

Kombinovanje metoda za merenje protoka u kanalizacionim sistemima u cilju smanjenja merne nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja

Damjan Ivetić¹
Dušan Prodanović²
Nemanja Rak³
Miloš Milašinović⁴
Robert Ljubičić⁵

APSTRAKT: Podaci o protocima u kanalizacionim sistemima su jedan od ključnih parametara za upravljanje radom sistema i planiranje daljeg razvoja. Usled prirode rada kanalizacionih sistema kao i specifičnih, nepovoljnih hidrauličkih uslova koji se javljaju u mreži, obezbeđivanje pouzdanih podataka o protoku je često veoma zahtevan zadatak. Na tržištu su dostupne različite merne metode, gde svaka od njih ima svoj opseg primenljivosti, koji je određen samim mernim principom i tehničkim karakteristikama konkretnih uređaja. Određivanjem merne nesigurnosti definiše se kvantitativni indikator kvaliteta rezultata merenja. Za određivanje nesigurnosti protoka izmerenog u kanalizacionoj mreži koriste se uglavnom preporuke iz odgovarajućih standarda i uputstava. Ispitivanjima korišćenih merila u kontrolisanim, laboratorijskim uslovima, definišu se vrednosti i funkcionalne zavisnosti za opisivanje komponenata merne nesigurnosti, koje se kasnije ekstrapoluju na terensku primenu ispitanog merila. Međutim, na kvalitet izmerenih podataka na terenu često značajno utiče i komponenta merne nesigurnosti koja se javlja usled uticaja lokalnih, specifičnih uslova strujanja na rad samog merila. Ova komponenta merne nesigurnosti se ne može opisati laboratorijskim eksperimentima, često se zanemara, dok sa druge strane ona može imati dominantan uticaj na kvalitet izmerenih podataka. U ovom radu se analizira jedan slučaj merenja protoka na ispustu kombinovanog kanalizacionog sistema u Beogradu gde su primenjena dva merila protoka koja rade na različitim mernim principima, zbog ekstremnih hidrauličkih uslova. Predstavljen je postupak kombinovanja podataka sa dva merila sa ciljem definisanja najbolje procene vremenske serije protoka, kao i određivanja vremenske serije komponente merne nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja.

Ključne reči: Merna nesigurnost, Merenje protoka, Elektromagnetni senzori, Akustični Dopler senzori, Kanalizacioni sistemi

Combining sewer discharge measurement methods for the reduction of in-situ measurement uncertainty

ABSTRACT: Discharge data is one of the key components for the successful sewer system management and development planning. Due to the sewer system nature, and specific, adverse hydraulic conditions in the network, obtaining reliable discharge data is a very complex task. Various measurement methods are available on the market, where each has its own application range defined by the measurement principles and technical

¹Dr Damjan Ivetić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, docent, divetic@grf.bg.ac.rs

²Dr Dušan Prodanović, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, profesor, dprodanovic@grf.bg.ac.rs

³Nemanja Rak, Hidroprojekt-saobraćaj d.o.o., inženjer, nemanja.rak@hps.rs

⁴Dr Miloš Milašinović, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, docent, mmilasinovic@grf.bg.ac.rs

⁵Dr Robert Ljubičić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, docent, rljubivic@grf.bg.ac.rs

characteristics of the particular devices. Computation of the measurement uncertainty allows for the quantitative indication of the measurement result quality. For sewer discharge measurements uncertainty assessment, usually the procedures from appropriate standards and guidelines are used. Laboratory tests and benchmarks are used to define the values and functional relationships for describing the measurement uncertainty components, which are later extrapolated to the field application of the analyzed instrument. However, the quality of the field data is often impeded by the measurement uncertainty component stemming from the effects of the local, specific flow conditions on the instrument operation. This measurement uncertainty components cannot be described by the lab experiments, is often neglected, while on the other hand can have a dominant effect on the measurement results quality. In this paper one example of the discharge measurements on the combined sewer outlet in the Belgrade, is analyzed, where the two different measurement methods were applied due to the adverse flow conditions. Data fusion procedure is shown, where the data from two instruments were combined to define the best estimate of the discharge time series, and the in-situ measurement uncertainty.

Keywords: Measurement uncertainty, Discharge measurements, Electromagnetic sensors, Acoustic Doppler sensors, Sewer systems

1 Uvod

Upravljanje kanalizacionim sistemima predstavlja složen izazov. Kanalizacija treba da funkcioniše 24 sata dnevno, svaki dan u nedelji, sprovodeći odgovarajuće količine otpadnih i atmosferskih voda do recipijenta ili postrojenja za preradu otpadnih voda (PPOV), minimizujući rizik po zdravlje stanovništva i negativne posledice po kvalitet vodnih tela koje prihvataju ove vode. Za donošenje pravovremenih i adekvatnih upravljačkih odluka, kao i za planiranje daljeg razvoja, neophodno je dobro poznavanje rada sistema. Ključno je poznavati šta se dešava u samoj kanalizacionoj mreži, odnosno kako sistem reaguje na dnevne, nedeljne i sezonske varijacije u opterećenju upotrebljenim vodama, pri suvim i kišnim uslovima. Jedini način da se dođe do ove spoznaje je putem merenja hidrauličkih veličina, prvenstveno protoka i nivoa, unutar same mreže na reprezentativnim mernim lokacijama. U idealnom slučaju merenja se obavljaju posredstvom dovoljnog broja stalnih mernih mesta, uspostavljenih od strane nadležnog JKP na karakterističnim lokacijama (crpne stanice, ključni kolektori itd.). Ukoliko su iz nekog razloga, potrebne dodatne i prostorno detaljnije informacije o radu mreže, organizuju se merne kampanje, putem kojih se uspostavljaju privremena merna mesta na lokacijama od interesa.

Jedan od problema u organizaciji mernih kampanja je vezan za merne lokacije. Odabir lokacija mernih mesta diktira topologija kanalizacione mreže kao i prostorni raspored i tip objekata priključenih na mrežu. Činjenica je da se privremena merna mesta često formiraju na lokacijski i hidraulički nepovoljnim delovima kanalizacione mreže za primenu konvencionalnih metoda (npr ultrazvučnih dopler protokomera, [1,2]) za merenja protoka i nivoa. Same lokacije se obično ne mogu menjati zbog reprezentativnosti prikupljenih podataka, a opet neophodno je obezbediti zadovoljavajuću pouzdanost izmerenih podataka. U opštem slučaju ne postoji univerzalna merna metoda ni merni instrument koji se u svim uslovima može jednako pouzdano koristiti, pa je potrebno odabrati optimalno rešenje za svako pojedinačno merno mesto. Ključni uticaj imaju [3] hidraulički uslovi na mernom mestu, fizičke karakteristike vode, geometrijske karakteristike cevi/kolektora, uslovi sredine, odnosno uslovi za montažu i obilazak opreme, potrebna dužina merenja, kao i ekonomska cena primene određenog rešenja. Prethodno navedeni lokacijski i hidraulički nepovoljni delovi mreže, u kojima je planirano formiranje privremenih mernih mesta, su specifični po tome što u većini slučajeva ne postoji jedna merna metoda koja se može na tom mestu pouzdano iskoristiti. Najčešće je neophodno kombinovati više metoda ili čak primenjivati određena inovativna rešenja [4], kako bi se obezbedio dovoljan kvalitet izmerenih podataka.

Da bi se kvantitativno odredio kvalitet izmerenih podataka, standardi [5] preporučuju sprovođenje analize merne nesigurnosti. Deklarativni podaci o pouzdanosti rada merila protoka, koje proizvođač isporučuje uz uređaj, su dobijeni na osnovu ispitivanja uređaja u standardom propisanim procedurama (npr ISO 3455 [6]) koje ne odgovaraju stvarnim uslovima primene uređaja pa su samim tim u velikoj

većini slučajeva neprimenjivi. Takođe, samim uređajima (merilima protoka) se vremenom menjaju radne karakteristike. Relevantni podaci o pouzdanosti rada, se dobijaju periodičnim ispitivanjem uređaja u odgovarajućim kontrolisanim laboratorijskim uslovima, prilagođenim uslovima primene. Koristeći dobijene podatke iz laboratorijskih testova, odgovorni inženjer prema pravilima/preporukama iz relevantnih standarda treba da propagira mernu nesigurnost i sračuna odgovarajuće vrednosti na terenu. Međutim, neretko se na terenu javljaju specifični hidraulički uslovi, koji se ne mogu adekvatno ispitati u laboratorijskim uslovima, a koji mogu značajno da utiču na kvalitet izmerenih podataka. Dodatna komponenta, merna nesigurnost usled lokalnih uslova strujanja, se može uvesti u analizu merne nesigurnosti, kako bi se adekvatno procenio kvalitet izmerenih podataka u takvim situacijama [7,8].

U ovom radu je analiziran primer merenje protoka na ispustu kišnog (ili kombinovanog) kanalizacionog sistema u Žarkovu, Beogradskom naselju na opštini Čukarica. Usled složenih uslova strujanja i značaja mernog mesta, primenjena su dva merila koja koriste dve različite merne metode merenja protoka: ultrazvučnu (UZV) i elektromagnetnu (EM). Tokom merenja, oba merila su imala probleme u kvalitetu izmerenih podataka, odnosno jedan od dva senzora (brzine i dubine) nije uspevao da adekvatno izmeri odgovarajuću hidrauličku veličinu, pogotovo u slučaju pojave ekstremnih kišnih epizoda. Međutim, podaci sa senzora oba merila koji su pokazali adekvatan odziv tokom merenja su spojeni kako bi se dobila najverovatnija procena vremenske serije merne veličine. Ovde je predstavljen postupak kombinovanja podataka sa dva merila sa ciljem definisanja najbolje procene vremenske serije protoka, kao i određivanja vremenske serije komponente merne nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja.

2 Metodologija

2.1 Metodologija merenja protoka

Merenje protoka u kanalizacionim sistemima je složen i osetljiv zadatak, koji zahteva visoku profesionalnost operatera i pouzdanu, adekvatno odabranu mernu opremu. Uobičajeno, za merenja protoka u kanalizacionim sistemima se prihvatljivom nesigurnošću smatraju vrednosti visoke čak do 10% (u posebnim slučajevima i više), zbog specifičnih nepovoljnih mernih uslova [9]. Najčešće se koriste merila koja koriste metodu Brzina-Proticajni presek (eng. $V - A$), gde se paralelnim merenjem brzine V i dubine H , na osnovu koje se određuje površina proticajnog preseka A , dolazi do vrednosti protoka Q . U slučajevima kada se na mernom mestu javlja jednoznačna veza između protoka Q i dubine H , merenja protoka se mogu vršiti i merenjem samo dubine, ukoliko je poznata veza $Q - H$.

U ovom radu su analizirane dva merila protoka koja rade na različitim principa merenja brzine V , dok su im merenja dubine H na istom principu ali sa različitim konstruktivnim rešenjima. Oba merila se postavljaju na dno kolektora ili direktnim fiksiranjem ili posredno preko namenskih prohromskih nosača. Konkretno, korišćeni su:

1. Ultrazvučni (UZV) kros-korelacioni „profajler“ brzina, „Nivus“ model POA-2 [10] – Merenje brzine V se vrši u kontrolnoj, mernoj zapremini koničnog oblika koja se pruža pod uglom od približno 30 stepeni u odnosu na osnovu merila, dok simultano integrisanim pijezeozistivnim senzorom meri dubinu H . Kompenzovanje atmosferskog pritiska u merenju H , se vrši pomoću kapilare ugrađene u kabl između merila i računске jedinice. Merilo koristi kros-korelacionu metodu merenja profila brzine (u 16 tačaka) koja, imajući u vidu ultrazvučni karakter metode, zahteva prisustvo nečistoća u vodi (kako bi se ostvario Doplerov efekat), čega u upotrebljenoj vodi svakako ima dovoljno. Radni opseg merila u pogledu merenja brzina je od -1,0 m/s do 6,0 m/s, dok je u pogledu merenja dubine vode od 0,0 do 5,0 m vodenog stuba.
2. Elektromagnetni (EM) senzor brzine, „Svet Instrumenata“ model Flat Compact [11] – Merenje brzine V se vrši u kontrolnoj, mernoj zapremini polusfernog oblika koja se formira oko samog uređaja i prodire u tok u dubini od 15 cm, dok simultano integrisanim pijezeozistivnim senzorom meri dubinu vode H . Merilo koristi elektromagnetnu metodu

merenja brzine koja se zasniva na Faradejevom zakonu indukcije i zahteva prisustvo jona u vodi zbog čega je metoda veoma pogodna za primenu u hidrotehničkim sistemima (jedino ne bi moglo da radi kada se meri brzina dejonizovane vode). Radni opseg merila u pogledu merenja brzina je od -10,0 m/s do 10,0 m/s, dok je u pogledu merenja dubine vode od 0,0 do 5,0 m vodenog stuba.

2.2 Metodologija procene merne nesigurnosti

Veoma bitan aspekt u merenjima protoka je pouzdanost izmerenih podataka, odnosno koliko mi zaista možemo da verujemo dobijenim podacima. Prvi logičan korak je vizuelni pregled snimljenih podataka, odnosno provera smislenosti na osnovu „zdrave logike“ (npr da li se u zoni gde nema uticaja pumpi vidi dnevna varijacija protoka?). Korak dalje, koji je ovde sproveden prema preporukama relevantnih metroloških organizacija (vidi [5]), je kvantitativna analiza pouzdanosti podataka. Kao reprezent pouzdanosti podatka, usvaja se vrednost merne nesigurnosti (a ne merne greške koja se ne može kvantifikovati). Uobičajeno, za merenja protoka u kanalizacionim sistemima se prihvatljivom nesigurnošću smatraju vrednosti visoke čak do 10% (u posebnim slučajevima i više), zbog specifičnih nepovoljnih mernih uslova [9].

Procenu merne nesigurnosti sprovodi sam izvođač merenja, koristeći raspoložive podatke o mernoj lokaciji, radu korišćenih instrumenata u kontrolisanim uslovima, pravila proračuna i propagacije merne nesigurnosti kod merenja složenih veličina i samih izmerenih podataka. Deklarativni podaci o pouzdanosti rada merila protoka, koje proizvođač isporučuje uz uređaj, su dobijeni na osnovu ispitivanja uređaja u standardom propisanim procedurama [6] koje ne odgovaraju stvarnim uslovima primene uređaja pa su samim tim u velikoj većini slučajeva neprimenjivi. Takođe, samim uređajima (merilima protoka) se vremenom menjaju radne karakteristike. Da bi se obezbedili relevantni podaci o pouzdanosti rada, neophodno je periodično ispitivati uređaje u odgovarajućim kontrolisanim laboratorijskim uslovima, prilagođenim uslovima primene. Za potrebe merne kampanje, sva korišćenja merila su pre instalacije bila ispitana na laboratorijskom kanalu Instituta za hidrotehniku Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu i poređena sa odgovarajućim etalonskim merilima. Ustanovljene su zavisnosti između komponenata mernih nesigurnosti (slučajne $u_p(x)$ i sistematske $u_b(x)$) i promena hidrauličkih veličina (brzina V , dubina H i Frudov broj). Procedure za određivanje navedenih komponenata merne nesigurnosti senzora brzine $u_s(V)$ i dubine $u_s(H)$ su opisane u [12,13].

Efekti merne nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja $u_i(x)$ se mogu kvantifikovati jedino na samom terenu. Dobra praksa nalaže da u svakoj situaciji merenja protoka u kanalizacionim sistemima, treba kvantifikovati vrednosti $u_i(x)$ zbog potencijalno značajnog uticaja na kvalitet merenja. Da bi se kvantifikovala vrednost $u_i(x)$, neophodno je koristiti drugu, referentnu mernu metodu na samoj mernoj lokaciji. Referentna metoda ne treba da bude pod uticajem lokalnih uslova strujanja. U ovom radu se predlaže proračun $u_i(x_j)$ za svako j -to merenje x_j , na sledeći način:

$$u_i(x_j) = \frac{1}{2} |x_j - x_{ref,j}| \quad (1)$$

Gde je $x_{ref,j}$, j -to referentno merenje u istom vremenskom trenutku. Ukupna merna nesigurnost se zatim računa, koristeći zakon propagacije merne nesigurnosti:

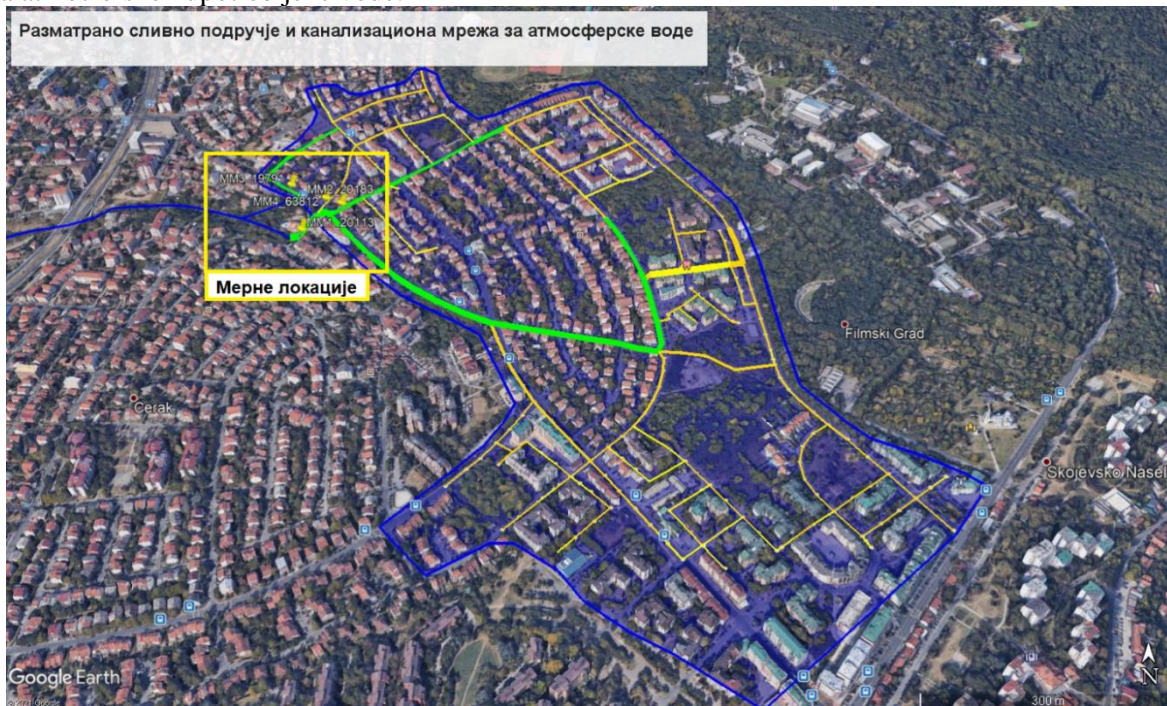
$$u(x) = \sqrt{u_s(x)^2 + u_i(x)^2} \quad (2)$$

3 Primer – Merenja protoka u Žarkovu

Kanalizacioni sistem, odnosno pripadajuće slivno područje, analizirano u ovom radu se nalazi u Beogradskoj opštini Čukarica. Preciznije, Veći deo slivnog područja se nalazi u naselju Žarkovu, dok se manji uzvodni delovi protežu kroz šumu Košutnjak (Slika 1). Izuzev uzvodnih delova koji se nalaze u šumi Košutnjak, veći deo sliva karakteriše visok prirodni pad terena. Prema planskoj dokumentaciji,

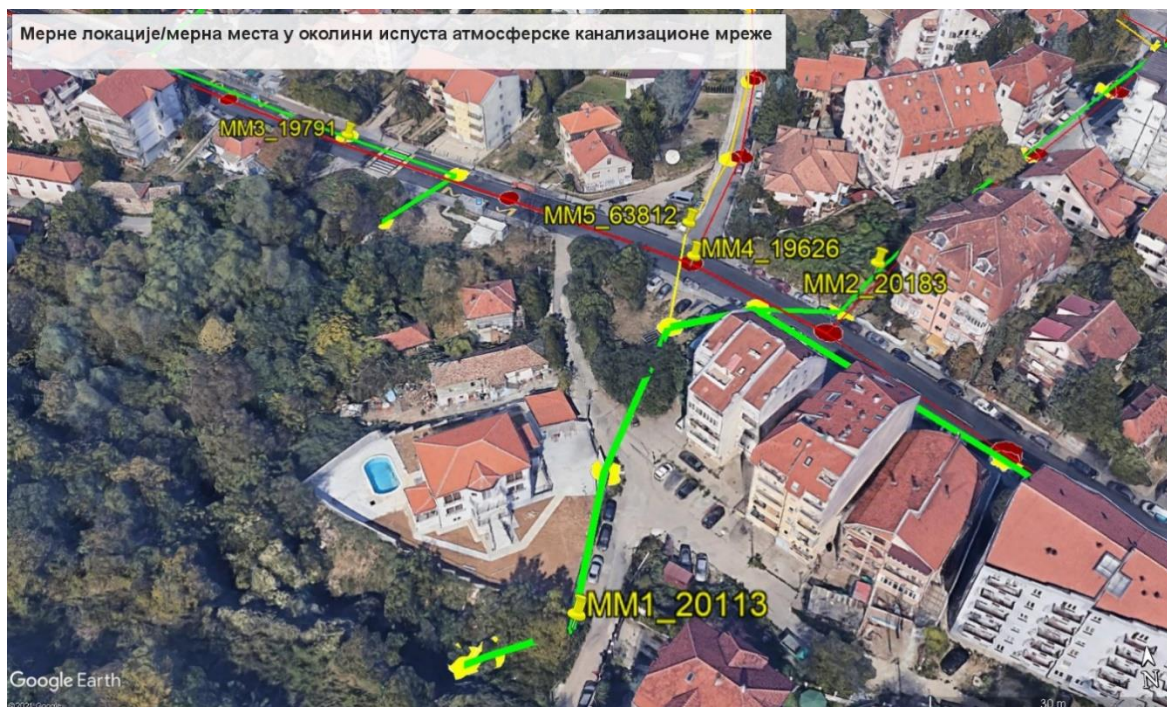
20. Savetovanje SDHI i SDH, Beograd, Srbija 2024. Conference SDHI & SDH, Belgrade, Serbia

na slivnom području je izveden separacioni kanalizacioni sistem, sa odvojenim kanalizacionim mrežama za atmosferske i upotrebne vode.



Slika 1. Razmatrano slivno područje u Beogradskom naselju Žarkovo sa izvedenom kanalizacionom mrežom za atmosferske vode.

Figure 1. Analyzed Belgrade watershed in the Žarkovo with the existing stormwater sewer network.

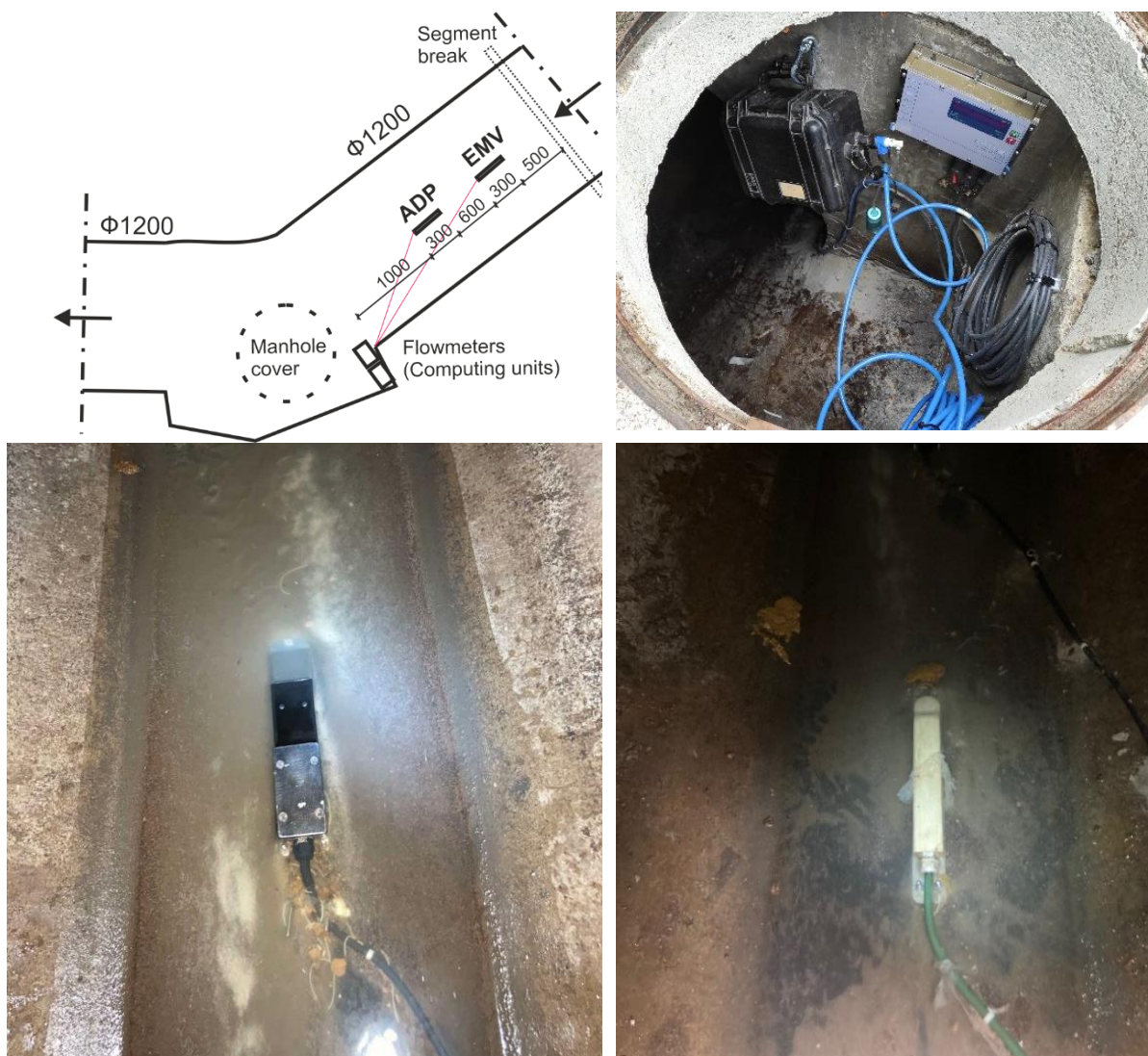


Slika 2. Lokacije mernih mesta u blizini ispusta atmosfere kanalizacione mреже

Figure 2. Measurement place locations near the stormwater outlet

20. Savetovanje SDHI i SDH, Beograd, Srbija 2024. Conference SDHI & SDH, Belgrade, Serbia

Stvarno stanje na terenu je drugačije, pa tako kanalizaciona mreža za upotrebne vode preuzima i prenosi značajne količine kišnog oticaja, tokom kišnih epizoda. Takođe u sušnim i kišnim periodima, usled nezanemarljivog broja nelegalnih priključaka, upotrebne vode se izlivaju i prenose kanalizacionom mrežom za atmosferske vode. Putem kanalizacione mreže za atmosferske vode, kišni oticaj sa slivnog područja se prikuplja i odvodi ka ispustu na Žarkovačkom potoku. Ovdje je analizirano upravo merenje protoka na mernom mestu 1 (Slika 2) koja se nalazi neposredno uzvodno od ispusta u betonskom kolektoru prečnika 1200 mm.



Slika 3. Merno mesto na ispustu kišnog kanalizacionog sistema u Žarkovu: Gore-Levo) Šematski prikaz mernog mesta, Gore-Desno) Računske jedinice u blizini poklopca šahta, Dole-Levo) Montirano EM merilo protoka Flat Compact, Dole-Desno) Montirano UZV merilo protoka POA-2.

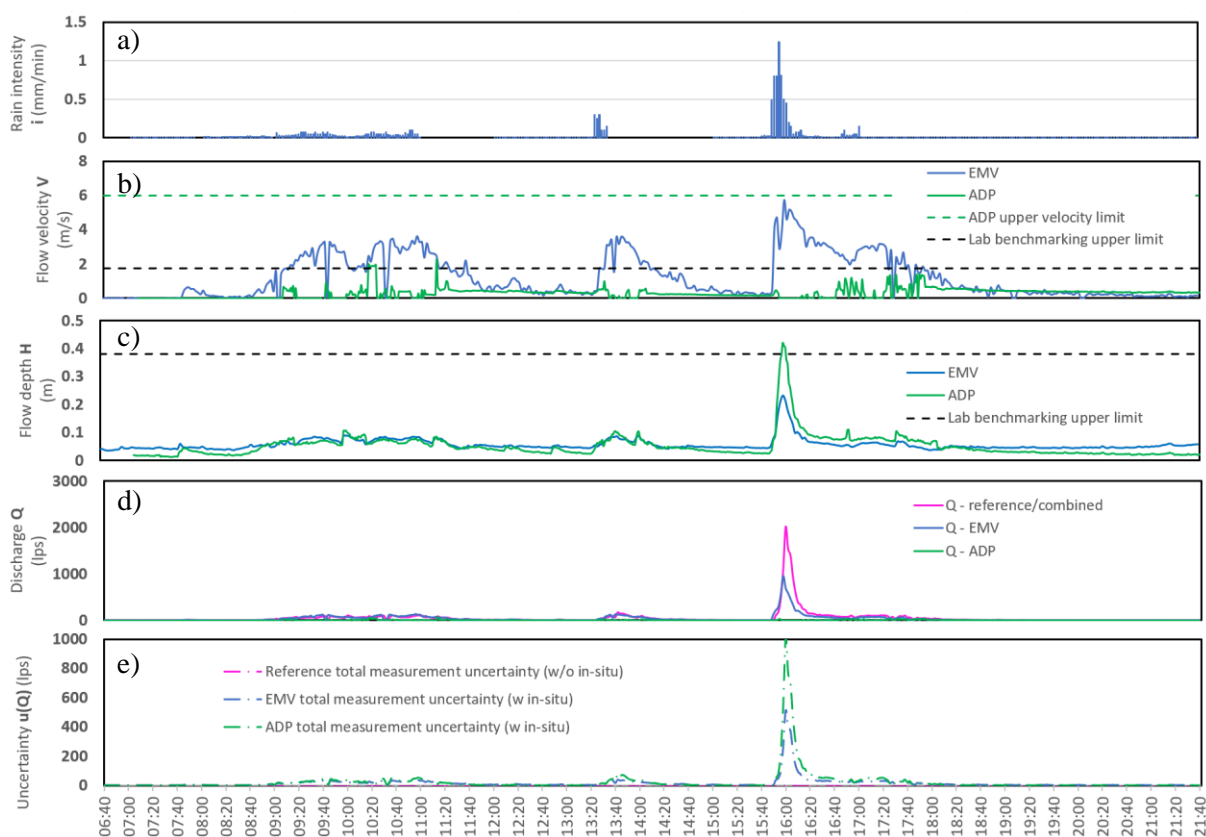
Figure 3. Measurement place on the stormwater outlet in Žarkovo: Top-Left) Schematic representation of the measurement place, Top-Right) Computing units in the vicinity of the manhole cover, Bottom-Left) Installed EM flowmeter Flat Compact, Bottom-Right) Installed ADP flowmeter POA-2.

Šematski prikaz osnove u kolektoru u okolini izabranog šahta je dat na Slici 3. Može se uočiti da se na ovoj lokaciji nalazi krivina, koja može nepovoljno uticati na strujnu sliku sa nizvodne strane (od krivine). Zbog toga je oprema postavljena uzvodno od krivine na relativno pravoj deonici kolektora. Na Slici 3 se može uočiti je da su betonski segmenti kolektora odvojeni nišom širine 10 cm.

Zbog važnosti merne lokacije, na mernom mestu 1, postavljena su dve sonde za merenje protoka čiji se princip rada razlikuje. Naime, uzvodno je postavljena Elektromagnetna (EM) sonda FLAT Compact DC 2.34 domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“, dok je 60 cm nizvodno postavljena

Ultrazvučna (UZV) sonda POA Correlation Wedge proizvođača „Nivus“ (Slika 3). Računske jedinice sa napajanjem, DC 2.34 i PCM Pro 4, za EM i UZV sondu respektivno, su postavljene neposredno ispod poklopca šahta tako da budu zaklonjene od toka u kolektoru a opet dostupne za kontrolu rada uređaja (Slika 3).

Korišćenjem dve različite metode, omogućeno je pouzdanije merenje protoka, što je bilo neophodno imajući u vidu da je ključni podatak za analizu kišnog oticaja upravo ukupna količina vode koja protiče kroz ispust atmosferske kanalizacije.



Slika 4. Rezultati merenja na ispustu kišnog kanalizacionog sistema u Žarkovu i proračuna merne nesigurnosti: a) Intezitet padavina, b) Brzine izmerene pomoću EM i UZV merila, c) Dubine izmerene pomoću EM i UZV merila, d) Protoci dobijeni EM, UZV i referentnim merenjem, e) Vrednosti ukupne nesigurnosti u merenju protoka za EM, UZV i referentno merenje.

Figure 4. Discharge measurement results from the stormwater outlet in Žarkovo: a) Rainfall intensity, b) Flow velocities captured with EMV and ADP, c) Flow depths captured with EMV and ADP, d) Discharge computed with reference/combined method, only EMV data and only ADP data, e) Temporal evolution of the total discharge measurement uncertainties for reference/combined method, EMV and ADP.

4 Rezultati i diskusija

Tokom merne kampanje u okviru koje je formirano analizirano merno mesto, konkretno 17.5.2021. dogodila se kišna epizoda visokog inteziteta. Maksimalni vrednost inteziteta padavina je iznosio 1,25 mm/min (Slika 4a). Izražen nagib terena zajedno sa visokim koeficijentom oticaja, su doveli do pojave naglo rastućeg i značajnog oticaja. Na mernom mestu je zabeležen pik protoka od 2,0 m³/s (Slika 4d), sa maksimalnim nivoom od 0,41 m (Slika 4c) i veoma visokom brzinom od 5,72 m/s (Slika 4b). Spiranje, unos i kretanje čvrstog materijala kroz betonski kolektor je čak dovelo do oštećenja prohromskog kućišta EM merila što se može videti na slici 5!

Oba merila, i EM i UZV, su imali problema u merenju podataka o brzini i dubini tečenja. Konkretno integrisani pjezorezistivni senzor dubine na EM merilu je pokazivao niže vrednosti dubine. Pretpostavlja se da je velika brzina tečenja izazivala negativne vrednosti dinamičkog pritiska, imajući u vidu frontalni položaj priključaka za senzor pritiska, koje su obarale ukupnu vrednost izmerene dubine. Problem je dakle u konstruktivnoj izvedbi merila, gde su priključci kojim se voda dovodi do senzora pritiska na nepovoljnom položaju, dok sam senzor pritiska je vršio merenja u granicama njegovih radnih karakteristika. Sa druge strane, senzor brzine na UZV merilu je imao poteškoća u merenju brzine (Slika 4d), gde su se za vreme pika hidrograma javljale brzine od blizu 0,0 m/s! Stvarne brzine, ili procene brzine izmerene EM merilom, su bile blizu limita UZV merila (maksimalna brzina deklarirana na 6,0 m/s). Pretpostavlja se da je došlo ili do značajnog uvlačenja vazduha u tok, ili da se kretanje čvrste materije kroz kolektor javilo upravo u ovom periodu, što je izazvalo naglo slabljenje ultrazvučnih talasa, odnosno loše merenje. Kod UZV merila, za razliku od EM, je problem u radnom principu metode koja u datim uslovima ne može da sprovede merenja, iako su hidraulički uslovi nominalno bili unutar radnog opsega uređaja.



Slika 5. Oštećenje prohrmskog kućišta EM merila protoka nakon intezivnog kišnog oticaja: Levo) Pre merenja, Desno) Posle merenja.

Figure 5. Damage to the inox casing of the EM flowmeter after the intensive runoff event: Left) Before the measurement, Right) After measurement.

Najverovatnija procena stvarnog hidrograma oticaja je dobijena fuzijom, ili spajanjem, signala sa oba merila, za koje se procenilo da nisu bili pod uticajem specifičnih uslova strujanja. Iskorišćena je vremenska serija merenja brzine pomoću EM merila i serija merenja dubine pomoću UZV merila. Ovi podaci su usvojeni kao referentna merenja, i iskorišćeni su za procenu komponente merne nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja $u_i(x)$ za merenja protoka pomoću EM i UZV merila.

Pad kvaliteta merenih podataka tokom intezivnog kišnog oticaja, je kvantifikovan proračunom $u_i(x)$, koristeći j-nu (1). Vremenska serije ukupne nesigurnosti u merenju protoka pomoću EM, UZV i referentnog merenja (j-na 2) je prikazana na Slici 4e. Mogu se uočiti značajni pikovi tokom pojave oticaja, u vrednostima ukupne merne nesigurnosti za EM i UZV merilo, gde su vrednosti merne nesigurnosti za UZV merilo značajno veće od EM, imajući u vidu skoro potpuni prestanak rada senzora brzine na UZV merilu. U oba slučajju može se konstatovati da se uvođenjem komponente merne

nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja, vrednost ukupne merne nesigurnosti povećala za preko jednog reda veličine! Vrednost $u_i(x)$ za referentno merenje nije moguće ni sračunati, budući da bi za tako nešto bilo neophodno primeniti još jednu referentnu metodu na mernom mestu.

5 Zaključci

Da bi se kvantitativno odredio kvalitet izmerenih podataka o protoku u kanalizacionim sistemima, standardi preporučuju sprovođenje analize merne nesigurnosti. Koristeći dobijene podatke tokom ispitivanja merila u kontrolisanim uslovima, odgovorni inženjer prema pravilima/preporukama iz relevantnih standarda treba da propagira mernu nesigurnost i sračuna odgovarajuće vrednosti merne nesigurnosti na terenu. Međutim, na terenu se javljaju i specifični hidraulički uslovi koji se ne mogu adekvatno reprodukovati u laboratorijskim uslovima, a koji mogu značajno da utiču na kvalitet izmerenih podataka. Zarad adekvatnog proračuna merne nesigurnosti u ovim situacijama, uvodi se dodatna komponenta, merna nesigurnost usled lokalnih uslova strujanja.

Za potrebe kvantifikovanja privremenog pada u kvalitetu izmerenih podataka, računa se vrednost merne nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja, poređenjem izmerenih vremenskih serija sa referentnim merenjima na samom terenu („in-situ“). Stručnost i profesionalnost odgovornog inženjera igra ključnu ulogu u definisanju referentnih merenja, budući da svaka merna metoda ima svoj opseg primenljivosti. U primeru analiziranom u ovom radu, merno mesto sa specifičnim, ekstremnim hidrauličkim uslovima je iskorišćeno kako bi se slikovito prikazao dinamički uticaj merne nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja na vrednost ukupne merne nesigurnosti. Korišćena su dva merila protoka, Ultrazvučno i Elektromagnetno, gde je po jedan senzor sa oba merila radio na očekivan način a po jedan nije. Konkretno, merenja pomoću senzora brzine EM merila kao i merenja dubine pomoću senzora dubine UZV merila su kombinovana (izvršena je fuzija podataka) kako bi se došlo do referentnih merenja. Sa druge strane senzor dubine EM merila i senzor brzine UZV merila nisu adekvatno izvršili merenje tokom intezivnog kišnog oticaja. Treba napomenuti da je logika definisanja referentnog merenja primenjiva samo u ovom specifičnom slučaju i ne bi je trebalo koristiti u drugim situacijama.

Vrednost merne nesigurnosti usled lokalnih uslova strujanja ima dominantan uticaj u proračunu ukupne merne nesigurnosti tokom trajanja intezivnog kišnog oticaja. Autori veruje da dobijeni rezultati naglašavaju potrebu za posebnom pažnjom pri planiranju i sprovođenju merenja protoka u kanalizacionim sistemima. Čak se može i zaključiti da bi opšte pravilo dobre prakse, trebalo da bude i da se na svakom mernom mestu u kanalizaciji, obezbedi privremeno i redundantna, referentna merna metoda kojom bi se kvantifikovala merna nesigurnost usled lokalnih uslova strujanja i generalno podigao kvalitet merenja.

Literatura

- [1] Larrarte F., M. Lepot, F. H.L.R.Clemens-Meyer, J.-L. Bertrand-Krajewski, D. Ivetić, D. Prodanović, B. Stegeman (2021). Water level and discharge measurements. Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management: Plug & Pray. Edited by: J.-L. Bertrand-Krajewski, F.H.L.R. Clemens-Meyer and M. Lepot. IWA Publishing. Pages: 35-104.
- [2] Larrarte, F., Bardiaux, J. B., Battaglia, P., & Joannis, C. (2008). Acoustic Doppler flow-meters: a proposal to characterize their technical parameters. Flow Measurement and Instrumentation, 19(5), 261-267.
- [3] Godley, A. (2002). Flow measurement in partially filled closed conduits. Flow Measurement and Instrumentation, 13(5-6), 197-201.
- [4] Ivetić, D., Ljubičić, R., Milašinović, M., Prodanović, D. i Pavlović, D. (2023). Merenje protoka otpadnih voda u kanalizacionim mrežama: Kombinovanje inovativnih sa konvencionalnim mernim metodama. Zbornik radova 44. Međunarodne konferencije Vodovod i Kanalizacija. Zlatibor, Srbija.
- [5] ISO (2008). ISO/IEC Guide 98-3:2008(E) Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995). ISO, Geneva (Switzerland), December 2008, 120 p.

20. Savetovanje SDHI i SDH, Beograd, Srbija 2024. Conference SDHI & SDH, Belgrade, Serbia

- [6] ISO-3455 Standard (1976), Liquid Flow Measurements in Open Channels. Calibration of Rotating Element Current Meter in Straight Open Tanks, 1st ed.
- [7] Lepot M., Momplot A., Lipeme Kouyi G. & Bertrand-Krajewski J.-L. (2014). Rhodamine WT tracer experiments to check flow measurements in sewers. *Flow Measurement and Instrumentation*, 40, 28–38. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.010.
- [8] Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Mathias Uhl, Francois H. L. R. Clemens-Meyer, (2021). Chapter 8: Uncertainty assessment, in *Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management: Plug and Pray*, Eds. Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Francois Clemens-Meyer, Mathieu Lepot. IWA Publishing.
- [9] Frédérique Larrarte, Mathieu Lepot, Francois H. L. R. Clemens-Meyer, Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Damjan Ivetić, Dusan Prodanović, Bram Stegeman, (2021). Chapter 3: Water level and discharge measurements, in *Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management: Plug and Pray*, Eds. Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Francois Clemens-Meyer, Mathieu Lepot. IWA Publishing.
- [10] Nivus (2023). <https://www.nivus.com/en/products-solutions/measurement-systems/flow-measurement-for-liquids/flow-meters-part-filled/flow-sensors/poa-correlation-wedge-sensor> (pristupljeno 18.12.2023).
- [11] Svet instrumenata (2023). <https://www.si.co.rs/index-e.html> (pristupljeno 18.12.2023).
- [12] Aguilar, M. F., McDonald, W. M., & Dymond, R. L. (2016). Benchmarking laboratory observation uncertainty for in-pipe storm sewer discharge measurements. *Journal of Hydrology*, 534, 73-86.
- [13] Ivetić, D., Prodanović, D., & Stojadinović, L. (2018). Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage Systems. *Journal of Hydrology*, 566, 455-469.