

Elektromagnetne sonde za merenje protoka otpadnih voda – primer Beogradske Kanalizacije

Mile Cvitkovac, Svet Instrumenata, Krajinska 1, 11351 Vinča, cvitkovac@krstarica.com

V.Prof. dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet Beograd, Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, eprodano@hikom.grf.bg.ac.rs

Veljko Vučurević, Institut Mihailo Pupin, 11060 Volgina 15, Beograd, veljko.vucurevic@automatika.imp.bg.ac.rs

Apstrakt: Savremeni kanalizacioni sistemi su, za razliku od vodovodnih sistema, još uvek slabo pokriveni uređajima za merenje protoka. Pored neophodnosti merenja količina (i kvaliteta) voda koje se ispuštaju u recipijente, važno je poznavati i realne protoke i dubine u samoj mreži, kao i protoke na kanalizacionim crpnim stanicama, koje su jedna od većih potrošača energije. U radu se daje prikaz razvijenih elektromagnetnih sonda, posebno prilagođenih za merenja u kanalizacionim sistemima. U zavisnosti od uslova u mernom preseku, moguće je postavljanje jedne ili više sonda, čime se povećava tačnost i pouzdanost merenja. Razvijene sonde su postavljene u Beogradskom kanalizacionom sistemu i u ovom radu su prikazani prvi rezultati merenja.

Ključne reči: Elektromagnetne sonde za brzinu, merenje protoka u kanalizaciji

1. Uvod

Kanalisanost teritorija Beograda trenutno obuhvata oko 15.000 ha i opslužuje oko 900.000 stanovnika. Mrežu čini 204 km kolektora veličine od 0,6m x 1,1m do 5,5m x 5,5m, zatim 1.376 km cevne mreže od prečnika Ø250mm do Ø600mm, 32.300 slivnika koji skupljaju atmosfersku vodu sa površine terena i uvode u kanalizaciju, 51.000 kanalizacionih priključaka, 30 crpnih stanica kojima se ukupno 63,5 m³/sec vode prepumpava i niz ostalih objekata (ulivne i izlivne građevine, retnzije, prelive, istovarište auto cisterni i drugo). Trenutna kanalisnost sistemom za odvođenje upotrebljenih voda je 75% dok je kanalisnost sistemom za odvođenje atmosferskih voda 65%, pri čemu je trend da kanalizacioni sistem postepeno prelazi sa opšteg sistema na separacioni.

Tokom 2006. i 2007. počelo je osavremenjavanje sistema za praćenje rada kanalizacije [1]. Uprava za vode gradskog sekretarijata za komunalne i stambene poslove grada Beograda je finansirala izgradnju i opremanje prvih 8 mernih mesta na najvećim izlivima iz BKS-a [2, 6]: Sajmište, Ušće (na gravitacionom by-pass-u), Lasta, Dorćol, Istovarište, Ada Huja 1 i 2 i Višnjica. Procenjuje se da je sa ovih 8 mernih mesta obuhvaćeno oko 80% količina voda koje se ispuštaju u Savu i Dunav. Sva merna mesta su opremljena uvoznim Ultrazvučnim dopler uređajima za kontinualno merenje protoka i nivoa vode i sa sensorima za kontinualno merenje parametara kvaliteta vode. Mereni podaci se GPRS vezom prosleđuju SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sistemu oformljenom na jednom PC-ju standardnih performansi.

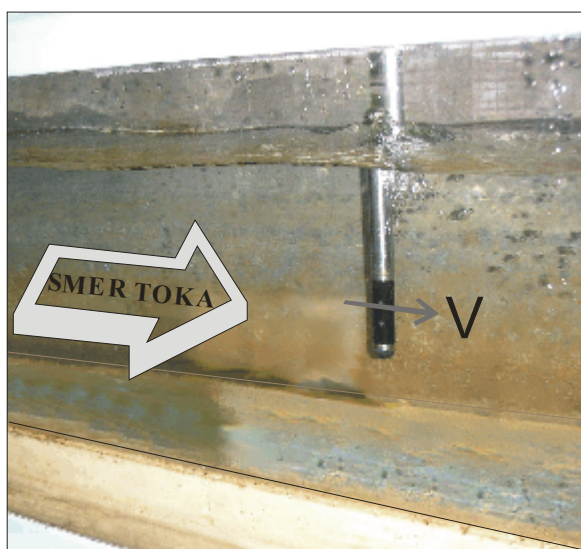
Druga faza modernizacije praćenja rada BKS je počela 2008. godine kao deo Naučnog projekta Republike Srbije, Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj. Cilj ovog projekta je bio

da se opremanje novih mernih lokacija obavi domaćom opremom kao i da se razvije domaća SCADA kojoj je omogućen pristup preko standardnog WEB interfejsa. U okviru projekta, uspostavljena su sledeća merna mesta [7]: crpna stanica Zemun polje (protok na dva cevovoda, nezavisno), fekalna crpna stanica Karađorđev trg (merenje protoka na 4 cevovoda nezavisno), crpna stanica Ušće (ukupni protok za vreme rada crpnih agregata) i izliv Istovarište, kod Pančevačkog mosta. Kompletnu telemetriju, SCADA-u i sav prateći hardver i softver su razvili stručnjaci Instituta Mihailo Pupin, koji je i bio nosilac naučnog projekta.

Za potrebe merenja protoka odlučeno je da se koriste elektromagnetna merila, pre svega zbog svoje linearne skale, tačnosti i ponovljivosti, kao i zbog širokog mernog opsega brzina od par mm/s do više m/s. Domaća firma Svet Instrumentata je razvila potpuno novu seriju elektromagnetnih sondi za merenje brzine vode. Sonde su posebno prilagođene za montažu i uslove rada u kanalizaciji, bilo u potisnim cevovodima, pod pritiskom, ili u kanalima i kolektorima sa tečenjem sa slobodnom površinom vode. U ovom radu se daju osnovni podaci o razvijenim sondama, kao i dobijeni rezultati merenja na nekoliko lokacija u Beogradskom kanalizacionom sistemu.

2. Elektromagnetne sonde prilagođene fekalnim vodama

Merenje protoka, odnosno brzine fluida korišćenjem Faradejevog elektromagnetnog principa indukcije se zasniva na sledećem [8]: voda je provodnik koji se kreće određenom brzinom V kroz elektromagnetno polje B koje pravi davač, pa proporcionalno brzini kretanja vode indukuje se (mali) napon E na elektrodama. Ovaj princip merenja se već duže vreme koristi u vodovodnim sistemima (popularni Elektromagnetni merači protoka), gde se elektromagnet za pravljenje magnetnog polja nalazi oko cevi, voda je znatno čistija a proticajni profil poznat i jednak poprečnom preseku cevovoda [3, 4].



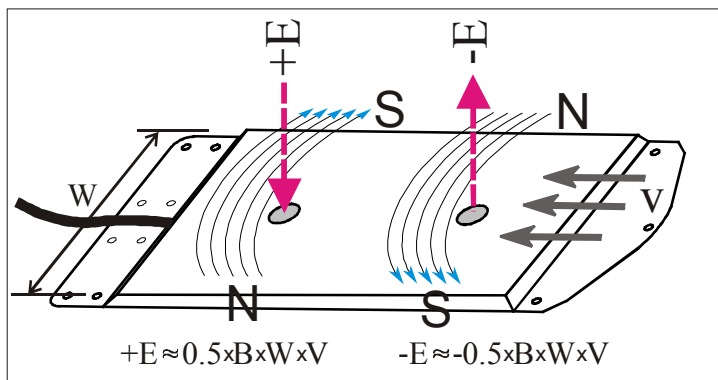
Slika 1. Elektromagnetna sonda PipeLog18 u laboratorijskom kanalu (sa jednim staklenim zidom)

Za merenje brzine vode i proračun protoka, često se koriste i Elektromagnetne sonde (slika 1). Postavljanjem u tok vode, sonda meri brzinu vode u relativno maloj zoni (smatra se da je merenje u tački). Pomeranjem sonde po celom preseku, moguće je dobiti pravi raspored brzina i izračunati protok. Ovakve sonde nije moguće trajno koristiti u kanalizaciji, pre svega zbog brzog nagomilavanja otpadaka na telu sonde, koji blokiraju elektrode.

Razvojem novih Elektromagnetnih sondi prilagođenih merenjima u prljavoj vodi je trebalo rešiti tri važna problema: konstrukcionu geometriju, otpornost na nečistoće i povećanje merne zone u kojoj sonda integriše brzinu. Prvi problem je rešen ravnom konstrukcijom sonde (slika 2), koja sada može da se montira direktno

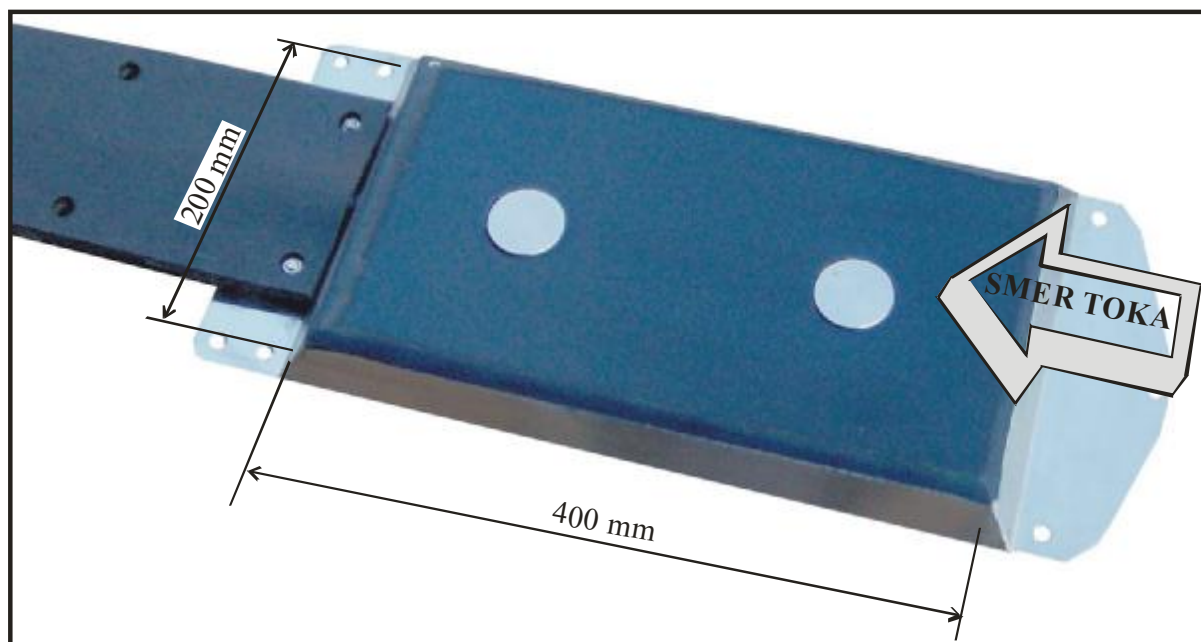
na zid kanalizacionog kolektora, a konstrukcija je takva da ne dozvoljava kačenje prljavštine

na sondu i blokiranje mernih elektroda. Povećanjem mernih elektroda postignuto je da sonde mogu da rade čak i u uslovima kada preko sonde padne talog, sve dok je njegoa provodnost ispod kritične.



Slika 2. Konstrukcija ravne Elektromagnetne sonde

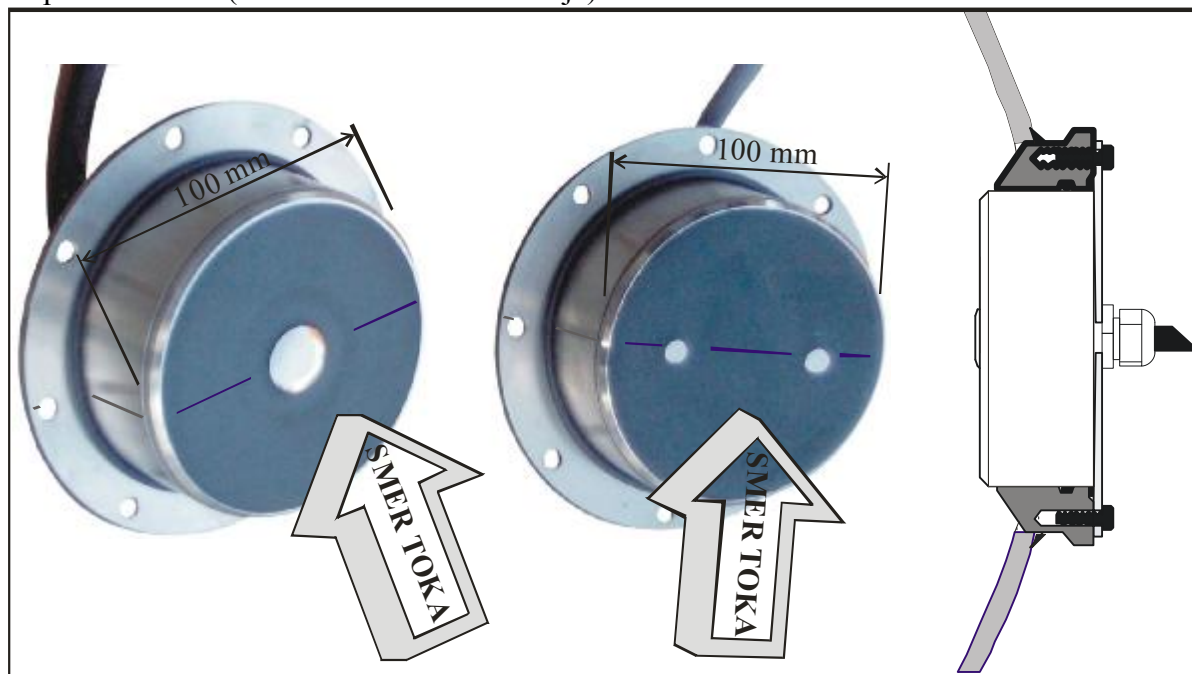
Oblikovanjem magnetnog polja, samom konstrukcijom sonde, povećan je merni domen. Za većinu kanalizacionih kolektora, kao optimalno rešenje je usvojena ravna sonda veličine 200x400 mm (slika 3) mada po istoj tehnologiji je moguće napraviti sonde i drugih veličina. Sonde se ugrađuju na zid kolektora pri minimalnom proticaju, pod vodom ili na nosač.



Slika 3. Dimenzije i izgled ravne EM sonde predviđene za montažu u kolektore sa unutrašnje strane, na zid kolektora

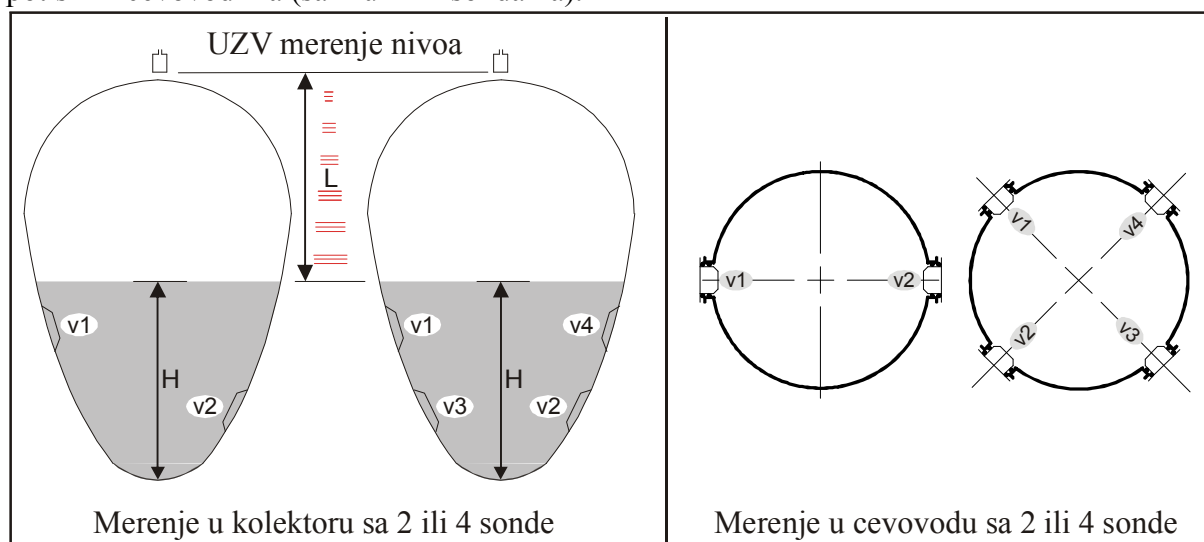
Na slikama 3 i 4 je prikazan izgled dve verzije sonde koje su napravljene i montirane na Beogradskom kanalizacionom sistemu. Ravna sonda (slika 3) ima efektivnu mernu zonu koja je približno jednaka polovini širine sonde W , pri čemu je veći doprinos integralu brzina koje su bliže sondi (kao i što je doprinos tih brzina veći u ukupnom protoku). Kod okruglih sonde, napravljene su dve verzije geometrije: sa dve elektrode (srednji deo slike 4) gde je magnetno polje tako orijentisano da vektor brzine vode mora da bude upravan na pravac elektroda, a zona prodiranja je $1/4$ prečnika sonde (25 mm). I ovde je primenjen pun diferencijalni pristup tako da je za merenje dovoljna samo jedna sonda. Druga je verzija sa samo jednom elektrodom (levi deo slike 4), asimetričnog dizajna sa dvostruko većom dubinom prodiranja ($1/2$ prečnika, 50 mm). Ovaj sonda nije diferencijalna te je za merenje neophodno ugraditi

barem dve po preseku. Sve elektromagnetne sonde imaju punu kosinusnu zavisnost izlaznog signala od ugla dostrujavanja vode, tako da ih je moguće koristiti i za snimanje protostornog rasporeda brzina (dvodimenzionalno merenje).



Slika 4. Kružna EM sonda predviđena za ugradnju u cevovode pod pritiskom, sa spoljne strane (na slici desno je dat presek kroz sondu montiranu na cev)

Jedan od osnovnih zahteva pri konstrukciji elektromagnetnih sondi za merenje protoka u kanalizaciji je bila mogućnost postavljanja više sondi u jednom mernom preseku. Na slici 5 je data skica montaže po dve ili četiri sonde u preseku, u kolektorima (sa ravnim sondama) i u potisnim cevovodima (sa kružnim sondama).



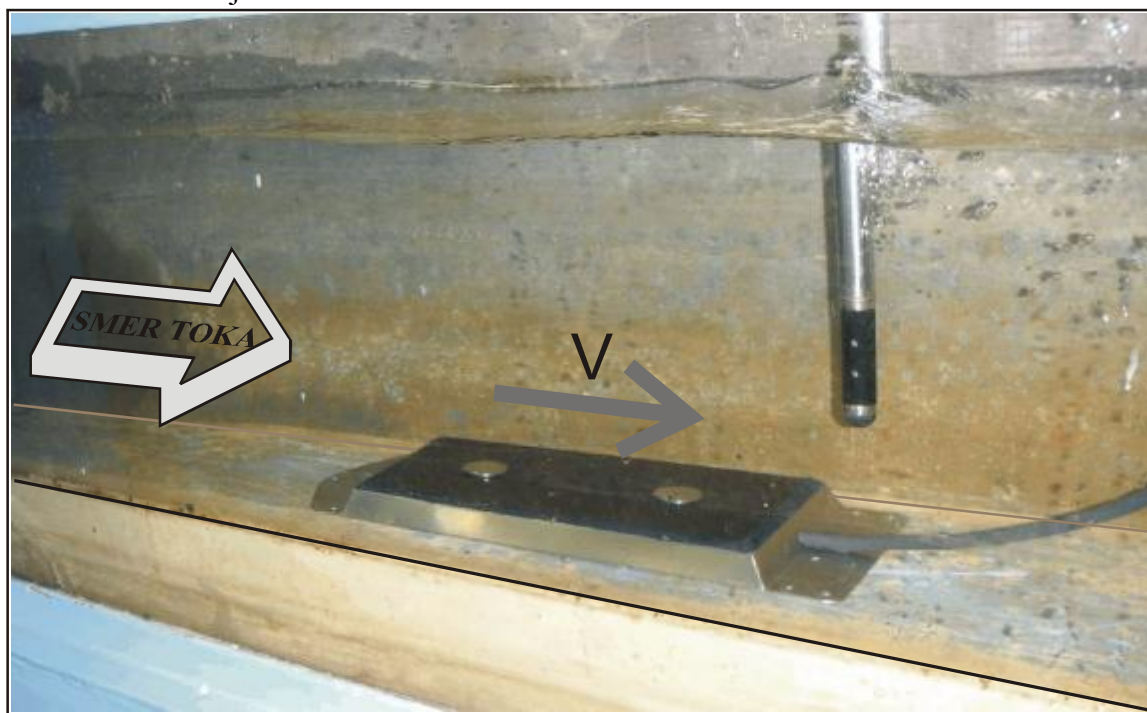
Slika 5. Više sondi u preseku povećava tačnost i robusnost merenja protoka

Postavljanjem više sondi u mernom preseku se povećava se tačnost merenja, jer se bolje meri efektivna brzina za različite profile tečenja. Posebna pažnja je posvećena situaciji kada senzori nisu potopljeni. Zbog toga se osim merenja brzine, isti senzori koriste i za merenje

elektroprovodnosti vode i tako vrši detekcija njihove potopljenosti. Time je omogućeno da instrument detektuje i isključi iz obračuna one senzore koje nisu pod vodom. Takođe, pored povećanja tačnosti merenja protoka, povećava se i osetljivost merenja malih brzina, tako da je moguće u punoj tačnosti meriti i brzine oko ili ispod 0.2 m/s. Prag osetljivost je oko 1mm/s.

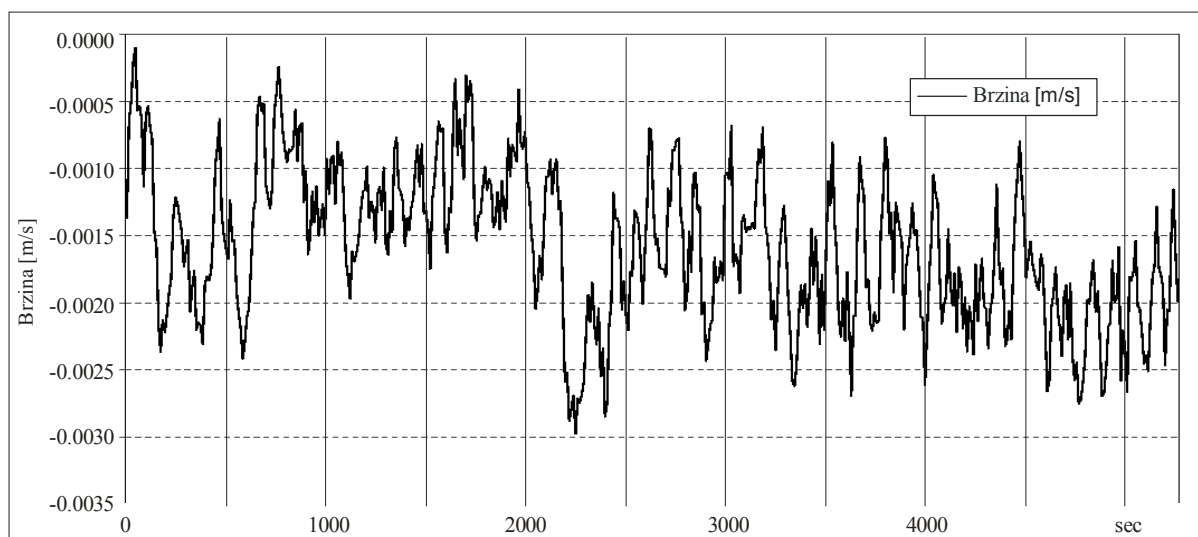
3. Ispitivanja sondi

U Laboratoriji Građevinskog fakulteta, na eksperimentalnoj instalaciji su ispitivane karakteristike sondi i određen je optimalan odnos dimenzija sondi, dubine prodiranja magnetnog polja i potrebne tačnosti. Na slici 6 je prikazano merenje stvarnog rasporeda brzina pomoću PipeLog18 EM sonde (gornja sonda): za snimljen raspored brzina računskim putem je proverena očekivana dubina integracije ravne sonde (na dnu kanala), nakon njene brzinske kalibracije.



Slika 6. Provera integracione zone za ravne sonde pomoću PipeLog18 EM sonde

Kako je predviđena montaža više elektromagnetnih sondi u jednom preseku, u laboratoriji je proveravan i rad takvog sistema u prelaznim režimima, kao i u režimima blokiranosti pojedinih elektroda. Na slici 7. je prikazan snimljen šum i ofset dve kružne sonde montirane na cevovod prečnika FI350 mm, pri protoku 0 L/s. Sa slike se vidi postojanje malog ofseta od -1.5 mm/s i sopstvenog šuma sonde koji je manji od 2 mm/s. Pri tome, merenja su obavljena sa brzinom uzorkovanja od 10 sekundi. U realnim uslovima, gde se koriste znatno manje brzine, osrednjavanjem će šum pasti još za red veličine.



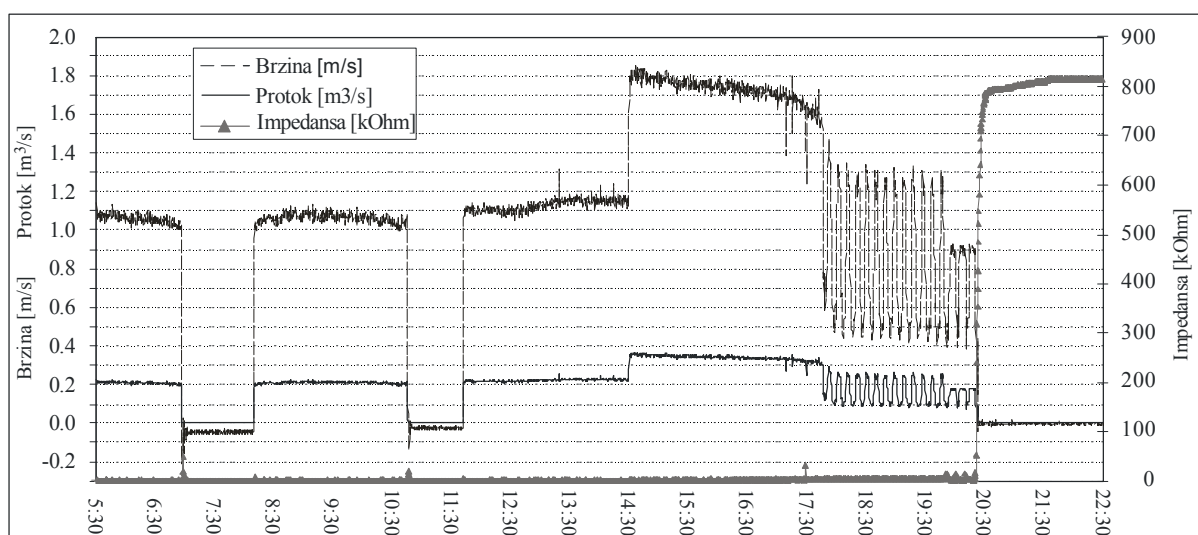
Slika 7. Šum i ofset para okruglih sondi LOG100, vreme semplovanja 10 sekundi

U okviru opsežnih ispitivanja sondi, proveravan je i rad više sondi postavljenih na različitim visinama, u režimu postepenog spuštavanja slobodnog nivoa vode, tako da najvišlje sonde ostaju na suvom, kao i rad sa talogom koji prekriva elektrode sonde.

4. Rezultati merenja

Na potisnim cevovodima kanalizacione crpne stanice Zemun Polje (2xFI500mm) su ugrađene po dve kružne sonde (slika 4) u mernom preseku. Na ulazu u crpni bazen Ušća su postavljene, dve ravne sonde (slika 3) u mernom preseku, na istoj koti (kolektor dimenzija 110x165 cm), dok su na izlivu Istovarište postavljene dve sonde u mernom preseku na različitim visinama (kolektor dimenzija 300x450 cm). U nastavku se daju neki rezultati sa tih mernih lokacija.

4.1. KCS Zemun Polje

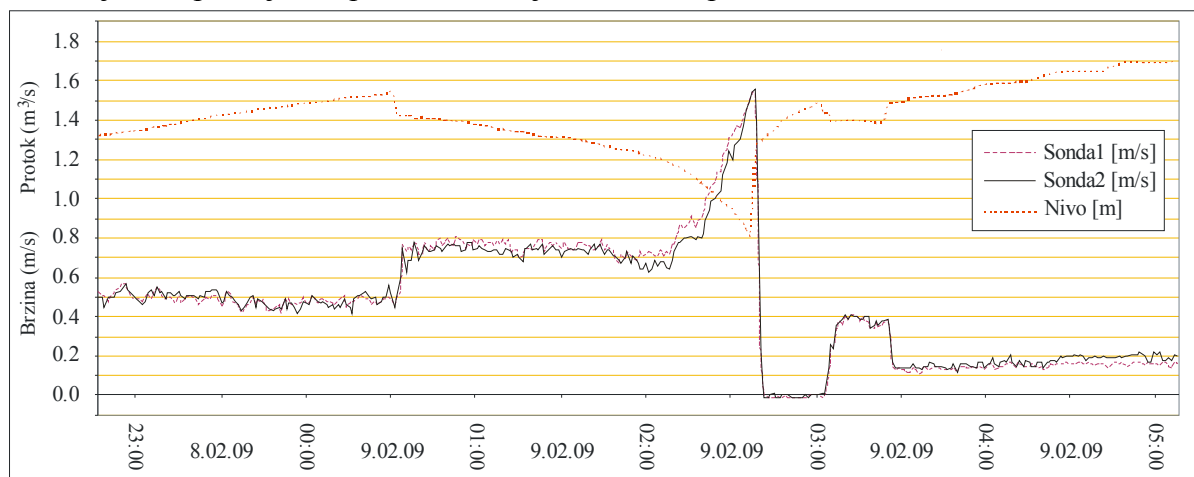


Slika 8. Brzina, protok i impedansa na jednoj od dve potisne cevi KCS Zemun Polje (datum merenja: 24.05.2009)

Na slici 8 je dat snimak rada jednog od dva potisna cevovoda na KCS Zemun Polje. Nakon ugradnje sonde, postalo je očigledno da nepovratne klapne na crpkama ne dihtuju dobro, jer je dobijena negativna brzina nakon iskuljučenja pumpe. Na slici se vidi i da je uključeno unidirekciono merenje protoka, jer je protok nula iako je brzina negativna: ovo je bio zahtev korisnika, da bi sumiranjem protoka dobijao ukupno prepumpanu količinu vode. Interesantan je period oko 18:30 – 19:30, kada pumpa radi u automatskom režimu, nakon čega bi se reklo da je po zaustavljanju pumpe klapna dobro zatvorila jer je brzina nula. Međutim, ako se pogleda dijagram impedansi, vidi se nagli skok sa uobičajene vrednosti od 0.6 do 0.7 kOhma na par stotina kOhma, što je znak da se cevovod ispraznio i da su sonde ostale na suvom (nagli skok impedanse – otpora između dve sonde u jednom preseku). Pregledom zapisa sa drugog cevovoda vidi se da nema problema sa klapnom, tako da je cev uvek puna i brzine po prestanku rada pumpe nisu negativne.

4.2. KCS Ušće

Na ulazu u KCS Ušće, u dovodnom kolektoru su postavljene dve ravne sonde. Kolektor je relativno kratak i tečenje u njemu je pod direktnim uticajem režima rada pumpi u crpnoj stanici. To se lepo vidi i na slici 9, gde su dati sirovi signali sa obe sonde. U zavisnosti od režima rada pumpi (koje pumpe su uključene) u određenim periodima je brzina veća uz jedan bok kolektora (sonda 1) ili uz drugi bok kolektora (sonda 2). Osrednjavanjem ta dva signala i množenjem sa proticjanim profilom, dobija se trenutni protok.



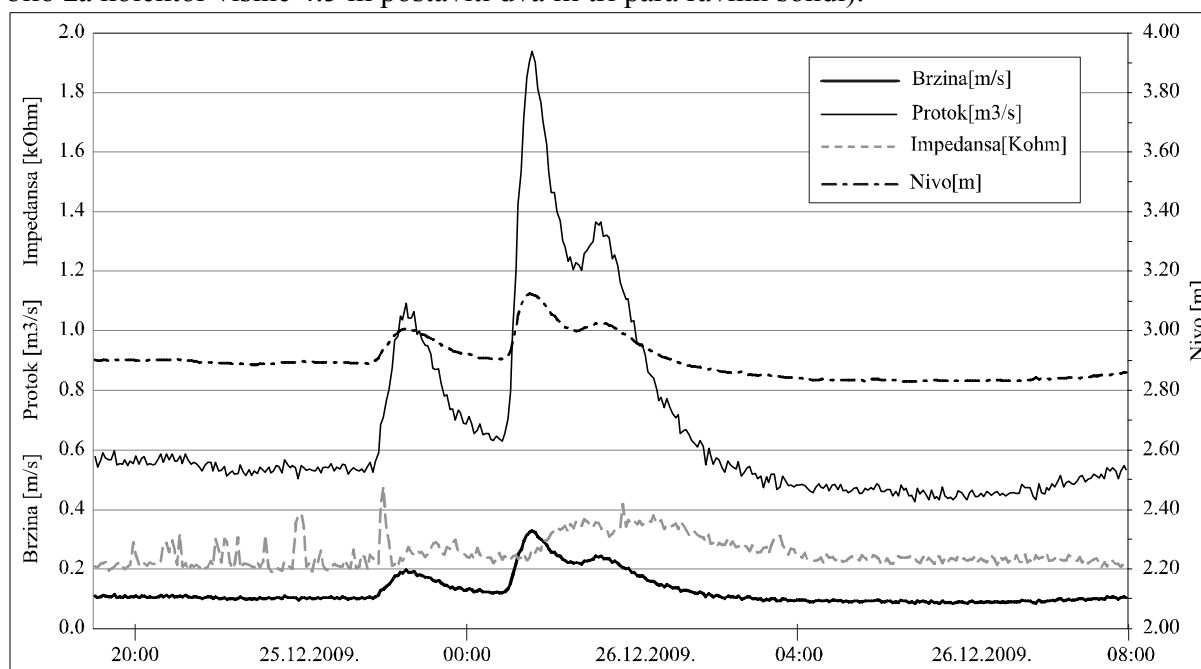
Slika 9. KCS Ušće, sirov signal sa dve sonde za brzine (na bokovima kolektora) i sonde za nivo (6 sati rada, 8. na 9.02.2009)

Zahvaljujući malom sopstvenom šumu EM sonde kao i velikoj brzini rada, na KCS Ušće je urađena i verifikacija merenja protoka preko punjenja i pražnjenja prilično malog crpnog bazena. Naravno, pri takvim verifikacijama treba biti oprezan da greške usled neustaljenosti ne budu veće od greške samih senzora za brzinu.

4.3. Ispust u Dunav - Istovarište (kod Pančevačkog mosta)

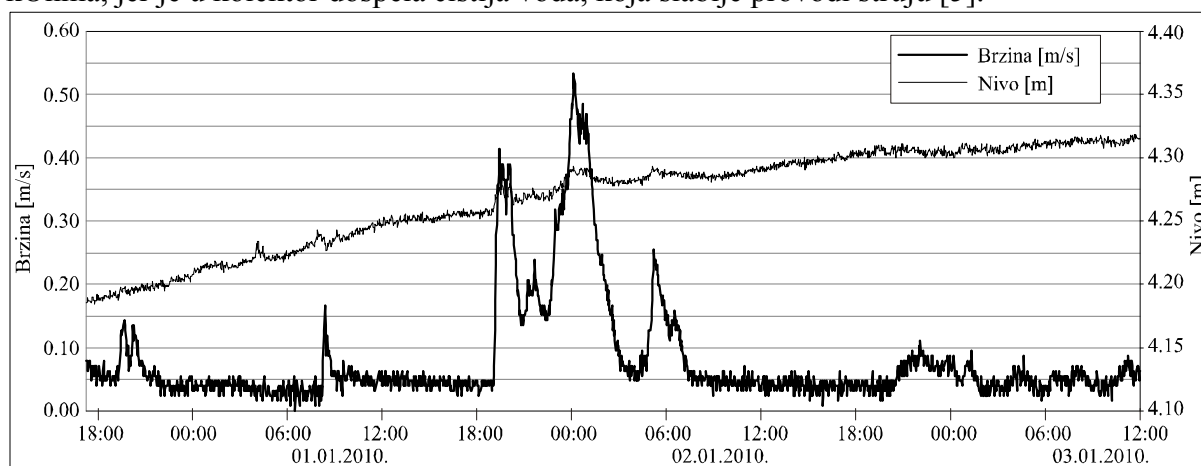
Na Istovarištu je ranije bio postavljen Ultrazvučni dopler merač brzine, koji je u periodima kada je izliv pod usporom usled visokog Dunava uglavnom bio isključen usled malih brzina. Na istoj lokaciji (par metara uzvodnije) su postavljene dve ravne EM sonde, na levom i desnom boku kolektora, na različitim visinama. Razlog postavljanja na različitim visinama je

želja da se što bolje pokrije veliki dijapazon mogućih dubina u kolektoru (mada bi korektnije bilo za kolektor visine 4.5 m postaviti dva ili tri para ravnih sonde).



Slika 10. Rad ispusta Istovarište pri kiši srednjeg intenziteta (oko 20 mm kiše za 4 sata)

Na slici 10 je prikazan rad sistema za merenje protoka pre i u toku padavina srednjeg intenziteta. Kolektor je bio pod usporom od strane Dunava (dubine oko 2.9 m su diktirane Dunavom) i izmerene brzine su bile između 0.1 i 0.35 m/s. Na slici se vidi i da merenje impedanse (odnosno, posredno elektroprovodnosti vode između dve sonde) radi korektno: pre padavina, otpornost je bila oko 0.2 kOhma a kada je pala kiša, otpornost je porasla na 0.4 kOhma, jer je u kolektor dospela čistija voda, koja slabije provodi struju [5].



Slika 11. Ispust Istovarište pod velikim usporom od strane Dunava

Mnogo oštriji uslovi za rad ravnih elektromagnetnih sonde su prikazani na slici 11. Tu je prikazan rad ispusta kada je kolektor skoro došao pod pritisak, usled visoke kote Dunava. Na slici je nacrtan sirov signal brzina da bi se videlo da i pri uslovima kada su brzine veoma male, oko 2 do 5 cm/s, sonde dobro rade. Pri tako punom kolektoru, oko ponoći je pala slabija kiša, što je izazvalo manje povećanje oticaja.

5. Zaključak

Merenje protoka u kanalizacionim kolektorima je izazov za proizvođače opreme, zbog neophodnosti merenja i brzine i dubine vode. Pravi bezkontaktni načini merenja brzine, koji bi mogli da se primenjuju kod prljivih voda, nisu još uvek dovoljno pouzdani i jeftini, dok su uobičajene ultrazvučne sonde koje rade na principu Doplerovog pomaka relativno slabe tačnosti i nezadovoljavajućeg ponašanja pri malim brzinama.

Razvijeni elektromagnetni senzori, prikazani u ovom radu, su se u dosadašnjoj eksploataciji u Beogradskoj kanalizaciji pokazale kao veoma robusne, a njihova osetljivost i tačnost su daleko bolje od postojećih ultrazvučnih uređaja.

Posebno se tehnološki važnom pokazala kružna sonda, čiji je oblik i sistem za montažu tako podešen da se može jednostavno, brzo i bez znatnih radova montirati na postojeće čelične potisne cevovode. Merenjem protoka na tim cevovodima, umesto praćenja struje elektromotora kao jedinog indikatora stanja pumpi, može se jasno i blagovremeno uočiti problem dihtovanja nepovratnih klapni i zagušenje radnog kola, a i time sprečiti znatan energetski gubitak usled njihove smanjene efikasnosti..

Zahvalnost

Ovaj rad je deo projekta „Razvoj sistema za merenje količine i kvaliteta vode u otvorenim tokovima baziranog na GPRS komunikaciji sa WEB pristupom za potrebe nadzora i upravljanja“, ev. br. 22013, program istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 2008 – 2010. Projekat je finansiran od strane Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije i Beogradskog vodovoda i kanalizacije.

Literatura:

- [1] Andrić S., A. Jauković, D. Prodanović (2007): *Merenja otpadnih voda u kanalizacionom sistemu Beograda*, Savremena tehnika regulisanja i tehnička regulativa, Beograd
- [2] Andrić S., A. Jauković, D. Prodanović i M. Popović (2007): *Modernizacija Beogradske Kanalizacije u oblasti monitoringa ispuštenih voda*. 28. ViK'07, Tara.
- [3] Cvitkovic M., D. Mudrić, D. Prokin, B. Miljković (1992): *Familija industrijskih mikroprocesorskih mernih instrumenata IMP*, Savetovanje Merenja u vodovodnim i kanalizacionim sistemima, Vrnjačka Banja.
- [4] Cvitkovic M. (2000): *Povećanje tačnosti elektromagnetnih merila protoka i zapremine*, Kongres metrologa Jugoslavije, Novi Sad.
- [5] Jauković A., D. Bićanić, D. Prodanović i M. Popović (2007): *Merenje količina i parametara kvaliteta vode na ispuštima Beogradske kanalizacije - prvi rezultati*. 28. ViK'07, Tara.
- [6] Prodanović D. i ostali (2007-2008): *Konsultantske usluge: Merenja otpadnih voda u kanalizacionom sistemu Beograda na 8 m.m.* Građevinski fakultet Beograd, IHE.
- [7] Prodanović D., P. Vojt, Ž. Despotović i V. Vučurević (2009): *Merenja na Beogradskom kanalizacionom sistemu*, Savremena tehnika kanalisanja, Beograd.
- [8] Stanković D. (1997): *Fizičko tehnička merenja - Senzori*, Univerzitet u Beogradu, Beograd