

# **PRIMENA KAMERA I TEHNIKA OBRADJE VIDEO ZAPISA ZA PROCENU PROTOKA U KANALIZACIONIM SISTEMIMA – ISKUSTVA MERNE KAMPANJE NOVI BANOVC**

Robert Ljubičić, mast. inž. građ.  
Damjan Ivetić, mast. inž. građ.  
Miloš Milašinović, mast. inž. građ.  
Dragutin Pavlović, dipl. građ. inž.  
*Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet*  
***rljubicic@grf.bg.ac.rs***

## **Rezime:**

Tehnike merenja u hidrotehnici zasnovane na upotrebi kamera i naknadnoj obradi video zapisa u trendu su poslednje dve decenije. Odlikuju ih tehnička jednostavnost, niska cena i prilagodljivost hardvera i softvera. Međutim, primena za merenje protoka u kanalizacionim sistemima nije analizirana u literaturi. Tim Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu osmislio je, konstruisao i postavio merni uređaj, baterijski napajan mikroracunar sa IC kamerom u kanalizacioni šaht u naselju Novi Banovci radi kontinualnog merenja dotoka upotrebljene vode. Rad prikazuje specifičnosti upotrebe mernog uređaja i tehnike obrade video zapisa. Preliminarni rezultati pokazuju potencijal razvijene metodologije, posebno tamo gde konvencionalna oprema nije primenjiva.

**Ključne reči:** kanalizacioni sistemi, merenje protoka, kamere, obrada video zapisa

# **APPLICATION OF CAMERAS AND VIDEO PROCESSING TECHNIQUES FOR FLOW RATE MEASUREMENT IN SEWAGE SYSTEMS – EXPERIENCES FROM NOVI BANOVC FIELD CAMPAIGN**

## **Abstract:**

Over the past two decades, the use of cameras and video processing techniques have become ever more popular. These are characterized by technical simplicity, low cost, and hardware/software adaptability. The adequacy of such techniques for use in sewage systems has not yet been analyzed in the literature. The team from the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, has developed, constructed, and set up flow measuring device, consisting of a battery-powered microcomputer and camera with near-infrared sensitivity, to a sewage maintenance hole in Novi Banovci with the objective of measuring the incoming sewage water flow. This paper presents a description of the working principles of both the hardware equipment and the data processing techniques. Preliminary results indicate a promising potential of the methodology in places where the use of conventional equipment is not possible.

**Keywords:** Sewer systems, Flow measurement, Cameras, Video Processing

## 1. UVOD

Poznavanje režima rada kanalizacione mreže – količina i kvaliteta – ključan je faktor ne samo za eksploataciju i održavanje mreže, već i kod planiranja njenog daljeg razvoja poput projektovanja i izgradnje postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV). U Srbiji je simptomatičan nedostatak stalnih mernih mesta za kontinualno merenje protoka, čak i u velikim gradovima poput Beograda. Prikupljanje neophodnih podataka odvija se, najčešće, kampanjski prema naročitim potrebama određene projektantske ili upravljačke aktivnosti. Imajući u vidu oštre zahteve poglavlja 27 iz klastera IV u okviru pregovora o pristupanju Srbije Evropskoj uniji [1], očekivano je inteziviranje merenja količina i kvaliteta vode u kanalizacionim sistemima.

Protekle dve decenije obeležene su izvanrednim napretkom metoda merenja upotrebom vizuelnih podataka, kako u laboratorijskim, tako i u terenskim uslovima. Pojedine metode, poput fotogrametrijskog geodetskog premera, revolucionisale su čitave inženjerske oblasti. Krajem 90-ih godina proteklog veka upotreba kamera pronašla je novo mesto u hidrometriji – merenje polja brzina i protoka u otvorenim kanalima [2, 3, 4]. Prednosti takvih metoda uočene su najpre u znatno nižoj ceni potrebne opreme i mogućnosti merenja u otežanim uslovima u kojima primena konvencionalnih tehnika (npr. ADCP uređaja) nije moguća. Godine koje su usledile dovele su do ubrzanog razvoja novih metoda za merenje hidrološko-hidrauličkih veličina iz slika i video zapisa – dubine, temperature, mutnoće, prisustva plutajućeg otpada, polutanata i sl. [5, 6, 7, 8].

U okviru kampanje merenja protoka upotrebljene vode u naselju Novi Banovci, tim sa Instituta za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo susreo se sa nepovoljnim uslovima za primenu konvencionalnih mernih uređaja. U cilju kontinualnog merenja, stoga je primenjen inovativan pristup merenju zasnovan na upotrebi kamere postavljene u šaftu kanalizacionog kolektora. Sklop mernog uređaja osmišljen je i konstruisan tako da obezbedi beskontaktno merenje u otežanim uslovima vidljivosti korišćenjem podataka iz blisko-infracrvenog dela spektra vidljive svetlosti. Neprekidnost merenja obezbeđena je napajanjem iz baterijskog izvora struje, sa posebnim merama za uštedu energije.

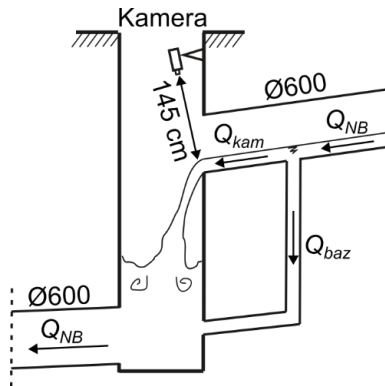
U ovom radu opisana je metodologija primene kamera za merenje protoka u kanalizacionim sistemima sa aspekta hardvera, softvera i algoritama obrade, a opisane su i poteškoće koje mogu nastati prilikom primene kao i preporuke za njihovo otklanjanje. Stečena iskustva ukazuju na značajan potencijal ovog i sličnih pristupa – kako u smislu jednostavnosti, tako i u

odnosu cene prikupljanja i kvaliteta dobijenih rezultata – posebno u sprezi sa konvencionalnim tehnikama merenja protoka.

## 2. METODOLOGIJA

### 2.1 Oprema

Odabrano merno mesto nalazi se u naselju Novi Banovci, na lokalitetu neposredno uzvodno od izliva kanalizacionog kolektora u reku Dunav. Šema kanalizacionog šahta nalazi prikazana je na slici 1. Uvidom u terenske uslove ustanovljeno je da je dno mernog šahta neprekidno potopljeno. Ulivna cev prečnika je  $\text{Ø}600$  mm i nalazi se na dubini od cca. 2 m od kote vrha šahta. U toku mernih kampanja, dubine vode u ulivnoj cevi iznosile su svega između 2-4 cm. Zbog značajne dubine šahta, odnosno visine kaskade, šaht je opremljen dodatnom cevi – odušak nepoznatog prečnika – koja iz dna kolektora uzvodno od kaskade odvodi bazni deo protoka  $Q_{baz}$ .



Slika 1. Skica mernog šahta sa položajem merne opreme  
Figure 1. Sketch of the manhole with the equipment position.

Zbog specifičnih uslova merenja – potopljenosti šahta, izuzetno malih dubina tečenja u ulivnoj cevi, visine kaskade, i dr. – primena konvencionalnih tehnika merenja protoka korišćenjem elektromagnetnih i ultrazvučnih senzora nije bila moguća. Iz tih razloga, merenju protoka pristupilo se primenom kamera i tehnika obrada video zapisa. U pripremnim fazama merenja identifikovani su sledeći izazovi:

1. Odsustvo izvora električnog napajanja.
2. Nizak intenzitet osvetljenosti u šahtu, posebno u toku noćnih perioda.
3. Prisustvo vlage, aerosola i prskanje vode.
4. Odabir adekvatnih parametara snimanja.

Imajući u vidu računarsku složenost upravljanja kamerom, snimanja podataka i upravljanje režimom snimanja, za kontrolni element merne opreme odabrana je ploča *Raspberry Pi 3B+* (u nastavku RPi). Zbog potrebe za višednevnim kontinualnim mernim kampanjama u uslovima u kojima ne postoji mogućnost snabdevanja strujom iz elektro mreže, primenjeno je baterijsko napajanje celokupnog mernog sklopa. U tom pogledu, glavni hardverski izazov bio je snižavanje potrošnje struje mernog uređaja u cilju produžavanja životnog ciklusa baterijskog napajanja. Primenjene su tri *LG MH1 Li-Ion* baterije napona 3,7 V i ukupnog kapaciteta od 9600 mAh, u sklopu sa upravljačkom pločom *Waveshare Solar Power Manager*<sup>1</sup>. Uloga upravljačke elektronike napajanja je regulacija napona na 5 V uz mogućnost istovremenog pražnjenja i punjenja baterija pomoću solarnog panela (upotreba solarnog panela nije primenjena u toku obavljene kampanje merenja). Kako kontrolna ploča RPi ne poseduje režim niske potrošnje struje („mod spavanja“, engl. *sleep mode*) koji bi produžio interval između zamena ili dopune baterija, primenjena je i naročita ploča za redukciju potrošnje struje RPi uređaja – *Witty Pi 3 Mini*. *Witty Pi* ploča pruža mogućnost kreiranja režima niske potrošnje, kao i definisanje režima intervalnog uključjenja i isključjenja napajanih uređaja. Preliminarne analize potrošnje struje pokazale su da se primenom opisane strategije smanjenja potrošnje struje, ciklus pražnjenja baterija može povećati sa svega 0,5 sati na 3,8 dana, prilikom primene režima snimanja video zapisa trajanja 5 sekundi na svakih 10 minuta.

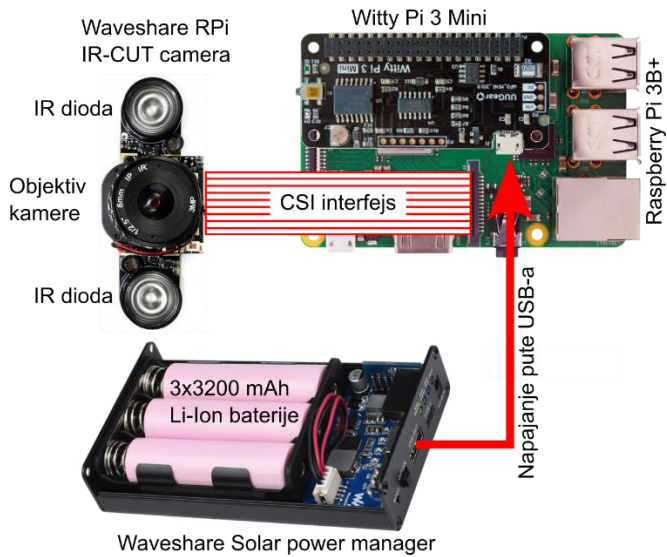
Zbog niskog intenziteta svetlosti u šahtu, posebno u toku noćnih perioda, odabarana je upotreba kamere osetljive na blisko-infracrveni segment svetlosnog spektra (engl. *near-infrared*, NIR) – *Waveshare RPi IR-CUT Camera*. Izabrana kamera poseduje objektiv sa ručno podesivim fokalnim rastojanjem i elektromehaničkim infracrvenim (IR) filterom. Uklanjanjem IR filtera, senzor kamere može primiti svetlost iz infracrvenog segmenta svetlosnog spektra, što znatno povećava vidljivost u uslovima niske ambijentalne osvetljenosti. Kamera je takođe opremljena i sa dve diode koje emituju infracrvenu svetlost, a koje obezbeđuju „zasejavanje“ prostora infracrvenom svetlošću čije reflektovanje onda može registrovati senzor kamere. Dve infracrvene diode najveći su potrošač električne energije čitavog mernog uređaja – ukupno 6 W snage pri naponu od 3,3 V.

---

<sup>1</sup> Upotreba konvencionalnih *powerbank* uređaja (namenjenih za punjenje mobilnih telefona i drugih „pametnih“ uređaja) uglavnom nije moguća – potrošnja struje merne opreme u stanju mirovanja uz korišćenje *Witty Pi* ploče veoma je niska – cca. 20  $\mu$ A – što najveći broj *powerbank* uređaja prepoznaje kao slučajno i nepoželjno „curenje“ baterija što uzrokuje preventivni prekid napajanja.



Slika 2. Levo: Kućište mernog uređaja sa vidljivim izloženim objektivom kamere i diodama. Desno: Merni uređaj montiran u šaht.  
 Figure 2. Left: Measuring device (MD) housing with exposed lens and IR light diodes. Right: MD mounting position in the manhole.



Slika 3. Hardverska šema mernog uređaja.  
 Figure 3. Measuring device hardware setup.

Zaštita uređaja od uticaja vlage i vode obezbeđena je zatvaranjem elektronike i napajanja u kućište od PVC plastike, tako da su spoljnim uticajima izloženi samo objektiv kamere i dve IR diode. Kućište je montirano na metalni nosač pričvršćen za zid šahta, koji je omogućio podešavanje

orijentacije kamere prilikom montaže (slika 2 desno). Usvojena hardverska šema mernog uređaja prikazana je na slici 3.

Primer slika iz video zapisa u toku dnevnih i noćnih uslova snimanja prikazan je na slici 4. Na slici se može uočiti da je u sredini mlaza uzvodno od kaskade prisutna šipka armature koja delimično remeti strujno polje.



*Slika 4. Primeri slika iz video zapisa, posvetljeno za 20%.  
Levo: dnevni uslovi 26.12.2022 u 11:40. Desno: noćni uslovi 28.12.2022 u 02:10.  
Figure 4. Still shots from video record samples. Left: daytime shooting at 11:40, 22.12.2022. Right: nighttime shooting at 02:10, 28.12.2022.*

## **2.2 Akvizicija podataka**

U skladu sa zadacima merne kampanje, odabran je režim snimanja jednog video zapisa na svakih 10 minuta. Zbog uočene ustaljenosti brzina na izlivu iz kolektora, odabrano je trajanje video zapisa od 5 sekundi, što za dati slučaj pruža adekvatnu količinu podataka za procenu brzina tečenja i protoka. Definisani su sledeći koraci u toku akvizicije podataka:

1. Prilikom startovanja RPi ploče, kôd pisan u *Python* jeziku definiše parametre snimanja (rezoluciju, trajanje i brzinu snimanja), i rukovodi procesom akvizicije snimka.
2. Podaci se snimaju na microSD karticu, sa naznakom datuma i vremena akvizicije. Metapodaci se upisuju u log fajl.
3. Uređaj se gasi i započinje režim smanjene potrošnje struje.

Celokupan prethodno opisani ciklus izvršava se za cca. 45-60 sekundi, nakon čega se uređaj gasi do isteka ciklusa od 10 minuta (oko 9 minuta u režimu smanjene potrošnje struje). Ponovnu aktivaciju uređaja omogućava

*Witty Pi*, korišćenjem ugrađenog modula za praćenje vremena (engl. *real-time clock*, RTC).

Na osnovu procenjenog kapaciteta baterija, preuzimanje podataka obavljano je fizičkim pristupom uređaju na terenu na svaka tri dana.

### 2.3 Obrada prikupljenih video zapisa

Iako RPi poseduje adekvatnu računarsku moć za potrebe obrade video zapisa, zbog potrebe za uštedom potrošnje energije obrada prikupljenih video zapisa obavljana je na zasebnom računaru nakon preuzimanja podataka na terenu. Za obradu je korišćen softverski alat SSIMS-Flow [9], koji je razvijen na Katedri za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Softver SSIMS-Flow prvobitno je razvijen za merenje polja površinskih brzina i protoka u otvorenim vodotocima, ali sadrži sve neophodne postupke za procenu brzina tečenja i kanalizacionim kolektorima gde je tečenje sa slobodnom površinom vode. Merenje polja površinskih brzina zasniva se na primeni Farnebek (šve. *Farnebäck*) metode optičkog toka (engl. *optical flow*), odnosno na analizi polja gradijenata intenziteta piksela između dve uzastopne slike iz video zapisa [10]. Procenom pomeraja karakterističnih oblika na slobodnoj površini toka između uzastopnih slika video zapisa – čestica prirodnog ili veštačkog trasera ili drugih struktura – omogućava se procena brzine tečenja vode.

Kako bi se na osnovu osmotrenog polja brzina pružila procena protoka, neophodno je poznavanje geometrije proticajnog preseka. Zbog nemogućnosti neposrednog merenja dubina tečenja u kolektoru, iz svakog video zapisa dobijen je najpre podatak o širini vodenog ogledala na nizvodnom kraju kolektorske cevi. Veza između širine vodenog ogledala  $B$  i dubine  $h$  u kružnom poprečnom preseku definisana je izrazom:

$$B = 2\sqrt{r^2 - (r - h)^2}, \quad (1)$$

gde je  $r$  poluprečnik cevi (0,3 m). Poznavanjem dubine tečenja, površina proticajnog preseka može se izračunati pomoću izraza:

$$A = r^2 \frac{\theta - \sin(\theta)}{2}, \quad (2)$$

gde je:

$$\theta = 2 \arccos \left( \frac{r-h}{r} \right). \quad (3)$$

Iako je izraz (1) implicitan po promenljivoj  $h$ , za dati poluprečnik kolektora može se aproksimirati eksponencijalnim izrazom što konačno dovodi do procenjene vrednosti dubine:

$$h = \frac{B^{2,043}}{263,05}. \quad (4)$$

Zbog izrazito malih dubina tečenja, prilikom procene protoka u obzir nije razmatrana neravnomernost brzine po dubini, te je protok računat prema izrazu:

$$Q_{kam} = V_{sr} A, \quad (5)$$

gde je  $V_{sr}$  srednja površinska brzina na nizvodnom kraju cevi.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Preliminarna terenska ispitivanja započeta su 21.12.2022. montiranjem kamere. Rastojanje od objektiva kamere do slobodne površine vode izmereno je laserskim daljinometrom. Poznavanje ove razdaljine omogućilo je kalibrisanje odnosa dimenzija na slikama iz video zapisa i odgovarajućih dimenzija u prirodi. Fokalno rastojanje kamere ručno je podešeno radi poboljšanja kontrasta. U toku preliminarnih ispitivanja, korišćeni su sledeći parametri kamere: rezolucija video zapisa 1294x972 px pri brzini snimanja od 30 slika u sekundi. U cilju dodatne zaštite mernog uređaja od temperaturnih gradijenata i padavina, preko poklopca šahta je prvobitno postavljen najlonski prekrivač.

Prvi video zapisi preuzeti su sa mernog uređaja nakon 3 dana (24.12.), pri čemu je konstatovano sledeće:

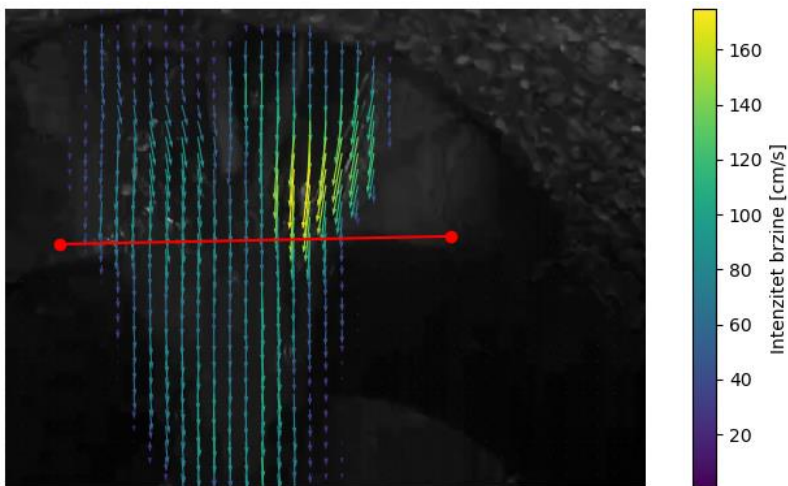
1. Kapacitet baterija je adekvatan i u skladu sa procenjenim vrednostima. Baterije obezbeđuju merenje u trajanju od cca. 3,5 dana.
2. Najlonski pokrov koji je inicijalno postavljen sa ciljem dodatne zaštite uređaja, onemogućio je adekvatnu evakuaciju gasova i vodene pare iz šahta, što je uzrokovalo često kondenzovanje vlage na objektivu kamere. Takođe je u okolini uređaja dolazilo do nagomilavanja vodene pare i aerosola, što je dodatno smanjilo vidljivost na video zapisima.



3. Brzina snimanja od 30 slika u sekundi nije bila adekvatna za ostvarene brzine tečenja (do 1,5 m/s).

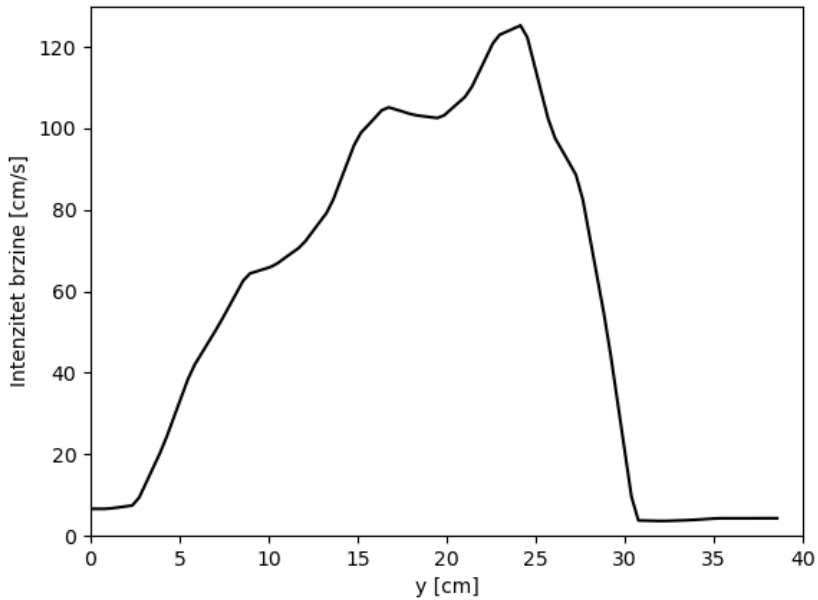
U skladu sa prethodnim zapažanjima, najlonski prekrivač uklonjen sa poklopca šahta 24.12., i parametri kamere izmenjeni su na rezoluciju od 648x486 px pri brzini snimanja od 62 slike u sekundi.

Video zapisi pretvoreni su u sekvence pojedinačnih slika pomoću softvera SSIMS-Flow. Analizom sekvenci slika utvrđeno je da su one zadovoljavajućeg kvaliteta, te ne moraju biti podvrgnute naknadnim obradama u cilju akcentovanja detalja na površini toka koji bi poslužili za određivanje brzina. Polja površinskih brzina takođe su procenjena korišćenjem softvera SSIMS-Flow. Primer vremenski osrednjenog polja brzina prikazan je na slici 5. Za određivanje protoka korišćen je profil preseka cevi i šahta – horizontalna linija na slici 5. Primer intenziteta brzina u odabranom profilu prikazan je na slici 6.



*Slika 5. Polje vremenski osrednjenih brzina, 26.12. u 12:40. Horizontalna linija predstavlja profil korišćen za procenu protoka.*

*Figure 5. Time averaged velocity field, 12:40, 26.12.2022. Horizontal line represents profile used for flow assesment.*



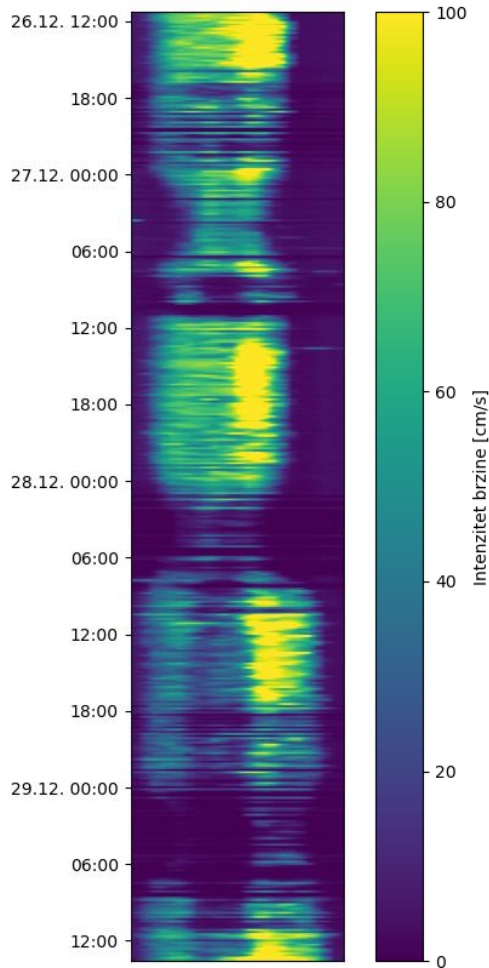
*Slika 6. Profil vremenski osrednjenih intenziteta brzina u odabranom mernom profilu, 26.12. u 12:40.*

*Figure 6. Time averaged velocities at selected profile at 12:40, 26.12.2022.*

Objedinjavanjem intenziteta brzina u mernom profilu dobijenih iz serije video zapisa, može se formirati slika prostorno-vremenske raspodele brzina kao na slici 7, koja ilustruje dinamiku promene protoka u različitim periodima dana. Na slici se jasno uočavaju najveći intenziteti protoka u periodu od 12-18h praćeni postepenim smanjenjem do ponoći. Najmanji protoci registrovani su svakog dana oko 4h ujutru.

Međutim, slika 7 ukazuje na to da kvalitet izmerenih profila brzina nije uniforman – uočavaju se preseki u kojima zbog otežanih uslova snimanja nije moguća procena protoka – na primer, u intervalu od 18-23h dana 26.12. Stoga je prepoznata potreba da se takvi rezultati identifikuju i uklone iz daljih analiza. S time na umu, razvijen je jednostavan filter koji na slikama iz video zapisa procenjuje globalni intenzitet kontrasta, i slike sa niskim kontrastom označava kao potencijalno nepouzdanе – poput onih koje nastaju prilikom kondenzovanja vlage na objektivu.

Širina mlaza  $B$  identifikovana je kao relativno pouzdan geometrijski podatak, koji se iz video zapisa može proceniti ručno ili automatski. Automatska detekcija širine mlaza realizovana je određivanjem rastojanja između krajnjih tačaka u profilu intenziteta brzina (poput onog na slici 6) u kojima intenzitet brzine prelazi 1% od maksimalne brzine u profilu.



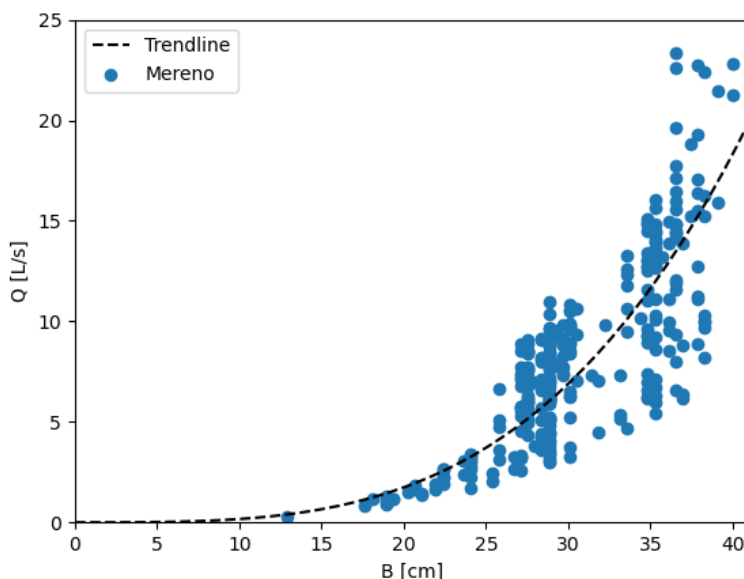
Slika 7. Prikaz polja intenziteta brzina u mernom profilu kroz vreme, neprečišćeni podaci.

Figure 7. Space-time representation of flow velocities at the selected profile, unfiltered data.

Na osnovu validiranih i prečišćenih podataka, formirana je kriva zavisnosti protoka  $Q_{kam}$  od širine mlaza  $B$  (slika 8). Korišćenje ove zavisnosti ima za cilj redukciju merne neizvesnosti procenjenog protoka, ali omogućava i bržu procenu protoka merenjem jedne (najpouzdanije) veličine – širine mlaza  $B$ .

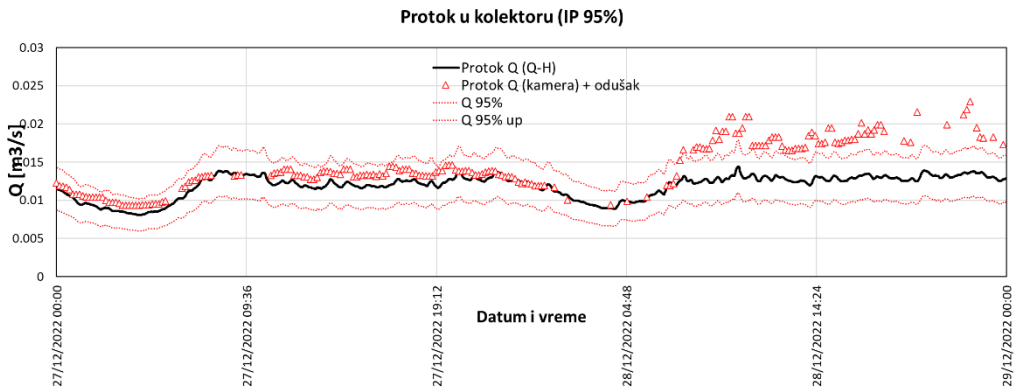
Na slikama 7 uočava se drastična promena u obliku profila brzina nakon ranih jutarnjih časova 28.12. kada dolazi do širenja mlaza uz smanjenje intenziteta brzina u okolini sredine profila. Uvidom u izvorne video zapise

utvrđeno je da je u datom periodu geometriju proticajnog preseka poremetila kuhinjska krpa zaglavljena za komad armature prisutan uzvodno od kaskade – što je dovelo do razdvajanja i širenja mlaza te se ovi podaci smatraju nepouzdanim. Ova fizička prepreka uklonjena je prilikom obilaska terena 29.12.



Slika 8. Kriva zavisnosti protoka od širine mlaza, prečišćeni rezultati.  
Figure 8. Flow rate  $Q$  vs surface width  $B$  curve, filtered data.

U cilju validacije dobijenih rezultata, u uzvodnom kanalizacionom šahtu montiran je EM senzor protoka FLAT400 sa spoljnim nivomerom. Zbog prisustva oduška kaskade uzvodno od mernog šahta  $Q_{baz}$  (slika 1) uočeno je da između rezultata dobijenih pomoću kamere i EM senzora postoji konstantna razlika od 8 L/s. Zbog konfiguracije šahta i kaskade opravdana je pretpostavka da je protok kroz odušak kaskade definisan razlikom nivoa vode u dovodnoj cevi – koji je praktično konstantan, odnosno menja se u opsegu od nekoliko cm – i nivoa vode u samom šahtu za koji takođe nije uočena značajnija promena u toku merne kampanje. Stoga je usvojena korekcija za ukupni protok u mernom šahtu  $Q_{baz} = 8$  L/s u odnosu na rezultate dobijene kamerom. Segment poređenja rezultata dobijenih primenom kamere i kalibrisane Q-H krive formirane primenom EM senzora prikazan je na slici 9, na kojoj se uočava da rezultati dobijeni kamerom veoma dobro prate trend promene protoka iz uzvodnog šahta, i nalaze se u okviru definisanog intervala poverenja. Nakon jutarnjih časova 28.12. dolazi do značajnog razmimoilaženja rezultata iz dva izvora, zbog pojave prepreke u vodu krpe ispred kaskade koja je bitno poremetila strujno polje i geometriju proticajnog preseka.



*Slika 9. Poređenje rezultata procene protoka pomoću kamere (trougaoni markeri) i putem kalibrisane Q-H krive (crna linija), sa prikazom intervala poverenja 95%.  
Figure 9. Flow assement comparison: camera + low flow manhole bypass determined Q (triangle markers) vs. Calibrated flow Q - depth H curve (black line) - incl. 95% confidence limits.*

#### 4. ZAKLJUČCI

U radu je opisana inovativna eksperimentalna metodologija merenja protoka kanalizacione vode pri tečenju sa slobodnom površinom u kanalizacionim šahtovima zasnovana na upotrebi kamera i tehnika obrade video zapisa. Iskustva stečena primenom na mernom mestu u naselju Novi Banovci mogu se rezimirati na sledeći način:

1. Primena kamera u kanalizacionim sistemima je perspektivna, ali može biti kompromitovana otežanim ambijentalnim uslovima – prskanjem vode, prisustvom oblaka aerosola, kondenzovanjem vlage na objektivu kamere i slično.
2. Postojeća softverska rešenja adekvatna su za rukovanje podacima i njihovu obradu u cilju dobijanja podataka o protoku.
3. Ističe se naročita potreba za razvojem metoda za validaciju i filtriranje rezultata dobijenih primenom ove metode.
4. Računska kompleksnost metode može se značajno smanjiti formiranjem kalibracionih krivih oblika  $Q_{kam}(B)$ , pri čemu je širina mlaza  $B$  relativno pouzdan i jednostavno procenjiv podatak. Ovakav pristup omogućava procenu protoka na samom mernom uređaju umesto u postprocesiranju.
5. Primena solarnog napajanja omogućila bi kontinualno merenje protoka bez potrebe za kratkim intervalima obilaska mernog mesta i preuzimanja podataka sa mernog uređaja. Alternativno, integracija

modula za pristup internetu omogućila bi daljinsko/beskontaktno preuzimanje podataka sa mernog uređaja i njegovu kontrolu.

6. Vizuelni podaci o polju merne veličine, za razliku od tačkasto izmerenih - skalarnih, omogućavaju jednostavniju validaciju podataka i identifikaciju potencijalnih izvora mernih nesigurnosti.

Metodologija demonstrirana u ovom radu je u ranim fazama razvoja i može biti unapređena na različite načine: integracijom solarnog sistema za napajanje uređaja i punjenje alternativnog baterijskog napajanja, grejača koji sprečavaju kondenzovanje na objektivu kamere, dodatnih senzora (gasova, zvuka, udaljenosti), kvalitetnijih objektivna i senzora kamere, i dr.

## LITERATURA

1. Ministarstvo za evropske integracije, Republika Srbija: *Poglavlje 27 – Životna sredina*. Pristupljeno 15.04.2023. <https://www.mei.gov.rs/srp/obuka/e-obuke/vodic-kroz-pregovore-srbije-i-evropske-unije/klasteri/klaster-4/poglavlje-27-zivotna-sredina/>.
2. Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). *Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications*. In Journal of Hydraulic Research (Vol. 36, Issue 3, pp. 397–414). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>.
3. Pearce, S., Ljubičić, R., Peña-Haro, S., Perks, M., Tauro, F., Pizarro, A., Dal Sasso, S., Strelnikova, D., Grimaldi, S., Maddock, I., Paulus, G., Plavšić, J., Prodanović, D., & Manfreda, S. (2020). *An Evaluation of Image Velocimetry Techniques under Low Flow Conditions and High Seeding Densities Using Unmanned Aerial Systems*. In Remote Sensing (Vol. 12, Issue 2, p. 232). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12020232>.
4. Perks, M. T., Dal Sasso, S. F., Hauet, A., Jamieson, E., Le Coz, J., Pearce, S., Peña-Haro, S., Pizarro, A., Strelnikova, D., Tauro, F., Bomhof, J., Grimaldi, S., Goulet, A., Hortobágyi, B., Jodeau, M., Käfer, S., Ljubičić, R., Maddock, I., Mayr, P., ... Manfreda, S. (2020). *Towards harmonisation of image velocimetry techniques for river surface velocity observations*. In Earth System Science Data (Vol. 12, Issue 3, pp. 1545–1559). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1545-2020>.
5. Manfreda, S., & Eyal, B. D. (2023). *Unmanned Aerial Systems for Monitoring Soil, Vegetation, and Riverine Environments* (1st ed.). Elsevier.
6. Miglino, D., Jomaa, S., Rode, M., Isgro, F., & Manfreda, S. (2022). *Monitoring Water Turbidity Using Remote Sensing Techniques*. In EWaS5. EWaS5. MDPI. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022021063>.
7. Jin, T., & Liao, Q. (2019). *Application of large scale PIV in river surface turbulence measurements and water depth estimation*. In Flow Measurement and Instrumentation (Vol. 67, pp. 142–152). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.03.001>.

8. Lin, D., Grundmann, J., & Eltner, A. (2019). *Evaluating Image Tracking Approaches for Surface Velocimetry With Thermal Tracers*. In *Water Resources Research* (Vol. 55, Issue 4, pp. 3122–3136). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2018wr024507>.
9. Ljubicic, R. (2022) *SSIMS-Flow: Preprocessing tool for UAV image velocimetry*, <https://github.com/ljubicicrobert/SSIMS-Flow>.
10. Farnebäck, G. (2003). *Two-frame motion estimation based on polynomial expansion*. In *Image Analysis: 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003 Halmstad, Sweden, June 29–July 2, 2003 Proceedings 13* (pp. 363-370). Springer Berlin Heidelberg.