazak između dva režima, kod ovih senzora se javlja takozvana „mrtva zona“. Ona se obično pruža do najčešće 30 cm udaljenosti od primopredajnika, i promene nivoa tečnosti u ovoj zoni ultrazvučni senzor ne može adekvatno da registruje. Iz izmerenog vremena pomnoženog sa brzinom ultrazvučnih talasa C može se odrediti rastojanje senzora od površine tečnosti L . Prema mestu postavljanja ovi senzori mogu biti uronjeni u vodu ili u vazduhu iznad tečnosti. U oba slučaja potrebno je poznavati brzinu ultrazvučnih talasa kroz medijum (voda ili vazduh). U slučaju uronjenog senzora izražena je zavisnost brzine talasa od temperature i gustine tečnosti, dok kod senzora u vazduhu, vlažnost vazduha i temperature utiču na brzinu prostiranja talasa. U oba slučaja najčešće se koriste samo merenja temperature za korekciju. Takođe, postojanje pene i otpadaka na površini vode može dovesti do slabljenja povratnog signala. Na Sl.2 moguća mesta postavke ultrazvučnih merila su obeležena sa B1 (češće) kad je merilo u vazduhu i B2 kada je u vodi [6].

Nivo vode može da se meri i radarskim sensorima koji rade na sličnom principu kao ultrazvučni, samo se koriste elektromagnetni talasi frekvencija reda desetina GHz. Brzina prostiranja ovih talasa nije toliko zavisna od temperature, vlažnosti vazduha a takođe su manje osetljivi na postojanja pene kao i otpadaka na površini vodenog ogledala. Pouzdaniji su od ultrazvučnih i lakše se uočavaju lažno pozitivne vrednosti u mernom signalu. Postoji mrtva zona ali je manja (neki proizvođači tvrde da njihovi modeli koji rade na 80 GHz uopšte nemaju „mrtvu zonu“). Sve se više rastojanje meri na osnovu razlike u frekvencije između povratnog i emitovanog frekventno modulisanog signala kod koga frekvencija linearno raste, pa opada sa vremenom, a što doprinosi boljoj tačnosti i smanjenju šuma. Cena radarskih senzora je još uvek veća od ultrazvučnih, ali sve više opada [6]-[8]. Primer načina postavke radarskog merila nivoa, označenog slovom C je dat na Sl.2.

Merenje nivoa može se vršiti i pomoću vodomernih letvi u kombinaciji sa jednom ili više kamera. Letve se postavljaju vertikalno duž zida šahta i vrši se njihovo snimanje kamerom postavljenom pod nekim uglom. Obradom slike se „očitava“ nivo. Zbog potencijalno velikog raspona dubina, u odnosu na prečnik šahta, izražen je uticaj ugla na tačnost određivanja podeoka do koga je došao nivo vode. Korekcija očitane visine se mora vršiti preko poznatog geometrijskog položaja kamere i letve. Korišćenjem više kamera i letvi mogu se izbeći grube greške ili nemogućnost očitavanja nivoa usled postojanja otpadaka u vodi [9], [10]. Jedan primer postavljanja vodomerne letve i kamere je dat na Sl.2 (oznaka D).

B. Merenje protoka

Za merenje protoka u kanalizacionim sistemima mogu se koristiti merni objekti koji nameću jednoznačnu vezu $Q = f(H)$ ili takozvana grupa metoda brzina-proticajni presek ($v - A$), gde se paralelnim merenjem nivoa, odnosno dubine i brzine, određuje protok. Za merenje v uobičajeno se koriste ultrazvučni (na bazi vremena putovanja povratnog impulsa), dopler (ultrazvučni ili laserski), radarski ili elektromagnetni senzori. U nastavku je upravo dat pregled metoda za merenje brzine tečenja v . Treba napomenuti, da zapravo svaki senzor meri neku lokalnu brzinu v_{lok} unutar pripadajuće merne zapremine, koju treba na odgovarajući način korelisati sa traženom srednjom profilskom brzinom v .

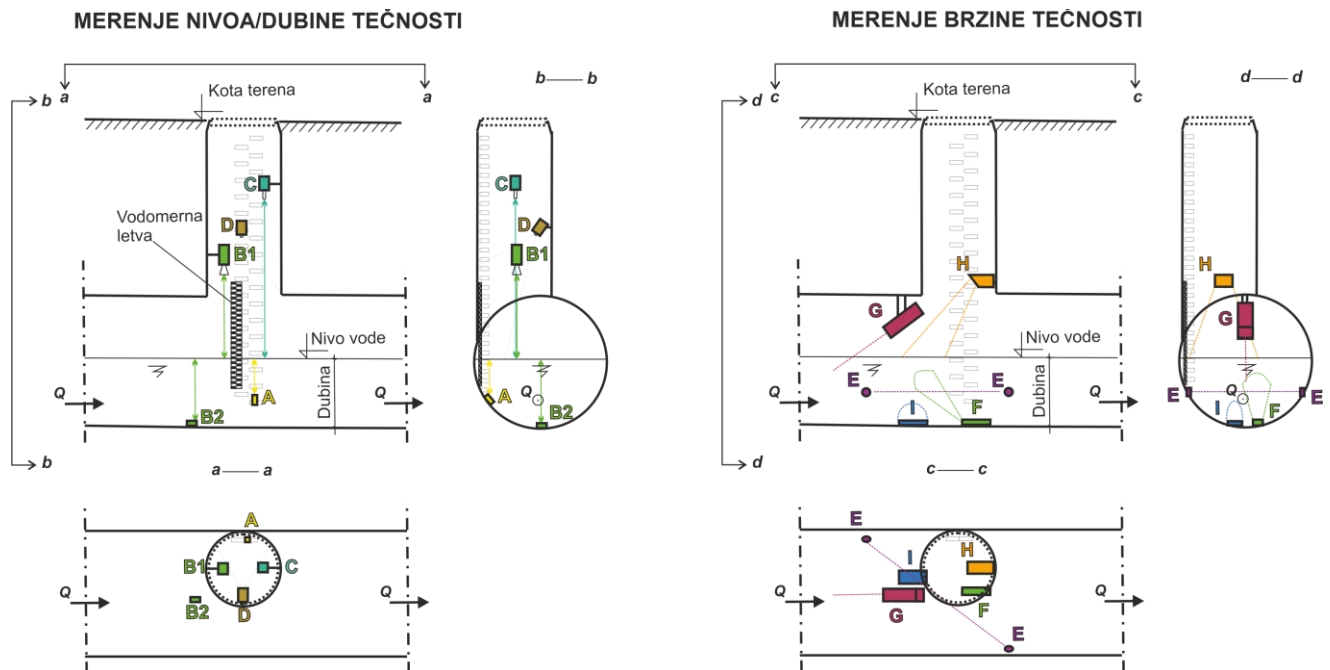
Prvi tip ultrazvučnih senzora meri vreme putovanja ultrazvučnih impulsa između jednog ili više parova ultrazvučnih sonde (eng. Transit-time/Time-of-flight) i na osnovu njega se dobija srednja brzina vode duž putanje ultrazvučnog talasa v_{lok} . Sonde koje su u paru su postavljene međusobno sa suprotnih strana cevi na istoj visini i duž koja ih spaja je pod nekim poznatim uglom u odnosu na osu cevi. Oni rade naizmenično kao predajnici i prijemnici ultrazvučnih talasa mereći vremena između emitovanog i detektovanog ultrazvučnog impulsa i to u dva različita smera. Koristeći činjenicu da se usled kretanja vode ova vremena razlikuju (talas koji nizvodno putuje brži od talasa koji putuje uzvodno) iz te razlike može se dobiti brzina tečenja. Merenje je osetljivo na postojanje mehurića u vodi što može dovesti do rasejanja talasa i pogodno je za šire cevi. Postavka para ultrazvučnih sonde obeleženih slovom E na mernom mestu je prikazana na Sl.2 [6].

Drugi ultrazvučni način merenje brzine je na bazi Doplerovog efekta. Kad se pošalje ultrazvučni talas u nekom pravcu deo talasa se reflektuje unazad od čestica čvrstih materija, mehurića, ili kapljica drugih fluida, koji se kreću vodotokom. Detektovana razlika frekvencija između povratnog i poslatog signala je zavisna od brzine ovih reflektujućih čestica, za koje se

u ovom načinu merenja pretpostavlja da u velikom procentu prate tok vode. Razlika frekvencija zavisi od brzine ultrazvučnih talasa u vodi koja se značajno menja sa temperaturom fluida pa je potrebno i merenje temperature radi korekcije. Ultrazvučni talasi se emituju i reflektuju u okviru nekog prostornog ugla, tako da se beleže praktično povratni talasi iz određene zapremine vode, koja ujedno predstavlja i mernu zapreminu senzora. Što su ovi prostorni uglovi veći, tj. što je ultrazvučni snop manje usmeren i domet merenja je manji. Ovaj tip senzora se postavlja na dno kolektora ili u blizini dna i često se u okviru istog uređaja/merila instaliraju i senzori za merenje nivoa (pijezorezistivni A ili ultrazvučni B2). Ovo merenje ima manju tačnost pri niskim vrednostima brzina kao i pri malim dubinama. U zavisnosti od mesta postavke merenje može biti osetljivo na nanošenje otpadnih čestica i materijala koje nosi voda kao i na oblaganje merila organskim otpadom [6], [11].

Ukoliko se meri istovremeno i promena frekvencije i vreme povratka signala ultrazvučnim senzorima može se odrediti profil polja brzina u nekom poprečnom preseku i takvi senzori se nazivaju ultrazvučni senzori profila brzina (eng. ultrasound profilers). Ovakvi uređaji su značajno skuplji od konvencionalnih dopler senzora. Primer postavke dopler senzora koji meri jednu ili profil brzina je prikazan na Sl. 3 sa oznakom F.

Poslednjih godina su se na tržištu pojavili i laserski senzori na bazi Doplerovog efekta koji se koriste u kanalizacionim sistemima. Ovdje se radi o beskontaktnom merenju gde je samo merilo postavljeno iznad površine vode. Laserski snop se deli na dva jednaka koherentna snopa koji se dodatnom optikom usmeravaju ka jednoj tački, interferiraju i stvaraju interferentnu sliku koja ima svetle i tamne pruge na nekom rastojanju u okolini te tačke unutar vodotoka. Ako se u vodi nalaze čestice koje plove, dolazi do rasejanja laserske svetlosti na mestima formiranja svetlih pruga i ta rasejana svetlost se detektuje na fotodetektoru. Usled kretanja čestica javlja se Doplerov pomeraj između frekvencija poslate i rasejane svetlosti, na osnovu koga



Sl. 2 Shematski prikaz hipotetičkog mernog mesta uključujući primere montaže i položaja različitih merila hidrauličkih veličina u kanalizacionim sistemima: (Levo) Merenje nivoa/dubine tečnosti (A, B1, B2, C i D); (Desno) Merenje brzine tečnosti (E, F, G, H i I)

se dobija komponenta brzine tečenja u ravni laserskih snopova. Sa aspekta tačnosti i ponovljivosti ovaj tip senzora je superioran u odnosu na ostale, međutim cena, visoka potrošnja energije i veličina samog merila ga ne čini preterano popularnim rešenjem. Jedan od mogućih načina postavke ovog merila je prikazan na Sl. 2. sa oznakom G.

Doplerov efekat se koristi i za merenje površinske brzine fluida i to radarskim senzorima iz vazduha. Senzori se postavljaju najčešće na vrhu cevi, tako da je postavljanje, pristup i održavanje ovih senzora mnogo jednostavnije u odnosu na potopljenje. Opseg merenih brzina je veliki i mogu se koristiti za kontinualno merenje veoma velikih brzina i do 10 m/s. Najveća mana ovih senzora se ogleda u zahtevu da na slobodnoj površini vode postoje fluktuacije nivoa (talasi) od kojih bi se emitovani elektromagnetski talasi odbili, što isključuje njihovu primenu u uslovima malih brzina tečenja. Dodatni problem je potreba da se uspostavi odgovarajuća veza između površinske brzine i srednje brzine protoka vode u cevi, tako da je potrebna kalibracija senzora ne samo u laboratorijskim već i u realnim uslovima na mernom mestu, najčešće poređenjem sa nekom drugom mernom metodom. Primer montaže radarskog merila, označenog slovom H, je dat na Sl.2 [8].

Elektromagnetne sonda za merenje protoka u kanalizacionim cevima se baziraju na Faradejevom zakonu elektromagnetske indukcije. Ako se uspostavi magnetsko polje unutar poprečnog preseka cevi kroz koju protiče voda koja se smatra elektroprovodnim fluidom doći će do indukovanja električnog polja. Na elektrodama postavljenim duž pravca koji je normalan i na pravac proticanja vode i na pravac vektora magnetskog polja javiće se razlika potencijala srazmerna brzini proticanja v . Kod cevi manjih prečnika (prvenstveno u vodovodnim sistemima) ova merila protoka obuhvataju cev i ceo proticajni presek na mernom mestu. Kod kanalizacionih cev ovo nije moguće pa se koriste ravne elektromagnetske sonde koje se postavljaju uglavnom na dno ili zidove cev. Ove sonde ne stvaraju dovoljno jako magnetsko polje duž čitavog poprečnog preseka cevi ili toka već u oblasti koja je blizu sonde i to magnetsko polje nije homogeno. Samim tim i njihova merna zapremina je ograničena i obično manja nego u slučaju ultrazvučnih dopler senzora, zbog čega se posebna pažnja mora posvetiti uspostavljanju veze između izmerene v_{lok} i tražene v brzine. Ovakvi senzori su detaljno ispitani na Institutu za hidrotehniku i vodno-ekološko inženjerstvo Građevinskog fakulteta, i pojedini članovi kolektiva su učestvovali u njihovom razvoju. Laboratorijsko i terensko poređenje ravne elektromagnetne sonde i najpopularnijeg rešenja ultrazvučnog Dopler senzora je pokazalo da je ravna elektromagnetska sonda značajno robusnija u eksploatacionim uslovima. Takođe, ovu metoda karakteriše veća ponovljivost. Ona može da se koristi i kod bidirekcionog tečenja, kao i pri malim brzinama reda 1-2 cm/s. Veoma važna prednost ovog tipa senzora je da on može da meri protok i kada je prekriven tanjim naslagama od poroznog materijala, i da debljina naslaga od nekoliko milimetara merenja ne utiče na tačnost merenja. Mana ove metode je osetljivost električne veze između vode i mernih elektroda koja može biti oslabljena i čak i prekinuta naslagama nekog izolacionog otpadnog materijala u kanalizaciji, kao što su na primer najlon kese. Da bi se sprečilo taloženje materijala preko sonde preporučljivo je da se ne postavljaju na dno cevi nego pod nekim uglom uz bočnu površinu cevi. U okviru istog merila mogu se integrisati i pijezeorezistivni senzori A za merenje nivoa. Na Sl. 2 je prikazan izgled i postavka jednog modela

sonde, označenog slovom I, kao i oblast prisustva magnetskog polja na mernom mestu.

C. Pristupačni senzori

Kako bi se mreža senzora progustila i unapredila prostorna pokrivenost, do nivoa odgovarajućeg za formiranje digitalnog blizanca, potreban je veliki broj senzora i mernih instrumenata čiji podaci mogu da se prate u realnom vremenu. Ako bi se koristila samo profesionalna, konvencionalna oprema, zajedno sa pripadajućim sistemima za napajanje, prikupljanje, bežični prenos, i obradu podataka, troškovi senzorske mreže bi učinili formiranje digitalnog blizanca praktično neizvodljivim. Zbog ovoga se sve više vrše istraživanja u pravcu razvoja i primene pristupačnih/jeftinih (eng. Low-cost) senzora i merila kao deo veće senzorske mreže. Ovi senzori se nekada povezuju i po konceptu interneta inteligentnih uređaja, IoT (eng. Internet-of-things). IoT senzori se često klasifikuju i kao pristupačni, pa se može reći da se u dosta aspekata ove dve grupe senzora preklapaju.

Ovakvi merni sistemi imaju tri tehničke celine, pristupačne/jeftine senzore, hardver (platforme sa mikrokontrolerima i mini računare) koji je slobodno dostupan i komunikacione protokole. Hardver i komunikacioni protokoli su već u velikoj meri razvijeni, iako se stalno usavršavaju. Njihov kvalitet je dosta standardizovan i za to garantuju njihovi proizvođači koji imaju veliki profesionalni ugled [7]. Od hardvera sa otvorenim pristupom koriste se mikrokontroleri, platforme sa mikrokontrolerima ili mini računari i njihove međusobne kombinacije. Kada se bira hardver u slučaju korišćenja pristupačnih ili IoT senzora kriterijumi za izbor su, cena, kompjuterska snaga, fleksibilnost u programiranju, robusnost, mala potrošnja energije, mogućnost povezivanja na određene komunikacijske protokole, veličina, memorija i sl. Iako ima mnogo hardvera koji je razvijen ili u razvoju, najčešće se koriste mikrokontroler ESP 32, Arduino platforma, i mini računari Raspberry Pi, BeagleBoard [12], [14].

Za bežični prenos podataka telekomunikacione mreže moraju da osiguraju malu potrošnju, i što veću prostornu pokrivenost i spadaju u LPWAN (eng. low-power wide-area networks). Za prenos podataka preko nelicenciranih frekventnih opsega koristi se LoRa tehnologija (eng. long-range radio) najčešće preko LoraWAN protokola, a manje i Sigfox, Wi-SUN tehnologije. LoraWAN omogućava prenos podataka na veliku daljinu, do 10 km, sa najvećom brzinom prenosa do 50 kbp/s, i sa visokim stepenom zaštitom podataka. Prenos podataka i komunikacija preko mreže mobilne telefonije se vrši još uvek najviše preko GSM-a (koji spada telekomunikacione standarde druge generacije (2G)), kao i preko UMTS (Universal Mobile Telecommunication System tehnologije - 3G), koja je za sada više dopunska tehnologija GSM-a za ove primene, a čija brzina prenosa je do 2Mbps. U okviru prenosa preko licenciranih frekventnih opsega mobilne telefonije za prenos se koriste i posebni protokoli vezani za IoT senzore kao što su NB-IoT i LTE-M koji spadaju u 4G standarde, ali je njihova primena koja obezbeđuje veću brzinu prenosa, i manju potrošnju energije, kao i optimizaciju ova dva parametra još uvek mnogo skuplja. Mreže i protokoli bežičnog prenosa kratkog dometa u koje spadaju Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth, nisu dovoljno pouzdani i dovoljnog dometa za primene u digitalnom blizancu kanalizacionog sistema [13].

Jeftini senzori, sa druge strane potiču od mnogobrojnih proizvođača i razvijani su za potrebe obuke studenata, hobbiste, za igračke i sl. Njihov kvalitet nije ujednačen, nekad se ne zna ko je proizvođač, a i tehnička dokumentacija može biti vrlo oskudna (prvenstveno ne sadrži sve merne karakteristike).

Kriterijumi po kojima se definiše šta su jeftini senzori nisu strogo definisani. Prema literaturi [7], [8], [11], jeftinim senzorima se mogu smatrati oni koji su bar deset puta jeftiniji od tradicionalnih koji se koriste, i ako su dizajnirani tako da mogu da se povezuju sa hardverom sa slobodnim pristupom, čineći tako pristupačan sistem za merenje neke veličine.

Kao perspektivan pristup sve više se razmatraju metode koje se zasnivaju na snimanju toka vode kamerom, i obradom snimaka odgovarajućim računskim softverima. Ovde se radi o beskontaktnom merenju, koje nudi niže troškove prikupljanja i obrade podataka. Ideja je da se upoređivanjem sukcesivnih slika prati brzina kretanja „detalja“ (eng. Features) koje se nalaze na površini vodenog toka. Oni mogu biti prirodni (lišće, mehurići, talasi, i dr turbulentne strukture) ili veštački (boje, fizički objekti itd.), i pretpostavlja se da se kreću istom brzinom kao i sam tok. Na osnovu poznavanja brzine trasera mogu se odrediti vektori površinske brzine toka. Koristeći teorijske obrasce, definiše se relacija između srednje površinske brzine v_{povr} i potrebne srednje profilske brzine v . Proces snimanja je najosetljiviji deo merenja, jer od kvaliteta zabeleženog snimka zavisi i kvalitet dobijenih rezultata. Optimalna orijentacija kamere je sa osom upravnom na površinu toka, čime se obezbeđuje relativno homogena prostorna gustina uzorkovanja površi, koja predstavlja jedan od parametara snimanja. Obradom slike poboljšava se kvalitet ulaznih podataka za merenje površinske brzine toka. Podrazumeva se uklanjanje geometrijskih deformacija iz video zapisa, stabilizacija, ortorektifikacija i filtracija video zapisa pri obradi zabeleženih snimaka. Sam izbor hardverskih komponenti zavisi će od zadataka merne kampanje i ekonomske isplativosti.

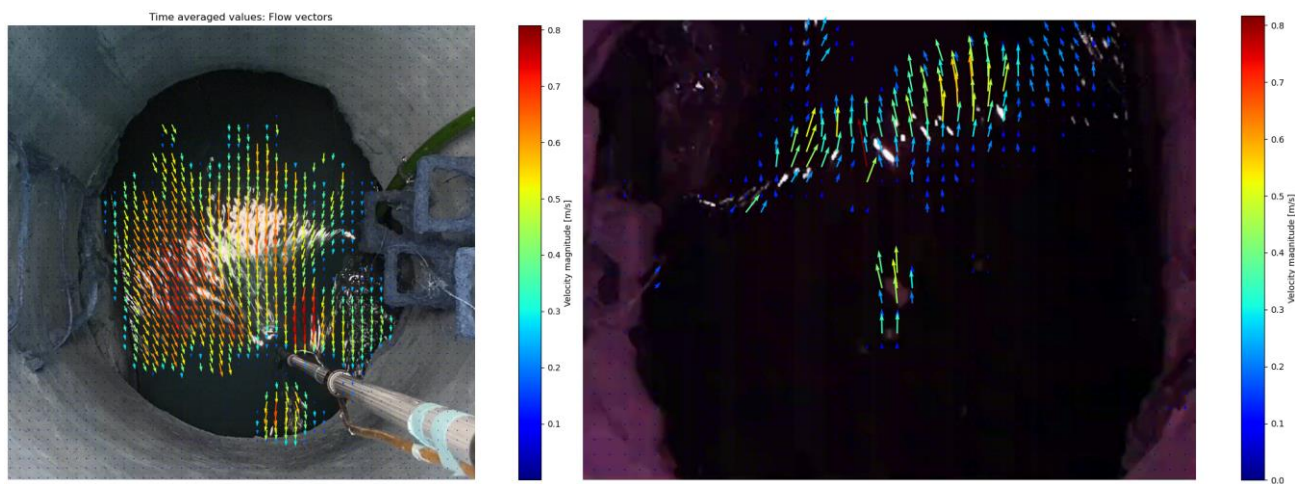
Razvoj i ispitivanje jednog takvog senzora se sprovodi i na Institutu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Prototipovi kamere sa blisko infracrvenim diodama (za rad u uslovima niskog osvetljenja), sastavljeni od široko dostupnih komponenti, su podvrgnuti ispitivanju u laboratoriji i

u realnoj kanalizacionoj mreži. Za obradu video snimaka videometrijskim metodama koristi se SSIMS-Flow softver koji je razvijen u Python programu [15]. Primer primene u takozvanom kaskadnom sistemu dve cevi (šahtu sa kaskadom) je detaljno opisan u [10]. Na Sl.3 je prikazan primer rada u Novo Beogradskom kanalizacionom sistemu, gde je posebno apostrofirana uticaj osvetljenja na dobijene rezultate.

D. Posebni uslovi koje treba da imaju senzori i merna oprema u kanalizacionim sistemima

Senzori i merna oprema u opštem slučaju treba da poseduju određene, zadovoljavajuće metrološke karakteristike, kojima se obezbeđuje da će moći da odrede vrednosti i dinamiku merne veličine na odgovarajući način. Ovde se pre svega misli na tačnost, ponovljivost, brzinu rada, osetljivost, rezoluciju i stabilnost. Međutim, imajući u vidu specifičnosti uslova rada u kanalizacionim sistemima, merna oprema koja se postavlja unutar kanalizacione mreže bi trebala da zadovolji dodatne uslove. Neki od najbitnijih su pobrojani u nastavku:

- Vododrživost – Za uređaje za koje se očekuje da su većim delom radnog veka pod vodom zahteva se zadovoljavanje IP68 standarda, dok za uređaje koji su povremeno u kontaktu IP67.
- Otpornost na koroziju.
- Otpornost na agresivne gasove i tečnosti.
- Nezapaljivost – zbog potencijalnog prisustva zapaljivih gasova, mora se obezbediti da rad merne opreme (senzor, napajanje, telemetrija) ne stvara uslove koji mogu dovesti do požara.
- Baterijsko napajanje – retko kad na mernim lokacijama postoji izvor napajanja. Zbog toga se zahteva da uređaji imaju nisku potrošnju energije i dugotrajnu autonomiju pri baterijskom radu. Pri montaži opreme se posebno vodi računa da baterija bude na pristupačnom mestu kako bi se olakšala zamena.
- Daljinski prenos podataka – poslednjih desetak godina ova opcija polako postaje uobičajena. Zbog otežanog pristupa i prikupljanja podataka, merna oprema se



Sl. 3 Rezultati obrade video snimka, zabeleženog pomoću prototipne kamere sa blisko infracrvenim diodama u kanalizacionoj mreži Novog Beograda, SSIMS-FLOW metodom. Dužina strelice i boja upućuju na pravac i intenzitet brzine vode u različitim tačkama šahta. (Levo) Pogodan nivo osvetljenja; (Desno) Nepogodan (nizak) nivo osvetljenja

isporučuje sa telemetrijskim modulima kojima se omogućava daljinski prenos podataka preko nekog komunikacionog protokola. Najveći izazov je ostvariti prenos iz podzemne infrastrukture, gde su pristupne tačke često na saobraćajnicama.

- Jednostavnost montaže – Rad u kanalizacionoj mreži se prema važećem Zakonu o bezbednosti i zdravlju na radu (Sl. Glasnik RS, br. 35/2023), karakteriše kao rad u skučenom prostoru, odnosno ako se radi unutar šahta, i kao rad na visini. Imajući u vidu povećan rizik, usled skučenosti i rada na visini, ali i usled potencijalnog prisustva otrovnih gasova na radnom mestu (najopasniji je vodonik sulfid), preporučljivo je koristiti što jednostavnije metode montaže opreme kako bi se minimizovalo vreme boravka ljudi unutar mreže.

III. ZAKLJUČCI

Digitalni blizanci kao virtualne replike fizičkih sistema mogu značajno unaprediti upravljačke kapacitete i doprineti blagovremenom donošenju optimalnih operativnih odluka. Ideja primene digitalnih blizanaca kanalizacionih sistema je tek u povoju i predmet je brojnih istraživanja. Jedna od ključnih prepreka u implementaciji predstavlja činjenica da su postojeće senzorske mreže oskudne, odnosno da postoji manjak informacija o radu sistema u realnom vremenu. U ovom radu je izvršen pregled metoda za merenje ključnih hidrauličkih veličina: nivo i protok vode, sa posebnim osvrtom na mogućnosti, ograničenja i način montaže. Kao potencijalno rešenje za proširenje senzorske mreže, razmatrani su tzv. pristupačni senzori. Identifikovani su ključni aspekti pri razmatranju upotrebe pristupačnih senzora, konkretno hardverske platforme i komunikacijski protokoli. Predstavljeno je jedno rešenje koje se razvija na Institutu za hidrotehniku, koje se zasniva na primeni videometrijskih metoda za merenje protoka.

REFERENCE/LITERATURA

- [1]. D. Prodanović, i D. Ivetić, 2019. Primeri primene ravnih elektromagnetnih sonde za merenje protoka u kolektorima. *Vodoprivreda*, 51.
- [2]. D. Ivetić, D. Prodanović, M. Stanić, B. Babić i R. Ljubičić 2024. Discharge measurements in Belgrade sewer systems: Forensic hydraulics. In 45. Međunarodna konferencija "Vodovod i kanalizacija'24"-zbornik radova (No. Digitalizacija, pp. 481-490).
- [3]. J-L. Bertrand-Krajewski, F. Clemens-Meyer and M. Lepot, 2021. *Metrology in urban drainage and stormwater management: Plug and pray*. IWA Publishing.
- [4]. A.N. Pedersen, M. Borup, A. Brink-Kjær, L.E. Christiansen and P.S. Mikkelsen, 2021. Living and prototyping digital twins for urban water systems: Towards multi-purpose value creation using models and sensors. *Water*, 13(5), p.592.
- [5]. A-J Wanga, H. Li, Z. He, Y. Tao, H. Wang, M. Yang, D. Savic, G. T. Daigger and N. Ren, "Digital Twins for Wastewater Treatment: A Technical Review," *Engineering*, vol. 36, pp. 21–35, May 2024.
- [6]. F. Larrarte, M. Lepot, F. H. L. R. Clemens-Meyer, J-L. Bertrand-Krajewski, D. Ivetić, D. Prodanović and B. Stegeman, "Water level and discharge measurements," in *Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management: Plug and Pray*, Chapter III, J-L. Bertrand-Krajewski, F. Clemens-Meyer, M. Lepot, Eds. London: IWA Publishing, 2021, pp. 35–104.
- [7]. Q. Zhu, F. Cherqui and J-L Bertrand-Krajewski, "End-user perspective of low-cost sensors for urban stormwater monitoring: a review," *Water Sci. Technol.*, vol. 87, pp. 2648–2684, June 2023.
- [8]. S. Catsamas, B. Shi 1, M. Wang, J. Xiao, P. Kolotelo and D. McCarthy, "Radar-Based IoT Sensor for Noncontact Measurements of Water Surface Velocity and Depth," *Sensors*, vol. 23, pp. 6314, July 2023.

- [9]. L. S. Nguyen, B. Schaeli, D. Sage, S. Kayal, D. Jeanbourquin, D. A. Barry and L. Rossi, "Vision-based system for the control and measurement of wastewater flow rate in sewer systems," *Water Sci. Technol.*, vol. 60, pp. 2281-2289, November 2009.
- [10]. R. Ljubičić, D. Ivetić and M. Milašinović, 2024. Towards camera-based sewer discharge monitoring: experiences using a low-cost DIY setup. In *16th International Conference on Urban Drainage*, 9-14 June 2024, Delft. University of Technology, NL.
- [11]. S. Catsamas, B. Shi, B. Deletic, M. Wang and D. T. McCarthy, "A Low-Cost Low-Power Water Velocity Sensor Utilizing Acoustic Doppler Measurement A Low-Cost, Low-Power Water Velocity Sensor Utilizing Acoustic Doppler Measurement," *Sensors*, vol. 22, pp. 7451, September 2022. (references)
- [12]. P. Hamel, N. Ding, F. Cherqui, Q. Zhu, N. Walcker, J-L. Bertrand-Krajewski and P. Champraserte, T.D. Fletcher c, D.T. McCarthy, O. Navratil, B. Shi, "Low-cost monitoring systems for urban water management: Lessons from the field," *Water Res. X*, vol. 22, pp. 100212, January 2024. (references)
- [13]. K. Mekki, E. Bajica, F. Chaxela, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol. 5, pp. 1–7, March 2018.
- [14]. D G. Costa and C. Duran-Faundez, "Open-Source Electronics Platforms as Enabling Technologies for Smart Cities: Recent Developments and Perspectives," *Electronics*, vol. 7, pp. 404–, December 2018.
- [15]. R. Ljubičić, S.F. Dal Sasso and B. Zindović, 2024. SSIMS-Flow: Image velocimetry workbench for open-channel flow rate estimation. *Environmental Modelling & Software*, 173, p.105938.

ABSTRACT

Sewer systems, as an integral part of urban infrastructure, are required to ensure the safe and uninterrupted conveyance of wastewater and stormwater from urban catchments. One of the approaches that has gained significant attention in recent years, with the potential to greatly enhance the efficiency and reliability of these systems, is the implementation of digital twins. A constituent element of digital twins is a sufficiently spatially distributed sensor network, which enables real-time monitoring of critical hydraulic parameters. However, due to the specific operational characteristics of sewer systems and the high cost of professional-grade measuring equipment, these systems often suffer from an insufficient number of sensors. This paper presents an overview of conventional measurement methods applied in sewer systems, discussing their respective advantages and limitations. Alternative solutions in the form of low-cost sensors are analyzed, with particular emphasis on a solution currently being developed at the Institute for Hydraulic Engineering, which is based on the application of videometric techniques. The specific operational conditions that all measuring equipment used in sewer systems must meet are listed in detail.

Keywords—sensors, sewer systems, digital twins, water level measurement, flow measurement

Sensors as constituent elements of sewer system digital twin: specifics of the measuring methods and applicability of the low-cost solutions

Damjan Ivetić, Robert Ljubičić, Jovana Lakičević, Ljiljana Brajović, Miloš Milašinović