

## **Merenje protoka vode u tunelima pri kombinovanim uslovima tečenja: primer tunela Dabarsko Polje - Fatničko polje**

Damjan Ivetić<sup>1</sup>  
Dušan Prodanović<sup>2</sup>  
Mile Cvitkovic<sup>3</sup>

APSTRAKT: U opštem slučaju, metode za merenje protoka vode se mogu klasifikovati prema uslovima tečenja na mernom mestu, pa se tako određene metode koriste u sistemima pod pritiskom dok nešto drugačije u sistemima gde se javlja tečenje sa slobodnom površinom. U određenim slučajevima, na mernom mestu se može javiti i tečenje pod pritiskom i sa slobodnom površinom, odnosno tzv. kombinovani uslovi tečenja. U ovom radu analiziran je jedan upravo takav slučaj, derivacioni tunel između Dabarskog i Fatničkog Polja u okviru sistema Hidroelektrane na Trebišnjici (HET). Glavne karakteristike ovog tunela, pored kombinovanih uslova tečenja, su i imponantne dimenzije, gde prečnik varira od 5,0 m do oko 5,6 m, kao i bidirekcionni raspon protoka od -40 do ~55 m<sup>3</sup>/s. Za potrebe merenja protoka projektovano je i izvedeno jedno merno mesto unutar tunela, neposredno uz izlazno/ulaznu građevinu u Fatničkom polju, opremljeno sa četiri ravne EM sonde, dva logera pritiska i dve kontrolne EM sonde tipa „Ajkulino krilo“. Imajući u vidu karakteristike tunela kao i merne metode, neophodno je pažljivo uspostaviti korelaciju između izmerene brzine i srednje profilske, odnosno lokalno kalibrisati ravne EM senzore brzine. U radu je analizirana mogućnost lokalne kalibracije ravnih EM senzora brzine pomoću kontrolnih EM sondi „Ajkulino krilo“. Dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima „suve kalibracije“ sprovedene korišćenjem teorijskog rasporeda brzine i jednodimenzionalne težinske funkcije.

Ključne reči: Merenje protoka, Merenje brzine, Elektro Magnetni senzori, Lokalna kalibracija, Derivacioni tunel, Kombinovani uslovi tečenja

---

<sup>1</sup> Damjan Ivetić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> Prof. dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [dprodanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:dprodanovic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Mile Cvitkovic, dipl. inž. el., „Svet Instrumenata“, Vinča-Beograd, [cvitkovic@yahoo.com](mailto:cvitkovic@yahoo.com)

# 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

## 1 Uvod

Jedan od preduslova za efikasno upravljanje velikim hidrotehničkim sistemima je poznavanje protoka, odnosno kontrolisanje bilansa vode u okviru sistema. Imajući u vidu značaj podatka o protoku, kao i specifičnosti različitih tipova hidrotehničkih sistema, vremenom su se razvili brojni i raznovrsni pristupi, odnosno metode za merenje protoka tečnosti. Generalno, izbor optimalne metode za merenje protoka u okviru određenog hidrotehničkog sistema je povezan sa brojnim uslovima koji karakterišu određeni sistem. Iz navedenog spektra uslova, moguće je izdvojiti dominantne koje svakako treba uzeti u razmatranje pri izboru merne opreme (Godley, 2002): hidraulički uslovi, karakteristike fluida, fizičke karakteristike provodnika (cevovoda, kanala ili tunela) i karakteristike sredine.

Ukoliko se razmatraju hidraulički uslovi na planiranom mernom mestu (Prodanović i saradnici, 2011), na izbor adekvatne merne metode najviše utiče tip tečenja koji se javlja: tečenje sa slobodnom površinom, tečenje pod pritiskom ili kombinovani uslovi tečenja (kombinacija prethodna dva). U većini slučajeva, merni instrumenti su specijalizovani ili za sisteme pod pritiskom ili za otvorene tokove. U opštem slučaju, merenje protoka u otvorenim tokovima je kompleksniji i zahtevniji zadatak (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011), budući da je površina proticajnog preseka promenljiva i može da varira u veoma širokom spektru (npr kombinovani kanalizacioni sistemi, Harramoses i saradnici, 1993). Poseban slučaj, predstavljaju sistemi u kojima se javljaju kombinovani uslovi tečenja, gde je manevarski prostor pri izboru adekvatne merne metode dodatno sužen, usled pojave tečenja pod pritiskom.

Kombinovani uslovi tečenja se u praksi najčešće javljaju u atmosferskim ili kombinovanim kanalizacionim sistemima, a nešto ređe i u derivacionim tunelima hidroenergetskih sistema. Kako bi se obezbedili adekvatni mereni podaci o protoku, najčešće se u ovim slučajevima koristi pristup Brzina – Proticajni Presek (B-PP) (Campisano i saradnici, 2012). U okviru primene B-PP, podatak o protoku se dobija paralelnim merenjem dubine i brzine. Merenjem dubine, i korišćenjem stabilne  $A(h)$  relacije, dobija se podatak o površini proticajnog preseka. Sa druge strane, problemi se javljaju kada je potrebno izmerenu brzinu  $V_{mer}$ , korelisati sa srednjom profilskom brzinom  $V$ . U analizi neodređenosti (JCGM, 2008), ili greški, konačne procene protoka  $Q$ , dominantan uticaj ima upravo neodređenost srednje profilске brzine. Neodređenost podatka o srednjoj profilskoj brzini ima dvojaki karakter, zbog čega je za definisanje odgovarajuće korelacije  $V = K(V_{mer})$  potrebno poznavanje hidrauličkih uslova na mernom mestu kao i same merne tehnologije (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011).

U ovom radu je analiziran jedan od praktičnih primera merenja protoka metodom B-PP, u kombinovanim uslovima tečenja. Merenja su obavljena u okviru sistema Hidroelektrane na Trebišnjici (HET) na derivacionom tunelu koji povezuje Dabarsko i Fatničko Polje. Za merenje dubine, odnosno pritiska, korišćene su dve pjezorezistivne sonde, dok su za određivanje srednje profilске brzine instalirane 4 ravne EM sonde i 2 kontrolne EM sonde „Ajkulino krilo“. Fokus rada je na ispitivanju mogućnosti lokalne kalibracije 4 ravne EM sonde na zidu tunela, tj. definisanja adekvatne korekcionе funkcije  $K$  za određivanje srednje profilске brzine  $V$ . Postupak lokalne kalibracije je sproveden na dva načina: 1.) primenom tzv. „Suve“ kalibracije koji se zasniva na upotrebi teorijskog rasporeda brzine koji se može pretpostiviti u mernom profilu kao i jednodimenzionalne težinske funkcije i 2.) primenom redukcionog, kontrolnog, mernog sistema kao etalona tokom početnog perioda eksploatacije. Na osnovu dobijenih rezultata, razmatrani su praktični aspekti primene predloženih procedura.

# 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

## 2 Metodologija

### 2.1 Merenje protoka metodom B-PP

Sistemi za merenje protoka metodom B-PP, zahtevaju paralelno merenje dubine  $h$  i brzine  $V_{mer}$ . Određivanje srednje profilske brzine  $V$ , samim tim i korekzione funkcije  $K$ , je komplikovan zadatak kojem treba pristupiti sa posebnom pažnjom (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011). Konačan podatak o protoku  $Q$  se dobija množenjem površine proticajnog preseka  $A$ , sračunate pomoću izmerene dubine  $h$ , i srednje profilske brzine  $V$ :

$$Q = A(h) \cdot V = A(h) \cdot K \cdot V_{mer} \quad (1)$$

U okviru projektovanog i izvedenog mernog sistema na derivacionom tunelu DP-FP, korišćene su 4 ravne EM sonde (Cvitkovac i saradnici, 2010; Ivetić i saradnici, 2018) i dve kontrolne EM sonde „Ajkulino krilo“, za merenje brzine. Budući da se EM sonde koriste ređe u praksi, u nastavku su predstavljene osnove principa rada ovih uređaja. Nakon toga, prikazane su i osnovne karakteristike korišćenih uređaja, domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“.

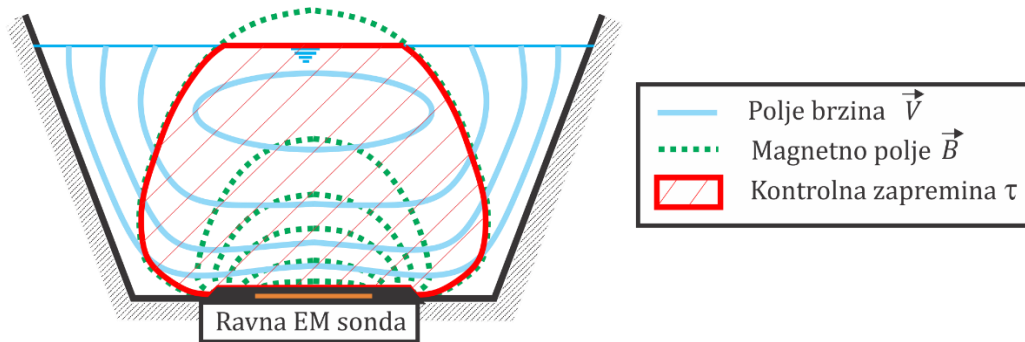
#### 2.1.1 Teorijske osnove principa rada EM sondi

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  $E$ . Opšta osetljivost EM senzora je opisana vektorskim proizvodom brzine tečenja  $\vec{V}$  i jačine magnetnog polja  $\vec{B}$  u određenoj tački (Bevir, 1970). Slično, 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):

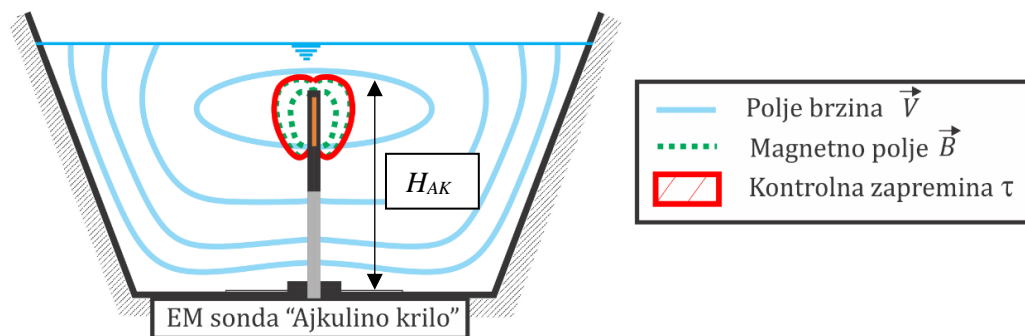
$$E = \int_{\tau} (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot \vec{V} d\tau = \int_{\tau} \vec{W} \cdot \vec{V} d\tau \sim \int_{\tau} w \cdot \vec{V} d\tau \quad (2)$$

Gde vektorski proizvod  $\vec{B} \times \vec{j}$  definiše Bevirovu težinsku funkciju  $\vec{W}$ ,  $\tau$  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 praktične potrebe, umesto težinskog vektora  $\vec{W}$  koristi se jednostavna jednodimenzionalna (Ivetić i saradnici, 2017) ili dvodimenzionalna težinska funkcija  $w$  (Shercliff, 1962). 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  $\tau$  najčešće obuhvata samo deo proticajnog profila (Slika 1). Zahvaljujući „fizički baziranom“ mernom sistemu, EM senzori mogu da mere od jako malih brzina vode (Prodanović, 2006) od par mm/s do brzina od preko 10 m/s.

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.



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



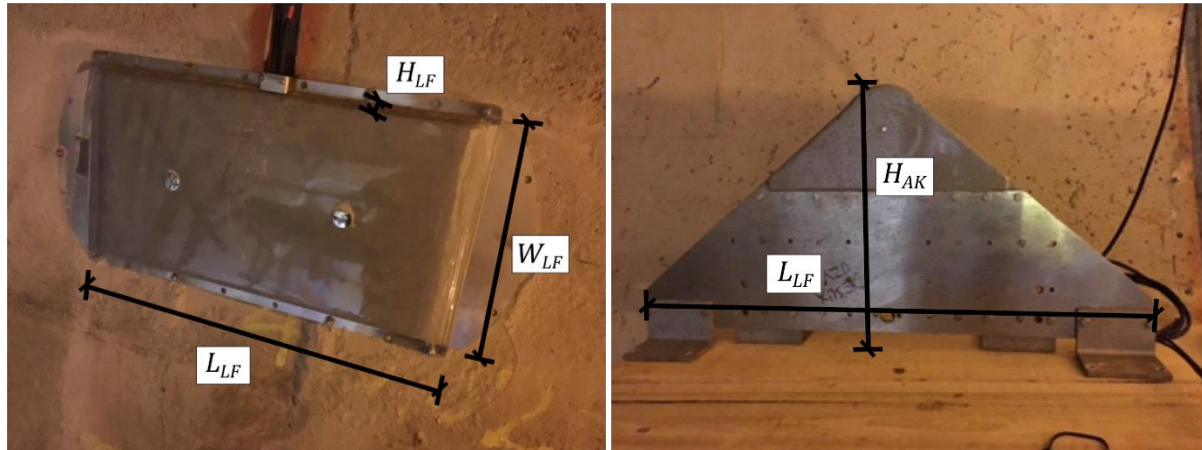
Slika 2. Shematizovan prikaz principa rada EM senzora „Ajkulino krilo“, proizvođača „Svet instrumenata“

### 2.1.2 Ravne EM sonde i EM sonde „Ajkulino krilo“

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 (Herschly, 1978). Oba korišćena tipa EM senzora: velike ravne EM sonde DC-2, kao i EM sonde „Ajkulino krilo“ domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“, upravo koriste pobudne kaleme ravnog oblika. Takođe, oba tipa senzora se koriste za merenje podužne komponente brzine, s tim što je kontrolna zapremina ravnih senzora veća u odnosu na kontrolnu zapreminu „Ajkulinog krila“ (Slika 1 i Slika 2).

Konstrukcija senzora je takva da omogućava minimalno remećenje fluidne struje. Velike ravne EM sonde su dimenzija  $L_{LF} = 800$  mm,  $W_{LF} = 380$  mm i  $H_{LF} = 25$  mm (Slika 3 Levo.), dok su dimenzije sonde „Ajkulino krilo“  $L_{AK} = 700$  mm,  $W_{AK} = 15$  mm i  $H_{AK} = 300$  mm (Slika 3 Desno.). Proizvođač navodi da je tačnost senzora  $\pm 1\%$ , ponovljivost 1 mm/s, a operativni opseg bidirekcionog karaktera  $\pm 15$  m/s. Fabrička kalibracija EM sonde se sprovodi u kanalu sa vučenim kolicima. Indukovani napon  $E$  pokazuje linearnu vezu sa srednjom profilskom brzinom  $V$ . Korišćene EM sonde imaju 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 $\Omega$ , 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. Takođe treba napomenuti da su jednodimenzionalne težinske funkcije  $w$  korišćenih uređaja poznate, čime se omogućava postupak tzv. „suve“ kalibracije.

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.



Slika 3. Dimenzije EM sondi: Velika ravna EM sonda DC-2 (Levo), EM sonda „Ajkulino krilo“ (Desno)

### 2.2 Lokalna kalibracija EM senzora

Imajući u vidu princip rada korišćenih EM senzora, odnosno koncept nelinearne integracije polja brzina unutar kontrolne zapremine senzora  $\tau$ , može se zaključiti da su EM senzori osetljivi na promene rasporeda brzina. Budući da se fabrička kalibracija senzora obavlja u kanalu sa vučenim kolicima gde se pretpostavlja da je raspored brzina uniforman, jasno je da se u realnim uslovima retko mogu sresti slični uslovi, zbog čega se javlja potreba za lokalnom (re)kalibracijom EM senzora. Takođe, pokazano je da (Ivetić i saradnici, 2018) i sami geometrijski uslovi mogu uticati na veličinu efektivne kontrolne zapremine (koja efektivno doprinosi izlaznom signalu) i konačno na izlazni signal.

Pod pojmom lokalne kalibracije senzora, smatra se adaptacija postojeće kalibracione krive EM senzora ili izvođenje nove odnosno dodatne, kako bi se kompenzovali sistematski uticaji hidrauličkih i geometrijskih uslova na mernom mestu, na sam izlazni signal EM senzora. U slučaju kada se EM senzori koriste za merenje protoka  $Q$  u okviru primene metode B-PP, od interesa je kalibrisati senzore tako da se obezbedi pouzdano merenje srednje profilske brzine  $V$ . Praktično, postupak lokalne kalibracije se svodi na definisanje nepoznate korekcionne funkcije  $K$ , kojom se koreliše izmerena brzina  $V_{mer}$  sa srednjom profilskom brzinom  $V$  prema hidrauličkim i geometrijskim uslovima na samom mernom mestu. Oblik same korekcionne funkcije  $K$  zavisi od merne tehnologije, principa rada samog uređaja i naravno prirode sistematskog uticaja na izlazni signal uređaja, gde u slučaju jednostavnih geometrijskih uticaja na ravne EM senzore, ove funkcije mogu biti linearne (Ivetić i saradnici, 2018), dok su u ostalim slučajevima uglavnom nelinearne.

#### 2.2.1 „Suva“ kalibracija

Kalibracija mernog instrumenta koja ne uključuje poređenje rezultata merenja ispitivanog uređaja, sa rezultatima merenja iste veličine pomoću drugog etalonskog mernog instrumenta se naziva „Suva“ kalibracija. U analizi EM senzora protoka, prvenstveno popularnijih konvencionalnih EM senzora namenjenih primeni u sistemima pod pritiskom, postupak „Suve“ kalibracije je razmatran od 80tih godina 20. veka (Bevir i saradnici, 1981, Al Rabeh i Baker, 1986, Luntta i Halttunen, 1989). Za potrebe „Suve“ kalibracije, neophodno je poznavati težinsku funkciju senzora  $w$  (jednačina 2) kao i raspored podužne komponente brzine unutar kontrolne zapremine uređaja, za različite vrednosti protoka. Najčešće se raspored brzina procenjuje

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

analitičkim ili empirijskim obrazcima (Al Rabeh i Baker, 1986, Luntta i Halttunen, 1989) dok se u slučajevima kada ovi obrazci nisu primenjivi, mogu koristiti numeričke simulacije prostornog turbulentnog tečenja (Steinbock i saradnici, 2016, Jaroslav Černi, Građevinski fakultet, Svet instrumenata, 2017). Integracijom proizvoda ove dve veličine ( $j$ -na 2), dobija se procenjeni izlazni signal za ispitani opseg protoka, koji se uz pomoć odgovarajuće korekcionne funkcije  $K$  koreliše sa željenim vrednostima merene veličine. Procenjuje se da je primenom „Suve“ kalibracije moguće obezbediti tačnost konvencionalnog EM senzora protoka od približno 1%.

Sa druge strane, primena postupka „Suve“ kalibracije nije prijavljena za ravne ili slične polu-integrativne EM senzore, namenjene primeni u otvorenim tokovima nije do sada razmatrana u naučnim i stručnim radovima. Michalski i saradnici (2001) su razmatrali „Suvu“ kalibraciju za potpuno integrativan EM senzor za otvorene kanale, međutim ovaj tip uređaja se retko koristi zbog značajne potrošnje energije. Koncept procedure za „Suvu“ kalibraciju ravnih EM senzora, predstavljen u ovom radu se oslanja na postupak korišćen i za konvencionalne EM senzore protoka.

Težinske funkcije  $w$  kako velikih ravnih EM senzora, tako i EM senzora „Ajkulino krilo“ su poznate i definisane od strane proizvođača „Svet instrumenata“ (Ivetić i saradnici, 2017). Za procenu rasporeda brzina u kombinovanim uslovima tečenja, neophodno je uzeti u razmatranje nekoliko faktora. Prvenstveno, neophodno je identifikovati deo proticajnog preseka koji je od interesa, odnosno u kojem se nalaze kontrolne zapremine ispitivanih EM senzora. Nakon toga, treba razmotriti uticaj geometrijskih karakteristika provodnika na raspored brzina u cilnom delu proticajnog preseka. Konačno, imajući u vidu prethodna dva faktora potrebno je odlučiti se za pristup u procenjivanju rasporeda brzina: 1.) primena analitičkih i/ili empirijskih obrazaca 2.) primena numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja. Budući da je drugi pristup prethodno analiziran (Ivetić i saradnici, 2017) u ovom radu se razmatra prvi pristup.

Deo proticajnog preseka tunela u kojem je potrebno proceniti raspored brzina je ograničen na region uz čvrstu konturu, konkretno na 40 cm od zidova, budući da se u tom regionu nalaze kontrolne zapremine velikih ravnih EM senzora i EM senzora „Ajkulino krilo“. U analizama kombinovanih uslova tečenja, treba imati na umu da se drugačiji obrasci koriste za opisivanje rasporeda brzina u slučaju tečenja pod pritiskom i tečenja sa slobodnom površinom. Međutim, u većini vremena rada mernog sistema, analiziranog u ovom radu, javlja se tečenje pod pritiskom, zbog čega je raspored brzina modeliran uz pomoć tzv. Stepelog zakona za kružni provodnik (Pope, 2008):

$$V_x(y) = V \left( \frac{2y}{D} \right)^{1/n} \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \quad (3)$$

Gde je  $V_x(y)$  podužna komponenta brzine,  $y$  odstojanje od zida a  $D$  prečnik provodnika. Za procenu vrednosti eksponenta  $n$ , ispitana su dva obrazca (Nikuradze, 1932; Pope, 2008):

$$n_1 = 0.5261(\log Re)^2 - 3.853 \log Re + 13.1537 \quad (4)$$

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

$$n_2 = 1 + \sqrt[6]{\frac{Re}{60}} \quad (5)$$

Integracijom proizvoda rasporeda brzina i težinske funkcije  $w$  ravnog EM senzora dobija se procenjena izmerena vrednost brzine  $V_{mer}^S$ . Slično, za EM senzore „Ajkulino krilo“, se može dobiti  $V_{kont,mer}^S$ . Odnos srednje profilske brzine  $V$  i sračunate vrednosti definiše vrednost korekcionne funkcije  $K^S$ , odnosno  $K_{kont}^S$ , dobijenih postupkom „Suve“ kalibracije.

### 2.2.2 Kalibracija pomoću kontrolnog mernog sistema

Iako „Suva“ kalibracija poseduje određene prednosti, prvenstveno u vidu manjeg utroška resursa i vremena, u većini slučajeva merni instrumenti se kalibrišu poređenjem sa etalonskom mernom opremom. Pod etalonskim uređajem se smatra instrument koji je za red veličine tačniji (pouzdaniji) od instrumenta koji se kalibriše i obično je potpuno nezavistan od ispitivanog uređaja. Etalonskim uređajima, se obezbeđuje pouzdanija procena željene veličine sa kojom se u postupku kalibracije koreliše izlazni signal ispitivanog uređaja. Generalno, standardnom kalibracijom se obezbeđuje veća tačnost i pouzdanost kalibrisanog instrumenta nego u slučaju „Suve“ kalibracije.

Kalibracija merne opreme se tradicionalno sprovodi u kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Međutim, u ovom radu je analizirana lokalna kalibracija koja se sprovodi na samom mernom mestu, a kojom se minimiziraju sistematski uticaji lokalnih hidrauličkih i geometrijskih karakteristika u radnom opsegu instalirane merne opreme. U određenim slučajevima lokalne kalibracije, kao što je primer derivacionog tunela DP-FP, specifičnosti geometrijskih i hidrauličkih uslova otežavaju sprovođenje etalonskog merenja željene veličine – budući da je teško obezbediti etalonski uređaj koji može u radnom opsegu i nepovoljnim uslovima, održati željeni nivo tačnosti. Zbog toga, u ovom radu je ispitana mogućnost upotrebe kontrolnog mernog sistema, koji može da obezbedi tačnije merenje željene veličine, međutim nije nezavistan budući da se zasniva na istom mernom pristupu.

Lokalna kalibracija, analizirana u ovom radu je sprovedena za velike ravne EM sonde, pomoću kontrolnih EM senzora „Ajkulino krilo“. Praktično u okviru postupka lokalne kalibracije pomoću kontrolnih EM senzora, korelišu se merenja pomoću ravnih EM senzora i merenja pomoću „Ajkulino krila“. Međutim, treba imati na umu da lokalni hidraulički i geometrijski uslovi utiču na merenja oba uređaja. Samim tim za određivanje srednje profilske brzine  $V$ , kao željene veličine, potrebno je poznavanje odgovarajućih korekcionih funkcija:

$$V = K \cdot V_{mer} = K_{kont} \cdot V_{kont,mer} \quad (6)$$

Gde je  $K_{kont}$  korekciona funkcija za EM senzor „Ajkulino krilo“. Imajući u vidu da se u periodu rada oba uređaja na mernom mestu dobijaju izmerene vrednosti brzine  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , odnos ove dve veličine će definsati odnos korekcionih funkcija:

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

$$\frac{K}{K_{kont}} = \frac{V_{kont,mer}}{V_{mer}} \quad (7)$$

Dobijeni odnos korekcionih funkcija je osrednjen na časovnom nivou, kako bi se eliminisao uticaj fluktuacija, i poređen sa ekvivalentom dobijenim u postupku „Suve“ kalibracije  $K^s/K_{kont}^s$ .

### 2.3 Merenje protoka na derivacionom tunelu DP-FP

Za potrebe bilansiranja vode u okviru sistema HET, posebno hidroenergetskog sistema koji čine Dabarsko i Fatničko Polje (DP i FP), kao i Bilećka akumulacija (BA), projektovana su i izvedena tri zasebna sistema za merenje protoka, od toga jedan u okviru derivacionog tunela DP – FP i dva u tunelu FP – BA. Svi instalirani sistemi za merenje protoka se zasnivaju na primeni B-PP metode. Analizama predstavljenim u ovom članku je obuhvaćen merni sistem u tunelu DP – FP. Poseban fokus je stavljen na merenja obavljena pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema u periodu od 3.2.-22.4.2018.

Derivacioni tunel koji spaja Dabarsko i Fatničko polje je deo velikog sistema HET u Republici Srpskoj, BiH. Tunel je pušten u rad 1986. sa osnovnim ciljem da omogući evakuaciju vode iz Dabarskog Polja u Fatničko i dalje ka Bilećkoj akumulaciji u periodima velikih voda. Dužina tunela iznosi oko 3250 m, dok se u samom tunelu smenjuju naizmenično obloženi i neobloženi delovi. Prečnik obloženih delova tunela iznosi 5.0 m, dok je prečnik neobloženih delova oko 5.6 m. Prosečan pad u tunelu iznosi oko 1 ‰. U periodu velikih voda, dolazi do akumulacije vode u Dabarskom i Fatničkom polju. U većini slučajeva potencijalna energija vode u Dabarskom polju je veća od u odnosu na Fatničko polje, pa voda teče u pravcu Fatničkog polja odakle se dalje evakuiše ka Bilećkoj akumulaciji. Međutim u pojedinim situacijama, što će biti prikazano kasnije, situacija je obrnuta pa se javlja tečenje u suprotnom smeru, odnosno ka Dabarskom polju. Imajući u vidu visinsku razliku dva polja, 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.



## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.



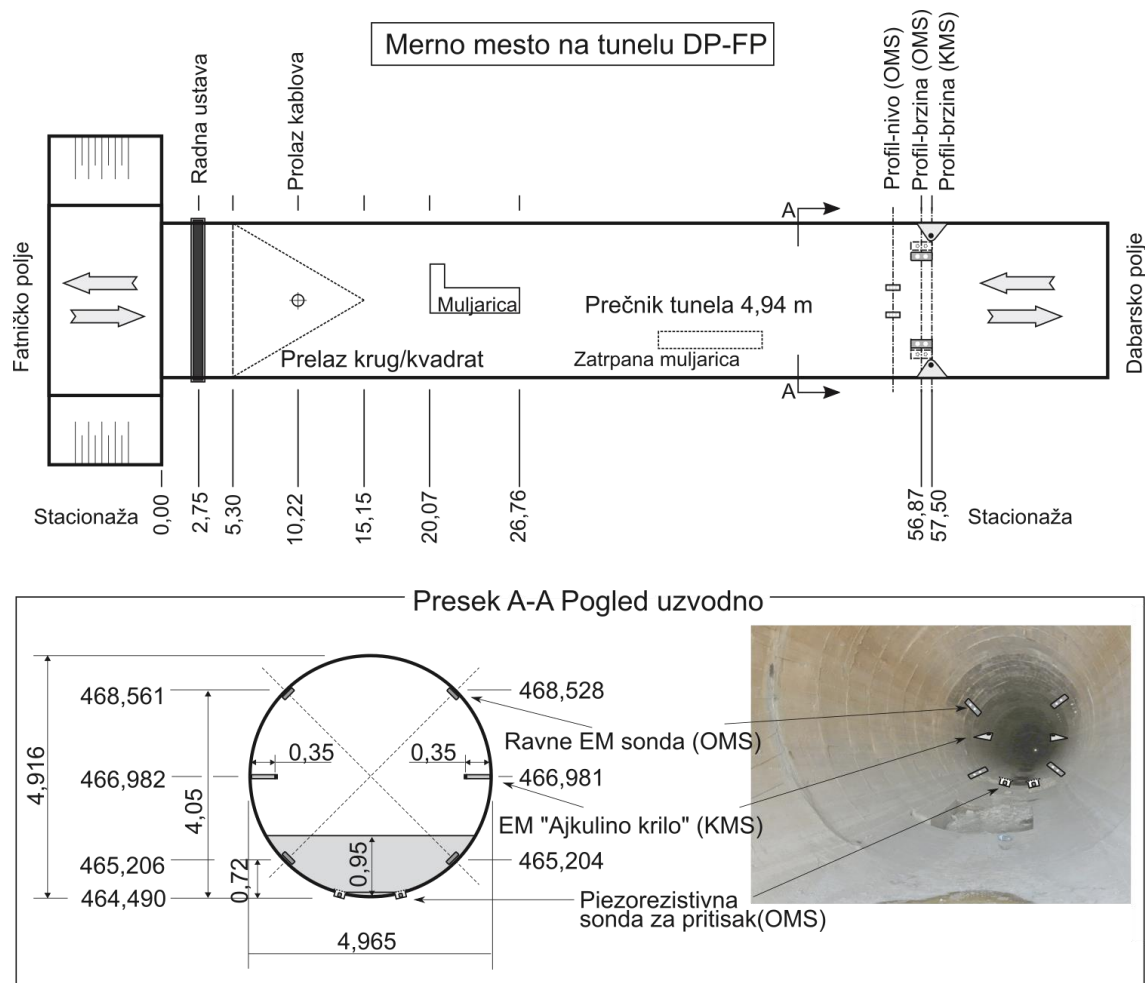
Slika 4. Merni sistemi u okviru derivacionog tunela Dabarsko polje – Fatničko polje: Izlazno/Ulazna građevina u Fatničkom Polju (Levo); Veliki ravni EM senzor u okviru osnovnog mernog sistema (Desno, gore); EM senzor „Ajkulino krilo“ u okviru kontrolnog mernog sistema (Desno, dole)

U nastavku su ukratko opisani instalirani osnovni, odnosno permanentni, sistem kao i kontrolni sistem za merenje protoka koji je iskorišćen za lokalnu kalibraciju. Osnovni zadatak ovog rada je upravo analiza mogućnosti lokalne kalibracije osnovnog mernog sistema, primenom postupka „Suve kalibracije“ i korišćenjem merenih rezultata za osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

### 2.3.1 Osnovni sistem za merenje protoka

Osnovni sistem za merenje protoka, zapravo predstavlja permanentni sistem koji će obavljati funkciju merenja protoka u derivacionom tunelu DP-FP tokom perioda eksploatacije. U okviru osnovnog sistema za merenje protoka instalirane su 4 velike ravne EM sonde i dve pjezorezistivne sonde za pritisak, prema Slici 5 na udaljenosti od 57 m od izlazne građevine u Fatničkom polju, kao i prapratne napojne i logerske jedinice.

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.



Slika 5. Shematski prikaz osnovnog (OMS) i kontrolnog (KMS) sistema za merenje protoka u derivacionom tunelu DP-FP: pogled odozgo (Gore), presek i pogled uzvodno (Dole).

U okviru samog osnovnog sistema za merenje protoka, senzori su grupisani u odgovarajuće podsisteme (Slika 5.). Dva ravna senzora sa leve strane tunela čine podsistem za merenje brzine  $V_A$ , dok dva senzora sa desne strane tunela čine podsistem koji meri brzinu  $V_B$ . Same brzine  $V_A$  i  $V_B$ , se dobijaju osrednjavanjem pojedinačnih doprinosa odgovarajućih ravnih EM senzora:

$$V_A = \frac{V'_A + V''_A}{2}; V_B = \frac{V'_B + V''_B}{2} \quad (8)$$

Gde su  $V'_A$  i  $V''_A$ ,  $V'_B$  i  $V''_B$  odgovarajuće izmerene brzine pomoću pojedinačnih ravnih EM senzora u okviru podsistema A i B respektivno. Senzori pritiska su takođe odvojeni, gde jedan senzor meri pritisak odnosno dubinu  $h_A$  dok se preko drugog dobija dubina  $h_B$ . Do izmerene brzine  $V_{mer}$ , koju je dalje potrebno korelisati sa srednjom profilskom brzinom, se dolazi dodatnim osrednjavanjem, brzina  $V_A$  i  $V_B$ . Slično se dolazi i do izmerene dubine  $h_{mer}$ , na osnovu osrednjavanja dubina  $h_A$  i  $h_B$ :

$$V_{mer} = \frac{V_A + V_B}{2}; h_{mer} = \frac{h_A + h_B}{2} \quad (9)$$

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

Treba imati u vidu da su za analizu izmerenih podataka na raspolaganju podaci sa odgovarajućih podsistema,  $V_A$  i  $V_B$ , odnosno  $h_A$  i  $h_B$  a ne i sa svakog pojedinog senzora. Konačno na osnovu izmerenih signala  $V_{mer}$  i  $h_{mer}$  se dolazi do protoka koristeći relaciju (1). Odgovarajuće korekzione funkcije za određivanje srednje profilske brzine pomoću ravnih EM senzora osnovnog mernog sistema, su  $K$  i  $K^S$  (za slučaj „Suve“ kalibracije).

### 2.3.2 Kontrolni sistem za merenje protoka

U početnom periodu eksploatacije instalirane merne opreme, merenja srednje profilske brzine  $V$ , odnosno protoka  $Q$ , su se obavljala pomoću dva sistema: osnovnog i kontrolnog. Dok je osnovni merni sistem permanentan, kontrolni sistem za merenje protoka je namenjen samo za privremenu upotrebu odnosno kalibraciju osnovnog sistema. Kontrolni sistem na derivacionom tunelu DP – FP su činile dve EM sonde „Ajkulino krilo“ instalirane na zidovima tunela, na polovini visine tunela.

Naime, pomoću kontrolnog sistema za merenje protoka dobijaju se dodatne informacije o rasporedu brzina na mernom mestu, budući da sama konstrukcija EM sonde „Ajkulino krilo“ omogućava merenje brzine na većoj udaljenosti od zidova tunela. Pored toga, treba imati u vidu da je kontrolna zapremina EM sonde „Ajkulino krilo“ dosta manja nego kod ravnih EM sonde. Budući da je u poređenju sa dimenzijama poprečnog preseka tunela, kontrolna zapremina zanemarljivo mala, može se smatrati da se ovim uređajima dobijaju približno tačkasta merenja brzine. Konkretno za slučaj derivacionog tunela, brzina dobijena pomoću EM sonde „Ajkulino krilo“ koja je postavljena na levi bok tunela je označena sa  $V_{kont,A}$ , dok je  $V_{kont,B}$  brzina izmerena sa sondom na suprotnoj strani tunela (Slika 4). Osrednjavanjem signala sa oba „Ajkulina krila“ dobija se:

$$V_{kont,mer} = \frac{V_{kont,A} + V_{kont,B}}{2} \quad (10)$$

Gde je  $V_{kont,mer}$  izmerena brzina pomoću kontrolnog sistema za merenje. Odgovarajuće korekzione funkcije za određivanje srednje profilske brzine pomoću EM senzora „Ajkulino krilo“ kontrolnog mernog sistema, su  $K_{kont}$  i  $K_{kont}^S$  (za slučaj „Suve“ kalibracije). Treba napomenuti da usled konstrukcije „Ajkulino krila“ i mogućnosti merenja dublje u jezgru toka, očekivane su manje vrednosti i manje varijacije korekcionih funkcija u odnosu na ravne EM senzore.

## 3 Rezultati i diskusija

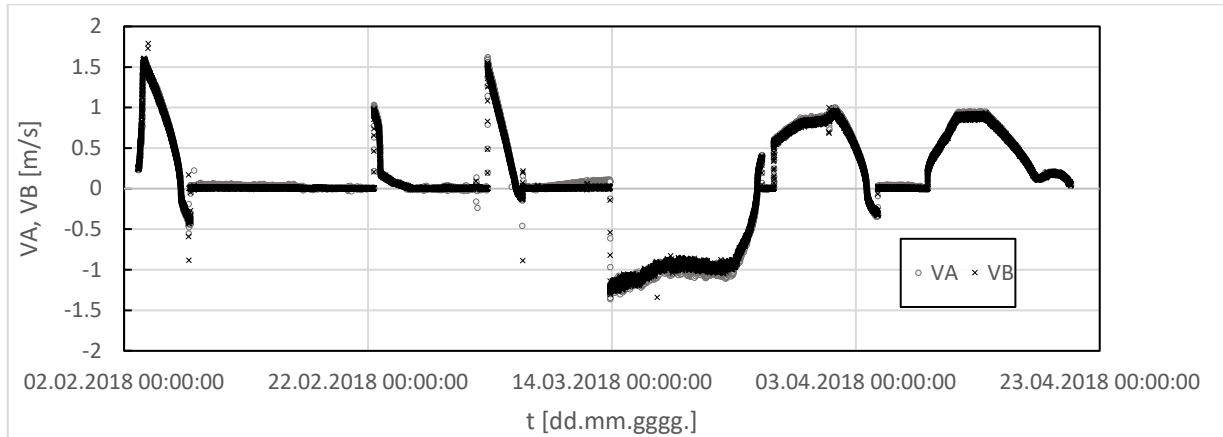
### 3.1 Analiza izmerenih podataka

Analiza izmerenih podataka, predstavlja u ovom radu, obuhvata period od 3.2.2018 do 22.4.2018. Tipično u ovom periodu dolazi do akumulacije vode u Dabarskom i Fatničkom polju, usled otapanja snećnog pokrivača i pojave prolećnih kiša. Samim tim, usled razlike visinskih kota i nivoa u akumulacijama, dolazi do pojave protoka u derivacionim tunelima u okviru sistema HET. Za ovaj rad je bidirekciono tečenje koje se javlja u tunelu DP-FP.

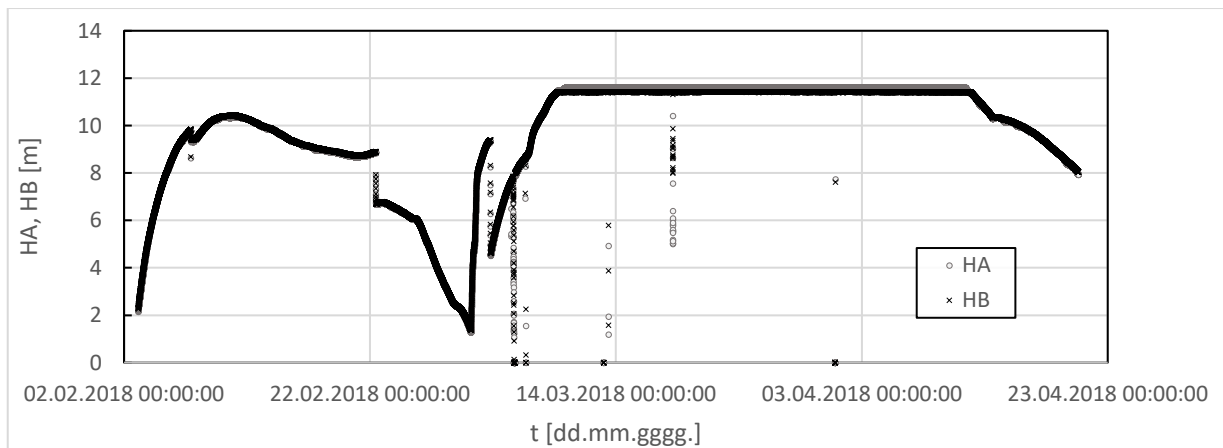
U periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018., osnovni i kontrolni merni sistem (poglavljja 2.3.1 i 2.3.2 respektivno) su kontinualno beležili podatke o brzinama ( $V_A$  i  $V_B$  - osnovni merni sistem,  $V_{kont,A}$

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

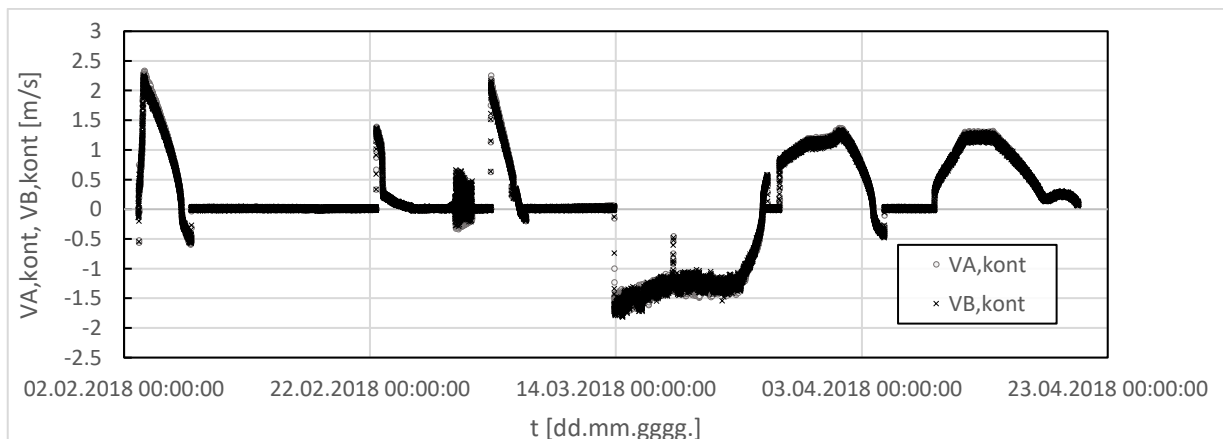
i  $V_{kont,B}$  – kontrolni merni sistem) i dubinama ( $h_A$  i  $h_B$  - osnovni merni sistem) sa vremenskim intervalom od  $\Delta t = 2$  min. Izmerene brzine  $V_A$  i  $V_B$ , kao i dubine  $h_A$  i  $h_B$  sa osnovnog mernog sistema, za razmatrani period su prikazane na Slici 6 i 7, respektivno. Treba napomenuti da je radni opseg pijerezistivnih senzora do približno 12 m vodenog stuba, što znači da su sve dubine, odnosno visine pritiska veće od 12 m zabeležene sa ovom vrednošću. Brzine izmerene pomoću kontrolnog mernog sistema  $V_{kont,A}$  i  $V_{kont,B}$  su prikazane na Slici 8.



Slika 6. Brzine izmerene u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018 korišćenjem velikih ravnih EM senzora u okviru osnovnog mernog sistema na derivacionom tunelu DP-FP.



Slika 7. Dubine (visine pritiska) izmerene u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018 korišćenjem pijerezistivnih senzora u okviru osnovnog mernog sistema na derivacionom tunelu DP-FP.

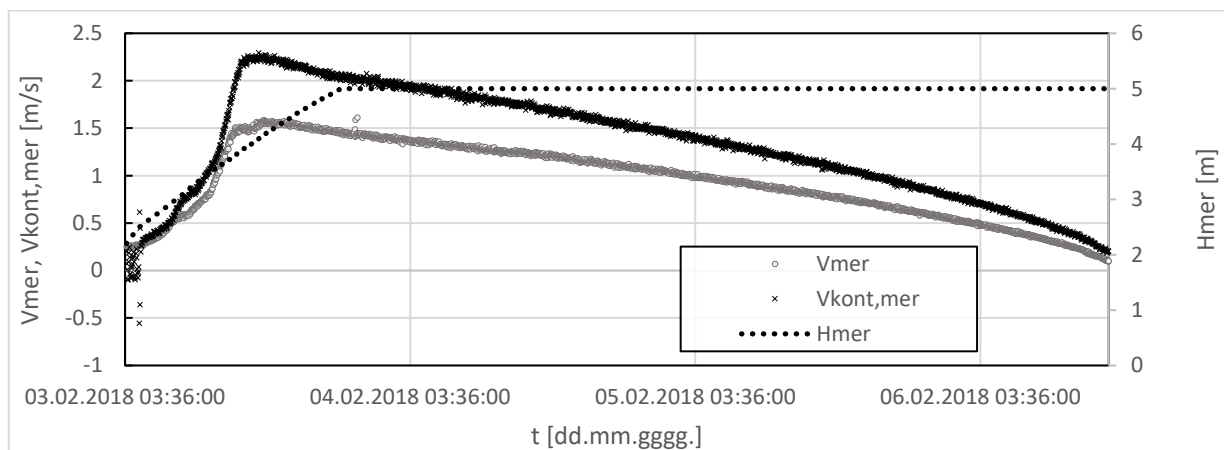


## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

Slika 8. Brzine izmerene u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018 korišćenjem EM senzora u okviru osnovnog mernog sistema na derivacionom tunelu DP-FP.

Na prikazanim dijagramima se može uočiti da je u razmatranom periodu zabeleženo pet događaja u kojima je tečenje bilo u smeru ka Fatničkom Polju i jedan u suprotnom smeru, ka Dabarskom polju. Imajući u vidu da se radi o velikoj količini podataka, radi preglednosti, izdvojena su tri karakteristična događaja koja će biti posebno analizirana za potrebe lokalne kalibracije osnovnog mernog sistema:

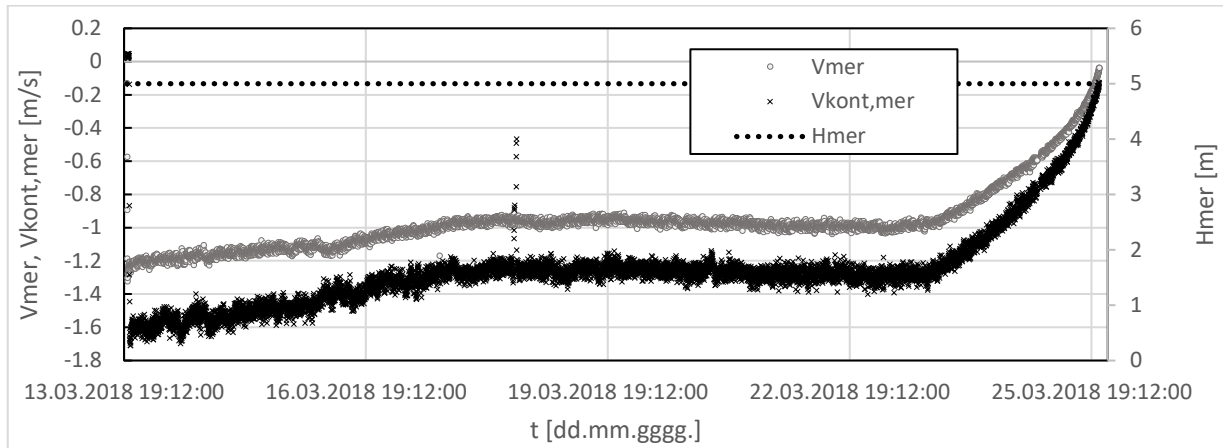
1. **Period 3.2.2018 – 6.2.2018 (Prvi događaj):** u ovom kratkom periodu, merni sistemi su zabeležili značajnu evakuaciju vode iz Dabarskog polja u Fatničko polje. Ovaj događaj je karakterističan po tome što je u njemu zabeležena maksimalna brzina za razmatrani merni period. Maksimalna brzina je dostignuta u periodu od 10 h od početka tečenja, gde je nakon toga u prostalom vremenu polako opadala. Pored toga u ovom periodu je zabeležena pojava kombinovanih uslova tečenja. Na osnovu izmerenih podataka o brzini  $V_A$  i  $V_B$ , odnosno dubini  $h_A$  i  $h_B$  sračunata je izlazna brzina sa osnovnog mernog sistema  $V_{mer}$  odnosno dubina  $h_{mer}$  (j-na 9). Po sličnom postupku, koristeći  $V_{kont,A}$  i  $V_{kont,B}$ , sračunata je izlazna brzina sa kontrolnog mernog sistema  $V_{kont,mer}$  (j-na 10). Izlazni signali  $V_{mer}$ ,  $h_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$  za prvi događaj su prikazani na Slici 9. Radi preglednosti  $h_{mer}$  je ograničeno na 5 m što odgovara visini tunela.



Slika 9. Brzine  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , i dubina  $h_{mer}$  zabeleženi tokom prvog događaja u periodu od 3.2.2018 do 6.2.2018 korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

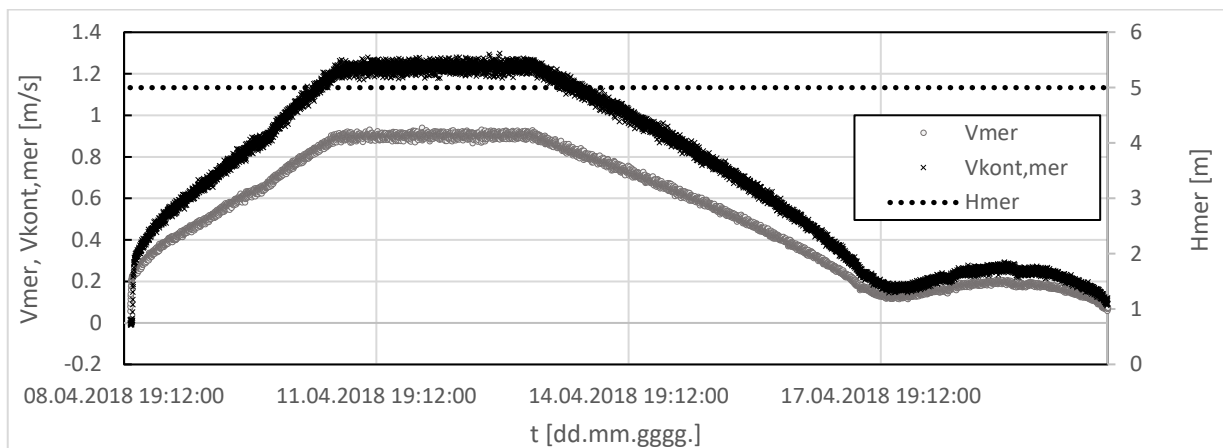
2. **Period 13.3.2018 – 25.3.2018 (Drugi događaj):** u ovom periodu, merni sistemi su zabeležili značajnu evakuaciju vode iz Fatničkog polja u Dabarsko polje. Ovaj događaj je karakterističan po tome što je tokom njega najveća količina vode protekla u „kontra-smeru“. Takođe, zabeležena je maksimalna negativna brzina za razmatrani merni period. Maksimalna brzina je zabeležena na samom početku, gde je nakon toga u prostalom vremenu polako opadala. Slično kao i za prvi događaj sračunate su izlazne vrednosti  $V_{mer}$ ,  $h_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , koje su prikazane na Slici 10. Radi preglednosti  $h_{mer}$  je ograničeno na 5 m što odgovara visini tunela.

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.



Slika 10. Brzine  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , i dubina  $h_{mer}$  zabeleženi tokom drugog događaja u periodu od 8.4.2018 do 20.4.2018 korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

- 3. Period 8.4.2018 – 20.4.2018 (Treći događaj):** u ovom periodu, merni sistemi su zabeležili evakuaciju vode iz Dabarskog polja u Fatničko polje. Ovaj događaj je karakterističan po tome što je najdužeg trajanja sa pozitivnim smerom tečenja. Generalno u ovom periodu, promene brzine su bile relativno blage. Slično kao i za prethodne događaje sračunate su izlazne vrednosti  $V_{mer}$ ,  $h_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , koje su prikazane na Slici 11. Radi preglednosti  $h_{mer}$  je ograničeno na 5 m što odgovara visini tunela.



Slika 11. Brzine  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , i dubina  $h_{mer}$  zabeleženi tokom prvog događaja u periodu od 3.2.2018 do 6.2.2018 korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

### 3.2 Lokalna kalibracija osnovnog sistema za merenje protoka

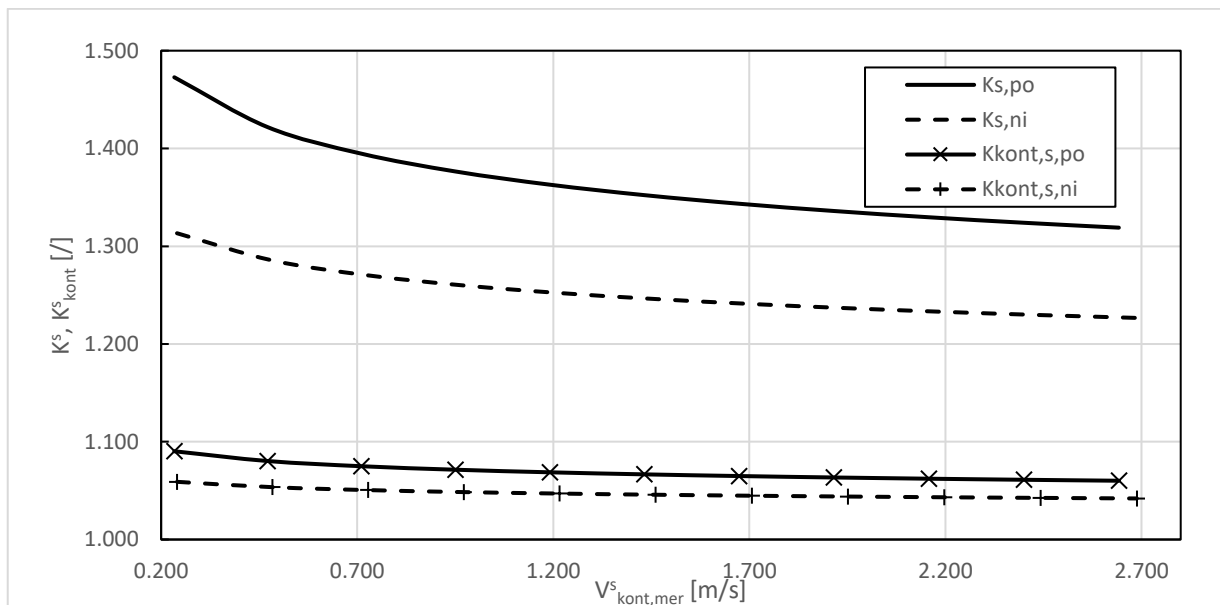
Analizirane su dva nezavisna pristupa za lokalnu kalibraciju velikih ravnih EM senzora: 1.) koristeći tzv. „Suvu“ kalibraciju i 2.) upotrebom kontrolnog mernog sistema. Dok se postupkom „Suve“ kalibracije omogućava definisanje korekcionih funkcija (neophodnih za procenu  $V$ ), kako za osnovni  $K^S$  tako i za kontrolni merni sistem  $K_{kont}^S$ , primenog drugog pristupa jedino je moguće odrediti odnos odgovarajućih korekcionih funkcija  $K/K_{kont}$ . Poređenje između dva analizirana pristupa je upravo izvršeno preko odnosa odgovarajućih korekcionih funkcija  $K^S/K_{kont}^S$  i  $K/K_{kont}$ .

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

### 3.2.1 „Suva“ kalibracija

U okviru ovog kalibracionog postupka, neophodno je bilo proceniti raspored brzina na mernom mestu, primenom analitičkog Stepenog zakona (j-na 3) sa dva različita obrazca za vrednost samog stepena  $n$  (j-ne 4 i 5). Primenom j-ne (4), dobijaju se veće vrednosti eksponenta, u odnosu na j-nu (5), a samim tim i raspored brzina je ravnomerniji. Postupak „Suve“ kalibracije je sproveden za opseg protoka  $Q = 1 - 55 \text{ m}^3/\text{s}$ . Međutim, dobijeni rezultati u vidu korekcionih funkcija su prikazani u zavisnosti od procenjene vrednosti izmerene brzine pomoću kontrolnog mernog sistema  $V_{kont,mer}^s$  (0.05 -2.69 m/s). Razlog leži u činjenici da u postupku kalibracije protok nije poznat (ili je poznat sa značajnom neodređenošću), zbog čega je za poređenje rezultata kalibracionih postupaka potrebno koristiti pouzdaniju referentnu veličinu. Imajući u vidu princip rada EM senzora „Ajkulino krilo“, malu kontrolnu zapreminu i poznatu težinsku funkciju, zaključeno je da se brzina izmerena pomoću (ili sračunata za) „Ajkulinog krila“ može uzeti kao referentna veličina za poređenje korekcionih funkcija.

Koristeći integrale proizvoda rasporeda brzina (j-ne 3, 4 i 5), kao i odgovarajuće težinskih funkcija velikog ravnog EM senzora i „Ajkulinog krila“ (j-na 2) sračunate se vrednosti korekcionih funkcija za opseg brzina od 0.05 do 2.69 m/s ( $Q = 1 - 55 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Imajući u vidu da su korišćena dva obrazca za eksponent stepenog zakona, j-ne (4) i (5), za ravni EM senzor su dobijene dve korekzione funkcije  $K^{s,ni}$  i  $K^{s,po}$ , respektivno. Slično za EM senzor „Ajkulino krilo“ u postupku „Suve“ kalibracije su dobijene dve korekzione funkcije  $K_{kont}^{s,ni}$  i  $K_{kont}^{s,po}$ . Navedene korekzione funkcije su prikazane na Slici 12.



Slika 12. Vrednosti korekcionih funkcija za ravne EM senzore i EM senzore „Ajkulino krilo“ dobijene u postupku „Suve kalibracije“ sa analitičkim stepenim rasporedom brzina

Iz prikazanih rezultata, interesantno je apostrofirati nekoliko značajnih karakteristika. Prvo, uočava se da je gradijent korekcionih funkcija, u analiziranom opsegu brzina, u proseku pet puta veći za ravne EM senzora nego za „Ajkulina krila“. Razlog leži u činjenici da ravni EM senzori unutar kontrolne zapremine integrale polje brzine u zidnom regionu tečenja, gde se sa promenama Rejnoldsovog broja javljaju i najveće relativne promene u rasporedu brzina. Sa druge strane „Ajkulina krila“ mere brzinu na otprilike 0.35 m od čvrste konture, u značajno manjoj kontrolnoj zapremini, gde su relativne promene rasporeda brzine dosta manje.

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

Isti razlog se može pripisati i za pojavu značajne razlike u vrednostima korekcionih funkcija, sračunatih za oba tipa senzora. Svakako, EM senzor „Ajkulino krilo“ meri brzinu koja je približnija srednjoj profilskoj brzini, zbog čega je opravdana upotreba ovog uređaja za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora. Međutim ne treba zanemariti činjenicu, da je u okviru prikazanog postupka pokazano da vrednosti brzine izmerene pomoću ovog senzora, treba korigovati pomoću odgovarajuće korekcionne funkcije (za 5-8%), kako bi se dobila adekvatna procena srednje profilske brzine  $V$ .

Konačno, primećuje se značajno odstupanja između vrednosti korekcionih funkcija, dobijenih pomoću dva različita analitička obrazca za eksponent  $n$  u stepenom zakonu. Iako, unapred nije moguće poznavati koji analitički obrazac za raspored brzina adekvatniji za primenu u svakom pojedinom slučaju, korisno je ispitati više različitih kako bi se dobio pouzdaniji rezultat „Suve“ kalibracije.

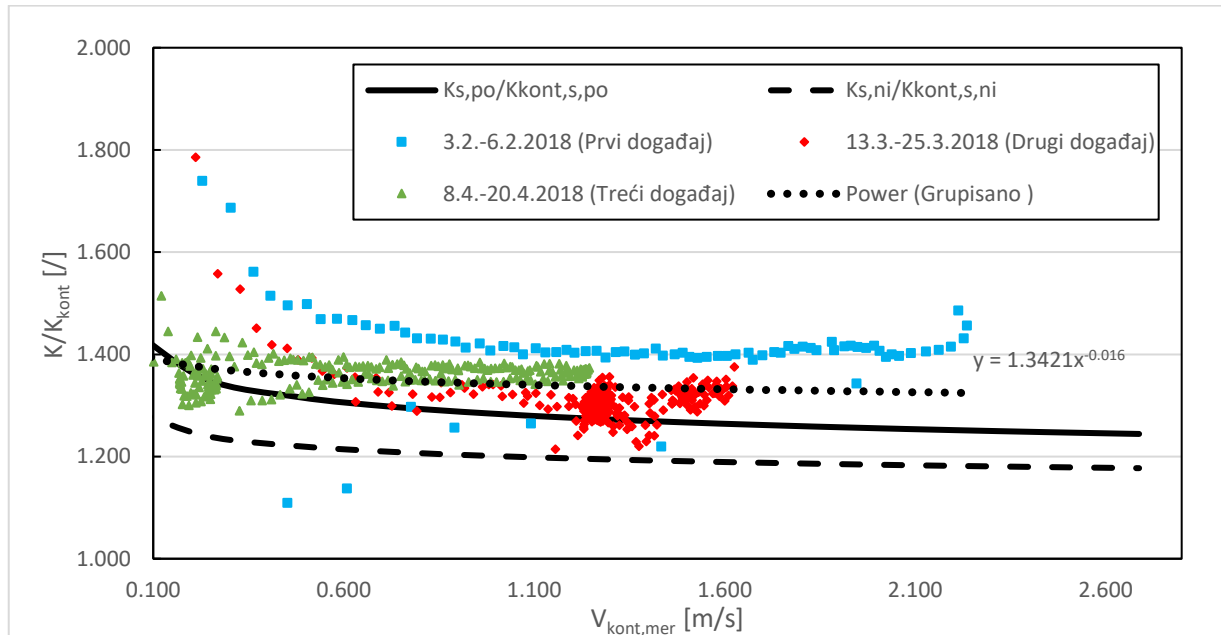
### 3.2.2 Kalibracija pomoću kontrolnog mernog sistema

Za potrebe lokalne kalibracije osnovnog mernog sistema, korišćenjem kontrolnog mernog sistema, izdvojena su tri događaja (3.2.2018 – 6.2.2018 Prvi događaj; 13.3.2018 – 25.3.2018 Drugi događaj; 8.4.2018 – 20.4.2018 Treći događaj) iz analiziranog perioda rada sistema (3.2.2018 do 22.4.2018.) za merenje protoka na derivacionom tunelu DP-FP. Za svaki od izdvojenih događaja, prethodno su sračunati izlazni signali sa osnovnog ( $V_{mer}$  i  $h_{mer}$ ) i kontrolnog mernog sistema ( $V_{kont,mer}$ ).

Originalni podaci o izmerenim brzinama  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , zabeleženi sa vremenskim korakom od  $\Delta t = 2$  min, su osrednjeni na časovnom nivou ( $\Delta t_{sr} = 60$  min). Koristeći osrednjene izmerene podatke, i  $j$ -nu (7), sračunati su odnosi korekcionih funkcija za osnovni i kontrolni merni sistem,  $K/K_{kont}$ , za svaki od izdvojenih događaja. Dobijeni rezultati su prikazani na Slici 13, i praktično pokazuju sa kojom vrednošću bi trebalo pomnožiti izmerenu brzinu  $V_{mer}$  sa osnovnog mernog sistema, kako bi se dobila pouzdanija vrednost, izmerena pomoću kontrolnog mernog sistema  $V_{kont,mer}$ . Na istoj Slici 13, naneseni su i rezultujući odnosi korekcionih funkcija za osnovni i kontrolni merni sistem  $K^{s,ni}/K_{kont}^{s,ni}$  i  $K^{s,po}/K_{kont}^{s,po}$ , dobijeni preko postupka „Suve kalibracije“ korišćenjem dva različita obrazca sa analitički raspored brzina,  $j$ -ne (3 i 4) i  $j$ -ne (3 i 5) respektivno.



## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.



Slika 13. Vrednosti odnosa korekcionih funkcija za ravne EM senzore i EM senzore „Ajkulino krilo“ dobijenih poređenjem izmerenih podataka za tri izdvojena događaja i u postupku „Suve kalibracije“ sa analitičkim stepenim rasporedom brzina

Vizualnim poređenjem rezultata, dobijenih pomoću dva potpuno nezavisna postupka kalibracije, može se doći do nekoliko interesantnih zaključaka. Prvo, ukoliko se posmatraju sami analizirani događaji, može se uočiti da vrednosti odnosa korekcionih funkcija najviše variraju za prvi događaj (Standardna devijacija  $\sigma_1 = 0.08$ ), dok su u slučaju drugog ( $\sigma_2 = 0.04$ ) a pogotovo trećeg ( $\sigma_3 = 0.02$ ) ove varijacije značajno manje. Razlog se može potražiti u činjenici da su gradijenti promene brzine najizraženiji bili upravo tokom prvog događaja. Pri naglim promenama brzine  $V$ , ili protoka  $Q$ , prvo se menjaju brzine u zidnom regionu toka a onda se polako profil brzina izravnava, odnosno menjaju se brzine i u jezgru. Zbog toga su ravni EM senzori, koji integrale brzine upravo u zidnom regionu, pokazivali čak 1.7 - 1.8 manju brzinu u periodima naglog opadanja protoka, dok u periodima naglog porasta protoka, ta vrednost bila manja, oko 1.1.

U periodima relativno blagih promena brzina (npr treći događaj), odnos korekcionih funkcija je relativno slabo varirao, između vrednosti 1.28 i 1.51, sa prosečnom vrednošću od 1.36. Za drugi događaj, vrednosti variraju između 1.21 i 1.78, sa prosečnom vrednošću od 1.31, dok za prvi događaj opseg vrednosti je 1.11 i 1.74, a prosečna 1.41. Treba napomenuti da se razlike u izračunatim prosečnim vrednostima, takođe mogu pripisati uočenim gradijentima brzine. Npr, za prvi događaj dobijena je najviša prosečna vrednost, budući da je većim delom trajanja, protok bio u opadanju sa izraženim gradijentom. Prosečna vrednost nad agregiranim podacima iznosi oko 1.35. Primenom nelinearne regresije, agregirani izmereni rezultati su fitovani stepenom krivom, koja je takođe prikazana na Slici 13.

Ukoliko se analiziraju samo rezultati „Suve“ kalibracije, može se uočiti da je trend dobijen primenom dva različita analitička obrazca dosta sličan. Pri minimalnoj brzini (min. Rejnoldsov broj), odnos korekcionih funkcija  $K^{s,ni}/K_{kont}^{s,ni}$  i  $K^{s,po}/K_{kont}^{s,po}$  je najveći i polako opada sa porastom brzina. Imajući u vidu da sa porastom brzina, raspored brzina postaje ravnomerniji – što znači da ravni EM senzori u zidnom regionu mere veću brzinu, ovaj rezultat je očekivan.

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

Prosečna vrednost odnosa korekcionih funkcija za originalni Nikuradzeov obrazac iznosi 1.20 dok za drugi analitički obrazac ona iznosi 1.28.

U poređenju rezultata dva nezavisna postupka kalibracije, treba imati na umu da unutar „Suve“ kalibracije implicitno su pretpostavljeni ustaljeni uslovi tečenja, dok se kod kalibracije preko kontrolnog mernog sistema – uslovi bili neustaljeni. Međutim, opšti trendovi odnosa korekcionih funkcija, dobijenih preko jednog i drugog postupka su dosta slični. Poređenjem prosečnih vrednosti korekcionih funkcija, može se zaključiti da je bolje slaganje između izmerenih vrednosti i „Suve“ kalibracije dobijene primenom  $j$ -na (3 i 5). Nikuradzeov analitički obrazac  $j$ -na (4) opisuje profil brzina ravnomerniji rasporedom nego  $j$ -na (5), međutim najverovatnije usled neustaljenosti toka tokom rada mernog sistema takav profil brzina se nije formirao. Zbog toga se može usvojiti da je za slučaj velikih kružnih provodnika (kakav je i derivacioni tunel DP-FP), sa relativno velikim gradijentima promena brzine, za opisivanje rasporeda brzina analitičkim obrazcem primerenije koristiti  $j$ -nu (3 i 5).

### 4 Praktične implikacije dobijenih rezultata

Cilj ovog rada je ispitivanje dva nezavisna pristupa za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora pri merenju srednje profilske brzine  $V$  (odnosno protoka  $Q$ ), u velikim provodnicima u kojima se javljaju kombinovani uslovi tečenja. Lokalnom kalibracijom je potrebno minimizirati sistematske uticaje geometrijskih i hidrauličkih karakteristika na merenje srednje profilske brzine pomoću velikih ravnih EM senzora. Na osnovu prikazanih rezultata, izvedeno je nekoliko opštih zaključaka koji mogu imati praktični značaj u budućim merenjima.

- Ravni EM senzori i EM senzori „Ajkulino krilo“ su pokazali stabilan signal i nizak šum u merenju bidirekcionih brzina u kombinovanim uslovima tečenja.
- Ravni EM senzori su osetljivi na neustaljenost toka, zbog čega u periodima porasta protoka, mere veću brzinu, dok pri opadanju protoka, mere manju brzinu od one koja bi odgovarala slučaju ustaljenog tečenja.
- EM senzori „Ajkulino krilo“ su manje osetljivi na neustaljenost tečenja u odnosu na ravne EM senzore i generalno su tačniji u merenju srednje profilske brzine. Imajući navedeno u vidu, oni se mogu koristiti kao kontrolni merni sistem za korigovanje merenja pomoću ravnih EM senzora.
- Tačnost merenja  $V$  pomoću EM senzora „Ajkulino krilo“ je uslovljena dimenzijama samog provodnika, odnosno relativnim rastojanjem između kontrolne zapremine senzora i izovele koja opisuje lokaciju srednje profilske brzine u celokupnom rasporedu brzina.
- Ukoliko geometrijski i hidraulički uslovi dozvoljavaju, primenom postupka „Suve“ kalibracije moguće je definisati preliminarne vrednosti korekcionih funkcija za Ravne EM senzore. Treba imati u vidu da ovim postupkom nije moguće kvantifikovati uticaj neustaljenosti tečenja na pokazivanje ravnih EM senzora.
- Lokalnom kalibracijom pomoću kontrolnog mernog sistema, moguće je definisati odgovarajuću relaciju kojom se za lokalne geometrijski i hidraulički uslove, merenja  $V$  pomoću ravnih EM senzora mogu korigovati do nivoa tačnosti koji se dobija primenom EM senzora „Ajkulino krilo“.

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

Imajući u vidu da se postupkom „Suve“ kalibracije ne mogu obračunati efekti neustaljenosti na merenja brzine pomoću ravnih EM senzora, dok se sa druge strane primenom kontrolnog mernog sistema ne može odrediti direktno sama korekciona funkcija  $K$ , predlaže se primena kombinacije ova dva pristupa za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora u velikim provodnicima. Kombinovani pristup za lokalnu kalibraciju bi podrazumevao da se nakon prikupljanja dovoljnog broja merenih podataka pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema, i određivanja prethodno prikazanih veličina, vrednost srednje profilske brzine  $V$  definiše preko sledećeg obrazca:

$$V = \overbrace{K_{kont}^{s,po}}^{\text{Suva kal.}} \cdot \overbrace{K/K_{kont}}^{\text{Kal. kont. merni sistem}} \cdot V_{mer} \quad (6)$$

Konačna korekciona funkcija bi bila proizvod korekcione funkcije za „Ajkulino krilo“ dobijene pomoću „Suve kalibracije“ i odnosa korekcionih funkcija dobijenih na osnovu merenja pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

### 5 Zaključci

Merenje protoka u velikim provodnicima u kojima se javljaju kombinovani uslovi tečenja, zahteva primenu pristupa Brzina – Proticajni Presek. Dominantan izvor neodređenosti u konačnoj proceni protoka, dobijene primenom pristupa B-PP, se nalazi u proceni srednje profilske brzine. U ovom radu je analiziran praktični primer merenja protoka u derivacionom tunelu sistema HET, koji spaja Dabarsko polje sa Fatničkim. Usled pojave bidirekcionog tečenja, uz kombinovane uslove tečenja, srednja profilska brzina je merena pomoću četiri velike ravne EM sonde, u okviru osnovnog mernog sistema, kao i dva EM senzora „Ajkulino krilo“, u okviru kontrolnog mernog sistema. Budući da je u prethodnim istraživanjima pokazano da je ravne EM senzore neophodno lokalno kalibrisati kako bi se minimizirao sistematski uticaj lokalnih geometrijskih i hidrauličkih uslova, na rezultate merenja brzine, u ovom radu su analizirane dva nezavisna pristupa za lokalnu kalibraciju: „Suva“ kalibracija i kalibracija pomoću kontrolnog mernog sistema.

U okviru postupka „Suve“ kalibracije izlazni signal senzora je modeliran korišćenjem odgovarajućih težinskih funkcija senzora, kao i analitičkih obrazaca za teorijski raspored brzina. Na osnovu odnosa modeliranog izlaznog signala i željene veličine (srednje profilske brzine  $V$ ), definišu se odgovarajuće korekcione funkcije, kojima se omogućava dobijanje pouzdanije procene srednje profilske brzine. Sa druge strane, primenom kontrolnog mernog sistema, na osnovu dovoljno dugačkog niza sniljenih podataka, definišu se korekcione funkcije kojima se izlazni signal sa ravnih EM senzora može korigovati do nivoa tačnosti kontrolnog mernog sistema (EM senzora „Ajkulino krilo“).

Oba navedena postupka su primenjena na merni sistem na derivacionom tunelu DP-FP, gde je analiziran period rada sistema 3.2.2018 do 22.4.2018. Iz navedenog perioda su posebno razmatrana tri karakteristična događaja, na osnovu kojeg su upoređeni rezultati dva nezavisna pristupa za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora. Postupak „Suve“ kalibracije omogućava direktno određivanje traženih korekcionih funkcija, međutim podrazumeva ustaljene uslove tečenja. Vrednosti dobijene kalibracijom pomoću kontrolnog mernog sistema, pokazuju značajan uticaj neustaljenosti toka na vrednosti korekcionih funkcija. Uočeno je da u periodu porasta protoka, ravni EM senzori daju veće vrednosti brzine, u poređenju sa ustaljenim uslovima. Nasuprot tome, u periodu opadanja protoka, ravni EM senzori pokazuju manje

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

vrednosti brzine nego u ustaljenim uslovima. Glavni razlog za ovakve rezultate leži u činjenici da se kontrolna zapremina ravnih EM senzora nalazi u zidnom regionu,. U periodima blagih promena protoka, promena vrednosti odnosa korekcionih funkcija, za ravne EM senzore i „Ajkulina krila“, pokazuju sličan trend kao rezultati dobijeni „Suvom“ kalibracijom. Na osnovu dobijenih rezultata, zaključeno je da je optimalan pristup u lokalnoj kalibraciji ravnih EM senzora, kombinacija „Suve“ kalibracije i primene kontrolnog mernog sistema.

### LITERATURA

1. Al-Rabeth, R. H., Baker, R. C., 1986. On the ability to dry calibrate an electromagnetic flowmeter. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 19(3): 203.
2. Bevir, M. K., O'Sullivan, V. T., Wyatt, D. G., 1981. Computation of electromagnetic flowmeter characteristics from magnetic field data. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 14(3), 373.
3. Bevir, M.K., 1970. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), pp.577-590.
4. 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.
5. 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.
6. Cvitkovac, M., Prodanović, D., Vučurević, V. (2010). Elektromagnetne sonde za merenje protoka otpadnih voda – Primer Beogradske kanalizacije. Deseta međunarodna konferencija: Vodovodni i kanalizacioni sistemi, Jahorina, Republika Srpska, BiH, strane: 231-239.
7. Gils, H., 1970. Discharge measurement in open water by means of magnetic induction. In *Symposium on hydrometry*, Koblenz.
8. Godley, A., 2002. Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 197-201.
9. 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.
10. Herschy, R.W., 1978. *Accuracy in Hydrometry*. Wiley, New York.
11. 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.
12. Ivetić, D., Prodanović, D., Stojadinović, L., Cvitkovac, M., 2017. Unapređenje metodologije merenja protoka pomoću ravnih elektromagnetnih senzora brzine. *Vodoprivreda*, 49(285-287), pp. 93-102.
13. Jaroslav Černi, Građevinski Fakultet, Svet instrumenata, 2017. Sistem za merenje protoka vode na tunelu DP-FP, Projekat Izvedenog Stanja. Investitor: Hidroelektrane na Trebišnjici.
14. Joint committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization.
15. 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.

## 18. Naučno savetovanje SDHI i SDH – Niš, Srbija 2018.

16. Luntta, E. and Halttunen, J., 1989. The effect of velocity profile on electromagnetic flow measurement. *Sensors and Actuators*, 16(4), pp.335-344.
17. Michalski, A., 2000. Dry calibration procedure of electromagnetic flowmeter for open channels. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 49(2), pp 434-438.
18. 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.
19. Nikuradse, J. (1932). *VDI Forschungsheft*.
20. Pope S.B.: *Turbulent Flows*, Fifth printing, Cambridge University Press, 2008, United Kingdom, ISBN 978-0-521-59889-6
21. Prodanović, D., 2006. Merenje malih brzina u terenskim uslovima. *Vodoprivreda*, 38 (222-224), pp. 205-214.
22. Prodanović, D., Pavlović, D., Branisavljević, N., 2011. Merenje protoka na kratkim objektima u hidraulički neregularnim uslovima na primeru HE 'Đerdap 2'. *Vodoprivreda*, 43(252-254), pp. 103-115.
23. Shercliff, J.A., 1962. *The theory of electromagnetic flow-measurement*. CUP Archive.
24. Steinbock, J., Weissenbrunner, A., Juling, M., Lederer, T. and Thamsen, P.U., 2016. Uncertainty evaluation for velocity–area methods. *Flow Measurement and Instrumentation*, 48, pp.51-56.