

PRIMERI PRIMENE RAVNIH ELEKTROMAGNETNIH SONDI ZA MERENJE PROTOKA U KOLEKTORIMA

Dušan PRODANOVIĆ, Damjan IVETIĆ
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

REZIME

Merenje protoka u kolektorima sa otvorenim tokom, kao i kanalizacionim sistemima predstavlja izazov jer ne postoji jedna najbolja metoda, već je neophodno dobro poznavati radne uslove i shodno njima izabrati optimalnu mernu metodu. U ovom radu je prikazana elektromagnetna (EM) metoda koja koristi ravne sonde, prilagođene ugradnji u kanalizacione sisteme. Ravne EM sonde su robusne, mogu da mere izuzetno male brzine (pri usporu) kao i velike brzine tokom kišnih epizoda, mogu da rade sa jako malim dubinama a i otporne su na nanos i prljavštinu koja može da se na njima nataloži. Kod većih proticajnih profila je moguće više ravnih EM sonda povezati u jedan integrisani sistem, čime se dobija bolja prostorna integracija brzina a ukupna cena sistema ostaje relativno mala. U radu su dati rezultati detaljnih ispitivanja sonda sprovedenih na Građevinskom fakultetu: snimanja 3D magnetnog polja radi definisanja kontrolne zapremine i težinskog vektora u realnim radnim uslovima, rad ravnih EM sonda pod nanosom i korekciju merenja u takvim uslovima, kao i metodologija primene CFD radi analize uticaja realnih uslova tečenja. Na kraju rada su dati i primeri upotrebe ravnih EM sonda na nekoliko sistema.

Ključne reči: merenje protoka, kanalizacija, otvoreni tokovi, elektromagnetne sonde

1. UVOD

Osnovni fizički parametar prema kojem se dimenzioniše većina hidrotehničkih sistema i prema kome se upravlja tim sistemima, je protok. Međutim, upravo je protok u otvorenim tokovima (kanalizacija) najteže izmeriti (Jeanbourquin i saradnici, 2012) zbog složenih hidrauličkih uslova (Ivetić, 2019), prisustva sedimenata i suspendovanih čestica i nepovoljnih uslova po mernu opremu zbog prisustva agresivnih, zapaljivih i korozivnih gasova. Kontinualno merenje protoka u

ovim slučajevima predstavlja veliki izazov kako praksi tako i istraživačima.

Pri izboru optimalne metode i merne opreme za merenje protoka moguće je izdvojiti dominantne faktore koje treba uzeti u razmatranje (Godley, 2002) kao što su: hidraulički uslovi, karakteristike fluida, fizičke karakteristike provodnika, karakteristike sredine i mogućnost napajanja/komunikacije. Hidraulički uslovi na izabranom mernom mestu su svakako najvažniji. Ukoliko postoji jednoznačna veza između protoka i dubine ($Q - h$), merenje protoka se može sprovesti posredno, samo pomoću odgovarajućih senzora dubine. U kanalizacionim sistemima, na žalost, to najčešće nije moguće pa se protok određuje paralelnim merenjem brzine toka V i dubine h (metoda $V - A$). U ovoj metodi je ključni izvor greške, odnosno neodređenosti (nepouzdanosti) protoka u određivanju srednje profilske brzine V (Ivetić i saradnici, 2018a).

Određivanje srednje profilske brzine V u otvorenim tokovima je osetljiv i komplikovan zadatak, koji zahteva ekspertsko znanje projektanta mernog sistema kako iz oblasti hidraulike tako i iz fizičkih principa mernih tehnika. Poznavanjem hidrauličkih uslova na mernom mestu moguće je uspostaviti održivu ekstrapolaciju kojom se od izmerene brzine V_{mer} (ili više izmerenih brzina) dolazi do srednje profilske brzine V potrebne za proračun protoka. Sa druge strane, potrebno je znati i radni princip korišćene merne sonde kako bi se pravilno tumačile izmerene brzine V_{mer} i odredila srednja profilska brzina.

U ovom radu će se prikazati ravna elektromagnetna (EM) sonda za merenje protoka u kolektorima i kanalizaciji. Merna metoda je bazirana na poznatoj metodi rada elektromagnetnih merača protoka u cevima pod pritiskom. Metoda je razvijana u okviru saradnje firme Svet Instrumenata (SI) i Građevinskog fakulteta, a primenjena je prvi put u Beogradskoj kanalizaciji u

okviru nacionalnog naučnog projekta TR-22013. Pored prikaza metode, daće se i poređenje sa ultrazvučnim dopler sondama koje se u poslednje vreme najčešće koriste. U radu će se dati rezultati detaljnih ispitivanja sondi sprovedenih na Građevinskom fakultetu: snimanja magnetnog polja radi određivanja radnih parametara, rad ravnih EM sondi pod nanosom i mogućnost korekcije merenja u takvim uslovima, kao i metodologija primene CFD analize za predikciju strujne slike u realnoj proticajnoj geometriji radi analize njenog uticaja na izmereni protok. Na kraju rada će se dati i primeri primene ravnih EM sondi.

2. ULTRAZVUČNA I ELEKTROMAGNETNA METODA MERENJA

2.1 Merenje protoka metodom B-PP

U kolektorima i kanalizacionim sistemima se standardno javlja tečenje sa slobodnom površinom, iako u pojedinim slučajevima (npr. intezivnog oticaja u kišnoj ili kombinovanoj kanalizaciji), može doći do izlivanja i tečenja pod pritiskom. Takođe, izazov za merenje protoka je i što se u kombinovanim kanalizacionim sistemima javljaju velike razlike između protoka u suvom i kišnom periodu, nekada i do 1:1000 (Harremoës i saradnici, 1993). Zbog svega ovoga, prihvatljiva neodređenost u merenju protoka u kanalizacionim sistemima je uobičajeno za red veličine viša nego u sistemima pod pritiskom i iznosi od 5 – 10% (Campisano i saradnici, 2013).

Za određivanje srednje profilske brzine V , u kanalizacionim sistemima, inženjeri se u poslednje vreme uglavnom odlučuju za primenu papučastih ADV (eng. Acoustic Doppler Velocimeter – ADV) uređaja (Larrarte i saradnici, 2008). Radni princip ovih uređaja se zasniva na primeni Doplerovog efekta: sonda emituje ultrazvuk koji se odbija od čestica u vodi i vraća sa promenjenom frekvencijom/fazom (Ivetić i saradnici, 2016). Zbog radnog principa zahteva se da tok poseduje određenu minimalnu koncentraciju suspendovanih čestica. Pri tome, korisniku nije baš jasno koje čestice, u kom delu proticajnog profila su korišćene da bi se odredile brzine, što ograničava tačnost metode. Pored toga, dosadašnja iskustva su ukazala na značajne probleme sa visokom mernom neodređenošću u uslovima sedimentacije, kao i malih dubina i malih brzina (Maheepala i saradnici, 2001; McIntyre i Marshall, 2008; Aguilar i saradnici, 2016).

Alternativno u kanalizacionim sistemima se mogu koristiti senzori koji rade na principu elektromagnetne (EM) indukcije, odnosno Faradejevog zakona indukcije: kretanje provodne tečnosti kroz upravno magnetno polje, dovodi do indukovanja napona na elektrodama senzora. Izlazni signal, odnosno napon U_m , se matematički može opisati preko relacije (Bevir, 1970):

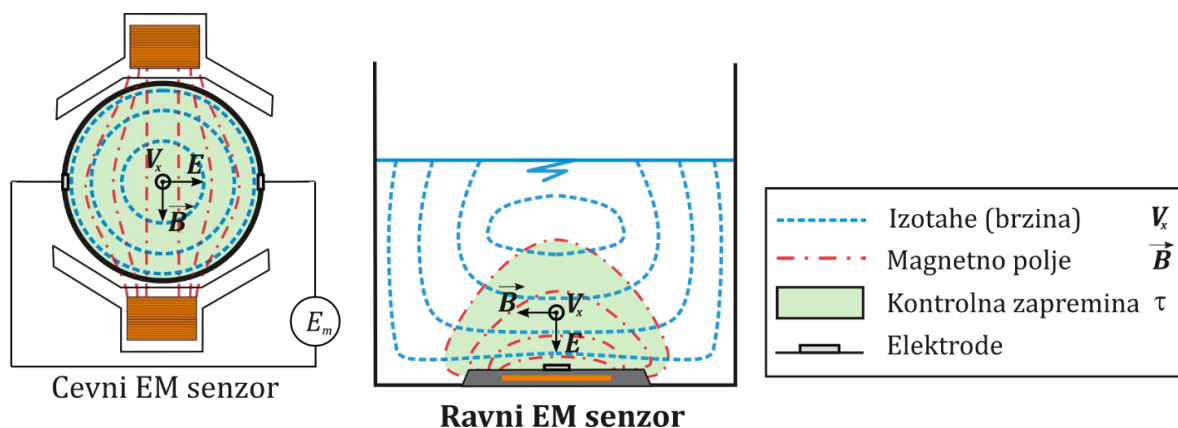
$$\begin{aligned} U_m &= - \int_{\tau} (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{j} d\tau \\ &= \int_{\tau} \vec{V} \cdot (\vec{B} \times \vec{j}) d\tau \\ &= \int_{\tau} \vec{V} \cdot \vec{W} d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

gde je \vec{V} vektor brzine strujanja, \vec{B} vektor magnetne indukcije, \vec{j} zapreminska gustina „virtuelne“ struje (pridev virtuelna se koristi da bi se ova struja razdvojila od struja unutar samog uređaja), $\vec{W} = \vec{B} \times \vec{j}$ je težinski vektor a τ je kontrolna (merna) zapremina, odnosno zapremina toka koja doprinosi generisanju izlaznog signala.

U sistemima pod pritiskom se uglavnom koriste tzv. cevni EM senzori, gde kontrolna zapremina τ (najčešće) obuhvata ceo proticajni presek (slika 1. levo). Sa druge strane, u kanalizacionim sistemima se koriste papučaste konstrukcije koje se pričvrste za dno ili zid provodnika, gde τ obuhvata samo deo proticajnog preseka (slika 1. sredina).

Ravni EM senzori, domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“ (slika 2) predstavljaju primer EM senzora papučaste konstrukcije. Dosadašnja istraživanja (Prodanović i saradnici, 2012; Ivetić i saradnici, 2018a; Ivetić i saradnici, 2018b; Ivetić, 2019) su pokazala da ravni EM senzori poseduju određene prednosti u odnosu na ADV senzore, kao što su kapacitet za rad kako pri malim brzinama (slika 3) i dubinama tako i u uslovima sedimentacije poroznog nanosa preko kućišta senzora (slika 4).

Sa slike 3 se vidi da ravna EM sonda bez problema meri jako male brzine vode, kao i vode sa različitim stepenom mutnoće. Korišćene ADV sonde praktično nisu mogle da mere brzine ispod 10 cm/s a i pokazivanje im je pri brzini od 17 cm/s značajno zavisilo od stepena mutnoće vode (prisustva lebdećeg nanosa).



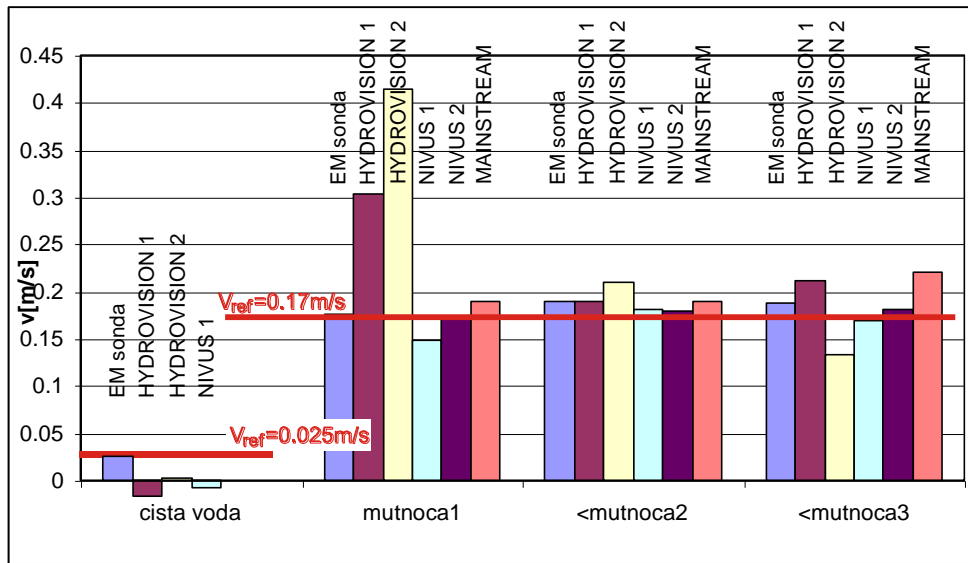
Slika 1. Radni princip cevnih i ravnih EM senzora



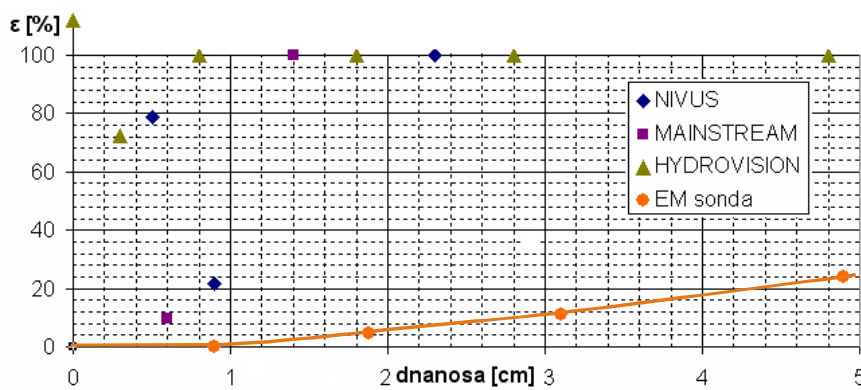
Slika 2. Primer ravnog EM senzora za merenje brzine i dubine, sa prenosnim logerom

Na slici 4 su dati rezultati testa rada 3 ADV sonde i ravne EM sonde u uslovima postojanja nanosa različite debljine. Pored dijagrama na slici 4 je data i fotografija jedne od ADV sonde (NIVUS) u standardnim radnim uslovima, kada nanos prekrije UZV primo-predajnik. U laboratorijskom testu je korišćen sitnozrni pesak kao porozni nanos. U zavisnosti od proizvođača ADV papuče, svi ispitani modeli su prestali da rade kada je debljina nanosa dostigla 0,9 cm (greška u merenju od 100%) dok ravna EM sonda se „uspešno“ i približno „linearno“ borila sa nanosom do debljine od 5 cm. U nastavku teksta su dati rezultati detaljnijeg ispitivanja rada ravne EM sonde pod nanosom kao i prikaz dobijene tačnosti rada nakon obavljene korekcije koja zavisi od visine nanosa.

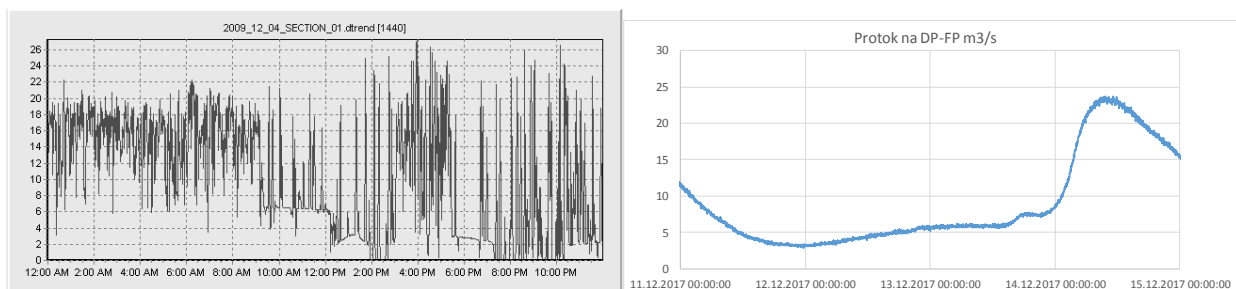
Pored robusnosti ravnih EM sonde za rad u uslovima malih brzina i „prljavih“ voda, na slici 5 je jasno prikazana i „integrativna“ osobina EM principa rada, koja omogućava stabilan i miran rad u svim uslovima. Na istoj lokaciji (izlaz iz tunela Fatničko polje – jezero Bileća) je bio postavljen UZV merač sa 4 paralelna traga. Ako se pogleda sirovi, nefiltrirani signal, podatak o protoku jako fluktuiraju (skala za protok je 0-30 m³/s). Za isti raspon protoka, kada su na izlazu iz tunela ugrađene 4 ravne EM sonde, dobijen je znatno kvalitetniji sirovi signal (desna strana slike 5 – voditi računa da su u datom primeru su prikazani različiti događaji: sa leve strane je iz decembra 2009-te a sa desne strane iz decembra 2017-te).



Slika 3. Primer uticaja čistoće vode (otica sa i bez kiše) i malih brzina na rad ravne EM sonde i 5 različitih ADV papuča



Slika 4. Rezultati preliminarnog ispitivanja rada ADV i EM senzora pod pokrivanom od poroznog nanosa



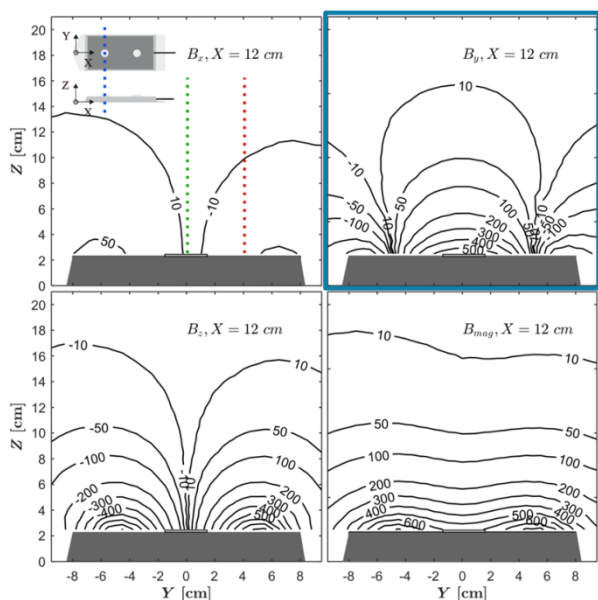
Slika 5. Sirovi nefiltrirani signal ultrazvučnog merenja protoka sa 4 traga (decembar 2009, 1 dan merenja) i merenja na istoj lokaciji pomoću 4 ravna EM senzora (decembar 2017, 4 dana merenja)

3. ISPITIVANJA RAVNIH EM SONDI

Kako bi se detaljno ispitale radne karakteristike ravnih EM senzora u dobro kontrolisanim uslovima, kao i mogućnost unapređenja pouzdanosti merenja protoka pomoću ovih uređaja, sprovedena je serija eksperimenata (Ivetić, 2019) u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. U ovom radu analizirani su rezultati mapiranja magnetnog polja senzora, koja su sprovedena u cilju ispitivanja radnog principa senzora, kao i eksperimentalni rezultati rada u uslovima sedimentacije poroznog nanosa preko kućišta senzora. Takođe, u ovom poglavlju je razmotrena i primena CFD, numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja sa ciljem unapređenja pouzdanosti merenja protoka.

3.1 Snimanje magnetnog polja

U kućištu ravnih EM senzora su ugrađeni kalemovi kroz koje se propušta impulsna, bipolarna pobudna struja sa dvojnomo frekvencijom, tako da je i indukovano magnetno polje impulsno, kao i indukovani napon na mernim elektrodama U_m . Izmereni napon na elektrodama senzora je proporcionalan integralu brzine tečenja tečnosti kroz magnetno polje senzora, odnosno jednak je zapremskom integralu tri vektorska polja: magnetnog \vec{B} , gustine struje \vec{j} i brzina \vec{V} (1).



Slika 6. Konturane linije magnetnog polja \vec{B} i magnitude za FLAT DC-2 EM senzor unutar mernog kanala (u gornjem levom uglu je dat koordinatni sistem i tačkastom linijom presek $X = 12$ cm)

Magnetno polje \vec{B} je karakteristika određenog modela EM senzora i u opštem slučaju ne zavisi od mernog mesta niti od hidrauličkih uslova. Dominanti tehnički parametri EM senzora koji direktno utiču na generisani izlazni napon (jednačina 1) su kontrolna zapremina senzora τ (slika 1 sredina, slika 7 levo) koja je u direktnoj vezi sa rasporedom magnetnog polja \vec{B} i težinski vektor \vec{W} koji je po definiciji određen magnetnim poljem \vec{B} .

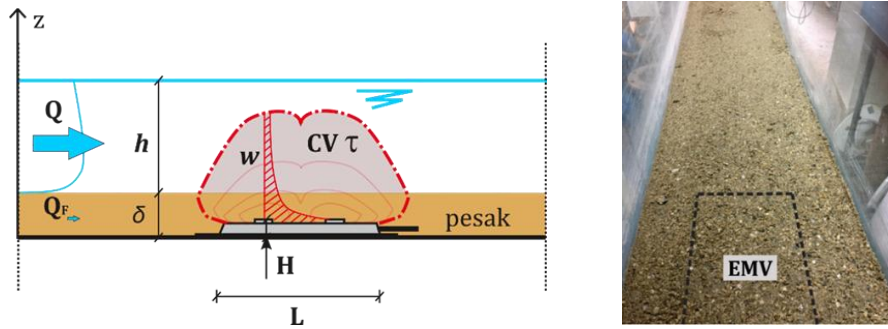
Raspored magnetnog polja \vec{B} za FLAT DC-2 model ravnog EM senzora je mapiran uz pomoć kalibrisanog magnetometra, čiji se princip rada zasniva na Halovom efektu. Na slici 6. su prikazani rezultati mapiranja za poprečni presek senzora kroz uzvodnu elektrodu. Za generisanje izlaznog signala ključna je komponenta B_y vektora magnetne indukcije (prema pravilu desne ruke koje opisuje Faradejev zakon indukcije, slika 1). Na osnovu snimljenog rasporeda može se uočiti da realna kontrolna zapremina ispitivanog senzora τ obuhvata udaljenja do 16 cm od sonde.

3.2 Rad pod nanosom

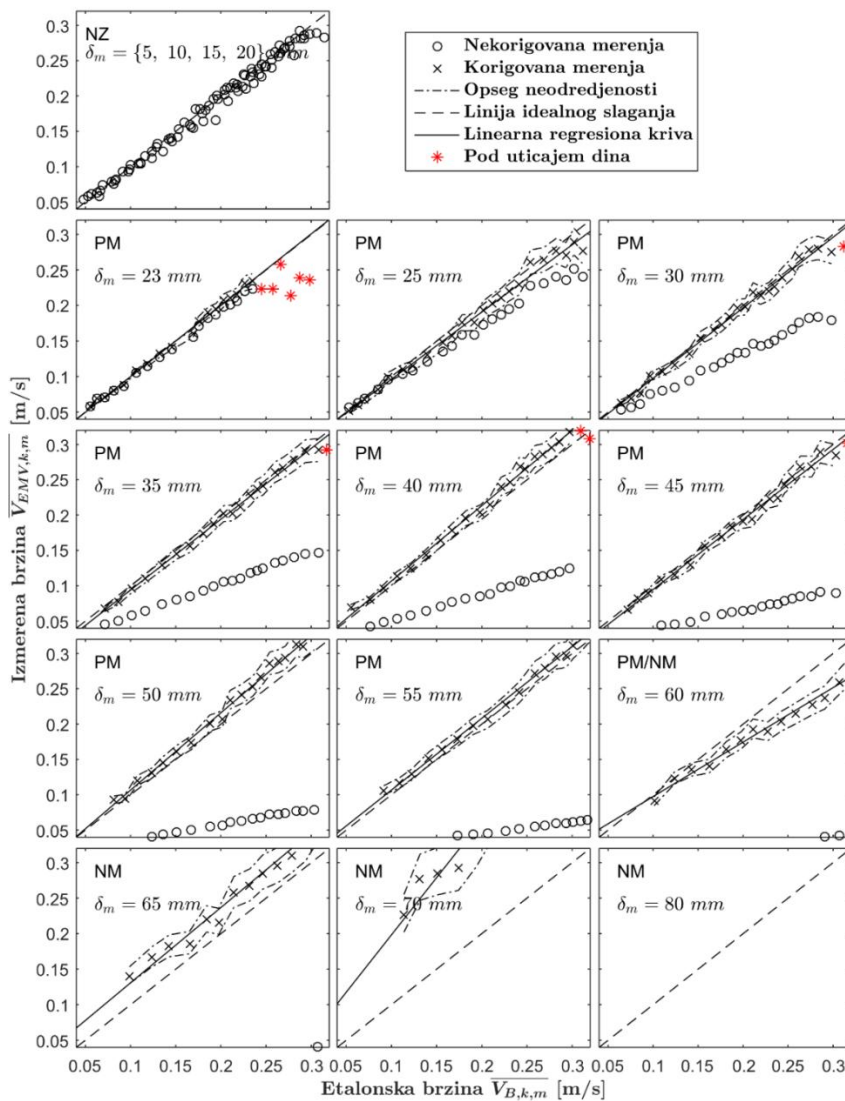
Ranije je konstatovano da u slučaju papučastih ADV senzora, pojava sedimenta dubine od svega par mm, dovodi do potpunog gubitka signala. Sa druge strane, u slučaju ravnih EM senzora nanosi od par cm utiču na postepeno slabljenje signala, ali ne i do potpunog gubitka. Kako bi se detaljnije ispitala mogućnost rada EM uređaja pod nanosom poroznog sedimenta, obavljena su ispitivanja u kontrolisanim laboratorijskim uslovima koristeći rečni pesak (slika 7). Upotreba rečnog peska je opravdana budući da su Butler i saradnici (2003) uočili da je većina sedimenta u kišnim kanalizacionim sistemima (i nešto manje u kombinovanim kanalizacionim sistemima) neorganskog porekla i rastresita (nema kohezije).

Na slici 7 je prikazan sa leve strane podužni presek kroz kanal i ravnu EM sondu. Preko sonde se nalazi pesak, koji u potpunosti prekriva merne elektrode. Sa plavom linijom je predstavljen raspored dolaznih brzina, a sa crveno linijom raspored magnetnog polja i kontrolna merna zapremina. Rezultat merenja ravne EM sonde je proizvod dva polja, koji očigledno zavisi od debljine nanosa. Sa desne strane slike 7 je data fotografija kanala u fazi ispitivanja: sonda se ne vidi pa je njeno prisustvo naznačeno isprekidanom linijom.

Na slici 8 su dati rezultati ispitivanja sonde FLAT DC-2 EM pod poroznim nanosom. Kružićima su data sirova, nekorigovana merenja. Prema očekivanju, sa porastom debljine nanosa, izlazni signal postepeno slabi.



Slika 7. Shematski prikaz ispitivanja kapaciteta FLAT DC-2 EM senzora za rad pod poroznim nanosom (levo), Fotografija sa laboratorijskog ispitivanja (desno).



Slika 8. Rezultati ispitivanja kapaciteta FLAT DC-2 EM senzora za rad pod poroznim nanosom pre i nakon primene linearnog regresionog modela korekcionih funkcija.

Analizom dobijenih rezultata, konstatovano je da je slabljenje izlaznog signala U_m direktno proporcionalno dubini sedimenta δ . Na osnovu tih rezultata, predložena je procedura za definisanje linearnog regresionog modela korekcionih funkcija, pomoću kojih je moguće korigovati izlazni signal na osnovu izmerene dubine sedimenta δ (Ivetić i saradnici, 2018a; Ivetić, 2019). Rezultati dobijeni nakon primene linearnog regresionog modela za različite dubine sedimenta δ , su prikazani na slici 8 krstićima.

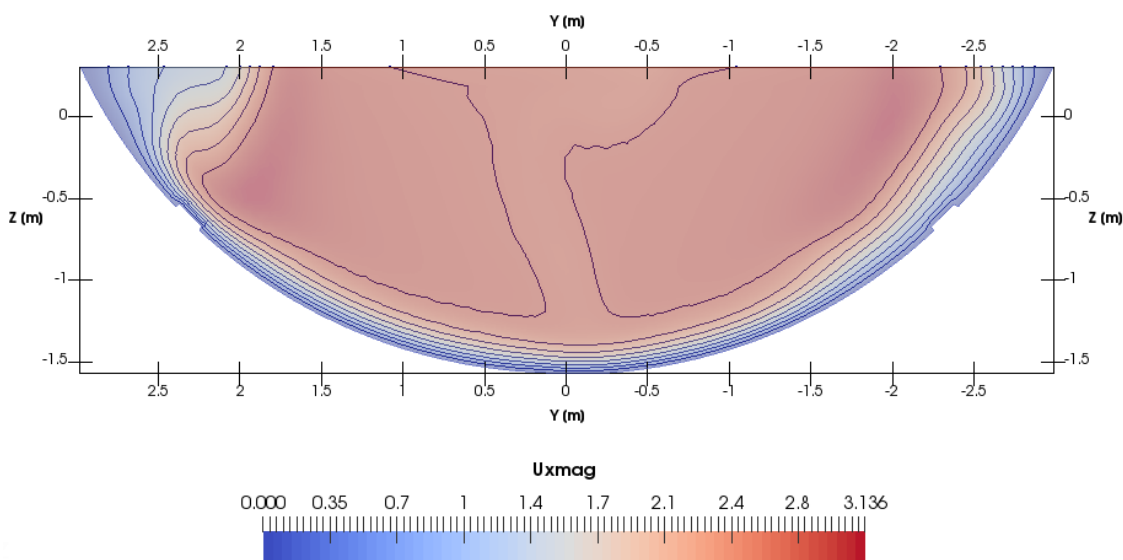
3.3 Primena CFD

Najveći prostor za unapređenje pouzdanosti merenja protoka se nalazi u aspektu definisanja odgovarajuće korelacione funkcije kojom se izmerena brzina V_{mer} dovodi u vezu sa srednjom profilskom brzinom V . Kako bi se omogućilo definisanje pouzdane korelacije $V_{mer}-V$, u slučaju primene ravnog EM senzora je razmatrana mogućnost upotrebe postupka lokalne kalibracije. Lokalna kalibracija podrazumeva korekciju izlaznog signala na osnovu simuliranja odziva senzora, u ovom slučaju ravnih EM senzora, korišćenjem matematičkog modela senzora i poznatog rasporeda brzina u njegovoj kontrolnoj zapremini τ (El Bahlouli i Larrarte, 2018; Ivetić i saradnici, 2019).

Kao poseban alat za definisanje rasporeda brzina u kontrolnoj zapremini senzora mogu se koristiti numeričke simulacije prostornog turbulentnog tečenja, CFD (Computation Fluid Dynamics). Karakteristično za primenu ovog alata je spora priprema računске mreže i veliko računarsko opterećenje. Sa druge strane ključna prednost se ogleda u tome što se na ovaj način, u slučaju adekvatno sprovedenih simulacija, mogu dobiti hidraulički podaci sa visokom prostornom i vremenskom rezolucijom. Primer rezultata primena numeričkih simulacija na izvedenom mernom mestu u okviru sistema „Hidroelektrane na Trebišnjici – Gornji horizonti“ je prikazan na slici 9 (Ivetić i saradnici, 2017a; Ivetić i saradnici, 2017b; Ivetić i saradnici, 2017c). Korišćen je CFD program otvorenog koda OpenFOAM. Za proračun je formirana mreža od preko 10 miliona elemenata, a proračun je trajao oko 6 sata na sistemu sa maksimum 16 procesora.

4. PRIMERI IZ PRAKSE

U nastavku se daje nekoliko primera primene ravnih EM sondi, u kanalizaciji većeg poprečnog preseka i pod usporom, u tunelu velikog preseka sa mešovitim tečenjem (sa otvorenim tokom i pod pritiskom) i sa pojavom povratnog toka, kao i u kanalizaciji pod pritiskom, nizvodno od crpne stanice.



Slika 9. Raspored podužne komponente vektora brzine na mernom mestu u tunelu Fatničko polje – Bilečka akumulacija za protok od $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ dobijen primenom numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja.

4.1 Merenje protoka na izlivu kod Pančevačkog mosta, BVK

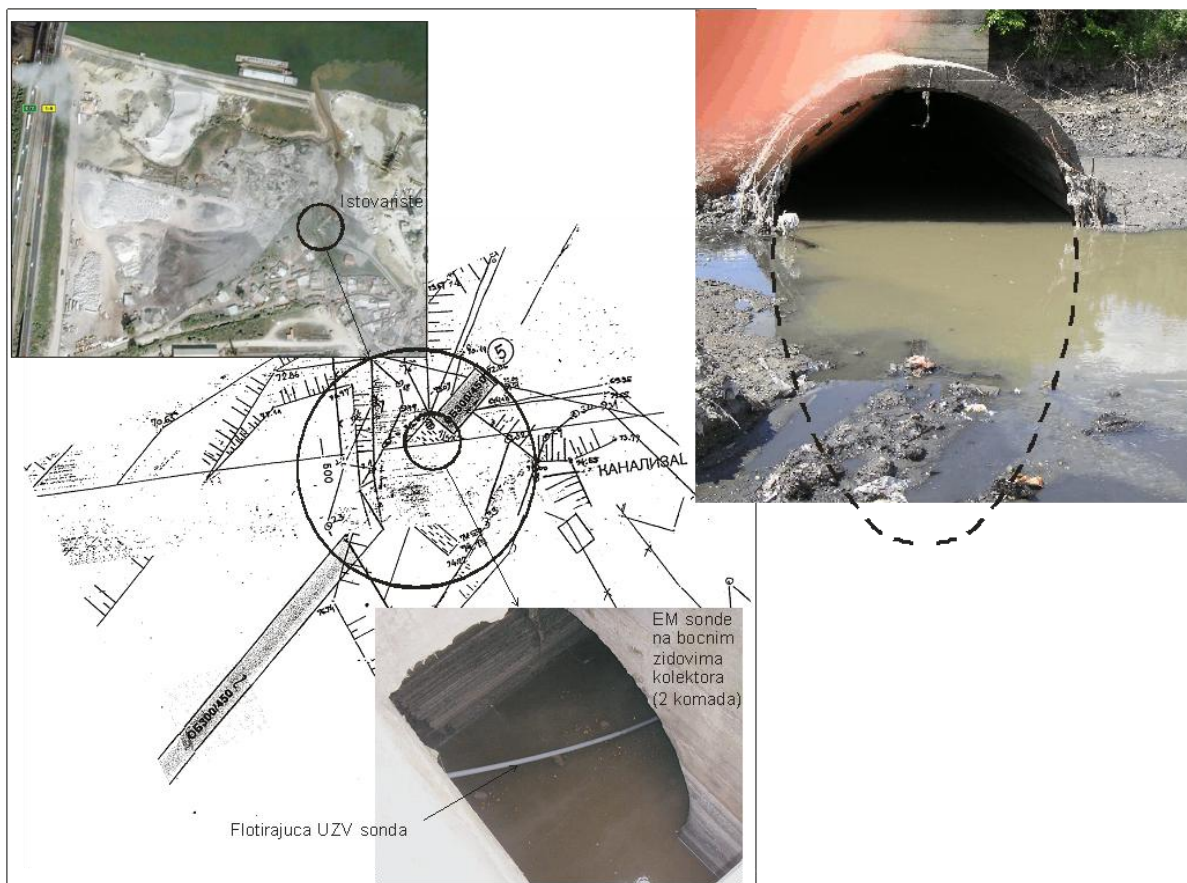
Beogradska kanalizacija je u toku 2006-2007 opremila 8 značajnijih kombinovanih izliva u Savu i Dunav sa opremom za merenje protoka (Jauković sa saradnicima, 2010). Korišćene su ADV papuče firme Mainstream, montirane ili pri dnu u kolektorima manjih prečnika ili na površini vode preko savitljivih plivajući FI50 cevi, kao na primer na lokaciji izliva kod Pančevačkog mosta (presek kolektora 300x450 cm, nosač sonde se vidi na slici 10, dole sredina).

Na lokaciji izliva kod Pančevačkog mosta dobijeni podaci nakon ugradnje ADV papuče uglavnom nisu bili pouzdani, jer je merno mesto pod velikim usporom od Dunava, pa se često javljaju jako male brzine. Pored uticaja Dunava, na merenja utiče i rad nizvodne lokalne fabrike betona koja tu već godinama ispira svoje

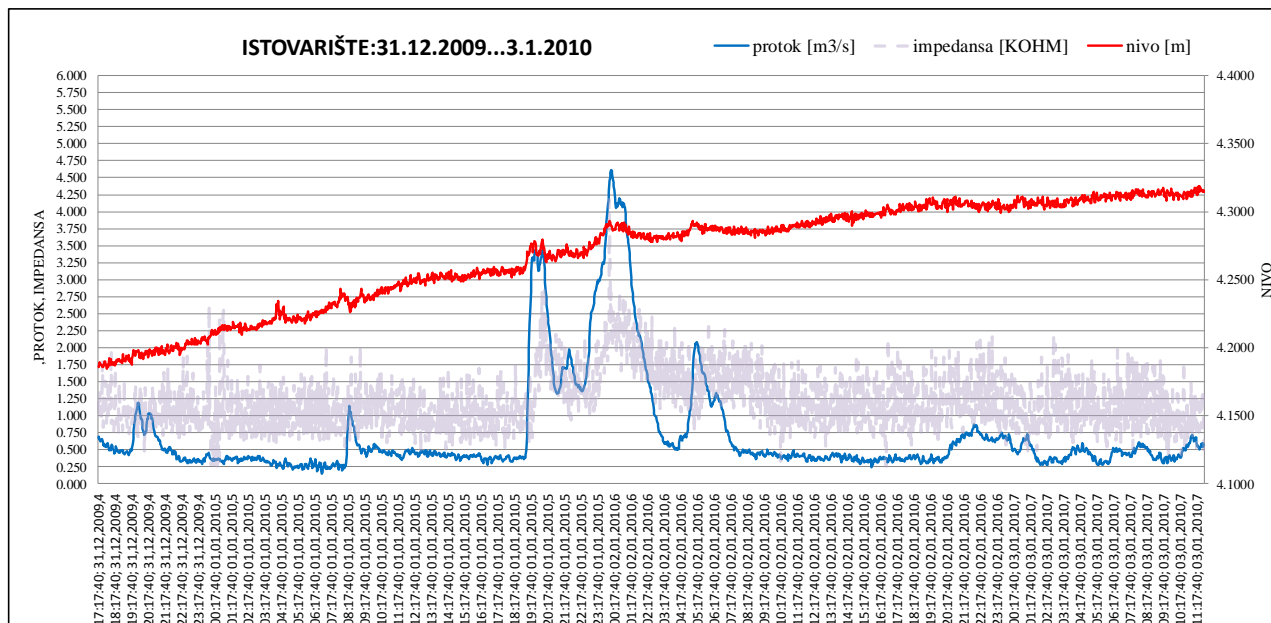
mešalice za beton i zbog toga postepeno podiže kotu dna na izlivu.

U okviru naučnog projekta TR-22013 postavljene su dve ravne EM sonde na preseku uzvodno od mesta gde je postavljen nosač ADV papuče. EM sonde su fiksirane na zid na različitim visinama, kako bi se pokrio širi opseg protoka i dubina.

Na slici 11. je prikazan jedan snimljeni kišni događaj. Na slici se vidi i kontinualni porast kote Dunava koja podiže merenu dubinu tokom prikazanih tri dana. Sa slike se može videti da sonde lepo mere pri jako malim brzinama (pri noćnom baznom protoku brzine su bile oko 1-2 cm/s a protok oko 0,2 m³/s) kao i u periodu padavina kada je protok bio oko 4,7 m³/s. S obzirom na metod rada, sonda može istovremeno da meri i otpornost između elektroda (recipročno od elektroprovodljivosti) tako da se lepo vidi nailazak čistije vode tokom padavina.



Slika 10. Lokacija izliva kod Pančevačkog mosta (Istovarište) sa ADV meračem protoka



Slika 11. Rezultati merenja protoka, nivoa i impedanse na Istovarištu pomoću ravnih EM sonde

4.2 Merenje protoka u tunelu Dabarsko polje – Fatničko polje

Derivacioni tunel koji spaja Dabarsko i Fatničko polje je deo velikog sistema HET u Republici Srpskoj, BiH. Tunel omogućava prevođenje vode iz Dabarskog Polja u Fatničko i dalje ka Bilečkoj akumulaciji u periodima velikih voda. Dužina tunela je 3250 m, u samom tunelu smenjuju se naizmenično obloženi (prečnik 5,0 m) i neobloženi delovi (prečnik 5,6 m) a prosečan pad tunela je 1 ‰ od Dabarskog ka Fatničkom polju. U većini slučajeva voda teče u pravcu Fatničkog polja ali u pojedinim situacijama se javlja tečenje i u suprotnom smeru. Tečenje sa slobodnom površinom (odnosno kombinovani uslovi tečenja) se mogu javiti isključivo u slučaju tečenja ka Fatničkom polju dok se u obrnutom smeru javlja tečenje pod pritiskom (Ivetić sa saradnicima, 2018c).

U mernom profilu (slika 12) su postavljene 4 ravne EM sonde, svaka dimenzija 800x380 mm. Kao kontrolne sonde, postavljene su i dve EM sonde specijalne konstrukcije, oblika „ajkulino krila“ širine 700 mm i dubine prodiranja (visine) 300 mm, sa malom integracionom zonom (tačkasto merenje). Fabrička kalibracione kriva, koja se dobija u homogenom strujnom polju na mernom kanalu sa kolicima, je preračunata na stvarnu lokaciju, dok su podaci o obliku strujnog polja u različitim režimima tečenja dobijeni

CFD analizom. Na slici 13 su date izmerene brzine odvojeno za dve sonde sa leve strane tunela (podsistem A) i sa desne strane (podsistem B).

Koristeći podatke prikazane na slici 13, kao i odvojeno podatke sa dve sonde „ajkulina krila“ (nisu ovde prikazani), obavljena je lokalna rekalkulacija. Inače, sa datog dijagrama se vidi period kada tunel radi sa maksimalnim protokom (brzina oko +1,55 m/s) kao i negativan protok (brzine od -1,2 pa do 1,0 m/s).

4.3 Merenje protoka na KCS Zemun Polje, Beograd

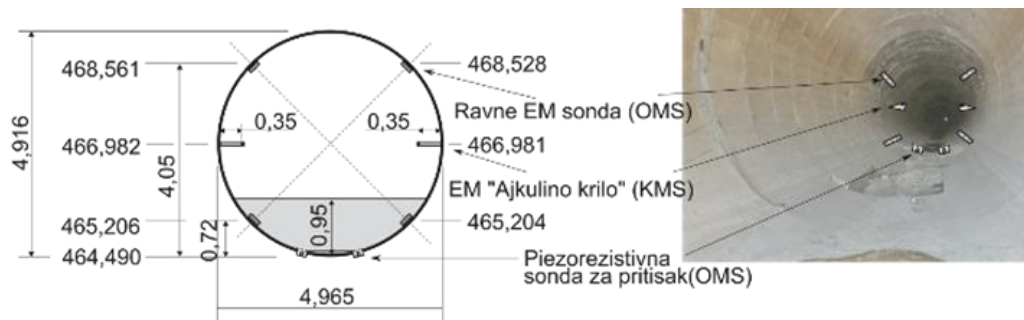
Kanalizaciona crpna stanica Zemun Polje je u razmatranom periodu (2010-ta) imala četiri pumpe (2x210 L/s i 2x300 L/s) i dva potisna cevovoda prečnika po 500 mm (predviđeno je pravljenje nove KCS na istoj lokaciji). Naučnim projektom TR-22013 je bilo predviđeno opremanje postojeće KCS na potisnim cevovodima merilima protoka. Kako nije bilo zgodne lokacije za ugradnju klasičnih EM ili UZV merila, postavljene su ravne kružne EM sonde, prečnika 100 mm takve konstrukcije da omogućavaju laku montažu/demontažu na postojećem cevovodu (slika 14, gornji desni ugao). Prethodno, pre ugradnje, obavljeno je snimanje realnog profila brzina na oba cevovoda, sa obe strane, čime su dobijeni potrebni kalibracioni podaci.



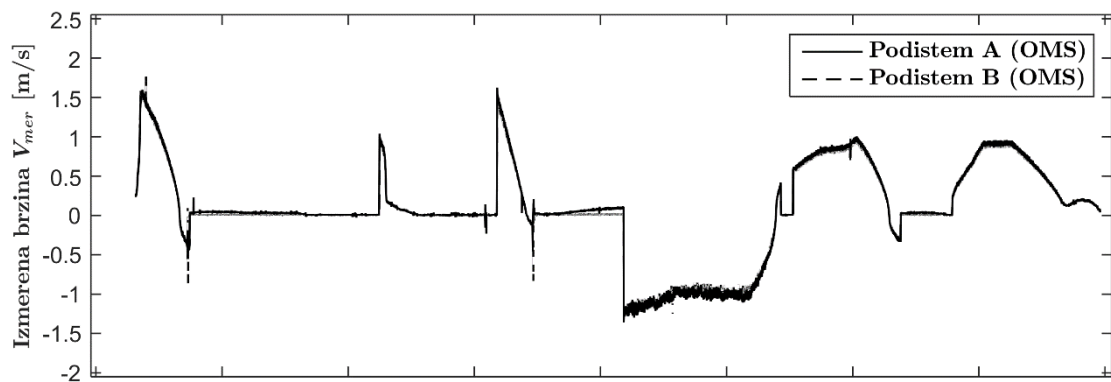
Pogled prema Dabarskom polju



Detalji EM sonde



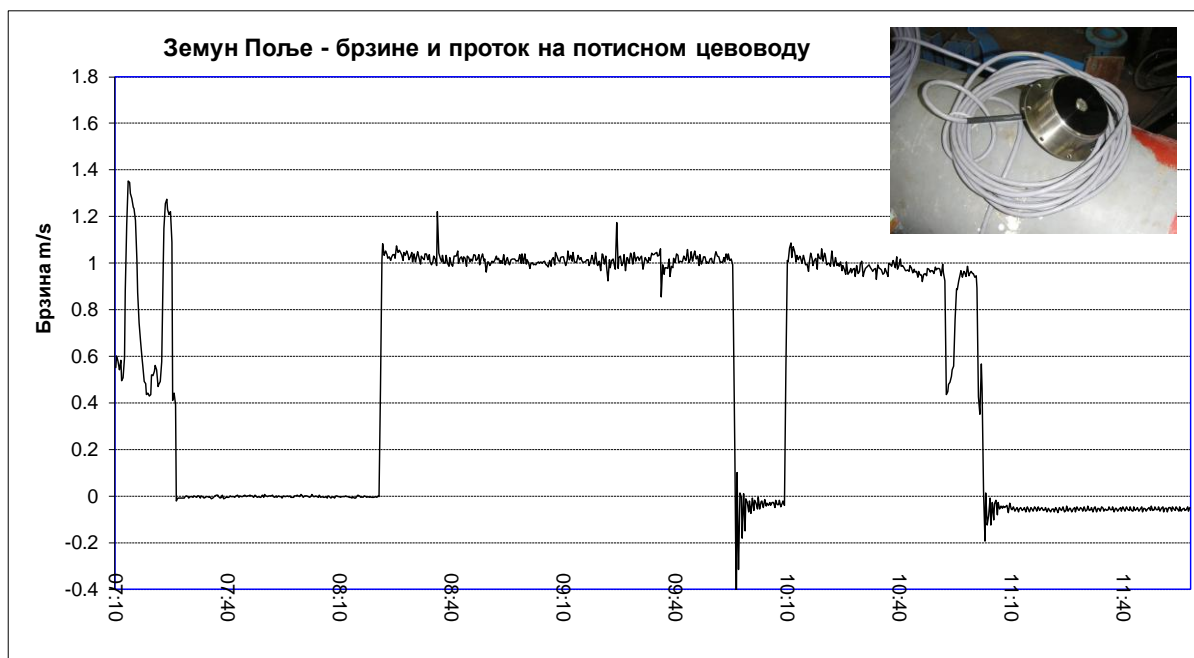
Slika 12. Merno mesto na izlazu tunela Dabarsko polje – Fatničko polje



Slika 13. Izmerene brzine tokom 2018-te godine (pozitivne su ka Fatničkom polju)

Postavljanjem merila protoka na potisu, dobijeni su vredni podaci o režimu rada postojećih crpki, kao i o stanju povratne klapne na usisu. Naime, uočeno je da povremeno klapne ne zatvore skroz usis, te da se događa

da se voda iz jednog cevovoda vraća kroz drugi cevovod ponovo u crpni bazen (vidi se kao negativne brzine u drugom delu dijagrama na slici 14).



Slika 14. Kružna ravna EM sonda i snimljene brzine na jednom od dva cevovoda (osrednjene brzine sa leve i desne sonde)

5. ZAKLJUČCI

Merenje protoka u otvorenim tokovima, kao što je tečenje u kanalizaciji, predstavlja još uvek izazov. Ne postoji jedna najskuplja/najbolja metoda koju korisnik može da kupi i bez mnogo razumevanja procesa (hidrauličkih uslova i radnih uslova) dobije siguran podatak o protoku. Umesto toga, neophodno je dobro poznavati uslove i shodno njima izabrati optimalnu metodu. U ovom radu je prikazana jedna od mogućnosti za merenje protoka u kanalizaciji, ravna elektromagnetna (EM) sonda.

Merna metoda je bazirana na poznatoj metodi rada elektromagnetnih merača protoka u cevima pod pritiskom. Ravne EM sonde su robusne, omogućavaju pouzdano merenje u svim uslovima rada u kanalizaciji, pri čemu mogu da mere izuzetno male brzine (i do par mm/s) kao i velike brzine (standardno do 5 m/s), mogu da rade sa jako malim dubinama (od 1 cm pa na više) a i otporne su na nanos i prljavštinu koja se može na njima nataložiti. Posebna prednost kod merenja u većim profilima je što je moguće više ravnih EM sonde

povezati na jedan davač, gde će same sonde obaviti prostornu integraciju unutar svojih mernih domena, a cena celog sistema ostaje relativno mala.

U radu su dati rezultati detaljnih ispitivanja sonde sprovedenih na Građevinskom fakultetu: snimanja magnetnog polja radi definisanja kontrolne zapremine i težinskog vektora koji određuju kalibraciju sonde u realnim radnim uslovima, rad ravnih EM sonde pod nanosom i metodologija za korekciju merenja u takvim uslovima, kao i metodologija primene CFD analize za predikciju strujne slike u realnoj proticajnoj geometriji i analizu njenog uticaja na izmereni protok. Takođe, u radu su dati i primeri upotrebe ravnih EM sonde na nekoliko sistema. U svim primerima su korišćena ravne EM sonde firme Svet Instrumentata (SI).

LITERATURA

- [1] Ivetić D. (2019): Određivanje protoka tečnosti u složenim uslovima strujanja primenom ravnih elektromagnetnih senzora. Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.

- [2] Ivetić, D., Prodanović, D. and Stojadinović, L. (2018a): Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage Systems. *Journal of Hydrology*, 566(11), pp.455-469.
- [3] El Bahlouli, A. and Larrarte, F. (2018): Proposal for improving discharge quantification in urban drainage. *Flow Measurement and Instrumentation*, 60, pp.51-56.
- [4] Ivetić D., D. Prodanović, L. Stojadinović (2018b): Laboratorijsko određivanje merne neodređenosti ravnih EM senzora. Zbornik radova 18. savetovanja SDHI i SDH, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Niš, strane: -.
- [5] Ivetić, D., Prodanović, D., Stojadinović, L. and Pavlović, D., (2019): Bed-mounted electro magnetic meters: Assessment of the (missing) technical parameters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, p.101588.
- [6] Stojadinović L., D. Ivetić, D. Prodanović (2018): Laboratorijsko ispitivanje magnetnog polja ravnih elektromagnetnih senzora. Zbornik radova 18. savetovanja SDHI i SDH, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Niš, strane: -.
- [7] Ivetić D., D. Prodanović, M. Cvitkovic (2018c): Merenje protoka vode u tunelima pri kombinovanim uslovima tečenja: primer tunela Dabarsko polje - Fatničko polje. *Vodoprivreda*, godina: 50/4-6, broj: 294-296, strane: 229-244.
- [8] Ivetić D., D. Prodanović, L. Stojadinović, M. Cvitkovic (2017a): Unapređenje metodologije merenja protoka pomoću ravnih elektromagnetnih senzora brzine. *Vodoprivreda*, godina: 49/1-3, broj: 285-287, strane: 93-102.
- [9] Ivetić D., D. Prodanović, M. Cvitkovic (2017b): Improved flow measurement using EM flat probes in mixed flow conditions, 14th IWA/IAHR International conference on Urban Drainage (ICUD), Prague, Czech Republic. Published by IWA/IAHR, pages: 1734-1737.
- [10] Ivetić D., D. Prodanović, M. Cvitkovic (2017c): Improvement of EM flow meter's accuracy through site-specific CFD calibration – case study HPS Trebinje, 9th Eastern European Young Water Professionals Conference, Budapest, organized by IWA.
- [11] Ivetić D., J. Đorđević, D. Prodanović (2016): Aspekti merenja brzine vode akustičnom Dopler anemometrijom. *Vodoprivreda*, godina 48, broj: 282-284, strane: 181-190.
- [12] Jauković A., D. Bićanić, D. Prodanović, P. Krstić (2014): Stalna merenja na izlivima Beogradske kanalizacije – naučene lekcije. 14-ta međunarodna konferencija: Vodovodni i kanalizacioni sistemi, Jahorina, Pale, Republika Srpska, strane: 263-272.
- [13] Campisano, A., Cabot Ple, J., Muschalla, D., Pleau, M. and Vanrolleghem, P.A. (2013): Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems. *Urban Water Journal*, 10(5), pp.300-311.
- [14] Prodanović D., A. Djačić, N. Branislavljević, J. Rukavina (2012): Laboratorijsko poredjenje ultrazvučnih i elektromagnetnih sondi za merenje protoka u kanalizaciji. Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Bol, otok Brač, Croatia, strane: 461-471.
- [15] Djačić A., N. Branislavljević, J. Rukavina, D. Prodanović, A. Jauković (2012): Izazovi pri merenju protoka u kanalizaciji mobilnim ultrazvučnim uredjajima. 12-ta međunarodna konferencija: Vodovodni i kanalizacioni sistemi, Jahorina, Pale, Republika Srpska, strane: 236-243.
- [16] Jeanbourquin, D., Sage, D., Nguyen, L., Schaeli, B., Kayal, S., Barry, D. A., Rossi, L. (2011) Flow measurements in sewers based on image analysis: automatic flow velocity algorithm. *Water Science & Technology*, 64 (5), 1108-1114.
- [17] Jauković A., M. Mihajlović, D. Prodanović, J. Vukić, D. Bićanić (2010): Measurement of waste water quantity and quality at Belgrade sewerage and stormwater system. Regional Expert Meeting: Regional Rainfall 2010, Beograd. Edited by J. Despotović, pages: 95-102.
- [18] Cvitkovic M., D. Prodanović, V. Vučurević (2010): Elektromagnetne sonde za merenje protoka otpadnih voda - primer Beogradske Kanalizacije. 10-ta međunarodna konferencija: Vodovodni i kanalizacioni sistemi, Jahorina, Pale, Republika Srpska, strane: 231-239.
- [19] Tehnološko razvojni projekat TR-22013 (2008-2009): Razvoj sistema za merenje količine i kvaliteta vode u otvorenim tokovima baziranog na GPRS komunikaciji sa WEB pristupom za potrebe nadzora i upravljanja. Nosilac projekta: Institut Mihajlo Pupin, finansira Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine.

- [20] Larrarte, F., Bardiaux, J.B., Battaglia, P. and Joannis, C. (2008): Acoustic Doppler flow-meters: a proposal to characterize their technical parameters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(5), pp.261-267.
- [21] McIntyre, N. and Marshall, M. (2008): Field verification of bed-mounted ADV meters. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Vol. 161, No. 4, pp. 199-206. ICE Publishing.
- [22] Butler, D., May, R. and Ackers, J. (2003): Self-cleansing sewer design based on sediment transport principles. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(12), 276-282.
- [23] Godley, A. (2002): Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 197-201.
- [24] Maheepala, U.K., Takyi, A.K. and Perera, B.J.C. (2001): Hydrological data monitoring for urban stormwater drainage systems. *Journal of Hydrology*, 245(1-4), pp.32-47.
- [25] Harremoës, P., Capodaglio, A.G., Hellström, B.G., Henze, M., Jensen, K.N., Lynggaard-Jensen, A., Otterpohl, R. and Sørensen, H. (1993): Wastewater treatment plants under transient loading-Performance, modelling and control. *Water Science and Technology*, 27(12), p.71.
- [26] Bevir, M.K. (1970): The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), pp.577-590.
- [27] OpenFOAM: <https://openfoam.org> (datum poslednje posete: 11.09.2019.)
- [28] SI, Svet Instrumenata: <http://www.si.co.rs/index.html> (datum poslednje posete: 11.09.2019.)

EXAMPLES OF FLAT EM SENSOR APPLICATION FOR FLOW MEASUREMENTS IN COLLECTORS

by

Dušan PRODANOVIĆ, Damjan IVETIĆ
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Summary

Flow measurement in trunks with open flow and in sewer systems is still a challenge: there is no one “the best” method which can solve all requests, but user has to optimize the selection of equipment to fulfill the existing flow and working conditions. One of the possibilities is to use the flat electromagnetic (EM) probes, presented in this paper. Flat EM probe is designed to suit the needs of sewer systems, i.e. they are robust, can operate with low velocities of few cm/s and at the same time can measure high velocities during heavy storms, can work with shallow water and even will operate if covered with sludge and sediments of reasonable height. In large flow profiles, user can easily integrate more flat EM probes into one system,

improving the spatial integration of measured velocities and at the same time keeping the low overall costs. Results of laboratory investigation at Faculty of Civil Engineering in Belgrade are presented in the paper: mapping of 3D magnetic field to delineate the control volume and calculate the weighting function in real conditions, operation of probe under the heavy sediment load of different height and usage of CFD to analyze the influence of real flow field. Few examples of flat EM probe applications are presented at the end of the paper.

Key words: flow measurement, sewer systems, open channel, electromagnetic probes

Redigovano 23.10.2019.