

UNAPREĐENJE METODOLOGIJE MERENJA PROTOKA POMOĆU RAVNIH ELEKTROMAGNETNIH SENZORA BRZINE

Damjan IVETIĆ*, Dušan PRODANOVIĆ*, Luka STOJADINOVIĆ*, Mile CVITKOVAC**

*Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

**Svet Instrumenata, Beograd

REZIME

Najčešće korišćen način merenja protoka u hidrotehničkim sistemima sa otvorenim tokom je preko merenja jedne dubine i preračunavanjem u protok korišćenjem Q-H krive. U uslovima kada nije moguće jednoznačno uspostaviti Q-H vezu, neophodno je koristiti metodu Brzina-Proticajni presek, gde se odvojeno mere (srednja) proticajna brzina i dubina. Iako su dosadašnja istraživanja pokazala da senzori brzine često rade sa visokom mernom neodređenošću, ovaj pristup je popularan zbog mogućnosti primene u širokom spektru hidrauličkih problema. Merna neodređenost u obračunatom protoku ima dvojaki karakter i rezultat je neodređenosti samog merenja brzine i dubine, kao i doprinosa usled nestandardnih uslova na mernom mestu. Iako se u hidrauličkim sistemima u poslednje vreme preferiraju ultrazvučne Dopler sonde, elektromagnetne (EM) sonde poseduju prednosti u realnim uslovima rada posebno u sistemima sa otpadnim vodama. U ovom radu, analizirane su ravne EM sonde za brzinu, koje se mogu koristiti umesto Dopler sonde za merenje protoka. Zbog jasnijeg principa rada EM sonde, moguće je definisati posebne težinske funkcije kojima se opisuje koliko koji deo polja brzina utiče na izlazni signal uređaja. Koristeći težinske funkcije u kombinaciji sa modeliranim realnim strujnim poljem, dobijenim pomoću prostornih numeričkih simulacija turbulentnog toka, moguće je smanjiti mernu neodređenost uređaja. Predložena metodologija je klasifikovana kao naknadna kalibracija EM uređaja prema uslovima na mernom mestu. Koncept njene primene je prikazan kroz praktičan primer.

Ključne reči: Merenje protoka, otvoreni tokovi, CFD, elektromagnetne sonde

1. UVOD

Poznavanje hidrauličkih parametara, prvenstveno protoka, predstavlja preduslov za efikasno upravljanje hidrotehničkim sistemima (Schutze et al., 2002). Međutim, adekvatno merenje protoka, pogotovo u sistemima gde se javlja tečenje sa slobodnom površinom ili kombinovani uslovi tečenja (kombinacija tečenja sa slobodnom površinom i tečenja pod pritiskom), je složen zadatak koji je i dalje atraktivan brojnim istraživačima. Generalno, izbor optimalne metode za merenje protoka je uslovljen kako hidrauličkim uslovima tako i osobinama fluida i fizičkim ograničenjima (Godley, 2002).

U uslovima kada nije moguće odrediti protok otvorenom toku samo na osnovu izmerene jedne dubine i stabilne Q-H veze, najčešće primenjen pristup je grupa metoda tzv. Brzina-proticajni presek, gde se senzori brzine koriste za procenu srednje profilske brzine a sonde za nivo/pritisak za procenu površine proticajnog preseka. Za merenje brzine se koriste polu-integrativne metode, kao što su Dopler ili Elektromagnetni (EM) uređaji, kod kojih samo deo proticajnog preseka utiče na izlazni signal (ne integriraju se strujno polje u celom proticajnom preseku). Iako ova grupa metoda predstavlja veoma popularan pristup, nasledna mana je velika merna neodređenost u proceni srednje profilske brzine (Hughes et al., 1996). Naime, neodređenost u proceni srednje profilske brzine ima dvojaki karakter, povezana je i sa brzinama koje se mere kao i sa primenjenom transformacijom kojom se od izmerene brzine dolazi do srednje profilske brzine. Dok je prvi problem više povezan sa korišćenim uređajima, drugi je uslovljen karakteristikama mernog mesta (Bonakdari & Zinatizadeh, 2011). U ovom radu je analiziran uticaj karakteristika mernog mesta na rad tzv. „ravnih“ EM senzora brzine, domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“ kao i mogućnost da se smanji merna

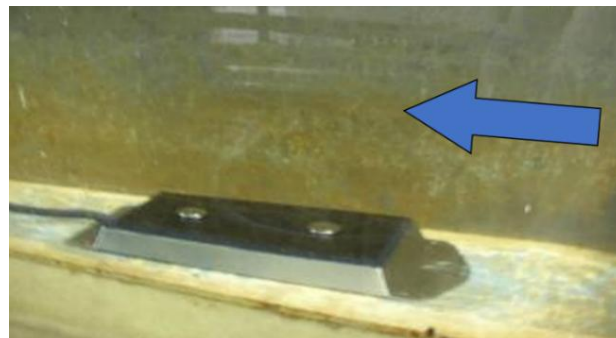
neodređenost odnosno poveća tačnost u proceni srednje profilske brzine i konačno protoka.

Iako manje popularne od Dopler sonde, EM sonde poseduju izvesne prednosti koje ih u pojedinim situacijama, pogotovo nestandardnim, preporučuju za upotrebu (Prodanović i saradnici, 2011). Naime, EM sonde imaju prednost u veoma širokom opsegu brzina koje mogu da mere, od svega nekoliko mm/s do 10 m/s, kao i mogućnost da rade i u prljavoj i u čistoj vodi (samo je bitno da je elektroprovodna). Takođe, moguće je i njihova upotreba pod slojem sedimenata i sa malom debljinom vodenog nadsloja (Prodanović *et al.*, 2012), situacijama u kojim Dopler senzori imaju velike probleme. Sa druge strane ključna mana u odnosu na Dopler uređaje je relativno mala, odnosno plitka zona integracije koja iziskuje potrebu za dodatnim oprezom pri izboru mernog mesta. Konačno EM senzori mere brzine pomoću donekle jasnijeg fizičkog principa koji omogućava primenu tzv. težinskih funkcija, kojima se omogućava procena koliko koji deo integracione zone uređaja utiče na izlazni signal. U ovom radu je predstavljena metodologija za unapređenje tačnosti merenja protoka korišćenjem ravnih EM senzora, kao i prvi rezultati njene primene. Pristup je nazvan kalibracija EM senzora prema uslovima na mernom mestu i upravo se oslanja na upotrebu težinskih funkcija u sprezi sa prostornim (3D) numeričkim simulacijama turbulentnog toka (eng. CFD Computational Fluid Dynamics).

Struktura rada je koncipirana na sledeći način: u poglavlju 2. dat je sažeti teorijski opis načina rada ravnih EM sonde kao i opis predložene kalibracije prema uslovima na mernom mestu zajedno sa primerom primene; u nastavku u poglavlju 3. prikazani su delovi prvih rezultata i prateća diskusija; dok su u poglavlju 4. izvedeni zaključci i dati su pravci daljeg istraživanja koje se obavlja na Građevinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu.

2. METODOLOGIJA

Da bi se stekao uvid u princip rada ravnih EM sonde kao i u mogućnost za unapređenje njene tačnosti u ovom poglavlju je dat kratak opis mernog principa koji je jedinstven za sve EM uređaje za merenje brzine/protoka. U nastavku su posebno izdvojene specifičnosti koje odvajaju ravne EM sonde (Slika 1) od ostalih istorodnih uređaja. Na kraju poglavlja definisana je predložena metodologija kao i primer primene iz realnog života.



Slika 1. Ravna EM sonda FLAT 400 „Svet instrumentata“

2.1. Teorija EM metode merenja brzine/protoka

Princip rada elektromagnetnih senzora za merenje brzine odnosno protoka vode, se zasniva na Faradajevom zakonu. Izlazni signal, odnosno napon između elektroda uređaja E , se indukuje pri kretanju provodne tečnosti kroz upravno magnetno polje (Shercliff, 1962). Vrednost napona je proporcionalna brzini kretanja provodne tečnosti. Tako se osetljivost EM senzora može opisati vektorskim proizvodom brzine strujanja i magnetnog polja u određenoj prostoru (Bevir, 1970). Prve eksperimente sa merenjem brzine odnosno protoka vode korišćenjem EM metode je sproveo Faradej lično, doduše neuspešno, na reci Temzi u Londonu. Čitav vek kasnije, formulisan je matematički model kojim se opisuju magnetna i električna polja (Williams, 1930) i sprovedena su prva uspešna merenja brzine vode. Razvojem tehnologije u dvadesetom veku, u oblasti hidrotehnike došlo je do ekspanzije upotrebe EM senzora za merenje brzine tečnosti, pogotovo u oblasti strujanja pod pritiskom. Iako postoje određena rešenja koja omogućavaju i primenu u slučaju strujanja sa slobodnom površinom, u ovoj oblasti su daleko popularnije Dopler metode (Larrarte *et al.*, 2008).

Imajući u vidu osetljivost uređaja, generalizovana formulacija modela težinske funkcije w (Shercliff, 1962) odnosno težinskog vektora \vec{w} (Bevir, 1970), kojim se opisuje uticaj rasporeda brzina na signal, je proistekla iz relacija koje se upotrebljavaju u električnim mrežama:

$$E = \int_A (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot \vec{V} dA \quad (1)$$

Gde je A integraciona zona elektromagnetnog senzora (Slika 2), \vec{B} je magnetno polje, \vec{j} je zapreminska gustina virtualne struje (pridev virtualna se koristi za diferenciranje od struja u samom uređaju) a \vec{V} je brzina strujanja. Vektorski proizvod $\vec{B} \times \vec{j}$ definiše Bevirov težinski vektor \vec{w} . Uobičajeno se u praksi, umesto vektora, koriste težinske funkcije. Izvestan broj istraživača se bavio formulisanjem metodologija za procenu težinskih funkcija npr. pomoću Grinove teoreme (Smyth, 1971), dvostrukih Furijeovih redova (Hemp *et al.*, 1986) ili analitičkih rešenja ekvivalentnih Laplasovih jednačina (Hu *et al.*, 2009). Međutim, budući da su se ovi istraživači bavili isključivo sistemima pod pritiskom, slični rezultati ne postoje za uređaje koji se koriste pri tečenju sa slobodnom površinom što može biti jedan od razloga njihove male popularnosti.

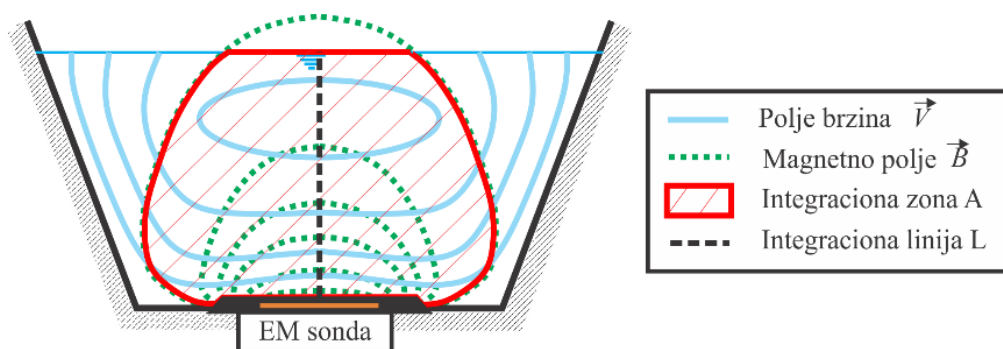
Cilj proizvođača mernih uređaja za merenje brzine je da se elektrode i magnetno polje tako uklope da izlazni signal bude nezavistan od rasporeda brzina. Takav

senzor se smatra „idealnim“ i može se opisati sledećim uslovom:

$$\text{rot}(\vec{B} \times \vec{j}) = \text{rot}(\vec{w}) = 0 \quad (2)$$

2.1.1. Ravnne EM sonde

Analize u ovom radu se odnose na tzv. ravnne EM senzore domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“, prvenstveno namenjene radu u kanalizaciji (Cvitkovic *et al.*, 2010). Primena ovih uređaja se razlikuje od popularnijih punocevni EM senzora. Punocevni EM senzori su integrativni uređaji, jer ceo proticajni presek utiče na signal, dok su ravnne EM sonde polu-integrativni, budući da samo brzine iz dela proticajnog preseka (Slika 2) utiču na izlazni napon. Takođe za merenje protoka pri tečenju sa slobodnom površinom, uz ravnne elektromagnetne sonde je neophodno koristiti merila za nivo, preko kojih se posredno računa površina proticajnog preseka.

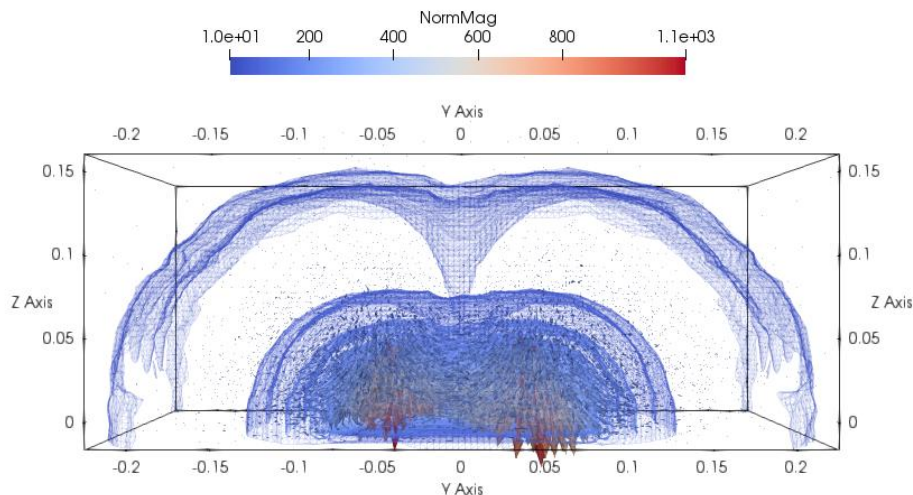


Slika 2. Shematski prikaz rada ravnih EM sonde u prizmatičnom kanalu

Veličina integracione zone ravnih EM senzora je definisana kako samom konstrukcijom uređaja, u smislu pozicije elektroda i jačine magnetnog polja, tako i geometrijom provodnika i dubinom vode. Magnetno polje ravne EM sonde FLAT 400 je mereno na Građevinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, na osnovu čega je data procena veličine integracione zone (Slika 3). Budući da samo magnetno polje, koje generiše ravna EM sonda, nije homogeno (približno opada sa kubom rastojanjem od kalema – Slika 3) kao i da je dubina vode u provodniku promenljiva u vremenu, uslov definisan jednačinom (2) se ne može ispuniti. Zaključak je da raspored brzina utiče na signal uređaja, iz čega proističe potreba da se korišćenjem podataka o rasporedu brzina unapredi merenje protoka.

2.2. Kalibracija EM senzora prema uslovima na mernom mestu

U zavisnosti od mernog mesta, prvenstveno dimenzija i stanja provodnika, može se koristiti jedan ili više ravnih EM senzora. Svaki uređaj je kalibrisan u rezervoaru sa vučenim kolicima u uslovima sa približno homogenim strujnim poljem. Međutim, u stvarnoj primeni, polje brzina u okolini uređaja odnosno u zoni integracije nije homogeno. Zbog toga je zadatak kalibracije EM senzora prema uslovima na mernom mestu da se ustanovi odstupanje stvarnog polja brzine od polja korišćenog pri kalibraciji uređaja, unutar zone integracije. Na ovaj način moguće je smanjiti mernu neodređenost odnosno povećati tačnost merenja protoka, posredno preko EM



Slika 3. Rezultati merenja magnetnog polja ravne EM sonde FLAT 400 (pogled od napred)

senzora brzine. Za procenu stvarnog polja brzine, mogu se koristiti numeričke simulacije prostornog turbulentnog tečenja (eng. CFD Computational Fluid Dynamics), koje predstavljaju koristan alat u analizama hidrotehničkih fenomena. Pri upotrebi je neophodno posebno voditi računa u pripremi ulaznih podataka, pogotovo vezanih za geometriju provodnika budući da mogu imati dominantan uticaj na strujno polje. Procedura predložene kalibracije prema uslovima na mernom mestu se sastoji od sledećih koraka:

1. Globalna hidraulička analiza – Cilj ove analize je da se kroz adekvatnu hidrauličku analizu sistema kao celine, sračunaju adekvatni granični i ako je moguće/potrebno početni uslovi za naredni korak – lokalnu hidrauličku analizu. Najčešće se merno mesto postavlja na ulazu/izlazu nekog hidrotehničkog sistema ili u nekom posebnom poprečnom preseku unutar sistema. U većini slučajeva, da bi numerička simulacija prostornog (3D) turbulentnog tečenja unutar celog sistema bila prihvatljivo tačna, neophodno je neprihvatljivo puno računarskog vremena. Visoko računarsko vreme je posledica rešavanja sistema jednačina čiji je broj jednak broju računskih ćelija diskretizovanog domena, koji je uobičajeno reda veličine nekoliko miliona. Zbog toga se ovakve analize sprovode nad manjim domenom u okolini mernog mesta. Za globalne hidrauličke analize se koriste znatno jednostavniji linijski (1D) modeli ustaljenog ili neustaljenog tečenja uz merenja nivoa vode.
2. Snimanje geometrije provodnika u kom se nalazi merno mesto – Pri sprovođenju ovog koraka procedure potrebno je posvetiti posebnu pažnju vernom reprodukovanju lokalnih geometrijskih karakteristika i nepravilnosti. Upravo ovi detalji mogu imati značajan uticaj na polje brzine. U svrhu detaljnih snimanja geometrijskih karakteristika mogu se koristiti modernije geodetske metode, ali i neke pristupačnije fotogrametrijske metode kao što je „Structure From Motion“ (Sturm & Triggs, 1996).
3. Lokalna hidraulička analiza – Korišćenjem prethodno prikupljenih ulaznih podataka, stvarne geometrije, graničnih i početnih uslova, lokalna hidraulička analiza bi mogla da se iskoristi za dobijanje podataka o stvarnoj strujnoj slici u okolini EM senzora brzine. Međutim upotreba ovakvih vidova simulacija zahteva značajne računarske kapacitete i izvesno znanje iz hidraulike i primeni numeričkih simulacija. U analizama predstavljenim u ovom radu korišćen je „open source“ softverski paket za numeričke simulacije OpenFOAM. Reynoldsove jednačine uprosečene po vremenu i za neustaljen tok (URANS – Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes), su korišćenje sa modeliranje turbulentnog tečenja u provodnicima. Trenutno je praktično standardizovana upotreba k-w SST (Menter, 1993) modela turbulencije koji se zasniva na primeni Businesskove aproksimacije i turbulentne viskoznosti, budući da je u brojnim primerima dao prihvatljive rezultate (Wilcox, 1998).

Korišćenjem sračunatog polja brzine u okolini EM senzora dobijenog pomoću pažljivo sprovedene Lokalne hidrauličke analize, mogu se sračunati korekcionni faktori za kalibraciju EM senzora prema uslovima na mernom mestu. U ovom radu, korišćene su jednodimenzionalne težinske funkcije proizvođača, budući da složenije težinske funkcije ili vektori nisu definisani za ovaj tip uređaja. Kako je korišćena težinska funkcija, funkcija upravnog odstojanja od elektroda uređaja (x_2), umesto integracione zone definiše se integraciona linija L (Slika 2.) i jednačina (1) se svodi na:

$$E_{mod} = \int_L w(x_2) \cdot v_1(x_2) dl \quad (3)$$

gde je E_{mod} modelirani rezultat kalibracije prema uslovima na mernom mestu, odnosno predikcija onoga što uređaj meri, a v_1 predstavlja komponentu brzine u pravcu toka. Korekcionni faktori SSC , za predloženi vid kalibracije, se definišu kao odnos, modelirane srednje brzine u odgovarajućem, mernom poprečnom preseku V i modeliranog rezultata kalibracije E_{mod} :

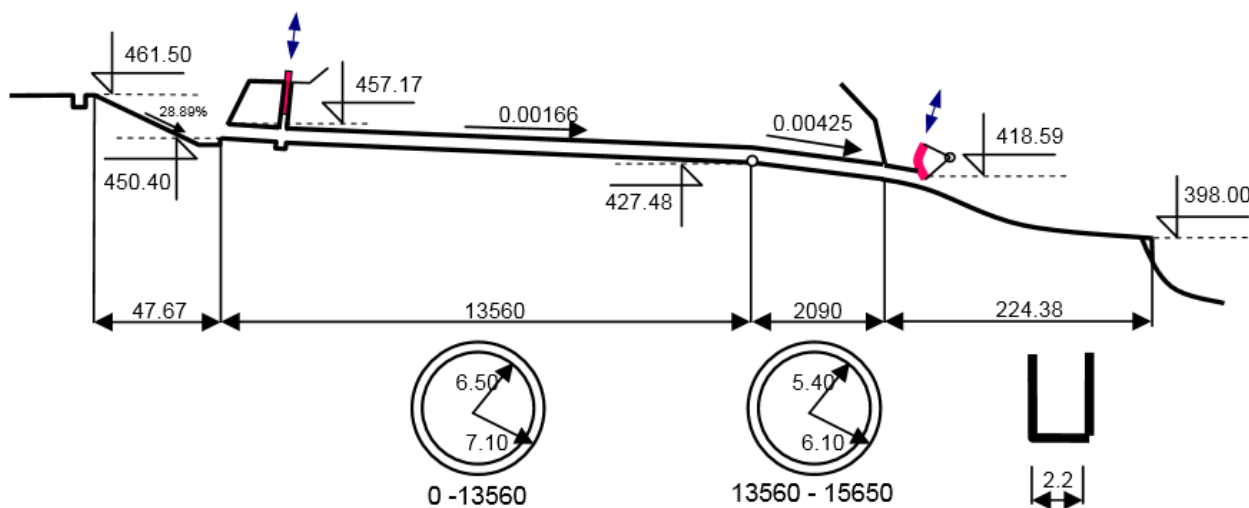
$$SSC = \frac{V}{E_{mod}} \quad (4)$$

Na ovaj način moguće je definisati SSC kalibracione krive za svaki pojedinačan ugrađeni uređaj. Množenjem

signala, dobijenih sa ravnih EM uređaja sa faktorima sa SSC kalibracione krive, moguće je smanjene merne neodređenosti odnosno povećanje tačnosti merenja protoka vode preko srednje profilske brzine.

2.3. Primer: Tunel FP-BA

Za prezentovanje prvih rezultata primene predložene metodologije, iskorišćeno je merno mesto na derivacionom tunelu koji spaja Fatničko Polje i Bilečku akumulaciju u okviru Hidro Energetskog Sistema (HES) Trebinje. Dimenzije ovog tunela su značajne: dužina tunela je oko 15 km a prečnik varira od 5.4 m na obloženim delovima do 7.5 m na neobloženim deonicama tunela (Slika 4). Protok vode u tunelu varira od 0 m³/s u sušnom periodu do otprilike 130 m³/s, prelazeći iz tečenja sa slobodnom površinom u tečenje pod pritiskom – kombinovani uslovi tečenja. Kao posledica velikih dimenzija i pojava velikih brzina u tunelu, Rejnoldsov broj dostiže čak 25 000 000. Imajući u vidu specifičnosti tečenja, u okviru mernog mesta su postavljene četiri ravne (FLAT 700) i dve pomoćne log EM sonde, zajedno sa parom sondi za pritisak (Slika 5). Log EM sonde su posebno dizajnirane za ovaj slučaj, mere brzinu u maloj zapremini ali nisu obuhvaćene analizama predstavljenim u ovom radu.



Slika 4. Shematizovani prikaz derivacionog tunela Fatničko Polje – Bilečka akumulacija



Slika 5. Prikaz dve ravne EM FLAT 700 sonde i jedne log-EM sonde na mernom mestu u tunelu FPBA

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Predložena kalibracija prema uslovima na mernom mestu je izvršena za četiri ravna EM merila ugrađena u derivacioni tunel koji spaja Fatničko Polje i Bilečku akumulaciju. Merno mesto je izvedeno na oko 45 m od ulaza u tunel (Slika 6). Zbog ograničenja koja je postavio investitor, u vidu omogućavanje prolaza mehanizacije kroz tunel, EM sonde ne pokrivaju ceo opseg proticaja već se aktiviraju pri proticaju od približno $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Za manje proticaje predložena je upotreba izvedene Q-H zavisnosti uz pomoć merenja nivoa vode. Deo rezultata dobijenih u okviru izrade projekta mernog mesta za merenje protoka, a koji se odnosi na rad EM sonde, (Jaroslav Černi, Građevinski fakultet i Svet Instrumenata, 2016), je predstavljen u ovom radu.

Prvi korak kalibracione procedure je bila globalna hidraulička analiza celog sistema, u ovom slučaju celog tunela sa ulaznom građevinom. Imajući u vidu kombinovane uslove tečenja, od interesa je bilo proceniti graničnu vrednost protoka, pri kojoj za potpuno otvorene ustave (najčešći slučaj), dolazi do prelaza iz tečenja sa slobodnom površinom u tečenje pod pritiskom. Procenjena je granična vrednost od $115 \text{ m}^3/\text{s}$, nakon koje tečenje u tunelu odlazi pod pritisak. Za vrednosti protoka do granične vrednosti, uglavnom se javljaju oba režima tečenja sa slobodnom površinom, miran režim u uzvodnoj, dužoj deonici i buran režim u nizvodnoj, kraćoj deonici sa kontrolnim presekom na

prelomu trase. Upotrebom linijskog (1D) modela ustaljenog tečenja, procenjene su vrednosti dubina vode i srednje profilske brzine u poprečnim presecima od interesa za ceo opseg protoka.

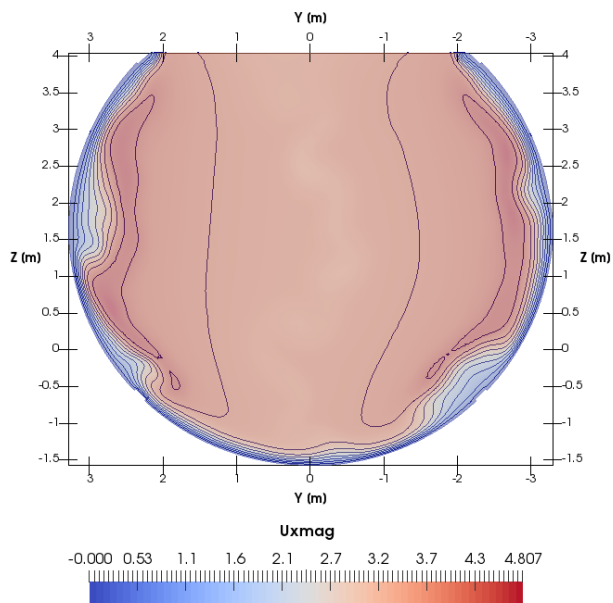


Slika 6. Ulaz u derivacioni tunel FPBA

Za dalju lokalnu hidrauličku analizu, izdvojen je segment tunela dužine 90 m koji se prostire od ulaza tunela. Koristeći detaljna snimanja geometrije, sprovedena od strane lokalne geodetske kompanije, kao i granične uslove dobijene iz globalne hidrauličke analize, formiran je numerički model prostornog (3D) turbulentnog toka u tunelu. Imajući u vidu izuzetno visok Reynoldsov broj, formirani su diskretizovani domeni sa velikim brojem računskih ćelija kako bi se zadovoljio Kurantov uslov (eng. CFL Courant–Friedrichs–Lewy; Ivetić M., 1999; Wilcox, 1998) i postigla zadovoljavajuća tačnost rezultata. Minimalan broj računskih ćelija je bio približno 6 500 000 dok je maksimalan broj bio čak 17 000 000. Kako bi se izbeglo neprihvatljivo visoko računsko vreme, simulacije su sprovedene za stacionarne uslove uz korišćenje pristupa tvrdog poklopca (eng. Rigid Lid).

Rezultati numeričkih simulacija su jasno pokazali da se u mernom preseku „oseća“ uticaj razdelnog zida ulazne građevine, što se može primetiti na Slici 7 gde je prikazano polje brzina za presek na mernom mestu pri proticaju od $110 \text{ m}^3/\text{s}$. Uočava se pomeraj oblasti sa maksimalnim brzinama ka levoj i desnoj strani poprečnog preseka tunela. Dodatno, može se konstatovati uticaj lokalnih nepravilnosti geometrije provodnika na polje brzina. Oba uočena fenomena eksplicitno sugerišu da se pravo strujno polje, u realnim uslovima, značajno razlikuje od približno homogenih polja koja se koriste u fabričkoj kalibraciji uređaja. Time se potvrđuje hipoteza da je predložena kalibracija prema uslovima na mernom mestu potrebna za

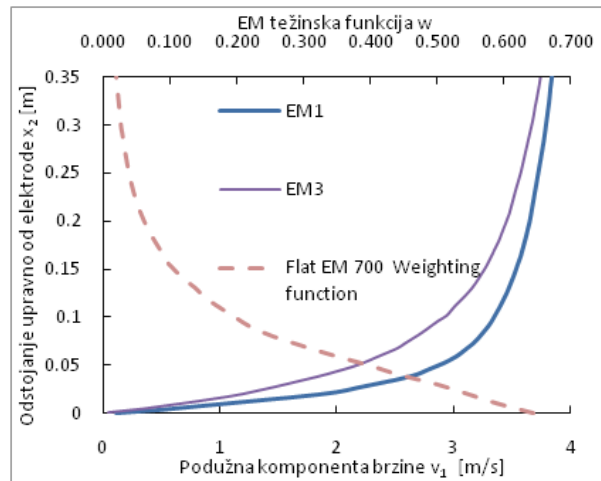
smanjenje merne neodređenosti odnosno povećanje tačnosti merenja protoka.



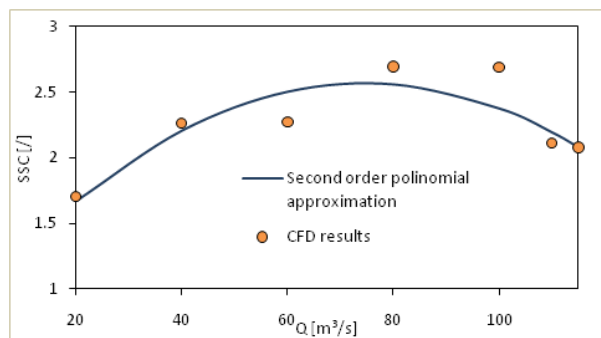
Slika 7. Sračunato polje brzina u mernom preseku tunela FPBA, za protok od $110 \text{ m}^3/\text{s}$

Konačno iz rezultata numeričkih simulacija su izvučeni profili podužne komponente brzine duž integracionih linija svakog pojedinačnog ravnog EM merila. Profili brzina su kombinovani sa težinskom funkcijom, dobijenom od proizvođača, kako bi se sračunali korekcionni faktori SSC kalibracije. Na Slici 8 je prikazan primer modeliranih profila brzina za dva uređaja obeležena kao EM1 i EM3 (prikazani i na Slici 5) naspram težinske funkcije samog uređaja. Primećuje se da, kako brzine rastu sa odstojanjem od uređaja tako i težinska funkcija opada, što implicira da uređaj svakako meri brzinu koja je manja od srednje profilske.

Na osnovu predloženog pristupa, korišćenjem jednačine (3) sračunat je parametar E_{mod} za različite protoke za svaku pojedinačnu EM sondu. Napokon, korišćenjem relacije (4) sračunati su korekcionni faktori za pojedinačne uređaje, koji se mogu koristiti za omogućavanje bolje procene srednje profilske brzine u tunelu. Primer dela SSC kalibracione krive za jednu EM sondu je prikazan na Slici 9. Primećuje se da su vrednosti korekcionnih faktora dosta visoke i variraju između 1.6 i čak 2.6. Za ostale ravne EM uređaje korekcionni faktori su u proseku 20-30% niži, dok je minimalna sračunata vrednost oko 1.3.



Slika 8. Podužne brzine i težinska funkcija duž integracione linije (pravac upravan na elektrode)



Slika 9. Podužne brzine i težinska funkcija duž integracione linije (pravac upravan na elektrode)

Ideja predloženog pristupa da se na ovaj način unapredi rad svakog pojedinačnog EM merila ugrađenog na mernom mestu. Budući da se konačan podatak, o srednjoj profilskoj brzini, dobija kao srednja vrednost korigovanih signala sa svakog uređaja, očekuje se procena protoka sa većom tačnošću. Neophodno je napomenuti da je za konkretan primer izuzetno teško doći do kvantifikacije smanjenja merne neodređenosti odnosno povećanja tačnosti. Naime za to je potrebna merna metoda koja je za red veličine tačnija od prikazanog pristupa, kako bi se koristila kao reper, što je dosta teško finansijski opravdati imajući u vidu kompleksnost problema.

4. ZAKLJUČAK

Merenje protoka sa zadovoljavajućom tačnošću u hidrotehničkim sistemima, može biti izuzetno komplikovan zadatak usled specifičnosti uslova tečenja i geometrije provodnika. Ukoliko nije moguće koristiti stabilnu Q-H vezu i merenjem samo jedne dubine dobiti protok, najčešće se za sisteme gde se javlja tečenje sa slobodnom površinom koriste tzv. metode Brzina-Proticajni presek zbog mogućnosti da se prilagode širokom spektru dispozicija. Karakteristično, za ovu grupu metoda, je da se dominantan izvor merne neodređenosti krije u proceni srednje profilske brzine. U okviru ovog rada predložen je pristup za unapređenje merenja srednje profilske brzine pomoću ravnih EM sonde, domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“. EM sonda rade na principu Faradejevog zakona, usled kog dolazi do pojave napona na elektrodama uređaja usled kretanja provodne tečnosti kroz upravno magnetno polje. Prednosti ovih uređaja su mogućnosti rada sa širokim opsegom brzina, sa malom visinom vodenog nadsloja kao i pri taloženju nanosa preko tela uređaja. Pored toga, usled jasnijeg fizičkog principa rada, moguće je definisati težinske funkcije, kojima se može upisati koliko brzine unutar integracione zone utiču na merenje srednje profilske brzine.

Predloženi postupak je klasifikovan kao naknadna kalibracija uređaja prema uslovima na mernom mestu i oslanja se na kombinaciju prostornih (3D) numeričkih simulacija turbulentnog tečenja u okolini samog uređaja i težinskih funkcija uređaja. Procedura se generalno sastoji iz tri koraka: 1.) Globalna hidraulička analiza, 2.) Snimanje geometrije provodnika u kom se nalazi merno mesto i 3.) Lokalna hidraulička analiza. Prvi rezultati primene predložene metodologije su prikazani kroz primer derivacionog tunela koji spaja Fatničko Polje i Bilečku akumulaciju u okviru HES Trebinje. U tunelu je izvedeno merno mesto za merenje protoka u kojem su trajno instalirane 4 ravne EM sonde i 2 sonde za pritisak. Tokom sezone se u tunelu javljaju kombinovani uslovi tečenja, gde proticaj varira od 0 do 130 m³/s. Kalibracija prema uslovima na mernom mestu je izvršena za svaki pojedinačan EM uređaj i deo rezultata je prikazan u okviru ovog rada. Primećeno je znatno odstupanje sirovih merenja od srednje profilske brzine kao i značajan uticaj lokalnih geometrijskih karakteristika na polje brzine u mernom preseku.

Trenutno se u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, sprovode dodatna ispitivanja predložene metodologije

čiji je cilj omogućavanje kvantifikacije smanjenja merne neodređenosti primenom navedenog postupka. Takođe u okviru istih istraživanja isputuju se kompleksnije formulacije težinske funkcije za ravne EM sonde, kojima bi se doprinelo u povećanju osetljivosti predloženog pristupa.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na podršci u realizaciji projekta TR37010 pod nazivom: „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture“, čiji je sastavni deo bilo ovo istraživanje.

LITERATURA

- [1] Bevir, M. K. (1970). The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(03), 577-590.
- [2] Bonakdari, H., & 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), 225-234.
- [3] 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.
- [4] Godley, A. (2002). Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5), 197-201.
- [5] Hemp, J., & Versteeg, H. K. (1986). Prediction of electromagnetic flowmeter characteristics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19(8), 1459.
- [6] Hu, L., Zou, J., Fu, X., Yang, H. Y., Ruan, X. D., & Wang, C. Y. (2009). Divisionally analytical solutions of Laplace's equations for dry calibration of electromagnetic velocity probes. *Applied Mathematical Modelling*, 33(7), 3130-3150.
- [7] Hughes, A. W., Longair, I. M., Ashley, R. M., & Kirby, K. (1996). Using an array of ultrasonic velocity transducers to improve the accuracy of large sewer mean velocity measurements. *Water Science and Technology*, 33(1), 1-12.

- [8] Ivetić, M. V. (1996). *Racunska hidraulika Tecenje u cevima*. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- [9] Jaroslav Černi, Građevinski fakultet, Svet Instrumenata (2016), *Projekat sistema za merenje protoka u tunelu Fatničko Polje – Akumulacija Bileća*, investitor Holding „Elektroprivreda Republike Srpske“ i „Hidroelektrane na Trebišnjici“.
- [10] Larrarte, F., Bardiaux, J. B., Battaglia, P., & Joannis, C. (2008). Acoustic Doppler flow-meters: A proposal to characterize their technical parameters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(5), 261-267.
- [11] Menter, F. (1993, July). Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In 23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference (p. 2906).
- [12] Prodanović, D., A. Djačić, N. Branislavljević, J. Rukavina (2012). *Laboratorijsko poredjenje ultrazvučnih i elektromagnetnih sonde za merenje protoka u kanalizaciji*. Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Bol, otok Brač, Croatia, strane: 461-471.
- [13] Prodanović, D., Pavlović, D., Branislavljević, N. (2011). *Merenje protoka na kratkim objektima u hidraulički neregularnim uslovima na primeru HE "Đerdap 2"*. *Vodoprivreda*, 43 (252-254): 103-115.
- [14] Schütze, M., Butler, D., Beck, M. B., & Verworn, H. R. (2002). Criteria for assessment of the operational potential of the urban wastewater system. *Water science and technology*, 45(3), 141-148.
- [15] Shercliff, J. A. (1962). *The theory of electromagnetic flow measurement*. Cambridge University Press.
- [16] Smyth, C. C. (1971). Derivation of weight functions for the circular and rectangular channel magnetic flowmeters, by means of Green's theorem and conformal mapping. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 4(1), 29.
- [17] Sturm, P., & Triggs, B. (1996). A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion. *Computer Vision—ECCV'96*, 709-720.
- [18] Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD (Vol. 2, pp. 103-217)*. La Canada, CA: DCW industries.
- [19] Williams, E. J. (1930). The induction of electromotive forces in a moving liquid by a magnetic field, and its application to an investigation of the flow of liquids. *Proceedings of the physical society*, 42(5), 466.

IMPROVEMENT OF THE FLOW MEASURING METHODOLOGY WITH THE FLAT ELECTROMAGNETIC VELOCITY PROBES

by

Damjan IVETIĆ*, Dušan PRODANOVIĆ*, Luka STOJADINOVIĆ*, Mile CVITKOVAC**

*Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

**Svet instrumenata, Belgrade

Summary

One of the commonly used approaches, for the flow measurements in open channel hydraulic systems, is to measure one depth and use the stable Q-H relationship to compute the flow rate. If this method is inappropriate, the velocity-area method has to be used: both area (depth) and mean velocity are measured in order to compute the flow rate. Although, it is reported that the velocity sensors operate with high uncertainty, the popularity of these methods stem from the fact that they can be applied in wide range of hydraulic conditions including the mixed flow conditions. Uncertainties are related both to the applied instruments and properties of the measurement site. While Doppler probes are preferred nowadays in the hydraulic systems, electromagnetic probes have certain advantages which are found to be useful in the methodology presented in this paper. Here, so called flat EM velocity probes are

analyzed, which can be used instead of Doppler probes for the flow measurements. Due to the more rigorous operating principle, particular weighting functions can be derived in order to define contributions from different parts of the flow to the measured signal. Reduction of the uncertainty can be obtained through combination of the weighting functions with site-specific velocity fields computed with CFD simulations. In order to overcome the high uncertainty issue, additional site-specific calibration procedure for flat EM sensors is presented in this paper. Concept of its application in the engineering practice example are presented.

Key words: Flow measurement, open channel, CFD, electromagnetic probes

Redigovano 13.10.2017.