

BEZKONTAKTNO MERENJE PROTOKA U KANALIZACIJI

Doc. dr Dušan Prodanović, dipl. inž
Građevinski fakultet Beograd
eprodano@hikom.grf.bg.ac.yu

REZIME

Merenje protoka u otvorenim kanalizacionim kolektorima je hidraulički komplikovanije od merenja u cevima pod pritiskom. U takvim uslovima ne postoji najbolji metod, već je potrebno za svako merno mesto odabrati optimalnu metodu. U ovom radu su prikazane bezkontaktne metode merenja protoka, jedna već klasična na bazi postojanja nekog mernog objekta i dve nove metode na bazi merenja površinskih brzina: Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) metoda i radarska metoda. Za obe metode se daju u najkraćem osnove rada, prednosti i nedostaci. Kako su obe metode tek u povoju, za očekivati je da će već naredne generacije uređaja (posebno radarske metode) postati standardne za merenja u kanalizaciji.

KLJUČNE REČI: Merenje protoka u kanalizaciji, LSPIV, Radarske metode.

NONINVASIVE FLOW MEASUREMENT IN SEWER SYSTEMS

ABSTRACT

Flow measurement in open channel systems is much more demanding than flow measurement in pressurized pipes. For open channel flow measurements there isn't any "best method". Instead of that, for each measuring site the optimal measuring method has to be chosen. The noninvasive flow measurement methods are presented in this paper. The first one is well known method based on flow measuring structure and known relation between one measured depth and flow. The two other methods are innovative: one is the Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) and the other one is radar method. Both methods are based on remote measurement of surface velocity. For those methods some fundamentals are given, together with pros and cons based on current technology. Since both methods are still in development, much better sensors and systems are expected in the near future.

KEYWORDS: Flow measurement in sewer systems, LSPIV, Radar flow measurement

1. UVOD

Na većini kanalizacionih sistema u Srbiji i Crnoj Gori je bila dosadašnja praksa da se količine otpadnih voda koje se ispuštaju u recipijent ne mere. Količine upotrebljenih (fekalnih) voda se najčešće procenjuju na osnovu količina voda koje se zahvataju iz vodovodne mreže, a količine kišnih otadnih voda se računaju iz podataka o padavinama, uz «dogovaranje» o

srednjem koeficijentu oticaja. Jedini pouzdaniji pokazatelj količina ispuštenih voda se dobija na osnovu broja sati rada pumpi, u slučajevima kada je kota vode u recipijentu visoka pa je potrebno prepumpavanje.

Naravno da je ovakva dosadašnja praksa neodrživa i da je rezultat trenutne politike gazdovanja vodama. Zbog toga su podaci kojima se sada raspolaže na većini kanalizacionih sistema nepouzdati i ne bi trebalo da se koriste za projektovanje sistema za prečišćavanje otpadnih voda. Jasno je da se problemu pouzdanog merenja količina i kvaliteta otpadnih voda mora prići znatno ozbiljnije, uvažavajući sve specifičnosti kanalizacionih sistema, pozitivna svetska iskustva kao i razvoj savremenih mernih sredstava. Po pravilu, neophodno je napraviti prethodnu analizu izbora merne metode koja bi bila najbolje prilagođena svakom pojedinom mernom mestu, uz uzimanje u obzir lokalnih uslova, odnosa minimalnih i maksimalnih protoka, mogućnosti potapanja i rada pod usporom, taloženja materijala u profilu i slično. Projektom mernog mesta treba rešiti i pitanje kalibracije i verifikacije merila. Svaka posredna merna metoda (a u merenjima protoka u kanalizaciji sve metode su posredne) mora biti kalibrisana i procenjena margina greške pri različitim hidrauličkim uslovima.

Na žalost, merenja protoka i kvaliteta u kanalizacionim sistemima je znatno komplikovanije od sličnih poslova u vodovodnim sistemima. Poseban problem je ako se to radi na postojećem sistemu, koji po pravilu nije pravljen tako da omogući jednostavno merenje. Većina metoda koje su primenljive za merenje protoka čiste vode (u vodovodima), kod merenja u kanalizaciji ne daju dobre rezultate zbog taloga, nehomogenosti vode, rastvorenih materija koje se lepe na senzore i zidove kolektora kao i plivajućih predmeta koje nosi voda. Zbog toga se razvoj savremene merne opreme okreće ka bezkontaktnim metodama (takozvane daljinske metode), metodama koje mere protok bez direktnog kontakta između senzora i prljave vode. U ovom radu se daje kratak pregled takvih metoda, mogućnosti njihove primene, procena tačnosti i upoređenje sa savremenim kontaktnom metodama.

2. MOGUĆNOSTI BEZKONTAKTNOG MERENJA PROTOKA

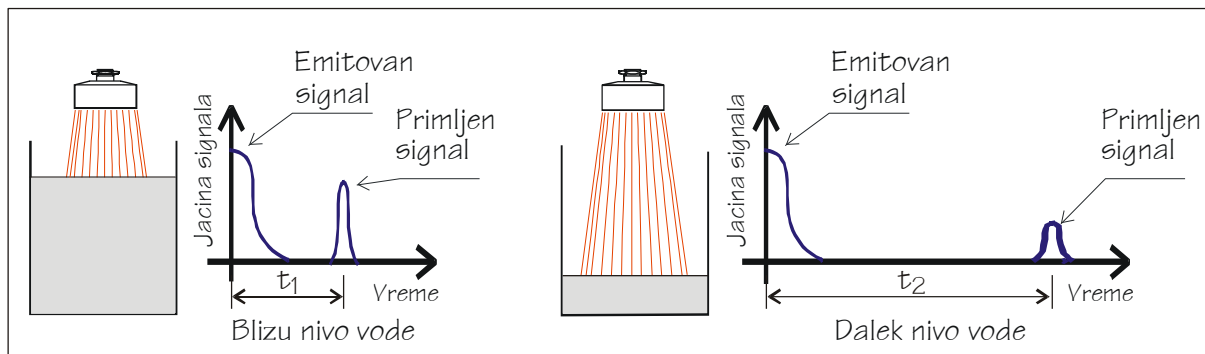
Bezkontaktno merenje protoka, ili neinvazivno merenje, podrazumeva da se merni senzor nalazi van domašaja vode. Takav sistem je u potpunosti zaštićen od problema prljanja, udaranja senzora vučenim predmetima, kačenja kesa na senzor i slično. Sa stanovišta rada i održavanja mernog sistema, bezkontaktno merenje sigurno predstavlja veoma značajno poboljšanje: čak i po cenu nešto niže tačnosti dobijenog rezultata, merni sistem će raditi nedeljama ili mesecima bez značajnijeg održavanja.

U osnovi, dve su mogućnosti da se bezkontaktno meri protok u otvorenim sistemima, kakvi su kanalizacioni sistemi: merenjem jedne dubine uz poznavanje hidrauličke veze između te dubine i protoka, ili merenjem površinske brzine i dubine.

2.1. MERENJE JEDNE DUBINE

Sistemi za merenje protoka u otvorenim tokovima, koji se zasnivaju na čvrstoj hidrauličkoj vezi (veza Q/H) između jedne dubine i protoka se koriste od davnina. U takvim sistemima mora postojati neki «hidraulički objekat» kao što je bočno suženje, oštroični ili široki preliv, prag i slično. Svi objekti rade na principu razdvajanja uzvodnih i nizvodnih uticaja promenom režima tečenja na objektu i dozvoljavaju jednoznačan proračun protoka samo na

osnovu jedne, uzvodne dubine. Zbog sigurnosti da objekat «radi» u predviđenim hidrauličkim uslovima, često se stavlja još jedan senzor dubine, sa nizvodne strane.



Slika 1. Bezkontaktno merenje nivoa pomoću ultrazvuka ili radara

Ovakav sistem za merenje protoka je bezkontaktno ako se merenje dubine obavi ultrazvučnim ili mikrotalasnim (radarskim) sondama, čiji je bazični princip rada prikazan na slici 1. Na vreme putovanja poslatog impulsa do površine vode i nazad utiče temperatura vazduha a na kvalitet primljenog signala dosta utiče i površina vode – da li na površini ima pene, talasa i slično.

Metodu merenja protoka preko jedne dubine treba koristiti kada god za to postoje mogućnosti. Sa kvalitetnim projektom i dobrim izvođenjem mernog mesta, dobija se pouzdano i tačno merenje protoka, uz malo učešće sofisticirane merne opreme. Naravno, i takvo merno mesto treba proveriti alternativnim metodama i to u svim režimima rada.

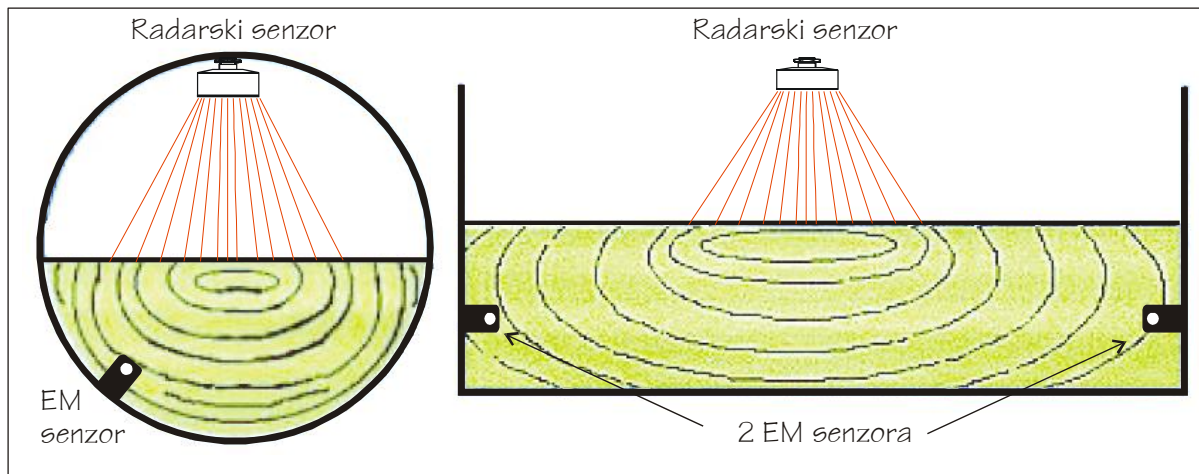
Na osnovu iskustva autora, prilikom nabavke opreme za merenje nivoa, treba dobro obratiti pažnju na uslove rada sonde za nivo. Mnogi proizvođači daju karakteristike senzora smatrajući da će se sonde ugraditi u «talasovode», cevi koje idu od sonde do dna kolektora. Time sonda dobija lep i jasan «odjek» od površine vode, ali to istovremeno kod merenja u kanalizaciji znači da se od bezkontaktnog sistema prelazi na kontaktne, a to opet znači da ostaju svi problemi oko prljanja talasovoda, kačenja kesa, zatvaranja ulaznih rupa i slično. Takođe, treba obratiti pažnju na potrebnu tačnost merenja nivoa vode: ultrazvučni pretvarači rade sa santimetarskom tačnošću, dok skuplji mikrotalasni sistemi sa milimetarskom tačnošću.

2.2 MERENJE POVRŠINSKE BRZINE I DUBINE

U uslovima kada nije moguće postaviti merni objekat, na osnovu samo jedne dubine nije moguće tačno odrediti protok. Potrebno je znati u izabranom preseku i kolika je srednja profilska brzina. Kod kontaktnog merenja se u takvim slučajevima koriste sonde za merenje brzine (elektromagnetne, hidrometrijska krila ili savremene ultrazvučne) postavljene u jednoj ili više tačaka profila. Kalibracijom na svakom pojedinom mernom mestu se određuje veza između merene brzine (ili merenih brzina) i srednje profilske brzine.

Daljinsko, bezkontaktno merenje brzine je moguće ostvariti jedino merenjem površinske brzine toka. Na slici 2 je prikazan poprečni presek kroz kružni i pravougaoni kolektor, sa ucrtanim rasporedom brzina (prilično simetričnim, što najčešće nije slučaj). Kontaktno merenje brzine podrazumeva postavljanje jednog ili više senzora pri dnu ili na bokove kolektora, čime se meri brzina u jednoj tački (ili savremenim ADCP uređajima i raspored brzina po nekom od preseka). Sa druge strane, ako se postavi uređaj iznad gornje maksimalne

kote vode koji može da snimi površinsku brzinu, dobiće se neka osrednjena brzina koja će zavisiti od obuhvaćene površine vode. Da bi se uspostavila veza između merene površinske brzine i stvarne srednje profilske brzine, potrebno je kalibrisati sistem za svaku pojedinu mernu lokaciju, snimanjem stvarnog rasporeda brzina.



Slika 2. Raspored brzina po preseku, za kružnu cev i pravougaoni profil. Na površini su maksimalne brzine u sredini preseka a manje brzine uza zid. Kontaktним merenjem dobijaju se brzine u jednoj tački pomoću EM sonde a bezkontaktnim, odozgo, osrednjena brzina sa veće površine

Koje su mogućnosti za bezkontaktno merenje površinske brzine? Trenutno su na raspolaganju dve metode. Prva je vizuelna, zasniva se na fotografskom snimanju površine vode u kratkim vremenskim razmacima i automatskoj obradi tih fotografija tako da se prepoznaju pojedini elementi na površini i da se oni prate kroz vreme. Ta metoda se naziva Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV – određivanje brzine prateći deliće u velikim razmerama). Druga mogućnost je da se upotrebe radari za merenje brzine, zasnovani na Doplerovom pomaku (slično kao radari za merenje brzine automobila). U nastavku rada će se dati kratko objašnjenje obe tehnologije uz komentare o upotrebljivosti za merenja u kanalizaciji.

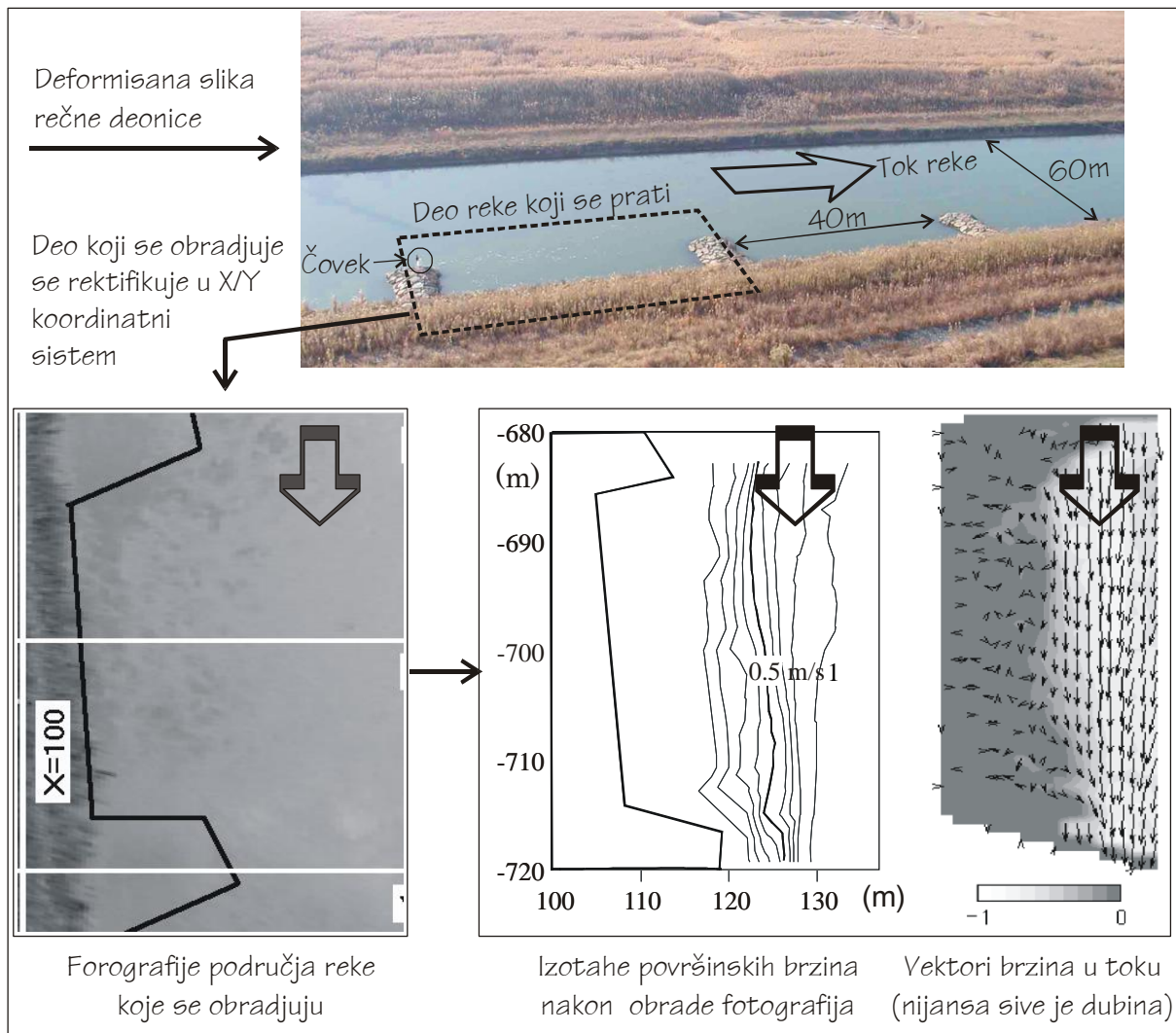
3. LARGE-SCALE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (LSPIV)

3.1. PRINCIP MERENJA

Osnovni princip LSPIV metode je automatsko prepoznavanje oblika objekata na površini i praćenje njihovog kretanja kroz vreme. Za obradu se obično koriste fotografski snimci, napravljeni bilo posebnim kamerama sa visokom rezolucijom i preciznim merenjem vremena (za laboratorijske uslove) ili klasičnom foto-opremom za rad u terenskim uslovima. Inače, sama PIV metoda (Particle Image Velocimetrz – merenje brzine delića) je razvijena za laboratorijske uslove, gde se laserskim svetlom prosvetljava tok, a kamera beleži kretanje veštački dodatih trasera. Međutim, pojedini autori su pokazali da se uspešno ista metoda može koristiti i za velike tokove [1].

Na slici 3. je prikazan jedan od primera upotrebe LSPIV metode za merenje protoka u reci kao i određivanje oblika strujnog polja u blizini napera. Sa visokog stuba se kamerom snima deo toka (označen na gornjem delu slike 3). Snimak se geometrijski koriguje (dole levo, na

slici 3) a zatim se iz serije snimaka načinjenih sa vremenskim korakom Δt posebnim algoritmima prate trajektorije delića na površini vode (prirodni talasi ili veštački ubačeni traseri) i dobijaju linije istih površinskih brzina i vektori površinskih brzina za ceo posmatrani prostor (dole desno, slika 3).



Slika 3. Primer primene LSPIV metode za merenje rasporeda brzina u reci. Na osnovu površinskog rasporeda brzina, moguće je korišćenjem matematičkog modela dobiti protok.

Daljom obradom dobijenih podataka, uzimanjem u obzir geometrije korita, moguće je formirati matematički model strujanja u preseku i na osnovu dobijenih rezultata izračunati protok. Druga, znatno lošija varijanta je da se bez primene modela tečenja u posmatranom preseku, protok odredi na osnovu procene veze između osrednjene površinske brzine i stvarne srednje profilske brzine.

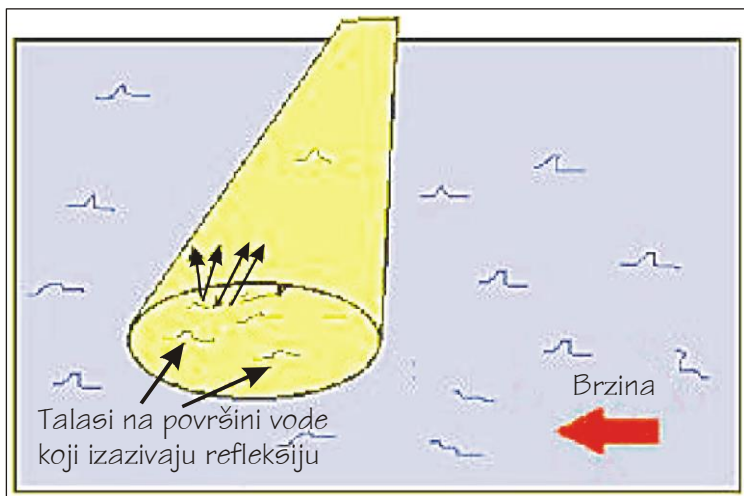
3.2. PREDNOSTI I NEDOSTACI LSPIV METODE

Prikazana LSPIV metoda je još uvek u fazi ispitivanja. Mada se oprema za merenje sastoji od relativno jeftine kamere (u poređenju sa drugom mernom opremom), uslovi za korišćenje kao i algoritmi za obradu snimaka još uvek nisu takvi da se mogu jednostavno koristiti na bilo kom mernom mestu.

Naravno, očekuje se da će se u bliskoj budućnosti, razvojem računarske opreme i metoda obrade fotografija, napraviti da metoda bude znatno robusnija. Problem u primeni ove metode je i potreba da se za svako merno mesto ustanoviti šta se može koristiti kao traser i da se prema tome prilagodi oprema i algoritmi za obradu signala.

4. RADARSKO (I ULTRAZVUČNO) MERENJE POVRŠINSKE BRZINE

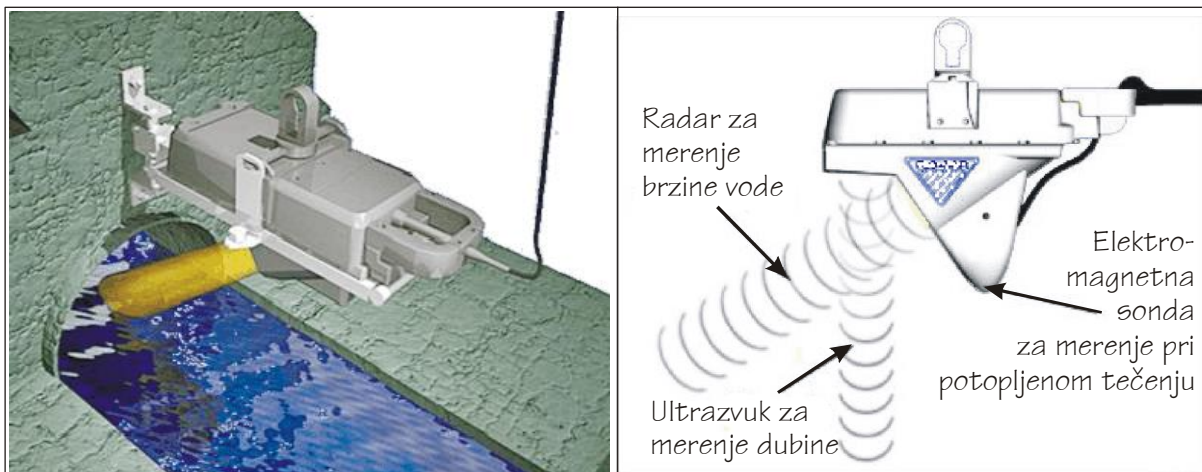
4.1. PRINCIP MERENJA



Slika 4: Mali površinski talas izazivaju Doplerov pomak emitovanog radarskog ili ultrazvučnog impulsa. Frekventni pomak je proporcionalan brzini talasa.

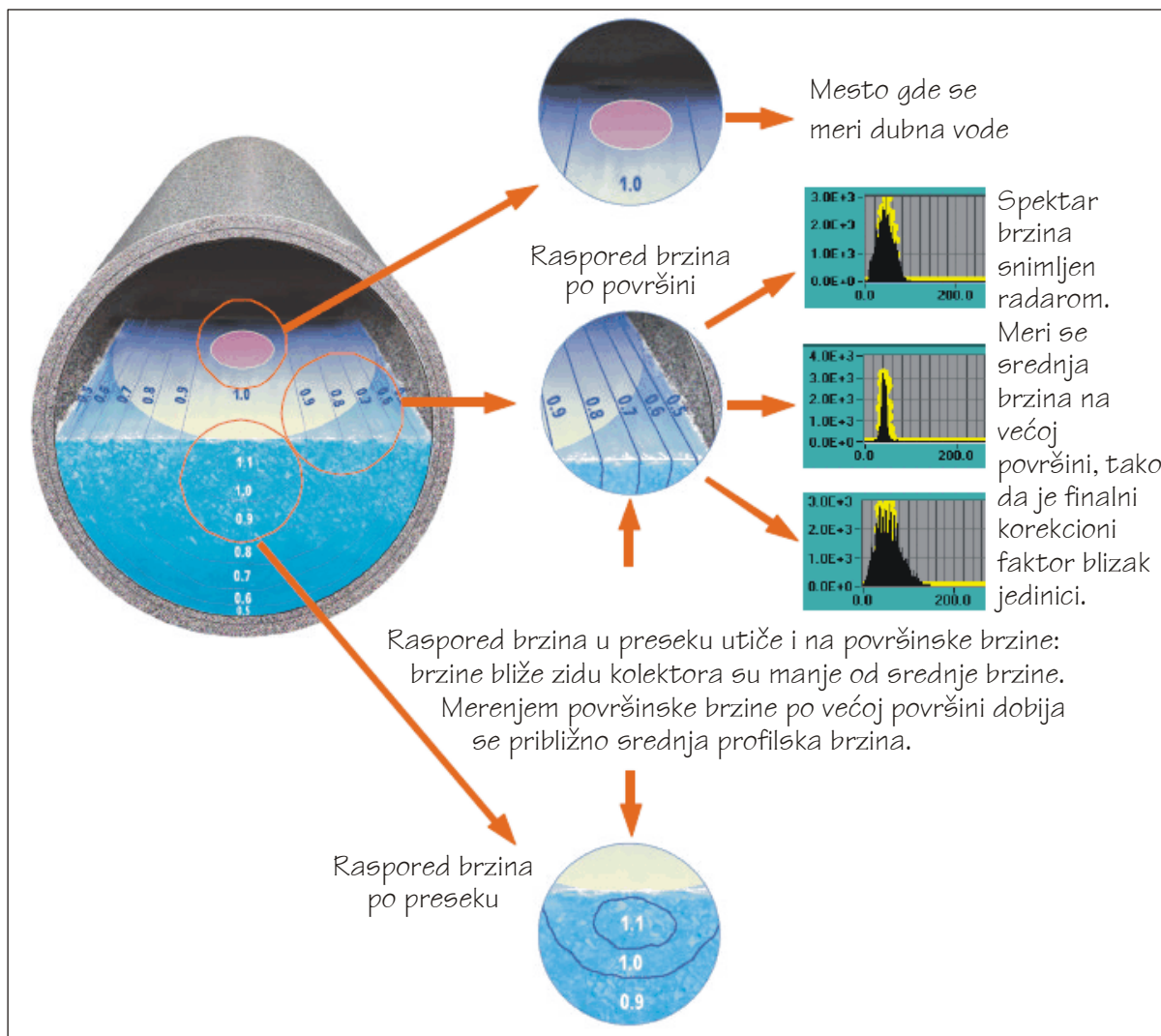
je poznat kao Doplerov frekventni pomak i on je osnova svih radarskih metoda merenja brzine. Na slici 4 je prikazana površina vode, koju pod određenim uglom «obasjava» radarski snop. Delići koji se nalaze na površini vode i koji se kreću bliskom brzinom kao što je površinska brzina, prave jasnu refleksiju koju «hvata» radar i na osnovu nje meri brzinu. Refleksiju će izazivati i sami talasići na površini.

Radarsko ili ultrazvučno merenje površinske brzine se bazira na merenju Doplerovog pomaka reflektovanog talasa. Naime, kada se iz izvora signala emituje kratak impuls frekvencije F , on će putovati do neke površine i od nje će se odbiti. Do prijemnika će se vratiti signal sa vremenskim kašnjenjem ali i sa promenjenom frekvencijom $F \pm \Delta F$ gde je promena frekvencija proporcionalna brzini kojom se površina od koje se odbio signal približava (pozitivan ΔF) ili udaljava (negativan ΔF). Ovaj fenomen



Slika 5. Radarski uređaj postavljen u šahtu i skica pravaca duž kojih se meri brzina i dubina

Za merenje površinske brzine moguće je koristiti izvore signala u ultrazvučnom opsegu ili mikrotalasnom. Ultrazvučna tehnika je dosta jeftinija, ali je i podložnija površinskim poremećajima, dok je mikrotalasno zračenje u opsegu 24 GHz znatno bolje za merenja jer i najmanji površinski talasi izazivaju dovoljno refleksije.



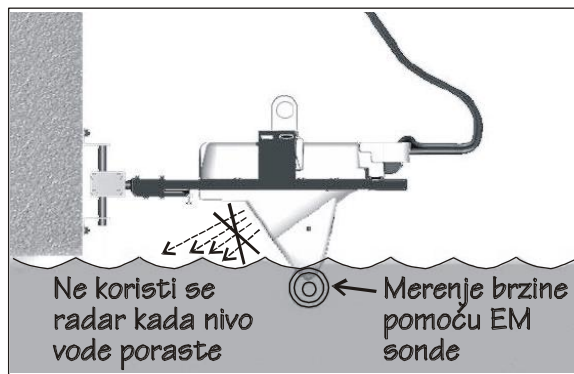
Slika 6. Raspored brzina u kružnom kolektoru i površina od koje se meri brzina i dubina

Na slici 6 je prikazana kompletna procedura merenja: ultrazvučnom sondom se meri dubina na sredini kolektora. Za poznat presek (koji može biti i složeni), na osnovu dubine se određuje proticajna površina. Radarskim snopom se u znatno širem području određuje brzina, kao srednja vrednost svih primljenih odjeka. Brzina se određuje analizom primljenog spektra. U zavisnosti od lokalnih uslova, izmerena brzina se množi sa korekcionim faktorom i sa proticajnom površinom da bi se diobio protok.

4.2. PRIMENA RADARSKE METODE U KANALIZACIJI

Radarsko merenje protoka je relativno lako za korišćenje. Potrebno je odabrati dugačku pravu deonicu kolektora, kako bi se izbegla nesimetričnost u rasporedu brzina na površini. Za odabranu lokaciju se precizno izmeri geometrija kolektora i položaj sonde i to se

u programu koji se dobija uz sondu, unese ili kao veza proticajne površine od dubine ili kao geometrija preseka.



Slika 7. Kada dođe do potapanja radarske sonde, može se primeniti drugi uređaj za merenje brzine u jednoj tački



Slika 8. Primer montaže radarskog senzora u velikom kanalizacionom kolektoru

Za izabranu lokaciju je potrebno obaviti i kalibraciono merenje, koristeći neku od metoda merenja brzine u toku i proračuna protoka integracijom polja brzine. Ako je moguće, to je potrebno uraditi pri nekoliko dubina u kolektoru i režima tečenja. Bez kalibracije na terenu, proizvođači ovakvih uređaja obično navode da će tačnost merenja protoka biti oko 5% ali je realnije očekivati tačnost u opsegu od 10%.

U kišnim kolektorima se često javlja i povremeno tečenje pod pritiskom. Na slici 7 je prikazan slučaj kada kolektor dolazi pod pritisak i kada radarski sistem prestaje da radi, jer nema dovoljno udaljenja od površine vode (ili je skroz potopljen). U takvim slučajevima je moguće senzor opremiti sa drugom sondom za kontaktno merenje brzine (na slici je nacrtana Elektro Magnetna sonda, ali to može biti i ultrazvučna sonda) tako da se u periodima potopljenosti senzora i dalje dobija informacija o brzini. Naravno, kalibracija ove druge sonde se mora obaviti nezavisno od radarske sonde. Takođe, po prolasku poplavnog talasa i spuštanju nivoa vode u kolektoru, može biti potrebno čišćenje te druge sonde, dok će radarska sonda u većini slučajeva nastaviti da radi i ako ima na njoj taloga.

4.3. PREDNOSTI I NEDOSTACI RADARSKE METODE

Osnovna prednost radarske metode je u jednostavnosti primene. Montaža se izvodi iznad površine prljave vode, te nisu potrebne nikakve mere zaštite. Takođe, u toku eksploatacije mala je šansa da se nešto zakači na sondu i time blokira njen rad ili, još gore, promeni kalibracione podatke pa sonda daje pogrešan protok. Ukupna tačnost merenja protoka u mnogome zavisi od uslova ugradnje i obavljenih kalibracionih merenja. U proseku se može smatrati da je klasa merenja bolja nego kod merenja protoka potopljenim sondama za brzinu u jednoj tački a u rangu sistema koji mere raspored brzina u jednom preseku.

Najveća mana radarskih sondi je u njihovoj ceni. Početna investicija je barem duplo veća od drugih načina merenja. Takođe, ova sonda ima velikih problema u merenju malih brzina i povratnih tokova (kada je kolektor pod usporom). U tim situacijama treba koristiti dvostruki radar (radar koji meri u dva smera).

Za ispravan rad potrebno je da postoje baram i najmanji površinski talasi koji će reflektovati radarski zrak, uz uslov da ti talasi moraju da putuju sa vodom, istom brzinom. Ako se uređaj postavi tako da bude u zoni uticaja vetrova, koji prave talase, dobijaće se pogrešna merenja. Proizvođači radarskih sistema se intenzivno bore sa tim problemima i za očekivati je da će već sledeća generacija uređaja biti znatno kvalitetnija.

Kao i većina sistema za merenje protoka u kanalizaciji koji koriste merenje dubine vode odozgo, kroz vazduh, da bi odredili proticajnu površinu, tako i ova metoda ne može tačno da radi u uslovima velikih i promenljivih nanosa. Jedina povoljnost je što nanos sada neće uticati na merenje površinske brzine.

5. ZAKLJUČAK

Merenje protoka u kanalizaciji i velikim kolektorima je komplikovano ali i neophodno. Za svako merno mesto je potrebno razmotriti uslove merenja. Ako postoje hidraulički i konstruktivni uslovi, treba obavezno ići na varijantu izgradnje mernog profila i na merenje samo jedne dubine. U svim ostalim slučajevima, pored dubine je potrebno znati i brzinu.

U ovom radu su prikazane dve bezkontaktne metode merenja brzina, pogodne za merenja u prljavim vodama kakve su vode u kišnim i fekalnim kolektorima. LSPIV metoda izgleda jednostavno i obećavajuće, pogotovu što može jednostavno da se primeni i za merenje protoka vode po ulicama u toku poplava, u rekama, kao i u velikim i malim kolektorima, uz dobijanje pouzdanih podataka o protocima. Za očekivati je da će u narednih 5 do 10 godina ta metoda da se razvije do nivoa standardne upotrebe.

Radarska metoda je već danas dostupna kao komercijalna metoda merenja površinskih brzina. Metoda je još uvek relativno skupa, mada su znatno manji kasniji troškovi eksploatacije. Kao i sve druge merne metode i radarska metoda zahteva dobro merno mesto, sa dugom pravom uzvodnom deonicom. Ako se želi merna tačnost ispod 5% u svim režimima tečenja, potrebno je obaviti detalju kalibraciju. Takođe, za dobar rad ove metode, mora biti ispunjen uslov o postojanju dovoljnog broja površinskih refleksija od talasa i drugih delića koje nosi voda, pri čemu se predpostavlja da oni putuju sa vodom istom brzinom kao i što je površinska brzina.

LITERATURA

1. Fujita I., Y. Muto, Y. Shimazu, R. Tsubaki i S. Aya (2003) *Velocity Measurements around Non-submerged and Submerged Spur Dykes by Means of Large-Scale Particle Image Velocimetry*. IAHR 2003, Thessaloniki.
2. Krajewski J.L.B. (2000): *Mesures en Hydrologie Urbane et Assainissement*. Technique and Documentation.
3. Marsh McBirney (2005) Utilizing Radar Technology to Measure Flow. Sa sajta: www.marsh-mcberney.com
4. Prodanović D. (2003) *Merenja u hidrotehnici*. Predavanja na redovnom kursu na Građevinskom fakultetu u Beogradu.
5. Prodanović D. (2005) *Kontinualno merenje nivoa i protoka na crpnim stanicama Kanalizacije Novog Sada, južnog sliva GC1 i severnog sliva GC2: Izbor merne metode i merne lokacije*. Investitor: Vodovod i kanalizacija, Novi Sad.