



ETALONIRANJE MERNE NEODREĐENOSTI RAVNIH EM SENZORA

APSTRAKT

Da bi se ostvarilo efikasno upravljanje hidrotehničkim sistemima neophodno je poznavati podatak o protoku. Merenje protoka u tokovima sa slobodnom površinom je generalno komplikovan zadatak koji zahteva znanja iz hidraulike i tehnologije merne opreme. Izbor optimalne merne metode je uslovljen specifičnostima svakog pojedinog mernog mesta, prvenstveno u vidu hidrauličkih parametara, fizičkih karakteristika fluida i provodnika. Najčešće se koristi pristup Brzina – Proticajni Presek, gde se paralelnim određivanjem dve veličine, Srednje profilske brzine i površine proticajnog preseka, dolazi do podatka o protoku. Ključan problem u primeni ove metode je obezbeđivanje dovoljno tačne procene srednje profilske brzine, imajući u vidu da se površina proticajnog preseka može relativno lako odrediti sa merenjem dubine. U većini slučajeva, za merenje srednje profilske brzine, se koriste akustični Dopler uređaji dok u znatno manjoj meri Elektro Magnetni (EM) senzori. U ovom radu su analizirane tehničke karakteristike ravnih EM senzora za merenje brzine u tokovima sa slobodnom površinom. Na osnovu laboratorijskih ispitivanja i poređenja sa etalonskim uređajima veće tačnosti, određene su komponente merne neodređenosti: sistematska, statistička i kombinovana neodređenost. Sračunate vrednosti su upoređene sa rezultatima za akustične Dopler uređaje, dobijene po sličnoj proceduri, čime je omogućeno nepristrasno poređenje dve merne tehnologije.

1. UVOD

Razvoj svesti javnosti, po pitanju zaštite životne sredine, doveo je do povećanja trenutnih znanja o hidrotehničkim infrastrukturnim sistemima. Da bi se procenile količine zagađenja koje napuštaju npr. kanalizacione sisteme i samim tim omogućilo kvantifikovanje negativnog uticaja na životnu sredinu, neophodni su podaci o protoku sa niskom mernom neodređenošću (Roy i saradnici, 2008). Upravo kanalizacioni sistemi su najnepovoljniji tip hidrotehničkih sistema, sa stanovišta postavljanja i održavanja merne opreme. Imajući u vidu spektar nepovoljnih uticaja koji se mogu javiti, kao npr. visok sadržaj vlage, prisustvo agresivnih i korozivnih gasova, nanosa, otpada itd., može se zaključiti da opravdano nose taj epitet.

Za privremena, a i stalna merna mesta za merenje protoka, u kanalizacionim sistemima se najčešće koristi pristup Brzina-Proticajni Presek (B-PP). U okviru ovog pristupa, inženjeri se uglavnom odlučuju za primenu papučastih ADV (eng. Acoustic Doppler Velocimeters) uređaja (Larrarte i saradnici, 2008), koji su trenutno dominantni na globalnom tržištu. Međutim, pokazano je da ovi uređaji imaju

• problema u obezbeđivanju podatka o protoku sa niskom mernom neodređenošću, pogotovo u uslovima sedimentacija kao i niskih dubina i malih brzina (Maheepala i saradnici, 2001; McIntyre i Marshall, 2008; Aguilar i saradnici, 2016). Ravni EM senzori, analizirani u ovom radu, se svakako mogu pozicionirati kao alternativna ili dopunska metoda za merenje protoka. Međutim, eksperimentalni podaci koji bi podržali ovu konstataciju nedostaju u literaturi.

• Za kvantifikaciju sposobnosti proizvoljnog mernog uređaja da izmeri neku fizičku veličinu, u poslednje vreme se koristi parametar merne neodređenosti (JCGM, 2008), koji se vezuje za izmeren podatak. Da bi se došlo do vrednosti merne neodređenosti izmerenog podatka, neophodno je etaloniranje odnosno poređenje sa etalonskom vrednošću, koja ima barem za red veličine nižu neodređenost. Generalno, etalonska merenja srednje profilske brzine ili protoka nisu dostupna na terenu, zbog čega je neophodno izvršiti analizu merne neodređenosti u laboratorijskim uslovima. Nekoliko laboratorijskih ispitivanja je izvršeno sa ciljem analize merne neodređenosti senzora protoka u otvorenim tokovima, ili greške merenja. Maheepala i saradnici (2001) su kalibrisali samo papučaste ADV senzore u mernom kanalu, nakon čega su ih postavili u

¹ Damjan IVETIĆ, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, Bul. Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd (E-mail: damjan.ivetice@gmail.com)

² Prof. dr Dušan PRODANOVIĆ, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, Bul. Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

³ Luka STOJADINOVIĆ, dipl.građ.inž., Institut Jaroslav Černi, Jaroslava Černog 80, 11000 Beograd

kolektore kišne kanalizacije. Heiner i Vermeyen (2012) su ispitali 9 različitih senzora, uključujući jedan EM senzor, u pravougaonim, kružnim i trapezoidnim mernim kanalima. Međutim, koristili su veoma mali broj protoka. Aguilar i saradnici (2016) su razvili laboratorijsku proceduru za etaloniranje merne neodređenosti koju su primenili na dva različita papučasta ADV senzora. Iako su ova istraživanja dovela do novih saznanja o procesu merenja protoka u otvorenim tokovima, nijedna se nije detaljno bavila EM senzorima.

Da bi se nadomestila ova praznina, sprovedena je serija eksperimenata u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Analiziran je rad ravnih EM senzora u standardnim uslovima, odnosno bez prisustva sedimenta. Za etaloniranje merne neodređenosti korišćena je unapređena verzija procedure predložene od Aguilar-a i saradnika (2016). Na ovaj način omogućeno je direktno poređenje rezultata dobijenih za ravne EM senzore sa rezultatima dobijenim za dva papučasta ADV senzora (iz Aguilar i saradnici, 2016).

Struktura ovog rada je formirana je formirana na sledeći način: U okviru poglavlja 2. Metodologija, ukratko je opisana analizirana merna metoda, korišćena laboratorijska instalacija, eksperimentalna procedura za ispitivanje kao i metodologija za procenu komponenata merne neodređenosti. Na kraju poglavlja 2. uveden je i parametar faktor umanjenja merne neodređenosti, na osnovu kojeg je izvršeno poređenje sa papučastim ADV uređajima. U okviru poglavlja 3. prikazani su rezultati kao i odgovarajuća diskusija. Konačno u poglavlju 4. predstavljeni su zaključci izvedeni iz prikazane analize kao i pravci budućih istraživanja.

2. METODOLOGIJA

2.1. Merenje srednje profilske brzine pomoću EM sonde

Određivanje srednje profilske brzine, u okviru primene B-PP metode, je komplikovan zadatak kojem treba pristupiti sa posebnom pažnjom (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011). Generalno, EM sonde se retko koriste u kanalizacionim sistemima, zbog čega su u nastavku predstavljene osnove principa rada ovih uređaja. Takođe, u nastavku su prikazane i osnovne karakteristike ispitivanih uređaja, domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“.

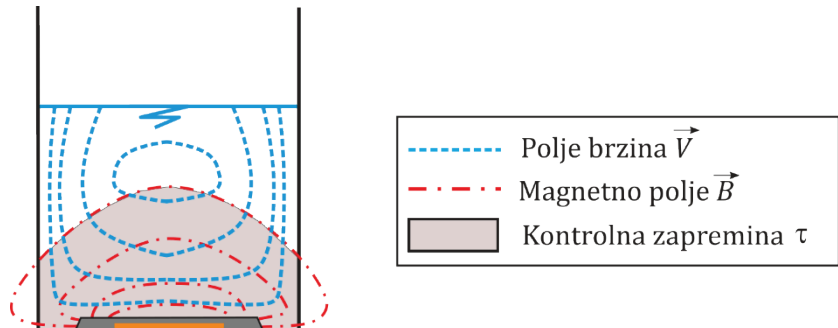
2.1.1. Teorijske osnove principa rada EM sonde

Princip rada EM senzora brzine (ili protoka) se zasniva na Faradejevom zakonu indukcije, prema kojem kretanje provodne tečnosti kroz upravno magnetno

polje, indukuje razliku potencijala na elektrodama uređaja odnosno pojavu elektromotorne sile E . Prvu matematičku relaciju kojom se opisuje primena Faradejevog zakona za merenje protoka tečnosti, predstavljena je od strane Kolin-a (1939). Na osnovu navedene analize, opšta osetljivost EM senzora je opisana vektorskim proizvodom brzine tečenja \vec{V} i jačine magnetnog polja \vec{B} u određenoj tački (Bevir, 1970). Takođe, koristeći konceptualne analize električnih mreža, predložena je relacija kojom se opisuje kako svaki deo toka doprinosi izlaznom naponu E , koristeći tzv. težinsku funkciju w (Shercliff, 1962), odnosno u rigoroznijoj formi težinski vektor \vec{W} (Bevir, 1970):

$$E = \int_{\tau} (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot \vec{V} d\tau = \int_{\tau} \vec{W} \cdot \vec{V} d\tau$$

Gde vektorski proizvod $\vec{B} \times \vec{j}$ definiše Bevirovu težinsku funkciju \vec{W} , τ je kontrolna zapremina EM senzora (zapremina toka koja doprinosi generisanju izlaznog napona E) i \vec{j} je zapreminska gustina virtualne struje (gustina struje koja bi se javila u slučaju protoka jedinične struje između dve elektrode EM senzora). Za razliku od konvencionalnih EM senzora protoka, kakvi se standardno koriste u sistemima pod pritiskom, EM senzori brzine su polu-integrativni uređaji (Steinbock i saradnici, 2016), čija kontrolna zapremina τ najčešće obuhvata samo deo proticajnog profila (Slika 1).



Ravna EM sonda

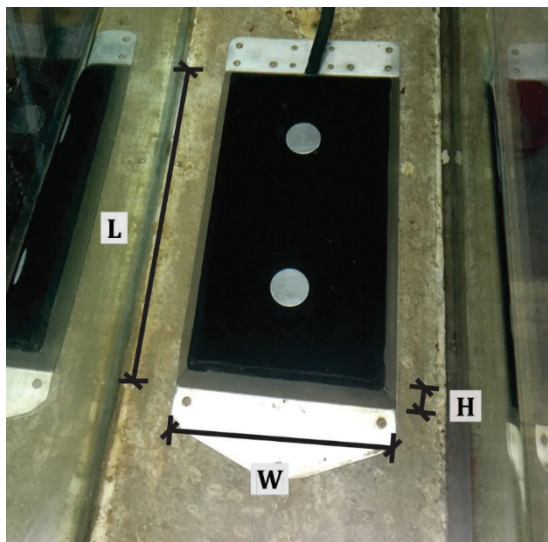
Slika 1. Shematizovan prikaz principa rada ispitivanih Ravnih EM senzora, proizvođača „Svet instrumenata“

2.1.2. Ravne EM sonde

Tokom 20. veka predloženi su različiti koncepti EM sonde za merenje brzine ili protoka u otvorenim tokovima (Gils, 1970, Michalski, 2002). Primena ravnih (spljoštenih) kalemova je prvobitno razmatrana iz čisto ekonomskih, odnosno praktičnih razloga (Hersch, 1978). Ravna EM sonda DC-2 domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“, korišćena u istraživanjima predstavljenim u ovom radu, upravo koristi 2 pobudna kalema ravnog oblika. Ravna EM sonda prvenstveno namenjena upotrebi u kanalizacionim sistemima, za merenje podužne komponente brzine. Ovaj tip senzora se obično postavlja na dno provodnika ili na zidove (kada se koristi više od jedne

sonde na jednom mernom mestu).

Ravan oblik sonde, dimenzija $L = 280$ mm, $W = 160$ mm i $H = 23$ mm (Slika 2.) omogućava minimalno remećenje fluidne struje. Sama sonda je povezana za eksterni loger i napajanje, smešteno u jedno kućište. Podaci se mogu prikupljati bežično preko GPRS veze ili preko standardne serijske (RS-232) veze. Proizvođač navodi da je tačnost DC-2 jedinice $\pm 1\%$, ponovljivost 0.001 m/s, a operativni opseg bidirekcionog karaktera



Slika 2. Ravna EM sonda DC-2 u laboratorijskom kanalu Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu

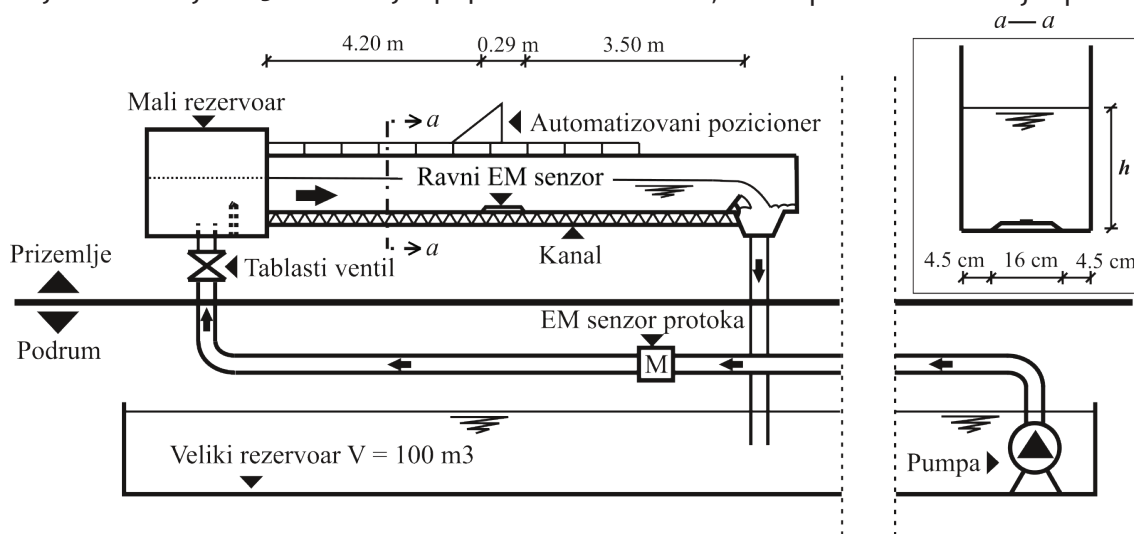
± 15 m/s. Fabrička kalibracija svake ravne EM sonde se sprovodi u kanalu sa vučenim kolicima. Indukovani napon E pokazuje linearnu vezu sa srednjom profilskom brzinom V . Potrošnja električne energije se može kontrolisati, gde jača pobudna struja i duži period osrednjavanja vodi ka povećanoj potrošnji ali i stabilnijim rezultatima (bolji odnos signal/šum). DC-2 ravna EM sonda ima pulsnu bipolarnu pobudu sa dvojnoum frekvencijom, gde je glavna frekvencija komutacije 12.5 Hz. Ovaj tip pobude

omogućava dobru stabilnost nule kao i minimizaciju pojave šuma (Kuromori i saradnici, 1994). Visoka unutrašnja otpornost uređaja, reda veličine oko 20 M Ω , omogućava minimizaciju uticaja varijacije elektroprovodnosti vode na merenja brzine. Očekuje se da će u ekstremnim slučajevima, unutrašnja otpornost uređaja biti barem 1000 puta veća od otpornosti vode.

2.2. Laboratorijska instalacija

Za potrebe etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora u standardnim uslovima korišćena je adaptirana laboratorijska instalacija u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu (Slika 3).

Budući da su ravni EM senzori prvenstveno namenjeni upotrebi u otvorenim tokovima, za potrebe ispitivanja adaptiran je najveći, raspoloživi merni kanal koji se nalazi u prizemlju hidrauličke laboratorije. U merni kanal dužine 8.0 m i širine 0.25 m, instalirana je Flat DC-2 EM sonda, na nekih 4.20 m od uzvodnog malog rezervoara, odnosno 3.50 m od nizvodne prelivne klapne (Slika 3). EM sonda je postavljena duž osovine kanala, na udaljenost od 4.5 cm od bočnih zidova kanala. Nagib kanala je 0.01 %, dok je efektivni Manningov koeficijent hrapovosti varirao oko vrednosti od 0.010 m $^{-1/3}$ s. Protok u kanalu je kontrolisan pomoću pumpe sa frekventnom regulacijom obrtaja i pomoću tablastog ventila na dovodnom cevovodu. Etalonska merenja protoka Q_{EMF} sa usvojenom neodređenošću od 0.6% za prošireni opseg protoka od $2 - 212$ L/s (max u ispitivanju oko 40 L/s), su dobijena pomoću EM senzora protoka instaliranom na dovodnom cevovodu. Merna igla sa nonijusom, postavljena upravno na kanal iznad ravnog EM senzora, je korišćena za etalonsko čitanje dubine (h_B) u opsegu $0 - 40$ cm sa etaloniranom neodređenošću od 0.2 cm. Budući da je predstavljena instalacija zatvorena, elektroprovodnost vode je aproksimirana



Slika 3. Šematski prikaz laboratorijske instalacije korišćene za ispitivanje rada Ravnih EM senzora u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.



kao uniformna i konstantna. Loger ravne EM sonde je bio priključen na konstantan izvor napajanja od 12 V, dok su podaci sa logera prikupljeni pomoću standardne RS-232 veze.

2.3. Laboratorijska procedura

Eksperimentalna procedura korišćena u ovoj analizi predstavlja unapređenu verziju procedure predložene od strane Aguilar-a i saradnika (2016). Za svaki od ispitanih protoka, u mernom kanalu je dostignuta početna dubina za $Q = 0$ a zatim je protok uvećavan ili povećanjem broja obrtaja na pumpi ili korišćenjem tablastog ventila. Imajući u vidu da je fokus istraživanja na merenjima srednje profilske brzine, etalonska srednja profilska brzina V_B (EMF brzina) je sračunata iz etalonskog merenja protoka Q_{EMF} , dubine h_B i poznate relacije $A(h_B)$:

$$V_B = \frac{Q_{EMF}}{A(h_B)} \quad (2)$$

Pre samih merenja, dostignuti su ustaljeni uslovi tečenja za svaki od ispitanih protoka. U proseku je za obezbeđivanje ustaljenosti u mernom kanalu bilo potrebno između 5 i 10 minuta. Jednom kad bi se postigla ustaljenost toka, održavana je u periodu trajanja minimum 2 minuta – ovaj period je nazvan „merni period“ i označen je sa j . Dubina $h_{b,j}$ je zabeležena za svaki merni period a svakih 30 s zabeleženo je i -to merenje sa ravnim EM senzorom - $V_{EMV,i,j}$. Porelelno, protok na etalonskom EM senzoru protoka je beležen sa frekvencijom od 1 Hz i uprosečen, kako bi se dobila vrednost $Q_{EMF,i,j}$. Broj merenja i za svaki merni period j , je bio $n = 4$. Ovde je napravljen otklon od originalne procedure, budući da je korišćeno kraće vreme između dva uzastopna merenja od 30 s umesto 60 s (Aguilar i saradnici, 2016). Maheepala i saradnici (2001), čak predlažu 120 s, međutim rukovođeni idejom da se sa kraćim vremenskim periodom mogu dobiti dodatne informacije o dinamici tečenja, a ujedno je i nepovoljniji slučaj, odlučeno je da se koristi interval od 30 s.

Nad svakim mernim periodom j sprovedena je statistička analiza, tako da su i -ta merenja agregirana u $j = 1 \rightarrow N$ mernih perioda. Srednja vrednost i standardna devijacija i -tih merenja brzine u mernom periodu j su sračunate i obeležene sa $\overline{V_{EMV,j}}$ i $S_{EMV,j}$, respektivno. Na sličan način je sračunata i srednja etalonska EMF brzina od i merenja u mernom periodu j (j -na 2), i označena sa $\overline{V_{B,j}}$.

2.4. Procena merne neodređenosti

Slično kao i u slučaju eksperimentalne procedure, osnove metode za etaloniranje merne neodređenosti senzora brzine su postavili Aguilar i saradnici (2016). Metoda se zasniva na proračunu sistematske,

statističke i etalonske neodređenosti izmerenog podatka o brzini. Za potrebe disertacije, predložena procedura je dodatno unapređena kako bi se smanjila etalonska neodređenost. Međutim, osnova procedure je ostala ista što je omogućilo direktno poređenje karakteristika između, ovde analiziranih ravnih EM senzora i papučastih ADV senzora.

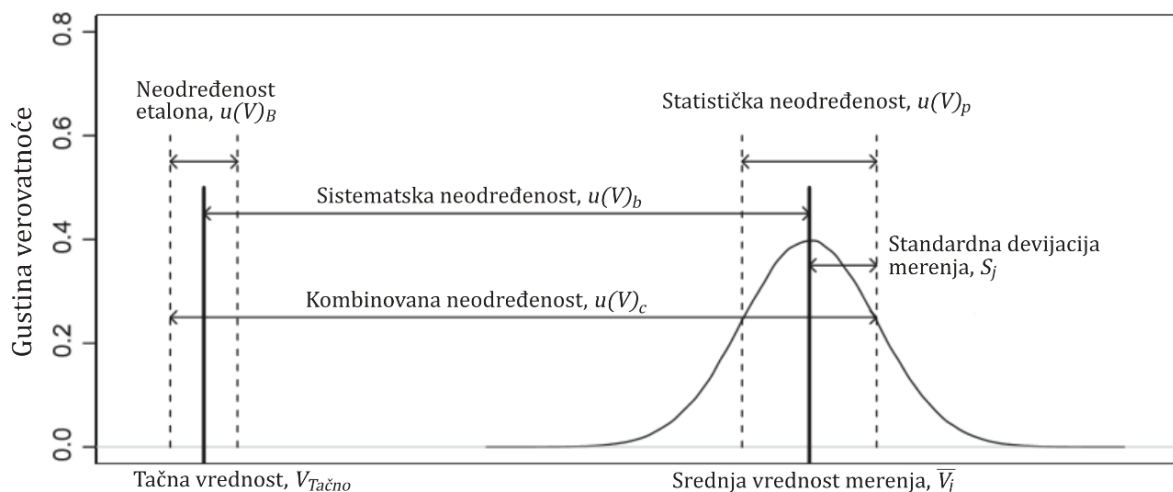
Za kvantitativnu ocenu tačnosti ravnih EM senzora, a i papučastih ADV senzora, korišćen je podatak o mernoj neodređenosti merenja, prema predlogu „Uputstva za procenu neodređenosti u merenjima“ (eng. „Guide to the expression of Uncertainty in Measurements“ iliti GUM) (JCGM, 2008). Do nedavno, uobičajena je praksa bila da se izmerenim vrednosti dodeli vrednost „greške“ merenja, koja je definisana kao razlika između tačne i izmerene vrednosti. Budući da je tačna vrednost fiktivna veličina, odnosno teško se može ikad zaista poznavati, pokrenuta je debata kako parametar „greške“ može imati operativni značaj. Zbog toga je u analizu merenja uvedena „merna neodređenost“ koja se definiše kao „parametar dodeljen rezultatu merenja koji opisuje rasipanje vrednosti koje se mogu opravdano dodeliti merenju“ (JCGM, 2008). Prvenstveno su Coleman i Steele (1995) definisali dve komponente merne neodređenosti, (1) sistematska neodređenost (eng. bias uncertainty) $u(V)_b$ i (2) statistička neodređenost (eng. precision uncertainty) $u(V)_p$, koju su Bertrand-Krajewsky i Muste (2008) primenili na hidrotehnička merenja (Slika 4).

Pored navedenih komponenti merne neodređenosti, neophodno je sračunati i neodređenost etalona (eng. benchmark uncertainty) $u(V)_B$. Ova vrednost se može tumačiti kao minimalna neodređenost koja se može obezbediti za određeni podatak na određenoj laboratorijskoj instalaciji.

2.4.1 Neodređenost etalona

Neodređenost etalona $u(V)_B$ je takođe poznata i kao epistemska neodređenost, odnosno granica poznavanja jednog sistema. Nasuprot epistemskoj neodređenosti postoji „prirodna“ ili statistička neodređenost (Merz i Thieken, 2005). Kao što je i ranije navedeno, etalonsku neodređenost merenja srednje profilske brzine nije moguće odrediti u terenskim uslovima. Zbog toga, neophodno je ovu vrednost kvantifikovati u laboratorijskim uslovima uz napomenu da ona predstavlja gornju granicu tačnosti koja se može obezbediti na terenu. Na osnovu toga, pretpostavlja se da su uređaji za merenje srednje profilske brzine na terenu, neodređeni barem kao oni koji su korišćeni u laboratoriji.

U predstavljenim laboratorijskim istraživanjima, etalonska vrednost srednje profilske brzine je dobijena koristeći jednačinu (2), etalonski EM senzor protoka i mernu iglu sa nonijusom. Etalonski EM senzor protoka može da obezbedi podatke o protoku sa niskom mernom neodređenošću u

Izmerena brzina V

Slika 4. Grafički prikaz komponenti merne neodređenosti i kombinovane merne neodređenosti, dodeljenih merenja srednje profilske brzine V , adaptirano od Coleman i Steele (1995) i Aguilar i saradnici (2016)

cevima pod pritiskom, ukoliko je redovno kalibrisan prema standardu (ISO9104, 1991) i ako su zadovoljene preporuke proizvođača o nizvodnoj i uzvodnoj udaljenosti promena geometrije cevodva. Glavna prednost u odnosu na primenu Venturijevog suženja (Aguilar i saradnici, 2016) se ogleda u tome što je na ovaj način moguće dobiti stabilna merenja protoka za širok spektar uslova u kanalu, uključujući i za vrednosti Frudovog broja blizu 1.

Budući da je etalonska vrednost srednje profilske brzine $V_{B,i,j}$ dobijena na osnovu merenja protoka $Q_{EMF,i,j}$, podeljenim sa površinom proticajnog preseka sračunatom pomoću $h_{B,j}$, neodređenost etalona srednje profilske brzine se definiše po principu propagacije neodređenosti etalona za protok i dubinu (Coleman i Steele, 1995; JCGM, 2008). Primenom principa propagacije neodređenosti dobija se sledeća jednačina za proračun etalona:

$$u(V)_B = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial Q}\right)^2 u(Q)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h}\right)^2 u(h)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial W}\right)^2 u(W)^2} \quad (3)$$

Gde je sa V označena brzina u [m/s], h je dubina u kanalu u [m], w je širina kanala u [m] a Q protok u [m³/s]. Prema j-ni (3) može se zaključiti da vrednost neodređenosti etalona brzine varira sa izmerenim dubinama i protocima. Zbog toga, za neodređenost etalona je usvojena vrednost koja odgovara gornjoj granici intervala poverenja od 95%, odnosno vrednost $u(V)_B = 0.015$ m/s.

2.4.2. Sistematska neodređenost

Sistematska neodređenost izmerenog podatka o brzini se definiše kao razlika između etalonske vrednosti ($V_{B,j}$) i srednje vrednosti i merenja u j -tom mernom periodu ($V_{EMV,j}$). Vrednost sistematske neodređenosti se može sračunati kao standardna

greška reziduala merenja koja vodi do jednačine za kvadratni koren iz srednjeg kvadratnog odstupanja:

$$u(V)_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{B,j} - V_{EMV,j})^2}{N - 2}} \quad (4)$$

Prvi korak u analizi sistematske neodređenosti, prema preporuci Aguilar-a i saradnika (2016) je vizualno poređenje izmerenih vrednosti $V_{EMV,j}$ i odgovarajućih etalonskih vrednosti $V_{B,j}$, koristeći referentnu liniju idealnog slaganja (linija 1:1). Nakon toga, da bi se sagledali uticaji hidrauličkih parametara, reziduali merenja ($V_{B,j} - V_{EMV,j}$) se nanose na grafike kao funkcije dubine u kanalu, srednje profilske brzine i Frudovog broja. Navedeni hidraulički parametri su tretirani kao sistematski uticaji na merenja srednje profilske brzine, na osnovu čega su 1:1 grafici kao i grafici sa rezidualima merenja ispitani za prisustvo trenda. Da bi se uklonili sistematski uticaji od navedenih parametara izvode se odgovarajuće korekcione ili transformacione funkcije za $V_{B,j}$, kao funkcije $V_{EMV,j}$. Imajući u vidu linearnost ravnih EM senzora, za izvođenje ovih funkcija dovoljno je koristiti isključivo linearnu regresionu analizu. Korekcione funkcije, dobijene na ovaj način su primenjene na originalna merenja kako bi se korigovane vrednosti približile referentnoj liniji savršenog uklapanja (linija 1:1). Na osnovu j-ne (3) sračunata je korigovana sistematska neodređenost, transformisanih merenja, $u(V)_{b,adj}$. Treba imati u vidu da redokovanjem sistematske neodređenosti, ravni EM senzori su praktično „lokalno“ kalibrisani (ili rekalibrisani) na uslove u mernom kanalu.

2.4.3. Statistička neodređenost

Statistička neodređenost $u(V)_p$, se definiše kao slučajno odstupanje izmerenih brzina pomoću ravnog EM senzora oko srednje vrednosti, usled



stohastičnosti električnih uslova i uslova sredine (Merz i Thieken, 2005). Laboratorijski eksperimenti su, po pravilu, u mogućnosti da minimizuju navedenu stohastičnost, međutim određene uticaje nije moguće kontrolisati, kao što su varijacije Zemljinog magnetnog polja ili uticaj kućišta senzora na indukovanje turbulencije. Međutim, budući da se ovi uticaji javljaju i na terenu, smatrani su prihvatljivim.

Vrednosti statističke neodređenosti su procenjene kao standardna devijacija $S_{EMV,j}$ od $n > 3$ merenja srednje profilske brzine za N mernih perioda pri ustaljenim uslovima. Na ovaj način sračunate se standardne devijacije za merne periode koji pokrivaju ceo analizirani opseg srednjih profilskih brzina. Pre konačnog definisanja integralne vrednosti statističke neodređenosti $u(V)_p$, izvršena je vizuelna inspekcija grafika koji prikazuju zavisnost $S_{EMV,j}$ od hidrauličkih parametara: dubine u kanalu, etalonske brzine i Frudovog broja. Ukoliko ne postoji trend između navedenih veličina, statistička neodređenost se može sračunati kao medijana svih sračunatih $S_{EMV,j}$, budući da je medijana robusna na granične slučajeve.

2.4.4. Kombinovana neodređenost

Konačno, vrednost kombinovane neodređenosti izmerene srednje profilske brzine $u(V)_c$ se može sračunati kao kvadratni koren zbira kvadrata komponenata neodređenosti, nekorigovane $u(V)_b$ ili korigovane $u(V)_{b,adj}$ sistematske neodređenosti, statističke neodređenosti $u(V)_p$ i neodređenosti etalona $u(V)_B$:

$$u(V)_c = \sqrt{u(V)_{b,adj}^2 + u(V)_p^2 + u(V)_B^2} \quad (5)$$

2.4.5. Poređenje sa ADV uređajima

Budući da je procedura korišćena za etaloniranje merne neodređenosti ravnih EM senzora, zasnovana na proceduri korišćenoj za analizu dva papučasta ADV senzora (Aguilar i saradnici, 2016), omogućeno je direktno poređenja ova dva uređaja. Kao kvantitativan i relativan parametar poređenja, uvodi se Faktor Smanjenja Neodređenosti (eng. Uncertainty Reduction Factor - URF_x). Parametar URF_x se definiše kao odnos odgovarajućih komponenata merne neodređenosti kao i kombinovane neodređenosti (Ivetic i saradnici, 2018):

$$URF_x = \frac{u(V)_{x,ADV}}{u(V)_{x,EMV}} \quad (6)$$

Gde x predstavlja oznaku za jednu od analiziranih mernih neodređenosti (B - etalonska, b - sistematska, p - statistička, c - kombinovana).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon obavljenih eksperimentalnih istraživanja, prvi korak je vizualna inspekcija rezultata. Mereni podaci dobijeni sa ravnog EM senzora su pokazali da je sonda adekvatno reagovala na promene protoka, kao i da je postoji linearna zavisnost između izmerenih i etalonskih brzina. Takođe, ustanovljeno je da nije bilo prekida u snimljenim podacima, odnosno da su uslovi omogućili kontinualan rada senzora.

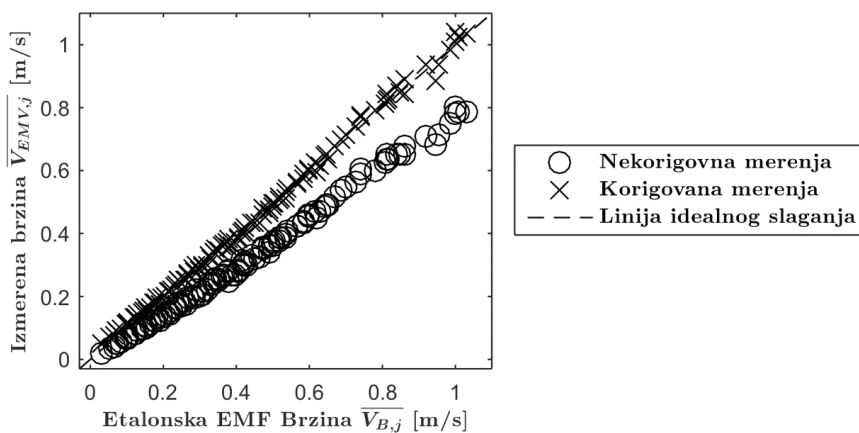
U narednim poglavljima, predstavljeni su rezultati etaloniranja sistematske, statističke i kombinovane neodređenosti merenja dobijenih korišćenjem ravnog EM senzora. Neodređenost etalona nije posebno razmatrano ovde, budući da je već prethodno sračunata i definisana u okviru poglavlja 2.4.1. Dobijene vrednosti neodređenosti merenja srednje profilske brzine ravnim EM sensorima su upoređeni sa rezultatima, predstavljenim u Aguilar i saradnici (2016), za dva papučasta ADV uređaja. Konačno, razmatran je i praktični značaj dobijenih rezultata.

3.1. Sistematska neodređenost

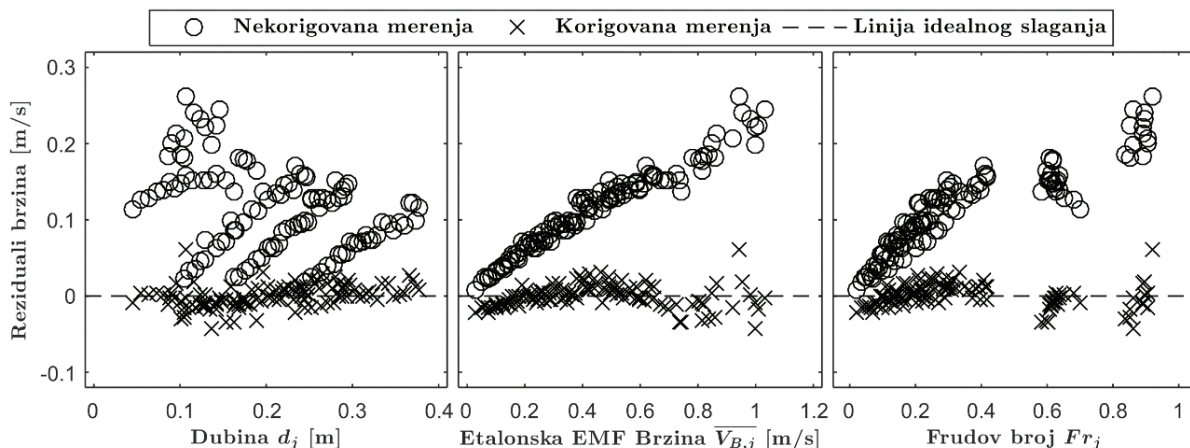
Prva razmatrana komponenta merne neodređenosti je sistematska neodređenost. Prethodno je napomenuto da redukovanje, odnosno korekcija, sistematske neodređenosti može da se tumači kao lokalna kalibracija (rekalibracija) ravnih EM senzora. Razlog za primenu ovakve terminologije leži u činjenici da je mapiranjem magnetnog polja ravne EM sonde ustanovljeno da širina kanala nije dovoljna da cela kontrolna zapremina EM senzora stane u kanal (Slika 1). Naime na taj način, ravna EM sonda je radila sa manjom efektivnom kontrolnom zapreminom u odnosu na uslove pri fabričkoj kalibraciji, što je konačno imalo sistematski uticaj na izlazni signal.

U skladu sa procedurom predstavljenom u poglavlju 2.4.2, izvedene su odgovarajuće korekcione (transformacione) funkcije za redukovanje sistematske neodređenosti i dobijanje $V_{EMVadj,j}$. Rezultujući kvadratni koren iz srednjeg kvadratnog odstupanja korigovanih merenja je sračunat i označen sa $u(V)_{b,adj}$ (korigovana sistematska neodređenost). Vrednosti nekorigovane i korigovane sistematske neodređenosti su zajedno za odgovarajućom korekcionom funkcijom prikazani u okviru Tabele 1. Pored toga, na Slici 5 su prikazane izmerene vrednosti brzine pomoću ravne EM sonde, pre korekcije $V_{EMV,j}$ i nakon $V_{EMVadj,j}$ u funkciji od etalonskih merenja srednje brzine V_B , sa referentnom 1:1 linijom idealnog slaganja. Može se primetiti da nekorigovana i korigovana merenja brzine sa ravnim EM sondom pokazuju jasnu linearnu vezu sa etalonskim merenjima srednje profilske brzine, unutar ispitnog opsega brzine (nažalost, na laboratorijskoj instalaciji nije bilo moguće ispitati pun radni opseg definisan

od strane proizvođača). Linearnost ravnih EM senzora omogućava primenu jednostavnih linearnih korekcionih funkcija (za razliku od papučastih ADV senzora – Tabela 1), definisanih sa samo dva parametra, za redukovanje sistematskih uticaja na merenja. Takođe, može se uočiti da je za korigovanje merenja, potrebno povećati nagib kalibracione krive. Na ovaj način potvrđena je hipoteza da je širina mernog kanala nedovoljna da prihvati celu kontrolnu zapreminu ravnog EM senzora, što posledično dovodi do sistematskog slabljenja signala. Konačno, na osnovu navedenih činjenica, može se zaključiti da je pre instalacije ovih uređaja u terenskim uslovima, potrebno sprovesti lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora kojim bi se uklonio uticaj geometrijskih karakteristika provodnika na profil brzine i na kontrolnu zapreminu.



Slika 5. Nekorigovana i korigovana merenja brzine pomoću ravne EM sonde naspram etalonske EMF brzine su 1:1 linijom idealnog slaganja



Slika 6. Reziduali merenja brzina pomoću ravnih EM sondi sa linijom idealnog slaganja u zavisnosti od dubine, etalonske EMF brzine i Frudovog broja

Da bi se ustanovila priroda, odnosno poreklo, sistematskog uticaja hidrauličkih parametara, na Slici 6, su prikazane zavisnosti između reziduala merenja i vrednosti dubine, etalonske EMF brzine i Frudovog broja. Može se uočiti jasna zavisnost između reziduala

i etalonske EMF brzine, koja je naknadno eliminisana primenom linearnih korekcionih funkcija. Takođe može se uočiti da vrednosti rezidua imaju opadajući trend sa porastom dubine, što se može pripisati činjenici da su manje brzine zabeležene pri višim dubinama.

Vrednosti nekorigovane i korigovane sistematske neodređenosti su u Tabeli 1, upoređene sa rezultatima dobijenim za dva papučasta ADV senzora, ispitana u okviru istraživanja Aguilar-a i saradnika (2016). Treba imati na umu, da direktno poređenje nekorigovanih sistematskih neodređenosti nije primereno, budući da je u slučaju ravnih EM senzora jasan sistematski uticaj smanjenja kontrolne zapremine, što nije slučaj kod papučastih ADV senzora. Sa druge strane, vrednosti korigovane sistematske neodređenosti praktično pružaju uvid u potencijal primene ravnih EM senzora. Može se videti da ukoliko se ravni EM senzor lokalno kalibriše (rekalibriše), može da radi sa značajno manjom sistematskom neodređenošću u odnosu na ADV senzore. Vrednosti faktora smanjenja sistematske neodređenosti $URF_{B,adj}$ su 3.1 i 11.5 u poređenju sa senzorima ADV A i B respektivno.

Rezultati analiza predstavljenih u ovom poglavlju ukazuju na dodatne pogodnosti primene ravnih EM senzora, koje imaju jasan praktičan značaj.

Prethodne analize papučastih ADV senzora su ukazale (Maheepala, 2001; McIntyre i Marshall, 2008; Aguilar i saradnici, 2016) na probleme sa

minimalnom granicom detekcije i mrtvom zonom, koje za posledice dovode do loših merenja pri malim brzinama i dubinama. Ovi problemi nisu uočeni u primeni ravnih EM senzora. Tako se na Slici 6, može videti da su zabeležena adekvatna merenja brzine pri dubinama od vode od samo 4 cm (~2 cm odstojanja između nivoa vode i elektroda). Pored toga, brzine od samo 3 cm/s su adekvatno izmerene, što je posebno korisno u slučaju merenja brzine u kolektorima sa blagim nagibom ili pod uticajem uspora.

Tabela 1. Poređenje rezultata etaloniranja merne neodređenosti između ravnih EM senzora i dva papučasta ADV-a (Aguilar i saradnici, 2016)

Senzor	Tip	Broj mernih perioda	Korekciona funkcija	Nekorigovana sistematska neodređenost *	Korigovana sistematska neodređenost	Statistička neodređenost
				[m/s]	[m/s]	[m/s]
1	ravna EM	114	$(V - 0.020)/0.790$	0.128	0.015	0.006
2	ADV	287	$0.875 \cdot V^{0.968}$	0.096	0.048	0.015
3	ADV	349	$0.692 \cdot V^{0.912}$	0.439	0.179	0.067
Faktor smanjenja neodređenosti			$URF_{x,A}$	0.75	3.13	2.41
			$URF_{x,B}$	3.43	11.57	10.63
Senzor	Tip	Broj mernih perioda	Korekciona funkcija	Etalonska neodređenost	Nekorigovana kombinovana neodređenost *	Korigovana kombinovana neodređenost
				[m/s]	[m/s]	[m/s]
1	ravna EM	114	$(V - 0.020)/0.790$	0.015	0.129	0.023
2	ADV	287	$0.875 \cdot V^{0.968}$	0.017	0.098	0.054
3	ADV	349	$0.692 \cdot V^{0.912}$	0.017	0.444	0.192
Faktor smanjenja neodređenosti			$URF_{x,A}$	1.13	0.76	2.38
			$URF_{x,B}$	1.13	3.45	8.52
* Direktno poređenje nije primereno zbog različitih izvora neodređenosti						

3.2. Statistička neodređenost

Statistička neodređenost merenja dobijenih pomoću ravnih EM senzora je definisana kao standardna devijacija od $n > 3$ merenja pri ustaljenim uslovima tečenja u mernom kanalu. Pre procene konačne vrednosti statističke neodređenosti, izvršena je vizuelna inspekcija sračunatih standardnih devijacija ($S_{V,EMV,j}$) kao funkcije izmerene dubine, etalonske brzine i Frudovog broja (Slika 7). Na dijagramima se može primetiti da ne postoje jasna korelacija između standardne devijacije i ispitanih parametara, osim u slučaju poređenja sa etalonskom brzinom. Ovde je uočen blagi uzlazni trend, koji se može pripisati ne-hidraulički oblikovanim ivicama ravnog EM senzora, međutim dalja istraživanja su neophodna pre donošenja konačnog zaključka. Pretpostavlja se da sa porastom srednje profilske brzine, odvajanje koherentnih turbulentnih vrtloga počinje značajnije da utiče na merenje brzine. Uprkos tome, u Tabeli 1 se može videti da je statistička neodređenost ravnih EM senzora dosta niža nego kod ADV senzora. Faktor smanjenja neodređenosti URF_p iznosi 2.4 i 10.6 u

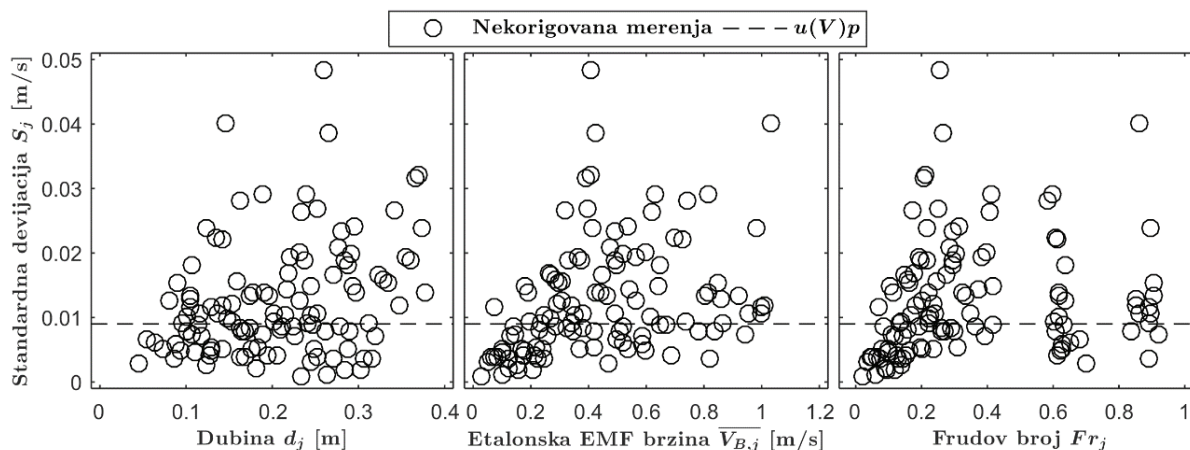
poređenju sa ADV senzorom A i B, respektivno.

3.3. Kombinovana neodređenost

Doprinosi od komponenata merne neodređenosti, etalonske, sistematske i statističke su agregirani u jedinstvenu vrednost kombinovane merne neodređenosti. U Tabeli 1 se može videti da je faktor smanjenja neodređenosti, u poređenju ravnih EM senzora i papučastih ADV senzora A i B, 2.4 i 8.5, respektivno. NA osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da ravni EM senzori imaju određene značajne prednosti u odnosu na papučaste ADV. Glavni razlog, verovatno leži u prirodi mernih tehnologija, gde kod EM senzora postoji jasan i relativno robusan integrativni princip rada, što se ne može reći i za ADV uređaje.

3.4. Praktični aspekt rezultata istraživanja

Rezultati laboratorijskog etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora ukazuju na značajne



Slika 7. Standardne devijacije merenja brzina pomoću ravnih EM sonde sa statističkom neodređenošću u zavisnosti od dubine, etalonske EMF brzine i Frudovog broja

prednosti u primeni ove metode za merenje protoka u hidrotehničkim sistemima sa otvorenim tokovima. Korišćenjem, u osnovi iste, procedure za etaloniranje koja je prethodno primenjena na papučastim ADV sensorima, omogućila je nepristrasno poređenje karakteristika ova dva tipa mernih uređaja. Iako se ovde diskutuje samo o laboratorijskim ispitivanjima, ona su dovoljna za formiranje hipoteze da ravni EM senzori mogu da pruže dodatne prednosti u merenjima protoka u otvorenim tokovima. Najbitnije karakteristike istražene i verifikovane ovim istraživanjem su navedene u nastavku:

- Ravni EM senzori mogu da mere srednju profilsku brzinu, sa niskom mernom neodređenošću u širem opsegu hidrauličkih uslova nego papučasti ADV uređaji. Prvenstveno, može da radi sa dubinama od svega nekoliko cm (4 cm) kao i pri malim brzinama (3 cm/s) (Slike 5 i 6, Tabela 1).
- Ravni EM senzori su linearni u ispitanom opsegu brzina (0 – 1.1 m/s). Ova bitna osobina, omogućava primenu jednostavnih linearnih korekcionih funkcija (Tabela 1) za uklanjanje sistematske neodređenosti mernih podataka. Linearnost je još jedna prednost u odnosu na papučaste ADV senzore.
- U odnosu na papučaste ADV senzore, merenja pomoću ravnih EM uređaja su stabilnija i ponovljivija, što je dokazano vrednostima Faktora smanjenja statističke neodređenosti $URF_p > 2.4$, uprkos tome što su korišćeni kraći merni intervali (Slika 7 i Tabela 1).
- Nakon instalacije ravnih EM senzora, potrebno je sprovesti lokalnu kalibraciju (rekalibraciju) uređaja kako bi se minimizirali sistematski uticaji geometrije na merenja srednje profilske brzine.
- Konačno, nakon lokalne kalibracije (rekalibracije) ili uklanjanja sistematske neodređenosti u izmerenim podacima, ravni EM senzori su pokazali veću tačnost nego papučasti ADV uređaji ($URF_c > 2.3$) (Tabela 1).

Razlog za ovakve rezultate u poređenju dve metode, treba potražiti u prirodi merne metode.

EM tehnologija ima jasniji i robusniji princip rada koji omogućava kako veću tačnost tako i veću stabilnost u merenjima. Pored toga, princip rada metode omogućava i merenja u dosta širem spektru hidrauličkih uslova.

4. ZAKLJUČCI

U ovom radu su prikazani rezultati laboratorijskog etaloniranja neodređenosti merenja srednje profilske brzine u otvorenim tokovima, korišćenjem ravne EM sonde proizvođača „Svet instrumenata“. Upotrebom laboratorijske procedure slične kao u prethodnim istraživanjima (Aguilar i saradnici, 2016), omogućeno je nepristrasno poređenje EM sonde sa popularnijim ADV sensorima. Rezultati laboratorijskog etaloniranja merne neodređenosti su nedvosmisleno ukazali da EM senzori mogu da se koriste kao alternativa ili suplementarna tehnologija, ADV sensorima. Ravni EM senzori su pokazali bolju ponovljivost (preciznost) i višu tačnost merenja srednje profilske brzine, ukoliko se kalibrišu prema uslovima na lokalnom mernom mestu. Pored toga, uočeno je da ovi senzori mogu adekvatno da rade u širem spektru hidrauličkih uslova nego ADV senzori, u pogledu dubina i brzina. Konačno ravni EM senzori su pokazali dobru linearnost u ispitanom opsegu brzina (0 – 1.1 m/s).

Međutim iako je pokazano da su ravne EM sonde superiorne po brojnim parametrima u odnosu na papučaste ADV senzore, glavna mana im je relativno mala kontrolna zapremina. Na ovaj način ravna EM sonda dolazi do podatka o brzini na osnovu relativno malog udela celokupnog proticajnog preseka što na terenu može dovesti do pristupstva značajne sistematske neodređenosti. Zbog toga se predlaže da se pre instaliranja ovih uređaja, sprovede neka vrsta pred-pozicione analize ili kalibracija prema lokalnim uslovima, kojom bi se omogućila redukcija ovog i ostalih sistematskih uticaja. Primenom ove procedure, omogućilo bi se iskorišćenje punog potencijala ravnih EM senzora na terenu, prvenstveno u pogledu tačnosti, stabilnosti i ponovljivosti.



LITERATURA

1. Aguilar, M.F., McDonald, W.M. and Dymond, R.L., 2016. Benchmarking laboratory observation uncertainty for in-pipe storm sewer discharge measurements. *Journal of Hydrology*, 534, pp.73-86.
2. 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.
3. McIntyre, N. and Marshall, M., 2008, August. 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.
4. 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.
5. Joint committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization.
6. Heiner, B.J. and Vermeyen, T.B., 2012. Laboratory evaluation of open channel area-velocity meters. US Bureau of Reclamation, Denver, CO, p.15.
7. Bonakdari, H. and Zinatizadeh, A.A., 2011. Influence of position and type of Doppler flow meters on flow-rate measurement in sewers using computational fluid dynamic. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(3), pp.225-234.
8. Kolin, A., 1936. An electromagnetic flowmeter. Principle of the method and its application to bloodflow measurements. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 35(1), pp.53-56.
9. Bevir, M.K., 1970. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), pp.577-590.
10. Shercliff, J.A., 1962. The theory of electromagnetic flow-measurement. CUP Archive.
11. Michalski, A., Starzynski, J. and Wincenciak, S., 2001. Electromagnetic flowmeters for open channels: two-dimensional approach to design procedures. *IEEE sensors journal*, 1(1), pp.52-61.
12. Herschy, R.W., 1978. Accuracy in Hydrometry. Wiley, New York.
13. Gils, H., 1970. Discharge measurement in open water by means of magnetic induction. In *Symposium on hydrometry*, Koblenz.
14. Kuromori, K., Gotoh, S. and Matunaga, Y., 1994. An electromagnetic flowmeter with dual frequency excitation. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 30(9), pp.1020-1026.
15. Merz, B. and Thielen, A.H., 2005. Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 309(1-4), pp.114-132.
16. Bertrand-Krajewski, J.L. and Muste, M., 2008. Understanding and managing uncertainty. *Data requirements for integrated urban water management*. Edited by: Tim Fletcher and Ana Deleti? (Vol. 1). Paris: UNESCO Publishing and Taylor & Francis.
17. Coleman, H.W. and Steele, W.G., 1995. Engineering application of experimental uncertainty analysis. *AIAA journal*, 33(10), pp.1888-1896.
18. Ivetić, D., Prodanović, D. and Stojadinović, L., 2018. Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage Systems. *Journal of Hydrology*, 566(11), pp.455-469.
19. D. IVETIĆ, M. IVETIĆ, N. JAĆIMOVIĆ, Interaktivni pristup u primeni strategije razvoja vodovodnog sistema Pančeva (Interactive approach in the Pancevo water supply development strategy implementation), "Voda i sanitarna tehnika " br. 3/4-2016.