

UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Damjan M. Ivetić

**ODREĐIVANJE PROTOKA TEČNOSTI U
SLOŽENIM USLOVIMA STRUJANJA PRIMENOM
RAVNIH ELEKTROMAGNETNIH SENZORA**

doktorska disertacija

Beograd, 2019

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Damjan M. Ivetić

**ASSESSMENT OF THE LIQUID FLOW RATE IN
COMPLEX FLOW CONDITIONS WITH FLAT
ELECTROMAGNETIC SENSORS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019

Podaci o mentoru i članovima komisije

Mentor

Prof. dr Dušan Prodanović
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Članovi komisije:

Prof. dr Dušan Prodanović
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
Prof. dr Milan Lečić
Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet
V.prof. dr Ljiljana Brajović
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
V.prof. dr Ana Mijić
Imperijal Koledž London, Velika Britanija
V.prof. dr Nenad Jaćimović
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Datum odbrane doktorske disertacije: _____

ZAHVALNICA

Prvenstveno želim da se zahvalim mentoru prof. dr Dušanu Prodanoviću za posvećenost i podršku tokom istraživanja, kao i pisanja disertacije. Posebno sam zahvalan mentoru na ukazanom poverenju, čime mi je obezbedio slobodu u istraživanjima. Takođe, veoma sam zahvalan za posvećeno vreme za pažljivo isčitavanje i recenziranje mojih tekstova, kao i za sve korisne savete koji su značajno unapredili moj naučno-istraživački rad.

Zahvaljum se v. prof. Ljiljani Brajović na divnom pristupu koji ima u komunikaciji sa mladim kolegama i kolegamicama, veoma korisnim sugestijama, kao i na pomoći prilikom istraživanja fenomena elektromagnetizma. V. prof. Ani Mijić se zahvaljujem na spremnosti za saradnju i na originalnim komentarima i predlozima. Zahvaljujem se v. prof Nenadu Jaćimoviću na revnosnom recenziranju disertacije, kao i na produktivnim diskusijama na temu numeričkog modeliranja turbulentnog tečenja. Prof. Milanu Lečiću dugujem zahvalnost za korisne sugestije u definisanju pravaca istraživanja.

Želim da se zahvalim svim kolegama i kolegamicama sa Katedre za Hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, a i sa ostalih katedara, koji su mi na razne načine pružali podršku tokom izrade ove disertacije. Posebno bih se zahvalio Guti (doc. dr Dragutinu Pavloviću) za neformalnu podršku tokom eksperimentalnog rada, kao i za ispoljenu dečačku zainteresovanost za istraživanje koje sam sprovodio. Takođe bih zahvalnost uputio Željku Vasiliću i Milošu Staniću za izuzetnu saradnju u početnim koracima mog naučno-istraživačkog rada. Konačno, veliku zahvalnost dugujem i bivšim studentima, sada kolegama, Luki Stojadinoviću i Jovanu Đorđeviću za praktičnu pomoć u sprovođenju eksperimenata i obradi dobijenih rezultata.

Sa velikim ponosom, se zahvaljujem mojim dragim prijateljima koji su mi pružali bezrezervnu podršku tokom ove avanture. Zahvalan sam što su me slušali i bodrili, kao i što su neretko dolazili u laboratoriju da mi obezbede praktičnu pomoć tokom eksperimenata.

Posebnu vrstu zahvalnosti, za pruženu podršku i poverenje, dugujem svom bratu, roditeljima, baki i ostaloj dragoj porodici.

Mojoj dragoj Ivi dugujem izvinjenje za sve trenutke koje smo propustili, jer sam neretko svoje slobodno vreme ulagao u izradu disertacije. Takođe, dugujem joj izuzetnu zahvalnost na emotivnoj podršci, razumevanju i poverenju. Međutim, najviše sam joj zahvalan za ovaj divan osećaj koji me ispunjava, otkad je na ovaj svet dovela našeg sina Jakova.

Beograd, 2019

Damjan

U znak sećanja na hrabrog Vuka Jokića.

ODREĐIVANJE PROTOKA TEČNOSTI U SLOŽENIM USLOVIMA STRUJANJA PRIMENOM RAVNIH ELEKTROMAGNETNIH SENZORA

Sažetak

Pouzdanost poznavanje protoka predstavlja preduslov za adekvatno dimenzionisanje hidrotehničkih sistema. Pored toga, upravljanje postojećim sistemima se često vrši na osnovu izmerenih podataka o protoku. Međutim, u sistemima gde se javlja tečenje sa slobodnom površinom, posebno u kanalizacionim sistemima, određivanje protoka je komplikovan i zahtevan zadatak.

U ovim slučajevima, protok se najčešće određuje pristupom $V - A$ (Brzina – Proticajni presek). Neodređenost ovako određenog protoka uglavnom potiče od neodređenosti procenjene srednje profilske brzine. Sama neodređenost procenjene srednje profilske brzine ima dve komponente: neodređenost samog senzora brzine i neodređenost korelacije između lokalno izmerene brzine i srednje profilske brzine. U kanalizacionim sistemima, a i generalno u ostalim oblastima hidrotehnike, za merenje brzine se najčešće koriste senzori koji se zasnivaju na primeni Doplerovog efekta. Međutim, problemi sa radom pri malim dubinama i brzinama kao i u slučaju formiranja sedimenta iznad kućišta senzora, često umanjuju pouzdanost dobijenih podataka.

U ovoj disertaciji, kao potencijalna alternativa, analizirani su ravni elektromagnetni (EM) senzori. Detaljno su ispitane karakteristike senzora, predložen je uprošćeni matematički model radnog principa, razvijene su metodologije za korekciju izlaznog signala, definisanje tehničkih parametara kao i primenu postupka lokalne kalibracije, sa ciljem unapređenja pouzdanosti protoka određenog primenom ovih senzora u složenim uslovima strujanja.

Radne karakteristike ravnih EM senzora, izražene kroz parametar merne neodređenosti, su ispitane na laboratorijskoj instalaciji u okviru Instituta za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo. Korišćenjem odgovarajuće metodologije za etalaloniranje merne neodređenosti omogućeno je nepristrasno poređenje sa Dopler sensorima. Ustanovljeno je da su ravni EM senzori ponovljiviji, linearniji i da mogu da rade u širem spektru dubina i brzina u odnosu na Dopler senzore. Posebno je ispitana mogućnost rada u slučaju sedimentacije kućišta senzora poroznim nanosom, kao i u slučaju zadržavanja plastičnih

kesa. Ustanovljeno je da ravni EM senzori u slučaju sedimentaciji daju linearan, ali oslabljen odziv. Predložena je metodologija za definisanje linearnog regresionog modela, kojim se može izvršiti korekcija oslabljenog odziva na osnovu izmerene dubine sedimenta. Sa druge strane, u slučaju zadržavanja plastičnih kesa, ravni EM senzori nisu u mogućnosti da proizvedu adekvatan odziv.

U okviru analize radnog principa ravnih EM senzora, mapirano je magnetno polje senzora i ustanovljeno je da dominantan doprinos generisanju izlaznog signala daje Y komponenta magnetnog polja. Predložen je uprošćeni matematički model za opisivanje radnog principa, kojim se izlazni signal aproksimira linijskim integralom proizvoda rasporeda podužnih komponenata brzine i jednodimenzionalne težinske funkcije, u okviru dometa kontrolne zapremine senzora. Takođe, predložena je i eksperimentalna metodologija za određivanje tehničkih parametara ravnih EM senzora, težinske funkcije i dometa kontrolne zapremine.

Za pouzdanije definisanje korelacije između izmerene i srednje profilske brzine, predložena je metodologija za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora. Lokalna kalibracija je primenjena na tri izvedena merna mesta u okviru derivacionih tunela sistema „Hidroelektrane na Trebišnjici“. Sprovedena je verifikacija postupka lokalne kalibracije na mernom mestu u tunelu Dabarsko Polje – Fatničko Polje, korišćenjem dodatnog kontrolnog mernog sistema, sačinjenog od lokalnih EM senzora „Ajkulino krilo“.

Ključne reči: Merenje protoka, merenje brzine, V – A pristup, složeni uslovi strujanja, elektromagnetni senzori, merna neodređenost, lokalna kalibracija

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uže naučne oblasti: Mehanika nestišljivih fluida i hidraulika

UDK: 624:532.1(043.3)

ASSESSMENT OF THE LIQUID FLOW RATE IN COMPLEX FLOW CONDITIONS WITH FLAT ELECTROMAGNETIC SENSORS

Abstract

Reliable flow data are a precondition for adequate designing of hydraulic systems. Additionally, hydraulic system control is frequently based on the measured flow rate data. However, in the systems with free surface flow, and especially sewer systems, flow rate assessment is a complex and challenging task.

In these cases, flow rate is commonly determined with the V – A (Velocity – Area) approach. Most of the flow rate uncertainty, obtained in this manner, stems from the uncertainty of the assessed mean flow velocity. Uncertainty of the mean flow velocity has two components: uncertainty emanating from the velocity sensor and the uncertainty of the correlation between the measured and mean flow velocity. In sewers, and other hydraulic systems, Doppler based sensors are commonly used for the velocity measurement. However, the accuracy of the acquired data is impeded in cases of the low flow depths and velocity operation, and sedimentation above the sensor housing.

In this dissertation, flat electromagnetic (EM) sensors are analysed as a potential alternative. To improve the reliability of the flow rate assessment with flat EM sensors in complex flow conditions, sensor characteristics have been examined in detail, simplified mathematical model of the sensor's operating principle is suggested and methodologies for the output signal correction, determination of the technical parameters and local calibration of the sensors are proposed.

Flat EM sensor characteristics, expressed through the measurement uncertainty parameter, have been assessed on the laboratory setup at the Institute for hydraulic and environmental engineering. Appropriate methodology was used for benchmarking measurement uncertainty, to allow for the unbiased comparison with the Doppler sensors. It was concluded that the Flat EM sensors are more precise, linear and can operate in wider range of flow depths and velocities. Additionally, capacity for operation under porous sediment deposit and in the case of the plastic bag retention, was assessed. In case of the sedimentation of the flat EM sensor, the output was still linear, but attenuated. Methodology for the definition of the linear regression model, for output signal correction

based on the sediment depth measurement, is proposed. On the other hand, in case of the plastic bag retention, flat EM sensors cannot produce adequate output.

Within the analysis of the flat EM operating principle, sensor's magnetic field was mapped, and it was determined that the dominant contribution to the output signal generation is provided by the Y magnetic field component. Output signal generation is described with the novel simplified mathematical model, where the output is approximated with the line integral of the product of longitudinal velocity distribution and one-dimensional weighting function, within the control volume reach. Additionally, an experimental methodology is proposed for the derivation of the flat EM sensor's technical parameters, weighting function and control volume reach.

To allow for more reliable assessment of the correlation between the measured and mean flow velocity a methodology for the local calibration of the flat EM sensors is suggested. Local calibration was applied on three measurement sites, constructed within the derivational tunnels of the "Hidroelektrane na Trebišnjici" system. The verification of the local calibration was performed on the measuring site within the Dabarsko Polje – Fatničko Polje tunnel, by using the additional control measurement system, made of local EM sensors "Ajkulino krilo".

Key words: Flow measurement, velocity measurement, V – A method, electromagnetic sensors, measurement uncertainty, local calibration

Scientific field: Civil Engineering

Scientific subfields: Fluid Mechanics and Hydraulics

UDC: 624:532.1(043.3)

SADRŽAJ

1	Uvod	1
1.1	Predmet istraživanja	1
1.1.1	Izbor metode za merenje protoka	1
1.1.2	Primena ravnih elektromagnetnih senzora	4
1.2	Cilj i zadaci istraživanja	5
1.3	Struktura disertacije	7
2	Merenje protoka u otvorenim tokovima	9
2.1	Elektromagnetni senzori brzine i protoka.....	9
2.1.1	Tipovi EM senzora brzine i protoka	9
2.1.1.1	Cevni EM senzori.....	10
2.1.1.2	Integralni EM senzori.....	11
2.1.1.3	Lokalni EM senzori.....	13
2.1.2	Teorija EM senzora	15
2.1.3	Nelinearna integracija polja brzina u okviru EM senzora	19
2.1.4	Standardizovani postupak kalibracije lokalnih senzora brzine.....	23
2.2	Merenje protoka tečnosti u složenim uslovima strujanja	25
2.2.1	Metoda Brzina – Proticajni presek	26
2.2.1.1	Odrađivanje površine proticajnog preseka.....	27
2.2.1.2	Odrađivanje srednje profilske brzine	29
2.2.1.3	Korekcionni koeficijenti i funkcije	30
2.2.2	Merenje protoka u kanizacionim sistemima	33
2.2.3	Merenje protoka u velikim provodnicima i provodnicima složenog poprečnog preseka	37
2.3	Zaključak pregleda literature	39
3	Eksperimentalna oprema	42

3.1	Ravni elektromagnetni senzori	43
3.2	Lokalni EM senzor brzine „Ajkulino krilo“	46
3.3	Štapičasti ADV senzor brzine	48
3.4	Magnetometar	52
3.5	Laboratorijska instalacija.....	55
3.5.1	Etalonsko cevno EM merilo protoka	57
3.5.2	Automatizovani pozicioner	58
3.6	Analiza merne neodređenosti	60
4	Laboratorijsko ispitivanje merne neodređenosti ravnih EM senzora.....	62
4.1	Merna neodređenost u standardnim uslovima	63
4.1.1	Metodologija.....	64
4.1.1.1	Laboratorijska instalacija	64
4.1.1.2	Eksperimentalna procedura	65
4.1.1.3	Procena merne neodređenosti.....	66
4.1.1.3.1	Neodređenost etalona.....	68
4.1.1.3.2	Sistematska neodređenost	69
4.1.1.3.3	Statistička neodređenost	70
4.1.1.3.4	Kombinovana neodređenost	70
4.1.1.4	Poređenje sa Dopler uređajima	70
4.1.2	Rezultati i diskusija	71
4.1.2.1	Sistematska neodređenost	71
4.1.2.2	Statistička neodređenost.....	75
4.1.2.3	Kombinovana neodređenost.....	76
4.1.2.4	Praktični aspekt rezultata istraživanja	76
4.1.3	Zaključci	78
4.2	Merna neodređenost u uslovima sedimentacije.....	78

4.2.1	Metodologija.....	79
4.2.1.1	Laboratorijska instalacija	80
4.2.1.1.1	Ispitivanje uticaja poroznog sedimenta.....	81
4.2.1.1.2	Ispitivanje uticaja plastičnih folija.....	82
4.2.1.2	Eksperimentalna procedura.....	84
4.2.1.2.1	Ispitivanje uticaja poroznog sedimenta.....	84
4.2.1.2.2	Ispitivanje uticaja plastičnih folija.....	85
4.2.1.3	Procena merne neodređenosti.....	85
4.2.1.4	Procena kapaciteta senzora brzine za rad pod pokrivkom od poroznog sedimenta	85
4.2.1.5	Procena kapaciteta senzora brzine za rad pod pokrivkom od poroznog sedimenta sa plastičnom folijom	88
4.2.2	Rezultati i diskusija	89
4.2.2.1	Procena kapaciteta senzora brzine za rad pod pokrivkom od poroznog sedimenta	90
4.2.2.2	Procena kapaciteta senzora brzine za rad pod pokrivkom od poroznog sedimenta sa plastičnom folijom	95
4.2.2.3	Praktični aspekt rezultata istraživanja.....	97
4.2.3	Zaključci	99
5	Unapređenje tačnosti merenja brzine primenom ravnih EM senzora.....	101
5.1	Mapiranje magnetnog polja ravnog EM senzora.....	102
5.1.1	Metodologija.....	104
5.1.1.1	Indukcija magnetnog polja ravnog EM senzora.....	104
5.1.1.2	Laboratorijska instalacija	106
5.1.1.3	Eksperimentalna procedura.....	107
5.1.1.4	Primena neuralnih mreža za klasifikovanje izmerenih podataka....	109
5.1.1.5	Vizuelizacija izmerenih vrednosti.....	112

5.1.2	Rezultati i diskusija	113
5.1.2.1	Mapiranje magnetnog polja ravnog EM senzora van kanala	113
5.1.2.2	Mapiranje magnetnog polja ravnog EM senzora unutar kanala.....	117
5.1.3	Zaključci	120
5.2	Uprošćeni model i tehnički parametri ravnih EM senzora	121
5.2.1	Metodologija.....	122
5.2.1.1	Uprošćeni matematički model EM senzora	122
5.2.1.2	Laboratorijska instalacija	126
5.2.1.3	Određivanje tehničkih parametara	126
5.2.1.3.1	Određivanje rasporeda brzina u laboratorijskom kanalu	128
5.2.1.3.2	Izvođenje tehničkih parametara	131
5.2.1.3.3	Validacija tehničkih parametara	133
5.2.1.3.4	Analiza veze između izmerenog magnetnog polja i tehničkih parametara	134
5.2.2	Rezultati i diskusija	135
5.2.2.1	Određivanje rasporeda brzina u laboratorijskom kanalu.....	135
5.2.2.2	Izvođenje tehničkih parametara	138
5.2.2.3	Validacija tehničkih parametara.....	140
5.2.2.4	Analiza veze između izmerenog magnetnog polja i tehničkih parametara	141
5.2.3	Zaključci	143
5.3	Predlog metodologije za merenje protoka u složenim uslovima strujanja primenom ravnih EM senzora	144
5.3.1	Globalna (Integralna) analiza hidrotehničkog sistema	145
5.3.2	Analiza mernog mesta	146
5.3.2.1	Opšti postupak za određivanje rasporeda brzina - primena analitičkih obrazaca	147

5.3.2.2	Posebni postupak za određivanje rasporeda brzina - primena numeričkih simulacija turbulentnog tečenja.....	148
5.3.3	Odabir merne metodologije i detaljno projektovanje mernog mesta	149
5.3.4	Lokalna kalibracija merne opreme	150
5.3.5	Sedimentacija: Mogućnosti merenja dubine sedimenata	154
5.3.5.1	Merenje dubine sedimenta akustičnim senzorima	154
5.3.5.2	Mogućnost korišćenja merenja unutrašnje impedanse.....	156
6	Terenska ispitivanja	158
6.1	Vodoprivredni sistem „Hidroelektrane na Trebišnjici“	159
6.1.1	Opšte karakteristike sistema	159
6.1.1.1	Derivacioni tunel Dabarsko polje – Fatničko polje.....	162
6.1.1.2	Derivacioni tunel Fatničko polje – Bilećka akumulacija	164
6.1.2	Izvedeni sistemi za merenje protoka	168
6.1.2.1	Osnovni merni sistem.....	169
6.1.2.2	Kontrolni merni sistem.....	172
6.1.2.3	Derivacioni tunel Dabarsko polje – Fatničko polje.....	173
6.1.2.4	Derivacioni tunel Fatničko polje – Bilećka akumulacija: Merno mesto Pađeni (Ulaz)	175
6.1.2.5	Derivacioni tunel Fatničko polje – Bilećka akumulacija: Merno mesto Čepelica (Izlaz).....	178
6.2	Verifikacija postupka lokalne kalibracije: primer tunela Dabarsko polje – Fatničko polje	181
6.2.1	Metodologija.....	182
6.2.1.1	Lokalna kalibracija ravnih EM senzora	182
6.2.1.2	Analizirani period rada osnovnog i kontrolnog mernog sistema	184
6.2.1.3	Verifikacija pomoću kontrolnog mernog sistema	184
6.2.2	Rezultati i diskusija	185

6.2.2.1	Lokalna kalibracija ravnih EM senzora	185
6.2.2.2	Analiza snimljenih podataka	187
6.2.2.3	Verifikacija pomoću snimljenih podataka.....	191
6.2.3	Zaključci	193
6.3	Dodatni aspekti primene predložene metodologije	195
6.3.1	Numeričke simulacije turbulentnog tečenja pri velikim Reynoldsovim brojevima	196
6.3.2	Procurivanje vode iz derivacionog tunela Fatničko polje – Bilećka akumulacija.....	200
7	Zaključci i preporuke.....	203
7.1	Zaključci	203
7.2	Preporuke za buduća istraživanja	208
8	Literatura	211
	Biografija.....	227

SPISAK SLIKA

Slika 2.1 Endress – Hauser cevni EM senzor protoka na instalaciji u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.....	11
Slika 2.2 Shematizovana ilustracija rada integralnog EM senzora u pravougaonom kanalu (Watrall i saradnici, 2015)	13
Slika 2.3 (Levo) Papučasti EM senzor Flowtronic EMV-A; (Desno) Instalacija Flowtronic EMV-a na dno kanalizacionog kolektora jajastog preseka (preuzeto sa www.flowtronic.com).....	14
Slika 2.4 (Levo) EM senzor brzine u toku Valeport 801 (preuzeto sa www.valeport.co.uk); (Desno) Kontrola položaja ubodnih EM senzora unutar vodovodnog cevovoda (preuzeto sa www.pilotflow.com).....	15
Slika 2.5 Shematizovan princip rada cevnog EM senzora protoka	17
Slika 2.6 Težinska funkcija u formi Kasinijevih ovala za konvencionalni EM senzor protoka sa homogenim magnetnim poljem i tačkastim elektrodama (Shercliff, 1954; Steinbock i saradnici, 2016)	20
Slika 2.7 Kalibracija hidrometrijskog krila (Levo) i ADCP uređaja (Desno) u kalibracionom kanalu Federalnog Instituta za Metrologiju u Švajcarskoj (Schott i Wutrich, 2012) (preuzeto sa www.metas.ch)	23
Slika 2.8 Kalibracioni list ravnog EM senzora brzine tip FLAT 700, proizvođača „Svet instrumenata“	24
Slika 2.9 Ultrazvučni nivomer na izlaznom profilu „Čepelica“ derivacionog tunela Fatničko Polje – Bilečka Akumulacija	27
Slika 2.10 Rezultat merenja površine proticajnog preseka pomoću georadara na reci San Hoakin, Kalifornija. Crvenim tačkama je obeleženo interpretirano dno korita reke. (preuzeto iz Costa i saradnici, 2006)	28
Slika 2.11 (Levo) Sedimentacija prilazne deonice trougaoanog preliva (Ogden i saradnici, 2017), (Desno) Sedimentacija na dnu kišnog kolektora (preuzeto sa rpitt.eng.ua.edu).....	35
Slika 2.12 Kanalizacioni kolektor blokiran očvršćenim masnim naslagama u Londonu, Ujedinjeno Kraljevstvo (preuzeto sa www.neogaf.com).....	36
Slika 2.13 (Levo) Rezultati numeričke simulacije tečenja na potisu crpne stanice Bao Jing, Kina (Gruber i saradnici, 2009); (Desno) Rezultati numeričke simulacije	

tečenja u kratkom nepravilnom dovodu HE Vetingen, Švajcarska (Aakti i saradnici, 2014)	39
Slika 3.1 Ispitivani Ravni EM senzori, proizvođača „Svet instrumenata“: Gore) Compact Flat DC-2, Levo) Standardni Flat DC-2, Desno) Large Flat DC-2.....	44
Slika 3.2 Shematizovan prikaz principa rada ispitivanih Ravnih EM senzora, proizvođača „Svet instrumenata“	45
Slika 3.3 Levo) EM senzora „Ajkulino krilo“ pre ugradnje; Desno) EM senzor „Ajkulino krilo“ ugrađen na zid tunela Fatničko polje – Bilećka akumulacija u okviru mernog mesta Čepelica	47
Slika 3.4 Shematizovan princip rada lokalnog EM senzora brzine u toku „Ajkulino krilo“, proizvođača „Svet instrumenata“	47
Slika 3.5 Mapiranje polja brzine u okolini Flat DC-2 EM sonde, pomoću Vectrino ADV štapičastog senzora	49
Slika 3.6 Prikaz pojave alijasinga Doplerovog signala na seriji podataka o brzini dobijenih u okviru merenja u laboratoriji građevinskog fakulteta	52
Slika 3.7 Kalibracija Melexis MLX90393 Magnetometra na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu.....	54
Slika 3.8 Rezultati kalibracije Melexis MLX90393 Magnetometra na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu.....	54
Slika 3.9 Fotografija laboratorijske instalacije u prizemlju hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, korišćene za ispitivanje rada Ravnih EM senzora.	55
Slika 3.10 Šematski prikaz laboratorijske instalacije korišćene za ispitivanje rada Ravnih EM senzora u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.....	56
Slika 3.11 Ebara pumpa 150-315, u podrumu hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.....	56
Slika 3.12 Levo) EM senzor protoka Aquaflux F/6 na potisnom cevovodu u podrumu hidrauličke laboratorije; Desno) Pretvarač, logger i displej IFC 110 u prizemlju hidrauličke laboratorije.....	58
Slika 3.13 Mapiranje magnetnog polja Flat DC-2 EM senzora brzine uz pomoć automatizovanog pozicionera i Melexis MLX90393 Magnetometra.....	59

Slika 4.1 Šematski prikaz laboratorijske instalacije korišćene za ispitivanje rada Flat DC-2 (ravnog) EM senzora u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.	65
Slika 4.2 Fotografije sa ispitivanja rada Flat DC-2 (ravnog) EM senzora u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.	66
Slika 4.3 Grafički prikaz komponenti merne neodređenosti i kombinovane merne neodređenosti, dodeljenih merenjima srednje profilske brzine V , adaptirano od Coleman i Steele (1995) i Aguilar i saradnici (2016).....	67
Slika 4.4 Nekorigovana i korigovana merenja brzine pomoću ravne EM sonde naspram etalonske profilske brzine su 1:1 linijom idealnog slaganja.....	72
Slika 4.5 Reziduali merenja brzina pomoću ravnih EM sondi sa linijom idealnog slaganja u zavisnosti od dubine, etalonske profilske brzine i Frudovog broja.....	72
Slika 4.6 Standardne devijacije merenja brzina pomoću ravnih EM sondi sa statističkom neodređenošću u zavisnosti od dubine, etalonske profilske brzine i Frudovog broja.	76
Slika 4.7 Šematski prikaz modifikovane laboratorijske instalacije korišćene za ispitivanje rada Ravnih EM senzora pod pokrivkom od poroznog sedimenta, sa i bez plastičnih kesa.	80
Slika 4.8 Ilustracija rada ravnog EM senzora sa nadslojem poroznog sedimenta i uz prisustvo plastične folije.....	81
Slika 4.9 Flat DC-2 (ravna) EM sonda pokrivena peskom debljine A) $\delta_m = 23$ mm B) $\delta_m = 23$ mm, formiranje dina C) $\delta_m = 80$ mm (pozicija ravne EM sonde obeležena isprekidanom linijom)	81
Slika 4.10 Ilustracija pozicija plastičnih folija unutar poroznog sedimenta a iznad ravnog EM senzora za tri ispitane varijante (redni broj varijante g se nalazi u donjem levom uglu plastične folije)	83
Slika 4.11 Prikaz pozicija listova plastične folije iznad Flat DC-2 (ravnog) EM senzora za varijante: Levo) $g = 1$ - Dimenzije lista plastične folije 280 * 250 mm, Desno) $g = 2$ - Dimenzije lista plastične folije 280 * 125 mm.....	83
Slika 4.12 Vrednosti etalonske i nekorigovane statističke, sistematske i kombinovane neodređenosti u funkciji od dubine sedimenta δ	90

Slika 4.13 Nagib (pojačanje) korekzione funkcije α_m u zavisnosti od dubine sedimenta δ , sa odgovarajućim stepenim zakonom.	91
Slika 4.14 Odsečak (klizanje nule) korekzione funkcije β_m u zavisnosti od dubine sedimenta δ , sa odgovarajućim kompozitnim linearnim modelom.....	91
Slika 4.15 Lokalno kalibrisana merenja brzine $V_{EMV,k,m}$, dobijena pomoću Flat DC-2 EM senzora, pre i nakon primene CFM-a, pri radu pod pokrivanom od poroznog sedimenta.	94
Slika 4.16 Etalonska i korigovana statistička, sistematska i kombinovana neodređenost u funkciji od dubine sedimenta δ	95
Slika 4.17 Lokalno kalibrisana merenja brzine $V_{EMV,l,g}$, pomoću Flat DC-2 EM senzora, pre i nakon primene CFM-a, pri radu pod pokrivanom od poroznog sedimenta sa plastičnom folijom.....	97
Slika 5.1 Šematski prikaz položaja ravnih kalemova unutar Flat DC-2 EM senzora. .	105
Slika 5.2 Grafički prikaz promene smera pobudne struje ravnih EM senzora, proizvođača „Svet instrumenata“ (Stojadinović i saradnici, 2018).	105
Slika 5.3 Mapiranje magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, van laboratorijskog kanala u prostorijama hidrauličke laboratorije Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.....	107
Slika 5.4 Primer izmerenih vrednosti komponenata magnetnog polja u jednoj tački. Prirodno magnetno polje planete Zemlje je uticalo na odstupanje srednje vrednosti komponenata magnetnog polja od 0 (isprekidana horizontalna linija).....	108
Slika 5.5 Shematski prikaz klasifikacije izmerenih komponenata magnetnog polja, ravnih EM senzora, upotrebom neuralnih mreža.....	110
Slika 5.6 Izometrijski prikaz prostornog rasporeda komponenata magnetnog polja Flat DC-2 EM senzora, izmerenih unutar laboratorijskog kanala	113
Slika 5.7 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponenata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $X = 12$ cm, u prvoj etapi mapiranja (van kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $X = 12$ cm.	114
Slika 5.8 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponenata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $Y = 0$	

cm, u prvoj etapi mapiranja (van kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $Y = 0$ cm.	115
Slika 5.9 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponentata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $Y = 5$ cm, u prvoj etapi mapiranja (van kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $Y = 5$ cm.	116
Slika 5.10 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponentata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $X = 12$ cm, u drugoj etapi mapiranja (unutar kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $X = 12$ cm.	117
Slika 5.11 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponentata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $Y = 0$ cm, u drugoj etapi mapiranja (unutar kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $Y = 0$ cm.	118
Slika 5.12 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponentata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $Y = 5$ cm, u drugoj etapi mapiranja (unutar kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $Y = 5$ cm.	119
Slika 5.13 Grafički prikaz rasporeda komponente magnetnog polja B_y FLAT DC-2 EM senzora, za vertikalnu u Z pravcu ($X = 12$ cm, $Y = 0$ cm), u drugoj etapi mapiranja (unutar kanala).	120
Slika 5.15 Uprošćeni matematički model ravnog EM senzora: grafički prikaz granica integracije – A) Standardni slučaj: Donja granica $Z_L = Z_{surf}$ i gornja granica $Z_U = Z_{surf} + \tau_{max}$, B) Slučaj sedimentacije: Donja granica $Z_L = \delta$ i gornja granica $Z_U = Z_{surf} + \tau_{max}$, C) Slučaj malih dubina: Donja granica $Z_L = Z_{surf}$ i gornja granica $Z_U = h$	125
Slika 5.16 Nagibi korekcionih funkcija α sa modelom nagiba iz CFM-a, dobijeni nakon redukovanje sistematske neodređenosti izmerenih brzina, proistekle od prisustva različitih dubina sedimenata $\delta = Z_L$	128
Slika 5.17 Shematski prikaz položaja CVP-a iznd Flat DC-2 EM senzora, korišćenih za merenja podužne komponente brzine pomoću štapičastog ADV senzora „Vectrino+“	130

Slika 5.18 Shematski prikaz generisanja izlaznog signala ravnih EM senzora kroz interakciju jednodimenzionalne težinske funkcije $w(z)$ i odgovarajućeg rasporeda brzina $V_x(z)$ za dubine sedimenata δ_i i δ_{i+1}	133
Slika 5.19 Izmerene i obrađene podužne komponente vektora brzine duž tri Centralna Vertikalna Profila zajedno sa analitičkim rasporedom brzina (Bonakdari i saradnici, 2008), za $Q = 14.5$ L/s, $h = 22.4$ cm, $\delta = 2.0$ cm, $Ar = 1.22$	136
Slika 5.20 Izmerene i obrađene podužne komponente vektora brzine duž tri Centralna Vertikalna Profila zajedno sa analitičkim rasporedom brzina (Bonakdari i saradnici, 2008), za $Q = 14.4$ L/s, $h = 22.3$ cm, $\delta = 2.5$ cm, $Ar = 1.26$	136
Slika 5.21 Izmerene i obrađene podužne komponente vektora brzine duž tri Centralna Vertikalna Profila zajedno sa analitičkim rasporedom brzina (Bonakdari i saradnici, 2008), za $Q = 33.3$ L/s, $h = 32.4$ cm, $\delta = 0.0$ cm, $Ar = 0.77$	137
Slika 5.22 RMSE između simuliranih i originalnih merenja brzina Flat DC-2 EM senzora pri $\delta = 8.0$ cm naspram ispitanih vrednosti dometa kontrolne zapremine τ_{max}	138
Slika 5.23 Merenja simulirana pomoću $\tau_{max} = 8.7$ cm, i odgovarajuće \mathbf{w} , naspram originalnih merenja brzine Flat DC-2 EM senzora pri prisustvom pokrivke od poroznog sedimenta dubine $\delta = 8.0$ cm.....	139
Slika 5.24 Izvedena jednodimenzionalna težinska funkcija \mathbf{w} i domet CV-a τ_{max} , Flat DC-2 EM senzora, naspram vertikalnog odstojanja od dna kanala ($Z = 0$).	139
Slika 5.25 Simulirana merenja naspram originalnih, nekorigovanih, merenja brzine Flat DC-2 EM senzora u uslovima rada bez prisustva sedimenta u laboratorijskom..	140
Slika 5.26 Poređenje normalizovanih izmerenih rasporeda magnetnog polja B_y i eksperimentalno dobijene težinske funkcije \mathbf{w} Flat DC-2 EM senzora (normalizacija od 0 do 1).....	142
Slika 5.27 Sračunati rasporedi osrednjene gustine struje j Flat DC-2 EM senzora.....	142
Slika 5.28 Simbolički dijagram toka za sprovođenje postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora brzine u okviru projektovanja sistema za merenje protoka u složenim uslovima strujanja.....	152
Slika 5.29 Simbolički dijagram toka za određivanje protoka u složenim uslovima strujanja pomoću ravnih EM senzora brzine.	153

Slika 5.30 Merni sistem <i>Furrina</i> za merenje dubine sedimenta pomoću akustičnog senzora. Na slici se može primetiti i teleskopski nosač sa baždarenim kablom i enkoderom za određivanje položaja samog akustičnog senzora (Larrarte i saradnici, 2016).....	155
Slika 5.31 Izmerene i osrednjene vrednosti impedanse R u zavisnosti od dubine poroznog, peščanog sedimenta δ , dobijenih pri ispitivanju robusnosti ravnih EM senzora.	156
Slika 6.1 Šematski prikaz trenutnog stanja razvoja sistema Hidroelektrane na Trebišnjici (CUW-UK i ICCI Limited, 2004).	161
Slika 6.2 Šematski prikaz osnovnih geometrijskih karakteristika derivacionog tunela Dabarsko polje – Fatničko polje.....	163
Slika 6.3 Izlazna građevina derivacionog tunela Dabarsko polje – Fatničko polje: (Levo) Pogled iz odvodnog kanala u Fatničkom polju; (Gore desno) Pogled iz tunela na odvodni kanal; (Dole desno) Zadržavanje vučenog nanosa neposredno uzvodno od izlazne građevine.	164
Slika 6.4 Šematski prikaz osnovnih geometrijskih karakteristika derivacionog tunela Fatničko polje – Bilećka akumulacija	165
Slika 6.5 Ulaz u derivacioni tunel Fatničko polje – Bilećka akumulacija.....	165
Slika 6.7 Izlazna građevina derivacionog tunela Fatničko polje – Bilećka akumulacija: (Gore levo) Pogled iz brzotoka na zatvaračnicu; (Gore desno) Pogled na suženi izlaz iz tunela; (Dole) Oštećenje zida brzotoka usled pojave kavitacije.	167
Slika 6.8 Šematski prikaz koncepta ugradnje pijeze rezistivnih senzora pritiska u derivacionim tunelima DP – FP i FP - BA.	170
Slika 6.9 Prikaz položaja ravnih EM senzora, u okviru OMS, kao i EM senzora „Ajkulino krilo“, u okviru KMS, zajedno sa odgovarajućim kontrolnim zapreminama (Crvena šrafura).	172
Slika 6.10 Šematski prikaz izvedenog mernog mesta u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela DP – FP u Fatničkom polju (Razmera za dužinu i prečnik tunela je distordovana).	174
Slika 6.11 Detalji izvedenog mernog mesta u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela DP – FP u Fatničkom polju: (Levo) Prelaz sa kružnog na pravougaoni poprečni presek (Pogled ka DP), (Desno Gore) Ugrađeni Large Flat DC-2 EM	

senzor (EM-A2) i Desno Dole) EM senzor brzine u toku „Ajkulino Krilo“(EM kontrolna – A).....	175
Slika 6.12 Šematski prikaz izvedenog mernog mesta Pađeni u neposrednoj blizini ulazne građevine tunela FP – BA u Fatničkom polju (Razmera za dužinu i prečnik tunela je distordovana).....	176
Slika 6.13 Detalji izvedenog mernog mesta Pađeni u neposrednoj blizini ulazne građevine tunela FP – BA u Fatničkom polju: Levo) Podsystem Large Flat DC-2 EM senzor (EM-B1 i EM-B2) i EM senzor brzine u toku „Ajkulino Krilo“(EM kontrolna – B), Desno) Merno mesto tokom montaže.	177
Slika 6.14 Uticaj krivine na raspored brzina nizvodno od mernog mesta Čepelica, u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela FP – BA u Bilečkom polju.....	178
Slika 6.15 Šematski prikaz izvedenog mernog mesta Čepelica u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela FP – BA u Bilečkom polju (Razmera za dužinu i prečnik tunela je distordovana).....	179
Slika 6.16 Detalji izvedenog mernog mesta u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela FP – BA u Bilečkom polju: Gore Levo) Ugrađeni Large Flat DC-2 EM senzor (EM-B2), Gore Desno) Oštećena oprema prethodno izvedenog mernog mesta u suženju i Dole) Prevezivanje napojnih i signalnih kablova „Svet instrumenata“.....	180
Slika 6.17 Vrednosti korekcionih funkcija za Large Flat DC-2 EM senzore (OMS) i EM senzore „Ajkulino krilo“ (KMS) dobijene u postupku lokalne kalibracije, za uslove u tunelu DP – FP.....	186
Slika 6.18 Brzine i dubine izmerene pomoću Osnovnog i Kontrolnog Mernog Sistema (OMS i KMS) u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018, na derivacionom tunelu DP-FP.....	188
Slika 6.19 Brzine V_{mer} i $V_{kont,mer}$, i dubina h_{mer} zabeležene tokom prvog događaja u periodu od 3.2.2018 do 6.2.2018 korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema (OMS i KMS).	189
Slika 6.20 Brzine V_{mer} i $V_{kont,mer}$, i dubina h_{mer} zabeležene tokom drugog događaja u periodu od 13.3.2018 do 25.3.2018, korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema (OMS i KMS).	190

Slika 6.21 Brzine V_{mer} i $V_{kont,mer}$, i dubina h_{mer} zabeležene tokom drugog događaja u periodu od 8.4.2018 do 20.4.2018, korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema (OMS i KMS).	190
Slika 6.22 Vrednosti odnosa korekcionih funkcija za ravne EM senzore i EM senzore „Ajkulino krilo“ dobijenih postupkom lokalne kalibracije zajedno sa recipročnim odnosima brzina izmerenih tokom tri karakteristična događaja u tunelu DP – FP.	191
Slika 6.23 Poređenje vrednosti korekcionih funkcija za ravne EM senzore dobijenih primenom numeričkih simulacija (CFD) i analitičkih obrazaca za opisivanje rasporeda brzina u derivacionim tunelima DP-FP i FP-BA.	198
Slika 6.24 Raspored brzina u mernom profilu Pađeni dobijen primenom numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja: Gore) Rezultati primene „ostvarljivog“ $k - \varepsilon$ model turbulencije; Dole) Rezultati primene modela $k - \omega$ transport smičućih napona.	199
Slika 6.25 Protoci i visine pritiska izmereni na ulazu (Pađeni) i izlazu (Čepelica) derivacionog tunela FP – BA, u periodu od 5.2.2019 do 14.2.2019.	201
Slika 6.26 Rezultati terenskog eksperimenta praženjenja derivacionog tunela FP – BA, radi procena položaja otvora u zidovima neobloženih segmenata tunela.	202

SPISAK TABELA

Tabela 4.1 Poređenje rezultata etaloniranja merne neodređenosti između ravnih EM senzora i dva papučasta ADV-a (Aguilar i saradnici, 2016).	74
Tabela 4.2 Poređenje rezultata etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora za slučaj rada pod pokrivkom od poroznog sedimenta, sa i bez plastične folije	96
Tabela 5.1 Karakteristike tri analizirana slučaja korišćena za procenu raspored podužnih komponenata brzina unutar laboratorijskog kanala.....	130

1 UVOD

1.1 PREDMET ISTRAŽIVANJA

Osnovni fizički parametar prema kojem se dimenzioniše većina hidrotehničkih sistema, predstavlja podatak o protoku. Praktično je nezamislivo analizirati bilo koji hidrotehnički problem, bez poznavanja osnovnih podataka, kao što su minimalni, srednji i maksimalni protok vode. Efikasno upravljanje hidrotehničkim sistemima zavisi od hidrauličkih podataka merenih u realnom vremenu (Schutze i saradnici, 2002). Okvirna direktiva o vodama, izdata od strane Evropske komisije, identifikuje osnovni cilj komunalnih preduzeća, čiji je zadatak održavanje vodnih resursa, u proceni protoka vode i protoka mase polutananta u vodna tela (EC, 2000). Za ispunjavanje ovog zadatka, u oba slučaja, su neophodna merenja protoka vode sa niskom mernom neodređenošću. Međutim, tradicionalno je upravo podatak o protoku najteže izmeriti ili odrediti, pogotovo u kanalizacionim sistemima (Jeanbourquin i saradnici, 2012). Iako su se mnogi istraživači bavili razvojem adekvatnih tehnologija mernih metoda, ovo polje istraživanja je i dalje aktuelno zbog niza faktora koji remete rad mernih uređaja.

1.1.1 IZBOR METODE ZA MERENJE PROTOKA

Veruje se da su prvi sistemi za merenje protoka korišćeni u antičkoj Sumeriji, odnosno gradovima Uru i Kišu. Naime, Sumerci su postavljali jednostavne prepreke od kamenih blokova u kanale i na osnovu merenja dubine vode na prepreci procenjivali su protok vode u kanalu (preteča upotrebe širokih pragova za merenje protoka). Imajući u vidu značaj podatka o protoku, kao i specifičnosti različitih tipova hidrotehničkih sistema, vremenom su se razvili brojni i raznovrsni pristupi i metode za merenje protoka vode. U opštem slučaju, projektovanje mernog mesta, odnosno sistema za merenje protoka se vrši u skladu sa potrebama krajnjeg korisnika podatka o protoku, najčešće tehničkom licu ili timu zaduženom za projektovanje ili upravljanje nekim hidrotehničkim sistemom. U praksi, iako je projektantu mernog mesta na raspolaganju širok spektar pristupa, on retko ima jasan i „čist“ izbor u pogledu optimalne merne metode kao i same lokacije. Na primer,

neretko se javlja situacija da nijedna od dostupnih metoda ne može da ispuni kriterijume, u pogledu tačnosti i ponovljivosti, za ceo opseg protoka ili ceo spektar uslova koji su mogu javiti na potencijalnom mernom mestu.

Generalno, izbor optimalne metode za merenje protoka, u okviru određenog hidrotehničkog sistema, je povezan sa različitim osobinama analiziranog sistema. Međutim, moguće je izdvojiti dominantne faktore koje svakako treba uzeti u razmatranje pri izboru merne opreme (Godley, 2002):

- *Hidraulički uslovi* – Izbor merne metode zavisi prvenstveno od tipa tečenja koji se može očekivati na mernom mestu (tečenje pod pritiskom ili tečenje sa slobodnom površinom ili kombinovani uslovi tečenja) kao i od opsega hidrauličkih parametara, prvenstveno protoka i pritisaka, koji se mogu javiti. Takođe, merni sistemi se razlikuju po brzini odziva, odnosno frekvenciji uzorkovanja, zbog čega je od interesa i sama neustaljenost toka, odnosno brzina kojom dolazi do promena protoka. Iako se trenutno raspoloživim metodama može obezbediti pouzdano merenje protoka u standardnim uslovima tečenja, poseban problem predstavljaju tzv. složeni uslovi tečenja, kakvi se javljaju u kanalizacionim sistemima ili velikim provodnicima sa složenim geometrijama. Upravo je merenje protoka u ovakvim uslovima tečenja, fokus ove disertacije.
- *Karakteristike fluida* – Svaka merna metoda za merenje protoka, je osetljiva na određene karakteristike fluide. Svakako najznačajnije su temperatura, elektroprovodnost kao i koncentracija, odnosno tip suspendovanih čestica u toku. Voda u hidrotehničkim sistemima može biti „čista“, iako češće, ona je opterećena suspendovanim ili/i vučenim nanosom. U slučaju kanalizacionih sistema (fekalnih i kombinovanih) karakteristična je pojava i masti, ulja i raznog biološkog odnosno hemijskog otpada.
- *Fizičke karakteristike provodnika* – Dimenzije i oblik poprečnog preseka provodnika često predstavljaju ograničavajući faktor za postavljanje pojedinih mernih sistema. Materijal zidova provodnika, takođe može uticati na radne karakteristike pojedinih mernih uređaja. Pored toga, pri izboru optimalne merne

tehnike, treba voditi računa i o promenljivoj prirodi hrapavosti obloge provodnika, budući da u dužem periodu, ovaj parametar, može uticati na tačnost podatka o protoku.

- *Karakteristike sredine* – Kanalizacioni sistemi predstavljaju najnepovoljniju sredinu za rad sistema za merenje protoka i generalno su identifikovani kao sredine opasne po zdravlje čoveka. Prisustvo otrovnih, korozivnih i čak eksplozivnih gasova može uticati na izbor optimalne merne metode odnosno merne lokacije. U ovu kategoriju faktora, treba svrstati i dostupnost mernog mesta kao i mogućnost adekvatnog napajanja instrumenata i razmene podataka sa upravljačkom jedinicom sistema.
- *Ekonomska kategorija* – Jasno je, da se u današnjem društvu od svakog inženjerskog rešenja očekuje da zadovolji određene ekonomske kriterijume. Primena robusnih metoda sa visokom deklarisanom tačnošću zahteva izdvajanje značajnih finansijskih sredstava, koja često projektantu nisu na raspolaganju. Ubrzani razvoj na polju mikrokontrolerskih jedinica je doveo do pojave jeftinih mernih instrumenata, koji sa druge strane, imaju lošije karakteristike u vidu tačnosti, ponovljivosti i robusnosti. Međutim, pojava jeftinih i pristupačnih senzora (eng. „low cost“) je omogućila šire integrisanje javnosti u fenomene hidrotehnike, čime je svakako ostvaren napredak ka usvajanju koncepta integralnog upravljanja vodnim resursima (Mao i saradnici, 2018; Paul i saradnici, 2018).

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da je pri izboru adekvatne merne metode, odnosno projektovanju sistema za merenje protoka, neophodno zadovoljiti više međusobno povezanih i neretko konfliktnih faktora. Da bi se ovaj zadatak ispunio na odgovarajući način, potrebno je koristiti znanja iz oblasti hidraulike kao i iz osnovnih fizičkih principa koji opisuju rad određene merne metode. Takođe, bitno je poznavati aktuelne raspoložive merne metode i posedovati iskustveno znanje o njihovim prednostima i manama.

1.1.2 PRIMENA RAVNIH ELEKTROMAGNETNIH SENZORA

Fokus istraživanja, predstavljenih u ovoj disertaciji, je stavljen na probleme određivanja protoka u složenim uslovima strujanja, kakvi se javljaju u kanalizacionim sistemima kao i u hidrotehničkim provodnicima sa složenom geometrijom. Pristup u merenju protoka, kategorisan kao metoda brzina-proticajni presek (V-A, eng. Velocity – Area), se izdvaja po svojoj popularnosti, prvenstveno zbog mogućnosti da se primeni u širem spektru hidrotehničkih problema, uključujući i slučajeve složenih uslova strujanja (Kouyi i saradnici, 2010). Ovaj pristup se zasniva na posebnom merenju dubine, preko koje se određuje površina proticajnog preseka A , i posebnom merenju brzine V_{mer} na osnovu koje se određuje srednja profilska brzina V . Proizvod površine proticajnog preseka i srednje profilske brzine je jednak protoku. Odabir mernih tehnika, za merenje dubine i brzine, se obavlja prema prethodno definisanim zahtevima i ograničenjima. Proračun proticajne površine, na osnovu podatka o dubini, se obavlja za preseke sa poznatom geometrijom bez posebnih problema.

Međutim određivanje srednje profilske brzine je komplikovan zadatak. Naime, u okviru procene V će se javiti greška, odnosno neodređenost, koja ima dvojak karakter: 1.) neodređenost usled merenja same brzine V_{mer} kao i 2.) neodređenost usled transformacije V_{mer} u V . Dok je prvi izvor neodređenost vezan za sam instrument koji se koristi, drugi je vezan za merno mesto i specifičnosti hidrauličkih uslova koji se na tom mestu i javljaju (Bonakdari & Zinatizadeh, 2011). Generalno postoje tri pristupa za određivanje srednje profilske brzine u uslovima tečenja sa slobodnom površinom: 1.) upotreba integralnih metoda – gde ceo proticajni presek utiče na merenje brzine, 2.) polu-integralne metode – gde deo poprečnog preseka utiče na merenje brzine i 3.) merenje brzine u tački (Steinbock i saradnici, 2016).

U kanalizacionim sistemima, a i generalno u ostalim oblastima hidrotehnike, najčešće se koriste senzori koji se zasnivaju na primeni Doplerovog efekta (Larrarte i saradnici, 2008), kao polu-integrativne metode. Dopler senzore brzine karakteriše prednost u vidu, relativno velike (duboke) zone integracije. Sa druge strane, mane u vidu nemogućnosti rada pri pojavi taloženja nanosa u vidu sedimenta na glavi predajnika ili sa smanjenom tačnošću pri manjim dubinama vodenog nadsloja - pri dubini od 5 cm zabeležena

neodređenost veća od 25% (Mueller i saradnici, 2007), otežavaju kontinualno dobijanje podataka sa niskom neodređenošću.

Alternativno se koriste, ali u dosta manjem obimu, lokalni elektromagnetni (EM) senzori za merenje brzina, kao npr EMV 500TM (www.flow-tronic.com). Princip rada ovih uređaja se zasniva na Faradejevom zakonu, gde kretanje provodne tečnosti kroz magnetno polje indukuje pojavu razlike napona na elektrodama sonde (Shercliff, 1962; Bevir, 1970). Nasuprot Dopler sensorima, ovi uređaji imaju manju zonu integracije (pliću). Glavne prednosti su mogućnost rada i sa prljavom i sa čistom vodom, merenja širokog spektra brzina od nekoliko mm/s do nekoliko m/s, mogućnost rada pri manjim nadslojevima vode, kao i mogućnost rada sa pojavom sedimenta na kućištu sonde.

Karakteristično za EM senzore brzine je nepoznavanje jasnog principa ponderisane integracije polja brzine kao ni veličine i položaja zone integracije. U slučaju EM merača za punu cev, metodologije za određivanje principa ponderisane integracije su razvijane (Smyth, 1971), međutim sličnih rezultata kod EM sondi za merenje brzina u otvorenim tokovima nema. Pored toga dodatna neodređenost u merenju srednje profilske brzine se javlja usled činjenice da lokalno izmerena brzina nije reprezentativna za ceo poprečni presek. Imajući navedeno u vidu, iako proizvođači tvrde da njihov uređaj pokazuje srednju brzinu, najčešće to nije slučaj (Hughes i saradnici., 1996; Bonakdari & Zinatizadeh, 2011). Zbog toga je neophodno uvesti dodatne korekzione koeficijente ili korekzione funkcije. U praksi se najčešće „in situ“ merenja brzine, ručno držanim hidrometrijskom krilom ili EM štapičisatom sondom pri malim protocima, interpoluju kako bi se procenili korekcioni koeficijenti. Međutim, korišćenjem ovako dobijenih korekcija pri većim protocima, unosi se sistematska greška (Aguilar i saradnici, 2016), zbog čega postoji potreba za razvojem metodologije koja se može primeniti na širem opsegu hidrauličkih uslova.

1.2 CILJ I ZADACI ISTRAŽIVANJA

U okviru istraživanja predstavljenih u ovoj disertaciji, prvi zadatak i osnova za dalji rad, je sistematsko ispitivanje radnih karakteristika lokalnih EM senzora brzine. Korišćeni su EM senzori domaćeg proizvođača elektromagnetnih uređaja „Svet instrumenata“, tzv.

Ravni (eng. Flat) EM senzori. Ovaj tip senzora je korišćen upravo zbog činjenice da ovakvi i slični lokalni EM senzori ne uživaju veliku popularnost, iako poseduju značajan potencijal, pogotovo za primenu u složenim uslovima strujanja. Analizirane su radne karakteristike senzora koje opisuju tačnost i ponovljivost merenja, kao i robusnost. Robusnost je ispitana kroz procenu kapaciteta senzora za rad pod slojem od poroznog sedimenta i u slučaju prekrivanja plastičnim kesama. Eksperimentalni deo istraživanja je sproveden laboratorijskoj instalaciji Instituta za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo na Građevinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu.

Drugi zadatak istraživanja je razvijanje metodologije kojom bi se mogao definisati princip rada lokalnih EM senzora brzine, odnosno koncept ponderisane integracije polja brzina u okolini senzora, na osnovu kojeg se generiše izlazni signal uređaja. Konačan cilj ovog dela istraživanja je formulisanje praktičnog matematičkog modela rada lokalnih EM senzora, kao i procedure za određivanje tehničkih parametara odgovarajućeg modela. Kako bi se realizovao navedeni zadatak sprovedena su dodatna eksperimentalna istraživanja u laboratoriji Instituta za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, gde su korišćeni štapičasti akustični Dopler senzori a merenje vektora brzine u tački kao i magnetometri, na bezi Holovog efekta, za merenje vektora magnetnog polja u tački.

Imajući u vidu da u proceni protoka, primenom pristupa $V - A$, značajan izvor merne neodređenosti predstavlja sama korelacija koja povezuje izmerenu brzinu V_{mer} sa srednjom profilskom brzinom V , naredni zadatak istraživanja je razvijanje metodologije za pouzdano definisanje navedene korelacije. Kako bi se definisala adekvatna korelacija, kroz tzv. korekcionu funkciju K , neophodno je omogućiti matematičko modeliranje radnog principa EM senzora i definisati metodologiju za određivanje tehničkih parametara senzora, što je rezultat prethodnog zadatka istraživanja.

Konačno, potrebno je proveriti odnosno verifikovati predloženu metodologiju u terenskim uslovima rada. Poslednji zadatak istraživanja je sprovođenje terenskih ispitivanja na osnovu kojih se, pored verifikacije predložene metodologije, mogu razmotriti dodatni aspekti primene predložene metodologije. Terenska ispitivanja su sprovedena kroz projekte ostvarene u okviru saradnje Građevinskog fakulteta sa privredom. Konkretno, projektovana su, i izvedena, tri merna mesta unutar derivacionih tunela sistema „Hidroelektrane na Trebišnjici“ u Republici Srpskoj. Kroz realizaciju i

naknadni monitoring rada sistema, obezbeđeni su izuzetno vredni podaci koji su iskorišćeni za sveobuhvatniju analizu metodologije za primenu ravnih EM senzora za određivanje protoka u složenim uslovima strujanja.

1.3 STRUKTURA DISERTACIJE

Poglavlje 2 disertacije je posvećeno pregledu literature, odnosno dosadašnjih istraživanja, na polju primene EM senzora za merenje protoka u otvorenim tokovima. Izvršena je klasifikacija EM senzora prema uslovima primene, i predstavljene su osnove teorije merenja brzine/protoka pomoću EM uređaja. Poseban fokus je stavljena na dosadašnja istraživanja koja se bave matematičkim opisivanjem radnog principa senzora. Na osnovu opisa specifičnosti složenih uslova strujanja, analizirane su trenutno najpopularnije metode za merenje protoka koje se primenjuju u ovakvim slučajevima. Konačno, identifikovani su nedostaci u dosadašnjim istraživanjima koji potencijalno mogu da budu pokriveni rezultatima predstavljenim u ovoj disertaciji.

U okviru *Poglavlja 3* predstavljena je merna oprema, kao i laboratorijske instalacija, korišćena tokom eksperimentalnog istraživanja. Pored ravnih EM senzora, koji su predmet istraživanja, opisane su glavne karakteristike lokalnog EM senzora brzine u toku „Ajkulino krilo“, štapičastog akustičnog Dopler senzora brzine „Vectrino+“, kao i magnetometra korišćenog za mapiranje magnetnog polja ravnih EM senzora. Ukratko je opisana i zatvorena laboratorijska instalacija, sa ključnim elementima, koja se pruža na dva sprata Instituta za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Uveden je i koncept merne neodređenosti, kao parametra koji je korišćen za kvantifikovanje radnih karakteristika ravnih EM senzora.

Kroz *Poglavlje 4*, predstavljeni su rezultati laboratorijskog ispitivanja radnih karakteristika ravnih EM senzora. Prvo su, upotrebom merne neodređenosti kao kvantitativnog pokazatelja valjanosti izmerene brzine, procenjene osnovne radne karakteristike kao što su tačnost i ponovljivost senzora. Zatim je proverena robusnost uređaja, ispitivanjem kapaciteta ravnih EM senzora za rad u uslovima sedimentacije kućišta poroznim sedimentom, kao i slučaju zadržavanja plastičnih kesa na kućištu. Za uslove sedimentacije, predložena je metodologija za povećanje tačnosti merenja brzine

na osnovu primene linearnog regresionog modela (Modela Korekcionih funkcija), kao i merenja dubine sedimenta.

Poglavlje 5 se bavi ispitivanjem radnog principa ravnih EM senzora. Predstavljani su rezultati mapiranja magnetnog polja ravnog EM senzora, koji su poslužili kao osnova za dalju analizu. Zatim, predložen je uprošćeni matematički model kao i eksperimentalna metodologija za određivanje tehničkih parametara ovakvog uprošćenog matematičkog modela. Posebno je analizirana mogućnost upotrebe rezultata mapiranja magnetnog polja za definisanje tehničkih parametara predloženog modela. Poglavlje se završava predlogom procedure za lokalnu kalibraciju EM senzora, kojom se može obezbediti pouzdana procena korekcionih funkcija K , neophodnih za određivanje srednje profilske brzine V na osnovu izmerene brzine V_{mer} .

U *Poglavlju 6*, predstavljani su rezultati terenskog ispitivanja ravnih EM senzora, kao i primene predložene procedure za lokalnu kalibraciju. Budući da su terenska ispitivanja obezbeđena kroz projekte saradnje Građevinskog fakulteta sa privredom, na početku poglavlja su opisane osnovne karakteristike sistema „Hidroelektrane na Trebišnjici“, kao i izvedenih mernih mesta, na kojima je primenjena predložena metodologija. Rezultati merenja na jednom od mernih mesta su iskorišćeni za verifikaciju postupka lokalne kalibracije. Takođe, analizirani su i dodatni, zanimljivi, aspekti primene predložene metodologije na ovom sistemu.

Konačno, u okviru *Poglavlja 7*, sumirani su ključni rezultati disertacije na osnovu kojih su formirani odgovarajući zaključci. Takođe, definisani su i pravci budućih istraživanja na polju primene ravnih EM senzora za merenje protoka u hidrotehničkim sistemima.

2 MERENJE PROTOKA U OTVORENIM TOKOVIMA

U okviru ovog poglavlja predstavljeni su osnovni elementi primene elektromagnetne (EM) tehnologije za merenje protoka i brzine u hidrotehničkoj struci. Klasifikovani su tipovi EM senzora dostupni na današnjem tržištu, od kojih su za ovu disertaciju najinteresantniji takozvani lokalni EM senzori, među koje spadaju i analizirani ravni EM senzori. Zatim, ukratko je predstavljena teorija EM senzora brzine i standardizovan postupak za njihovu kalibraciju. Konačno, analizirani su dosadašnji rezultati istraživanja na polju merenja protoka u složenim uslovima strujanja, pristupom Brzina – Proticajni Presek. Posebno su obrađeni problemi merenja protoka u kanalizacionim sistemima, u velikim provodnicima, kao i provodnicima sa složenom geometrijom.

2.1 ELEKTROMAGNETNI SENZORI BRZINE I PROTOKA

Pionirska istraživanja, na polju merenja brzine/protoka vode pomoću EM tehnologije, je u prvoj polovini 19. veka napravio Faradej lično. Nažalost, njegovi pokušaji na reci Temzi su bili neuspešni, prvenstveno zbog nesavršenosti, tada dostupne, opreme. Skoro čitav vek kasnije prvi patent (Smith and Slepian, 1915) je odobren za razvoj EM uređaja koji se koriste za merenje brzine kretanja brodova. Young i ostali (1920) su nastavili Faradejeva istraživanja na polju merenja protoka reke, međutim ni njihovi pokušaji nisu bili u potpunosti uspešni. Prvi bazni matematički opis koncepta rada EM senzora brzine/protoka je predstavljen od strane Williams-a (1930). Za merenje protoka tečnosti pod pritiskom, EM tehnologija je prvi put predložena (Kolin, 1936) u medicinske svrhe za merenje protoka u krvnim sudovima. Imajući u vidu specifičnosti EM tehnologije, odnosno Faradejevog zakona indukcije, ova metoda se tokom 20. veka standardizovala i u polju hidrotehnike.

2.1.1 TIPOVI EM SENZORA BRZINE I PROTOKA

Tokom intezivnog razvoja koji je trajao čitav vek, razvijena su različita rešenja odnosno tipovi EM senzora protoka i brzine koji se mogu koristiti kako u hidrotehničkim

sistemima pod pritiskom tako i u onim gde se javlja tečenje sa slobodnom površinom. U sistemima pod pritiskom, kao što su vodovodni sistemi, *cevni* ili konvencionalni EM senzori su postali standard za kontinualna merenja protoka, prvenstveno zahvaljući visokoj tačnosti i pristupačnoj ceni. Pored cevnih, u vodovodnim sistemima se za privremena merenja koriste i tzv. *lokalni* EM senzori za merenje brzine u relativno maloj kontrolnoj zapremini (zapremini toka koja doprinosi generisanju izlaznog signala). Sa druge strane, u otvorenim tokovima, EM tehnologija trenutno ne uživa sličnu popularnost. Pored lokalnih EM senzora, štapičastih ili papučastih, koji se mogu koristiti i pri tečenju pod pritiskom i sa slobodnom površinom, u drugoj polovini 20. veka su se koristili i tzv. *integralni* EM senzori. Koncept integralnih senzora, iako omogućava merenje protoka u rekama širine do 100 m, je napušten zbog prevelikih troškova instalacije, održavanja i eksploatacije. U nastavku su navedene glavne karakteristike navedenih tipova EM senzora protoka i brzine.

2.1.1.1 CEVNI EM SENZORI

Na bazi istraživanja Kolina (1936), 1939. godine je odobren patent (Alexander, 1939), za EM senzor protoka koji je koristio konstantno magnetno polje stalnog magneta (ili indukovano pomoću kalema). Više od deceniju kasnije, predložena je upotreba vazdušnih kalemova, na osnovu kojih je kompanija Foksboro (eng. Foxboro) dobila patent 1954 (Eugene, 1954; Watral i saradnici, 2015). Od tog trenutka, EM tehnologija za merenje protoka tečnosti u sistemima pod pritiskom je privukla veću pažnju naučne javnosti. Formulisanjem rigoroznijeg matematičkog modela za opisivanje principa rada ovih uređaja (Shercliff, 1954; Shercliff, 1962; Bevir, 1970) omogućena je detaljnija analiza i dalji razvoj. U drugoj polovini veka, ova merna metodologija se polako standardizovala u vodovodnim sistemima, nudeći korisnicima povoljan kompromis između cene, robusnosti i tačnosti.

Cevni EM senzori, se često nazivaju i konvencionalni EM senzori (Leeungculsatien & Lucas, 2013) odnosno punocevni EM senzori protoka (Slika 2.1). Karakteristično za ovaj tip EM senzora je da se u osnovi oni integralnog tipa (celokupan proticajni presek utiče na izmereni signal). Budući da se koriste u sistemima pod pritiskom, površina proticajnog preseka je nepromenljiva pa se samim tim na osnovu izmerenog signala, direktno

određuje protok tečnosti. Početkom 21. veka su razvijani i posebni cevni EM senzori koji omogućavaju merenje protoka mešavine dve ili više faza (npr voda-vazduh) (Cha i saradnici, 2002; Ahn i saradnici, 2003).



Slika 2.1 Endress – Hauser cevni EM senzor protoka na instalaciji u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

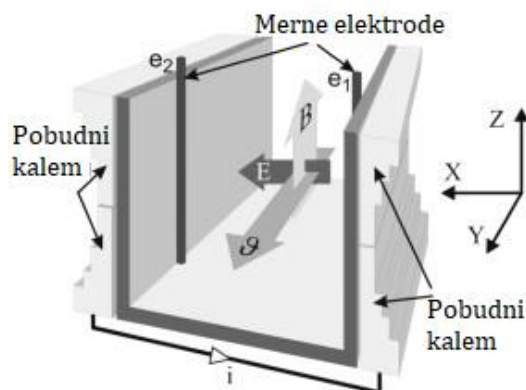
Glavna prednost cevnih EM uređaja je visoka tačnost i ponovljivost odnosno niska merna neodređenost (od 0.1% do 0.5%) izmerenog protoka. Specifičnost cevnih EM senzora je osetljivost na raspored brzina (Shercliff, 1962; Bevir, 1970). Imajući u vidu da na tačnost merenja utiče raspored brzina, cevni EM senzori protoka se postavljaju na pravim deonicama gde se može očekivati teorijski (logaritamski) raspored brzina, tipično na udaljenosti od minimum 5-20 prečnika cevi od uzvodnih i minimum 2-10 prečnika cevi od nizvodnih promena geometrije. Takođe, vremenom može doći do klizanja nule EM senzora ili promene kalibracionih parametara, najčešće zbog zaprljanosti elektroda ili promene karakteristika provodnika, zbog čega se zahteva redovna kalibracija uređaja prema ISO standardu (ISO9104, 1991).

2.1.1.2 INTEGRALNI EM SENZORI

Nakon neuspešnih pionirskih istraživanja, nije bilo značajnih rezultata na polju razvoja EM senzora protoka i brzine za otvorene tokove, sve do razvoja moderne elektronike u kasnim 50-tim i 60-tim godinama 20. tog veka. U tom periodu počinju istraživanja na

konceptu EM merenja protoka uz pomoć kalemova koji su se ugrađivali u samo korito kanala. Predloženi su EM uređaji sa tzv. „dugim“ elektrodama koje su se pružale od dna do vrha kanala na oba zida (Engel, 1967; Gils, 1970). Sa aspekta modernih EM senzora brzine/protoka, veoma značajne su bila istraživanja objavljena tokom 70-tih godina prošlog veka (Herschey and Newman, 1974; Herschey 1978). Predložena su prva rešenja za merenje protoka u rekama i to koristeći uprošćenu relaciju između jačine magnetnog polja, širine reke i srednje profilske brzine, sa standardnim izlaznim signalom u formi indukovanog napona. U kontekstu ravne EM sonde analizirane u okviru ove doktorske disertacije, najznačajniji je bio predlog da se kao izvor magnetnog polja koriste ravni kalemovi, postavljeni u dno reke. Rezultati navedenih istraživanja, motivisali su razvoj sistema sa velikim ravnim kalemovima, za merenje protoka. Tih godina, jedino su se u Ujedinjenom Kraljevstvu, proizvodili ovakvi sistemi (kompanija Plessey Radar Ltd.), koji su omogućavali merenje protoka u rekama širine do 100 m. Navodi se da je merna neodređenost bila 2% a rezolucija merenja 5 mm/s. U narednim decenijama, izvestan broj istraživača se bavio daljim razvojem EM uređaja ovog tipa. Tri varijante sistema su se pojavile, na osnovu rešenja razvijenog od strane Plessey Radar Ltd., koje se razlikuju po načinu na koji se generiše magnetno polje (Watrall i saradnici, 2015): 1.) pobudni kalem se nalazi iznad vode (Sarasota, 1992), 2.) pobudni kalem je integralni deo kanala (Michalski, 2000; Michalski i saradnici, 2002) (Slika 2.2) 3.) pobudni kalem je iznad ili ispod dna korita.

Iako EM sistemi za merenje brzine/protoka, sa velikim kalemovima, nude odlične mogućnosti oni nisu dostigli značajnu popularnost. Ovakvi EM senzori se klasifikuju kao potpuno integralna metoda za merenje protoka/brzina budući da ceo proticajni presek utiče na izlazni signal (Steinbock i saradnici, 2016). Merna neodređenost merenja protoka obično nije viša od 3% i omogućeno je merenje veoma širokog spektra protoka, uključujući i male protoke. Međutim, sa druge strane glavna mana ovih sistema a ujedno i razlog slabe popularnosti je visoka cena, kako ugradnje tako i eksploatacije. Naime potrošnja električne energije je izuzetno visoka i veoma se teško tehno-ekonomskom analizom može opravdati primena ovakvih EM uređaja. Imajući u vidu da se u modernom društvu teži globalnom smanjenju potrošnje energije odnosno povećanju energetske efikasnosti, mišljenje kandidata (autora) je da će se ovakvi i slični uređaji primenjivati sve manje u budućnosti.



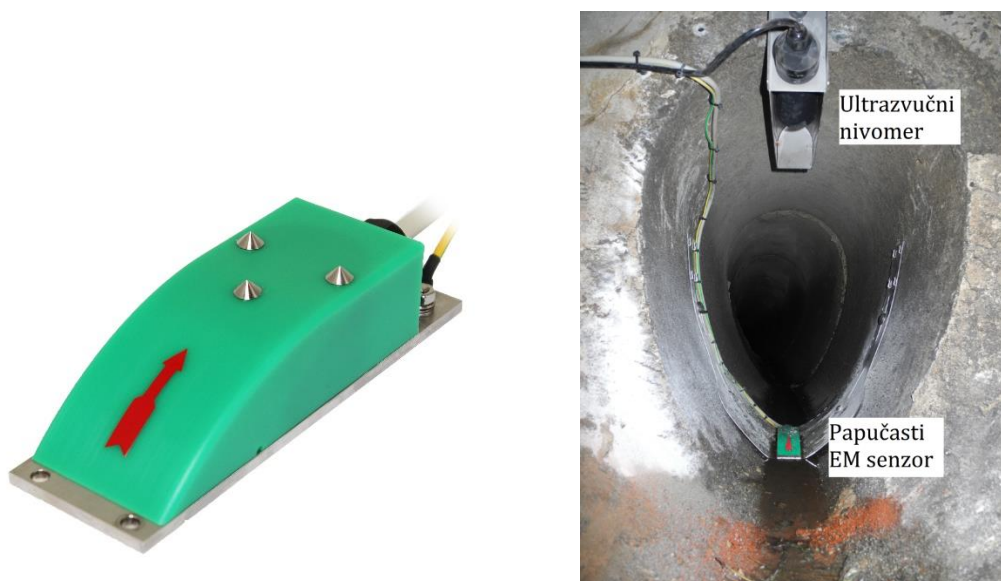
Slika 2.2 Shematizovana ilustracija rada integralnog EM senzora u pravougaonom kanalu (Watrál i saradnici, 2015)

2.1.1.3 LOKALNI EM SENZORI

Rukovodeći se potrebom za smanjenjem potrošnje električne energije, krajem dvadesetog veka, razvijana su različita rešenja EM uređaja malih dimenzija za merenje protoka i brzine u otvorenim tokovima. Zajedničko za sve tipove lokalnih EM senzora je da se pomoću njih može meriti brzina samo u okolini samih senzora, u relativno maloj kontrolnoj zapremini. Praktično, umesto celog proticajnog preseka, na izlazni signal utiče daleko manji deo toka, što implicira da se lokalni EM senzori mogu klasifikovati kao polu-integralni merni uređaji (Steinbock i saradnici, 2016). Posledično, tačnost merenja protoka je niža, odnosno merna neodređenost u proceni protoka je viša nego u slučaju potpuno integralnih EM uređaja. U opštem slučaju, lokalni EM senzori se mogu klasifikovati kao:

1. *Papučasti EM senzori* – Autonomni senzori, relativno malih dimenzija koji se fiksiraju na dno ili zid provodnika i mere lokalnu brzinu u okolini samog uređaja (Slika 2.3). Veličina merne ili kontrolne zapremine senzora je definisana karakteristikama pobudnog kalema, položajem i veličinom elektroda kao i jačinom pobudne struje. Ovaj tip uređaja je prvenstveno namenjen primeni u otvorenim tokovima, međutim može se koristiti i u tokovima pod pritiskom. Papučasti EM senzori predstavljaju kompromis između više međusobno oprečnih zahteva, potrošnje električne energije, gabarita uređaja, troškova ugradnje i tačnosti merenja protoka. Devedesetih godina 20. veka, u proizvodnji novih EM

senzora protoka/brzine u Sjedinjenim Američkim Državama, je prednjačila firmi Marsh – McBirney (sada Hach) sa modelom Flo - Tote. Od Evropskih proizvođača, do danas su verovatno najpopularniji EM senzori za otvorene tokove kompanije Flowtronic iz Belgije, EMV 500. U bivšoj Saveznoj Federativnoj Republici Jugoslaviji (SFRJ) slične EM uređaje je razvijao institut „Mihajlo Pupin“ iz Beograda. Dalji razvoj se nastavio u privatnoj kompaniji „Svet instrumenata“ (ravni EM senzori, analizirani u okviru ove doktorske disertacije, su njihov proizvod).



Slika 2.3 Levo) Papučasti EM senzor Flowtronic EMV-A; Desno) Instalacija Flowtronic EMV-a na dno kanalizacionog kolektora jajastog preseka (preuzeto sa www.flowtronic.com)

2. *EM senzori brzine u toku* – U ovu kategoriju lokalnih EM senzora se mogu svrstati svi lokalni EM senzori koji mere brzinu u konačno maloj zapremini koja se nalazi na određenoj udaljenosti od čvrste konture provodnika (npr. ubodni senzor). Ovaj tip senzora se najčešće primenjuje za potrebe mapiranja polja brzine u otvorenim tokovima i u tokovima pod pritiskom. Treba napomenuti da se ovaj tip senzora popularan u hidrotehničkoj praksi (Clemmens i Wahlin, 2006), prvenstveno zbog robusnosti i jednostavnosti primene. Postupak fabričke kalibracije se sprovodi pomoću vučenih kolica, prema standardu ISO 3455 (2007), o čemu će biti više reči u poglavlju 2.1.4, budući da se prema istom

postupku kalibrišu i ravni EM senzori, analizirani u ovoj disertaciji. Najčešće su štapičaste konstrukcije tako da operater ručno kontroliše položaj senzora tokom merenja (Slika 2.4 Levo). Takođe mogu biti i fiksirani za zidove provodnika ili za pozicionerski sistem. U ovaj tip rešenja se mogu podvesti i lokalni senzori posebne namene kao što je i uređaj kolokvijalno nazvan „Ajkulino krilo“ proizvođača „Sveta instrumentata“.



Slika 2.4 Levo) EM senzor brzine u toku Valeport 801 (preuzeto sa www.valeport.co.uk); Desno) Kontrola položaja ubodnih EM senzora unutar vodovodnog cevovoda (preuzeto sa www.pilotflow.com)

2.1.2 TEORIJA EM SENZORA

Polje teorije EM tehnologije za merenje brzine/protoka je najintezivnije istraživano u drugoj polovini 20. tog veka. Shodno ostvarenim dobrim rezultatima u praksi, većina istraživanja je pratila upotrebu i razvoj cevnih EM senzora protoka, projektovanih za sisteme pod pritiskom. Naravno i ostali tipovi EM senzora, integralni i lokalni su bili kako korišćeni u praksi i nauci, tako i izučavani, odnosno dalje razvijani. Iako postoje bitne razlike između navedenih tipova EM senzora, njihov princip rada je zajednički.

Princip rada EM senzora za merenje brzine, odnosno protoka tečnosti, se zasniva na Faradejevom zakonu indukcije (Faraday, 1832), prema kojem se izlazni signal senzora (indukovani napon između elektroda uređaja $U_m = U_m^1 - U_m^2$) generiše kretanjem provodne tečnosti kroz upravno magnetno polje (Shercliff, 1954; Shercliff, 1962). Interesatno je napomenuti da je tek vek kasnije od Faradejevih neuspelih eksperimenata,

u prvoj polovini i sredinom 20. veka (Williams, 1930; Kolin, 1936; Shercliff, 1954), definisan matematički model koji opisuje Faradejev zakon elektromagnetne indukcije za merenje brzine provodne tečnosti. Model podrazumeva stacionarnu, odnosno analizu fenomena elektromagnetizma u ustaljenim uslovima, zbog čega je neophodno usvojiti određene pretpostavke o električnim i magnetnim osobinama sredine (Michalski i saradnici, 2001):

- Magnetna permeabilnost provodne tečnosti $\mu = \mu_0$, je konstantna,
- Električna provodnost tečnosti σ_0 i čvrste granice provodnika σ_t (prirodnog ili veštačkog) je izotropna i ne zavisi od brzine tečnosti i magnetnog polja,
- Ne razmatra se fenomen Holovog efekta,
- Tečenje u okolini senzora se može aproksimirati kao rektilinearano (vektor brzine ima samo komponentu u pravcu toka).

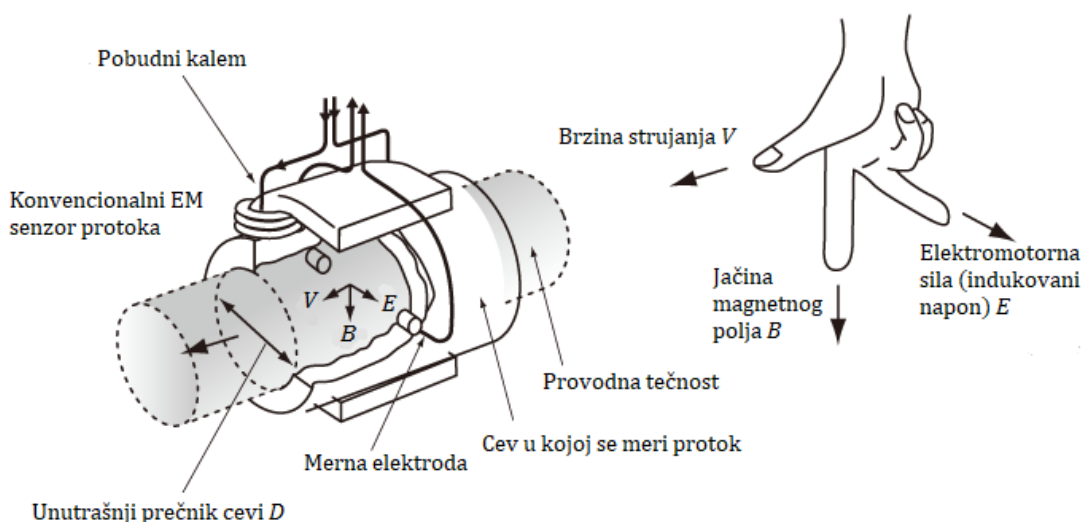
Navedene pretpostavke su usvojene isključivo da bi se uprostila matematička analiza i smatra se da ne utiču na praktičnu primenu EM merne tehnologije. Pod ovim pretpostavkama, i na bazi osnovnih Maksvelovih jednačina koje se koriste u analizi elektromagnetizma, predložena je osnovna relacija Poasonovog tipa za opisivanje teorije EM senzora (Kolin, 1936):

$$\nabla^2 U = \text{div}(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

gde je sa U označen indukovani električni potencijal, a član $\text{div}(\vec{V} \times \vec{B})$ je povezan sa rasporedom naelektrisanja (eng. charge distribution). Na osnovu relacije (2.1), osetljivost EM senzora u opštem slučaju je opisana vektorskim proizvodom brzine i magnetnog polja u određenoj tački u prostoru (Bevir, 1970). Zapravo, pod uticajem magnetnog polja \vec{B} i usled kretanja pozitivnog i negativnog naelektrisanja unutar provodne tečnosti koja se kreće brzinom \vec{V} , dolazi do formiranja električnog polja \vec{E} (Slika 2.5). Na Slici 2.5 se može primetiti da su vektori brzine, magnetnog polja i strujnog polja međusobno ortogonalni i prate pravilo desne ruke. Električno polje \vec{E} se u svakoj tački razmatranog domena može opisati kao gradijent indukovanog električnog potencijala:

$$\vec{E} = \nabla U \quad (2.2)$$

Domen koji se razmatra je najčešće kontrolna zapremina ili merna zapremina EM senzora (eng. Control Volume – CV), označena sa τ , odnosno zapremina toka koja doprinosi generisanju izlaznog napona na elektrodama U_m . Striktno govoreći, τ može biti beskonačno veliko, međutim u praksi samo određena konačna zapremina toka utiče na indukovanje izlaznog napona U_m .



Slika 2.5 Shematizovan princip rada cevnog EM senzora protoka

Kako bi se slikovito opisao analizirani princip rada, razmatra se jednostavan primer poprečnog preseka cevnog EM senzora na kružnom provodniku (cevi) ispunjenom provodnom tečnošću koja se kreće brzinom \vec{V} . Pobudni kalemovi EM senzora generišu magnetno polje \vec{B} usmereno od gornjeg zida provodnika ka donjem (Slika 2.5). Za najjednostavniji slučaj, uniformnog magnetnog polja i aksijalno simetričnog polja brzina indukovani napon između elektroda U_m se može opisati sledećom relacijom (Michalski i saradnici, 1998):

$$U_m = B \cdot D \cdot V = \frac{4B}{\pi \cdot D} Q \quad (2.3)$$

gde je $D = 2r$ prečnik cevi - ujedno i rastojanje između elektroda, V srednja profilna brzina a Q ukupan protok. Jednačina (2.3) važi samo u idealnim i teško ostvarljivim uslovima, stoga nema praktičnu primenu u analizi osetljivosti EM senzora. Međutim, omogućava jednostavnu interpretaciju veličine izlaznog napona U_m . Može se uočiti da je

izlazni napon direktno proporcionalan jačini magnetnog polja B i protoku Q odnosno srednjoj profilskoj brzini V (i odstojanju između elektroda).

Za potrebe matematičkog modeliranja osetljivosti konvencionalnih EM senzora na raspored brzina u kružnim cevima, predložena je ideja da se uticaj delova toka na generisanje izlaznog napona U_m , opiše preko težinske funkcije w (Shercliff, 1954). Naime, uzimajući u obzir činjenicu da je brzina na zidovima cevi, kao i gradijent potencijal $\partial U/\partial r$ jednak nuli, može se doći do relacije:

$$U_m^1 - U_m^2 = U_m = \int_{\tau} V(x, y, z) \cdot w \, d\tau \quad (2.4)$$

gde je \vec{V} je vektor polja brzina. Originalno, τ je tumačena kao kontrolna površina koja obuhvata poprečni presek cevi pod pritiskom na mestu gde se nalaze elektrode, odnosno sam EM senzor (Shercliff, 1954). Međutim, kasnije je Bevir (1970), sugerisao da je primerenije da se τ tumači kao kontrolna zapremina a da se prema potrebi može aproksimirati, u određenim slučajevima, kao površina ili čak duž. Treba napomenuti, da svaki EM senzor, pobudom kalemova indukuje magnetno polje prostornog karaktera a ne ravanskog i da oblik magnetnog polja zavisi od konstrukcije kalemova. U okviru istog istraživanja, Bevir predlaže rigorozniju definiciju modela indukovanja izlaznog napona U_m kroz težinski vektor \vec{W} :

$$U_m = - \int_{\tau} (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{j} \, d\tau = \int_{\tau} \vec{V} \cdot (\vec{B} \times \vec{j}) \, d\tau = \int_{\tau} \vec{V} \cdot \vec{W} \, d\tau \quad (2.5)$$

gde \vec{j} predstavlja vektor tzv. gustine virtualne struje (pridev virtualna se koristi da bi se razlikovala od struje koja postoji u samom uređaju). Vektor \vec{j} se opisuje kao gustina struje koja se javlja pri tečenju jedinične struje između elektroda uređaja, bez uticaja magnetnog polja. Ona ponderiše uticaj „elementarnih baterija“ $\vec{V} \times \vec{B}$ veličine $d\tau$, unutar kontrolne zapremine τ , na elektrodama uređaja (Wang i saradnici, 2007). Uvođenjem koncepta gustine virtualne struje, omogućeno je matematičko i numeričko modeliranje principa rada pojedinih tipova EM senzora brzine/protoka (Hemp i Wyatt, 1981). Neophodno je naglasiti ovde, da je predstavljeni matematički model izveden za cevne EM senzore kod kojih je problem definisanja veličine kontrolne zapremine jednostavniji. Naime u slučaju

cevnih EM senzora, kontrolna zapremina τ , definisana je zidovima cevi (provodnika) u pravcima upravno na tok, dok u pravcu toka se može aproksimirati na osnovu dometa magnetnog polja (Hemp & Versteeg, 1986). Sličan zaključak se može izvesti za integralne EM uređaje za merenje protoka u otvorenim tokovima, gde se magnetno polje indukuje po celoj visini bočnih, vertikalnih zidova provodnika (Michalski, 2000). Sa druge strane, kod lokalnih EM uređaja (kakva je i ravna EM sonda), to nije slučaj.

Generalno, na osnovu jednačine (2.5), može se zaključiti da je cilj proizvođača mernih uređaja, na bazi EM tehnologije, da prilagodi magnetno polje (odnosno kalemove koji indukuju magnetno polje) i elektrode, tako da izlazni signal ne zavisi od rasporeda brzina u toku. Uređaj u kojem je ovaj uslov ispunjen, smatra se „idealnim“, i matematički se može opisati sledećom relacijom:

$$\text{rot}(\vec{B} \times \vec{j}) = \text{rot}(\vec{W}) = 0 \quad (2.6)$$

U stvarnosti, gotovo je nemoguće projektovati i napraviti „idealni“ EM senzor, pa se praktični zadatak proizvođača svodi na to da senzor bude što manje osetljiv na raspored brzina. Preduslov za analize ove vrste je poznavanje rasporeda magnetnog polja \vec{B} i gustine virtualne struje \vec{j} , odnosno težinskog vektora \vec{W} ili težinske funkcije w , kao i veličine kontrolne zapremine τ . Dalje se ovi parametri mogu koristiti za interpretaciju nelinearne integracije strujnog polja, na osnovu koje se dobija izlazni signal u vidu napona E . U narednom poglavlju su analizirani najznačajniji naučni rezultati ostvareni na ovom polju, koji su uglavnom izvedeni za cevne EM senzore protoka. Međutim, imajući u vidu jedinstven princip rada i nedostatak odgovarajuće literature za lokalne EM senzore, ovi rezultati su od velike koristi u analizi ravnih EM sondi.

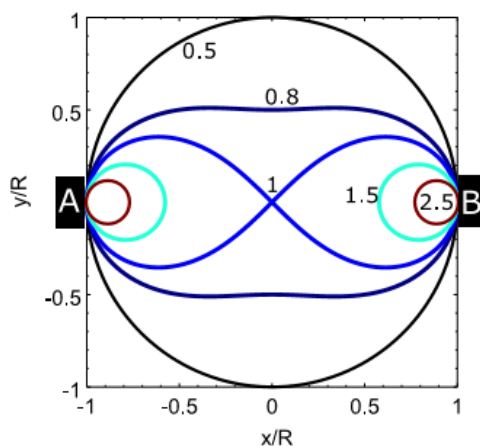
2.1.3 NELINEARNA INTEGRACIJA POLJA BRZINA U OKVIRU EM SENZORA

Princip nelinearne integracije polja brzina, prvenstveno kod cevnih EM senzora protoka, detaljnije se izučava od polovine 20.og veka. Prema prethodno definisanom matematičkom modelu koji opisuje rad EM senzora, može se videti da će, u okviru kontrolne zapremine τ , različiti delovi toka doprinostiti izlaznom signalu sa različitim

udelom odnosno ponderom. Tako, brzina kretanja fluidnih delića u blizini elektroda, gde je magnituda magnetnog polja veća, će doprineti izlaznom signalu više nego brzina fluidnih delića koji se nalaze na nekoj većoj udaljenosti. Za potrebe matematičkog modeliranja princip nelinearne ponderisane integracije i adekvatnog interpretiranja odziva EM senzora u različitim uslovima eksploatacije, koristi se težinska funkcija w ili ređe težinski vektor \vec{W} . Budući da w , ili \vec{W} , zajedno sa CV τ opisuju radni princip EM senzora, oni se ovde tumačeni kao tehnički parametri senzora.

Kao i što je ranije navedeno prvi predlog težinske funkcije za cevni EM senzor protoka sa homogenim i konstantnim magnetnim poljem i tačkastim elektrodama, dao je Shercliff (1954). Naime on je, razmatrajući jednačinu (2.1), pretpostavio da su na granicama kružnog provodnika brzina vode \vec{V} i gradijent potencijala $\partial U/\partial r$ jednaki nuli. Na osnovu ovih pretpostavki, došao je do relacije za w (2.4) u formi jednačine za krivu četvrtog reda – Kasinijeve ovale (Slika 2.6):

$$w(x, y) = \frac{R^4 + R^2(x^2 - y^2)}{R^4 + 2R^2(x^2 - y^2) + (x^2 - y^2)^2} \quad (2.7)$$



Slika 2.6 Težinska funkcija u formi Kasinijevih ovala za konvencionalni EM senzor protoka sa homogenim magnetnim poljem i tačkastim elektrodama (Shercliff, 1954; Steinbock i saradnici, 2016)

Pomoću Šerklifove težinske funkcije, može se tumačiti uticaj asimetričnog rasporeda brzina na izlazni signal cevni EM senzora protoka, koji barem približno ispunjavaju navedene pretpostavke.

Međutim, osnova za detaljnije analize nelinearne integracije unutar kontrolne zapremine EM senzora protoka, predstavlja model Bevira (1970). Naime, Bevir je u njegovom istraživanju, koje se smatra jednim od fundamentalnih u analizi EM senzora, predložio rigorozniju formu sa težinskim vektorom (2.5). On je težinski vektor, koji se za praktične potrebe retko uzima u razmatranje, iskoristio da opiše uslov idealnog EM senzora (2.6), čija je tačnost potpuno nezavisna od rasporeda brzina. Kako bi došao do analitičkog rešenja koje definiše karakteristike idealnog EM senzora protoka, Bevir je predložio tumačenje vektora \vec{B} i \vec{j} preko gradijenta skalarnog potencijala F i G :

$$\vec{B} = \nabla F \quad (2.8)$$

$$\vec{j} = -\nabla G \quad (2.9)$$

gde skalarni potencijali F i G zapravo predstavljaju rešenja Laplasovih jednačina:

$$\nabla \cdot \nabla F = \Delta F = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \nabla G = \Delta G = 0 \quad (2.11)$$

Korišćenjem navedene matematičke forme za opisivanje težinskog vektora, omogućeno je analitičko i numeričko tumačenje osetljivosti EM senzora na asimetričnost rasporeda brzina. Iako je Bevir (1970), na osnovu predloženog matematičkog modela došao do zaključka da konvencionalni EM senzori sa konstantnim magnetnim poljem i tačkastim elektrodama ne mogu biti idealni, on je postavio osnovu za dalja istraživanja težinskih funkcija i vektora, koje opisuju koncept nelinearne integracije, za različite oblike provodnika, magnetnog polja i elektroda.

Preduslov za analizu predstavlja poznavanje skalarnog magnetnog potencijala F , odnosno rasporeda magnetnog polja \vec{B} kao i potencijala koji opisuje gustinu virtualne struje G . Imajući u vidu fizičko značenje ovih parametara, kao i raspoloživu tehnologiju za merenje električnih veličina, ograničen je broj metoda koji se može koristiti za njihovo definisanje. Tako se do distribucije skalarnog magnetnog potencijala F ili magnetnog polja \vec{B} može doći na sledeće načine:

1. Analitičkim ili numeričkim rešavanjem Laplasove jednačine (2.10) sa definisanim graničnim uslovima.
2. Merenjem vektora magnetnog polja \vec{B} u dovoljno gustom rasteru da se pokrije kontrolna zapremina EM senzora.

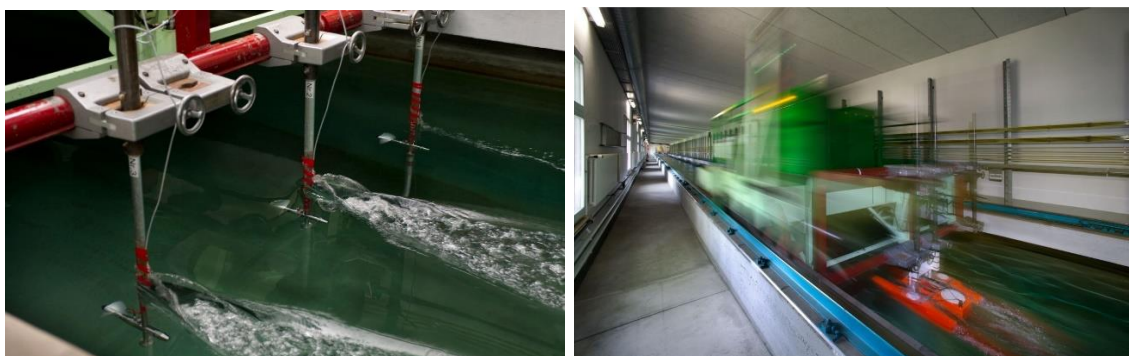
Sa druge strane, raspored skalarnog električnog potencijala G , i gustinu struje \vec{j} nije moguće meriti, s toga se za određivanje ovih veličina moraju koristiti analitička ili numerička rešenja druge Laplasove jednačine (2.11).

Većina istraživanja koja su se bavila određivanjem težinskih funkcija ili vektora, na bazi matematičkog modela definisanim jednačinama (2.8 – 2.11), su se bavila ispitivanjima najpopularnijih, cevnih EM senzora protoka. Analitički pristup u rešavanju Laplasovih jednačina je korišćen za slučajeve cevnih EM senzora sa tačkastim i dugim elektrodama (Shercliff, 1962; Bevir, 1971; Luntta and Halttunen, 1989). Koristeći osnove istog matematičkog modela, Grinovu teoremu i konformnu (ravnougaonu) projekciju, izvedene su i težinske funkcije za pravougaoni EM senzor sa konstantnim magnetnim poljem i tačkastim elektrodama (Smyth, 1971). U pojedinim istraživanjima korišćeni su rezultati merenja magnetnog polja (Bever i saradnici, 1981; Al Rabeth i Baker, 1986), gde je pokazano da je moguće sprovesti takozvanu „suvu“ kalibraciju cevnog EM senzora sa greškom od svega par procenata. Ovim postupkom se u praksi, obično za velike cevne EM senzore ($D > 600$ mm), opisuje osetljivost izlaznog signala – merenjem samo magnetnog polja i prečnika senzora (Baker, 2005). Dodatna unapređenja postupka „suve kalibracije“ su ostvarena primenom multifizičkih numeričkih simulacija (Ahn i saradnici, 2003; Zhang & Li, 2004; Wang i saradnici, 2007; Li i saradnici, 2007; Fu i saradnici, 2010) koje poseduju potencijal da u određenim situacijama zamene i merenja magnetnog polja. Multifizičke numeričke simulacije su takođe korišćene za izučavanje posebnog tipa cevnih EM senzora protoka koji omogućava merenje protoka (Cha i saradnici, 2002) dvofaznih tokova ili čak profila brzina u dvofaznim tokovima (Leeungcalsatien & Lucas, 2013). Sa druge strane odgovarajuća istraživanja vezana za principe rada lokalnih EM senzora, nedostaju u literaturi.

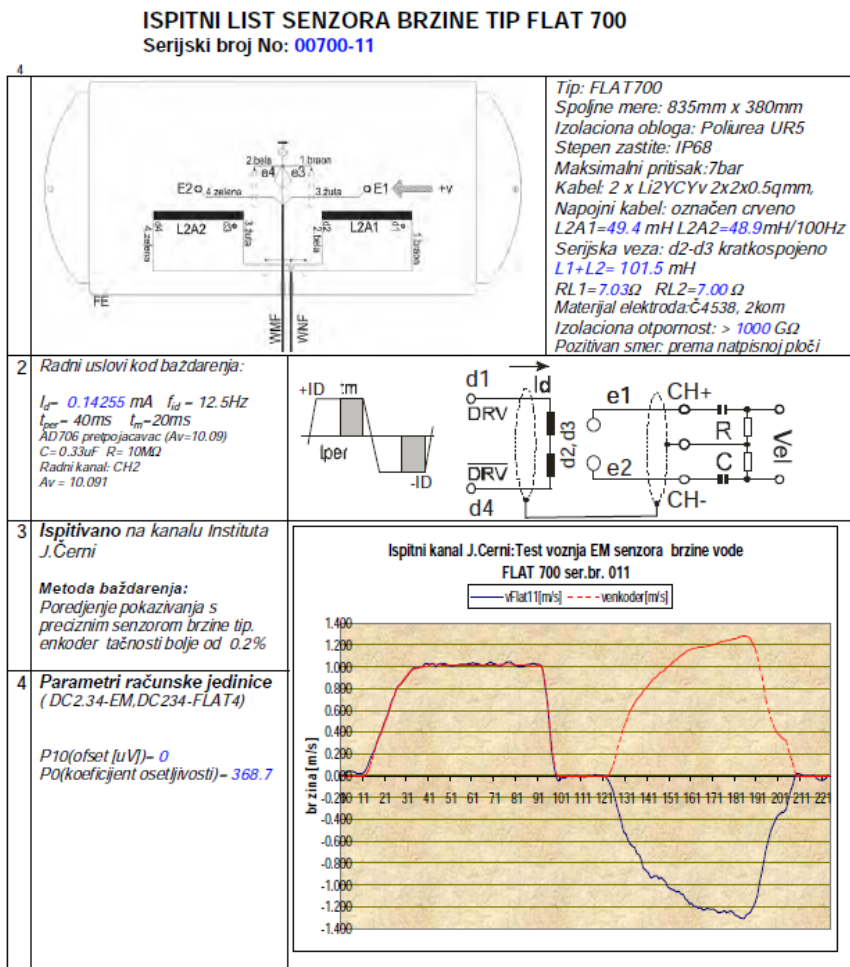
2.1.4 STANDARDIZOVANI POSTUPAK KALIBRACIJE LOKALNIH SENZORA BRZINE

Lokalni senzori brzine se standardno koriste u hidrotehnici za merenja brzine u relativno malim zapreminama toka, koje se u pojedinim slučajevima mogu aproksimirati i tačkama. Najpoznatiji tip senzora za lokalno merenje brzina u hidrotehnici, svakako je hidrometrijsko krilo (Camnasio i Orsi, 2011). Hidrometrijska krila mogu biti različitih dimenzija, gde prečnik propelera varira od nekoliko mm (Mikro-krila) do nekoliko desetina cm. Brzina u tački ili zapremini, definisanoj dimenzijama propelera, je proporcionalna broju okretaja propelera u određenom vremenskom periodu (Soupir i saradnici, 2009; Chauhan i saradnici, 2014). Pored hidrometrijskih krila, na tržištu su zastupljeni štapičasti Dopler uređaji (Voulgaris and Trowbridge, 1998) kao i EM senzori brzine u toku.

Imajući u vidu zastupljenost ovakvih uređaja u hidrotehnici, koji se po principu rada međusobno značajno razlikuju, vremenom se javila potreba za standardizacijom fabričkog postupka kalibracije. Tako je definisan standard ISO 3455 (ISO, 2007), čime je omogućena adekvatnija kontrola kvaliteta mernih instrumenata ovog tipa. Takođe, obezbeđen je okvir za nepristrasno poređenje radnih karakteristika različitih tipova i modela lokalnih senzora brzine.



Slika 2.7 Kalibracija hidrometrijskog krila (Levo) i ADCP uređaja (Desno) u kalibracionom kanalu Federalnog Instituta za Metrologiju u Švajcarskoj (Schott i Wutrich, 2012) (preuzeto sa www.metas.ch)



Slika 2.8 Kalibracioni list ravnog EM senzora brzine tip FLAT 700, proizvođača „Svet instrumenta“

ISO 3455 standard definiše proceduru za fabričku kalibraciju u pravom prizmatičnom kanalu, ili bazenu, sa mirnom vodom. Iznad kanala je potrebno postaviti konstrukciju sa vučenim kolicima, koja omogućava kontrolisano, rektilinearano kretanje vučenih kolica duž kanala. Instrument koji se kalibriše se postavlja na vučena kolica tako da merna ili kontrolna zapremina instrumenta bude porinuta u potpunosti. Vučenjem kolica duž kanala pri različitim brzinama, beleženjem izlaznog signala senzora, kao i brzine kretanja pomoću visoko tačnih enkodera, definiše se kalibraciona kriva instrumenta. Dužina kanala, odnosno bazena, diktira maksimalnu brzinu na koju je moguće kalibrisati određeni instrument. Kalibracijom prema ISO 3455 standardu se zapravo simuliraju uslovi homogenog polja brzina, unutar kontrolne zapremine, budući da se sonda zapravo kreće kroz vodu koja miruje. Na Slici 2.7 je prikazan postupak kalibracije

hidrometrijskog krila (Levo) kao i ADCP uređaja (Desno), na kalibracionom bazenu dužine 140 m, Federalnog Instituta za Metrologiju u Švajcarskoj.

Proizvođač „Svet instrumenata“ takođe kalibriše sopstvene ravne EM senzore kao i EM senzore brzine u toku (štapičaste i „Ajkulina krila“), prema standardu ISO 3455, u okviru hidrauličke laboratorije Instituta za Vodoprivredu „Jaroslav Černi“. Primer izdatog kalibracionog lista za ravne EM senzore tip FLAT 700 je prikazan na Slici 2.8.

2.2 MERENJE PROTOKA TEČNOSTI U SLOŽENIM USLOVIMA

STRUJANJA

U analizama rada sistema odnosno uređaja za merenje protoka, često se tačnost, ponovljivost i ostale relevantne radne karakteristike ovih instrumenata predstavljaju i posmatraju u kontekstu rada u idealnim uslovima. Sa druge strane, primena u realnim terenskim uslovima neretko podrazumeva rad u uslovima koji su daleko od idealnih, koji se u opštem slučaju mogu klasifikovati kao tzv. *složeni uslovi tečenja*. Složeni uslovi tečenja se javljaju npr u kanalizacionim sistemima, gde su tokovi opterećeni prisustvom sedimenata i suspendovanih čestica, a sami uslovi sredine su nepovoljni po mernu opremu zbog prisustva agresivnih, zapaljivih i korozivnih gasova, itd. Takođe otvoreni tokovi gde je sam provodnik velikih dimenzija ili se javljaju rasporedi brzina koji ne odgovaraju teorijskim, ili čak dolazi do pojave kombinovanih uslova tečenja (sa slobodnom površinom i pod pritiskom), se mogu tretirati kao fenomeni sa složenim uslovima tečenja. Kontinualno merenje protoka u ovim slučajevima predstavlja veliki izazov kako praksi tako i istraživačima. Dosadašnja rešenja su u velikoj meri posebno „krojena“ za svaki pojedinačan slučaj i generalno su nedovoljno ispitana i analizirana u literaturi.

U okviru ovog poglavlja razmatrana je najpopularnija metoda za merenje protoka u navedenim slučajevima, tzv. metoda Brzina – Proticajani Presek (Le Coz i saradnici, 2012; Cohn i saradnici, 2013). Primena ravnih EM senzora, analiziranih u ovoj disertaciji, podrazumeva primenu metode Brzina – Proticajni Presek, gde se odvojenim sistemima meri srednja profilska brzina i površina proticajnog preseka na osnovu koga se dolazi do podatka o protoku. U nastavku su takođe prikazane i specifičnosti merenja protoka u navedenim složenim uslovima tečenja kao i pojedini dosadašnji rezultati istraživanja. EM

senzori analizirani u okviru ove disertacije, poseduju potencijal da obezbede merenja protoka sa visokom pouzdanošću čak i u ovakvim uslovima. Kroz tekst disertacije će biti dokazane prednosti radnih karakteristika EM senzora u odnosu na konkurentne, uz predlog metodologije za obezbeđivanje merenja protoka u složenim uslovima tečenja sa visokom tačnošću odnosno niskom mernom neodređenošću.

2.2.1 METODA BRZINA – PROTICAJNI PRESEK

Metoda Brzina – Proticajni presek ($V - A$) je najčešće korišćen pristup za kontinualno merenje protoka u kombinovanim, kišnim i fekalnim kanalizacionim (Larrarte i saradnici, 2008; Bonakdari & Zinatizadeh, 2011) sistemima. U ostalim hidrotehničkim sistemima, gde se javlja tečenje sa slobodnom površinom, $V - A$ metoda se standardno koristi u okviru privremenih mernih mesta kao i za kontinualna merenja u slučaju kada nije moguće izvesti merno suženje ili preliv (Clemmens i Wahlin, 2006). Ovaj pristup se koristi i u sistemima pod pritiskom, pogotovo u slučaju provodnika (cevi) većeg prečnika.

U okviru $V - A$ metode primenjene u uslovima tečenja sa slobodnom površinom, merenje protoka se zapravo odvija posredno, pomoću dva tipa senzora postavljenih u okviru mernog mesta: 1.) senzor pritiska ili nivoa koji se koristi za merenje dubine h , 2.) senzor brzine (ili više senzora brzine u jednom preseku) koji meri brzinu V_{mer} . Na osnovu podatka o dubini h , korišćenjem prethodno definisane relacije $A(h)$ dolazi se do veličine proticajnog preseka A , izuzev u slučaju primene georadara gde se površina proticajnog preseka određuje direktno. Ukoliko je, na mernoj lokaciji, geometrija odnosno poprečni presek provodnika stabilan i poznat, određivanje površine proticajnog preseka ne predstavlja problem. Specifičnosti određivanja površine proticajnog preseka su dodatno analizirane u okviru poglavlja 2.2.1.1.

Nasuprot tome, određivanje srednje profilske brzine V je osetljiv i daleko teži zadatak. U zavisnosti od fizičkih karakteristika provodnika i samog fluida, mogući su različiti pristupi za određivanje srednje profilske brzine. Najčešće se na osnovu merenja jedne (ili više) brzine V_{mer} , pomoću jednog ili više senzora brzine, koristeći odgovarajuće ekstrapolacione ili korekcionne funkcije K dolazi do podatka o srednjoj profilskoj brzini V . U slučaju kanalizacionih sistema, gde je geometrija provodnika stabilna, senzori

nivoa/pritiska i brzine su fiksirani, i kontinualnim radom se obezbeđuje kontinualno merenje protoka (ako nema sedimentacije). Sa druge strane u prirodnim vodotocima, gde proticajni presek može biti daleko veći i promenljiv, neophodno je sistematski mapirati polje brzine uz pomoć nekog lokalnog senzora brzine (hidrometrijskog krila, akustičnog Dopler ili elektromagnetnog senzora brzine). Sam proces mapiranja, u zavisnosti od dimenzija poprečnog preseka i gustine rastera po kojem se mapiranje odvija, može trajati i do nekoliko sati. U ovom slučaju, metoda $V - A$ se ne koristi za kontinualno već diskretno merenje protoka. Problem određivanja srednje profilske brzine V je posebno analiziran u poglavlju 2.2.1.2.

2.2.1.1 ODRAĐIVANJE POVRŠINE PROTICAJNOG PRESEKA

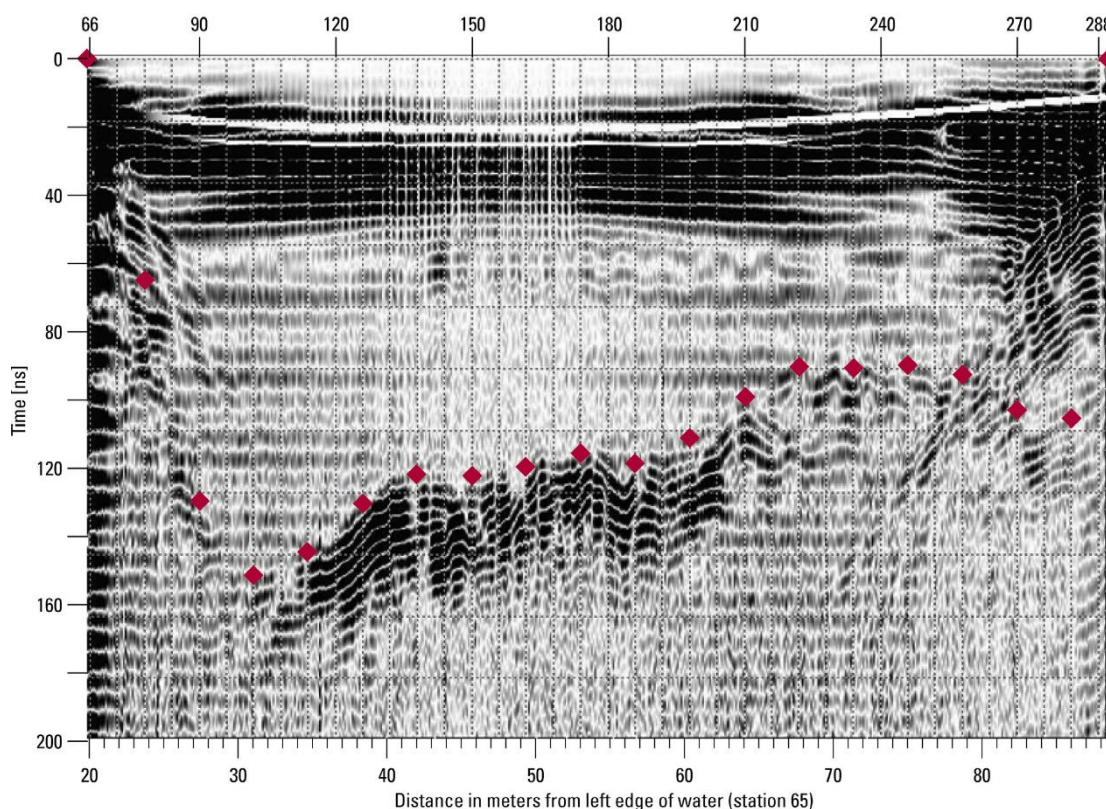
Da bi se procena veličina proticajnog preseka, na osnovu izmerene dubine ili pritiska, sprovela sa niskom mernom neodređenošću, neophodno je poznavati geometrijske karakteristike provodnika.



Slika 2.9 Ultrazvučni nivomer na izlaznom profilu „Čepelica“ derivacionog tunela
Fatničko Polje – Bilećka Akumulacija

Kod veštački napravljenih provodnika, kao što su kanalizacioni kolektori ili kanali, geometrija provodnika je stabilna. Geodetskim ili standardnim merenjima geometrije,

omogućava se definisanje stabilne relacije $A(h)$ koja se može koristiti da se na osnovu podatka o dubini dobije površina proticajnog preseka. Uobičajeno se u ovim slučajevima koriste ultrazvučni nivomeri ili pijezezistivni senzori pritiska. Ultrazvučni senzori nivoa (Slika 2.9) mere dubinu na osnovu procene udaljenosti od senzora do površine vode (kroz vazduh ili kroz vodu) – deljenjem vremena potrebnog da se visokofrekventni zvučni talas odbije od površine do senzora sa brzinom prostiranja talasa (Angrisani i saradnici, 2009). Uobičajene neodređenosti izmerene dubine pomoću ultrazvučnih senzora ne prelaze 1% za opsege dubina do nekoliko metara (Aguilar i saradnici, 2016). Pijezezistivni senzori se mogu koristiti kao zasebni instrumenti, ili alternativno da se ugrade u sam senzor brzine (Akustični Dopler ili papučasti EM) kako bi se dobio jedinstven uređaj za merenje protoka. Takođe, postoje rešenja gde su i pijezezistivni sensor pritiska i ultrazvučni senzor nivoa, integrisani u senzor brzine. Neodređenosti procene dubine na osnovu izmerenog pritiska su obično manje od 0.5% za dubine do desetak metara (Aguilar i saradnici, 2016).



Slika 2.10 Rezultat merenja površine proticajnog preseka pomoću georadara na reci San Hoakin, Kalifornija. Crvenim tačkama je obeleženo interpretirano dno korita reke.

(preuzeto iz Costa i saradnici, 2006)

Kod prirodnih vodotokova, geometrija najčešće nije stabilna. Samim tim nije moguće uspostavljati konstantne $A(h)$ veze. U ovom slučaju tehno-ekonomskom analizom je neophodno definisati učestalost premeravanja geometrije poprečnog preseka, najčešće pomoću ultrazvučnih uređaja. Alternativa u prirodnim vodotocima sa nestabilnom geometrijom može biti i bezkontaktni georadar (eng. Ground Penetrating Radar - GPR) koji se može iskoristiti za direktnu procenu površine proticajnog preseka (Costa i saradnici, 2006). U vodi sa dovoljno niskom elektroprovodnošću, merenja površina proticajnog preseka pomoću georadara (Slika 2.10) su u poređenju sa klasičnim ultrazvučnim metodama, odstupala sa svega nekoliko procenata (Costa i saradnici, 2000; Costa i saradnici, 2006).

2.2.1.2 ODRAĐIVANJE SREDNJE PROFILSKE BRZINE

Određivanje srednje profilske brzine V , pri merenju protoka $V - A$ metodom u otvorenim tokovima, je osetljiv i komplikovan zadatak, koji zahteva ekspertsko znanje projektanta mernog sistema kako iz oblasti hidraulike tako i iz fizičkih principa mernih tehnika. Poznavanje hidraulike, odnosno zakonitosti koje opisuju dinamiku fluida/vode, je neophodno kako bi se adekvatno sagledali uslovi tečenja na mernom mestu. Na osnovu ove analize moguće je uspostaviti održivu ekstrapolaciju kojom bi se od izmerene brzine V_{mer} (ili više izmerenih brzina) došlo do srednje profilske brzine V . Poznavanje radnih principa merne tehnike, trebalo bi da obezbedi pravilno tumačenje izmerene brzine V_{mer} , u cilju uspostavljanja navedene relacije sa srednjom profilskom brzinom.

U okviru ove disertacije analizirani su slučajevi u kojima je geometrija provodnika stabilna, gde se za procenu srednje profilske brzine V koriste senzori fiksirani na zidove provodnika. U ovim slučajevima, na globalnom nivou, najčešće se koriste varijante akustičnih Dopler senzora (Larrarte i saradnici, 2008), a dosta ređe elektromagnetni ili ostali senzori. Proizvođači mernih instrumenata za merenje brzine u većini slučajeva, navode da njihovi uređaji mere srednju brzinu bez obzira na specifičnosti mernog mesta i graničnih uslova koji definišu hidrauličke parametre tečenja na mernom mestu (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011). Jednostavnom parametarskom analizom osetljivosti, može se zaključiti da to nije slučaj. Istraživanja koja su se bavila analizom rada akustičnih Dopler senzora su takođe ukazala na nedvosmislen zaključak, da izmerena lokalna brzina

V_{mer} (srednja ili maksimalna brzina unutar konusne kontrolne zapremine (CV), $V_{mer,kon}$ ili $V_{mer,max,kon}$) odstupa od srednje profilske brzine V (Hughes i saradnici, 1996; Larrarte i saradnici, 2004). Treba imati na umu da navedeno odstupanje odnosno neodređenost ovako izmerene srednje profilske brzine, bilo kojom mernom tehnikom, ima dve komponente:

1. *Neodređenost izmerene brzine V_{mer}* – potiče od same merne metode i povezana je sa uređajem/pristupom koji se koristi za merenje brzine. U okviru projektovanja mernog mesta analizira se i izbor opreme i merne metode, kojom se može postići optimalni kompromis između tražene tačnosti i cene. Različiti pristupi odnosno metode su na raspolaganju korisniku/projektantu, od kojih je svaka okarakterisana određenim prednostima i manama (Baker, 2005; Dobriyal i saradnici, 2017; Abetle i saradnici, 2017; Muste i saradnici, 2017).
2. *Neodređenost ekstrapolacije između izmerene brzine V_{mer} i srednje profilske brzine V* – potiče od specifičnosti merne lokacije koje definišu hidrauličke i fizičke uslove na mernom mestu. Veza $V_{mer} - V$ se definiše preko ekstrapolacionih ili korekcionih, K - faktora odnosno korekcionih K - funkcija. Ovaj tip funkcija je detaljnije opisan u poglavlju 2.2.1.3.

Za pravilno tumačenje 1. komponente, a zatim i minimiziranje neodređenosti 2., potrebno je sprovesti posebnu ekspertsku analizu za svako merno mesto.

2.2.1.3 KOREKSIONI KOEFICIJENTI I FUNKCIJE

Primenom nekog od mernih instrumenata (npr papučasti ADV) dobija se podatak o određenoj brzini toka V_{mer} , koja u većini slučajeva nije jednaka željenoj srednjoj profilskoj brzini V . Da bi se što tačnije izmerio protok, neophodno je definisati ekstrapolaciju ili korekciju K između izmerene brzine V_{mer} , i srednje profilske brzine V :

$$V = K \cdot V_{mer} \quad (2.12)$$

U interesu projektanta mernog mesta je da korekciona funkcija K bude što jednostavnijeg oblika, ili konstantna ($K = const$). U slučaju merenja površinske brzine u prirodnim

vodotocima K se uglavnom usvaja kao konstantna vrednost. Ukoliko je razumno pretpostaviti da se u vodotoku, formirao logaritamski raspored brzina, teoretski odnos srednje profilske brzine i površinske brzine, odnosno vrednost K je 0.85 (Rantz, 1982) za širok opseg odnosa dubina i hrapavosti obloge. Slična vrednost se može usvojiti i u kanalima gde je odnos srednje širine vodenog ogledala B i dubine h , tzv. Ar (eng. Aspect ratio) veći od 6. Međutim za manje vrednosti Ar , tipične za kolektore i kanale, usled uticaja sekundarnog strujanja (Bonakdari i saradnici, 2008), maksimalna brzina se spušta sa površine toka, dublje ka jezgru toka. Tako se za vrednost $Ar = 1$, maksimalna brzina može očekivati negde na polovini dubine toka.

U kontekstu analize ravnih EM senzora predstavljene u ovoj disertaciji, za dobijanje srednje profilske brzine koristi se K funkcija, koju je potrebno definisati za svako posebno merno mesto. Svaki senzor, procesira signal izmeren na osnovu nelinearne integracije brzina u određenoj kontrolnoj zapremini (eng. Control Volume) senzora τ . U slučaju kanalizacionih sistema na primer, u praksi se senzor za merenje brzine, fiksiran za zid ili dno provodnika, kalibriše pomoću kontrolnih merenja brzine u više tačaka. Za kontrolna merenja brzine koriste se ručna hidrometrijska krila ili štapičasti EM senzori brzine u toku (Bonakdari & Zinatizadeh, 2011). Same vrednosti korekcionne funkcije K se dobijaju kao odnos brzine dobijene interpolacijom kontrolnih merenja V_{kont} i brzine izmerene pomoću analiziranog senzora brzine V_{mer} . Prvi problem ovog pristupa kalibraciji, je u tome što pozicioniranje ručno držanih senzora brzine ometaju uslovi na terenu, zbog čega samu interpolacijom dobijenu srednju profilsku brzinu treba uzeti sa rezervom. Drugi problem se ogleda u činjenici da se kontrolno merenje protoka, sa ručno držanim sensorima, najčešće može obaviti isključivo u periodu malih voda. Postavlja se pitanje da li K dobijeno za male protoke i dubine, može da se koristi i u kišnim periodima, odnosno periodu velikih voda – ili će se na ovaj način uvesti značajna sistematska neodređenost merenog podatka? Definisanje adekvatnog odgovora na ovo pitanje je složeno zbog uticaja brojnih faktora. Dosadašnja ispitivanja su pokazala da vrednost K funkcije zavisi od nekoliko parametara, kao što su:

1. *Geometrija provodnika* – Strujno polje u samom provodniku, samim tim i unutar CV senzora, je definisano geometrijskim karakteristikama provodnika kao i samom hrapavošću zidova. (Hughes i saradnici, 1996; Koelling, 1996)

2. *Pozicije senzora brzine u okviru mernog mesta* – Poziciju CV unutar ispitivanog toka, definiše sama pozicija senzora. (Nivus, 1999; Larrarte i saradnici, 2004; Klepiszewski i saradnici, 2017)
3. *Vrste senzora* (Bonakdari, 2006) – Svaki model senzora ima svojstvene karakteristike u pogledu fizičkog principa rada a samim tim veličine, oblika i relativnog položaja CV.
4. *Hidrauličkih uslova* (Koelling, 1996; Larrarte i saradnici, 2004) – Pored samog strujnog polja koje se ispituje i meri sensorima brzine, bitno je spomenuti i uticaj dubine koja opisuje veličinu proticajne površine. Dubina na ovaj način direktno utiče na veličinu CV a samim tim i na vrednost K koeficijenta. Takođe, u kanalizacionim sistemima česta je pojava histerezisa u vezi između dubine h i srednje profilske brzine V .
5. *Karakteristika fluida* (Michalski, 2000) – Elektroprovodnost vode može da utiče na izlazni signal EM senzora a samim tim i na vrednost K koeficijenta. Takođe je pokazano da jačina signala na Akustičnim Dopler sensorima zavisi od rasporeda koncentracije suspendovanih čestica u vodi (Nord i saradnici, 2014)

Iz navedenog se može zaključiti da se poznavanjem principa rada određenog senzora, samim tim položajem i veličinom kontrolne zapremine, kao i strujnog polja unutar nje, može definisati oblik K funkcije. Samim tim, važno je odrediti CV ravnih EM senzora kao i ostale relevantne tehničke parametre koji opisuju radni princip ovih senzora. Za definisanje strujnog polja moguće, je pored analitičkih i empirijskih obrazaca koristiti i neke numeričke alate. Razvoj računarskog hardvera, doveo je do popularizacije upotrebe Numeričkih simulacija turbulentnog tečenja (eng. Computational Fluid Dynamics CFD) za modeliranje strujnog polja brzine. Adekvatno sprovedenim numeričkim eksperimentima, moguće je uz relativno mali utrošak resursa obezbediti dodatne hidrauličke parametre koji opisuju tečenje na samoj mernoj lokaciji. Upravo je korišćenjem ovog pristupa Koelling (1996) došao do zaključka da postoji jasna zavisnost između K i dubine na mernom mestu, u kanalizacionim sistemima. Slično, uticaj rasporeda brzina na K funkciju je analiziran za potrebe kalibracije ultrazvučnih senzora brzine u različitim uslovima eksploatacije u kanalizaciji (Hrabak i saradnici, 1998; Pollert and Bares, 2002; Larrarte i saradnici, 2004; Bonakdari & Zinatizadeh, 2011). Pokazano je da upotrebom CFD numeričkih simulacija kao dodatnog izvora informacija, uz

ekspertska poznavanje hidrauličkih uslova na mernom mestu, moguće unaprediti tačnost merenja srednje profilske brzine odnosno protoka pomoću akustičnih Dopler senzora (Bonakdari, 2006).

S obzirom na osetljivost vrednosti K funkcije na prikazane faktore, jasno je da svakom pojedinom slučaju, potrebno pristupiti sa posebnom pažnjom kako bi se kombinacijom raznih izvora informacija i znanja, došlo do unapređenja tačnosti merenja protoka. Verovatno usled činjenice da su papučasti EM senzori slabije zastupljeni u praksi, odgovarajuće analize koje omogućavaju tumačenje, prvo izmerene brzine V_{mer} a zatim i definisanje K funkcija ne postoje u literaturi.

2.2.2 MERENJE PROTOKA U KANALIZACIONIM SISTEMIMA

U kanalizacionim sistemima se standardno javlja tečenje sa slobodnom površinom, iako u pojedinim slučajevima (npr intezivnog oticaja u kišnu ili kombinovanu kanalizaciju), može doći do prekoračenja kapaciteta provodnika što dovodi do pojave izlivanja, odnosno tečenja pod pritiskom. U kombinovanim kanalizacionim sistemima se javljaju velike razlike između protoka u suvom i kišnom periodu, čak i do 1:1000 (Harremoës i saradnici, 1993). Merenje protoka u kanalizacionim sistemima i generalno tokovima sa slobodnom površinom se najčešće sprovodi metodom $V - A$. Za određivanje srednje profilske brzine V , u kanalizacionim sistemima, inženjeri se uglavnom odlučuju za primenu papučastih ADV uređaja (Larrarte i saradnici, 2008). Međutim, dosadašnja iskustva su ukazala na probleme sa visokom mernom neodređenošću, pogotovo u uslovima sedimentacije, kao i niskih dubina i malih brzina (Maheepala i saradnici, 2001; McIntyre i Marshall, 2008; Aguilar i saradnici, 2016). Treba napomenuti da prihvatljiva neodređenost u merenju protoka u kanalizacionim sistemima nešto viša nego u sistemima pod pritiskom i iznosi od 5 – 10% (Campisano i saradnici, 2013).

Pojava sedimentacije u otvorenim tokovima je česta u praksi. U slučaju prirodnih vodotoka ili kanala, sediment potiče od suspendovanog ili vučenog nanosa koji dospeva u vodotok (npr erozijom lokalnog terena). U kanalizacionim sistemima je izraženo prisustvo sedimenta. Evropski standard NF EN 14654-1 (AFNOR, 2014) apostrofira negativan uticaj sedimenta na upravljanje kanalizacionim sistemima kao i potrebu za

redovnim aktivnostima na održavanju merne opreme u kanalizaciji kao i uklanjanju sedimenta iz samog sistema. Da bi se ponovo omogućio rad senzora, neophodno je čišćenje uređaja i otklanjanje sedimenta, međutim problem izgubljenih podataka ostaje nerešen. U zavisnosti od tipa samog kanalizacionog sistema zavisi i sastav i forma sedimenta. Tako se u atmosferskim (kišnim) kanalizacionim sistemima javljaju prvenstveno rastresiti i neorganski sedimenti (izuzev slučaja cementiranja dugotrajnog taloga sedimenta), dok u fekalnim sistemima sedimenti imaju kohezivne sposobnosti usled organske prirode čestica (npr masti i biološki otpad). Interesantno je napomenuti da je u fekalnim kanalizacionim sistemima, zapreminski udeo čvrstih materija oko 2% (Larrarte i Chanson, 2008). U kombinovanim kanalizacionim sistemima javlja se kombinacija navedena dva tipa sedimenta (Butler i saradnici, 2003). Karakteristično za atmosfersku i kombinovanu kanalizaciju je i prisustvo krupnog materijala i otpada u formi vučenog nanosa.

Bilo da se analiziraju kanalizacioni sistemi ili prirodni vodotoci i kanali, prisustvo suspendovanog ili vučenog nanosa će imati uglavnom negativan uticaj na sistem za merenje protoka. Ključni aspekti ovog uticaja su navedeni u nastavku, u kontekstu tradicionalnih i najčešće primenjivanih metoda za merenje protoka:

1. Merni sistemi u vidu hidrauličkih građevina, prvenstveno preliv i sužanja, po prirodi svoje funkcije usporavaju tok vode u neposredno uzvodnoj deonici. Usled formiranog uspora, dolazi do akumulacije vučenog nanosa kao i sedimentacije suspendovanog nanosa i ostalog otpada (Slika 2.11). Posledično dolazi do drastične promene geometrije u prilaznim deonicama hidrauličkih građevina, što izaziva pojavu velikih greški, odnosno neodređenosti, u proceni dubine a i u teorijskoj zavisnosti kojom se ta dubina povezuje sa željenom veličinom – protokom (Hudson, 2004; Ogden i saradnici, 2017). U najgorem slučaju može doći do potpune blokade hidrauličke građevine. Takođe, prisustvo sedimenta u formi suspenzije, pogotovo pri visokim koncentracijama, značajno menja fizičke karakteristike vode u odnosu na karakteristike čiste vode. Promene se prvenstveno manifestuju kroz dva parametra, gustina i viskoznost. Pod uticajem promene ovih parametara, menja se i zavisnost između dubine i protoka, što izaziva grešku u

konačnoj proceni protoka pri korišćenju kako hidrauličkih građevina tako i pristupa na osnovu izmerene $Q - H$ krive (Hudson, 2004).



Slika 2.11 Levo) Sedimentacija prilazne deonice trougaoanog preliva (Ogden i saradnici, 2017), Desno) Sedimentacija na dnu kišnog kolektora (preuzeto sa rpitt.eng.ua.edu)

2. Ultrazvučne, odnosno Dopler, metode za merenje protoka zahtevaju prisustvo određene koncentracije suspendovanih čestica, kako bi obezbedile adekvatne podatke. Međutim u slučaju prevelike koncentracije suspendovanih čestica, javljaju se velike greške u merenjima (do 30%), budući da dolazi do atenuacije odnosno slabljenja odbijenog signala (Hudson, 2004; Nord i saradnici, 2014). Dodatan problem u slučaju Dopler senzora, predstavlja i neravnomeran raspored koncentracija suspendovanih čestica – koja takođe dovodi do izraženih grešaka u merenjima (Maheepala i saradnici, 2001; McIntyre & Marshall, 2008; Nord i saradnici, 2014). U slučaju EM senzora, samo prisustvo suspendovanih čestica nema nikakav uticaj na izlazni signal. U kontekstu primene EM senzora u kanalizacionim sistemima, treba imati u vidu da će se elektroprovodnost vode razlikovati u odnosu na slučaj čiste vode (Hudson i saradnici, 2004). Međutim, Njuman (Newman, 1982) upravo ističe da EM senzori mogu biti otporni na ove uticaje. Poseban problem predstavlja tvrdoća vode, odnosno prisustvo magnezijum i kalcijum karbonata, koje dovodi do pojave kamenca na elektrodama. Na ovaj način povećava se otpornost virtualnoj struji, pa samim tim slabi izlazni signal.

3. Konačno, jedan od ključnih problema vezan za prisustvo sedimenta predstavlja slučaj sedimentacije preko kućišta Dopler senzora u kanalizacionim sistemima. Ovaj vid problema je najzastupljeniji u praksi (Maheepala i saradnici, 2001; ITA, 2002; Aguilar i saradnici, 2016). Sedimentacija se javlja na diskontinuitetima, kako konstruktivnog tako i hidrauličkog karaktera (Chebbo i ostali, 1995; Ashley i Verbanck, 1996). Naime, ukoliko se ADV uređaji fiksiraju za dno kanalizacionih cevi ili kolektora, u blizini nekog diskontinuiteta, postoji opasnost da će doći do sedimentacije suspendovanog nanosa i ostalog otpada (Slika 2.11 Desno) preko samog kućišta senzora. Ultrazvučni talasi nisu u mogućnosti da prodru kroz talog sedimenta od svega nekoliko mm (Prodanović i ostali, 2012) zbog čega će doći do potpunog prekida rada uređaja. Za razliku od njih EM senzori, u slučaju prisustva poroznog sedimenta, mogu da proizvode signal proporcionalan brzini. Naime, magnetno polje EM senzora najčešće neće biti značajno poremećeno prisustvom nekog materijala iznad same sonde. Ukoliko je omogućen kontakt vode koja teče i elektroda, pretpostavlja se da i uređaji mogu da generišu izlazni napon koji je proporcionalan srednjoj profilskoj brzini. Ovde treba napomenuti da najekstremniji problem u fekalnim i kombinovanim kanalizacionim sistemima predstavlja sedimentacija i očvršćivanje masnih taloga (Slika 2.12). Ovaj fenomen nije analiziran u okviru ove disertacije.



Slika 2.12 Kanalizacioni kolektor blokiran očvršćenim masnim naslagama u Londonu, Ujedinjeno Kraljevstvo (preuzeto sa www.neogaf.com)

Imajući u vidu da je kao jedan od ključnih faktora u kontroli kanalizacionih sistema u realnom vremenu, identifikovana potreba za kontinualnim merenjem protoka (Schutze i

saradnici, 2002; Roy i saradnici, 2008), neophodno su dodatna istraživanja na polju merenja protoka u kanalizacionim sistemima – pogotovo primenom EM senzora.

2.2.3 MERENJE PROTOKA U VELIKIM PROVODNICIMA I

PROVODNICIMA SLOŽENOG POPREČNOG PRESEKA

Klasifikacija provodnika, prema veličini proticajnog preseka, je u opštem smislu relativna budući da npr. cev kružnog preseka sa prečnikom $D > 1000$ mm se smatra velikom u kontekstu vodovodnih sistema dok u kontekstu hidroenergetskih sistema ona to nije. Analiza predstavljena u ovom poglavlju je primarno fokusirana na velike provodnike kakvi se sreću u derivacionim tunelima i dovodnim cevovodima hidroenergetskih postrojenja ili na potisu masivnih pumpnih stanica, gde su poprečni preseki opisani hidrauličkim (ili stvarnim) prečnikom od preko nekoliko metara. Kuriozitet je da su trenutno najveći prečnici hidrotehničkih provodnika preko 12 m (Gruber i saradnici, 2009). Pod provodnicima složenog poprečnog preseka se smatraju oni u kojima se raspored brzina ne može adekvatno opisati standardnim analitičkim obrazcima. Primer ovakvih provodnika su hidraulički kratki dovodi na hidroelektranama (Slika 2.13).

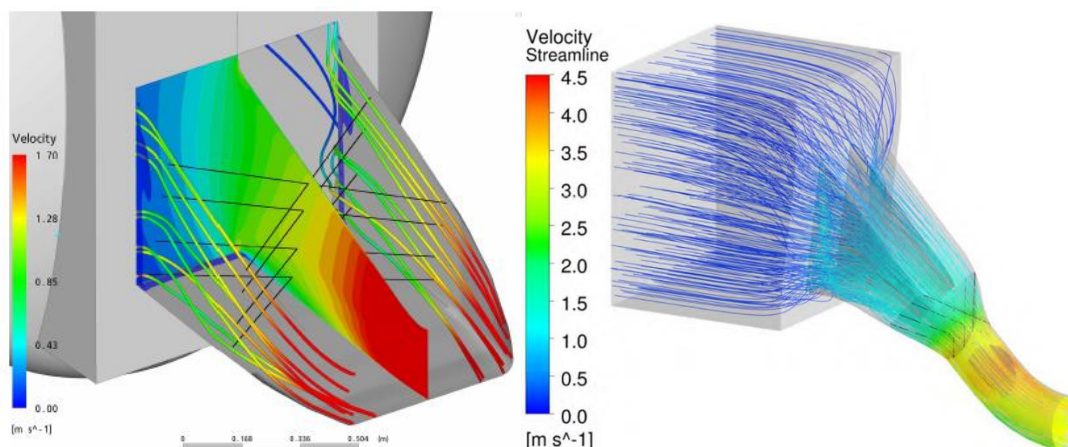
Projektovanje sistema za merenje protoka u ovakvim sistemima predstavlja veliki izazov i iziskuje značajne finansijske resurse. Hidraulički, u navedenim provodnicima se može javiti i tečenje pod pritiskom i tečenje sa slobodnom površinom. Trenutno najpopularniji pristup je primena akustične metode sa više putanja (Tresch i saradnici, 2008; Hu i saradnici, 2016; Marushchenko i saradnici, 2016). Akustična metoda sa više putanja je u osnovi ultrazvučna transit-time metoda (Iooss i saradnici, 2002) sa više parova ultrazvučnih primopredajnika (obično između 2 i 10) ugrađenih u same zidove provodnika. Svaki par ultrazvučnih primopredajnika meri brzinu uprosečenu duž jedne putanje ultrazvuka, pa se tako upotrebom više parova dobija bolja procena srednje profilske brzine V . Broj parova primopredajnika, položaj u cevi i procedura za numeričku integraciju izmerenih brzina duž putanja se definiše u skladu sa lokalnim uslovima i zahtevima za tačnost izmerenog signala. Tačnost izmerenog protoka pomoću akustične metode sa više putanja će u opštem slučaju zavistiti od (Gruber i saradnici, 2009):

- *Geometrije provodnika* – oblika i veličine poprečnog preseka, kao i udaljenosti, u uzvodnom i nizvodnom pravcu od geometrijskih promena.
- *Procedure za integraciju protoka* – izbora numeričke procedure za integraciju protoka - npr. Optimal Weighted Integration for Circular Sections – OWICS (Tresch i saradnici, 2006) ili Optimal Weighted Integration for Rectangular Sections – OWIRS (Luscher i saradnici, 2008), rasporeda brzina, broja i rasporeda akustičnih putanja kao i pozicije i orijentacije mernog poprečnog preseka – poprečnom preseku definisanom akustičnim putanjama.
- *Operativnih uslova* – Greške usled pretpostavke o ustaljenosti tečenja, opseg protoka kao i režim rada pumpi odnosno turbina.
- *Kvaliteta vode* – Koncentracija suspendovanih čestica, njihov oblik i veličina, mutnoća i prisustvo vazдушnih mehurića.

Posebnu pažnju treba obratiti na proceduru za integraciju protoka. Naime, u okviru ove procedure određuju se težinski koeficijenti kojima se ponderišu brzine, izmerene duž svake putanje – analogno težinskoj funkciji w EM senzora. Određivanje težinskih koeficijenata se sprovodi na osnovu podataka o rasporedu brzina u mernom preseku. Budući da se raspored brzina u navedenim uslovima veoma teško može izmeriti, on se procenjuje na osnovu numeričkih simulacija turbulentnog tečenja (Slika 2.13), odnosno primene CFD-a. Do sada je pokazano da u ovim slučajevima CFD može biti od velike pomoći, omogućavajući minimiziranje greške izmerenog protoka na osnovu adekvatno sračunatih težinskih koeficijenata (Gruber i saradnici, 2009; Aakti i saradnici, 2014; Marushchenko i saradnici, 2016). Na osnovu ispitivanja na fizičkim i numeričkim modelima, dosadašnjih iskustava i malobrojnih poređenja sa redundantnim mernim sistemima, procenjuje se da se akustičnom metodom sa više putanja može ostvariti minimalna merna neodređenost od svega 0.5% (Gruber i saradnici, 2009).

Sa druge strane, primena akustične metode sa više putanja je opterećena naslednim manama ultrazvučnih metoda. Naime, na kvalitet izmerenog signala veliki uticaj ima koncentracija suspendovanih čestica, i mehurića vazduha, koja pri visokim vrednostima dovodi do slabljenja ili potpunog prekida signala. Pored toga, treba spomenuti i visoku cenu ugradnje ovakvih mernih sistema. Glavninu troškova čine građevinski i montažerski radovi za ugradnju desetina uređaja u same zidove provodnika i cena samih senzora,

međutim ne treba zaboraviti i troškove ekspertске analize u okviru koje je neophodno prvo optimizovati položaje samih senzora a zatim i proceniti princip numeričke integracije protoka.



Slika 2.13 Levo) Rezultati numeričke simulacije tečenja na potisu crpne stanice Bao Jing, Kina (Gruber i saradnici, 2009); Desno) Rezultati numeričke simulacije tečenja u kratkom nepravilnom dovodu HE Vetingen, Švajcarska (Aakti i saradnici, 2014)

2.3 ZAKLJUČAK PREGLEDA LITERATURE

Primena elektromagnetnih senzora brzine i protoka u hidrotehnici je relativno česta. Cevni EM senzori protoka su postali standard u sistemima pod pritiskom. Popularnost i primenjivost integralnog EM senzora, u tokovima sa slobodnom površinom, je ograničena visokim investicionim i eksploatacionim troškovima. Lokalni EM senzori brzine u toku su u umerenoj meri zastupljeni u sistemima pod pritiskom i u otvorenim tokovima. Konačno, papučasti EM senzori se ređe koriste, iako poseduju određeni potencijal za primenu u širokom spektru uslova.

Radne karakteristike lokalnih EM senzora se određuju fabričkom kalibracijom prema opštem ISO standardu 3455, simulirajući homogen raspored brzina u kanalu sa vučenim kolicima. Tačnost i ponovljivost senzora se definiše poređenjem izmerenog signala sa visoko pouzdanim enkoderima položaja, koji prate kretanje vučenih kolica. U slučaju papučastih EM senzora, može se postaviti pitanje da li je primena ISO 3455 standardna adekvatna, imajući u vidu da se ovaj tip senzora postavlja uz čvrstu konturu, gde raspored

brzina značajno odstupa od uslova pri fabričkoj kalibraciji. Ispitivanja radnih karakteristika papučastih EM senzora, u dobro kontrolisanim uslovima, koja bi mogla da odgovore na ovo pitanje, nedostaju u literaturi.

Treba napomenuti, da se generalno pri analizama radnih karakteristika sistema, odnosno uređaja za merenje protoka, posmatra rad u idealnim uslovima. Nasuprot tome, u praksi se često sreću složeni uslovi tečenja koji dodatno otežavaju rad mernih sistema. Složeni uslovi tečenja se javljaju u kanalizacionim sistema, gde je pored velike varijacije protoka, specifična i pojava raznog suspendovanog i vučenog nanosa, masti, ulja itd. U navedenim uslovima javljaju se brojni problemi sa mernom opremom, koji dovode do merenja protoka sa visokom mernom neodređenošću. Poseban izazov u kanalizaciji, predstavlja kontinualno merenje protoka, imajući u vidu česte pojave sedimentacije senzora. Kapacitet EM senzora za rad u ovakvim uslovima, odnosno njegova robusnost (kao radna karakteristika), do sada nije detaljno ispitan iako ovi senzori poseduju određeni potencijal za primenu.

Sa aspekta analize sistema za merenje protoka, složeni uslovi tečenja se javljaju, pored kanalizacionih sistema, i u velikim provodnicima, kao i provodnicima sa složenom geometrijom. Karakterističan problem za ovakve uslove tečenja je definisanje adekvatne korelacije, odnosno korekcionne funkcije K , kojom se izmerena brzina V_{mer} dovodi u vezu srednjom profilskom brzinom V . Za definisanje funkcije K , pored hidrauličkih uslova na mernom mestu odnosno rasporeda brzina, neophodno je poznavati princip nelinearne integracije brzina, kojim se opisuje princip merenja brzine pomoću ravnih EM senzora. U opštem slučaju, radni princip proizvoljnog senzora se može opisati matematičkim modelom i odgovarajućim tehničkim parametrima. Princip nelinearne integracije je detaljno izučavan, sa ciljem unapređenja tačnosti merenja, u slučaju cevnih, čak i integralnih EM senzora. U slučaju lokalnih EM senzora slična istraživanja tehničkih karakteristika, kao i metodologije za definisanje istih, nedostaju u literaturi. Takođe, imajući u vidu lokalni karakter merenja ravnih EM senzora, potrebno je definisati opštu metodologiju kojom će se na osnovu poznavanja tehničkih karakteristika senzora, kao i odgovarajuće hidrauličke analize, obezbediti pouzdano definisanje korekcionne funkcije K .

Uzimajući u obzir prethodno navedene činjenice, proistekle iz pregleda referentne literature, u nastavku su definisana osnovna istraživačka pitanja koja su motivisala istraživanje predstavljeno u disertaciji:

- Kakve radne karakteristike poseduju ravni EM senzori, u pogledu tačnosti i ponovljivosti i kako se one mogu definisati?
- Da li su ravni EM senzori dovoljno robusni za rad u kanalizacionim sistemima, odnosno da li poseduju kapacitet za rad u uslovima sedimentacije kućišta?
- Kako matematički opisati radni princip ravnih EM senzora?
- Koje su tehničke karakteristike ravnih EM senzora, merodavne za modeliranje radnog principa ovih senzora?
- Da li je moguće eksperimentalno definisati merodavne tehničke karakteristike ravnih EM senzora?
- Kako se mogu upotrebiti matematički model, i tehnički parametri ravnih EM senzora, za unapređenje pouzdanosti merenja protoka odnosno definisanje odgovarajuće korekzione funkcije K ?

U nastavku disertacije, sistematski su razmatrana navedena istraživačka pitanja, sa ciljem unapređenja metodologije za određivanje protoka u složenim uslovima strujanja, primenom ravnih EM senzora. Konačno, predlog unapređenja metodologije je ispitan i verifikovan u realnim terenskim uslovima.

3 EKSPERIMENTALNA OPREMA

Ispitivanje radnih karakteristika ravnih EM senzora brzine kao i unapređenje njihove tačnosti u određivanju srednje profilske brzine (samim tim i protoka) u složenim uslovima tečenja, predstavlja osnovni zadatak ove doktorske disertacije. Generalno, u analizama mernih instrumenata, karakteristike samog uređaja je potrebno ispitati kako u kontrolisanim laboratorijskim uslovima, tako i u realnim terenskim uslovima. Adekvatno sprovedena laboratorijska ispitivanja u kontrolisanim uslovima omogućavaju da uticaj stohastičnosti uslova sredine, na rad samih uređaja, bude minimiziran. Samim tim, otvara se mogućnost za jasno definisanje uzročno-posledičnih veza koje opisuju osetljivost mernog instrumenta. Pored toga, laboratorijska ispitivanja služe za etaloniranje radnih karakteristika, prvenstveno tačnosti i ponovljivosti uređaja. Iako zaključci izvedeni na osnovu laboratorijskih ispitivanja imaju veliku vrednost, konačan „sud“ o radu nekog mernog instrumenta se donosi nakon primene u terenskim uslovima. Neretko, terenska ispitivanja otkrivaju nove „detalje“ vezane za upotrebu neke merne opreme, budući da ne postoji laboratorijska instalacija koja može da replicira širok spektar uslova sa kojima se korisnik može sresti na terenu.

U poglavlju 2. koje se bavilo analizom literature i istraživanja relevantnih za ovu disertaciju, korišćena su dva kvantitativna parametra za opisivanje mogućnosti mernih instrumenata da adekvatno okarakteriše merenu veličinu, greška i merna neodređenost. Iako je greška, u osnovi, uobičajen i tradicionalan parametar u poslednje dve decenije u svetskoj stručnoj javnosti se prelazi na koncept upotrebe merne neodređenosti (eng. measurement uncertainty). Merna neodređenost je i korišćena u analizama sprovedenim u disertaciji, budući da ona, prema mišljenju autora, primerenije opisuje valjanost izmerene vrednosti.

U okviru ovog poglavlja, predstavljen je opis opreme koja je korišćena u eksperimentalnom delu istraživanja. Prvi deo 3.1. je posvećen upravo analiziranim ravnim EM sensorima, proizvođača „Svet instrumenata“, gde su opisana sva tri korišćena i dostupna modela ovih senzora: Flat, Compact Flat i Large Flat. Zatim su u okviru poglavlja 3.2. i 3.3. analizirani lokalni EM senzor brzine u toku „Ajkulino krilo“ kao i

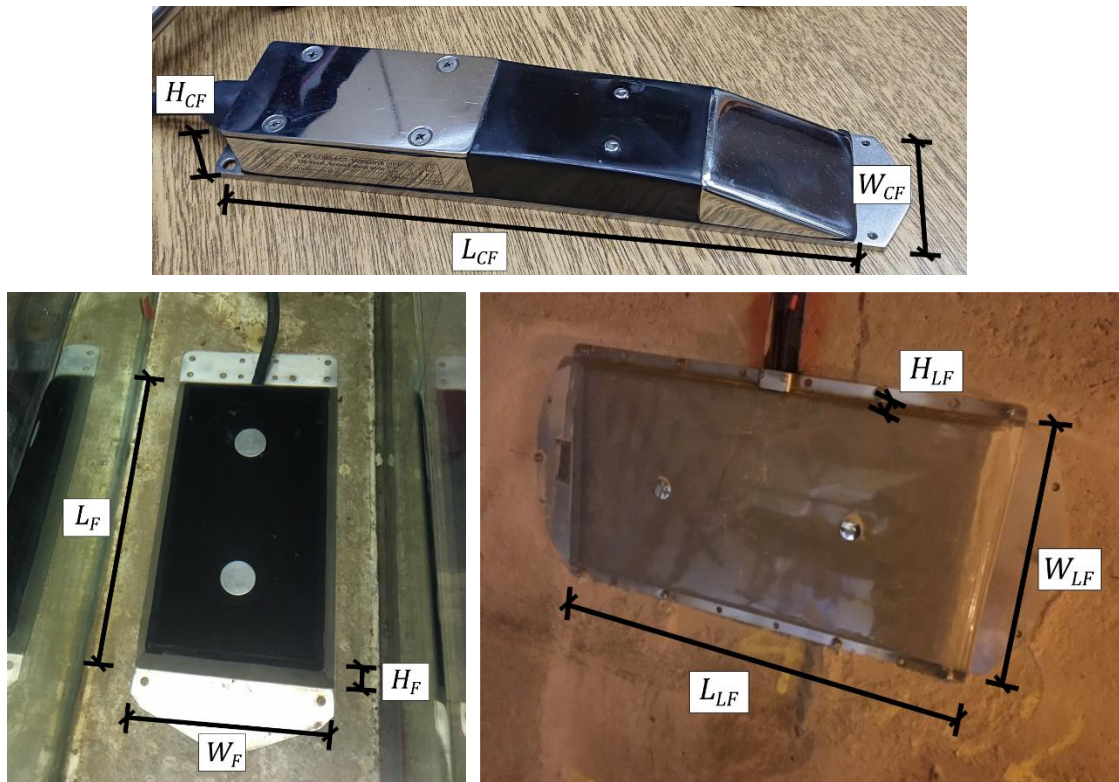
Akustični Dopler Senzori brzine, korišćeni za merenje brzina u tačkama na terenu i u laboratoriji, respektivno. Sledeće poglavlje 3.4. je posvećeno magnetometru, senzoru za merenje vektora magnetnog polja, korišćenom pri mapiranju magnetnog polja ravnih EM senzora. Poglavlje 3.5. se bavi opisom Laboratorijske instalacije u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta, korišćenoj za potrebe detaljnog ispitivanja radnih karakteristika ravnih EM senzora u kontrolisanim uslovima. Konačno, u okviru poglavlja 3.6., predstavljene su osnove analize merne neodređenosti, parametra korišćenog za etaloniranje valjanosti izmerenih vrednosti pomoću analiziranih ravnih EM senzora.

3.1 RAVNI ELEKTROMAGNETNI SENZORI

Analize u ovom radu se odnose na tzv. ravne papučaste EM senzore domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“. Ovaj tip lokalnih EM senzora je originalno projektovan za rad u kanalizacionim sistemima (Cvitkovac i saradnici, 2010). Pridev „ravne“ se odnosi na oblik pobudnih kalemova unutar samih uređaja, koji su kao što je i ranije navedeno u poglavlju 2.1.1.2, prvo korišćeni u integralnim EM sensorima sredinom sedamdesetih godina prošlog veka. Pored povoljnosti u pogledu radnih karakteristika i tehničkih parametara, ravan oblik pobudnih kalemova je omogućio i relativno tanak oblik kućišta senzora.

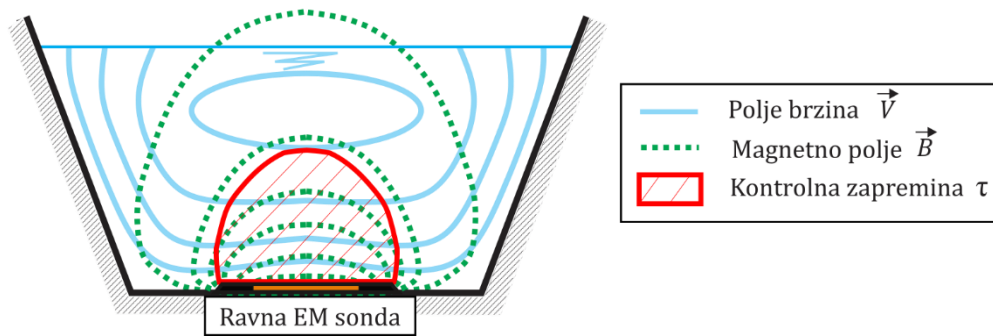
Analizama su obuhvaćena tri modela ravnih elektromagnetnih senzora: Compact Flat DC-2 EMV, Flat DC-2 EMV i Large Flat DC-2 EMV (Slika 3.1). Sva tri senzora mere podužnu komponentu brzine, na osnovu istog principa rada (Slika 3.2) – opisanog u poglavlju 2.1.2. Za generisanje izlaznog napona U_m najznačajnija je Y komponenta magnetnog polja B_y . Ključna razlika između ova tri modela je u veličini pobudnih kalemova, odnosno veličini i rasporedu elektroda, koja samim tim uslovljava drugačije radne karakteristike i tehničke parametre. Tako se Compact Flat DC-2 model koristi u kanalizacionim kolektorima koji nemaju ravno dno, budući da senzor ima uzanu konstrukciju širine $W_{CF} = 60$ mm, dužine $L_{CF} = 300$ mm i visine $H_{CF} = 35$ mm. Nešto veća visina kućišta (H_{CF}) je uslovljena integrisanim sensorom pritiska, koji se jedino u ovom modelu trenutno nalazi. Sledeći po veličini, ujedno osnovni model Flat DC-2 je pljosnatijeg oblika i veće širine $W_F = 160$ mm, dužine $L_F = 280$ mm i visine $H_F = 23$ mm.

Ovaj model se najčešće koristi u većim kanalizacionim kolektorima ($D > 800$ mm) ili kolektorima sa ravnim dnom. Konačno, postoji i Large Flat DC-2, $W_{LF} = 380$ mm, $L_{LF} = 800$ mm i visine $H_{LF} = 25$ mm. Imajući u obzir velike dimenzije, ovaj senzor ima najveću kontrolnu zapreminu CV (mernu zapreminu), samim tim i najstabilnija merenja u pogledu šuma. Ovaj tip senzora je namenjen upotrebi u velikim hidroenergetskim tunelima i cevovodima.



Slika 3.1 Ispitivani Ravni EM senzori, proizvođača „Svet instrumenata“: Gore) Compact Flat DC-2, Levo) Standardni Flat DC-2, Desno) Large Flat DC-2

Ravni EM senzori brzine su oblikovani tako da u što manjoj meri utiču na strujnu sliku u provodniku. U zavisnosti od modela ravni kalemovi, različitih veličina i oblika, su integrisani u robusno kućište, napravljeno od inoks (prohrom) čelika i zaliveno zaštitnom epoksi masom. Uz sam senzor dobija se i eksterni loger podataka sa integrisanim NiMH akumulatorom za napajanje. Prikupljanje podataka sa logera se može izvršiti „žičano“ preko standardne serijske veze (RS-232 ili RS-485), kao i bežično pomoću GPRS-a. Cena jedne Compact ili standardne Flat DC-2 jedinice je u rangu sa jednodimenzionalnim papučastim ADV uređajima.



Slika 3.2 Shematizovan prikaz principa rada ispitivanih Ravnih EM senzora, proizvođača „Svet instrumenata“.

Proizvođač „Svet instrumenata“, u svojim reklamnim brošurama, navodi da je nominalna tačnost standardne Flat DC-2 jedinice u merenju brzine $\pm 1\%$ a ponovljivost 0,001 m/s (Svet instrumenata, 2018). Takođe, navodi se i široki bidirekcionni radni opseg od ± 15 m/s koji potencijalno predstavlja veoma korisnu osobinu ovih uređaja. Mogućnost merenja malih brzina je značajna u kombinovanim kanalizacionim sistemima, gde se javljaju velike razlike između protoka u suvom i kišnom periodu, čak i do 1:1000 (Harremoës i saradnici, 1993). Takođe, mogućnost bidirekcionnog merenja je korisna u slučaju tokova pod usporom, ili u slučaju pojave povratnog tečenja. Kao što je i navedeno u poglavlju 2.1.4, ravni EM senzori se fabrički kalibrišu u kanalu sa vučenim kolicima u okviru Instituta za Vodoprivredu “Jaroslav Černi”, postupkom sličnim standardu ISO3455 (ISO, 2007) (Slika 2.8). Indukovani napon U_m , kao izlazna veličina ovih senzora, pokazuje linearnu zavisnost sa željenom veličinom, brzinom V_{mer} .

Potrošnja električne energije je promenljiva, pod kontrolom korisnika, i zavisi od jačine pobudne struje kao i od učestalosti i dužine semplovanja, odnosno uzorkovanja. Maksimalna frekvencija uzorkovanja je 1,3 Hz, a najniže trajanje uzorkovanja je 0,6 s. Jača pobudna struja, veća frekvencija i duži period uzorkovanja dovode do veće stabilnosti u merenju, pa se tako u zavisnosti od potreba korisnik odlučuje za kompromisno rešenje između potrošnje energije i stabilnosti merenja. Pobuda ravnih EM senzora je pulsna, bipolarna i sa dvojnoum frekvencijom, gde je glavna pobudna frekvencija 12,5 Hz. Na ovaj način, omogućena je visoka stabilnost nule kao i dobre karakteristike u pogledu šuma (Kuromori i ostali, 1994; Ishikawa and Oota, 2004). Naime, ukoliko se pretpostavi da se šum ne menja u vremenu, oduzimanjem napona izmerenih u prvoj i drugoj polovini jedne periode, on se efikasno može ukloniti.

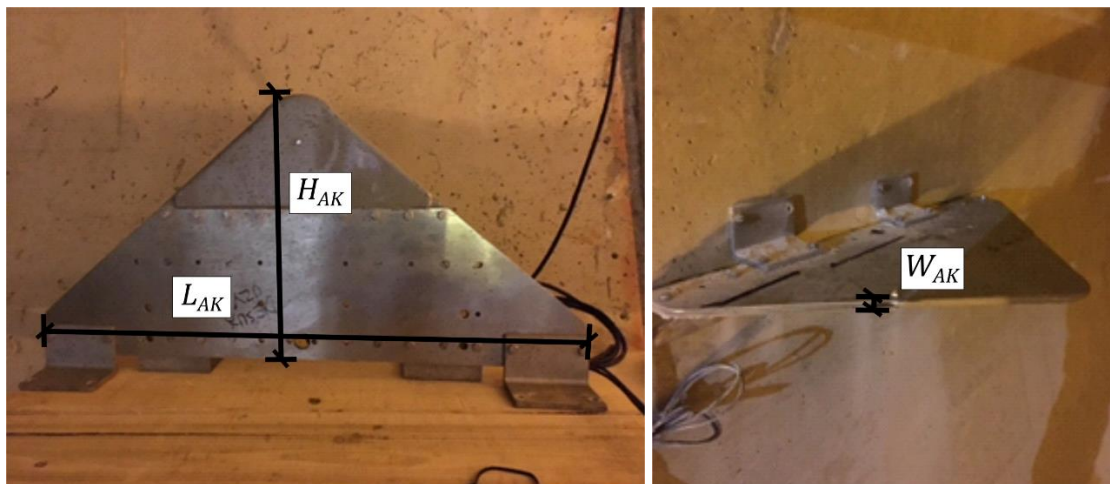
Unutrašnja impedansa ovih senzora je visoka, reda veličine $20 \text{ M}\Omega$. Visokom unutrašnjom impedansom, omogućava se redukovanje uticaja moguće varijacije elektroprovodnosti (karakteristično za kanalizacione sisteme), budući da se očekuje da će u najgorem slučaju ona biti barem 1000 puta veća od impedanse vode. Takođe, smatra se da visoka unutrašnja impedansa smanjuje uticaj sedimentacije na rada sonde.

3.2 LOKALNI EM SENZOR BRZINE „AJKULINO KRILO“

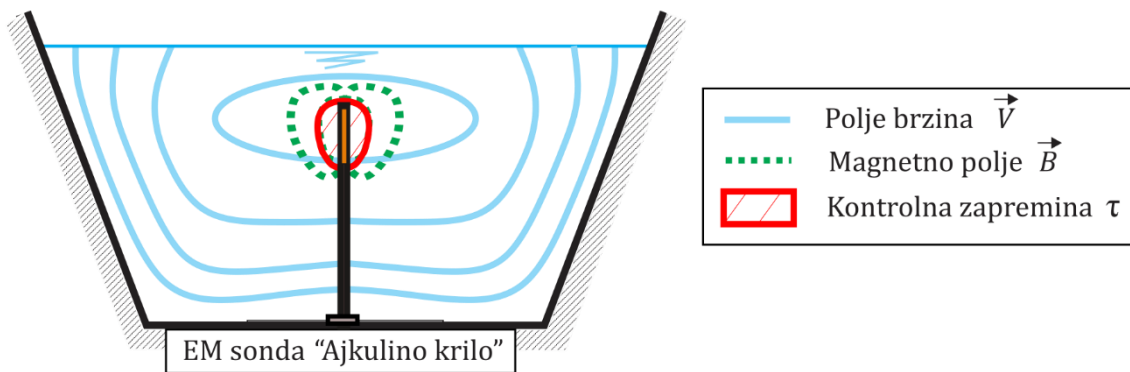
Model lokalnog EM senzora brzine u toku, proizvođača „Svet instrumenata“, kolokvijalno je nazvan „Ajkulino krilo“. Ovaj model EM senzora je posebno projektovan i konstruisan za potrebu kalibracije Large Flat DC-2 sonde, instaliranih u okviru dva derivaciona tunela sistema Hidroelektrane na Trebišnjici: Dabarsko polje – Fatničko polje i Fatničko polje – Bilećka akumulacija. Dimenzije sonde „Ajkulino krilo“ su $L_{AK} = 700 \text{ mm}$, $W_{AK} = 15 \text{ mm}$ i $H_{AK} = 450 \text{ mm}$ (Slika 3.3). Sam senzor, iako ima ravan pobudni kalem, ne pripada grupi ravnih papučastih senzora budući da se pobudni kalem i samo kućište senzora postavljaju upravno na zidove provodnika (Slika 3.3). Samim tim, integraljenje polja brzina u okviru generisanja izlaznog napona U_m se ne sprovodi u pravcu najvećih gradijenata polja brzina (kao u slučaju ravnih EM senzora). Konstrukcija je izvedena u ovom obliku, kako bi se obezbedilo lokalno merenje brzine „dublje“ u zoni toka, a sprečilo zadržavanje plutajućeg otpada i trave.

Princip rada je istovetan kao i u slučaju ostalih EM senzora brzine (opisan u poglavlju 2.1.2). Međutim, za razliku od ravnih EM senzora, „Ajkulino krilo“ meri brzinu u relativno maloj kontrolnoj zapremini τ koja se nalazi pri vrhu peraja (Slika 3.4). Glavni doprinos merenju lokalne brzine daje deo toka u okolini elektroda sa obe strane senzora, na udaljenosti od 370 mm od donje ivice senzora. Za potrebe analiza predstavljenih u ovoj disertaciji, kontrolna zapremina τ se može aproksimirati i tačkom, imajući u vidu odnos dimenzija koje opisuju CV i prečnika provodnika u kojima se primenjuje. Praktično, „Ajkulino krilo“ predstavlja EM senzor za merenje „neporemećene“ brzine u „tački“, prilagođen terenskim uslovima. Robusnom i relativno tankom konstrukcijom od inoks (prohrom) čelika u obliku trougla, omogućeno je minimalno remećenje strujne slike, kao i merenje lokalne brzine na udaljenosti od oko 420 mm (370 mm + 50 mm za

nosače senzora) od zidova provodnika. Pored toga, trouglasti oblik uređaja sa zaobljenim vrhom omogućava sprečavanje zadržavanja vegetacije ili plastičnih kesa na kućištu. Primenom „Ajkulino krilo“, omogućena je detaljnija interpretacija i bolje razumevanje stvarnih polja brzina kao i lokalna kalibracija ravnih EM senzora prilikom eksploatacije u derivacionim tunelima u okviru sistema HET.



Slika 3.3 Levo) EM senzora „Ajkulino krilo“ pre ugradnje; Desno) EM senzor „Ajkulino krilo“ ugrađen na zid tunela Fatničko polje – Bilećka akumulacija u okviru mernog mesta Čepelica



Slika 3.4 Shematizovan princip rada lokalnog EM senzora brzine u toku „Ajkulino krilo“, proizvođača „Svet instrumenata“

Velike dimenzije ovog senzora su onemogućile ispitivanje radnih karakteristika u hidrauličkoj laboratoriji, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Laboratorijska ispitivanja na osnovu kojih je procenjen oblik kontrolne zapremine, sprovedena su od strane proizvođača „Svet instrumenata“. Fabrička kalibracija je

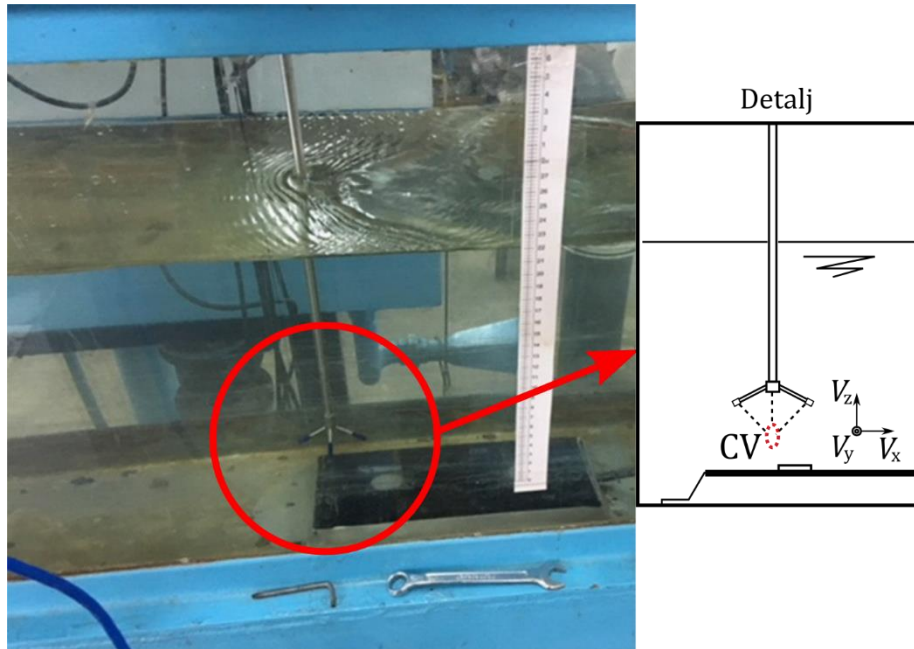
sprovedena prema prethodno opisanom standardu ISO 3455 (ISO, 2007). Imajući navedeno u vidu, za ocenjivanje valjanosti izmerenog podatka pomoću „Ajkulino krila“, može se koristiti minimalna greška merenja lokalne brzine V_{mer} ili minimalna merna neodređenost od 0,5%, procenjena na osnovu rezultata fabričke kalibracije.

3.3 ŠTAPIČASTI ADV SENZOR BRZINE

Upotreba akustičkih senzora na bazi Doplerovog efekta, popularno ADV-a (eng. Acoustic Doppler Velocimeter), za merenje brzina je generalno široko prihvaćena u oblasti hidrotehnike. Ovo poglavlje je posvećeno opisu štapičastog ADV senzora brzine, korišćenog u sprovedenim laboratorijskim eksperimentima. Uzimajući u obzir specifične karakteristike ovog instrumenta, moguća je podjednako efikasna upotreba kako u terenskim tako i u laboratorijskim uslovima (Khorsandi i saradnici, 2012). Štapičasti ADV je uređaj za (skoro) neinvazivno merenje trenutnih vrednosti komponenta vektora brzine, u sva tri koordinatna pravca, originalno razvijen za upotrebu na ispitivanjima fizičkih modela (Voulgaris & Trowbridge, 1998). Princip rada ovog tipa instrumenata je zasnovan na efektu Doplerovog pomaka. ADV sonda u toku rada, emituje kratke akustične (talasne) pulseve duž kolone vode. Kako talas putuje kroz zahvaćenu kolonu vode, deo akustične energije se odbija i prelama od malih suspendovanih čestica u vodi. Na osnovu analize odbijenog signala dolazi se do podatka o brzini. Metoda zahteva prisustvo suspendovanih čestica u vodi, gde one mogu biti i veštačkog porekla, ukoliko ih vodotok ne poseduje u prirodnom stanju.

U ispitivanjima koja su pratila izradu ove doktorske disertacije korišćen je ADV „Vectrino+“ proizvođača „Nortek“ (Nortek, 2009). Klasična dispozicija sonde podrazumeva upotrebu dva, tri ili četiri prijemne glave i jednog centralnog pozicioniranog transmitera radnih frekvencija u opsegu od 1-10 MHz. U slučaju Vectrino+ sonde, radna frekvencija akustičnih talasa je 10 MHz. Prijemne glave su radijalno postavljene sa inkrementom od 90 stepeni, tako da formiraju krug oko centralnog transmitera. Sonda se potapa u vodotok i prijemnici su nagnuti ka transmitteru tako da se fokusiraju ka jedinstvenoj mernoj zapremini čija udaljenost od glave transmitera iznosi 5 cm (Slika 3.5). Udaljavanjem merne zapremine od glave ADV sonde, omogućeno je neinvazivno merenje brzine u vodotoku. Sama veličina CV zavisi od podešavanja dužine emitovanog

pulsa, širine perioda u kom prijemnici „odsluškuju“ odjek kao i od šablona emitovanih i primljenih pulseva. Uobičajena je aproksimacija CV cilindrom (ili elipsoidom), visine od 0.3 do 1.5 cm i prečnika 0.6 cm (Slika 3.5).



Slika 3.5 Mapiranje polja brzine u okolini Flat DC-2 EM sonde, pomoću Vectrino ADV štapičastog senzora

Budući da je ova merna metoda direktnog karaktera, uređaj se kalibriše samo jednom tokom eksploatacionog veka (kao i ostali lokalni EM senzori brzine prema standardu ISO 3455). Tri komponente trenutne brzine, u pravcima definisanim međusobnim uglovima između prijemnika i predajnika se transformišu u ortogonalni koordinatni sistem preko odgovarajuće matrice transformacije T :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Sa (u, v, w_1, w_2) su obeležene komponente vektora brzine u ortogonalnom koordinatnom sistemu, dok su sa (V_1, V_2, V_3, V_4) označene komponente vektora brzine duž akustičnih osa odnosno bisektrisa između prijemnih i predajnih osa. Vrednosti matrice transformacije T zavise od položaja predajnika i prijemnika i određuju se na osnovu geometrije sistema prijemnik-predajnik. Transformaciona matrica je jedinstvena za svaki uređaj i ne menja

se tokom eksploatacije, izuzev ukoliko dođe do fizičkog oštećenja uređaja – kada je potreban remont instrumenta.

Deklarisana tačnost merenja brzine iznosi $\pm 0.5\%$ od izmerene vrednosti (Nortek, 2009), na šta treba dodati i grešku usled Doplerovog šuma od 1% od definisanog opsega brzina (radni opseg se može menjati u zavisnosti od očekivanih varijacija vektora brzine). Komunikacija sa uređajem se odvija preko standardne serijske RS-232 veze i odgovarajućeg softvera, dobijenog od proizvođača. Za merenja vektora brzine u ustaljenim uslovima tečenja, preporučuje se osrednjavanje signala snimljenog u periodu trajanja od minimum 30 s (Buffin-Bélanger i Roy, 2005).

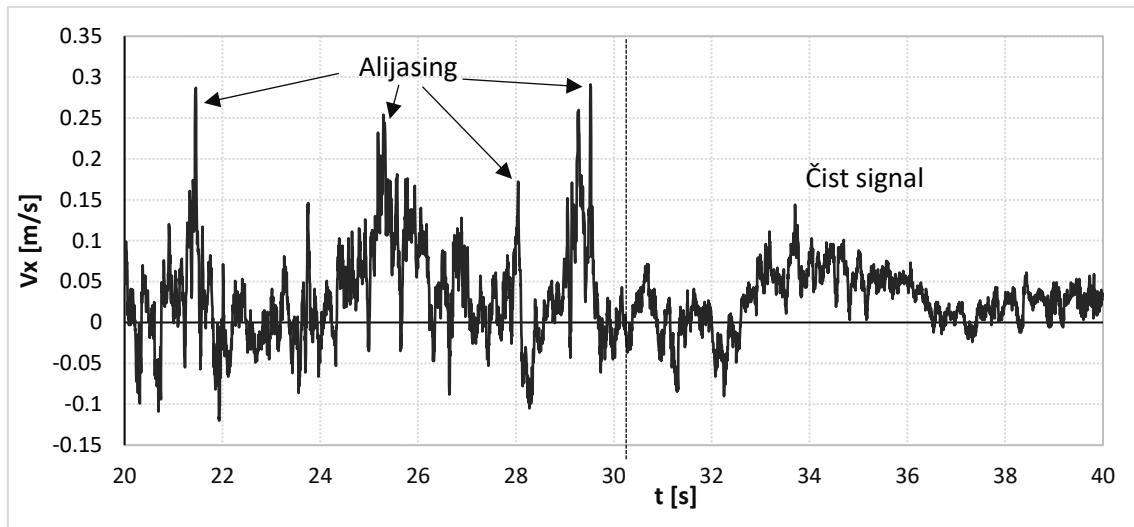
Iako je u osnovi ADV metoda robustna i praktična, njena upotreba je praćena izvesnim naslednim manama, od kojih se deo može u pripremi ili naknadnom procesiranju, otkloniti. Detaljan opis principa funkcionisanja ADV uređaja, kao i naslednih mana odnosno praktičnih ograničenja, zajedno sa mogućnostima za njihovo prevazilaženje, je dat u radu Ivetić i saradnici (2016). Nasledne mane potiču od fizike procesa koji se koristi u okviru ADV tehnologije. Kratak opis navedenih ograničenja, i načina za njihovo prevazilaženje, je dat u nastavku:

Alijasing Doplerovog signala – Alijasing Doplerovog signala se može shvatiti kao pogrešna procena frekvencije odnosno faze odbijenog signala. Pri upotrebi ADV, do alijasinga signala može doći na dva načina: usled nedovoljnog sadržaja suspendovanih čestica u mernoj zapremini ili usled merenja brzine koja je izvan podešenog opsega brzina. Naime, imajući u vidu da Doplerov uređaj meri fazni pomak između dva akustična pulsa, koji mora ležati u opsegu od 180° do -180° , ukoliko se fazni pomak nađe izvan ovog opsega, ADV uređaj daje pogrešan podatak o brzini. Za ADV uređaj je fazni pomak od 190° istovetan pomaku od -170° . Podaci o brzinama koji su dobijeni usled pojave alijasinga se primećuju na korisničkom ekranu kao pikovi sa ekstremnim vrednostima brzina (Slika 3.6). Međutim, problem najčešće predstavlja nedovoljna koncentracija suspendovanih čestica u vodotoku. Naime, da bi se dovoljan deo energije poslatih impulsa vratio do prijemnika ADV-a, neophodno je da koncentracija suspendovanih čestica u vodotoku prelazi određenu minimalnu granicu. Ukoliko vodotok ne sadrži prirodno suspendovane čestice, one se moraju ubaciti u njega. Ovaj proces se u praksi naziva „zasejavanje“ vode. Kao „zasejivači“ se mogu koristiti razni prirodni i veštački materijali.

Najbolji rezultati se dobijaju primenom komercijalnih borosilikatnih mikronskih sfera „Spherical 110P8“ proizvođača Potters, ili organskog mastila „Dytex Dye“ proizvođača Tintex (Chanson, 2008; Ivetić i saradnici, 2016). U istraživanjima koja su pratila izradu ove disertacije korišćene su mikronske sfere „Spherical 110P8“. Praktična posledica pojave alijasinga može biti pogrešna procena brzine, kao i u slučaju analiza turbulentnih karakteristika: precenjena turbulentna kinetička energija i nepravilan energetski spektar. Sama pojava alijasinga se može detektovati kroz pad vrednosti parametra SNR (eng. Signal to Noise Ratio), koji je opisan odnosom magnituda korisnog signala i šuma. Brojni istraživači su se bavili problemom detektovanja i pravilne zamene podataka, opterećenih alijasingom. U praksi su se dva algoritma izdvojila po svojoj efikasnosti odnosno primenjivosti: Algoritam na bazi filtera faza-prostor (Goring i Nikora, 2002) i Algoritam na bazi 3D kros korelacije brzina (Cea i saradnici 2007). Algoritam, na bazi primene filtera faza-prostor, se do sada pokazao kao najrobustniji u primeni. Sa druge strane noviji algoritam, koji koristi 3D kros korelacije brzine, ima prednost u tome što ne zahteva ručna, fina podešavanja radnih parametara koji su odražavaju na efikasnost algoritma. Navedeni algoritmi su implementirani u okviru funkcije *Despiking ADA.m* razvijene za potrebe izrade ove disertacije.

Doplerov šum – Pojava Doplerovog šuma je prisutna u slučaju merenja turbulentnih karakteristika sa bilo kojim uređajem koji se zasniva na Doplerovom principu (Garcia i saradnici, 2005). Do pojave šuma dolazi usled rasipanja poslatih pulseva i kratkog, odnosno konačnog, vremena koje suspendovane čestice provedu u mernoj zapremini. Relativan udeo Doplerovog šuma u signalu, u odnosu na koristan deo turbulentnih statistika, je funkcija karakteristika fluida kao i hidrauličkih uslova (brzina strujanja, turbulencija itd). Bitna je napomenuti da pojava Doplerovog šuma ne utiče na osrednjeni podatak o brzini, budući da je po karakteristikama sličan tzv. „belom“ šumu (srednja vrednost je jednaka nuli). Međutim u izučavanju turbulentnih karakteristika toka, usled pojave ovog fenomena dobija se greška pozitivnog karaktera na energetskom spektru (precenjene vrednosti), pogotovo u domenu velikih frekvencija. Izvestan broj istraživača se bavio ovim fenomenom i pokušajima da se on ukloni. Do sada, prihvaćene metode od strane naučne zajednice su u mogućnosti jedino da utiču na izvedene statistike, kao što su Rejnoldsovi naponi, odnosno da ih preprave tako da se eliminiše uticaj šuma. Metode za eliminaciju Doplerovog šuma iz originalnog signala, kao npr. predložena od autora

Nikora i Goring (1998), nisu opšte prihvaćene. Od metoda koje prepravljaju izvedene turbulentne statistike, ističu se one od autora Hurther i Lemmin (2001), kao i od Khorsandi i Saradnici (2013). Budući da fenomen turbulencije, na nivou mera za vreme od 0.01 s, nije od interesa za analizu EM senzora, signali mereni pomoću štapičastog ADV-a za potrebe predstavljenog istraživanja, nisu korigovani zbog prisustva Doplerovog šuma.



Slika 3.6 Prikaz pojave alijasinga Doplerovog signala na seriji podataka o brzini dobijenih u okviru merenja u laboratoriji građevinskog fakulteta

Blizina čvrste konture – Iskustvo u primeni ADV sonde je dovelo do saznanja da blizina čvrste konture može imati negativan uticaj na tačnost izmerenih brzina. Ovde se radi o blizini konture kako u vertikalnom smislu, tako i u horizontalnom smislu. Naime, preporučuje se da čvrsta kontura bude udaljena od merne zapremine barem 3 do 4.5 cm u oba pravca (Chanson, 2008). Primećeno je da parametar koji definiše kvalitet signala SNR, pada ispod 15 dB, ukoliko ovaj uslov nije ispunjen.

3.4 MAGNETOMETAR

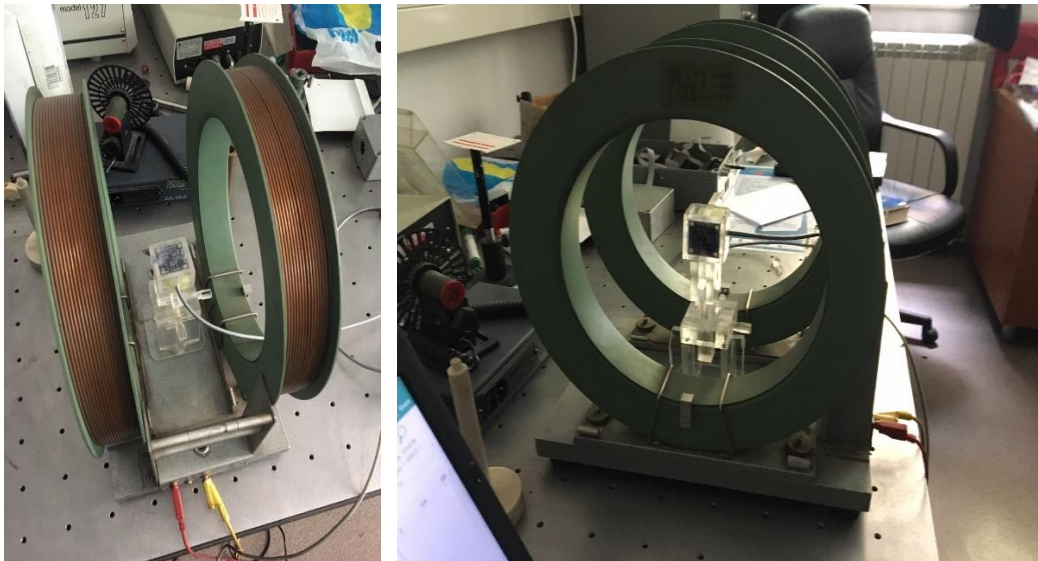
Podatak o rasporedu i obliku magnetnog polja je od velikog značaja u analizama nelinearne integracije i osetljivosti EM senzora brzine i protoka uopšte. Upravo se u osnovnim jednačinama rada EM senzora (j-ne (2.1), (2.3) i (2.5)), Kolina (1939) i ostalih (Shercliff, 1962; Bevir, 1970), može uočiti direktna veza između jačine magnetnog polja

\vec{B} i izlaznog napona E . Kako bi se adekvatno sagledala jačina, pravac i raspored magnetnog polja analiziranih EM senzora, sprovedene su serije merenja na relativnom gustom rasteru tačaka u hidrauličkoj laboratoriji, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

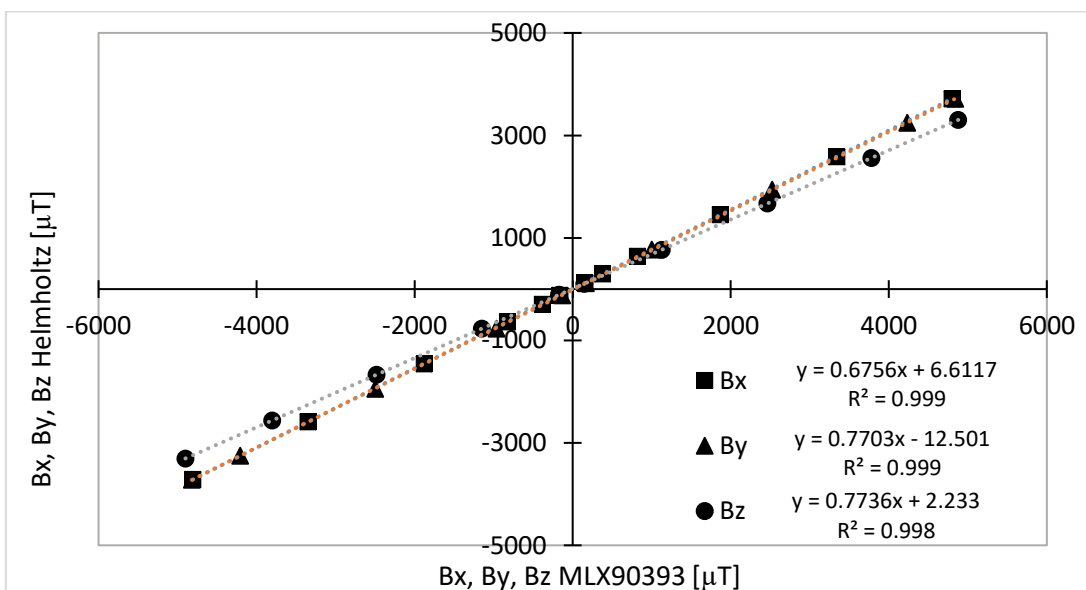
Za merenje vektora magnetnog polja u tački korišćen je magnetometar MLX90393 firme „Melexis“. Melexis MLX90393 je čip za merenje magnetnog polja koji radi na principu Holovog efekta. Prema ovom principu, usled prisustva magnetnog polja, upravnog na senzor, na krajevima poluprovodnika će doći do generisanje napona usled dejstva Lorencove sile (Surutka, 1984). Postavljanjem tri poluprovodnička čipa u tri ortogonalna pravca (x , y i z), moguće je izmeriti sve tri komponente vektora magnetnog polja. Čip magnetometra je ugrađen u kućište od pleksiglasa, koji se može fiksirati na nosač, od istog materijala, koji se dalje instalira na automatizovani pozicioner. Kontrola MLX90393 čipa se vrši preko Arduino kontrolne jedinice, koja se micro USB – USB kablom vezuje za računar. Slično kao i za slučaj automatizovanog pozicionera, upravljanje magnetometrom se vršilo preko GUI (eng. Graphical User Interface)-ja razvijenog u MATLAB okruženju. Imajući u vidu da je glavna pobudna frekvencija magnetnog polja 12.5 Hz, merenja magnetnog polja su morala da se obave na minimum dva puta većoj frekvenciji prema Nikvistovom pravilu (Grenander i Rosenblatt, 2008). Uprkos osnovnom Nikvistovom pravilu koje implicira upotrebu dvaput veće frekvencije, u praksi je perporučljivo na frekvencija uzorkovanja budem barem 5 puta veća, tako je u slučaju merenja magnetnog polja ona iznosila oko 90 Hz.

Korišćeni magnetometar je pre upotrebe kalibrisan na Helholcovom kalemu na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu (Slika 3.7). U toku postupka kalibracije, magnetometar je pokazao odličnu linearnost u ispitanom opsegu – do 5 mT (radni opseg sonde je do 50 mT). Rezultati kalibracije su pokazali da je za sva tri pravca neophodno korigovati (smanjiti) nagib kalibracione krive, dok su korekcije nule merenja praktično beznačajne (Slika 3.8). Pored kalibracije u odnosu na referentno magnetno polje, pre merenja je izvedena i kriva temperaturne kompenzacije. Primena temperaturne kompenzacije se smatrala neophodnom, imajući u vidu da je ovaj tip senzora osetljiv na varijacije ambijentalne temperature. Sam MLX90393 magnetometar ima ugrađen

termometarski čip, tako da se tokom merenja može beležiti i temperatura prema kojoj će se izvršiti sama temperaturna kompenzacija.



Slika 3.7 Kalibracija Melexis MLX90393 Magnetometra na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu



Slika 3.8 Rezultati kalibracije Melexis MLX90393 Magnetometra na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu

3.5 LABORATORIJSKA INSTALACIJA

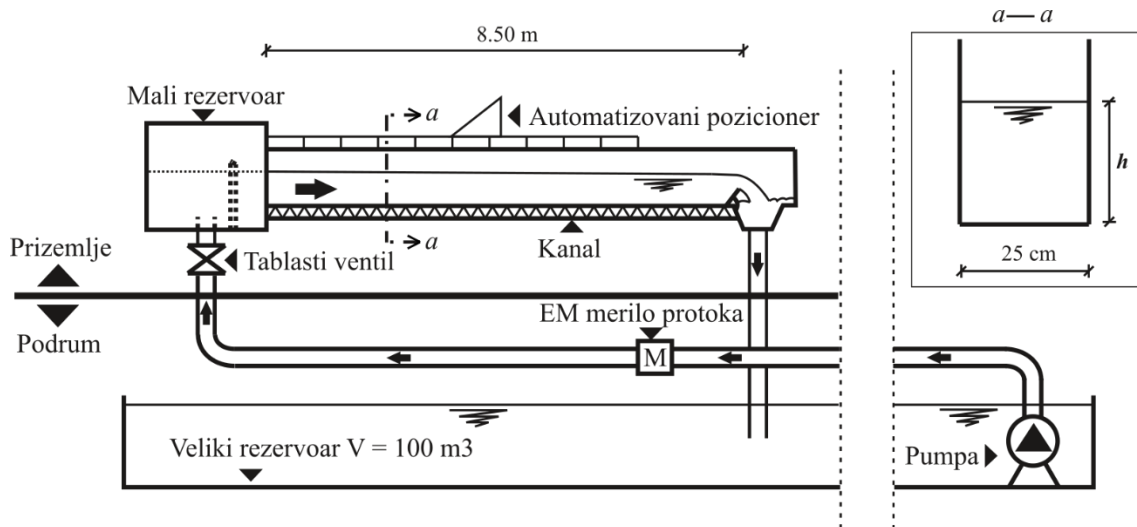
Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja radnih karakteristika i tehničkih parametara ravnih EM senzora, korišćena je adaptirana laboratorijska instalacija u hidrauličkoj laboratoriji, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Fotografija i šematski prikaz adaptirane instalacije su prikazani na Slikama 3.9 i 3.10, respektivno.



Slika 3.9 Fotografija laboratorijske instalacije u prizemlju hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, korišćene za ispitivanje rada Ravnih EM senzora.

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. Dužina mernog kanala je približno 8 m a poprečni presek je pravougaonog oblika sa širinom dna od 0.25 m. Zidovi mernog kanala su napravljeni od stakla, dok je samo dno aluminijumsko. Maksimalni protok u kanalu je 50 L/s a dubina oko 45 cm. Merni kanal je deo zatvorenog recirkulacionog sistema koji pored njega čine i dovodni i odvodni cevovod sa regulacionim i izolacionim ventilima, veliki i mali rezervoar kao i pumpa sa promenljivim brojem obrtaja. Mali rezervoar na uzvodnom kraju kanala služi za umirivanje vode iz dovoda a ujedno i za svaki različit protok Q

predstavlja uzvodni granični uslov sa konstantnim nivoom. Nizvodni granični uslov, u vidu jednoznačne veze protoka Q i visine prelivnog mlaza, diktira položaj prelivne klapne na nizvodnom kraju kanala.



Slika 3.10 Šematski prikaz laboratorijske instalacije korišćene za ispitivanje rada Ravnih EM senzora u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.



Slika 3.11 Ebara pumpa 150-315, u podrumu hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

Voda se u merni kanal podiže iz velikog rezervoara u podrumu laboratorije, pomoću pumpe proizvođača „Ebara“ (Slika 3.11), oznake 150-315. (radne karakteristike na linku http://media.ebaraurope.com/assets/140221_183015_74_enr4_0.pdf). Broj obrtaja radnog kola pumpa, a samim tim i protok u kanalu, se može fino podešavati pomoću frekventnog regulatora koji se nalazi u prizemlju hidrauličke laboratorije. Potisni cevovod je izrađen od čeličnih cevi prečnika 200 mm, ukupne dužine od približno 30 m. Na potisnom cevovodu se nalazi i referentni ili etalonski EM senzor (ili merilo) protoka, čije karakteristike su detaljno predstavljene u poglavlju 3.5.1. Pred sam ulazak u mali rezervoar, nalazi se regulacioni tablasti ventil, koji se takođe može koristiti za kontrolu protoka u kanalu. Dubina vode u kanalu, na mestu ravne EM sonde, se meri pomoću merne igle. Iznad kanala izrađen je automatizovani pozicioner mernih instrumenta, koji je detaljnije opisan u poglavlju 3.5.2.

3.5.1 ETALONSKO CEVNO EM MERILO PROTOKA

Etalonsko cevno EM merilo protoka se nalazi na cevi koji spaja veliki rezervoar i mali umirujući rezervoar odnosno merni kanal. U eksperimentima je korišćen kao referentno merilo za protok Q odnosno, u kombinaciji sa mernom iglom, srednju profilsku brzinu V . Model EM merila protoka je Aquaflux F/6, proizvođača „Krohne“, sa deklarisanom tačnošću od 0.3% za opseg protoka od 6 – 212 L/s (Slika 3.12 Levo). Deklarisana tačnost EM merila protoka se može usvojiti za referentnu ukoliko se uređaj kalibriše prema proceduri definisanoj standardom ISO9104 (ISO, 1991). Međutim za potrebe ispitivanja ravne EM sonde, etalonsko EM merilo je korišćeno u proširenom radnom opsegu 2 - 212 L/s. Vrednost greške u dodatom opsegu 2 – 6 L/s, raste kako protok opada (za protok 2 L/s – tačnost je 1%) i može se aproksimirati polinomom drugog reda. Za procenu greške odnosno neodređenosti izmerenog protoka, u proširenom opsegu, korišćena je navedena aproksimacija za protoke od 2 – 6 L/s i konstantna vrednost za standardan opseg 6 – 212 L/s.

Senzor Aquaflux F/6 je povezan sa pretvaračem, logerom i displejom IFC 110 koji se nalazi u prizemlju hidrauličke laboratorije (Slika 3.12 Desno). Frekvencija uzorkovanja je 1 s, a postoji i mogućnost praćenja ukupne protekle zapremine u određenom vremenskom periodu. Referentna vrednost u laboratorijskim eksperimentima,

predstavljenim u ovoj disertaciji, je dobijena kao integral protoka u unapred definisanom vremenskom periodu (obično 30, 60 ili 120 s), podeljen sa dužinom vremenskog perioda.



Slika 3.12 Levo) EM senzor protoka Aquaflux F/6 na potisnom cevovodu u podrumu hidrauličke laboratorije; Desno) Pretvarač, logger i displej IFC 110 u prizemlju hidrauličke laboratorije

3.5.2 AUTOMATIZOVANI POZICIONER

Automatizovani pozicioner na mernom kanalu (Slika 3.13) je konstruisan posebno za potrebe eksperimentalnih istraživanja prikazanih u ovoj doktorskoj disertaciji. Upotrebom automatizovanog pozicionera u merenjima fizičkih veličina u tački, omogućava se veća efikasnost, tačnost i ponovljivost u pozicioniranju različite merne opreme unutar ograničenog analiziranog prostornog domena. U okviru analiza predstavljenih u ovoj disertaciji, pozicioner je korišćen za upotrebu ADV Vectrino+ sonde za merenje vektora brzine i Melexis MLX90393 senzora za merenje vektora magnetnog polja.

Navedeni ograničeni prostorni domen se može tumačiti kao radna zapremina mernog kanala, odnosno deo kanala u kojem je ovom instalacijom omogućeno automatizovano pozicioniranje merne opreme. Dužina radne zapremine je oko 3.70 m a širina i visina iznose 370 mm. Praktično ograničenje za tačkasta merenja uz zid mernog kanala, unutar radne zapremine (širine 250 mm), predstavljaju konstrukcije samih mernih instrumenata. Tako je efektivna radna zapremina za Vectrino sondu manje širine i iznosi oko 180 mm dok je kod Melexis magnetnometra ona nešto veća, sa širinom 190 mm.



Slika 3.13 Mapiranje magnetnog polja Flat DC-2 EM senzora brzine uz pomoć automatizovanog pozicionera i Melexis MLX90393 Magnetometra

Noseći elementi pozicionera su izrađeni od konstruktivnih aluminijumskih profila, dok je na postojećem kanalu dodatna noseća konstrukcija izrađena od kutijastih čeličnih profila (Slika 3.13). Kretanje pozicionera duž kanala je ručno, preko teflonskih ležajeva duž kružne šine. Kretanje u pravcima poprečnim smeru tečenja vode se kontroliše pomoću dva step motora koji pokreću nosače na dva unakrsna linearna sistema sa vretenima, proizvođača IGUS. Kontrola step motora se vrši pomoću kontrolne jedinice smeštene unutar razvodne kutije koja se nalazi na unutrašnjem boku konstrukcije pozicionera. Kontrolna jedinica se, micro USB - USB kablom, povezuje na računar, pa se komunikacija, odnosno upravljanje kontrolnom jedinicom, može obaviti preko odgovarajućeg računarskog softvera. Tokom eksperimentalnog istraživanja, upravljanje automatizovanim pozicionerom je vršeno preko GUI-ja (eng. Graphical User Interface) razvijenog u MATLAB okruženju. Preko GUI-ja omogućeno je zadavanje brzine kretanja i pređenog puta nosećih elemenata linearnih sistema. Za mapiranje polja brzine ili magnetnog polja, razvijeni su odgovarajući algoritmi za automatizovano pomeranje.

3.6 ANALIZA MERNE NEODREĐENOSTI

Tradicionalno se, za kvantitativnu ocenu valjanosti nekog izmerenog podatka, koristi veličina greške merenja. Greška merenja se definiše kao razlika između izmerene vrednosti neke veličine i njene tačne vrednosti. Iako je sama definicija greške merenja jasna, ona sadrži u sebi jednu krupnu manu. Naime, postavlja se pitanje: Kada mi (korisnici) znamo tačnu vrednost neke veličine? Mofat (Moffat, 1988) navodi da jedine situacije, u realnom životu, u kojima se tvrdilo da se poznaju i tačne i merene vrednosti, su one u kojima se određeni uređaji ili eksperimenti, uslovno rečeno, kalibrišu ili „verifikuju“ u poređenju sa etalonskim eksperimentima ili sa vrednostima dobijenim analitičkim rešenjem osnovnih zakona održanja. Nasuprot tome, u većini situacija, korisnik ne može sa velikom sigurnošću tvrditi šta je zaista greška merenja, već jedino da proceni šta greška može biti – odnosno opseg u kojem očekuje da će se vrednost greške naći.

Alternativno, za kvantitativnu ocenu valjanosti izmerenog podatka, u ovoj disertaciji je korišćena i predložena za standardnu upotrebu, veličina merne neodređenosti. Smatra se da je prva definicija merne neodređenosti data još u 19. veku (Airy, 1879; Kline i McClintock, 1953), gde je pojam merne neodređenosti definisan kao „kao moguća vrednost greške merenja“. Na dalje, ovde se pod mernom neodređenošću, zapravo podrazumeva opseg merne neodređenosti, koji opisuje opseg u okolini izmerene vrednosti u kojem se veruje da se nalazi tačna vrednost merene veličine. Trenutno se koristi definicija, novijeg datuma, usvojena i u referentnom dokumentu „Uputstva za procenu merne neodređenosti“ (eng. „Guide to the expression of Uncertainty in Measurements“ iliti GUM). Tako je merna neodređenost definisana kao „parametar dodeljen rezultatu merenja koji opisuje rasipanje vrednosti koje se mogu opravdano dodeliti merenoj veličini“.

Pri ispitivanju radnih karakteristika mernih uređaja, analiza merne neodređenosti omogućava kvantitativno definisanje kapaciteta, odnosno tačnosti i ponovljivosti, ispitanih uređaja. Kako je disertacija posvećena analizama ravnih EM senzora brzine (protoka), analiza merne neodređenosti je iskorišćena za etaloniranje radnih karakteristika ovih uređaja u laboratorijskim uslovima. Treba napomenuti da pandan podacima o

tačnosti i ponovljivosti, predstavljaju sistematska i statistička komponenta kombinovane merne neodređenosti. Sama kombinovana merna neodređenost predstavlja jedinstven parametar preko kojeg su izraženi uticaji tačnosti i ponovljivosti samog instrumenta, kao i korišćenog etalonskog merila. Na ovaj način je omogućeno i kvantitativno poređenje sa konkurentnim mernim sistemima, prvenstveno papučastim ADV sensorima. Korak-po-korak opis opšte procedure za određivanje merne neodređenosti je dat u GUM-u (JCGM, 2008). U kontekstu etaloniranja merne neodređenosti senzora u laboratorijskim uslovima, detaljniji opis procedura za određivanje komponentata merne neodređenosti je prikazan u narednom poglavlju 4.

4 LABORATORIJSKO ISPITIVANJE MERNE NEODREĐENOSTI RAVNIH EM SENZORA

U okviru ovog poglavlja, predstavljeni su rezultati laboratorijskog ispitivanja merne neodređenosti, odnosno radnih karakteristika, kojima se opisuje tačnost, ponovljivost kao i robusnost ravnih EM senzora, u kontrolisanim uslovima. Za kvantifikovanje navedenih radnih karakteristika, u ovoj disertaciji je predložena upotreba parametra merne neodređenosti. U poglavlju 3.6, je navedeno da se kao direktni pandani tradicionalnim vrednostima tačnosti i ponovljivosti nekog mernog instrumenta, mogu koristiti sistematska i statistička komponenta merne neodređenosti. Imajući u vidu, da su ravni EM senzori projektovani za upotrebu u kanalizacionim sistemima, od interesa je ispitati i robusnost instrumenata odnosno kapacitet za rad u složenim i nepovoljnim uslovima. Rukovodeći se definisanim ciljevima, laboratorijska ispitivanja radnih karakteristika su sprovedena u dve etape:

- *Etaloniranje merne neodređenosti u standardnim uslovima* – Kombinovana merna neodređenost definisana u standardnim laboratorijskim uslovima, predstavlja jedinstveni parametar kroz koji se opisuje tačnost i ponovljivost ravnih EM senzora. Treba napomenuti da se kombinovana merna neodređenost, dobijena kroz ove eksperimente, praktično određuje u idealnim uslovima. Dobijena vrednost predstavlja minimalnu mernu neodređenost koja se može javiti u terenskim uslovima (ujedno i vrednost koju proizvođače navode u specifikacijama proizvoda). Imajući navedeno u vidu, kroz ovo eksperimentalno ispitivanje, praktično su definisane merodavne radne karakteristike EM senzora, preko kojih je moguće porediti ovaj tip instrumenata sa konkurentnim.
- *Etaloniranje merne neodređenosti u uslovima sedimentacije* – Druga etapa laboratorijskog ispitivanja ravnih EM senzora je posvećena proverbi robusnosti, odnosno kapaciteta senzora za rad u složenim i nepovoljnim uslovima. Parametar merne neodređenosti je, slično kao i u prvom delu, korišćen za kvantifikovanje radnih karakteristika EM senzora pri radu u uslovima sedimentacije. Sedimentacija je razmatrana kroz kontekst kanalizacionih sistema, pa je tako

analiziran rad u slučaju prekrivanja kućišta senzora poroznim sedimentom, kao i u slučaju kombinacije poroznog sedimenta i plastičnih kesa. Na ovaj način su proverene dodatne mogućnosti ravnih EM senzora, koje potencijalno mogu izdvojiti ovaj tip urađaja u odnosu na konkurentne.

Rezultati predstavljeni u ovom poglavlju predstavljaju osnovu za ispitivanje mogućnosti unapređenja tačnosti merenja protoka, pomoću ravnih EM senzora.

4.1 MERNÁ NEODREĐENOST U STANDARDNIM USLOVIMA

Da bi se došlo do vrednosti merne neodređenosti, koja se može pripisati nekom instrumentu, neophodno je etaloniranje odnosno poređenje sa etalonskom vrednošću, koja ima barem za red veličine nižu neodređenost. Generalno, etalonska merenja srednje profilske brzine V (ili protoka Q) nisu dostupna na terenu, zbog čega je neophodno definisati mernu neodređenost u laboratorijskim uslovima. Nekoliko laboratorijskih ispitivanja je izvršeno sa ciljem analize merne neodređenosti senzora protoka u otvorenim tokovima. Maheepala i saradnici (2001) su kalibrisali samo papučaste ADV senzore u mernom kanalu, nakon čega su ih postavili u kolektore kišne kanalizacije. Heiner i Vermeyen (2012) su ispitali 9 različitih senzora, uključujući jedan papučasti 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 navedena istraživanja dovela do novih saznanja o neodređenosti merenja protoka u otvorenim tokovima, nijedna se nije detaljno bavila EM sensorima.

U ovom delu disertacije, analiziran je rad ravnih EM senzora u standardnim uslovima. 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 poglavlja je formirana na sledeći način: U okviru podpoglavljá 4.1.1, ukratko je opisana korišćena laboratorijska instalacija, eksperimentalna procedura za ispitivanje kao i metodologija za procenu komponenata merne neodređenosti. Na kraju

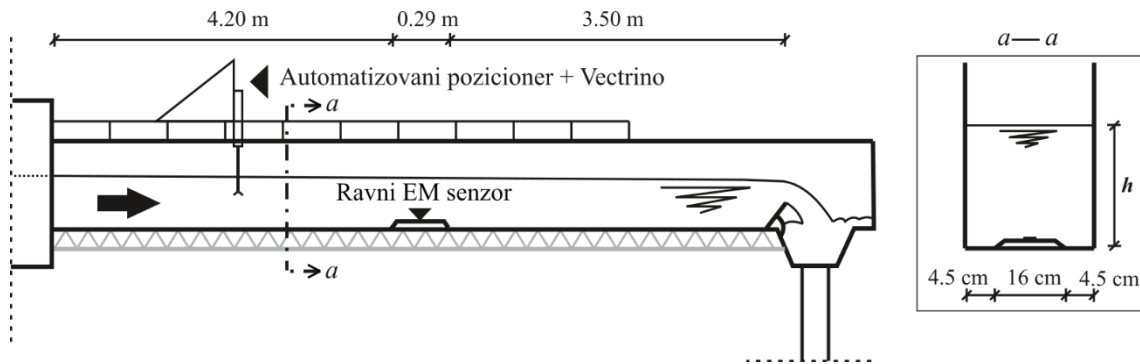
poglavlja 4.1.1 uveden je i parametar faktor umanjjenja merne neodređenosti pre kojeg je izvršeno poređenje sa papučastim ADV uređajima. U okviru poglavlja 4.1.2 prikazani su rezultati kao i odgovarajuća diskusija. Konačno u poglavlju 4.1.3 predstavljeni su zaključci izvedeni iz predstavljene analize.

4.1.1 METODOLOGIJA

Osnove metodološkog pristupa za eksperimentalno određivanje komponenata merne neodređenosti ravnih EM senzora, u standardnim uslovima eksploatacije, su predstavljene u ovom poglavlju.

4.1.1.1 LABORATORIJSKA INSTALACIJA

Za potrebe etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora u standardnim uslovima eksploatacije, korišćena je laboratorijska instalacija opisana u okviru poglavlja 3.5. U laboratorijski kanal, dužine 8,0 m i širine 0,25 m, instalirana je standardna Flat DC-2 EM sonda (Slika 3.1 Levo), na nekih 4,20 m od uzvodnog malog rezervoara, odnosno 3,50 m od nizvodne prelivne klapne (Slika 4.1). EM sonda je postavljena duž osovine kanala, na udaljenosti od 4,5 cm od bočnih zidova kanala. Nagib kanala je relativno mali, oko 0,01 %, dok je efektivni Manningov koeficijent hrapovosti varirao oko vrednosti od $0,010 \text{ m}^{-1/3}$. Protok u kanalu je kontrolisan pomoću pumpe sa frekventnom regulacijom obrtaja kao i 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 cevnog EM merila protoka instaliranom na dovodnom cevovodu (poglavlje 3.5.1). Merna igla sa nonijusom, postavljena upravno na kanal iznad ravnog EM senzora, je korišćena za etalonsko merenje 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 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.



Slika 4.1 Šematski prikaz laboratorijske instalacije korišćene za ispitivanje rada Flat DC-2 (ravnog) EM senzora u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

4.1.1.2 EKSPERIMENTALNA 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 otvaranjem tablastog ventila. Imajući u vidu da je fokus istraživanja na merenjima srednje profilske brzine, etalonska srednja profilska brzina V_B je sračunata iz etalonskog merenja protoka Q_{EMF} , dubine h_B i poznate relacije $A(h_B)$:

$$V_B = \frac{Q_{EMF}}{A(h_B)} \quad (4.1)$$

Pre samih merenja, dostignuti su ustaljeni uslovi tečenja za svaki od ispitanih protoka (Slika 4.2). U proseku je za obezbeđivanje ustaljenosti u mernom kanalu bilo potrebno između 5 i 10 minuta. Kad bi se dostigla ustaljenost toka, ona je održavana u periodu trajanja od minimum 2 minuta – ovaj period je nazvan „merni period“ i označen je sa j . Jedinствена dubina $h_{b,j}$ je zabeležena za svaki merni period, dok je na svakih 30 s zabeleženo i -to merenje sa ravnim EM senzorom, $V_{EMV,i,j}$. Porelno, protok na etalonskom cevnom EM merilu je beležen sa frekvencijom od 1 Hz i naknadno osrednjen, 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.



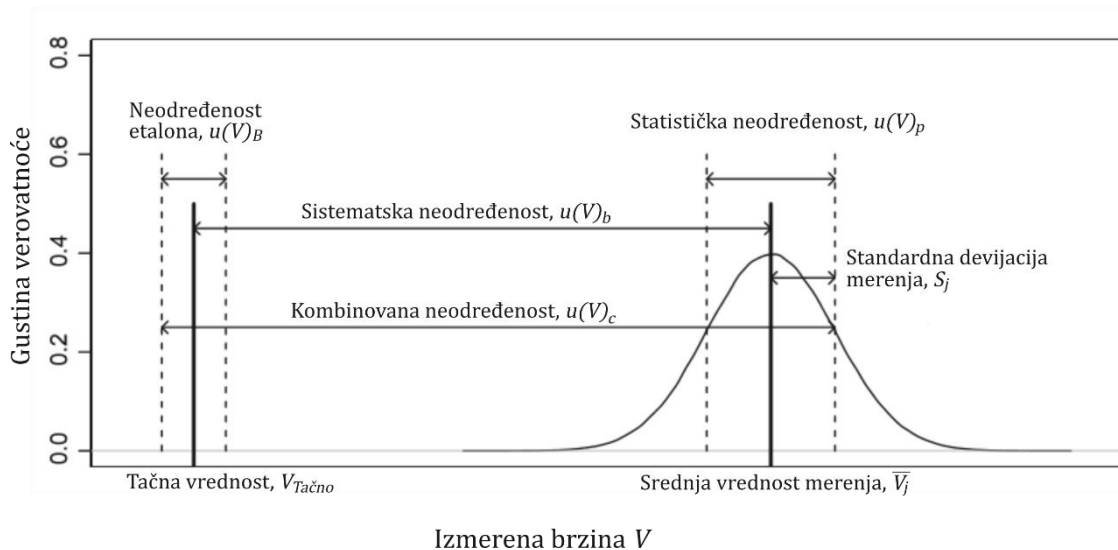
Slika 4.2 Fotografije sa ispitivanja rada Flat DC-2 (ravnog) EM senzora u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

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 profilaska brzina od i merenja u mernom periodu j (j -na 4.1), označena sa $\overline{V_{B,j}}$.

4.1.1.3 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 komponenata kombinovane merne neodređenosti (poglavlje 3.6), odnosno sistematske, statističke i etalonske neodređenosti izmerenog podatka o brzini. Za potrebe disertacije, predložena procedura je dodatno unapređena kako bi se umanjila vrednost etalonske neodređenost. Međutim, osnova procedure je zadržana, čime je omogućeno direktno poređenje karakteristika između, ovde analiziranih ravnih EM senzora i papučastih ADV senzora.

Za kvantitativnu ocenu tačnosti i ponovljivosti 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 merenje 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 4.3).



Slika 4.3 Grafički prikaz komponenti merne neodređenosti i kombinovane merne neodređenosti, dodeljenih merenjima srednje profilske brzine V , adaptirano od Coleman i Steele (1995) i Aguilar i saradnici (2016).

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 podataka na određenoj laboratorijskoj instalaciji.

4.1.1.3.1 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 korišćenjem jednačine (4.1) i etalonskog cevnog EM merila protoka u kombinaciji sa mernom iglom. Etalonsko EM merilo protoka (poglavlje 3.5.1) može da obezbedi podatke o protoku sa niskom mernom neodređenošću u cevima pod pritiskom, ukoliko je redovno kalibrisan prema standardu (ISO9104, 1991) i ako su zadovoljene preporuke proizvođače o nizvodnoj i uzvodnoj udaljenosti promena geometrije cevodva. Glavna prednost u odnosu na primenu Venturijevog manometra, korišćenog u radu 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 (Ivetić i saradnici, 2018).

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 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 etalonske merne neodređenosti:

$$u(V)_B = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial Q}\right)^2 u(Q)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h}\right)^2 u(h)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial w}\right)^2 u(w)^2} \quad (4.2)$$

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 (4.2) 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.

4.1.1.3.2 SISTEMATSKA NEODREĐENOST

Sistematska neodređenost izmerenog podatka o brzini se definiše kao razlika između etalonske vrednosti ($\overline{V}_{B,j}$) i srednje vrednosti i merenja u j -tom mernom periodu ($\overline{V}_{EMV,j}$). Vrednost sistematske neodređenosti serije merenja se može sračunati kao standardna greška reziduala merenja, koristeći jednačinu za kvadratni koren iz srednjeg kvadratnog odstupanja:

$$u(V)_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\overline{V}_{B,j} - \overline{V}_{EMV,j})^2}{N - 2}} \quad (4.3)$$

Prvi korak u analizi sistematske neodređenosti, prema preporuci Aguilar-a i saradnika (2016) je vizualno poređenje izmerenih vrednosti $\overline{V}_{EMV,j}$ i odgovarajućih etalonskih vrednosti $\overline{V}_{B,j}$, koristeći referentnu liniju idealnog slaganja (linija 1:1). Nakon toga, da bi se sagledali uticaji hidrauličkih parametara, reziduali merenja ($\overline{V}_{B,j} - \overline{V}_{EMV,j}$) 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 je ispitano prisustvo trenda na 1:1 graficima kao i graficima sa rezidualima merenja. Kako bi se uklonili sistematski uticaji od navedenih parametara, izvode se odgovarajuće korekcione ili transformacione funkcije za $\overline{V}_{B,j}$, kao funkcije $\overline{V}_{EMV,j}$. 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 (4.3) sračunata je korigovana sistematska neodređenost, transformisanih merenja, $u(V)_{b,adj}$. Treba imati u vidu da se redukovanjem sistematske neodređenosti, ravni EM senzori praktično „lokalno“ kalibrišu (ili rekaliبریšu) na uslove u mernom kanalu.

4.1.1.3.3 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 pojedinih mernih perioda 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 su 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 serije se može izraziti kao medijana svih sračunatih $S_{EMV,j}$, budući da je medijana robusna na granične slučajeve.

4.1.1.3.4 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 $u(V)_B$:

$$u(V)_c = \sqrt{u(V)_{b,adj}^2 + u(V)_p^2 + u(V)_B^2} \quad (4.4)$$

4.1.1.4 POREĐENJE SA DOPLER 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 poređenje 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 (Ivetić i saradnici, 2018):

$$URF_x = \frac{u(V)_{x,ADV}}{u(V)_{x,EMV}} \quad (4.5)$$

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

4.1.2 REZULTATI I DISKUSIJA

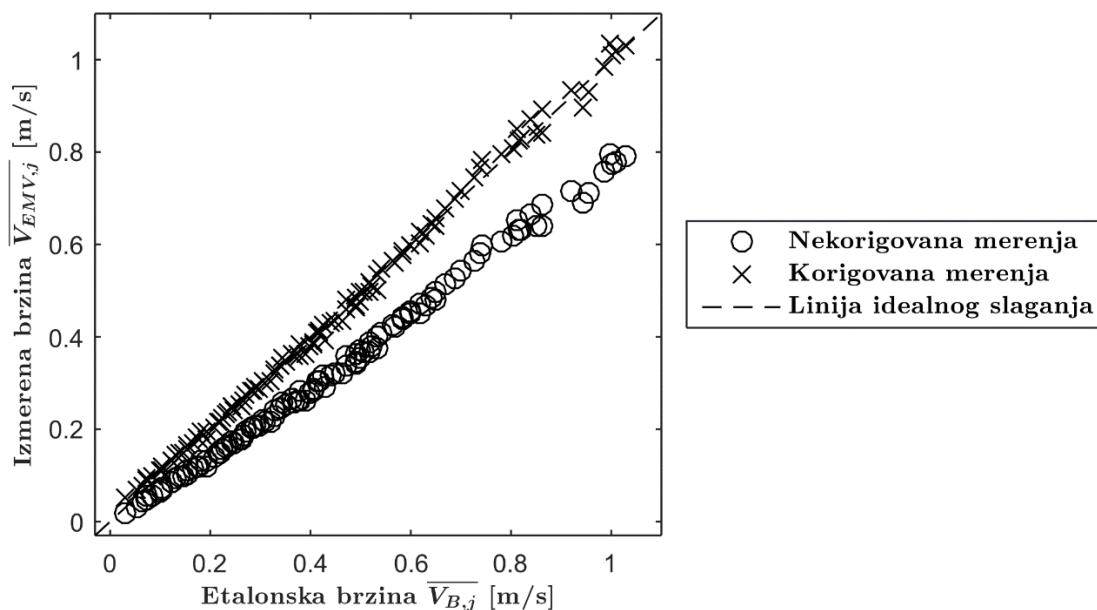
Nakon obavljenih eksperimentalnih istraživanja, prvo je sprovedena vizualna inspekcija rezultata. Mereni podaci, dobijeni sa ravnog EM senzora, su pokazali da je sonda adekvatno reagovala na promene protoka, kao i da je postoji linearna zavisnost između izmerenih i etalonskih brzina. Takođe, ustanovljeno 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 4.1.1.3.1. 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.

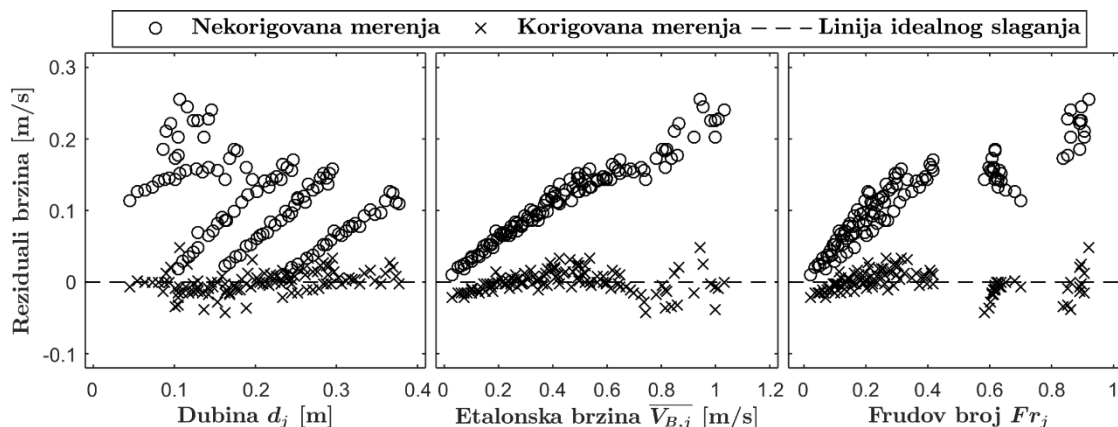
4.1.2.1 SISTEMATSKA NEODREĐENOST

Prva razmatrana komponenta merne neodređenosti je sistematska neodređenost. U skladu sa procedurom predstavljenom u poglavlju 4.1.1.3.2, izvedene su odgovarajuće korekcione (transformacione) funkcije za redukovanje sistematske neodređenosti i dobijanje $\overline{V_{EMVad,J}}$. Rezultujući kvadratni koren iz srednjeg kvadratnog odstupanja

korigovanih merenja je sračunat i označen sa $u(V)_{b,adj}$ (korigovana sistematska neodređenost).



Slika 4.4 Nekorigovana i korigovana merenja brzine pomoću ravne EM sonde naspram etalonske profilske brzine su 1:1 linijom idealnog slaganja



Slika 4.5 Reziduali merenja brzina pomoću ravnih EM sondi sa linijom idealnog slaganja u zavisnosti od dubine, etalonske profilske brzine i Frudovog broja

Tabela 4.1 prikazuje poređenje vrednosti nekorigovane i korigovane sistematske neodređenosti, zajedno za odgovarajućom korekcionom funkcijom. Na Slici 4.4 su prikazane izmerene vrednosti brzine pomoću ravne EM sonde, pre korekcije $\overline{V_{EMV,j}}$ i nakon $\overline{V_{EMVadj,j}}$ u funkciji od etalonskih merenja srednje brzine $\overline{V_{B,j}}$, sa referentnom 1:1

linijom idealnog slaganja. Može se primetiti da nekorigovana i korigovana merenja brzine sa ravnom 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 4.1), 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.

Da bi se ustanovila priroda, odnosno poreklo, sistematskog uticaja hidrauličkih parametara, na Slici 4.5, su prikazane zavisnosti između reziduala merenja i vrednosti dubine, etalonske profilske brzine i Frudovog broja. Može se uočiti jasna zavisnost između reziduala i etalonske profilske brzine, koja je naknadno eliminisana primenom linearnih korekcionih funkcija. Takođe može se uočiti da vrednosti reziduala imaju opadajući trend sa porastom dubine, što se može pripisati činjenici da su manje brzine zabeležene pri većim dubinama.

Prethodno je napomenuto da redukovanje, odnosno korekcija, sistematske neodređenosti može da se tumači kao lokalna kalibracija (rekalibracija) ravnih EM senzora. Prvobitno je smatrano da je korekciju neophodno sprovesti zbog činjenice da je širina mernog kanala nedovoljna da prihvati celu kontrolnu zapreminu ravnog EM senzora (budući da se magnetno polje senzora prostire na širini većoj od 0,25 m). Međutim, naknadno je utvrđeno da je uzrok odstupanja dobijenih vrednosti od etalonskih merenja, zapravo neadekvatna fabrička kalibracija ravnih EM senzora. Naime, raspored brzina uz čvrstu konturu ima logaritamski oblik, dok se kalibracijom prema standardu ISO 3455 simuliraju uslovi homogenog strujnog polja. Konačno, na osnovu navedenih činjenica, može se zaključiti da je pre instalacije ovih uređaja u terenskim uslovima, neophodno sprovesti lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora kojim bi se uklonio uticaj neadekvatne fabričke kalibracije kao i ostalih uticaja geometrije odnosno rasporeda brzine.

Tabela 4.1 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

Vrednosti nekorigovane i korigovane sistematske neodređenosti su upoređene sa rezultatima dobijenim za dva papučasta ADV senzora (Tabela 4.1), 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

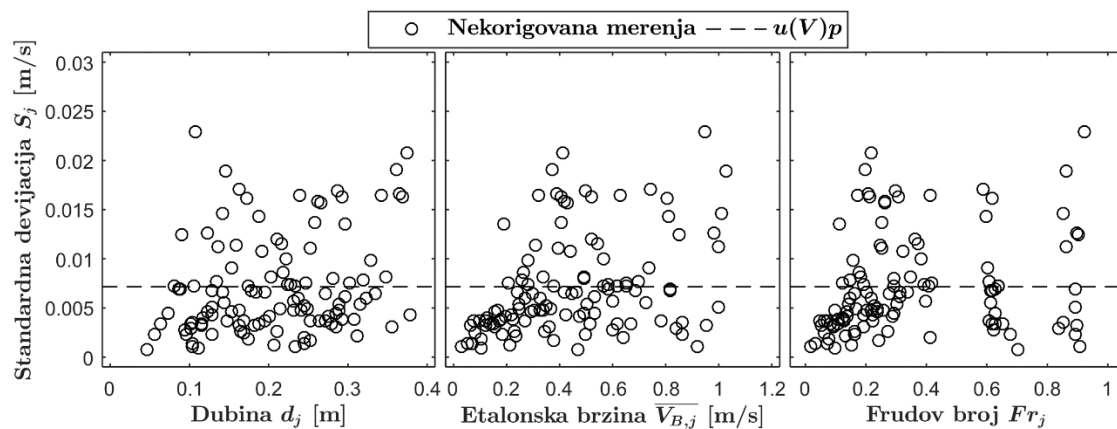
EM senzora posledica neadekvatne fabričke kalibracije, što nije slučaj kod papučastih ADV senzora. Sa druge strane, vrednosti korigovane sistematske neodređenosti praktično pružaju uvid u potencijal primene ravnih EM senzora. Može se videti da ukoliko se ravni EM senzor lokalno kalibriše (rekalibriše), 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 4.5, 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, pod uticajem uspora ili povratnog toka.

4.1.2.2 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 4.6). Na dijagramima se može primetiti da ne postoji 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 nehidraulički 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 4.1 se može videti da je statistička neodređenost

ravnih EM senzora dosta niža nego kod ADV senzora. Faktor smanjenja statističke neodređenosti URF_p iznosi 2.4 i 10.6 u poređenju sa ADV sensorom A i B, respektivno.



Slika 4.6 Standardne devijacije merenja brzina pomoću ravnih EM sonde sa statističkom neodređenošću u zavisnosti od dubine, etalonske profilske brzine i Frudovog broja.

4.1.2.3 KOMBINOVANA NEODREĐENOST

Doprinosi od komponenta merne neodređenosti, etalonske, sistematske i statističke su agregirani u jedinstvenu vrednost kombinovane merne neodređenosti. U Tabeli 4.1 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 bolje radne karakteristike u odnosu na papučaste ADV. Glavni razlog, verovatno leži u prirodi mernih tehnologija, gde kod EM senzora postoji jasan, i fizički zasnovan, integrativni princip rada, što nije slučaj kod ADV uređaja.

4.1.2.4 PRAKTIČNI ASPEKT REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Rezultati laboratorijskog etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora ukazuju na značajne prednosti u pogledu radnih karakteristika pri merenju protoka u hidrotehničkim sistemima sa otvorenim tokovima. Korišćenjem, u osnovi iste, procedure za etaloniranje merne neodređenosti, prethodno primenjene na papučastim ADV sensorima, omogućeno je nepristrasno poređenje radnih 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, mogu da rade sa dubinama od svega nekoliko cm (4 cm) kao i pri malim brzinama (3 cm/s) (Slika 4.4 i Slika 4.5, Tabela 4.1).
- Ravni EM senzori su linearni u ispitanom opsegu brzina (0 – 1.1 m/s). Ova bitna osobina, omogućava primenu jednostavnih linearnih korekcionih funkcija (Tabela 4.1) za uklanjanje sistematske neodređenosti mernih podataka. Linearnost je još jedna prednost u odnosu na papučaste ADV senzore.
- U odnosu na papučaste ADV senzore, ravni EM uređaji su stabilniji i ponovljiviji, što je dokazano vrednostima Faktora smanjenja statističke neodređenosti $URF_p > 2.4$, uprkos tome što su korišćeni kraći merni intervali (Slika 4.6 i Tabela 4.1).
- Nakon instalacije ravnih EM senzora, potrebno je sprovesti lokalnu kalibraciju (rekalibraciju) uređaja kako bi se minimizirali sistematski uticaji neadekvatne fabričke kalibracije.
- Konačno, nakon lokalne kalibracije (rekalibracije) odnosno uklanjanja sistematske neodređenosti u izmerenim podacima, ravni EM senzori su pokazali veću tačnost nego papučasti ADV uređaji ($URF_c > 2.3$) (Tabela 4.1).

Razlog za dobijene 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.

4.1.3 ZAKLJUČCI

U ovom poglavlju su prikazani rezultati laboratorijskog etaloniranja neodređenosti merenja srednje profilske brzine u otvorenim tokovima, korišćenjem Flat DC-2 (ravne) EM sonde proizvođača „Svet instrumenata“. Upotrebom laboratorijske procedure slične kao u prethodnim istraživanjima (Aguilar i saradnici, 2016), omogućeno je nepristrasno poređenje radnih karakteristika ravnih EM sondi sa popularnijim ADV senzorima. Rezultati laboratorijskog etaloniranja merne neodređenosti su nedvosmisleno ukazali da EM senzori mogu da se koriste kao alternativa ili suplementarna tehnologija, ADV senzorima. Ravni EM senzori su pokazali bolju ponovljivost (preciznost) i višu tačnost merenja srednje profilske brzine, ukoliko se kalibrišu prema uslovima na lokalnom mernom mestu (lokalna kalibracija). 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).

Treba napomenuti da je kroz navedenu analizu, ustanovljeno da postupak fabričke kalibracije prema standardu ISO 3455, nije adekvatan za ravne EM senzore. Prema tome, predlaže se inoviranja postupka fabričke kalibracije. Poželjno bi bilo da se inovirani postupak fabričke kalibracije sprovodi na mernom kanalu, gde se verodostojnije mogu reprodukovati uslovi tečenja kakvi se javljaju na terenu. Takođe, imajući u vidu uočenu osetljivost na raspored brzina, predlaže se i primena neka vrste pred-pozicione analize ili lokalne kalibracije, kojom bi se minimizirali uticaji specifičnosti lokalnih hidrauličkih uslova. Primenom ove procedure, omogućilo bi se efikasnije iskorišćenje potencijala ravnih EM senzora na terenu. Poglavlje 5 je upravo posvećeno razvoju procedure za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora, odnosno unapređenje tačnosti merenja protoka pomoću ravnih EM senzora.

4.2 MERNÁ NEODREĐENOST U USLOVIMA SEDIMENTACIJE

Prethodno, u okviru poglavlja 2.2.2, navedena je činjenica da upotreba papučastih ADV senzora u složenim uslovima tečenja, kakvi se javljaju u kanalizacionim sistemima, vodi do beleženje podataka o srednjoj profilskoj brzini V sa visokom mernom neodređenošću.

Sa druge strane, u prethodnom poglavlju je pokazano da ravni EM senzori poseduju bolje osnovne radne karakteristike. Pored toga, u slučaju malih brzina ili merenja pri malim dubinama, ravni EM senzori imaju jasnu prednost u odnosu na ADV senzore. U poglavlju 2.2.2 konstatovano je da u slučaju papučastih ADV senzora, pojava sedimenta dubine od svega par mm, dolazi do potpunog gubitka signala. Treba napomenuti da, pored nanosa i čvrstog otpada, prekid rada senzora protoka mogu izazvati i plastične kese koje se mogu zadržati na kućištu senzora. Plastične kese u kanalizaciji su česta pojava, pogotovo u zemljama u razvoju (Kavvas, 2002), gde neretko izazivaju razne probleme u radu – uključujući i zapušavanje cevi i kolektora (Wagner, 2017). U ovom poglavlju je razmatrana robusnost ravnih EM senzora, upravo kroz mogućnost upotrebe u uslovima sedimentacije poroznog nanosa, a i zadržavanja plastičnih kesa, preko kućišta senzora.

Kapacitet EM uređaja za rad pod nanosom poroznog sedimenta je ispitan u kontrolisanim uslovima, koriseći rečni pesak različitih dubina. Upotreba rečnog peska se smatra opravdanom budući da su Butler i saradnici (2003) uočili da je većina sedimenta u kišnim kanalizacijama (i nešto manje u kombinovanim kanalizacionim sistemima) neorganskog porekla i rastresita (nema kohezije). Dodatni uticaj plastičnih kesa na rad EM senzora je ispitan tako što su plastični listovi različitih veličina umetnuti u prekrivku od poroznog sedimenta.

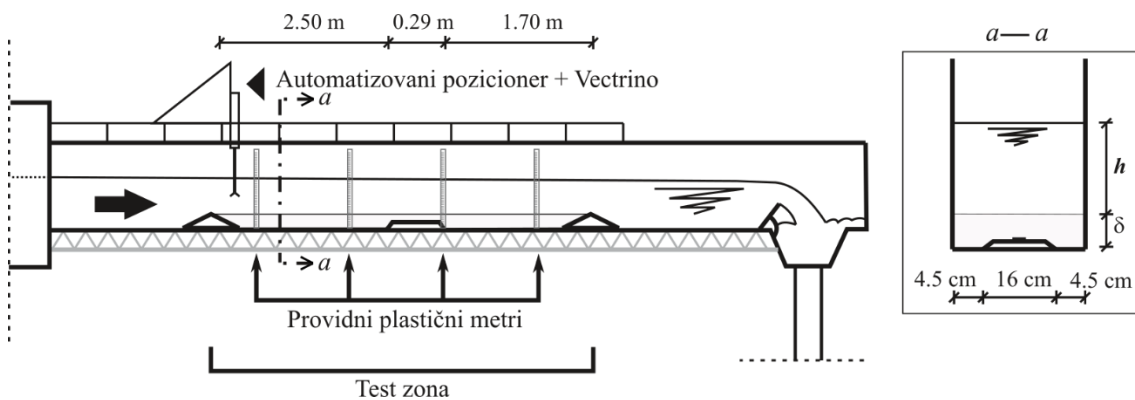
Struktura ovog poglavlja je formirana na sledeći način: U okviru poglavlja 4.2.1., ukratko je opisana korišćena laboratorijska instalacija za ispitivanje rada pod pokrivanjem od poroznog sedimenta sa i bez plastičnih kesa, eksperimentalna procedura za ispitivanje, kao i metodologija za izvođenje Modela Korekcionne Funkcije. U okviru poglavlja 4.2.2. prikazani su rezultati kao i odgovarajuća diskusija. Konačno u poglavlju 4.2.3. su predstavljeni izvedeni zaključci.

4.2.1 METODOLOGIJA

Osnove metodološkog pristupa za eksperimentalno ispitivanje robusnosti ravnih EM senzora, kroz proveru mogućnosti rada u uslovima sedimentacije, su predstavljene u ovom poglavlju.

4.2.1.1 LABORATORIJSKA INSTALACIJA

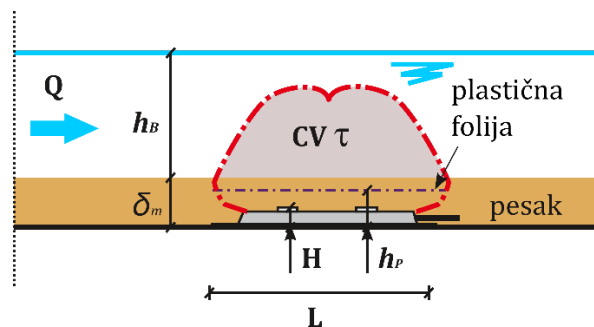
Za potrebe etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora u uslovima sedimentacije, korišćena je laboratorijska instalacija opisana u okviru poglavlja 3.5, uz dodatne modifikacije laboratorijskog kanala (Slika 4.7). Dodatne modifikacije su uključile definisanje „test zone“, unutar kanala, dužine 4,5 m i širine jednake širini kanala 0,25 m. U okviru test zone je postavljen i Flat DC-2 ravni EM senzor, na udaljenosti od 2,50 m od uzvodne granice i 1,70 m od nizvodne granice. U test zonu je na kontrolisan način nanošen rečni pesak, korišćen kao model poroznog sedimenta, sa relativno uniformnom granulometrijskom krivom ($C_u = 3,57$, $C_c = 1,12$, $D_{10} = 0,15$ mm, $D_{50} = 0,48$ mm, $D_{90} = 2,30$ mm). Sastav rečnog peska nije identičan sastavu sedimenta koji se obično nalazi u kišnim i kombinovanim kanalizacionim sistemima, međutim zajedničke su im dve osobine: neorgansko poreklo i odsustvo kohezije. Za potrebe analize uticaja plastičnih kesa, koje se mogu zadržati na kućištu senzora, korišćena je kuhinjska plastična folija postavljena iznad kućišta senzora na visini h_p od dna mernog kanala (Slika 4.8). Detaljan opis postavke unutar test zone laboratorijske instalacije, za slučaj prisustva kako samo poroznog sedimenta, kao i poroznog sedimenta sa plastičnom folijom, je dat u narednim podpoglavljima.



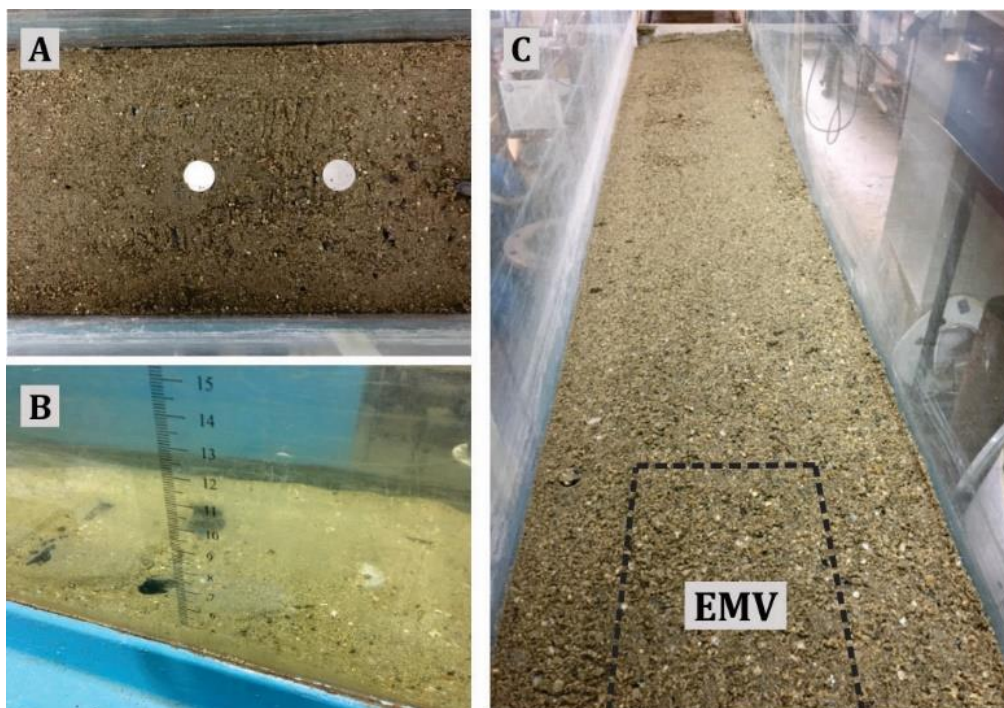
Slika 4.7 Šematski prikaz modifikovane laboratorijske instalacije korišćene za ispitivanje rada Ravnih EM senzora pod pokrivkom od poroznog sedimenta, sa i bez plastičnih kesa.

Etalonska merenja srednje profilske brzine V , u oba slučaja, su obezbeđena na identičan način kao što je opisano u poglavlju 4.1.1.3.1. Takođe, 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.



Slika 4.8 Ilustracija rada ravnog EM senzora sa nadstlojem poroznog sedimenta i uz prisustvo plastične folije.



Slika 4.9 Flat DC-2 (ravna) EM sonda pokrivena peskom debljine A) $\delta_m = 23$ mm B) $\delta_m = 23$ mm, formiranje dina C) $\delta_m = 80$ mm (pozicija ravne EM sonde obeležena isprekidanom linijom)

4.2.1.1.1 ISPITIVANJE UTICAJA POROZNOG SEDIMENTA

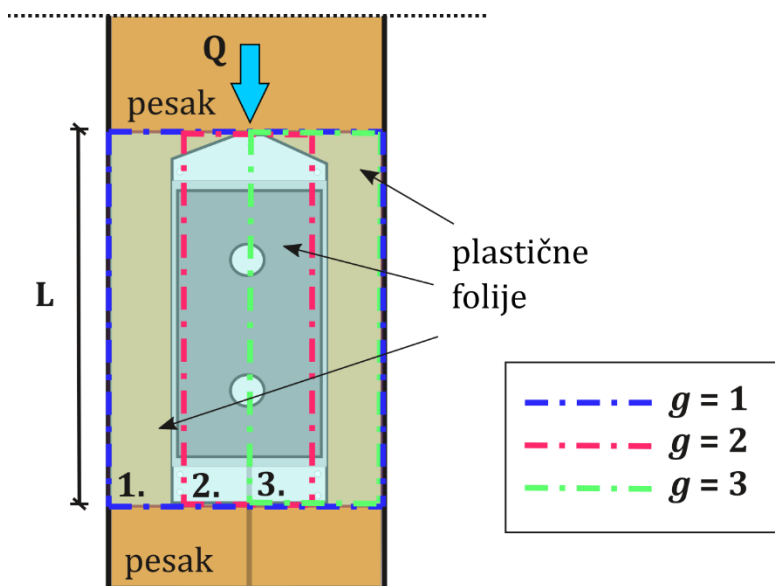
Sprovedeno je $m = 1 \rightarrow M$ (gde je $M = 16$) eksperimenata sa prisustvom isključivo poroznog sedimenta različitih dubina δ_m . Dubina sedimenta u mernom kanalu δ_m je

definisana kao na Slikama 4.7 i 4.8. Korišćene su dubine sedimenta $\delta_m = \{0, 5, 10, 15, 20, 23, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 80 \text{ mm}\}$. Slika 4.9 A prikazuje pogled odozgo na ravni EM senzor pre eksperimenta sa $\delta_m = 23 \text{ mm}$ (dubina sedimenta jednaka visini senzora H_F), dok Slika 4.9 C postavku sa najvećom ispitanom dubinom peska $\delta_m = 80 \text{ mm}$. Dubina sedimenta δ_m u svakom od m eksperimenata je bila konstanta i merena pomoću nekoliko providnih plastičnih metara postavljenih na staklene zidove mernog kanala. Rastojanje između dva plastična metra je u proseku bilo 1.30 m. Dubina sedimenta je takođe kontrolisana pomoću akustične *distance check* funkcije Vectrino ADV-a (Nortek, 2009) kontrolisanom pomoću automatizovanog pozicionera (Slika 4.7). Usvojena je merna neodređenost određivanja dubine sedimenta δ_m od $\pm 1 \text{ mm}$.

4.2.1.1.2 ISPITIVANJE UTICAJA PLASTIČNIH FOLIJA

Pored eksperimenata koji su uključivali prisustvo samo poroznog sedimenta, analiziran je i uticaj prisustva plastičnih kesa, iznad kućišta senzora, na rad ravnih EM senzora. Da bi se kvantifikovao potencijalni uticaj na merenja, sprovedena su $g = 1 \rightarrow G$, gde je $G = 3$, testa u kojima je list kuhinjske plastične folije postavljen iznad kućišta senzora na visini $h_p = 30 \text{ mm}$ od dna mernog kanala (Slika 4.8). Kako bi se omogućio fiksiran položaj plastične folije, listovi su prekriveni nadslojem peska od 5 mm. Razmatrane su tri varijante položaja i veličine listova plastične folije (Slika 4.10):

1. $g = 1$ - Dimenzije lista plastične folije 280 * 250 mm. Najnepovoljniji slučaj u kome je plastična folija postavljena celom širinom kanala, dužine Flat DC-2 senzora, iznad samog senzora (Slika 4.11 Levo).
2. $g = 2$ - Dimenzije lista plastične folije 280 * 125 mm. U ovoj varijanti širina plastične folije je prepolovljena, tako da zauzima polovinu širine kanala. Folija je postavljena iznad senzora duž ose mernog kanala (Slika 4.11 Desno).
3. $g = 3$ - Dimenzije lista plastične folije 280 * 125 mm. Razlika u odnosu na prethodnu varijantu su ogleđa u tome što je folija sad postavljena asimetrično uz levu ivicu mernog kanala.



Slika 4.10 Ilustracija pozicija plastičnih folija unutar poroznog sedimenta a iznad ravnog EM senzora za tri ispitane varijante (redni broj varijante g se nalazi u donjem levom uglu plastične folije).



Slika 4.11 Prikaz pozicija listova plastične folije iznad Flat DC-2 (ravnog) EM senzora za varijante: Levo) $g = 1$ - Dimenzije lista plastične folije 280 * 250 mm, Desno) $g = 2$ - Dimenzije lista plastične folije 280 * 125 mm

4.2.1.2 EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

Na identičan način kao u poglavlju 4.1.1.2, 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. Etalonska srednja profilska brzina V_B je sračunata iz etalonskog merenja protoka Q_{EMF} , dubine h_B i poznate relacije $A(h_B)$, koristeći jednačinu (4.1). Brzine, izmerene pomoću Flat DC-2 EM senzora su korigovane korišćenjem korekcionne funkcije iz Tabele 4.1 za potrebe predstavljenih eksperimenata. Drugim rečima, u eksperimentima za potrebe etaloniranja merne neodređenosti u uslovima sedimentacije pretpostavljeno je da je Flat DC-2 EM senzor bio lokalno kalibrisan.

Kako je fokus istraživanja bio na ispitivanju uticaja statičnog sedimenta, sa i bez plastične folije, maksimalna srednja profilska brzina je ograničena na 0.30 m/s. Naime pri većim brzinama pokrenule bi se sitnije frakcije peska, zbog čega bi došlo do formiranja dina. Osim promene hidrauličkih uslova u kanalu (Banasiak, 2008), peščane dine izazivaju nekontrolisane prostorne i vremenske varijacije dubine sedimenta. Treba napomenuti da usled recirkulacije vode iza kruna dina, merenja ravnim EM sondom gube linearnost.

Detalji korišćenih eksperimentalnih procedura, za slučaj prisustva kako samo poroznog sedimenta kao i poroznog sedimenta sa plastičnom folijom, su dati u narednim podpoglavljima.

4.2.1.2.1 ISPITIVANJE UTICAJA POROZNOG SEDIMENTA

U testovima gde je korišćen isključivo porozan sediment, ispitano je $M = 16$ različitih dubina sedimenta. Eksperimenti su sprovedeni opadajućim redosledom, od najveće dubine sedimenta do najmanje. Pesak nije veštački sabijan, samo je gornja površina poravnavana kako bi se postigla konstantna dubina sedimenta δ_m u celoj test zoni. Nakon provere dubine sedimenta, merenja su vršena prema proceduri opisanoj u poglavlju 4.2.1.2. Zbog jasne diferencijacije sa ostalim laboratorijskim eksperimentima, merni period je ovde označen sa k , iako je isti broj merenja i prikupljen $n = 4$. Odgovarajuća analiza merne neodređenosti je sprovedena nad svakim mernim periodom k , gde je $k = 1 \rightarrow N_{sed}$ za svaku ispitanu dubinu sedimenta δ_m . Broj mernih perioda N_{sed} je varirao između 20 i 30 u zavisnosti od δ_m . Srednja vrednost od i kalibrisanih merenja u mernom

periodu k , za dubinu sedimenta δ_m , je označena sa $\overline{V_{EMV,k,m}}$. Analogna etalonska profilska brzina je označena sa $\overline{V_{B,k,m}}$.

4.2.1.2.2 ISPITIVANJE UTICAJA PLASTIČNIH FOLIJA

U eksperimentima koji su uključivali i prisustvo plastičnih folija, ispitane su $G = 3$ tri varijante u kojima je varirana veličina i/ili pozicija folija. Eksperimenti su sprovedeni redosledom predstavljenim u prethodnom poglavlju 4.2.1.1.2, a gornji nadsloj peska (iznad folije) je poravnavan kako bi se obezbedila konstantna dubina sedimenta sa plastičnom folijom. Merni periodi su ovde označeni sa l , a broj merenja i je bio $n = 4$. Analiza je sprovedena nad mernim periodima l , gde je $l = 1 \rightarrow N_{foil}$ za svaku ispitanu varijantu. Broj mernih perioda N_{foil} je varirao između 10 i 15. Srednja vrednost od i kalibrisanih merenja u mernom periodu l , za varijantu g , je označena sa $\overline{V_{EMV,l,g}}$. Analogna etalonska profilska brzina je označena sa $\overline{V_{B,l,g}}$.

4.2.1.3 PROCENA MERNE NEODREĐENOSTI

Analogno analizi predstavljenoj u poglavlju 4.1, kapacitet ravnih EM senzora za rad u uslovima sedimentacije senzora, sa i bez prisustva plastičnih folija, je kvantifikovan korišćenjem veličine merne neodređenosti. Procedura za određivanje vrednosti komponenata merne neodređenosti je identična proceduri predstavljenoj u poglavlju 4.1.1.3. U odnosu na originalni predlog (Aguilar i saradnici, 2016), procedura je unapređena sniženjem vrednosti etalonske neodređenosti $u(V)_B = 0.015$ m/s.

4.2.1.4 PROCENA KAPACITETA SENZORA BRZINE ZA RAD POD POKRIVKOM OD POROZNOG SEDIMENTA

Da bi se odredio kapacitet bilo kog senzora brzine za rad pod pokrivkom od poroznog sedimenta, neophodna je odgovarajuća procedura za etaloniranje koja bi trebalo da odgovori na sledeće pitanje: Koliko tačno može određeni senzor brzine da izmeri srednju profilsku brzinu pod poroznom pokrivkom određenog materijala i određene dubine? Kako slična procedura ne postoji u literaturi, ovde se predlaže upotreba nove procedure

koja se zasniva na izvođenju linearnog regresionog modela, odnosno Modela Korekzione Funkcije (eng. Correction Function Model CFM).

Osnovna pretpostavka za primenu nove procedure i izvođenje CFM-a je da se sistematski uticaj porozne pokrivke određene dubine δ_m , na merenja srednje profilske brzine, može redukovati pomoću odgovarajućih linearnih korekcionih funkcija f_c . Linearne korekzione funkcije su definisane pomoću samo dva parametra, nagiba α i odsečka β . Nagib α , definiše pojačanje izmerene vrednosti (srednje profilske brzine), dok β odgovara klizanju nule usled prisustva poroznog prekrivača. Pošto etaloni nisu dostupni na terenu, izmerene vrednosti srednje profilske brzine se ne mogu korigovati ukoliko ovi parametri korekcionih funkcija nisu poznati. Stoga se ovde postavlja hipoteza da se vrednosti nagiba α i odsečka β , mogu dovoljno tačno modelirati pomoću odgovarajućih meta modela, $f_{amp}(\delta)$ i $f_{zero}(\delta)$, ukoliko su poznati dubina δ i sastav sedimenta. Konačno, pretpostavlja se da se definisanjem CFM-a i merenjem debljine sedimenta δ na mernom mestu gde je postavljen ravni EM senzor, omogućava merenje srednje profilske brzine sa niskom neodređenošću.

Da bi se proverile postavljene hipoteze, 16 eksperimenata je sprovedeno sa različitim dubinama sedimenta od rečnog peska δ_m , kao što je opisano u poglavlju 4.2.1.2.1, na instalaciji opisanoj u poglavlju 4.2.1.1.1. Takođe, predložena je procedura za izvođenje CFM-a za određeni sastav sedimenta:

- 1.) *Analiza merne neodređenosti.* Primena procedure za etaloniranje merne neodređenosti (poglavlje 4.1.1.3) na svakom m -tom skupu izmerenih podataka.
- 2.) *Definisanje korekcionih funkcija.* Izvođenje linearnih korekcionih funkcija $f_{c,m}$ za $\overline{V_{B,k,m}}$ u funkciji od $\overline{V_{EMV,k,m}}$, za redukovanje sistematskog uticaja sedimenta dubine δ_m na merenja srednje profilske brzine. Svaka funkcija $f_{c,m}$ ima oblik:

$$\overline{V_{B,k,m}} = \frac{\overline{V_{EMV,k,m}} - \beta_m}{\alpha_m} \quad (4.6)$$

Gde je α_m [-] nagib korekzione funkcije a β_m [m/s] odsečak za dubinu sedimenta δ_m .

- 3.) *Provera trenda.* Vizualna inspekcija grafika: parametri korekcionih funkcija, nagib α_m i odsečak β_m , u funkciji od dubine sedimenta δ_m . Ako je trend prisutan, neophodno je definisati odgovarajući matematički model za opisivanje α i β , na osnovu izmerenih vrednosti δ_m .
- 4.) *Definisanje granica primene modela parametara α i β .* Očekuje se da male dubine sedimenta δ_m ne utiču na rad senzora, usled tehnologije i konstrukcije samog uređaja (ukupna visina senzora je $H_F = 23$ mm). Vrednost δ_m , pri kojima u merenjima brzine kreće da se javlja sistematska neodređenost, definiše donju granicu primene modela parametara. Sa druge strane, pri velikim dubinama δ_m , dolazi do izražene atenuacije izlaznog signala, što ujedno predstavlja gornju granicu primenjivosti modela. Na ovaj način definiše se opseg vrednosti δ_m , nad kojima će se izvršiti sledeći koraci procedure.
- 5.) *Modeliranje parametara korekcionih funkcija α i β .* Primena linearne i nelinearne regresione analize nad parametrima korekcionih funkcija (nagibom α_m i odsečkom β_m) u zavisnosti od prethodno definisanog skupa dubina sedimenta δ_m . Rezultat primene regresione analize su dva nova meta modela za predikciju parametara: $\alpha_{m,mod} = f_{amp}(\delta_m)$ i $\beta_{m,mod} = f_{zero}(\delta_m)$. Definisanjem ovih modela, ujedno se i definiše Model Korekcionih Funkcija (CFM).
- 6.) *Validacija CFM-a.* Korekcija izmerenih brzina primenom Modela Korekcionih Funkcija $f_{c,m}(\overline{V_{EMV,k,m}}, \alpha_{m,mod}, \beta_{m,mod}, \delta_m)$ i primena procedure za definisanje komponenta merne neodređenosti (poglavlje 4.1.1.3). Kako je merna neodređenost dubine sedimenta definisana opsegom ± 1 mm, korigovana sistematska neodređenost izmerenih brzina, nakon primene CFM-a, je sračunata kao srednja vrednost RMSE-a (kvadratnog korena iz srednjeg kvadratnog odstupanja) dobijenog za δ_m , $\delta_m + 1$ mm i $\delta_m - 1$ mm.
- 7.) *Procena primenjivosti CFM-a.* Konačna procena primenjivosti CFM-a za korigovanje izmerenih brzina, se zasniva na primeni potpuno empirijskog

kriterijuma dve vrednosti korigovane kombinovane merne neodređenosti. Prema ovom kriterijumu, operativna granica ravnog EM senzora, za rad pod poroznim sedimentom, je dostignuta onog trenutka kada vrednost korigovane kombinovane neodređenosti (nakon primene CFM-a) dostigne vrednost jednaku ili veću od dve korigovane kombinovane neodređenosti za rad u standardnim uslovima (0.023 m/s - Tabela 4.1). Tako opseg dubina sedimenta δ , pri kojima ne postoji sistematski uticaj na merenje brzine definiše Neporemećenu zonu (NZ). Prati je opseg dubina sedimenata δ , koje ispunjavaju kriterijum dve vrednosti kombinovane korigovane neodređenosti, koji definiše zonu Primenjivosti Modela (PM). Vrednosti δ , veće od δ koje definiše gornju granicu PM, se nalaze u zoni Neprimenjivosti Modela (NM).

Primenom eksperimentalne procedure definisane u okviru poglavlja 4.2.1.2.1, i procedure za definisanje CFM-a, može se proceniti kapacitet ravnog EM senzora za rad pod nanosom od poroznog sedimenta. Treba napomenuti da je izvođenje CFM-a specifično za svaki pojedini sastav sedimenta kao i model ravnog EM senzora.

4.2.1.5 PROCENA KAPACITETA SENZORA BRZINE ZA RAD POD POKRIVKOM OD POROZNOG SEDIMENTA SA PLASTIČNOM FOLIJOM

Pored sedimentacije preko kućišta senzora, za kanalizacione sisteme je specifičan i problem zadržavanja plastičnih kesa na kućištu senzora za merenje brzine, odnosno protoka. Budući da su plastične kese vodonepropusne, njihovo prisustvo može da spreči rad instaliranih senzora. U slučaju papučastih ADV senzora, plastične kese, ukoliko se nađu iznad primopredajnika, sprečavaju prostiranje ultrazvučnih talasa pa samim tim i registrovanje Doplerovog efekta neophodnog za merenje brzine vode. Sa druge strane, iako uticaj plastičnih kesa na rad EM senzora nije do sada analiziran, pretpostavlja se da ukoliko se plastična kesa nađe iznad kućišta senzora ona može da spreči kretanje pozitivnog i negativnog naelektrisanja ka elektrodama a samim tim i indukovanje izlaznog napona proporcionalnog srednjoj profilskoj brzini.

Uticaj plastičnih kesa je analiziran korišćenjem kuhinjskih plastičnih folija, umetnute u pokrivku od poroznog sedimenta. Ispitane su tri varijante u kojima je plastična folija

postavljena na visini od $h_p = 30$ mm i prekrivena sa nadslojem peska od 5 mm. Na terenu nije praktično, niti jednostavno, odrediti poziciju i veličinu plastične kese koja se zadržala na kućištu senzora. Imajući navedeno u vidu, sprovedeni laboratorijski eksperimenti su korišćeni za bolje razumevanje uticaja plastičnih kesa na rad ravnih EM senzora. Slično kao i u prethodnom poglavlju, nad prikupljenim merenjima je sprovedena procedura za etaloniranje merne neodređenosti (poglavlje 4.1.1.3). Dobijeni rezultati su poređeni sa rezultatima rada pod pokrivkom od čistog poroznog sedimenta sa ekvivalentnom dubinom od $\delta_m = 35$ mm. Ukoliko vrednosti kombinovane korigovane neodređenosti ravnih EM senzora, nakon primene CFM-a za $\delta_m = 35$ mm, ne ispunjavaju prethodno definisani empirijski kriterijum od dve kombinovane korigovane neodređenosti, smatra se da ravni EM senzori nemaju kapacitet za rad u slučaju zadržavanja plastičnih kesa iznad kućišta senzora (NM prema definiciji predstavljenoj u poglavlju 4.2.1.4).

Pored generalne provere kapaciteta ravnih EM senzora za rad u slučaju zadržavanja plastičnih kesa na kućištu senzora, eksperimenti sa plastičnim folijama se mogu koristiti za analizu oblika kontrolne zapremine τ ravnih EM senzora. Naime, korišćenjem tri različite dispozicije eksperimenta sa plastičnom folijom (Slika 4.10) i analizom dobijenog odziva EM senzora, moguće je ustanoviti koji deo kontrolne zapremine ima dominantan uticaj na generisanje izlaznog napona.

4.2.2 REZULTATI I DISKUSIJA

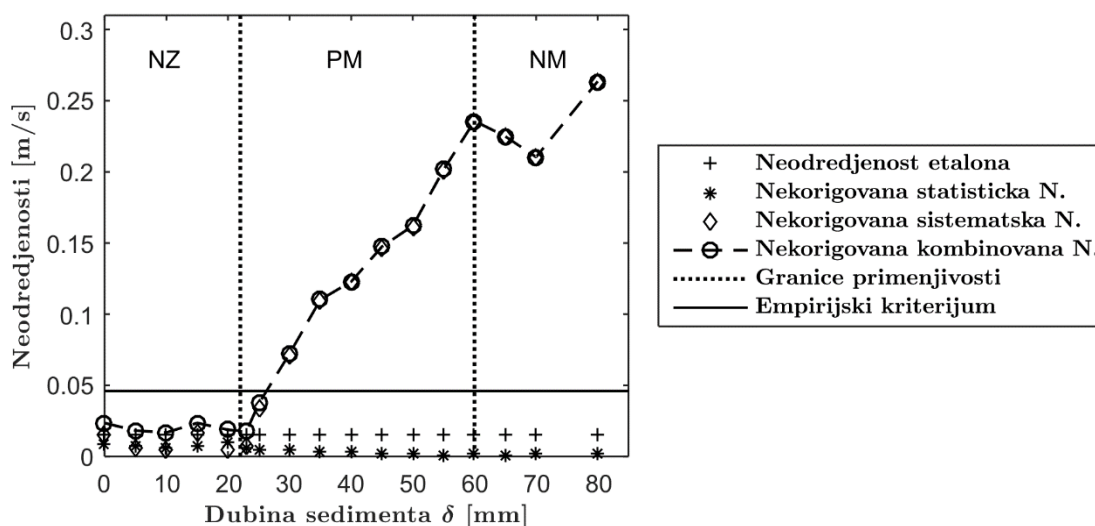
Nakon sprovedenih eksperimentalnih istraživanja, sprovedena je vizualna inspekcija rezultata. Uočeno je da nije bilo prekida u snimljenim podacima, međutim u zavisnosti od postavki eksperimenata dolazilo je do umerene ili čak potpune atenuacije, odnosno slabljenja izlaznog signala. Opširnija analiza uzroka slabljenja signala je data u nastavku.

U narednim poglavljima su predstavljeni rezultati etaloniranja merne neodređenosti u uslovima sedimentacije, iskorišćeni za ispitivanje robusnosti ravnih EM senzora. Konkretno sprovedena je procena kapaciteta ravnog EM senzora za rad pod pokrivkom od poroznog sedimenta. Takođe analizirani su i rezultati rada ravnog EM senzora sa pokrivkom od poroznog sedimenta uz prisustvo plastične folije. Na osnovu dobijenih vrednosti, razmatran je i praktični značaj sprovednog istraživanja.

4.2.2.1 PROCENA KAPACITETA SENZORA BRZINE ZA RAD POD POKRIVKOM OD POROZNOG SEDIMENTA

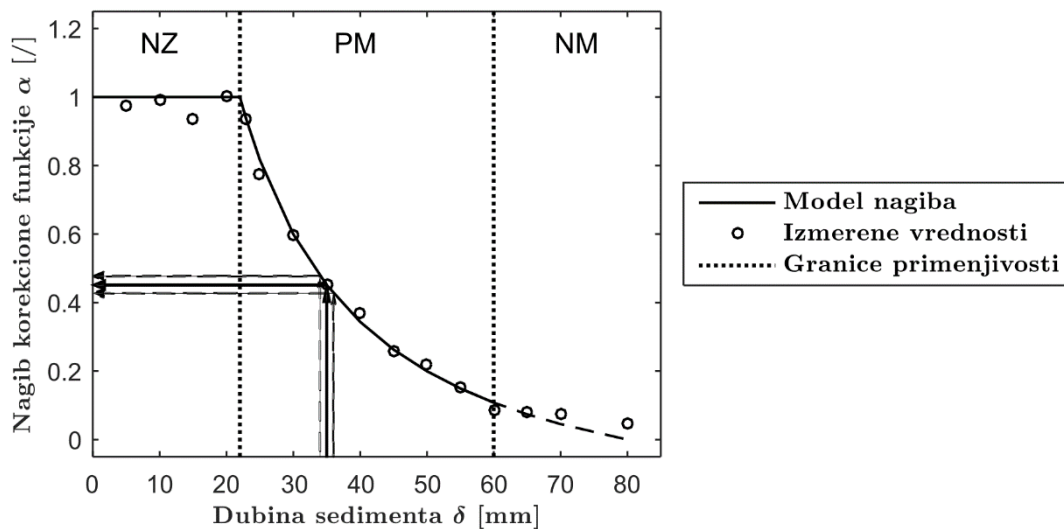
Primenom eksperimentalne procedure predložene u poglavlju 4.2.1.2.1, sprovedena su merenja neophodna za etaloniranje merne neodređenosti ravnih EM senzora, za 16 različitih dubina sedimenta δ_m . CFM je definisan i validiran kroz sledeće korake:

- 1.) *Analiza merne neodređenosti.* Procedura za etaloniranje merne neodređenosti (poglavljje 4.1.1.3) je primenjena na svakom m -tom skupu, lokalno kalibrisanih, izmerenih podataka. Vrednosti komponenta merne neodređenosti za svaki m -ti skup podataka su prikazane na Slici 4.12.

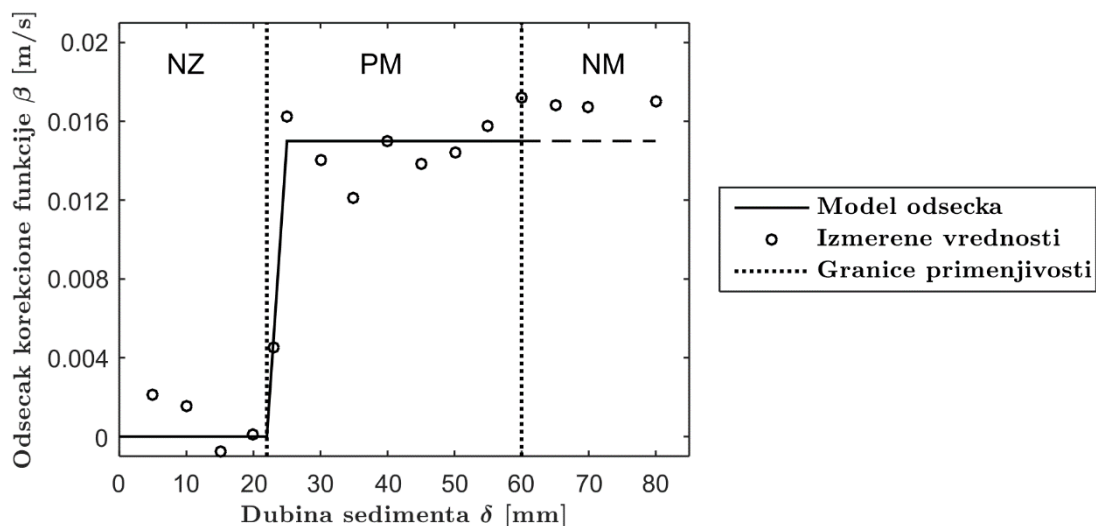


Slika 4.12 Vrednosti etalonske i nekorigovane statističke, sistematske i kombinovane neodređenosti u funkciji od dubine sedimenta δ .

- 2.) *Definisanje korekcionih funkcija.* Sa Slike 4.12 se može primetiti da vrednosti sistematske neodređenosti rastu sa porastom dubine sedimenta δ_m . Dobijeni rezultati ukazuju da se sa porastom δ_m , smanjuje efektivna kontrolna zapremina i pomera sve dalje od senzora, ka slabijem magnetnom polju, izazivajući atenuaciju izlaznog signala. Kako bi se redukovala rezultujuća sistematska neodređenost, izvedene su odgovarajuće linearne korekzione funkcije $f_{c,m}$. Svaka korekciona funkcija $f_{c,m}$ je definisana uz pomoć dva parametra α_m and β_m , koji se mogu modelirati u funkciji dubine sedimenta (sledeći korak).



Slika 4.13 Nagib (pojačanje) korekcionne funkcije α_m u zavisnosti od dubine sedimenta δ , sa odgovarajućim stepenim zakonom.



Slika 4.14 Odsečak (klizanje nule) korekcionne funkcije β_m u zavisnosti od dubine sedimenta δ , sa odgovarajućim kompozitnim linearnim modelom.

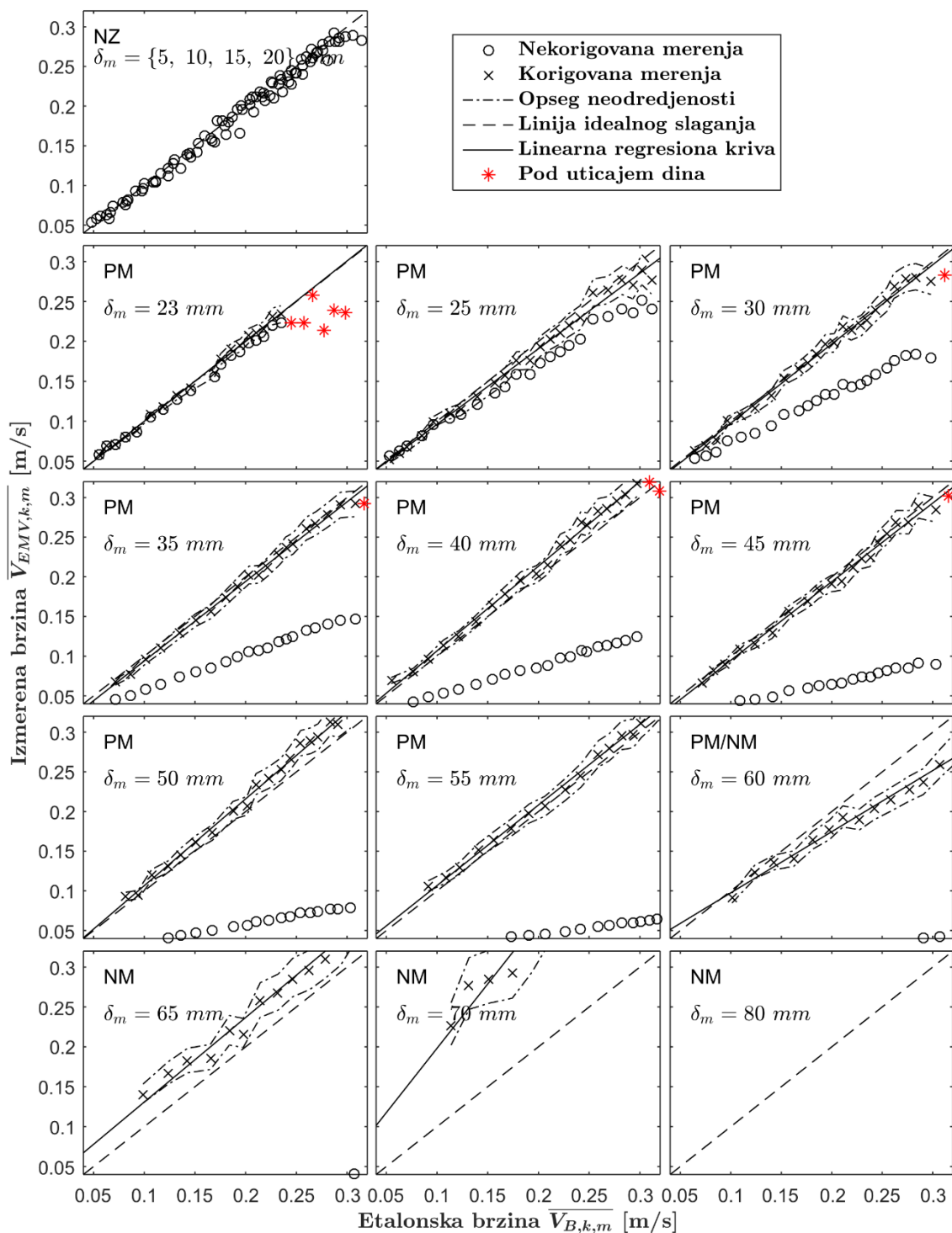
3.) *Provera trenda.* Na Slikama 4.13 i 4.14 su prikazani parametri korekcionnih funkcija, nagib α_m i odsečak β_m , u funkciji od dubine sedimenta δ_m . Može se uočiti da parametar nagiba α_m (pojačanja) ima jasnu stepenu zavisnost sa dubinom sedimenta δ_m (Slika 4.13), dok odsečak β_m (klizanje nule) varira između dve konstantne vrednosti sa skokom između (Slika 4.14).

- 4.) *Definisanje granica primene modela parametara α i β .* Na osnovu vizualnog poređenja Slika 4.12, 4.13 i 4.14, uočeno je da pri dubini sedimenta od $\delta_m = H_F = 23$ mm, prisustvo poroznog sedimenta počinje da utiče na rezultate merenja brzine. Imajući u vidu da je visina senzora bez elektroda 22 mm, odnosno da je visina elektroda 1 mm, usvojena je fizički zasnovana donja granica primenjivosti CFM-a: $H_F - 1$ mm = 22 mm. Takođe, primećeno je da pri dubinama sedimenta od $\delta_m = 60$ mm pa naviše, Flat DC-2 senzor daje izuzetno slab izlazni signal, zbog čega je pretpostavljena gornja granica primenjivosti CFM-a na vrednost 60 mm.
- 5.) *Modeliranje parametara korekcionih funkcija α i β .* Nagib korekcionih funkcija α , je modeliran stepenim zakonom za opseg vrednosti δ_m od 22 do 60 mm (Slika 4.13). Za isti opseg, odsečak korekcionih funkcija β je modeliran uz pomoć linearne funkcije između $\delta_m = 22$ i 25 mm, i sa konstantnom vrednosti za opseg između $\delta_m = 25$ i 60 mm (Slika 4.14). Na ovaj način definisan je Model Korekcionih Funkcija, CFM.
- 6.) *Validacija CFM-a.* Lokalno kalibrisani rezultati merenja brzine $\overline{V_{EMV,k,m}}$ su korigovani uz pomoć CFM-a (f_c , $f_{amp}(\delta_m)$ i $f_{zero}(\delta_m)$), za svaki m -ti podskup podataka. Suštinski, za svaku ispitanu dubinu sedimenta δ_m , parametri korekcionih funkcija su modelirani, koristeći meta funkcije CFM-a - $\alpha_{m,mod}(f_{amp}(\delta_m))$ i $\beta_{m,mod}(f_{zero}(\delta_m))$. Izmerene brzine za svaku ispitanu dubinu sedimenta δ_m , pre i posle korekcije primenom CFM-a, zajedno sa linijama idealnog slaganja, su prikazane na Slika 4.15. Interval neodređenosti, prikazan na graficima, ukazuje na propagaciju neodređenosti u merenju dubine sediment kao i efekat na parametre korekcionih funkcija za $\delta_m \pm 1$ mm. Rezultati merenja brzine, koji odgovaraju etalonskim merenjima brzine veće od 0,3 m/s, su isključeni iz analiza, budući da je uočen nekontrolisani uticaj formiranih peščenih dina na površini sedimenta. Za merenja brzine u slučaju $\delta_m = H_F = 23$ mm, sitnije frakcije sedimenta su formirale tanku debljine 1 mm, zbog čega je do formiranja dina došlo već pri nižim srednjim profilskim brzinama, rezultujući sa ranijim gubitkom linearnosti u izmerenim vrednostima (Slika 4.9 B).

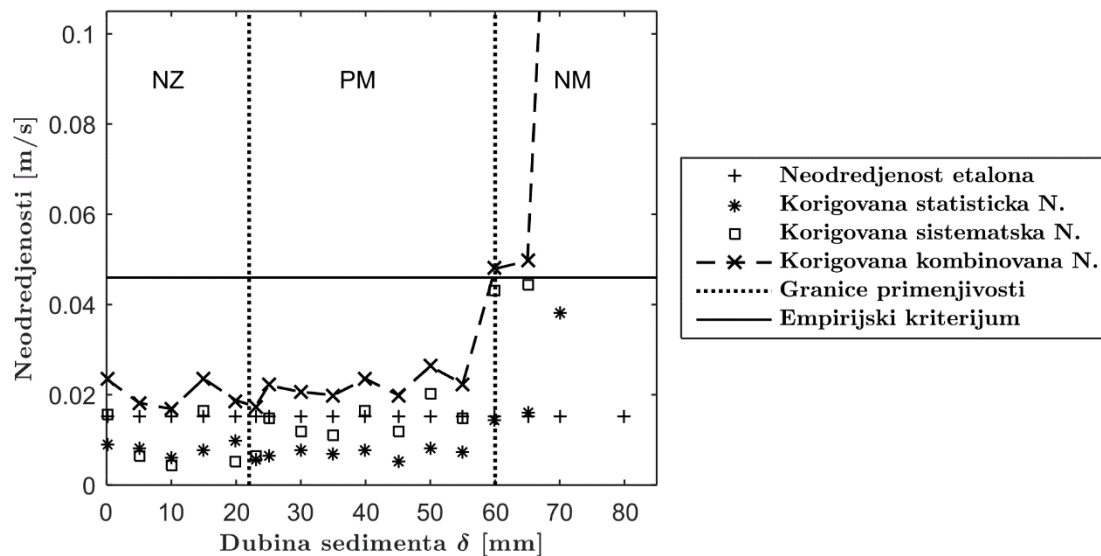
7.) *Procena primenjivosti CFM-a.* Nakon sprovođenja procedure za određivanje komponenta merne neodređenosti, nad merenjima korigovanim uz pomoć primene CFM-a, procenjena je primenjivost samog CFM-a (Slika 4.16). Za procenu gornje granice primenjivosti CFM-a, korišćen je empirijski kriterijum dve vrednosti korigovane kombinovane neodređenosti (prikazan uz pomoć punih horizontalnih linija na Slikama 4.12 i 4.16). Prvo je definisana *Neporemećena Zona* (NZ) za opseg dubina poroznog sedimenta od $\delta_m = 0 - 22$ mm (Slika 4.12 – Slika 4.16). U ovoj zoni, Flat DC-2 EM senzor može da meri brzine bez potrebe za naknadnom korekcijom primenom CFM-a. Brzine merene u okviru NZ zone, su grupisane na jedan grafik u gornjem levom uglu Slike 4.15. Opseg dubina sedimenta $\delta_m = 22 - 60$ mm, definiše zonu *Primenjivosti Modela* (PM), unutar koje se očekuje da Flat DC-2 EM senzor može da obezbedi pouzdana merenja brzine, ukoliko je poznata dubina sedimenta i uz primenu CFM-a. Može se uočiti na Slici 4.15, da u zoni PM (i za vrednosti srednjih profilskih brzina do 0,3 m/s), korigovane brzine pokazuju zadovoljavajuće slaganje sa etalonskim merenjima. Na granici između zona PM i NM $\delta_m = 60$ mm, navedeno slaganje počinje da slabi dok vrednosti korigovane kombinovane neodređenosti prikazuju eksponencijalan rast (Slika 4.16). Upravo iznad dubine sedimenta od $\delta_m = 60$ mm, se definiše navedena zona *Neprimenjivosti Modela* (NM) unutar koje se pretpostavlja da se merenja srednje profilske brzine ne mogu korigovati na odgovarajući način pomoću CFM-a.

Konačno, korisno je protumačiti fizičko značenje prirode promene parametara korekcionih funkcija α i β , odnosno odgovarajućih meta modela, $f_{amp}(\delta_m)$ i $f_{zero}(\delta_m)$. Pretpostavlja se da se nelinearna zavisnost između nagiba korekcionih funkcija α i dubine sedimenta δ , javlja kao posledica nelinearne težinske funkcije samog ravnog EM senzora, Flat DC-2. Tako je gradijent nagiba α , odnosno pojačanja, najveći na početku zone PM – gde vektori magnetnog polja \vec{B} i gustine virtualne struje \vec{j} (2.5) imaju maksimalne vrednosti. Vrednosti α opadaju zajedno sa \vec{B} i \vec{j} , kako raste δ (Slika 4.13). Sa druge strane na vrednost odsečka β , odnosno klizanja nule, utiče samo prisustvo poroznog sedimenta na površini elektroda Flat DC-2 senzora (efektivno je umanjena površina elektroda), zbog čega se javlja relativno konstantna vrednost i pri većim dubinama sedimenta δ (Slika

4.14).



Slika 4.15 Lokalno kalibrisana merenja brzine $\overline{V_{EMV,k,m}}$ dobijena pomoću Flat DC-2 EM senzora, pre i nakon primene CFM-a, pri radu pod pokrivanom od poroznog sedimenta.



Slika 4.16 Etalonska i korigovana statistička, sistematska i kombinovana neodređenost u funkciji od dubine sedimenta δ

4.2.2.2 PROCENA KAPACITETA SENZORA BRZINE ZA RAD POD POKRIVKOM OD POROZNOG SEDIMENTA SA PLASTIČNOM FOLIJOM

Primenom eksperimentalne procedure predložene u poglavlju 4.2.1.2.2, sprovedena su merenja neophodna za procenu kapaciteta senzora za rad u slučaju zadržavanja plastičnih kesa na kućištu senzora. Nad prikupljenim merenjima brzine, primenjen je CFM (definisan u prethodnom poglavlju) za vrednost dubine sedimenta od $\delta_m = 35$ mm. Korišćenjem CFM-a za istu dubinu sedimenta kao u eksperimentima sa plastičnom folijom, sproveden je pokušaj uklanjanja sistematskog uticaja pokrivke od poroznog sedimenta sa plastičnom folijom (Slika 4.17). Rezultati primene procedure za etaloniranje merne neodređenosti, pre i nakon primene CFM-a, su prikazani u Tabeli 4.2.

Može se uočiti da je za ispitane varijante $g = 1$, gde je plastična folija (dimenzija 280 * 250 mm) prekrila ceo Flat DC-2 EM senzor, i $g = 2$, gde je plastična folija (dimenzija 280 * 125 mm) (Slika 4.11) prekrila celom dužinom središnji deo senzora, došlo do potpunog slabljenja izlaznog signala. Samim tim, primena CFM-a nije dovela do poboljšanja rezultata merenja odnosno eliminaciji sistematskog uticaja (Tabela 4.2). Na osnovu toga ispitane varijante su klasifikovane kao NM (Neprimenjivost Modela), tj. Rad ravnog EM senzor je onemogućeno. Sa druge strane za varijantu $g = 3$, gde je plastična

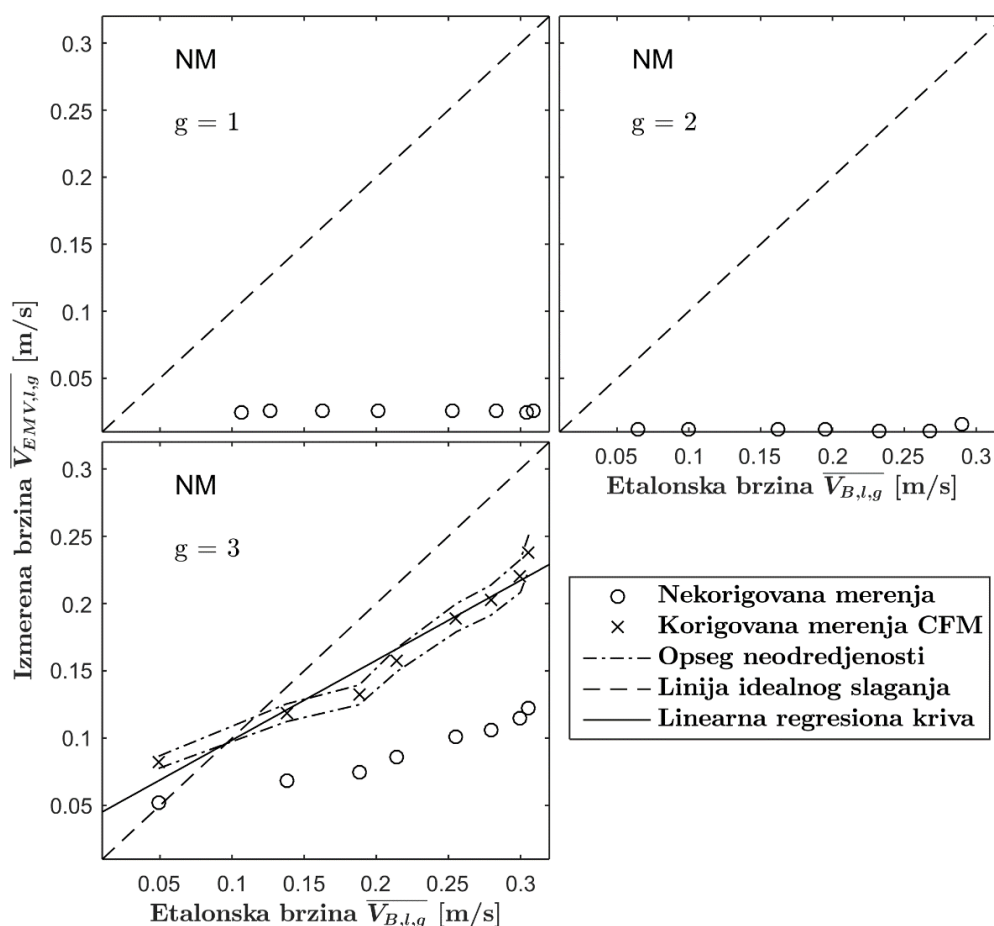
folija (dimenzija 280 * 125 mm) prekrila celom dužinom jednu polovinu senzora i kanala, Flat DC-2 EM senzor je zabeležio određene brzine. Međutim, iako je primena CFM-a omogućila smanjenje sistematske neodređenosti pa samim tim i kombinovane korigovane neodređenosti, empirijski kriterijum za Primenjivost Modela (PM) nije ispunjen. Na osnovu navedenih rezultata, zaključeno je da Flat DC-2 EM senzori, kao i generalno ravnih EM senzori, ne poseduju kapacitet za rad u slučaju zadržavanja plastičnih kesa na kućištu senzora.

Tabela 4.2 Poređenje rezultata etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora za slučaj rada pod pokrivanjem od poroznog sedimenta, sa i bez plastične folije

Eksperiment	Tip	Nekorigovana	Korigovana	Nekorigovana	Korigovana
		sistematska	sistematska	statistička	statistička
		neodređenost	neodređenost	neodređenost	neodređenost
		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
$\delta_m = 35$ mm	Sed.	0.109	0.011	0.003	0.007
$g = 1$	Sed. + Folija	0.239	0.241	0.001	0.002
$g = 2$	Sed. + Folija	0.213	0.231	0.002	0.006
$g = 3$	Sed. + Folija	0.161	0.070	0.003	0.007
Eksperiment	Tip	Etalonska	Nekorigovana	Korigovana	Empirijski
		neodređenost	kombinovana	kombinovana	kriterijum
		neodređenost*	neodređenost	neodređenost	
		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
$\delta_m = 35$ mm	Sed.		0.110	0.024	
$g = 1$	Sed. + Folija	0.015	0.239	0.241	0.046
$g = 2$	Sed. + Folija		0.214	0.232	
$g = 3$	Sed. + Folija		0.162	0.072	
CFM =			$(V - 0.015)/0.451$		

Na osnovu analize eksperimentalnih rezultata, potvrđena je hipoteza postavljena u poglavlju 4.2.1.5. Prisustvo plastičnih folija, iznad ravnih EM senzora, sprečava kretanje pozitivnog i negativnog naelektrisanja, pod uticajem magnetnog polja, ka elektrodama senzora čime se onemogućava indukovanje izlaznog napona. Imajući u vidu da je potpuno

prigušenje izlaznog signala zabeleženo i za varijantu $g = 2$, gde je širina plastične folije prepolovljena, može se zaključiti da se dominantni deo kontrolne zapremine τ Flat DC-2 EM senzora, nalazi iznad samog kućišta senzora. Dobijeni zaključak je iskorišćen u narednom poglavlju za definisanje veličine i oblika kontrolne zapremine Flat DC-2 EM senzora kao i težinske funkcije w .



Slika 4.17 Lokalno kalibrisana merenja brzine $\overline{V_{EMV,l,g}}$, pomoću Flat DC-2 EM senzora, pre i nakon primene CFM-a, pri radu pod pokrivanjem od poroznog sedimenta sa plastičnom folijom.

4.2.2.3 PRAKTIČNI ASPEKT REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Rezultati laboratorijskog etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora u uslovima sedimentacije su omogućili bolje sagledavanje robusnosti senzora za rad u složenim i nepovoljnim uslovima, kakvi se javljaju u kanalizacionim sistemima. Slično

kao i u poglavlju 4.1.2.4, neophodno je napomenuti da se ovde diskutuje samo o laboratorijskim ispitivanjima. Međutim, imajući u vidu karakter istraživanja i korišćenu eksperimentalnu metodologiju, u nastavku su navedeni aspekti koji imaju praktični značaj za buduću primenu ravnih EM senzora:

- Najznačaniji rezultat predstavljenog istraživanja je svakako mogućnost primene ravnih EM senzora za merenje brzine u slučaju sedimentacije poroznim nanosom, korišćenjem CFM-a. Naime budući da je sediment porozan, voda može da provodi naelektrisanje do elektroda a samim tim dolazi do generisanja izlaznog napona proporcionalnog brzini tečenja. Međutim u zonama gde se nalazi porozni sediment, brzina strujanja je zanemarljiva zbog čega delovi kontrolne zapremine ravnog EM senzora, sada okupirani sedimentom, ne doprinose izlaznom signalu. Primenom CFM-a, moguće je eliminisati sistematski uticaj prisustva sedimenta do dubine δ od oko 60 mm. Sa praktičnog stanovišta, neophodno je posebno obratiti pažnju na činjenicu da je na mernom mestu neophodno obezbediti pouzdano merenje dubine nanosa iznad kućišta senzora, u realnom vremenu. Jedno od potencijalnih rešenja može biti i merenje impedanse R , koja opisuje otpornost elektroprovodnika koji se formira između elektroda ravnog EM senzora. Detaljnija analiza ovog, i drugih, pristupa za merenje dubine sedimenta je predstavljena u poglavlju 5.3.5. Takođe treba apostrofirati da rezultati dobijeni korišćenjem rečnog peska imaju ograničeni praktičan značaj. Naime, imajući u vidu heterogenost sastava sedimenta zahvaćenog sa različitih lokacija (Crabtree, 1989; Skipworth i saradnici, 1999; Ashley i saradnici, 2004), preporučuje se definisanje CFM-a za sastav sedimenta karakterističan za određeno merno mesto.
- Sa druge strane, pomoću ravnih EM senzora i primenom CFM-a, nije moguće obezbediti pouzdana merenja srednje profilske brzine u slučaju zadržavanja plastičnih kesa na kućištu senzora. Iako je rezultat ovog ispitivanja negativan, njegov praktični značaj se ogleda u činjenici da je na ovaj način definisan jedan od mehanizama za prestanak rada ravnih EM senzora. Može se zaključiti da prisustvo vodonepropusnih barijera unutar kontrolne zapremine sprečava pouzdano merenje brzine pomoću ravnih EM senzora.

- Rezultati ispitivanja kapaciteta ravnih EM senzora za rad u slučaju prisustva plastičnih folija iznad kućišta senzora su doveli do zaključka da je kontrolna zapremina ravnih EM senzora, zapravo iznad samog kućišta. Detaljnije analize tehničkih parametara ravnih EM senzora, prvenstveno veličine kontrolne zapremine i oblika težinske funkcije, su predstavljene u poglavlju 5.2.

4.2.3 ZAKLJUČCI

U ovom delu disertacije prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja robusnosti Flat DC-2 (ravne) EM sonde proizvođača „Svet instrumenata“, u uslovima sedimentacije. Posebno su analizirana dva slučaja: rad EM senzora pod pokrivkom od poroznog nanosa kao i rad pod pokrivkom od poroznog nanosa sa umetnutom plastičnom folijom. Na ovaj način simulirana su uslovi rada u kanalizacionim sistemima, prvo kada se javlja sedimentacija kućišta poroznim nanosom, a zatim i slučaj kada se platična kesa zadrži na kućištu senzora. U oba slučaju korišćen je rečni pesak kao porozni sediment. Kao parametar za definisanja kapaciteta za rad u navedenim uslovima, predložen je empirijski kriterijum od dve kombinovane korigovane neodređenosti. Za određivanje komponenata merne neodređenosti, primenjena je unapređena verzija procedure originalno predložene od strane Aguilar-a i saradnika (2016). Za rad u uslovima sedimentacije, predložena je primena Modela Korekcionih Funkcija (CFM).

Pokazano je da u uslovima sedimentacije isključivo poroznim nanosom, dubine sedimenta od 22 mm pa naviše, unose sistematski uticaj na merenja srednje profilske brzine. Ukoliko je poznata dubina sedimenta, primenom CFM-a moguće je eliminisati navedeni sistematski uticaj za dubine sedimenta do 60 mm. Međutim, rezultati analize su pokazale da je CFM moguće primeniti jedino u slučaju ravne površine taloga od sedimenta. Pojava talasaste površine, odnosno dina, uzrokuje gubitak linearnosti u merenjima srednje profilske brzine. Zbog toga je potrebno u budućim istraživanjima ustanoviti funkcionalnu zavisnost između dimenzija dina i sistematskog uticaja na merenja srednje profilske brzine.

Sa druge strane, eksperimenti u kojima je unutar poroznog sedimenta dubine 35 mm postavljena plastična folija, su pokazali da ravni EM senzori nemaju kapacitet za rad u slučaju zadržavanja plastičnih kesa na kućištu. Nepropusne plastične kese sprečavaju kretanja naelektrisanja ka elektrodama senzora i samim tim indukovanje izlaznog napona. Na ovaj način je definisan jedan od mehanizama otkaza ravnih EM senzora: prisustvo vodonepropusnih barijera unutar kontrolne zapremine EM senzora.

5 UNAPREĐENJE TAČNOSTI MERENJA BRZINE PRIMENOM RAVNIH EM SENZORA

Na osnovu laboratorijskog ispitivanja radnih karakteristika ravnih EM senzora, predstavljenih u poglavlju 4, ustanovljeno je da se ovi uređaji mogu smatrati tačnijim (sa nižom sistematskom mernom neodređenošću), ponovljivijim (sa nižom statističkom mernom neodređenošću) i čak robusnijim od papučastih ADV senzora. Navedeni zaključci su dobijeni kao rezultat ispitivanja, i EM (u ovom doktoratu) i ADV (u literaturi) senzora, u dobro kontrolisanim, praktično idealnim, uslovima. Zbog toga se sračunate vrednosti kombinovane merne neodređenosti srednje profilske brzine (kao jedinstvenog parametra za kvantifikovanje valjanosti izmerenih podataka) moraju okarakterisati kao minimalne. Sa praktičnog stanovišta, očekivano je da će se na terenu – pogotovo u složenim uslovima tečenja, dobijati rezultati merenja sa većom neodređenošću, nego oni dobijeni u laboratoriji. Brojni faktori, karakteristični za svako merno mesto, mogu negativno uticati na neodređenost izmerene srednje profilske brzine.

U poglavlju 2.2.1, razmatrani su ključni aspekti primene metode V-A za određivanje protoka. U okviru navedenog poglavlja, konstatovano je da ključni doprinos neodređenosti protoka izmerenog ovim pristupom, predstavlja neodređenost izmerene srednje profilske brzine V . Sama neodređenost srednje profilske brzine ima dvojako poreklo, gde jedan deo potiče od radnih karakteristika korišćenog instrumenta, dok drugi od neodređenosti korelacije koja povezuje izmerenu brzinu V_{mer} sa srednjom profilskom brzinom V . Kako su radne karakteristike ravnih EM senzora ispitane u poglavlju 4, i na njih korisnik ne može uticati, u ovom poglavlju su analizirane mogućnosti za redukovanje neodređenosti korelacije između V_{mer} i V . Imajući u vidu mane tradicionalnih pristupa za definisanje ove korelacije, ovde je data prednost pristupu nazvanom „Lokalna kalibracija“ preko kojeg se, koristeći matematički model senzora, može modelirati odziv senzora u lokalnim terenskim uslovima i kasnije korelisati sa srednjom profilskom brzinom (detaljnije u poglavlju 5.3.4).

Za primenu postupka lokalne kalibracije neophodno je poznavati tehničke parametre, i odgovarajući matematički model, koji definišu operacioni princip senzora. Princip rada EM senzora je opisan u poglavlju 2.1, gde je ustanovljeno da se u mernoj, odnosno kontrolnoj zapremini senzora, nelinearnom integracijom proizvoda tri vektorska polja – magnetnog, gustine struje i polja brzine, dobija izmereni podatak o brzini. Ključan problem ovog modela se ogleda u njegovoj složenosti, zbog čega je ovde predložen uprošćeni model definisan sa samo dva parametra (poglavljje 5.2), težinskom funkcijom $w(z)$ i maksimalnim dometom kontrolne zapremine τ_{max} . Takođe, predložena je eksperimentalna procedura za definisanje potrebnih tehničkih parametara uprošćenog modela. Polazna tačka za navedene analize, predstavlja mapiranje magnetnog polja ravnog EM senzora \vec{B} (poglavljje 5.1), kao osnovne veličine koja, zajedno sa gustinom struje \vec{j} , opisuje princip rada senzora. U slučaju ravnih EM senzora, za generisanje izlaznog signala ključna je Y komponenta magnetnog polja, B_y . Na osnovu izmerenih podataka o B_y i eksperimentalno definisane $w(z)$, analizirana je mogućnost primene postupka suve kalibracije za definisanje tehničkih parametara ravnih EM senzora.

Na osnovu predstavljenih analiza, dobijenih rezultata, kao i dosadašnjih istraživanja na polju merenja protoka, metodom V – A, definisana je procedura za sprovođenje lokalne kalibracije ravnih EM senzora (poglavljje 5.3). Lokalna kalibracija ravnih EM senzora, omogućava pouzdanije i tačnije merenje protoka, kroz integraciju hidrauličkih parametara koji opisuju tečenje na mernom mestu, lokalnih geometrijskih karakteristika kao i tehničkih parametara samih ravnih EM senzora. Konačno, na kraju ovog poglavlja razmotreni su i neki dodatni aspekti primene ravnih EM senzora u kanalizacionim sistemima, odnosno u uslovima sedimentacije senzora brzine. Budući da je ustanovljeno da je primenom modela korekcionih funkcija (CFM-a, poglavljje 4.2) moguće obezbediti pouzdana merenja brzine, ukoliko je poznata dubina sedimenta koji pokriva senzor, analizirani su mogući pristupi za merenje dubine sedimenta iznad samog senzora.

5.1 MAPIRANJE MAGNETNOG POLJA RAVNOG EM SENZORA

Princip rada EM senzora brzine se zasniva na Faradejevom zakonu: kretanje provodne tečnosti kroz upravno magnetno polje, dovodi do indukovanja napona na elektrodama

senzora. U kućišta ravnih EM senzora su ugrađeni ravni kalemovi, kroz koje se propušta pulsna, bipolarna pobudna struja sa dvojnoum frekvencijom. Samim tim, i indukovano magnetno polje ima pulsni, bipolarni karakter, kao i dvojnoum frekvenciju. Pod uticajem indukovanog magnetnog polja, formira se upravno električno polje \vec{E} . Na elektrodama senzora se meri napon U_m , čija je vrednost direktno proporcionalna brzini tečenja tečnosti kroz magnetno polje senzora. Prethodno opisani proces indukcije napona na elektrodama senzora, matematički je opisan kao zapreminski integral tri vektorska polja: magnetnog \vec{B} , gustine struje \vec{j} i brzina \vec{V} (2.5).

Za potrebe modeliranja odziva ravnog EM senzora, u opštem slučaju, neophodno je poznavati sva tri navedena vektorska polja. Raspored brzina, kao hidraulički parametar zavisi od uslova tečenja i geometrijskih karakteristika mernog mesta. Može se odrediti, sa manjom ili većom neodređenošću, pomoću lokalnih merenja brzine, analitičkih obrazaca, numeričkih simulacija ili kombinacijom ova tri pristupa, za određene granične uslove i geometrijske karakteristike koje definišu opšte uslove tečenja na mernom mestu. Gustina struje opisuje električno polje, koje nastaje pod uticajem magnetnog polja, u protočnoj tečnosti (provodniku). Samo magnetno polje je karakteristično za korišćeni merni instrument i u opštem slučaju ne zavisi od mernog mesta niti od hidrauličkih uslova. Imajući navedeno u vidu, može se zaključiti da je magnetno polje senzora, dominantan tehnički parametar EM senzora, koji direktno određuje princip rada senzora, odnosno generisanje izlaznog napona.

Postupak lokalne kalibracije, predložen za unapređenje tačnosti korelacije kojom se definiše veza između izmerene V_{mer} i srednje profilske brzine V , se zasniva na upotrebi matematičkog modela rada senzora. Za potrebe analize principa rada ravnih EM senzora kao i razvijanja uprošćenog matematičkog modela, u ovom poglavlju je razmatrano magnetno polje ravnih EM senzora. Magnetno polje \vec{B} je moguće modelirati numeričkim rešavanjem odgovarajuće Laplasove jednačine (2.10), za poznate granične uslove. Definisavanje adekvatnih graničnih uslova može biti komplikovan zadatak, ukoliko se sprovode detaljnije elektromagnetne analize. Najpouzdaniji postupak za određivanje magnetnog polja je sistematsko mapiranje, odnosno merenje u dovoljno velikom broju tačaka, koje omogućava definisanje detaljnog prostornog rasporeda. Mapiranje magnetnog polja ravnog EM senzora je sprovedeno u hidrauličkoj laboratoriji

Građevinskog fakulteta. Imajući u vidu pulsni, bipolarni karakter, kao i dvojnju frekvenciju analiziranog magnetnog polja, izmereni rezultati su posebno obrađeni primenom heurističkog algoritma neuralnih mreža. Rezultati predstavljeni u ovom poglavlju predstavljaju osnovu za detaljniju analizu radnog principa ravnih EM senzora.

5.1.1 METODOLOGIJA

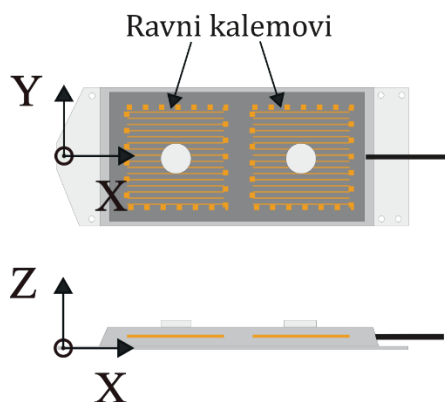
Specifičnosti vektora magnetne indukcije ravnih EM senzora, kao i osnove metodološkog pristupa za laboratorijsko merenje i obradu izmerenih vrednosti komponenata magnetnog polja su predstavljene u ovom poglavlju. Analiza je fokusirana na određen model ravnih EM senzora, ali je predstavljeni pristup univerzalan.

5.1.1.1 INDUKCIJA MAGNETNOG POLJA RAVNOG EM SENZORA

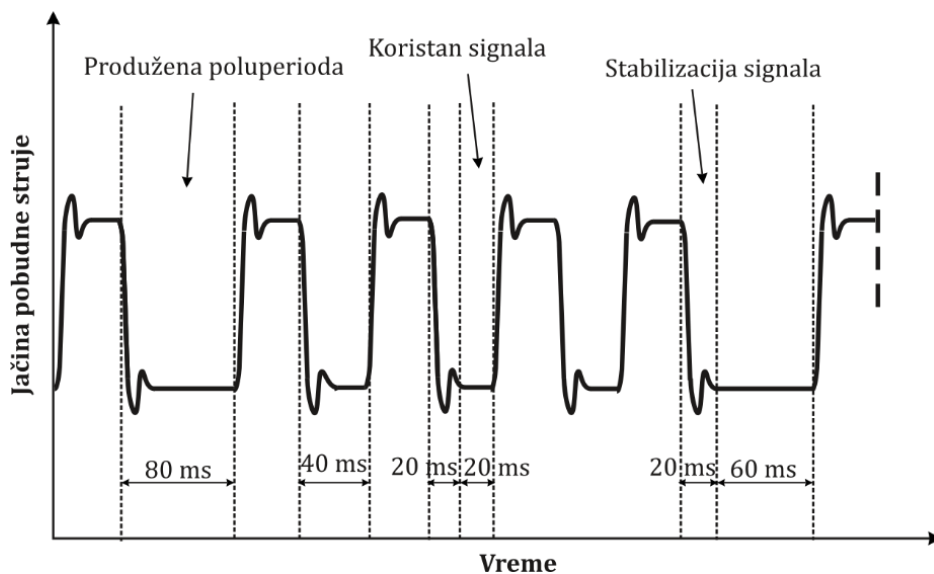
Analiza magnetnog polja \vec{B} ravnih EM senzora, predstavljena u ovom poglavlju disertacije se odnosi na standardni model proizvođača „Svet instrumenata“, Flat DC-2 EM senzor (Poglavljje 3.1). Na Slici 5.1 su prikazani položaji dva ravna kalema, integrisana u kućište senzora, kao i usvojeni koordinatni sistem korišćen u analizi. Dominantan doprinos generisanju izlaznog napona daje Y komponenta magnetnog polja je B_y . Pobuda kalema se vrši impulsno modulisanom strujom, čija jačina je pod kontrolom korisnika. Veća jačina pobudne struje vodi ka poboljšanju stabilnosti i ponovljivosti merenja brzine, na uštrb veće potrošnje električne energije. U predstavljenim laboratorijskim ispitivanjima, korišćena je minimalna jačina pobudne struje od 80 mA.

Tokom rada Flat DC-2 EM senzora, smer pobudne struje se menja na svakih 40 ms, budući da je glavna pobudna frekvencija 12.5 Hz ($1/(2 \times 0,04) = 12,5$ Hz). Smer pobudne struje prednjeg i zadnjeg kalema se u svakom trenutku razlikuje. Sekundarna pobudna frekvencija se može uočiti na Slici 5.2, gde se vidi da je svaka osma polu-perioda produžena na 80 ms. Dvojna frekvencija pobude se koristi kako bi se eliminisala mogućnost poklapanja frekvencije pobude sa umnoškom frekvencije turbulentnih vrtloga koji se javljaju u toku. Takođe, na ovaj način smanjuje se uticaj promena elektrohemijskog potencijala na merenja brzine (Stojadinović i saradnici, 2018). Pri svakoj promeni smera pobudne struje, smatra se da je potrebno maksimalno 20 ms za

stabilizaciju magnetnog polja, zbog čega se merenje izlaznog napona radi tokom zadnjih 20 ms jedne polu-periode.



Slika 5.1 Šematski prikaz položaja ravnih kalemova unutar Flat DC-2 EM senzora.



Slika 5.2 Grafički prikaz promene smera pobudne struje ravnih EM senzora, proizvođača „Svet instrumenata“ (Stojadinović i saradnici, 2018).

Kretanjem provodne tečnosti kroz magnetno polje \vec{B} ravnih EM senzora, indukuje se izlazni napon U_m , između elektroda i mase senzora. Merenje napona se vrši pomoću univerzalnog industrijskog mernog pretvarača, integrisanog u eksterni loger sa NiMH akumulatorom. Pretvarač vrši analogno/digitalnu konverziju signala tokom perioda stabilnog magnetnog polja (zadnjih 20 ms polu-periode). Konačna vrednost izlaznog signala se dobija na osnovu osrednjavanja izmerenih napona tokom deset uzastopnih perioda – zbog čega je maksimalna frekvencija uzorkovanja $1/(10 \cdot 0.08) \sim 1.3$ Hz.

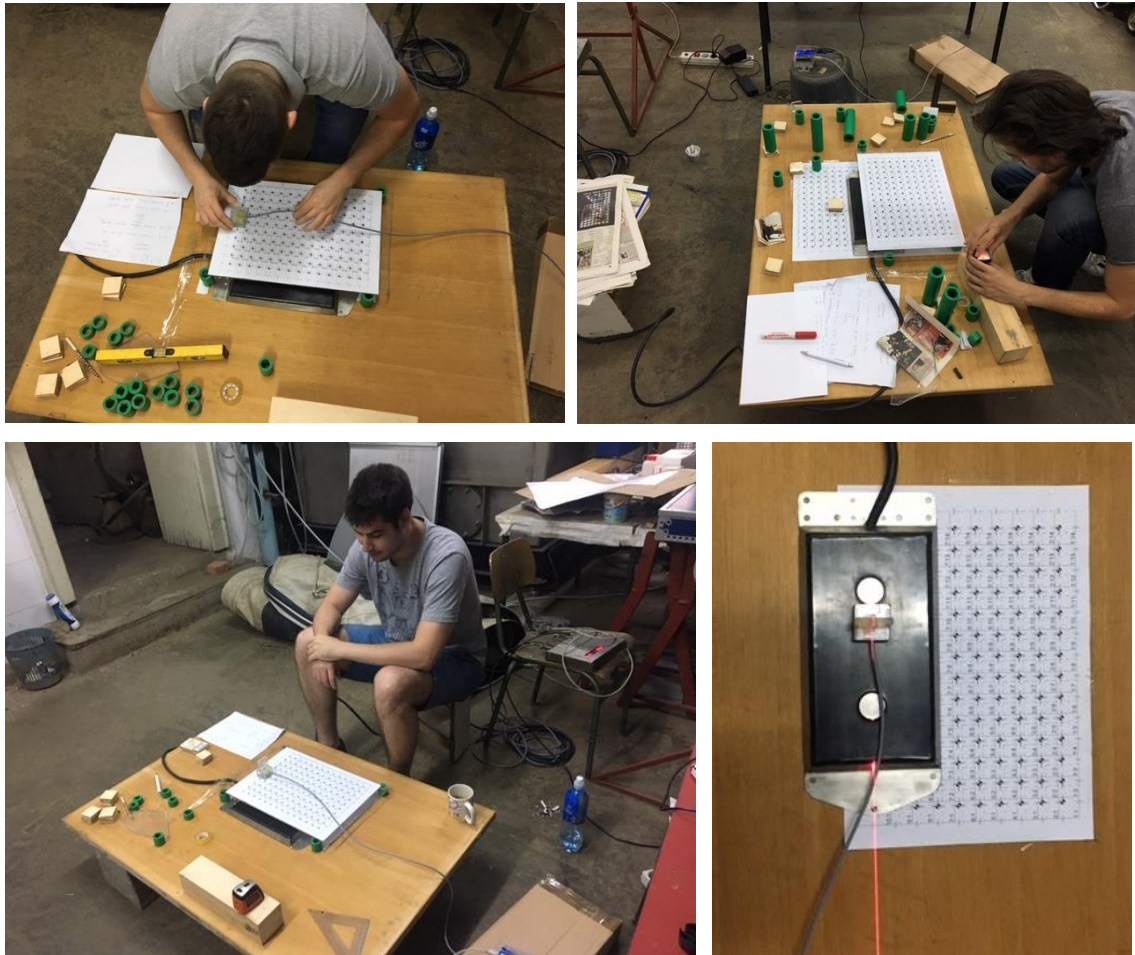
5.1.1.2 LABORATORIJSKA INSTALACIJA

Merenja magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora je sprovedeno korišćenjem magnetometra MLX90393 firme „Melexis“, opisanog u poglavlju 3.4. Imajući u vidu da je glavna pobudna frekvencija magnetnog polja 12.5 Hz, merenja magnetnog polja su morala da se obave na minimum dva puta većoj frekvenciji prema Nikvistovom pravilu (Grenander and Rosenblatt, 2008). Uprkos osnovnom Nikvistovom pravilu, u praksi se preporučuje da frekvencija uzorkovanja bude barem 5 puta veća. Kako bi se omogućilo ispunjenje strožeg uslova, korišćena je maksimalna frekvencija rada magnetometra, od skoro 90 Hz (tzv. „Burst“ režim). Komunikacija sa korišćenim magnetometrom je ostvarena preko Arduino kontrolne jedinice. Samo upravljanje radom magnetometra, kao i beleženje podataka, je sprovedeno pomoću posebne GUI aplikacije razvijene u MATLAB okruženju.

Mapiranje magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora je obavljeno kroz dve etape. U prvoj etapi, mapiranje polja je izvršeno van laboratorijskog kanala, gde je ravni EM senzora postavljen na drvenu ploču, izdignutu od poda. U ovoj etapi, ravni EM senzor je udaljen od svih potencijalnih smetnji magnetnom polju. Položaj ravnog EM senzora nije menjan tokom celog merenja. Pozicioniranje magnetometra je vršeno ručno, pomeranjem po ravanskom pravougaonom rasteru (Slika 5.3) sa rastojanjima između susednih mernih tačaka od 2.5 cm u X i Y pravcu. Pravougaoni raster je sekvencijalno podizan, tako da je visinska razlika (u Z pravcu) između susednih položaja 1 cm. Ukupna širina koja je obuhvaćena merenjem je 45 cm u smeru Y ose, 32,5 cm u smeru X ose i 22 cm u smeru Z osa. Zbog prisustva simetrije, merenja magnetnog polja u Y opsegu od 0 do -22.5 cm, su obavljena sa manjom gustinom.

U drugoj etapi, FLAT DC-2 EM senzor je instaliran unutar laboratorijskog kanala. Magnetometar je pozicioniran korišćenjem konstruisanog automatizovanog pozicionera (poglavlje 3.5.2). Druga etapa mapiranja je prvenstveno iskorišćena kako bi se stekao uvid u raspored magnetnog polja u uslovima laboratorijske eksploatacije. U laboratorijskom kanalu je korišćen gušći raster, tako da su međusobna rastojanja između susednih položaja magnetometra iznosila 1 cm u sva tri koordinatna pravca. Zbog konstrukcije kućišta senzora, merenjima je zahvaćena zapremina uža od širine kanala, širine 19 cm (Y pravac). Dužina (X pravac) i visina (Z pravac) zapremine rastera su

iznosile 34 i 27 cm, respektivno. Takođe, u okviru ove etape je ispitan uticaj blizine feromagnetnih objekata na indukovane magnetno polje, koji je detaljnije analiziran u radu Stojadinović i saradnici (2018).

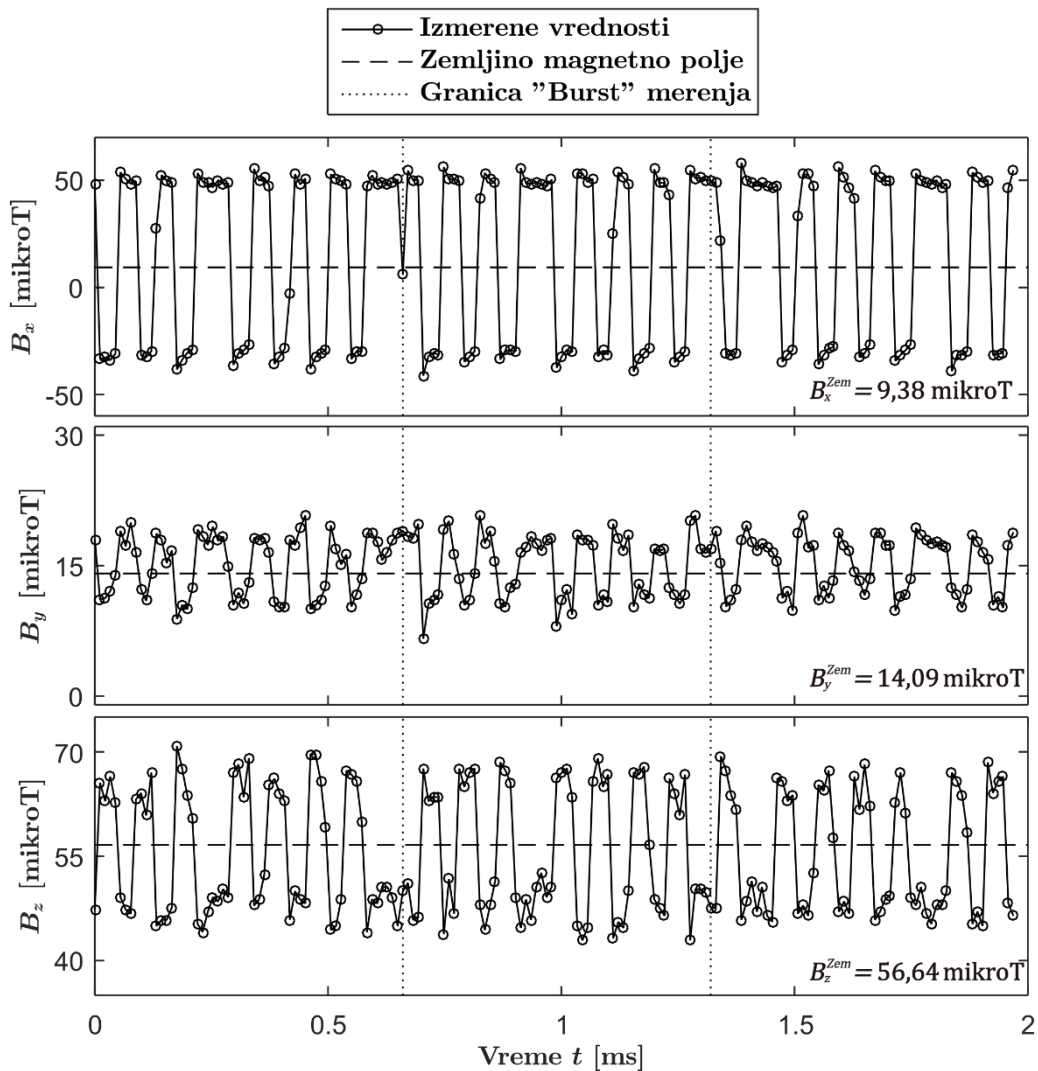


Slika 5.3 Mapiranje magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, van laboratorijskog kanala u prostorijama hidrauličke laboratorije Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

5.1.1.3 EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

Magnetno polje \vec{B} , koje je zbir prirodnog magnetnog polja Zemlje i polja ravnog EM senzora, je u svakoj tački određeno merenjem tri komponente vektora B_x , B_y i B_z . Na osnovu vrednosti komponenata, računata je i magnituda vektora magnetnog polja B_{mag} . Merenje komponenata vektora \vec{B} u svakoj tački je ostvareno pomoću tri sekvencijalna snimanja sa maksimalnom frekvencijom u „Burst“ režimu rada. U okviru svakog „Burst“

snimanja, zabeležena su 60 podataka o vrednostima komponentata vektora \vec{B} , na svakih 0.011 ms. Imajući u vidu da se promena smera pobudne struje odvija na svakih 40 ms, za svaku polu periodu je moguće zabeležiti 3 ili 4 podatka kako u periodima stabilizacije magnetnog polja tako i periodu stabilnog polja.



Slika 5.4 Primer izmerenih vrednosti komponentata magnetnog polja u jednoj tački. Prirodno magnetno polje planete Zemlje je uticalo na odstupanje srednje vrednosti komponentata magnetnog polja od 0 (isprekidana horizontalna linija).

Da bi se dobio konačni podatak o jačini magnetnog polja u jednoj tački, potrebno je razdvojiti snimljene podatke, pri različitim polaritetima magnetnog polja, na dve grupe. Takođe neophodno je izbaciti podatke koji su snimljeni tokom promene i stabilizacije magnetnog polja. Konačno treba razdvojiti vrednost magnetnog polja, indukovano EM

senzorom, od prirodnog magnetnog polja planete Zemlje. Za klasifikovanje vrednosti indukovanog magnetnog polja, korišćen je heuristički algoritam neuralnih mreža. Nakon klasifikacije, dobijene su dve vrednosti svake komponente magnetnog polja, usled pozitivne $B_{p,i}$ i negativne $B_{n,i}$ (gde i odgovara koordinatnim pravcima X, Y ili Z) pobude kalemova. Usvojena je konvencija da je pozitivna komponenta magnetnog polja, ona koja odgovara pojavi produžene polu-periode, dok je suprotna okarakterisana kao negativna. Grafički prikaz snimljenih vrednosti magnetnog polja u jednoj tački rastera je dat na Slici 5.4. Na ovoj slici se može uočiti uticaj prirodnog Zemljinog magnetnog polja na pomeranje srednje vrednost merenja dalje od 0. Konačna vrednost komponente vektora magnetnog polja \vec{B} , indukovanog od strane EM senzora, je dobijena kao polovina razlike pozitivne i negativne vrednosti:

$$B_i = \frac{B_{p,i} - B_{n,i}}{2} \quad (5.1)$$

Na ovaj način je izolovana vrednost magnetnog polja EM senzora od prirodnog magnetnog polja Zemlje. Komponente polja Zemlje se mogu sračunati osrednjavanjem pozitivne i negativne komponente:

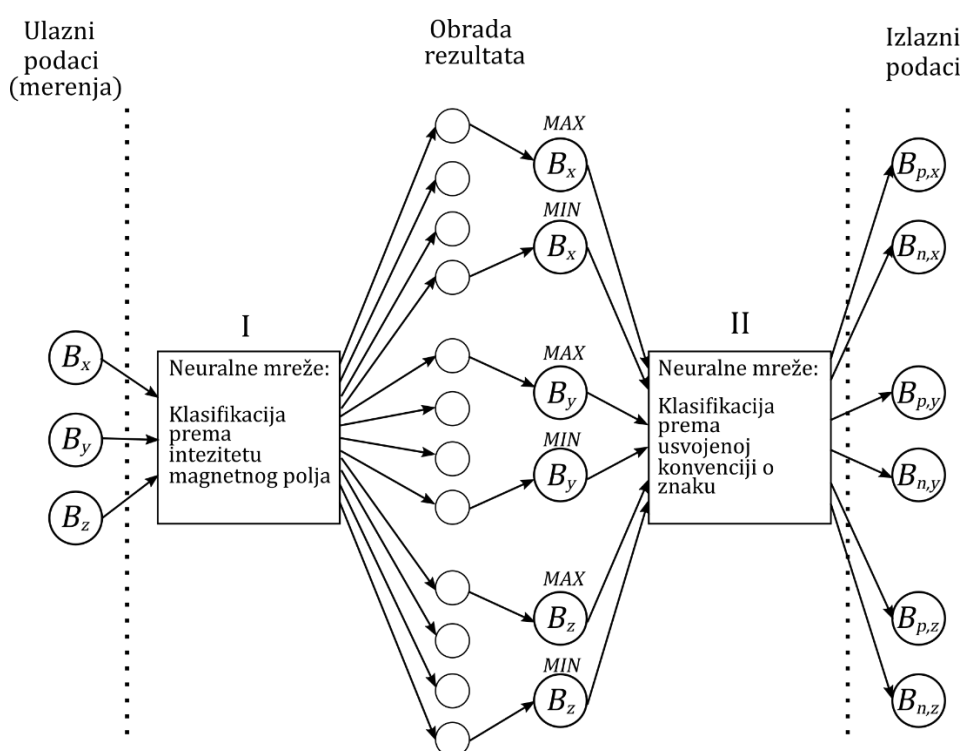
$$B_i^{Zem} = \frac{B_{p,i} + B_{n,i}}{2} \quad (5.2)$$

5.1.1.4 PRIMENA NEURALNIH MREŽA ZA KLASIFIKOVANJE IZMERENIH PODATAKA

Vrednosti komponenta indukovanog magnetnog polja su klasifikovane na pozitivne i negativne, upotrebom neuralnih mreža, odnosno posebne grupe kompetitivnih klasifikujućih neuralnih mreža (Demuth i saradnici., 2014). Zadatak klasifikujuće neuralne mreže je da za određeni ulazni vektor (ili niz podataka) definiše kojoj klasi (grupi) on pripada (Rafiq i saradnici, 2001). Svaki neuron u mreži predstavlja po jednu klasu. Sam neuron je definisan svojim težinskim vektorom, koji ponderiše veze sa ulaznim vektorom. Kada se algoritmu proslede ulazni podaci, unutar neuralne mreže, za svaki neuron se računa suma proizvoda ulaznih podataka i odgovarajućih težinskih koeficijenata. Neuronu, u kojem je sračunata vrednost prešla određeni prag aktivacije,

dodeljuje se izlaz 1 dok svi ostali neuroni dobiju izlaz 0. Na ovaj način se vrši klasifikacija ulaznih vektora.

Prvi korak pri formiranju mreže je definisanje broja klasa (neurona) u odnosu na koje će se ulazni vektori klasifikovati. Sledeći korak je treniranje mreže, tj. određivanje težinskih vektora veza mreže. Kroz proces treniranja definišu se težinski koeficijenti za svaku vezu neurona sa ostalim neuronima ili ulaznim podacima. Osnovni proces u treniranju kompetitivnih (takmičarskih) mreža je približavanje aktiviranih (pobedničkih) neurona ulaznom vektoru, za koji je unapred poznato kojoj klasi pripada (Kohonen, 2012).



Slika 5.5 Shematski prikaz klasifikacije izmerenih komponenta magnetnog polja, ravnih EM senzora, upotrebom neuralnih mreža.

Prema dimenzionalnosti ulaznih vektora, klasifikujuće neuralne mreže se dele na jednodimenzionalne, dvodimenzionalne i višedimenzionalne. Iako je ulazni vektor za obradu vrednosti komponenta magnetnog polja dvodimenzionalan (intezitet polja i vreme), u obradi merenja magnetnog polja pokazalo se da dvodimenzionalna mreža nema značajnih prednosti u odnosu na jednodimenzionalnu mrežu.

Rezultat snimanja magnetnog polja u jednoj tački je matrica dimenzije 180×3 gde je svaka vrsta definisana sa tri komponente magnetnog polja snimljene u jednom trenutku tokom „Burst“ režima rada. Budući da su korišćena tri sekvencijalna „Burst“ snimanja, ukupan broj snimljenih podataka je bio $3 \times 60 = 180$. Ulazni vektor za neuralnu mrežu je jedna kolona matrice, tj. 180 jednodimenzionalnih vektora. Zadatak algoritma neuralne mreže je da podeli ulazne vektore u 4 grupe (4 neurona) prema njihovom položaju u jednodimenzionalnom prostoru (Slika 5.5). Četiri klase su korišćene da bi se omogućilo da se u unutrašnjim klasama (bližim srednjim vrednostima ulaznih vektora) grupišu podaci snimljeni u trenucima promene smera pobudne struje, dok bi se u spoljašnjim klasama grupisali filtrirani korisni podaci u trenucima stabilnijeg signala. Kao konačne vrednosti maksimalne i minimalne komponente magnetnog polja uzimaju se uprosečene vrednosti spoljnih grupa.

Nakon klasifikovanja ulaznih podataka, algoritam neuralne mreže definiše dve uprosečene vrednosti za svaku komponentu magnetnog polja. Preostali korak se sastoji od klasifikovanje uprosečenih vrednosti prema usvojenoj konvenciji, gde se za pozitivne vrednosti uzimaju one koje gde se javlja produžena poluperioda. Ovaj problem se rešava upotrebom nove neuralne mreže koja vrši dalju klasifikaciju u dve grupe (Slika 5.5). Nakon prethodnog koraka, u svakoj klasi se vrši se pretraga za 6 uzastopno izmerenih podataka. Klasa koja ima više ovakvih podataka je klasa u kojoj je zabeležena produžena poluperioda. Ukoliko ni jedna grupa nema 6 uzastopnih podataka, smatra se da je jačina magnetnog polja toliko mala da se može uzeti vrednost 0. U tačkama u okolini spajanja pojedinačnih „Burst“ serija (tačke 60 i 120), mogući niz od 6 uzastopnih podataka se ne uzima u obzir.

Obrada merenja magnetnog polja, primenom algoritma neuralne mreže, kao rezultat daje pozitivne i negativne vrednosti komponentata magnetnog polja u svakoj tački, prema usvojenoj konvenciji. Dobijeni rezultati su pomereni u odnosu na nulu za jačinu prirodnog magnetnog polja (Slika 5.4). Ovde je implicitno uvedena pretpostavka o nepromenljivosti prirodnog magnetnog polje u toku jednog snimanja. Konačan podatak o vrednostima komponentata magnetnog polja se dobija primenom j-ne (5.1).

5.1.1.5 VIZUELIZACIJA IZMERENIH VREDNOSTI

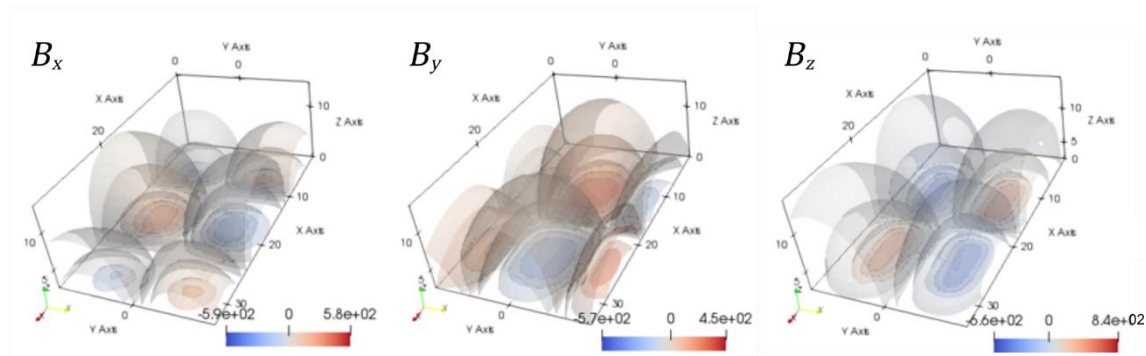
Magnetno polje, indukovano pobudom ravnih kalemova EM senzora, je prostornog karaktera (Slika 5.6). Pored toga, u jednom trenutku, pobuda dva ravna kalema je uvek suprotne orijentacije. Shodno tome, i mapiranje magnetnog polja, je obavljeno po trodimenzionalnim rasterima, definisanim u poglavlju 5.1.1.2. Takođe, treba imati u vidu da je u svakoj tački, korišćenih rastera, snimljen vektor magnetnog polja, definisan sa tri ortogonalne komponente. Imajući u vidu složenost vizualizacije prostornih vektorskih polja, radi preglednosti, rezultati merenja su predstavljani pomoću konturnih linija u određenim karakterističnim podužnim (u X - Z ravni) i poprečnim (u Y - Z ravni) presecima. Za vizualizaciju rezultata mapiranja magnetnog polja Flat DC-2 EM senzora, kako van kanala tako i unutar kanala, korišćeni su sledeći preseci:

- *Presek $X = 12 \text{ cm}$* – poprečni presek magnetnog polja koji prolazi kroz sredinu prednje elektrode i kalema (predstavljen plavom isprekidanom linijom).
- *Presek $Y = 0 \text{ cm}$* – podužni presek magnetnog polja koji se poklapa sa podužnom osom simetrije Flat DC-2 EM senzora (predstavljen zelenom isprekidanom linijom).
- *Presek $Y = 5 \text{ cm}$* – podužni presek magnetnog polja koji približno odgovara polovini odstojanja između elektroda i bočne ivice Flat DC-2 EM senzora (predstavljen crvenom isprekidanom linijom).

U svakom od navedenih preseka, pojedinačno su predstavljene sve tri komponente vektora magnetnog polja pomoću konturnih dijagrama. Pored komponenata magnetnog polja, konturni dijagram je korišćen i za vizualizaciju magnitude magnetnog polja B_{mag} .

Konačno, imajući u vidu da dominantan doprinos generisanju izlaznog napona daje komponenta magnetnog polja B_y , posebno je predstavljen raspored B_y iznad elektroda Flat DC-2 EM senzora ($X = 12 \text{ cm}$, $Y = 0 \text{ cm}$). U ovom koraku korišćeni su podaci snimljeni sa gušćim rasterom, unutar laboratorijskog kanala. Raspored B_y je predstavljen duž vertikale u Z pravcu, upravnom na površinu elektroda. Za vizualizaciju su korišćena dva pristupa: 1.) Raspored originalnih izmernih vrednosti B_y duž vertikale Z i 2.) Raspored osrednjenih izmerenih vrednosti B_y u opsegu Y vrednosti od -4 do 4 cm duž

vertikale Z. Ovi podaci su kasnije iskorišćeni za analizu funkcionalne zavisnosti između vrednosti B_y i odgovarajuće jednodimenzionalne težinske funkcije w .



Slika 5.6 Izometrijski prikaz prostornog rasporeda komponenta magnetnog polja Flat DC-2 EM senzora, izmerenih unutar laboratorijskog kanala

5.1.2 REZULTATI I DISKUSIJA

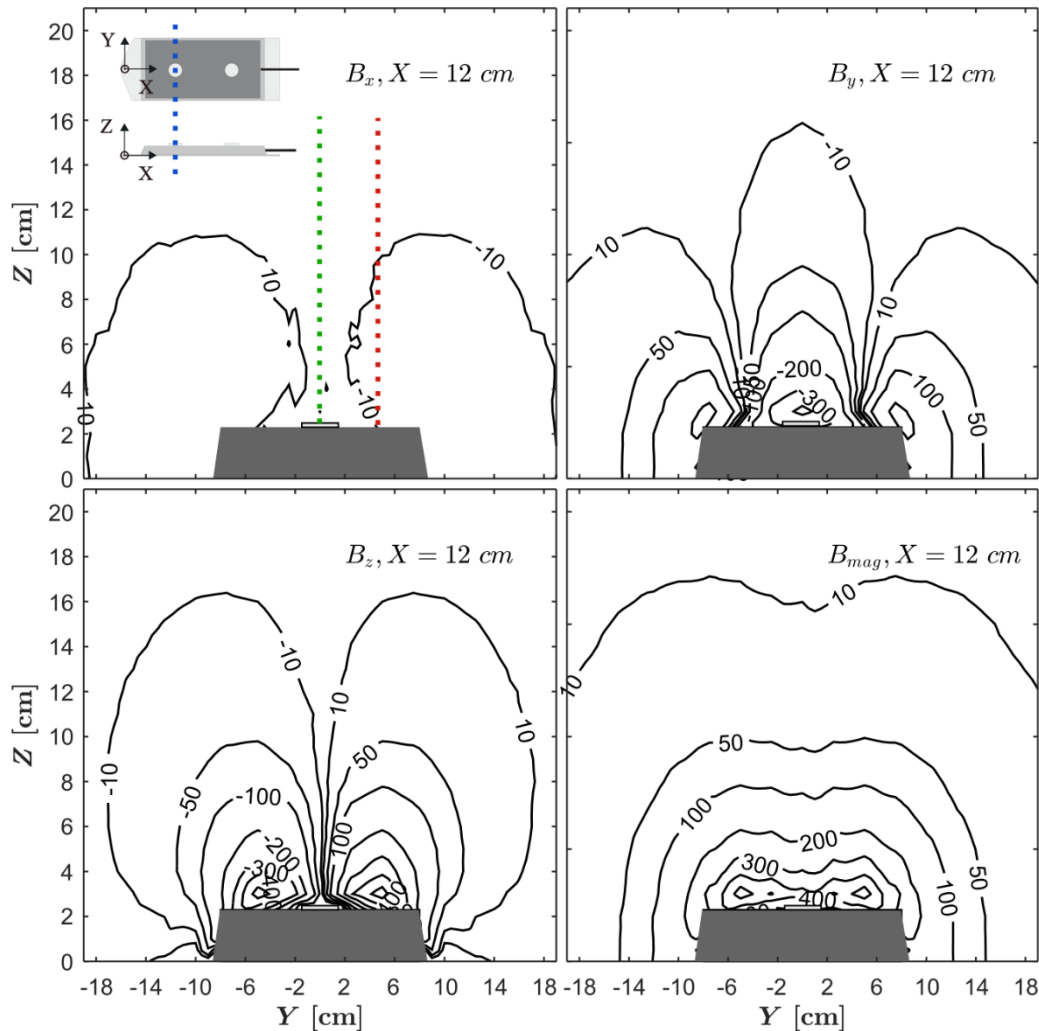
Nakon izvršenog mapiranja magnetnog polja, kako van kanala tako i unutar, sprovedena je vizualna inspekcija dobijenih rezultata. Ustanovljeno je da se tokom merenja, kao i obrade, nisu javili značajniji nedostaci u podacima. Magnetometar je uspešno zabeležio vrednosti vektora magnetnog polja u prostoru, dok su se primenom algoritma neuralnih mreža izmereni podaci klasifikovani na željen način.

U narednim poglavljima su predstavljeni rezultati mapiranja magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, prvo van kanala a kasnije i unutar kanala. Rezultati provere uticaja feromagnetnih objekata na rad senzora su ukazali da njihovo prisustvo u blizini EM senzora, ne utiče značajno na oblik magnetnog polja. Detaljnije o ovom aspektu istraživanja se može naći u radu Stojadinovića i saradnika (2018).

5.1.2.1 MAPIRANJE MAGNETNOG POLJA RAVNOG EM SENZORA VAN KANALA

Magnetno polje, FLAT DC-2 EM senzora, je u prvoj etapi eksperimentalnog istraživanja mapirano ručnim pomeranjem magnetometra po rasteru. Odstojanje između susednih mernih tačaka su iznosila po 2.5 cm u X i Y pravcu, odnosno 1 cm po Z pravcu. Merenja magnetnog polja za opseg Y od 0 do -22.5 cm su obavljena sa manjom gustinom odnosno većim međusobnim rastojanjima, zbog uočenog prisustva simetrije. Rezultati merenja

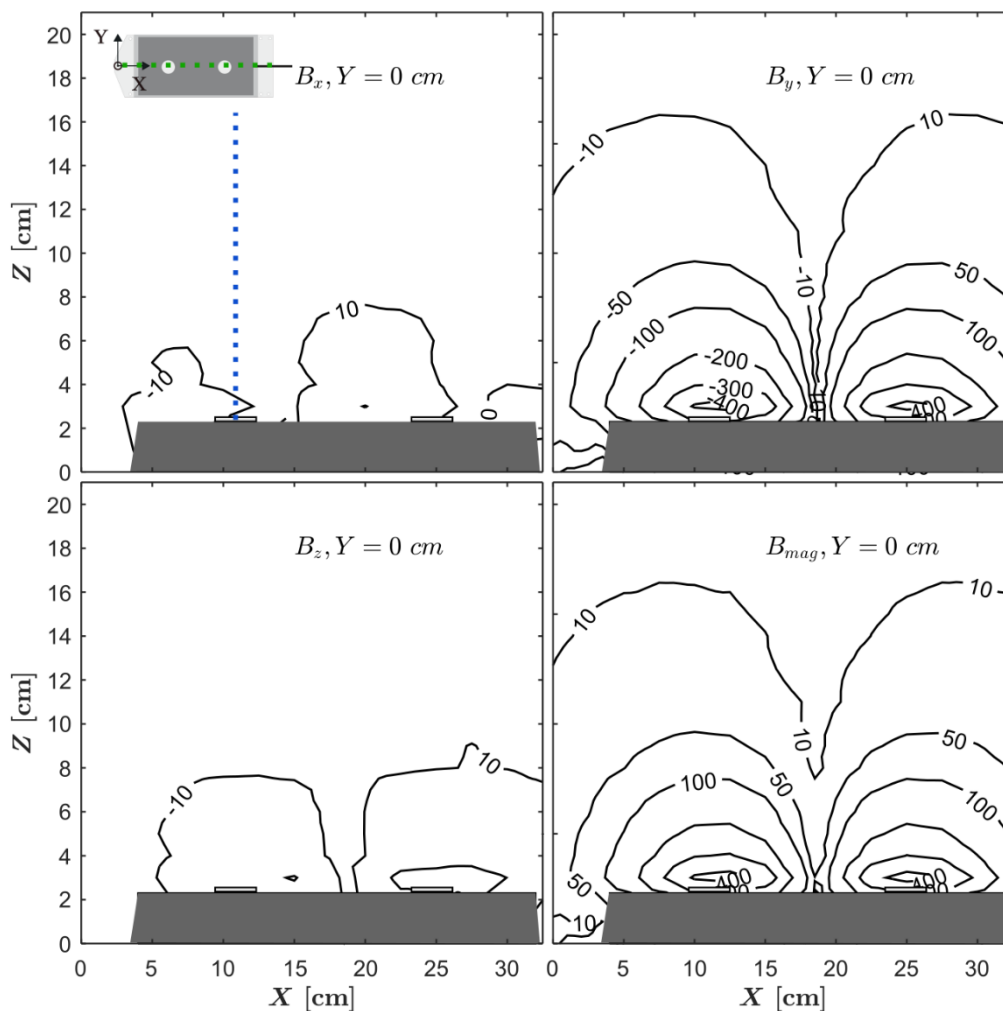
komponentata vektora magnetnog polja su obrađeni naknadno pomoću algoritma neuralnih mreža kako bi se eliminisao uticaj prirodnog magnetnog polja.



Slika 5.7 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponentata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $X = 12 \text{ cm}$, u prvoj etapi mapiranja (van kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $X = 12 \text{ cm}$.

Na Slici 5.7 su prikazani rezultati mapiranja komponentata vektora magnetnog polja, zajedno sa sračunatom magnetudom vektora, pomoću konturnih linija, za presek $X = 12 \text{ cm}$. Može se uočiti da u ovom preseku, X komponenta magnetnog polja ima zanemarljive vrednosti, dok su maksimalne vrednosti zabeležene za Y i Z komponentu. Treba napomenuti da na indukovanje izlaznog napona na elektrodama senzora, ključan doprinos

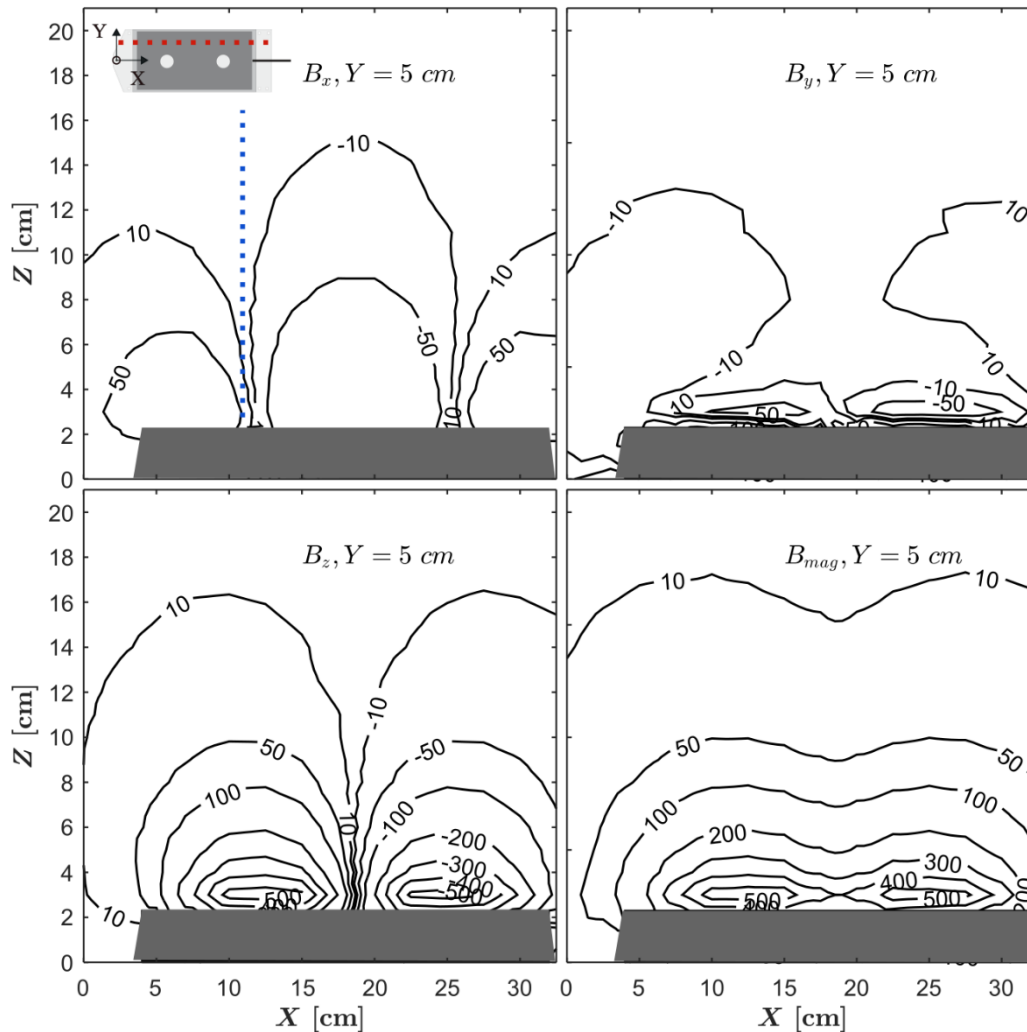
ima upravo Y komponenta magnetnog polja (zbog pravila desne ruke koji opisuje Faradejev zakon indukcije – Slika 2.5).



Slika 5.8 Grafčki prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponenta, kao i sračunate magnitute, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $Y = 0 \text{ cm}$, u prvoj etapi mapiranja (van kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $Y = 0 \text{ cm}$.

Na Slikama 5.8 i 5.9, prikazane su konturne linije izmerenih komponenta, kao i magnitute, magnetnog polja u presecima $Y = 0 \text{ cm}$ i $Y = 5 \text{ cm}$, respektivno. U preseku $Y = 0 \text{ cm}$, može se primetiti da su komponente magnetnog polja u X i Z pravcu zanemarljive, dok je dominantna komponenta u Y pravcu. Sa druge strane, u preseku $Y = 5 \text{ cm}$, dominantna je komponenta magnetnog polja u Z pravcu. Na osnovu gradijenta pada vrednosti komponenta i magnitute magnetnog polja, sa povećanjem odstojanja od

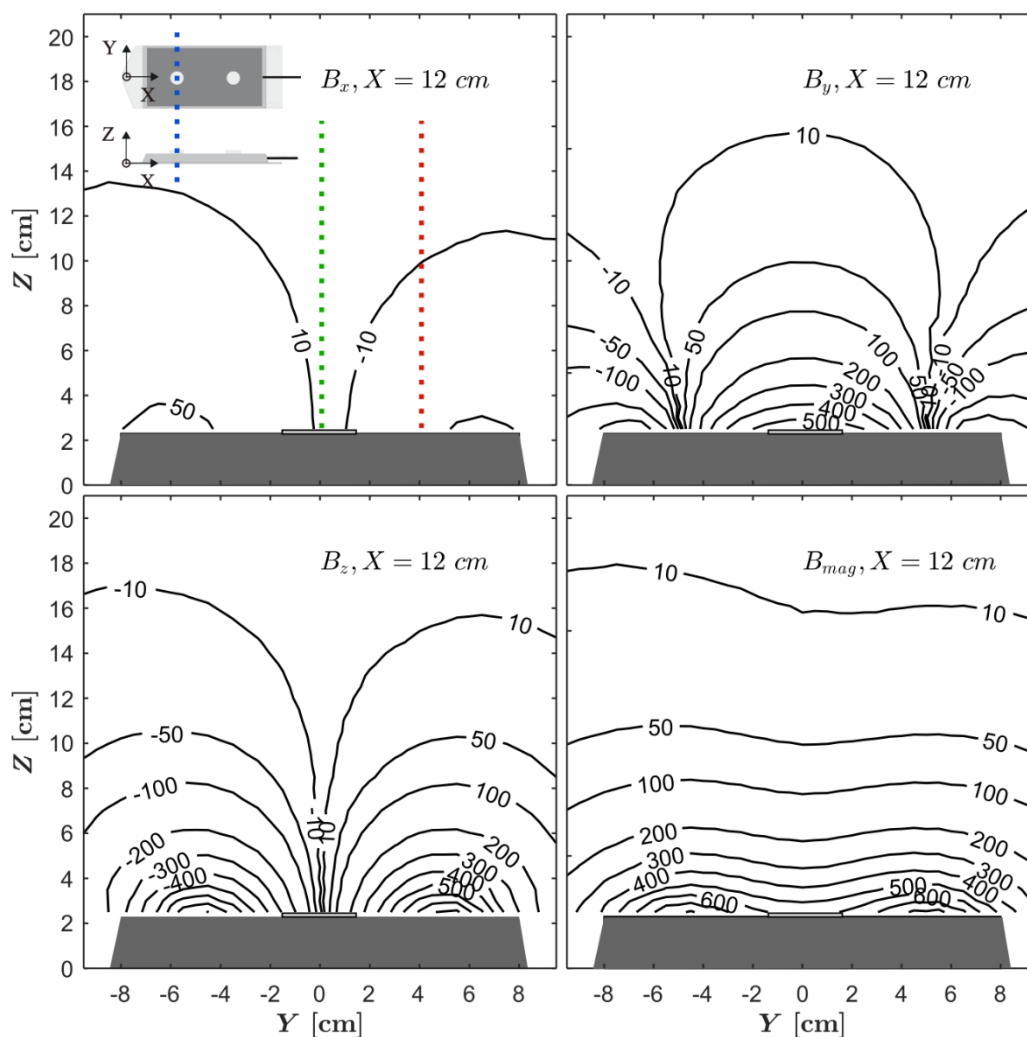
ravnih kalemova, zaključuje se da je integracija brzina u mernoj zapremini izrazito nelinearna. Prostorni raspored magnetnog polja je složen, zbog čega je jasno zašto se za cevne EM senzore sa visokom deklarisanom tačnošću, predlaže upotreba kompleksnog matematičkog modela za modeliranje radnog principa senzora, definisan j-nom (2.5).



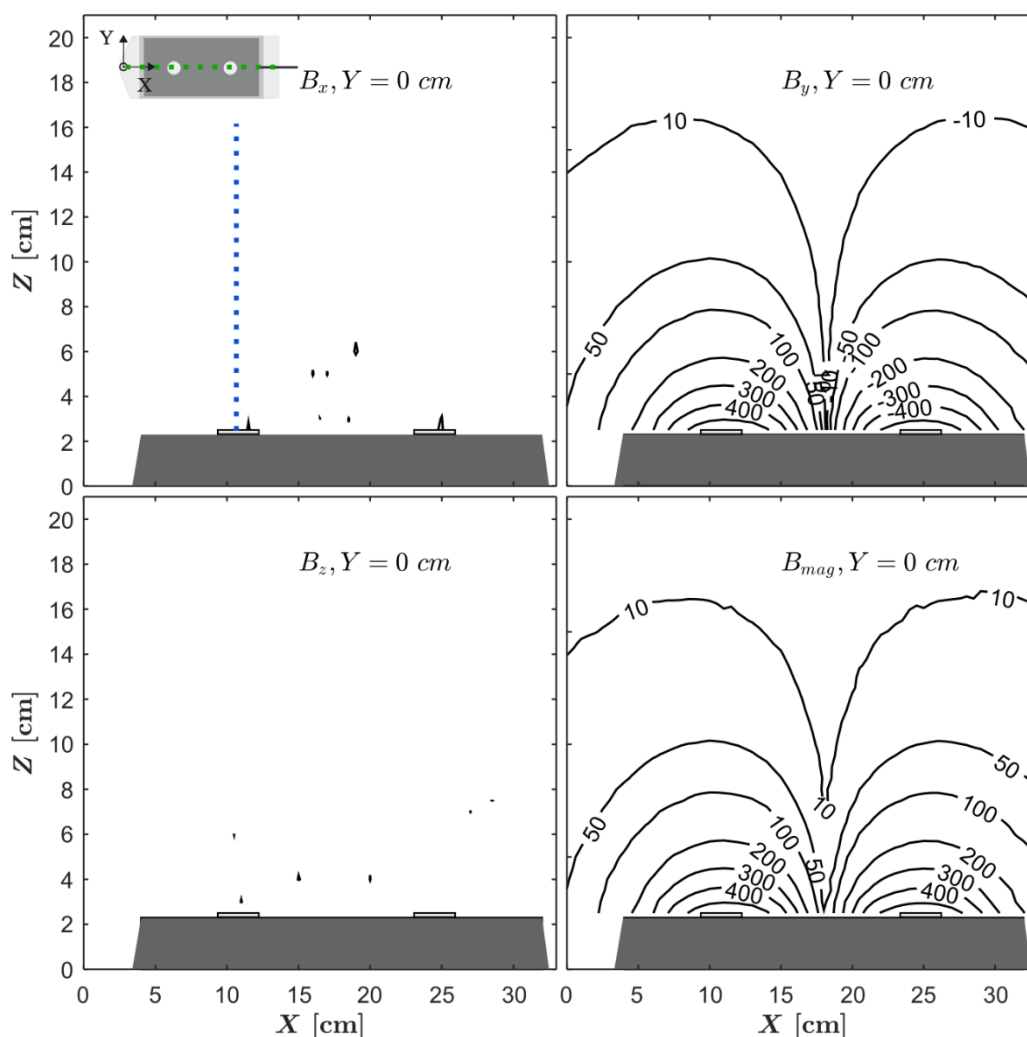
Slika 5.9 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponenata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $Y = 5$ cm, u prvoj etapi mapiranja (van kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $Y = 5$ cm.

5.1.2.2 MAPIRANJE MAGNETNOG POLJA RAVNOG EM SENZORA UNUTAR KANALA

U okviru druge etape eksperimentalnog istraživanja magnetno polje, FLAT DC-2 EM je mapirano automatizovanim pomeranjem magnetometra po rasteru unutar laboratorijskog kanala. Odstojanje između susjednih mernih tačaka su iznosila po 1.0 cm u X, Y i Z. Rezultati merenja komponenta vektora magnetnog polja su obrađeni naknadno pomoću algoritma neuralnih mreža kako bi se eliminisao uticaj prirodnog magnetnog polja.



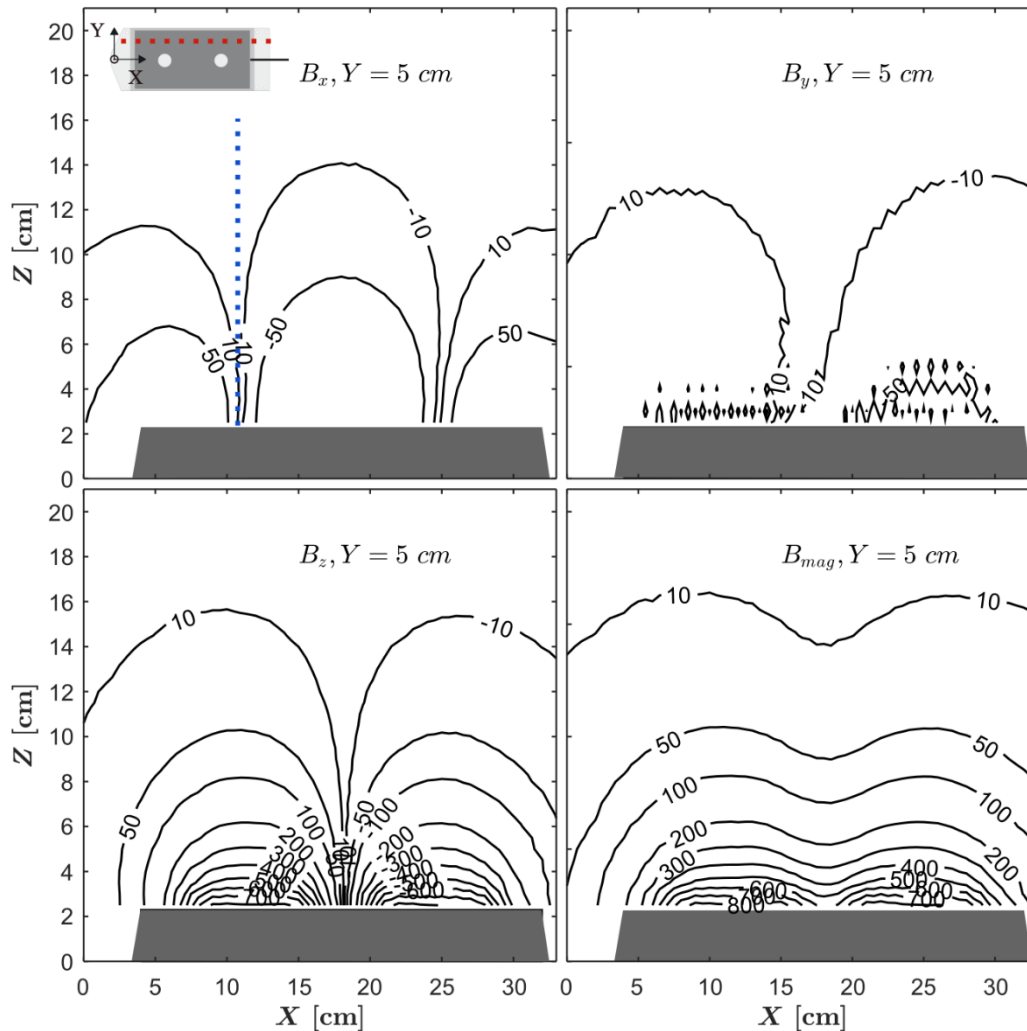
Slika 5.10 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponenta, kao i sračunate magnitute, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $X = 12 \text{ cm}$, u drugoj etapi mapiranja (unutar kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $X = 12 \text{ cm}$.



Slika 5.11 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponenta, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $Y = 0$ cm, u drugoj etapi mapiranja (unutar kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $Y = 0$ cm.

Na Slici 5.10 su prikazani rezultati mapiranja komponenta vektora magnetnog polja, zajedno sa sračunatom magnetudom vektora, pomoću konturnih linija za presek $X = 12$ cm. Na Slikama 5.11 i 5.12, prikazane su konturne linije izmerenih komponenta, kao i magnitude, magnetnog polja u presecima $Y = 0$ cm i $Y = 5$ cm, respektivno. Slični zaključci se mogu izvesti kao i u slučaju mapiranja magnetnog polja van kanala. U drugoj etapi mapiranja, uočena je blaga nesimetrija između magnetnog polja za vrednosti $Y < 0$ cm u odnosu na $Y > 0$ cm. Imajući u vidu da je korišćena preciznija metoda pozicioniranja magnetometra, u odnosu na prvu etapu, smanjena je greška u pozicioniranju. Blaga

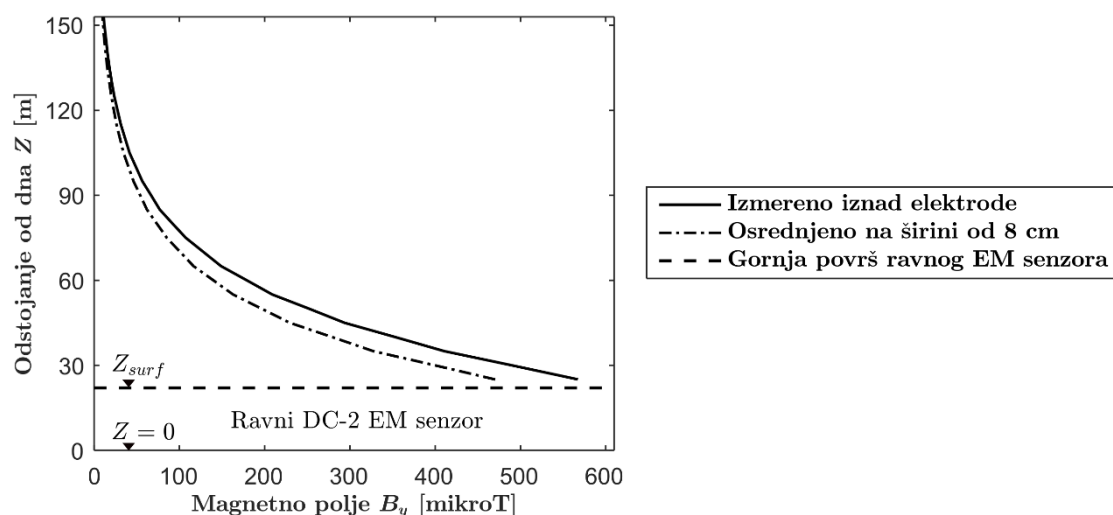
nesimetrija se javlja na nižim vrednostima magnetnog polja, manjim od 70 mikroT, najverovatnije kao posledica uticaja metalne konstrukcije laboratorijskog kanala.



Slika 5.12 Grafički prikaz konturnih linija izmerenih vrednosti komponentata, kao i sračunate magnitude, magnetnog polja FLAT DC-2 EM senzora, za presek $Y = 5 \text{ cm}$, u drugoj etapi mapiranja (unutar kanala). Plava isprekidana linija na skici EM senzora, u gornjem levom uglu, pokazuje položaj preseka $Y = 5 \text{ cm}$.

Zbog analize nelinearnog integracionog principa ravnih EM senzora, odnosno ispitivanja mogućnosti primene postupka suve kalibracije ravnih EM senzora, na Slici 5.13 su posebno predstavljeni rasporedi komponente B_y iznad elektroda senzora ($X = 12 \text{ cm}$, $Y = 0 \text{ cm}$). Punom linijom su prikazane izmerene vrednosti duž vertikale u Z pravcu, a linijom „crta-tačka“ osrednjene izmerene vrednosti u opsegu Y vrednosti od -4 do 4 cm.

Opseg Y vrednosti od -4 do 4 cm je definisan prema rasporedu pozitivne komponente B_y (Slika 5.11) Sa Z_{surf} je označena kota gornje površine senzora koja odgovara vrednosti od 22 mm (Od H_F se oduzima visina elektroda, 1 mm).



Slika 5.13 Grafički prikaz rasporeda komponente magnetnog polja B_y FLAT DC-2 EM senzora, za vertikalnu u Z pravcu ($X = 12$ cm, $Y = 0$ cm), u drugoj etapi mapiranja (unutar kanala).

5.1.3 ZAKLJUČCI

Magnetno polje EM senzora je osnovni tehnički parametar senzora koji definiše princip rada odnosno generisanje izlaznog napona. Magnetno polje FLAT DC-2 EM senzora, proizvođača „Svet instrumenata“ je sistematski mapirano, odnosno mereno u dovoljno velikom broju tačaka, kako bi se omogućilo definisanje detaljnog prostornog rasporeda i ispitala mogućnost primene postupka suve kalibracije ravnih EM senzora. Mapiranje magnetnog polja ravnog EM senzora je sprovedeno u hidrauličkoj laboratoriji Građavinskog fakulteta, pomoću magnetometra čiji princip rada se zasniva na Holovom efektu. Mapiranje je sprovedeno u dve etape, gde je u prvoj etapi merenje obavljeno izvan laboratorijskog kanala, po ređem rasteru, ručnim pozicioniranjem magnetometra. U drugoj etapi, mapiranje je sprovedeno u laboratorijskom kanalu, po gušćem rasteru, koristeći automatizovani pozicioner. Imajući u vidu pulsni, bipolarni karakter, kao i dvojni frekvenciju merenog magnetnog polja, izmereni rezultati su posebno obrađeni

primenom heurističkog algoritma neuralnih mreža. Takođe, iz izmerenih vrednosti je eliminisan uticaj prirodnog magnetnog polja planete Zemlje.

Na osnovu gradijenta pada vrednosti komponenata i magnitude magnetnog polja, sa povećanjem odstojanja od ravnih kalemova, konstatovano je da se integracija rasporeda brzina u mernoj zapremini, sprovodi na izrazito nelinearan način. Zaključeno je da je prostorni raspored magnetnog polja složen, čime se opravdava upotreba složenog matematičkog modela EM senzora, za potrebe modeliranja cevnih EM senzora sa visokom deklarisanom tačnošću. Međutim, imajući u vidu da su ravni EM senzori namenjeni upotrebi u kanalizacionim sistemima i generalno imaju nižu tačnost od cevnih, sa praktičnog aspekta je poželjno razviti odgovarajući jednostavniji odnosno uprošćeni model. Za potrebe uprošćenog modela, pretpostavlja se da je dovoljno analizirati raspored komponente magnetnog polja B_y . Dobijeni rezultati, upravo predstavljaju polaznu tačku za razvijanje uprošćenog matematičkog modela ravnih EM senzora.

5.2 UPROŠĆENI MODEL I TEHNIČKI PARAMETRI RAVNIH EM SENZORA

Kako bi se omogućilo definisanje pouzdane korelacije između brzine izmerene pomoću ravnog EM senzora V_{mer} i srednje profilske brzine V , u ovoj disertaciji je razmatrana mogućnost upotrebe postupka lokalne kalibracije. Lokalna kalibracija podrazumeva korekciju izlaznog signala na osnovu simuliranja odziva senzora, u ovom slučaju ravnih EM senzora, korišćenjem matematičkog modela senzora i poznatog rasporeda brzina u njegovoj kontrolnoj zapremini CV (El Bahlouli & Larrarte, 2018; Ivetić i saradnici, 2018b).

Fundamentalni matematički model EM senzora, kojim se odziv ovih uređaja opisuje pomoću integrala proizvoda tri vektorska polja, je složen i teško primenjiv na praktične probleme merenja protoka metodom V - A. Složenost se ogleda u činjenici da je za definisanje potrebnih ulaznih podataka, neophodno poznavati prostorni oblik kontrolne zapremine τ i unutar nje opisati prostorni raspored ukupno 9 komponenata (tri vektora sa tri komponente). Imajući u vidu kompleksnost fenomena elektromagnetizma, za

sprovođenje ovakve analize, na potrebnom nivou detaljnosti, potreban je neprihvatljivo visok utrošak ljudskih i računarskih resursa. U literaturi ne postoji adekvatan zamenski, odnosno jednostavniji, model EM senzora kojim se ovaj problem može prevazići.

U ovom poglavlju je dat predlog za upotrebu uprošćenog matematičkog modela kojim se odziv ravnih EM senzora opisuje pomoću dva tehnička parametra: jednodimenzionalne težinske funkcije w i maksimalnog dometa kontrolne zapremine τ_{max} . Pretpostavlja se da predloženi model može verodostojno da simulira princip nelinearne integracije polja brzine unutar kontrolne zapremine ravnih EM senzora. Takođe, predložena je eksperimentalna metodologija za određivanja odgovarajućih tehničkih parametara, $w(z)$ i τ_{max} . U okviru metodologije, prvo su korišćeni eksperimentalni rezultati dobijeni u poglavlju 4.2, gde je ravni (Flat DC-2) EM senzor bio pokriven poroznim sedimentom. Dodatno je, korišćenjem štapičastog ADV senzora, definisan i raspored podužnih komponenta brzina u kontrolnoj zapremini senzora. Kombinacijom rezultata iz navedenih eksperimenata, omogućava se sprovođenje analize „unazad“ kako bi se došlo do traženih tehničkih parametara. Konačno, analizirana je funkcionalna zavisnost između dobijenih tehničkih parametara i rasporeda komponente magnetnog polja B_y . Konkretno, ispitana je dodatna mogućnost suve kalibracije ravnih EM senzora definisanjem težinske funkcije $w(z)$, na osnovu podataka o B_y i modela rasporeda osrednjene gustine struje $j(z)$.

5.2.1 METODOLOGIJA

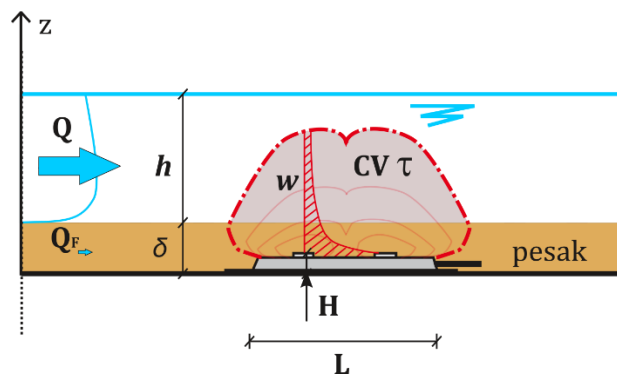
Konceptualna analiza uprošćenog matematičkog modela ravnih EM senzora, zajedno sa osnovama metodološkog postupka za eksperimentalno određivanje i validaciju tehničkih parametara, su predstavljeni u ovom poglavlju.

5.2.1.1 UPROŠĆENI MATEMATIČKI MODEL EM SENZORA

Brojni istraživači su naveli da brzina koju meri, trenutno najpopularniji, papučasti ADV senzor odstupa od srednje profilske brzine V , usled lokalnog karaktera merenja. Čak i na mernim mestima, koja zadovoljavaju osnovne kriterijume u pogledu dugačkih prizmatičnih deonica, bez singulariteta u blizini, neophodno je definisati adekvatnu

korekcionu funkciju K za određivanje V . Usled činjenice da ravni EM senzori, takođe mere lokalnu brzinu u relativno maloj kontrolnoj zapremini CV, isti zaključak je i ovde primenjiv. Korekciona funkcija K , koja povezuje izmerenu brzinu V_{mer} sa srednjom profilskom brzinom V , zavisi od tehničkih parametara razmatranog senzora (koji opisuju veličinu CV-a kao i princip integracije polja brzina unutar nje) i od lokalnih hidrauličkih uslova (prvenstveno rasporeda brzina) za analizirani opseg protoka.

Budući da je fundamentalni matematički model EM senzora, definisan j-nom (2.5), isuviše složen za praktičnu upotrebu ravnih EM senzora, ovde je analizirana mogućnost uvođenja uprošćenog matematičkog modela. Polazna tačka za konceptualnu analizu uprošćenog modela predstavlja sam Faradejev zakon indukcije (poglavljje 2.1.2). Budući da je Faradejev zakon indukcije definisan pravilom desne ruke, glavni doprinos izlaznom signalu će dati podužna komponenta vektorskog polja brzina V_x . Shodno navedenom, može se zaključiti da je za analizu principa integracije ravnih EM senzora, adekvatna formulacija predložena od strane Šerklifa (Shercliff, 1962) koja podrazumeva upotrebu težinske funkcije w (2.4) umesto težinskog vektora \vec{W} . Stoga, usvojiće se da je za analizu rada ovakvih EM senzora, dovoljno poznavati težinsku funkciju w i veličinu kontrolne zapremine CV τ .



Slika 5.14 Grafički prikaz rada ravnog EM senzora ispod porozne prekrivke od peska sa parametrima relevantnim za analizu (podužni presek)

U opštem slučaju, CV ravnih EM senzora je definisana tipom i veličinom pobudnih kalemova, i prostorno se definiše kao zapremina τ (Slika 5.14). Analiza predstavljena u poglavljju 4.2, gde je ravni EM senzor prekriven poroznim sedimentom i plastičnom folijom, je ukazala da se zapremina τ , praktično nalazi iznad samog kućišta senzora. U

prilog ovoj konstataciji idu i rezultati predstavljeni u poglavlju 5.1. Mapiranjem magnetnog polja ravnog EM senzora (Slike 5.7 – 5.13), uočeno je da komponenta magnetnog polja u Y pravcu B_y zaista ima dominantne vrednosti iznad samog kućišta. Ukoliko se pretpostavi da raspored podužne komponente brzine V_x ne varira značajno po dužini i širini kućišta senzora, površinski ili zapreminski integral iz jednačina (2.4) i (2.5), se može svesti na jednu dimenziju, odnosno na konačni linijski integral. Time se integracija proizvoda polja brzina i težinske funkcije, sprovodi duž linije upravne na površinu elektroda. Treba napomenuti, da se usvajanjem ovog uprošćenja, dozvoljava analiza uticaja rasporeda brzina na izlazni signal, isključivo u pravcu upravnom na elektrode, odnosno kućište, ravnog EM senzora. Sa druge strane, na ovaj način težinska funkcija w se svodi na jednodimenzionalnu težinsku funkciju $w(z)$. Takođe, CV ravnih senzora se može opisati upotrebom jednog parametra, ovde nazvanog dometom CV-a, τ_{max} . Domet CV-a definiše odstojanje između minimalne donje i maksimalne gornje granice linearne integracije (Slika 5.15). Donja granice integracije se u opštem slučaju određuje položajem površine elektroda ravnih EM senzora Z_{surf} . Međutim, u slučaju prisustva pokrivke od poroznog sedimenta, dubine δ , donju granicu integracije treba definisati kao:

$$Z_L = \max\{Z_{surf}, \delta\} \quad (5.3)$$

Budući da dubina tečnosti h , može biti manja od zbira $Z_{surf} + \tau_{max}$, gornju granicu integracije treba definisati na sledeći način:

$$Z_U = \min\{Z_{surf} + \tau_{max}, h\} \quad (5.4)$$

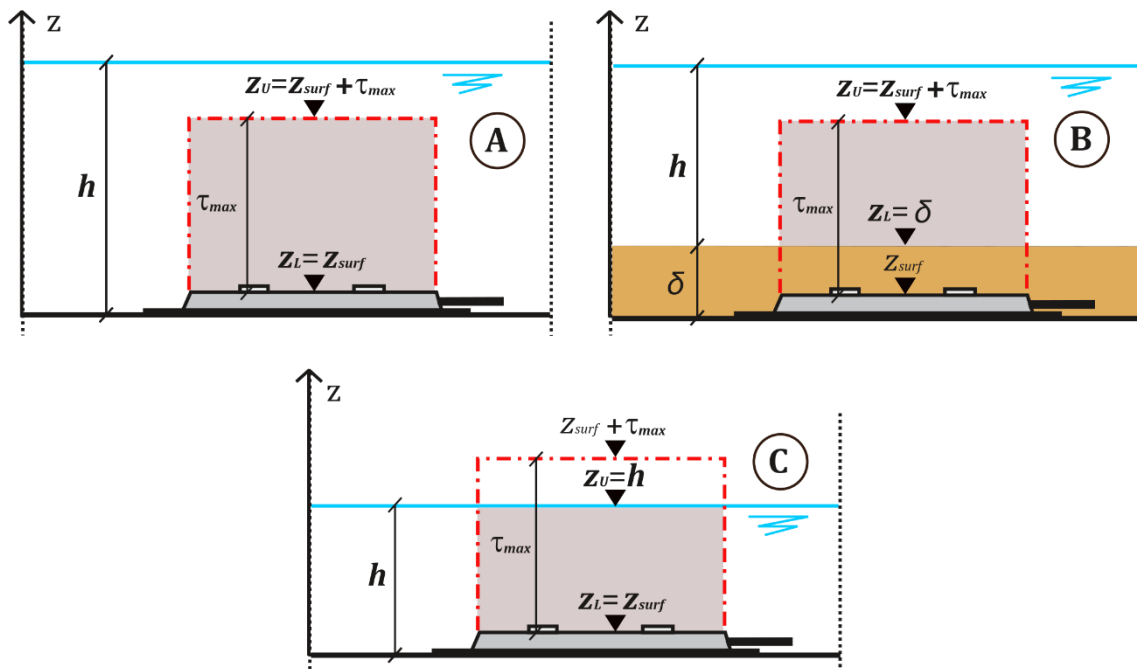
Imajući navedeno u vidu, izmerena brzina V_{mer} se može modelirati, odnosno simulirati, integralom proizvoda profila podužnih brzina $V_x(z)$ i odgovarajuće jednodimenzionalne težinske funkcije $w(z)$:

$$V_{mer} \cong V_{S,mer} = \frac{1}{(Z_U - Z_L)} \int_{Z_L}^{Z_U} w(z) \cdot V_x(z) dz \quad (5.5)$$

gde je $V_{S,mer}$ simulirani izlaz ravnog EM senzora, a z odstojanje upravno na površinu elektroda, mereno od dna provodnika (ili zidova ako je senzor postavljen na zid). Treba

napomenuti da se variranjem donje i gornje granice integracije, različiti delovi $w(z)$ uključuju u integral, iako prostorni raspored $w(z)$ ostaje fiksiran.

Jednačine (5.3) – (5.5) definišu uprošćeni matematički model ravnih EM senzora. Omogućavanjem simuliranja odziva ravnih EM senzora, pomoću predloženog modela, olakšava se sprovođenje postupka lokalne kalibracije za razne geometrijske dispozicije hidrotehničkih sistema. Lokalna kalibracija (El Bahlouli i Larrarte, 2018) se može iskoristiti i za procenu neodređenosti izmerenog protoka Q i optimizacije broja i položaja senzora. Nažalost, proizvođači mernih instrumenata ne prilažu tehničke parametre (kao $w(z)$ i τ_{max}) njihovih uređaja u okviru tehničke dokumentacije. Takođe, odgovarajuće preporuke i procedure za njihovo određivanje ne postoje u literaturi.



Slika 5.15 Uprošćeni matematički model ravnog EM senzora: grafički prikaz granica integracije – A) Standardni slučaj: Donja granica $Z_L = Z_{surf}$ i gornja granica $Z_U = Z_{surf} + \tau_{max}$, B) Slučaj sedimentacije: Donja granica $Z_L = \delta$ i gornja granica $Z_U = Z_{surf} + \tau_{max}$, C) Slučaj malih dubina: Donja granica $Z_L = Z_{surf}$ i gornja granica $Z_U = h$.

5.2.1.2 LABORATORIJSKA INSTALACIJA

Dodatna eksperimentalna istraživanja, neophodna za izvođenje tehničkih parametara uprošćenog matematičkog modela ravnih EM senzora, su sprovedena na laboratorijskoj instalaciji opisanoj u poglavlju 3.5. Korišćena je modifikovana instalacija, detaljnije opisana u okviru poglavlju 4.2.1.1.1, odnosno prikazana na Slici 4.7. Flat DC-2 senzor je bio smešten unutar „test zone“ kanala, dužine 4.5 m i širine 0.25 m. U test zonu je na kontrolisan način nanošen rečni pesak, korišćen kao model poroznog sedimenta, sa relativno uniformnom granulometrijskom krivom ($C_u = 3.57$, $C_c = 1.12$, $D_{10} = 0.15$ mm, $D_{50} = 0.48$ mm, $D_{90} = 2.30$ mm).

U ovom delu istraživanja, korišćen je štapičasti ADV senzor „Vectrino+“ proizvođača „Nortek“ (Nortek, 2009). Detaljniji opis karakteristika ovog instrumenta za merenje brzine u tački je dat u poglavlju 3.3. Radi preglednosti, ovde će samo biti navedeno da je deklarisan tačnost merenja brzine ± 0.5 % od izmerene vrednosti, na šta treba dodati i grešku usled Doplerovog šuma od 1% od definisanog opsega brzina. Pozicioniranje štapičastog ADV senzora, unutar laboratorijskog kanala, je kontrolisano pomoću automatizovanog pozicionera, predstavljenog u poglavlju 3.5.2 (Slika 3.13). ADV senzor je korišćen za merenje rasporeda brzina unutar CV-a ravnog EM senzora.

5.2.1.3 ODREĐIVANJE TEHNIČKIH PARAMETARA

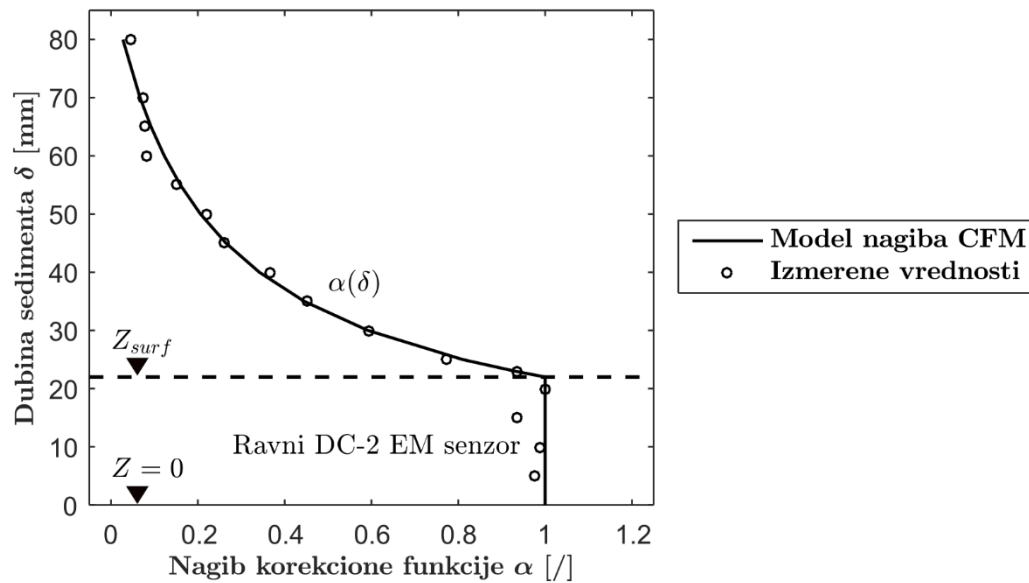
Predložena procedura za definisanje jednodimenzionalne težinske funkcije ravnog EM senzora $w(z)$ i dometa CV-a τ_{max} , se bazira na dva korelisana eksperimentalna istraživanja. Prvo, korišćeni su rezultati ispitivanja robusnosti ravnih EM senzora, odnosno mogućnosti rada pod pokrivanom od poroznog (peščanog) sedimenta, predstavljeni u okviru poglavlja 4.2. Polazna pretpostavka, za upotrebu ovih rezultata, je da peščana pokrивka ne utiče na elektromagnetne karakteristike ravnih EM senzora (Newman, 1982). U okviru ukupno $m = 1 \rightarrow M$ eksperimenata, gde je $M = 16$, Flat DC-2 EM senzor je pokriven rečnim peskom, dubina $\delta_m = \{0, 5, 10, 15, 20, 23, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 80$ mm}. Zaključeno je da prisustvo pokrивke, ili sedimenta, sistematski redukuje izlazni signal, odnosno izmerenu brzinu. Uočeni sistematski efekat je moguće minimizirati upotrebom linearne regresione analize i izvedenih linearnih

korekcionih funkcija (CFM-a), definisanih pomoću dva parametra, odsečak ili klizanje nule β i nagiba odnosno pojačanja α :

$$\overline{V_{B,m}} = \frac{\overline{V_{EMV,m}} - \beta_m}{\alpha_m} \quad (5.6)$$

Gde su sa $\overline{V_{B,m}}$ i $\overline{V_{EMV,m}}$ označene etalonska srednja profilska brzina i izmerena brzina, respektivno, dok su α_m [-] i β_m [m/s] nagib i odsečak m -te korekcionne funkcije. Za analizu predstavljenu u ovom poglavlju, od interesa je posmatrati trend promene vrednosti parametara korekcionih funkcija, sa promenom dubine sedimenta δ_m (ili samo δ). Prvo se uočava da vrednost parametra β , ne varira sa promenom dubine pokrivke (Slika 4.14). Ovakav trend se može pripisati činjenici da samo β potiče od smanjenja efektivne površine elektrode usled prisustva poroznog sedimenta (Ivetić i saradnici, 2018). Sa druge strane vrednost parametra α pokazuje eksponencijalnu zavisnost sa dubinama sedimenta većim od 22 mm, odnosno Z_{surf} (Slika 4.13). Na Slici 5.16, prikazani su rezultati sa Slike 4.13, samo sa obrnutim osama, kako bi dubina sedimenta odgovarala vertikalnom odstojanju. Uočena funkcionalna zavisnost, potiče od činjenice da je peščani sediment, ili pokrivka, zauzela donje delove kontrolne zapremine ravnog EM senzora, čime je podignuta donja granica integracije (j-ne (5.3) i (5.5)). Delove CV-a, okupirane sedimentom, karakteriše zanemarljiva filtraciona brzina ($Q_F \sim 0$, Slika 5.14) pa samim tim ne doprinose generisanju izlaznog signala.

Daljim razmatranjem, ustanovljeno je da predstavljeni rezultati mogu biti iskorišćeni za izvođenje jednodimenzionalne težinske funkcije $w(z)$ i dometa CV-a τ_{max} . Ideja se bazira na činjenici da su eksperimenti sa peščanim sedimentom, doveli do jasne korelacije između smanjenja veličine CV-a u pravcu upravnom na elektrode (kroz $Z_L = \delta$) i smanjenja izlaznog signala Flat DC-2 sonde – predstavljenog kroz parametar α . Ukoliko je poznat raspored podužne komponenta brzina $V_x(z)$, j-na (5.5) se može iskoristiti za određivanje nedostajućih tehničkih parametara $w(z)$ i τ_{max} . Dalja podpoglavljja su posvećena opisu predloženih procedura za definisanje stvarnog rasporeda podužnih brzina unutar laboratorijskog kanala kroz nove eksperimenta, kao i kasnije definisanje i validaciju tehničkih parametara ravnih EM senzora.



Slika 5.16 Nagibi korekcionnih funkcija α sa modelom nagiba iz CFM-a, dobijeni nakon redukovanje sistematske neodređenosti izmerenih brzina, proistekle od prisustva različitih dubina sedimenta $\delta = Z_L$.

5.2.1.3.1 ODREĐIVANJE RASPOREDA BRZINA U LABORATORIJSKOM KANALU

Da bi se odredila jednodimenzionalna težinska funkcija $w(z)$, potrebno je definisati neprekidnu funkciju koja opisuje raspored podužnih komponenta brzine $V_x(z)$, iznad Flat DC-2 EM sonde, za eksperimente gde je ispitivan rad ovih instrumenata pod pokrivanjem od poroznog sedimenta (poglavlje 4.2). Kao što je ranije i navedeno, odgovarajući eksperimenti su sprovedeni unutar laboratorijskog kanala opisanog u poglavljima 3.5 i 4.2.1.1.1. Ovde je neophodno napomenuti, da je tokom eksperimenata, odnos Ar (eng. Aspect ratio, tj. odnos između širine kanala B i dubine vode u kanalu h) uglavnom bio manji od 5. Prema tome, eksperimenti su sprovedeni u uslovima tečenja u „uzanom provodniku“, gde raspored brzina ima prostorni karakter i gde se maksimalna brzina javlja ispod slobodne površine (Nezu i saradnici, 1986; Bonakdari i saradnici, 2008). Potopljeni položaj maksimalne podužne komponente brzine se definiše kroz vrednost ξ_{dip} .

U opštem slučaju, za opisivanje $V_x(z)$ u turbulentnom toku sa slobodnom površinom, različiti obrazci se koriste za unutrašnji i spoljašnji region turbulentnog toka. Unutrašnji region se nalazi u donjih 10 – 20% dubine toka, i unutar njega stvaranje (generacija)

turbulentne kinetičke energije dominira nad njenom disipacijom. U zavisnosti od hrapavosti zida ili dna, odnosno da li se smatra glatkim ili hrapavim, koriste se odgovarajući obrazci za opisivanje rasporeda brzina. Za slučaj hrapavih kontura, koristi se standardni logaritamski obrazac:

$$\frac{V_x}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + B_s \quad (5.7)$$

gde je u_* smičuća brzina, κ Von Karmanova konstanta, k_s apsolutna hrapavost, dok $B_s = -2.5 \ln\left(\frac{z_0}{k_s}\right)$. Za definisanje B_s , potrebna je dužina hrapavosti površine z_0 , koja se određuje na osnovu Rejnoldsovog broja hrapavosti, prema obrazcima predloženim od strane Jan-a i saradnika (2006).

Usled činjenice da su eksperimenti sprovedeni u „uzanom provodniku“, neophodno je koristiti analitički obrazac za raspored brzina koji verodostojno može predstaviti pojavu potapanja maksimalne brzine, kroz vrednost ξ_{dip} . Ovde je korišćen opšti obrazac, predložen od strane Bonakdari-ja i saradnika (2008):

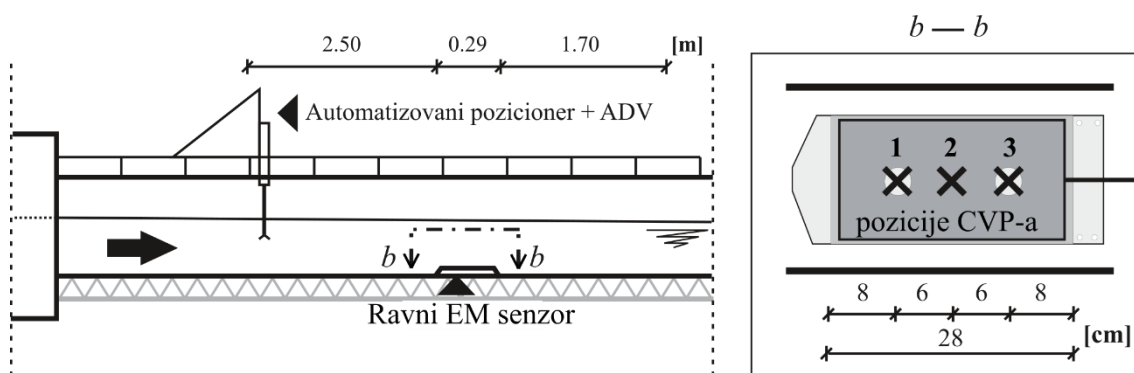
$$\frac{V_x(\xi)}{u_*} = \left(\frac{\frac{\xi_i^2}{2} + \xi_i + C_{Ar}}{\frac{\xi^2}{2} + \xi + C_{Ar}}\right) \left[\left(\frac{\left(\frac{\xi^2}{4} + \xi + C_{Ar} \ln(\xi)\right) - \left(\frac{\xi_i^2}{4} + \xi_i + C_{Ar} \ln(\xi_i)\right)}{\frac{\xi_i^2}{2} + \xi_i + C_{Ar}} \right) \cdot \frac{\left(\frac{gh \sin \theta}{u_*^2} - 1\right)}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{0.2h}{k_s}\right) + B_s \right] \quad (5.8)$$

gde je ξ_i relativno odstojanje od dna, ξ je relativan položaj granice između unutrašnjeg i spoljašnjeg regiona turbulentnog toka (ovde usvojena vrednost 0,2), C_{Ar} predstavlja parametar čija vrednost zavisi od vrednosti ξ_{dip} , dok je $\sin \theta$ nagib energetske linije. Obrazac je izveden iz uprošćenih Rejnoldsovih jednačina (Hajdin, 1977), uzimajući u obzir prethodno uočene karakteristike tečenja u „uzanom provodniku“. Glavni parametar modela je definisan kroz $C_{Ar} = 9.3 \xi_{dip}^{1.7}$. Nekoliko istraživača je predložilo različite obrasce za određivanje vrednosti ξ_{dip} u Centralnom Vertikalnom Profilu (CVP), na osnovu serija merenja (npr Wang i saradnici, 2001; Yang i saradnici, 2004; Bonakdari i saradnici, 2008). Kako bi se usvojila adekvatna formulacija za vrednost ξ_{dip} , i samim tim

definisao odgovarajući raspored brzina u eksperimentima gde je ravni EM senzor prektiven poroznim sedimentom, sprovedena su dodatna merenja $V_x(z)$. Korišćena je eksperimentalna instalacija predstavljena u poglavlju 5.2.1.2, i analizirana su tri slučaja predstavljena u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Karakteristike tri analizirana slučaja korišćena za procenu raspored podužnih komponentata brzina unutar laboratorijskog kanala

Slučaj	Dubina sedimenta	Protok	Dubina vode
	δ	Q	h
	[/]	[L/s]	[cm]
1	20	14.5	20.4
2	25	14.4	20.3
3	0	33.3	32.4



Slika 5.17 Shematski prikaz položaja CVP-a iznad Flat DC-2 EM senzora, korišćenih za merenja podužne komponente brzine pomoću štapičastog ADV senzora „Vectrino+“

Raspored podužnih komponentata brzina iznad Flat DC-2 EM senzora je meren, unutar laboratorijskog kanala, duž tri CVP-a. Položaj CVP-a 1 i 3 je izabran tako da odgovara središtu elektroda senzora, dok je CVP 2 postavljen između (Slika 5.17). Merenja brzina u tačkama su obavljena pomoću „Vectrino+“ ADV senzora. Trenutne vrednosti brzina su zabeležene sa frekvencijom uzorkovanja od 100 Hz i naknadno obrađena algoritmom za

detekciju i uklanjanje pikova (Goring i Nikora, 2002). Obradna merenja su uprosečena nad intervalom od 30 s ($\overline{v_x}$), prema predlogu iz literature (Buffin-Bélanger i Roy, 2005).

5.2.1.3.2 IZVOĐENJE TEHNIČKIH PARAMETARA

Polazna tačka za izvođenje jednodimenzionalne težinske funkcije $w(z)$ i dometa CV-a τ_{max} , predstavlja uprošćeni matematički model ravnih EM senzora, opisan j-nama (5.3) – (5.5). Uzimajući u obzir pretpostavku da je $V_{mer} \cong V_{S,mer}$, uprošćeni matematički model opisuje kako vrednost izmerene brzine V_{mer} može da se redukuje povećanjem donje Z_L ili smanjenjem gornje Z_U granice integracije. Budući da magnetno polje B_y , analizirano u poglavlju 5.1, i gustina struje \vec{j} , imaju najveće magnitude u blizini elektroda, očekuje se težinska funkcija $w(z)$ prati sličan raspored. Stoga se može zaključiti da će povećanje donje granice Z_L (Slika 5.15 B) imati izraženiji uticaj na V_{mer} , u odnosu na smanjenje Z_U (Slika 5.15 C). Samim tim, za proračun nedostajućih tehničkih parametara smatra se da je adekvatna upotreba funkcionalne zavisnosti između povećanja Z_L i redukcije V_{mer} .

Veza između Z_L - V_{mer} je definisana na osnovu eksperimenata, gde je Flat DC-2 EM senzor pokrivan poroznim, peščanim sedimentom (poglavlja 4.2 i 5.2.1.3.2). Donja granica integracije Z_L je varirana na kontrolisan način, uz pomoć poroznog sedimenta dubine δ . Dobijena merenja brzine, pomoću ravnog EM senzora, su poređena sa merenjima ostvarenim za slučaj kada je cela težinska funkcija bila aktivirana, odnosno za slučaj $Z_L = Z_{surf}$, kome odgovara da je $V_{mer} = V_0$ (gde je za V_0 , $\alpha = 1$). Slika 5.14 pokazuje da sa porastom $Z_L = \delta$ (gde je $\delta > Z_{surf}$), V_{mer} eksponencialno opada u poređenju sa V_0 ($Z_L = Z_{surf}$). Ukoliko se u ovom delu, u analizu uvrsti raspored podužne komponente brzine $V_x(z)$, iz j-ne (5.5), proračunom unazad se može doći do stvarnog oblika težinske funkcije $w(z)$. Problem predstavlja činjenica da je maksimalna gornja granica integracije Z_U (odnosno domet CV-a τ_{max}) nepoznata. Imajući to u vidu, problem određivanja nedostajućih tehničkih parametara je definisan kao problem minimizacije, gde je opseg vrednosti τ_{max} ispitivan, kako bi se došlo do optimalnog rešenja.

Na osnovu eksperimenata sa poroznim sedimentom, zaključeno je da pri maksimalnoj ispitanoj dubini sedimenta od $\delta = 8.0$ cm, ravni EM senzor proizvodi značajno oslabljen

izlazni signal. Treba istaći, da je dobijeni signal generisan uz pomoć učešća samo viših delova težinske funkcije (sa malim magnitudama), između $Z_L = \delta = 8.0$ cm i nepoznatog Z_U . Stoga, vrednost odstupanja izražena kroz RMSE, između simuliranih merenja $V_{S,mer}$ i stvarnih merenja V_{mer} za dubinu sedimenta $\delta = 8.0$ cm, je usvojena kao kriterijum za minimizaciju. Opseg ispitanih vrednosti τ_{max} je definisan uzimajući u obzir osmotrene karakteristike izlaznog signala. Minimalna ispitana vrednost je usvojena da približno odgovara razlici između $\delta = 8.0$ cm i Z_{surf} , preciznije 6.0 cm. Imajući u vidu da je za $\delta = 8.0$ cm, izlazni signal bio 22 puta slabiji od V_0 ($\alpha = 0.045$), jasno je da je stvarna vrednost τ_{max} u blizini minimalne ispitane vrednosti. Zbog toga je maksimalna ispitana vrednost τ_{max} usvojena da bude duplo veća od minimalne, odnosno 12.0 cm.

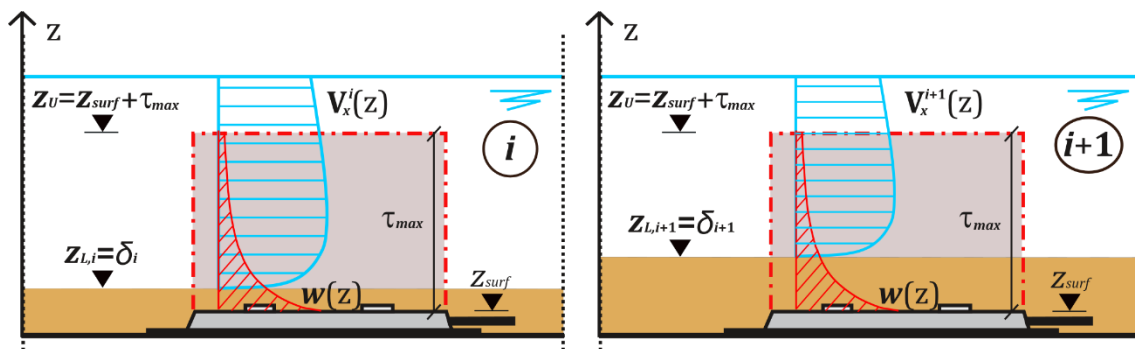
Nakon definisanja minimizacionog problema, neophodno je pre samog rešavanja, diskretizovati uprošćeni matematički model (j-ne 5.3 - 5.5). Budući da su obe funkcije, $w(z)$ i $V_x(z)$, konačni integral u j-ni (5.5) se može predstaviti sumom proizvoda duž vertikalne linije, diskretizovane sa proizvoljnim Δz . Odstojanje između Z_{surf} i $Z_{surf} + \tau_{max}$ se diskretizuje u N segmenata, pomoću $i = 0 \rightarrow N$ diskretizacionih čvorova. Za svako $\delta_i = Z_{surf} + i\Delta z = Z_{L,i}$, može se napisati linearna jednačina, u formi sume proizvoda, za opisivanje generisanja izlaznog signala $V_{mer,i} = \alpha_i V_0$. Funkcija $w(z)$ je karakteristična za svaki model ravnog EM senzora, i fiksirana je u prostoru za promenljiv protok, dubinu vode i dubinu sedimenta. Sa druge strane, za svako $Z_{L,i}$, neophodno je definisati odgovarajući raspored brzina $V_x^i(z)$, budući da se sa porastom i glavni tok udaljava od elektroda senzora. Stoga, za svako $Z_{L,i}$, drugačiji gornji segment $w(z)$, između $j = i \rightarrow N$, se množi sa odgovarajućim $V_x^i(z)$, i naknadno integrali kako bi se dobila vrednost $V_{mer,i}$ (Slika 5.18). Predstavljene matematičke operacije je moguće opisati na sledeći način:

$$\alpha_i V_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=i}^N w_j v_{x,j}^i \quad (5.9)$$

J-na (5.9) se može protumačiti kao diskretizovana verzija uprošćenog matematičkog modela, odnosno j-ne (5.5). Radi jednostavnosti, sistem od N j-na (5.9) se može predstaviti pomoću matrične notacije:

$$N\alpha V_0 = \mathbf{wV} \quad (5.10)$$

gde je α (dimenzija $1 \times N$) vektor koeficijenata nagiba korekcionih funkcija, \mathbf{w} (dimenzija $1 \times N$) je vektor nepoznatih koeficijenata diskretizovane težinske funkcije i \mathbf{V} ($N \times N$) je matrica profila podužnih komponenta brzina. Filtraciona brzina, odnosno brzina strujanja vode kroz sloj poroznog sedimenta, je zanemarljiva ($Q_F \sim 0$, Slika 5.14). Samim tim i matrica \mathbf{V} ima LD (eng. Lower Diagonal) oblik, gde su vrednosti iznad dijagonale, koje odgovaraju brzinama u sedimentu, jednake nuli. Budući da je određivanje tehničkih parametara postulirano kao minimizacioni problem, za svako ispitano τ_{max} , između 6.0 i 12.0 cm, iz j-ne (5.10) je sračunato odgovarajuće \mathbf{w} . Konačno \mathbf{w} i τ_{max} je izabrano na osnovu kriterijume minizacije, odnosno minimalne vrednosti RMSE između simuliranih $V_{S,mer}$ i stvarnih V_{meas} merenja za $\delta = 8.0$ cm.



Slika 5.18 Shematski prikaz generisanja izlaznog signala ravnih EM senzora kroz interakciju jednodimenzionalne težinske funkcije $w(z)$ i odgovarajućeg rasporeda brzina $V_x(z)$ za dubine sedimenta δ_i i δ_{i+1} .

5.2.1.3.3 VALIDACIJA TEHNIČKIH PARAMETARA

Da bi se validirao predloženi uprošćeni matematički model ravnog EM senzora, kao i izvedenih tehničkih parametara \mathbf{w} i τ_{max} , korišćen je nezavistan skup brzina izmerenih pomoću ravnog EM senzora. Naime, iskorišćeni su rezultati laboratorijskog ispitivanja radnih karakteristika Flat DC-2 senzora, predstavljenih u poglavlju 4.1, za slučaj rada senzora brz pokrivke od poroznog sedimenta. Za potrebe validacije, 114 originalnih (nekorigovanih) merenja brzine su simulirana korišćenjem uprošćenog matematičkog modela (j-ne 5.3 - 5.5) i izvedenih parametara, \mathbf{w} i τ_{max} . Koristeći rezultate određivanja

rasporeda podužnih komponenata brzina, konkretno za slučaj 3 (Tabela 5.1), modelirani su nedostajući profili brzina. Grafički su predstavljena simulirana merenja naspram originalnih merenja, sa referentnom linijom idealnog slaganja (1:1 linija) radi vizualne inspekcije. Sračunata je vrednost odstupanja RMSE, koja odgovara sistematskoj neodređenosti merenja, i upoređena sa korigovanom sistematskom neodređenošću Flat DC-2 senzora, dobijenoj prilikom ispitivanja radnih karakteristika senzora (poglavlje 4.1).

5.2.1.3.4 ANALIZA VEZE IZMEĐU IZMERENOG MAGNETNOG POLJA I TEHNIČKIH PARAMETARA

Prethodno predložena procedura se oslanja na laboratorijske eksperimente u kojima je analiziran odziv senzora u poznatim hidrauličkim uslovima. Iako se ona može koristiti za fundamentalno definisanje tehničkih parametara, sprovođenje potrebnih eksperimenata može biti skupo i vremenski zahtevno. Prema osnovnom matematičkom modelu (j-na (2.5), težinski vektor \vec{w} je definisan vektorskim proizvodom između magnetnog polja \vec{B} i gustine virtualne struje \vec{j} . Iako se ovde predlaže upotreba jednodimenzionalne težinske funkcije \mathbf{w} , pretpostavlja se da vrednost \mathbf{w} takođe zavisi od rasporeda korisne komponente magnetnog polja B_y i odgovarajuće osrednjene gustine struje $j(z)$ (ili vektorski \mathbf{j}). Kroz ispitivanje funkcionalne zavisnosti ovih parametara, zapravo se analizira mogućnost suve kalibracije ravnih EM senzora, odnosno definisanja težinske funkcije na osnovu izmerenog rasporeda B_y . Kako merenja magnetnog polja zahtevaju relativno skromne resurse (poglavlje 5.1), primenom ovakvog postupka moguće je značajno smanjiti troškove definisanja tehničkih parametara ravnih EM senzora.

Da bi se omogućilo poređenje izmerenih vrednosti B_y i eksperimentalno definisane \mathbf{w} , neophodno je obe veličine normalizovati. Oba niza podataka su normalizovana prema maksimalnoj vrednosti, tako da se dobijene vrednosti između 0 i 1. Ukoliko se pretpostavi da relacije koje važe u osnovnom matematičkom modelu EM senzora (j-na (2.5) važe i u uprošćenom modelu (j-ne 5.3 – 5.5), preko poznatih vrednosti B_y i \mathbf{w} moguće je odrediti osrednjenu gustinu virtualne struje \mathbf{j} (kao zamenu za \vec{j}):

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{w}}{B_y} \quad (5.11)$$

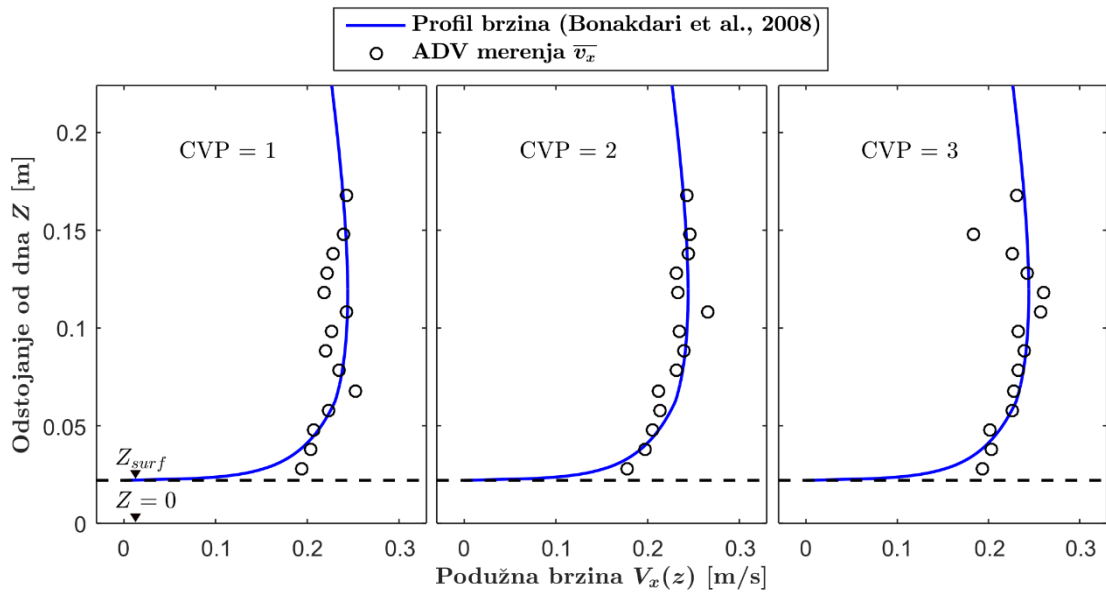
Od interesa za predstavljenu analizu i praktičnu primenu ravnih EM senzora je ispitati prirodu veličine \mathbf{j} . Pretpostavlja se da vrednost \mathbf{j} zavisi od rastojanja od elektroda kao i od fizičkih karakteristika EM senzora. Uz same elektrode \mathbf{j} bi trebalo da ima maksimalnu vrednost od 1, dok bi u beskonačnoj udaljenosti \mathbf{j} trebalo da teži nekoj manjoj fiksnoj vrednosti. Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 5.13, odnosno izmerenog rasporeda B_y (sa i bez osrednjavanja po Y pravcu), i eksperimentalno definisane \mathbf{w} (poglavljje 5.2.2.2), određena je i analizirana funkcija gustine virtualne struje \mathbf{j} za Flat DC-2 EM senzor. Razmotrena je mogućnost definisanja adekvatnog modela za ovu veličinu, čime bi se opravdala upotreba (jeftinijeg) postupka suve kalibracije za određivanje tehničkih parametara ravnih EM senzora.

5.2.2 REZULTATI I DISKUSIJA

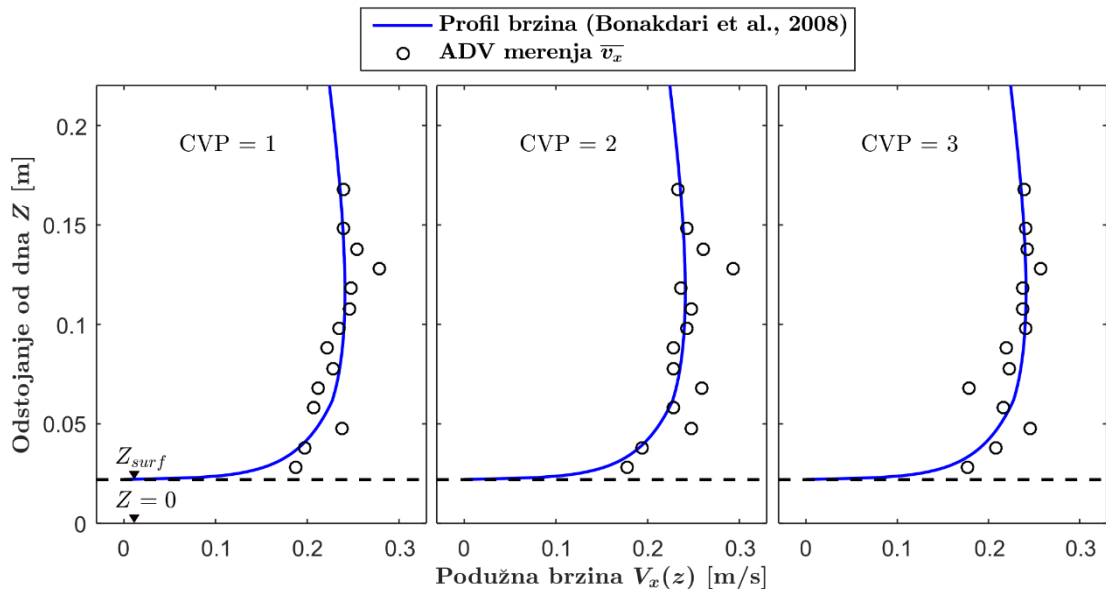
U narednim poglavljima su predstavljeni rezultati određivanja rasporeda brzina u laboratorijskom kanalu, kao i izvođenja i validacije predloženih tehničkih parametara ravnih EM senzora. Konačno analizirana je veza između izmerenih vrednosti magnetnog polja i izvedenih tehničkih parametara.

5.2.2.1 ODREĐIVANJE RASPOREDA BRZINA U LABORATORIJSKOM KANALU

Na osnovu eksperimentalne procedure predstavljene u poglavljju 5.2.1.3.1, izmerene su brzine duž CVP-a unutar laboratorijskog kanala, za tri analizirana slučaja (Tabela 5.1). Cilj sprovedenih merenja je bio da se definiše adekvatan analitički raspored podužnih komponenta brzina, potreban za izvođenje jednodimenzionalne težinske funkcije $w(z)$ (ili \mathbf{w} u diskretizovanoj formi) i dometa kontrolne zapremine τ_{max} Flat DC-2 EM senzora. Originalni sirovi podaci su naknadno obrađeni algoritmom za detekciju i uklanjanje pikova (Goring i Nikora, 2002), i osrednjeni duž intervala od 30 s. Iako su u nekoliko tačaka zabeleženi podaci sa niskim vrednostima SNR-a (eng. Signal to Noise Ratio), ova merenja \bar{v}_x nisu odbačena budući da nisu značajno odstupala od rasporeda brzina, definisanog analitičkim obrazcima.



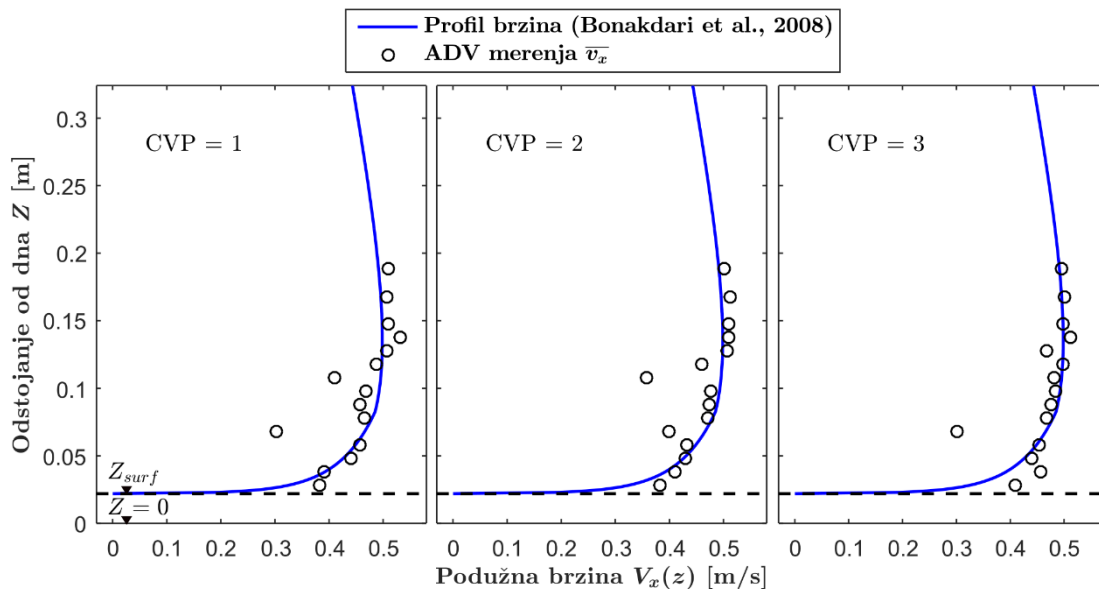
Slika 5.19 Izmerene i obrađene podužne komponente vektora brzine duž tri Centralna Vertikalna Profila zajedno sa analitičkim rasporedom brzina (Bonakdari i saradnici, 2008), za $Q = 14.5 \text{ L/s}$, $h = 22.4 \text{ cm}$, $\delta = 2.0 \text{ cm}$, $Ar = 1.22$.



Slika 5.20 Izmerene i obrađene podužne komponente vektora brzine duž tri Centralna Vertikalna Profila zajedno sa analitičkim rasporedom brzina (Bonakdari i saradnici, 2008), za $Q = 14.4 \text{ L/s}$, $h = 22.3 \text{ cm}$, $\delta = 2.5 \text{ cm}$, $Ar = 1.26$.

Izmerene podužne komponente brzine, za slučajeve koje uključuju prisustvo poroznog sedimenta (1 i 2) su prikazani na Slikama 5.19 i 5.20, respektivno. Brzine izmerene za

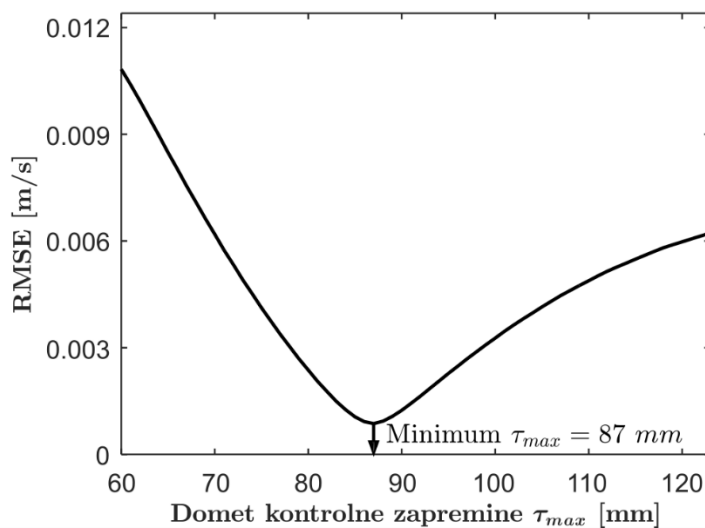
slučaj 3, odnosno bez prisustva sedimenta u laboratorijskom kanalu, su prikazane na Slici 5.21. Usled uticaja geometrije laboratorijskog kanala, odnosno tečenja u „uzanom provodniku“, uočen je efekat pojave Prandtlvih sekundarnih vrtloga (Nezu i Nakagawa, 1993) kroz porinuće maksimalne brzine ispod površine vode (opisane kroz parametar ξ_{dip}). Ovaj efekat je zabeležen u svim merenjima, što se može videti na Slikama 5.19 – 5.21. Da bi se omogućilo adekvatno modeliranja rasporeda brzina, ispitan je i upoređen analitički obrazac predložen od strane Bonakdari-ja i saradnika (2008) sa različitim formulacijama za vrednost parametra ξ_{dip} . Ustanovljeno je da se za ispitane slučajeve, u kojima su se javile niske vrednosti Ar od 0.77 do 1.26, najbolje slaganje dobija upotrebom obrazca za $\xi_{dip} = 1.3 e^{(-Ar/2)}$, predloženog od strane Yang-a i saradnika (2004). Odgovarajući modelirani rasporedi brzina su prikazani na Slikama 5.19 – 5.21 punom plavom linijom. Konačno, zaključeno je da je moguće pouzdano modelirati raspored podužnih komponentata brzine, kako u unutrašnjem tako i u spoljašnjem regionu, toka u laboratorijskom kanalu.



Slika 5.21 Izmerene i obrađene podužne komponente vektora brzine duž tri Centralna Vertikalna Profila zajedno sa analitičkim rasporedom brzina (Bonakdari i saradnici, 2008), za $Q = 33.3$ L/s, $h = 32.4$ cm, $\delta = 0.0$ cm, $Ar = 0.77$.

5.2.2.2 IZVOĐENJE TEHNIČKIH PARAMETARA

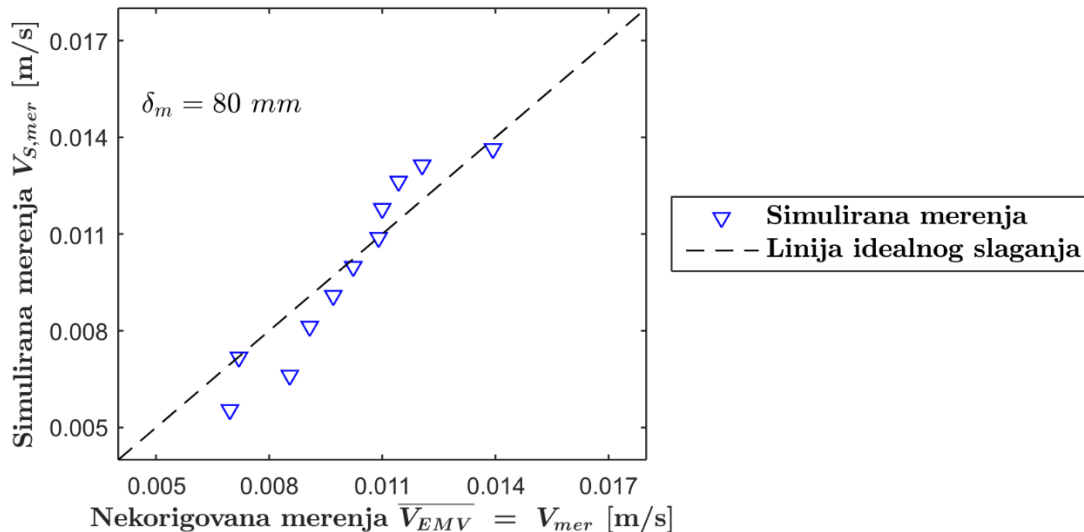
Definisanjem analitičkog obrazca za opisivanje rasporeda podužne komponente brzine unutar laboratorijskog kanala, obezbeđeni su svi neophodni podaci za formiranje sistema linearnih j-na (5.9). U samom sistemu linearnih jednačina, opisanom u matricnoj notaciji j-nom (5.10), nalazi se N j-na (5.9). Kako domet CV-a τ_{max} nije unapred bio poznat, ispitan je niz vrednosti τ_{max} , gde je za svako ispitano τ_{max} , rešavanjem sistema (5.10) dobijena drugačija težinska funkcija \mathbf{w} . Konačna vrednost dometa CV-a τ_{max} , kao i odgovarajuće \mathbf{w} , je izabrana minimizacijom vrednosti RMSE-a između simuliranih i zabeleženih merenja brzine, pomoću Flat DC-2 EM senzora, za $\delta = 8.0$ cm. Ustanovljeno je da se minimalna vrednost RMSE-a javlja za $\tau_{max} = 8.7$ cm, što se može uočiti na Slici 5.22. Poređenje meranja simuliranih pomoću izabranog $\tau_{max} = 8.7$ cm, i odgovarajuće sračunate \mathbf{w} , sa originalnim merenjima pri $\delta = 8.0$ cm je prikazano na Slici 5.23, zajedno sa referentnom linijom idealnog slaganja (1:1 linija).



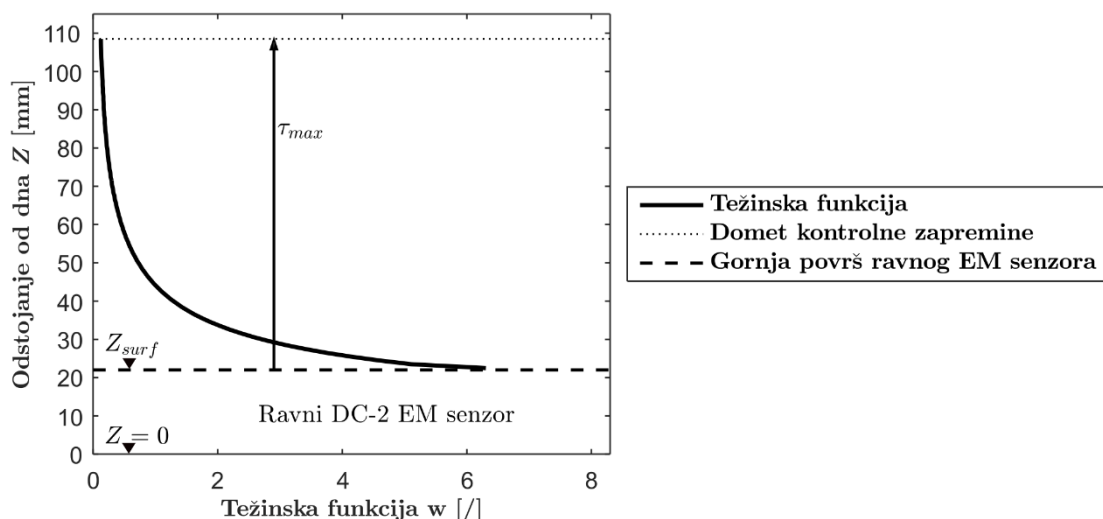
Slika 5.22 RMSE između simuliranih i originalnih merenja brzina Flat DC-2 EM senzora pri $\delta = 8.0$ cm naspram ispitanih vrednosti dometa kontrolne zapremine τ_{max} .

Rešavanjem sistema linearnih jednačina (5.10), za $\tau_{max} = 8.7$ cm, dobijena je diskretizovana jednodimenzionalna težinska funkcija \mathbf{w} (Slika 5.24). Može se primetiti da dominantan doprinos generisanju izlaznog signala ravnih EM senzora, daje region kontrolne zapremine uz same elektrode. Sa povećanjem vertikalnog odstojanja od kote Z_{surf} , magnitude težinske funkcije opadaju. Ovakav oblik funkcije je očekivan, imajući

u vidu da u je u originalnom obrazcu Bevir-a (1970) (j-na (2.5), težinski vektor opisan vektorskim proizvodom magnetnog polja \vec{B} i gustine naelektrisanja \vec{j} . Pokazano je da sa povećanjem odstojanja od ravnih kalemova, magnituda magnetnog polja \vec{B} ravnih EM senzora opada (poglavlje 5.1). Slično i magnituda gustine naelektrisanje \vec{j} opada, budući da je definisana položajem elektroda kao i samim \vec{B} .



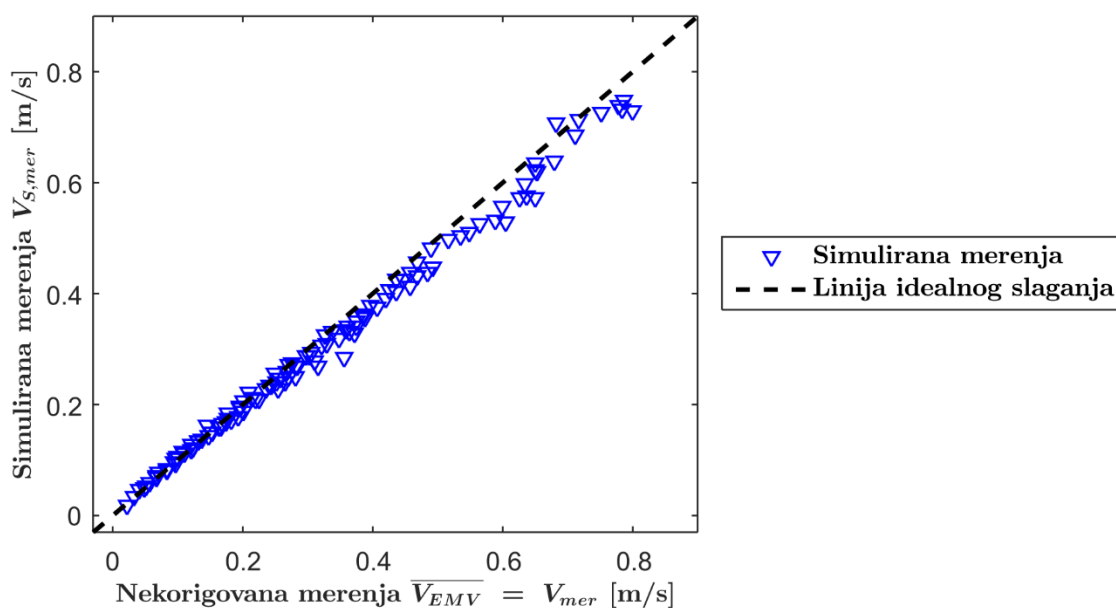
Slika 5.23 Merenja simulirana pomoću $\tau_{max} = 8.7$ cm, i odgovarajuće w , naspram originalnih merenja brzine Flat DC-2 EM senzora pri prisustvom pokrivke od poroznog sedimenta dubine $\delta = 8.0$ cm.



Slika 5.24 Izvedena jednodimenzionalna težinska funkcija w i domet CV-a τ_{max} , Flat DC-2 EM senzora, naspram vertikalnog odstojanja od dna kanala ($Z = 0$).

5.2.2.3 VALIDACIJA TEHNIČKIH PARAMETARA

Validacija izvedenih tehničkih parametara, kao i predloženog uprošćenog matematičkog modela, je izvršena korišćenjem skupa merenja brzine Flat DC-2 EM senzora, prikazanim u poglavlju 4.1. U poglavlju 5.2.2.1 je pokazano da je u uslovima koji su odgovarali navedenim eksperimentalnim merenjima (bez sedimenta) moguće modelirati raspored podužnih komponenta brzina pomoću j -na (5.7) i (5.8). Za svako od 114 merenja brzina pomoću Flat DC-2 EM senzora, raspored podužnih komponenta brzine je kombinovan sa izvedenim tehničkim parametrima, \mathbf{w} i τ_{max} , kako bi se dobila odgovarajuća simulirana merenja $V_{S,mer}$. Grafički prikaz simuliranih merenja brzine $V_{S,mer}$, naspram originalnih nekorigovanih merenja $\overline{V_{EMV}}$, je dat na Slika 5.25, zajedno sa referentnom linijom idealnog slaganja (1:1 linija).



Slika 5.25 Simulirana merenja naspram originalnih, nekorigovanih, merenja brzine Flat DC-2 EM senzora u uslovima rada bez prisustva sedimenta u laboratorijskom

Na dijagramu se može uočiti da postoji zadovoljavajuće slaganje između simuliranih i originalnih merenja brzina. Sračunata vrednost RMSE iznosi 0.025 m/s, što je nešto veće od prethodno sračunate korigovane sistematske neodređenosti ravnih EM senzora (Tabela 4.1). Pretpostavlja se da se viša vrednost RMSE-a javlja usled devijacije stvarnih rasporeda brzina od modeliranih. Konkretno, pretpostavlja se da pri većim brzinama i

nižim dubinama, stvarni raspored brzina ima veće vrednosti u unutrašnjem regionu toka, nego što su dobijene primenom analitičkog obrazca, j -ne (5.8).

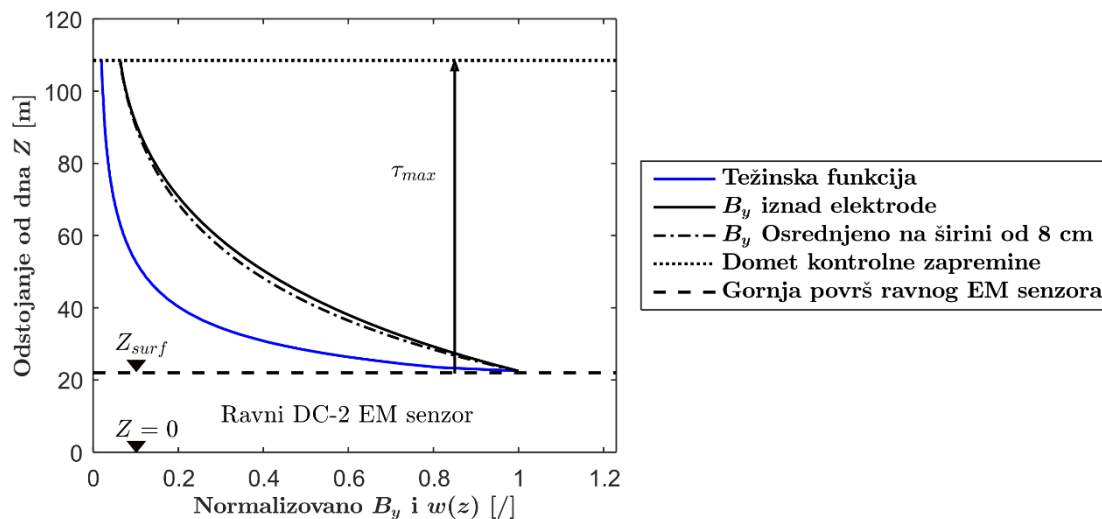
Na osnovu predstavljenih rezultata može se zaključiti da je upotrebom uprošćenog matematičkog modela ravnih EM senzora, kao i izvedenih tehničkih parametara \mathbf{w} i τ_{max} , moguće opisati princip rada ravnih EM senzora. Korišćenjem predloženog modela, i izvedenih tehničkih parametara, moguće je sprovesti postupak lokalne kalibracije, kojim se na određenom mernom mestu, za merodavan opseg hidrauličkih uslova, može definisati korekciona funkcija K koja povezuje izmerenu brzinu V_{mer} sa stvarnom srednjom profilskom brzinom V .

5.2.2.4 ANALIZA VEZE IZMEĐU IZMERENOG MAGNETNOG POLJA I TEHNIČKIH PARAMETARA

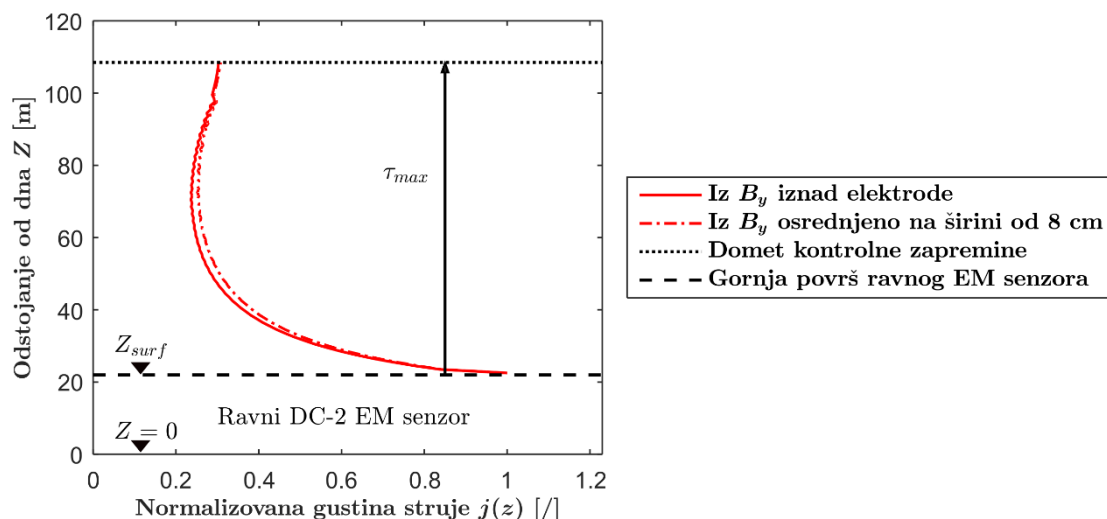
Za potrebe provere mogućnosti primene postupka suve kalibracije za definisanje tehničkih parametara ravnih EM senzora, korišćeni su izmereni rasporedi korisne komponente magnetnog polja B_y (Slika 5.13) i eksperimentalno izvedena težinska funkcija \mathbf{w} (Slika 5.24). Razmatran je raspored B_y direktno izmeren duž vertikale na elektrodi ($X = 12$ cm, $Y = 0$ cm), kao i raspored merenja osrednjenih između $Y = -4$ cm i $Y = 4$ cm (za $X = 12$ cm). Da bi se omogućilo direktno poređenje vrednosti B_y sa \mathbf{w} , vrednosti su normalizovane i domen je ograničen na maksimalnu gornju granicu integracije (j -na (5.4) koji odgovara zbiru z_{surf} i eksperimentalno definisanog τ_{max}). Dobijene vrednosti su prikazane na Slici 5.26. Može se uočiti da u okviru dometa CV-a (τ_{max}) težinska funkcija \mathbf{w} ima manje magnitude od izmerenih magnetnih polja B_y . Samim tim i vrednosti \mathbf{j} , koje se prema j -ni (5.11) mogu definisati deljenjem \mathbf{w} sa B_y , imaju vrednosti manje ili jednake od 1. Sračunati rasporedi \mathbf{j} su prikazani na Slici 5.27.

Na Slici 5.27 se može primetiti da vrednost \mathbf{j} opada od 1 i dalje pokazuje naznake oscilovanja oko fiksne vrednosti od oko 0.3, u oba slučaja. Takođe se može uočiti da vrednost \mathbf{j} , dobijena preko osrednjenog magnetnog polja blaže osciluje, što se može opravdati činjenicom da je izlazni signal EM senzora zapravo rezultat prostorne a ne linijske integracije.

Ukoliko bi se razmatrala priroda veličine \mathbf{j} , na osnovu dobijenih vrednosti može se pretpostaviti da se raspored \mathbf{j} može modelirati koristeći model razdelnika napona. Uz samu elektrodu, ceo potencijal je spušten na elektrodu, zbog čega je vrednost \mathbf{j} bliska 1. Sa povećanjem odstojanja, \mathbf{j} opada i teži ka konačnoj vrednosti manjoj od 1, koja opisuje raspodelu potencijala između elektrode i mase (u slučaju ravnih EM senzora) preko provodnika iste dužine. Dalja ispitivanja su neophodna za potvrdu ove pretpostavke.



Slika 5.26 Poređenje normalizovanih izmerenih rasporeda magnetnog polja B_y i eksperimentalno dobijene težinske funkcije \mathbf{w} Flat DC-2 EM senzora (normalizacija od 0 do 1).



Slika 5.27 Sračunati rasporedi osrednjene gustine struje \mathbf{j} Flat DC-2 EM senzora.

5.2.3 ZAKLJUČCI

Kako bi se sproveo postupak lokalne kalibracije ravnih EM senzora, neophodno je omogućiti modeliranje odziva, odnosno radnog principa, ovih uređaja. Fundamentalno, radni princip ravnih EM senzora je moguće opisati pomoću integrala proizvoda tri vektorska polja: magnetnog, gustine struja i brzine tečenja. Imajući u vidu da je teško poznavati ova tri polja na svakom mernom mestu, ovde je predložen uprošćeni matematički model ravnih EM senzora. Uprošćeni matematički model opisuje radni princip ravnih EM senzora, pomoću dva tehnička parametra, jednodimenzionalne težinske funkcije $w(z)$ (ili \mathbf{w} u diskretizovanoj formi) i dometa kontrolne zapremine τ_{max} .

Takođe, predložena je metodologija za određivanje nedostajućih tehničkih parametara, koja se oslanja na rezultate eksperimentalnog ispitivanja ravnih EM senzora. Prvo su korišćeni rezultati ispitivanja robusnosti ravnih EM senzora, gde je uređaj prekrivan poroznim peščanim sedimentom (omogućavajući električni kontakt kroz ceo sediment), za definisanja korelacije između slabljenja izlaznog signala i promene donje granice integracije ravnih EM senzora. Zatim je u odvojenom eksperimentu, mapiran raspored podužnih komponentata brzine iznad EM senzora, kako bi se definisao adekvatan analitički obrazac za opisivanje rasporeda brzina u laboratorijskom kanalu. Predložena je analiza „unazad“ koja korišćenjem prikupljenih podataka, može da dovede do nedostajućih tehničkih parametara.

Na osnovu predložene metodologije, definisana je jednodimenzionalna težinska funkcija $w(z)$ (ili \mathbf{w} u diskretizovanoj formi) kao i domet CV-a, τ_{max} Flat DC-2 EM senzora. Ustanovljeno je da magnituda težinske funkcije opada eksponencijalno sa porastom odstojanja od elektroda senzora. Takođe, definisan je i domet CV-a koji iznosi $\tau_{max} = 8.7$ cm. Predloženi uprošćeni model, kao i izvedeni tehnički parametri, su validirani korišćenjem rezultata ispitivanja radnih karakteristika Flat DC-2 EM senzora u laboratorijskom kanalu, bez prisustva sedimenta. Zaključeno je da je moguće modelirati odziv ravnih EM senzora korišćenjem uprošćenog modela i izvedenih parametara, iako su simulirana merenja brzine okarakterisana blago većom neodređenošću u odnosu na originalna merenja.

Konačno razmatrana je mogućnost sprovođenja suve kalibracije ravnih EM senzora, odnosno definisanja w pomoću izmerenog rasporeda B_y . Za primenu ovog postupka neophodno je modelirati raspored osrednjene gustine virtualne struje j . Rezultati dobijeni za Flat DC-2 EM senzora ukazuju na mogućnost upotrebe modela razdelnika napona, međutim dalja detaljnija istraživanja su neophodna za adekvatno opisivanje ove veličine.

Predstavljena analiza je osnova za definisanje predloga procedure za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora, čime se omogućava povećanje tačnosti korelacije između izmerene i srednje profilske brzine za spektar hidrauličkih uslova koji opisuju neko merno mesto.

5.3 PREDLOG METODOLOGIJE ZA MERENJE PROTOKA U SLOŽENIM USLOVIMA STRUJANJA PRIMENOM RAVNIH EM SENZORA

Prethodno prikazane analize su dovele do novih saznanja o primeni ravnih EM senzora za merenje brzine, odnosno protoka tečnosti, u hidrotehničkim sistemima primenom pristupa V-A. Fokus poglavlja 4 je bio na ispitivanju i kvantifikovanju radnih karakteristika ravnih EM senzora, gde su tačnost i ponovljivost ovih uređaja predstavljene kroz parametar merne neodređenosti. Kroz datu analizu definisana je minimalna merna neodređenost pri merenju srednje profilske brzine V , koja potiče od samog mernog instrumenata. Primenom pristupa V-A za merenje protoka, pored merne neodređenosti koja potiče od same opreme, na pouzdanost izmerenog podatka o protoku utiče i neodređenost korelacije kojom se izmerena brzina dovodi u vezu sa srednjom profilskom brzinom. Sa ciljem redukcije ovog dela ukupne neodređenosti izmerenog protoka, detaljno je analiziran radni princip ravnih EM senzora. Predložen je uprošćeni matematički model ravnih EM senzora, definisan pomoću dva tehnička parametra: jednodimenzionalne težinske funkcije i dometa kontrolne zapremine.

U nastavku ovog poglavlja razmatraće se sam postupak Lokalne kalibracije u okviru celokupnog pristupa za projektovanje mernog mesta za određivanje protoka u složenim uslovima strujanja. Projektovanje ovakvog mernog mesta u hidrotehničkim sistemima, se u opštem slučaju može predstaviti kroz algoritam koji se sastoji od nekoliko koraka:

1. Globalna (integralna) analiza hidrotehničkog sistema
2. Analiza uslova na mernom mestu
3. Odabir merne metodologije i detaljno projektovanje mernog mesta
4. Lokalna kalibracija senzora

Lokalna kalibracija se ovde predlaže kao obavezan korak u slučajevima merenja protoka u složenim uslovima strujanja. U ostalim slučajevima, projektant bi svakako adekvatnom sprovedenom lokalnom kalibracijom omogućio pouzdaniji rad mernog sistema. Međutim, dobijeno unapređenje pouzdanosti merenja u nekim slučajevima ne opravdava angažovanje dodatnih resursa neophodnih za sprovođenje ovog postupka.

U nastavku su detaljnije razmotreni koraci algoritma projektovanja mernog mesta, u kontekstu merenja protoka u složenim uslovima strujanja ravnim EM senzorima. Poseban fokus je stavljen na specifičnosti primene ove merne tehnologije. Predložen je i postupak lokalne kalibracije za ravne EM senzore, koji se oslanja na sličan postupak izveden za papučaste ADV uređaje (El Bahlouli i Larrarte, 2018). Konačno razmotreni su posebni aspekti primene ravnih EM senzora u uslovima sedimentacije, gde je veliki izazov obezbediti pouzdano merenje dubine sedimenta na mernom mestu. Upravo je merenje dubine sedimenta, u realnom vremenu, preduslov za primenu ravnih EM senzora u uslovima sedimentacije.

5.3.1 GLOBALNA (INTEGRALNA) ANALIZA HIDROTEHNIČKOG SISTEMA

Projektovanje mernog mesta u hidrotehničkom sistemu se sprovodi u cilju dobijanja informacija o radu sistema, neophodnih za uspešno upravljanje nekim specifičnim aspektom i/ili celokupnim sistemom. Pred projektantom mernog mesta se, od strane investitora, postavljaju uslovi koje budući merni sistem treba da obezbedi tokom svog eksploatacionog perioda. Najčešće se definiše opseg vrednosti koje budući merni sistem treba pouzdano da meri, kao i uslov pouzdanosti izmerenih podataka. Imajući navedeno u vidu, obaveza projektanta je da se, u početnim koracima projektovanja, upozna sa analiziranim sistemom kao celinom kako bi adekvatno mogao da sagleda sve merodavne faktore koji utiču, kako na izbor odgovarajuće merne opreme, tako i na samo predloženo

rešenje mernog mesta (napajanje, komunikacija, održavanje itd.). Ovde će se pretpostaviti da je makro lokacija mernog mesta unapred poznata.

Ukoliko se razmatra merno mesto koje treba da obezbedi pouzdano i kontinualno merenje protoka, u okviru globalne analize hidrotehničkog sistema, postoji nekoliko ključnih faktora koje je neophodno uzeti u razmatranje. Za početak je potrebno analizirati hidrauličke uslove u sistemu. Naime, neophodno je utvrditi koji se režimi tečenja javljaju (pod pritiskom, sa slobodnom površinom ili kombinovani), kao i opsege merodavnih hidrauličkih parametara na budućem mernom mestu. Za merenje protoka V-A metodom, ključni parametri su opsezi brzina, odnosno dubina/pritisaka, na samom mernom mestu. Neretko ovi parametri nisu unapred poznati, ili se ne mogu smatrati merodavnim za razmatrano stanje hidrotehničkog sistema. Za dodatne hidrauličke analize sistema kao celine, sprovedene sa ciljem obezbeđivanja nedostajućih hidrauličkih parametara, mogu se koristiti posebno planirane merne kampanje i/ili kalibrisani linijski ustaljeni/neustaljeni modeli tečenja.

Takođe, bitne su i fizičke karakteristike tečnosti čiji protok je neophodno meriti. Ranije je u uvodnom poglavlju 1.1.1, navedeno da fizičke karakteristike tečnosti, kao što su temperatura, gustina, tvrdoća, mutnoća, elektroprovodnost itd., direktno utiču na izbor merne opreme. Za primenu ravnih EM senzora, preduslov je da tečnost poseduje određenu minimalnu elektroprovodnost. Takođe, potrebno je proveriti i tvrdoću vode, budući da u uslovima visokih koncentracija soli kalcijuma i magnezijuma, može doći do kalcifikacije elektroda senzora. Kalcifikacijom, elektrode se praktično izoluju od sredine, čime se sprečava generisanje napona proporcionalnog brzini tečenja. Ne treba zaboraviti i sklonost ka sedimentaciji na mernom mestu. Ukoliko se razmatra kanalizacioni sistem, sedimentacija se svakako mora uzeti u obzir, zbog čega je neophodno integrisati dodatni merni sistem koji može da obezbedi pouzdano merenje dubine sedimenta (više o ovoj temi u poglavlju 5.3.5).

5.3.2 ANALIZA MERNOG MESTA

Sa stanovišta proizvoljnog mernog mesta u hidrotehničkim sistemima, potrebno je razmotriti uslove sredine na samoj mikrolokaciji. Neophodno je proveriti dostupnost samog mernog mesta zbog redovnog održavanja, kao i opšte uslove u pogledu opasnosti

za ljudsko zdravlje (npr prisustvo vodonik-sulfida u kanalizacionim sistemima može dovesti do fatalnih ishoda – Miami Herald, 2017). Takođe, potrebno je sagledati mogućnosti komunikacije sa mernom opremom, obezbeđivanja kontinualnog napajanja opreme, kao i, možda i najvažnije, zaštitu od vandalizma.

Ukoliko se pak razmatra sistem za merenje protoka u složenim uslovima strujanja, u okviru analize mernog mesta neophodno je posebnu pažnju posvetiti lokalnim geometrijskim i hidrauličkim uslovima. Ključan element pri primeni pristupa V-A, zapravo predstavljaju senzori za merenje brzine, pomoću kojih se određuje srednja profilska brzina V . Budući da su senzori brzine lokalnog karaktera, odnosno mere lokalnu brzinu V_{mer} u ograničenoj kontrolnoj zapremini, neophodno je steći uvid u relativan raspored brzina na datom mernom mestu, za merodavan opseg protoka. Ne treba zanemariti činjenicu da na raspored brzina na mernom mestu, veliki uticaj imaju i lokalne geometrijske karakteristike. Stoga se predlaže, da se u okviru ovog koraka, sprovedu detaljna (po mogućstvu geodetska) snimanja geometrije provodnika u okolini mernog mesta – po mogućstvu do uzvodnog i nizvodnog kontrolnog profila. Na ovaj način omogućava se detaljnija analiza hidrauličkih uslova na samom mernom mestu, kroz primenu numeričkih simulacija turbulentnog tečenja. U nastavku su posebno razmatrana dva pristupa za određivanje rasporeda brzina na mernom mestu – opšti koji se oslanja na primenu analitičkih, odnosno teorijskih, rasporeda brzina i posebni gde se koriste, prethodno navedene, numeričke simulacije turbulentnog tečenja.

5.3.2.1 OPŠTI POSTUPAK ZA ODREĐIVANJE RASPOREDA BRZINA - PRIMENA ANALITIČKIH OBRAZACA

Opšti postupak se primenjuje ukoliko se, za potrebe analize, može smatrati da uzvodni i nizvodni granični uslovi omogućavaju verodostojno predstavljanje rasporeda brzina na mernom mestu (i za dati opseg protoka) pomoću analitičkih obrazaca. U većini slučajeva, ovako dobijeni rasporedi brzina ne odstupaju značajno od rezultata adekvatno sprovedene numeričke simulacije turbulentnog tečenja na mernom mestu.

Brojni istraživači su predložili analitičke obrazce za opisivanje rasporeda brzina kako u uslovima tečenja pod pritiskom, tako i uslovima tečenja sa slobodnom površinom. Ukoliko se razmatraju uslovi tečenja pod pritiskom, najčešće se u hidrotehničkim

sistemima javlja potpuno razvijeno turbulentno tečenje, analogno turbulentnom tečenju u hidraulički hrapavim cevima (Weber, 1974). Za potpuno razvijeno turbulentno tečenje raspored brzina se opisuje ili potpuno empirijskim ili polu-empirijskim obrazcima izvedenim na osnovu eksperimentalnih istraživanja (Pope, 2008). Najčešće se koriste tzv. logaritamski obrazci (npr Guo i Julien, 2003; Hultmark i saradnici, 2013; Guo, 2017) uz tzv. stepene zakone za cevi, gde se vrednost eksponenta (ili stepena) određuje u zavisnosti od Rejnoldsovog broja (npr Nikuradze, 1932; Pope, 2008).

Kod tečenja sa slobodnom površinom, profil brzina se opisuje tako da vrednosti podužnih komponenta brzina rastu od dna ka slobodnoj površini, kao i od zidova ka sredini toka. Uglavnom se javlja potpuno razvijeno turbulentno tečenje što iziskuje upotrebu empirijskih ili polu-empirijskih logaritamskih obrazaca za opisivanje rasporeda brzina. Karakteristično za ovaj tip tečenja je to što je neophodno voditi računa o odnosu širine provodnika B i dubine vode h , kroz parametar $Ar = B/h$. Ukoliko je vrednost Ar veća od 5, radi se o tečenju u širokom provodniku gde se maksimalna podužna brzina javlja na samoj površini provodnika (Bonakdari i saradnici, 2008). Sa druge strane ukoliko je Ar manje od 5, radi se o tečenju u uzanom provodniku, što dovodi do porinuća maksimalne brzine ispod nivoa slobodne površine (Wang i saradnici, 2001; Bonakdari i saradnici, 2008; Guo, 2014).

5.3.2.2 POSEBNI POSTUPAK ZA ODREĐIVANJE RASPOREDA BRZINA - PRIMENA NUMERIČKIH SIMULACIJA TURBULENTNOG TEČENJA

U pojedinim slučajevima, gde nisu zadovoljeni granični uslovi koji omogućavaju primenu analitičkih rešenja (zbog uticaja lokalnih geometrijskih karakteristika), očekuje se asimetričnost strujne slike ili nepravilan raspored brzina. Tada je primerenije upotrebom numeričkih simulacija doći do potrebnih podataka o rasporedu brzina. Za ovakav vid inženjerske upotrebe numeričkih simulacija turbulentnog tečenja uglavnom se koriste modeli turbulencije sa turbulentnom viskoznošću (Wilcox, 1998; Spallart, 2000). U osnovi, matematički model turbulentnog tečenja, zasnovan na primeni modela turbulencije sa turbulentnom viskoznošću, čine jednačina kontinuiteta, tri Rejnoldsove jednačine i jedna, dve ili tri dodatne jednačine za transport turbulentnih veličina koje opisuju turbulentnu viskoznošću. Navedene jednačine su parcijalnog diferencijalnog tipa

za koje, u većini praktičnih problema, ne postoji analitičko rešenje. Zbog toga je neophodno matematički model aproksimirati numeričkim modelom, diskretizacijom analiziranog prostornog domena na konačan broj računskih ćelija, integracijom jednačina matematičkog modela nad računskim ćelijama i njihovom daljom prostornom i vremenskom diskretizacijom. Konačno, potrebno je numerički rešiti diskretizovane jednačine numeričkog modela za zadate granične i početne uslove. Imajući u vidu da se numeričkim ili aproksimativnim rešavanjem parcijalnih diferencijalnih jednačina, u konačan rezultat unosi određena greška (koja se tumači ovde kao razlika između analitičkog i numeričkog rešenja), pri sprovođenju numeričkih simulacija cilj je da se navedena greška svede na minimum (Ćočić, 2013).

U analizama, predstavljenim u poglavlju 6, numerički model turbulentnog tečenja je formiran i rešavan korišćenjem „open-source“ (ili „otvorenog“ tipa) softverskog paketa OpenFOAM (Weller i ostali, 1996). OpenFOAM kao i većina komercijalnih CFD (eng. Computational Fluid Dynamics) softvera se zasniva na primeni metode konačnih zapremina za formiranje numeričkog modela turbulentnog tečenja. Primena metode konačnih zapremina podrazumeva Ojlerov pristup u analizi fenomena tečenja, gde se analiziraju fiksirani prostorni domeni kroz koji protiče fluid. Pored metode konačnih zapremina, od Ojlerovskih pristupa, u hidrotehnici se koriste i metoda konačnih razlika, metoda konačnih elemenata, spektralne metode kao i u poslednje vreme popularna Latis-Bolcmanova metoda (eng. Lattice-Boltzman). Polazna formulacija metode konačnih zapremina je takva da su zakoni održanja ispunjeni, budući da se bazira na diskretizaciji integralnih oblika jednačina matematičkog modela turbulentnog tečenja. Pored toga, ne postoje ograničenja u vidu oblika diskretizovanog domena, imajući u vidu da se prostorni domen može diskretizovati skupom konačnih zapremina proizvoljnog poliedarskog oblika.

5.3.3 ODABIR MERNE METODOLOGIJE I DETALJNO

PROJEKTOVANJE MERNOG MESTA

Na osnovu, prethodno sprovedene, globalne analize hidrotehničkog sistema, kao i detaljnije analize izabranog mernog mesta, potrebno je prikupiti sve neophodno podatke, merodavne za odabir merne tehnike, kao i detaljno projektovanje samog mernog mesta.

Podsećanja radi, ključan uticaj na odabir merne metodologije imaju hidraulički uslovi, fizičke karakteristike fluida i provodnika, uslovi sredine kao i nezaobilazna ekonomska kategorija (Godley, 2002). Nakon odabira odgovarajuće merne metodologije, neophodno je definisati broj i položaj mernih instrumenata unutar samog provodnika. U velikim provodnicima se uglavnom instalira nekoliko senzora brzine po zidovima, dok je u standardnim aplikacijama (npr u manjim kanalizacionim kolektorima) dovoljan jedan uređaj. Ukoliko se koristi više senzora brzine, pri odabiru njihovog položaja treba se rukovoditi pretpostavkom da se na mernom mestu javlja asimetrična strujna slika, čiji uticaj na neodređenost izmerenog protoka treba redukovati.

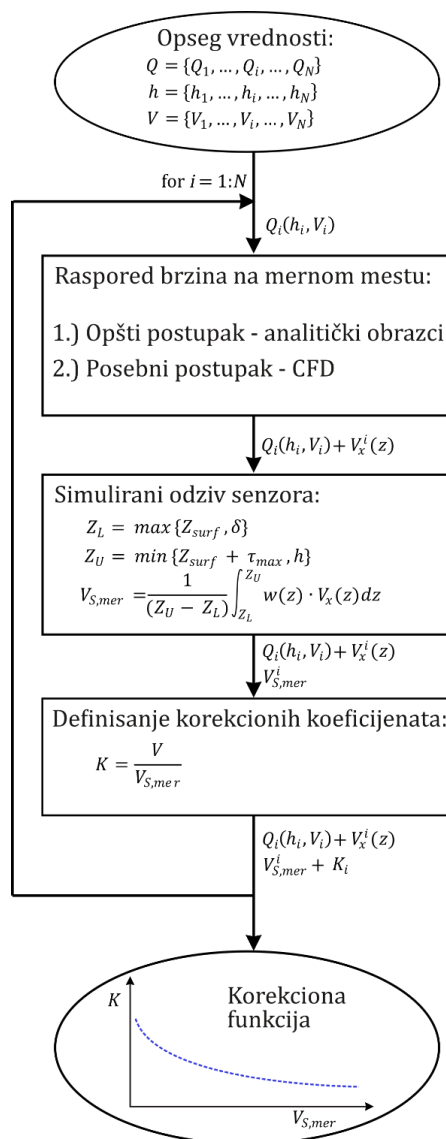
Detaljno projektovanje mernog mesta, pored definisanja broja i položaja mernih uređaja, podrazumeva i detaljnu razradu napajanja opreme, komunikacije sa kontrolnom jedinicom i ostalim sistemima akvizicije podataka, kao i održavanja mernog sistema. Ovde treba voditi računa o frekvencijama uzorkovanja, aktivacije uređaja i čuvanja podataka. Takođe, neophodno je obratiti pažnju na skladištenje podataka kao i na komunikaciju sa korisnikom, gde se preporučuje da se pored redovne komunikacije putem WiFi mreže ili GPRS signala obezbedi i lokalno čuvanje podataka. Konačno, poželjno je definisati i proceduru za redovno održavanje merne opreme na mernom mestu, koja pored čišćenja mernih uređaja podrazumeva i proveru komponenata sistema kao i periodičnu rekalibraciju.

5.3.4 LOKALNA KALIBRACIJA MERNE OPREME

Za merenje protoka Q u složenim uslovima strujanja, u ovoj disertaciji se predlaže lokalna kalibracija senzora brzine. Imajući u vidu lokalni karakter izmerenih brzina, karakterističan za većinu komercijalno dostupnih uređaja, neophodno je na adekvatan način definisati korelaciju kojom se lokalno izmerena brzina V_{mer} dovodi u vezu sa traženom srednjom profilskom brzinom V . Postupak lokalne kalibracije senzora brzine se u literaturi naziva i „prevođenje protoka“ (eng. discharge transiting) (El Bahlouli & Larrarte, 2018), i poslednjih godina se koristi u slučaju primene akustičnih Dopler senzora, prvenstveno papučastih ADV uređaja ali i akustičnih senzora sa više putanja. Istraživanjima predstavljenim u ovoj disertaciji, ostvaren je napredak u tumačenju radnog

principa ravnih EM senzora (kroz uprošćeni matematički model), čime je omogućena upotreba lokalne kalibracije i za ovaj tip uređaja.

U osnovi, postupak lokalne kalibracije senzora brzine podrazumeva niz analiza koje se mogu predstaviti simbolički uz pomoć dijagrama toka (eng. flowchart) (Slika 5.28). Delovi ovog postupka se sprovode unutar prethodnih koraka, predložene procedure za projektovanje sistema za merenje protoka u složenim uslovima. Ukoliko se analizira slučaj primene postupka V-A za merenje protoka, prvi korak u analizi predstavlja definisanje očekivanih opsega relevantnih hidrauličkih veličina na samom mernom mestu: samog protoka Q , srednje profilske brzine V i dubine h . Praktično, ovaj korak analize je sproveden u okviru Globalne (Integralne) analize hidrotehničkog sistema (poglavlje 5.3.1). Zatim, potrebno je za svaki i -ti skup vrednosti $Q(h, V)$, proceniti raspored brzina na mernom mestu. Procena rasporeda brzina na mernom mestu je analizirana u okviru poglavlja 5.3.2, gde je navedeno da su na raspolaganju dva pristupa: 1.) Opšti, koji podrazumeva upotrebu analitičkih obrazaca kao i 2.) Posebni, gde se koriste složenije numeričke simulacije turbulentnog tečenja. Kao rezultat dobija se raspored brzina, za date hidrauličke uslove $Q_i(h_i, V_i)$, u relevantnom prostornom domenu samog mernog mesta. Za primenu ravnih EM senzora, u poglavlju 5.2 je zaključeno da je dovoljno definisati raspored podužne komponente brzine u pravcu upravnom na elektrode senzora, odnosno $V_x^i(z)$. U sledećem koraku, potrebno je simulirati odziv $V_{S,mer}^i$ za date hidrauličke uslove $Q_i(h_i, V_i)$, odnosno sračunati raspored brzina $V_x^i(z)$. Za simuliranje odziva ravnih EM senzora, predlaže se upotreba uprošćenog matematičkog modela, definisanog j -nama (5.3 – 5.5). Preduslov za korišćenje uprošćenog modela, je poznavanje tehničkih parametara ravnog EM senzora, $w(z)$ i τ . Ovi parametri se eksperimentalno mogu odrediti procedurom razmatranom u okviru poglavlja 5.2. Takođe, na osnovu preliminarne rezultata prikazanih u poglavlju 5.2.2.4, može se zaključiti da je težinsku funkciju $w(z)$ moguće proceniti i na osnovu izmernog rasporeda korisne komponente magnetnog polja B_y . Proračunom simuliranog odziva $V_{S,mer}^i$, na osnovu poznatih tehničkih parametara, prelazi se u naredni korak – definisanje vrednosti korekcionog koeficijenta K_i (j -na (2.12)). Određivanjem niza vrednosti K_i , za merodavne hidrauličke uslove $Q_i(h_i, V_i)$, definiše se i sama korekciona funkcija K kojom se omogućava pouzdanije određivanje protoka u realnim eksploatacionim uslovima.

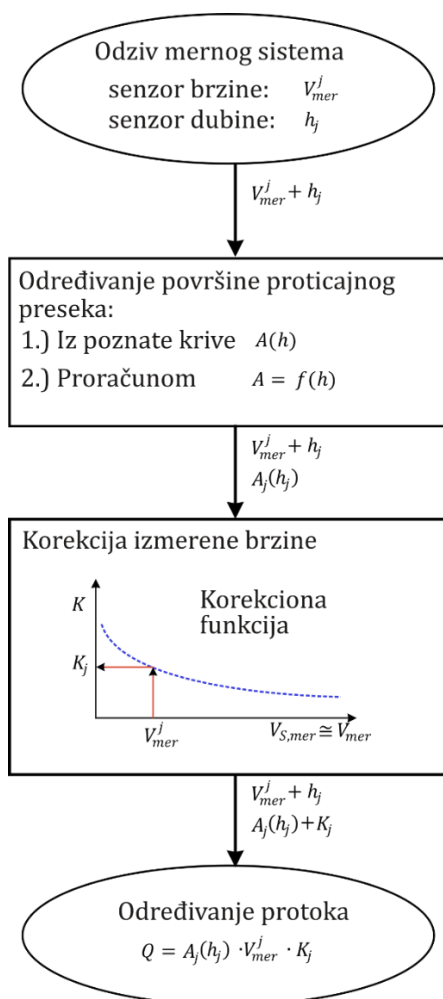


Slika 5.28 Simbolički dijagram toka za sprovođenje postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora brzine u okviru projektovanja sistema za merenje protoka u složenim uslovima strujanja.

Određivanje protoka u složenim uslovima strujanja, primenom pristupa V-A i ravnih EM senzora brzine, se takođe može simbolički predstaviti uz pomoć dijagrama toka (Slika 5.29). U okviru ovakvog mernog mesta, postoje dva tipa senzora: 1.) senzori brzine koji mere određenu lokalnu brzinu V_{mer}^j , kao i 2.) senzori dubine koji određuju dubinu h_j (notacija *mer* se ne koristi kod dubina, budući da se u većini slučajeva dubina pouzdano meri sa niskom mernom neodređenošću). Na osnovu izmerene dubine h_j , u prvom koraku se određuje površina proticajnog preseka A_j : 1.) na osnovu poznate krive $A(h)$ ili 2.)

odgovarajućim proračunom. U narednom koraku se na osnovu izmerene brzine V_{mer}^j , ili u određenim slučajevima (kad se javlja histerizis u korekcionoj funkciji) više veličina, procenjuje vrednost korekcionog koeficijenta K_j , korišćenjem prethodno definisane korekcionne funkcije K . Konačno, traženi protok se može odrediti sledećim obrazcem:

$$Q_j = A_j(h_j) \cdot V_{mer}^j \cdot K_j \quad (5.12)$$



Slika 5.29 Simbolički dijagram toka za određivanje protoka u složenim uslovima strujanja pomoću ravnih EM senzora brzine.

Konačno, preporučljivo je razmotriti mogućnost verifikacije postupka lokalne kalibracije, odnosno rada projektovanog mernog sistema za određivanje protoka u složenim uslovima strujanja. Verifikaciju je moguće sprovesti uz pomoć, privremeno postavljenog,

etalonskog mernog sistema (koji je za red veličine pouzdaniji od analiziranog sistema), ali i primenom volumetrijske ili bilansne metode. Međutim, u složenim uslovima strujanja, retko je moguće ekonomski opravdati a i obezbediti upotrebu ovakvih metoda. Imajući to u vidu, usvaja se da je prihvatljiva i upotreba kontrolnog mernog sistema (Ivetić i saradnici, 2019), čija je pouzdanost slična kao i kod analiziranog sistema. Pri upotrebi kontrolnog mernog sistema, treba voditi računa o tome da se omogući referentno merenje srednje profilske brzine na osnovu lokalnih merenja brzine, u delovima toka koji nisu obuhvaćeni kontrolnim zapreminama senzora sistema koji se verifikuje. Upravo je ovaj pristup korišćen za verifikaciju postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora instaliranih u okviru derivacionih tunela sistema HET. Kao kontrolni merni sistem korišćeni su EM senzori brzine u toku „Ajkulino krilo“, čija se kontrolna zapremina nalazi dublje u toku, u odnosu na CV ravnih EM senzora.

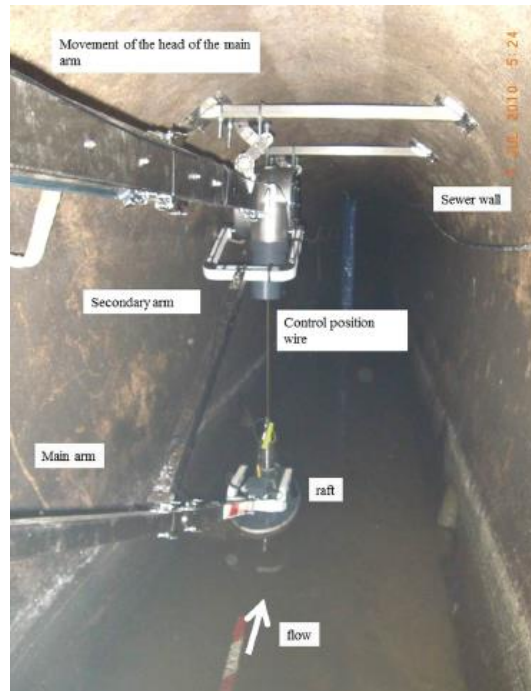
5.3.5 SEDIMENTACIJA: MOGUĆNOSTI MERENJA DUBINE

SEDIMENATA

U okviru poglavlja 4.2, proverena je robusnost ravnih EM senzora, ispitivanjem merne neodređenosti u uslovima rada pod pokrivkom od poroznog sedimenta. Ustanovljeno je da je moguće obezbediti pouzdana merenja srednje profilske brzine V , ukoliko je poznata dubina sedimenta δ i odgovarajući model korekcionih funkcija (CFM). CFM-om se, na osnovu δ , uklanja sistematski uticaj poroznog sedimenta na neodređenost izmerene srednje profilske brzine V . U ovom poglavlju je dat kratak osvrt na problematiku merenja dubine sedimenta korišćenjem akustičnih senzora, kao i mogućnost primene samih ravnih EM senzora za posredno merenje dubine sedimenta, preko impedanse R .

5.3.5.1 MERENJE DUBINE SEDIMENTA AKUSTIČNIM SENZORIMA

Problem merenja dubine i prostornog rasporeda sedimenta, u realnom vremenu, je zahtevan zadatak. Imajući u vidu da je problem sedimentacije senzora brzine, vodeći uzrok nepouzdanog merenja protoka u kanalizacionim sistemima, većina istraživanja je upravo fokusirana na ovaj tip hidrotehničkih sistema.



Slika 5.30 Merni sistem *Furrina* za merenje dubine sedimenta pomoću akustičnog senzora. Na slici se može primetiti i teleskopski nosač sa baždarenim kablom i enkoderom za određivanje položaja samog akustičnog senzora (Larrarte i saradnici, 2016)

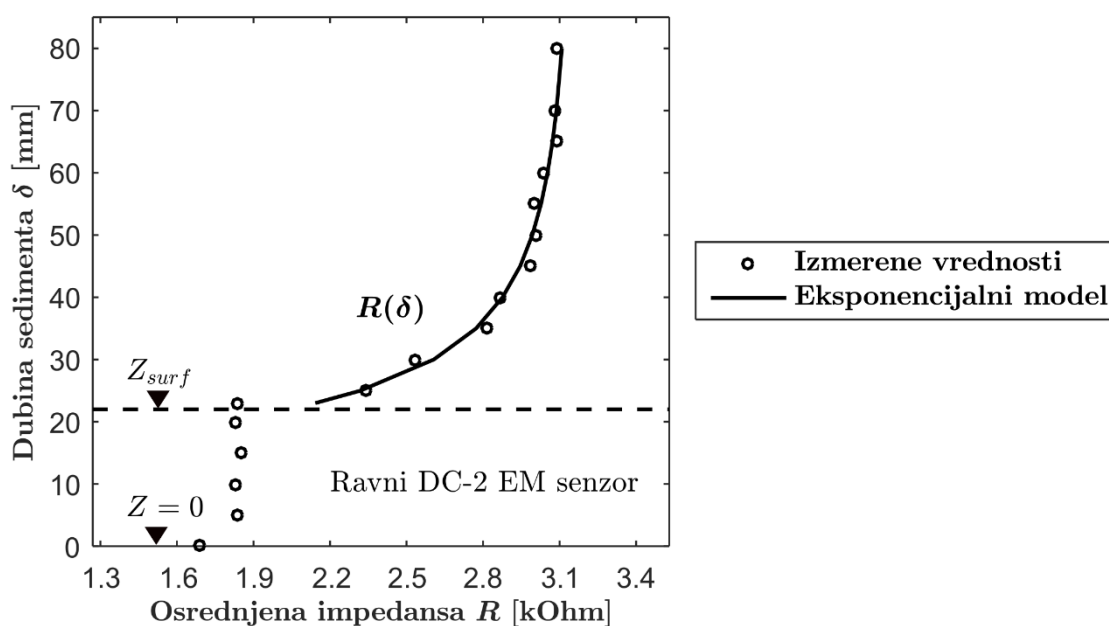
Različita rešenja, odnosno merni instrumenti, su korišćeni u svrhu uspostavljanja dugotrajnog mernog mesta za merenje dubine sedimenta u kanalizaciji (Larrarte i saradnici, 2016). Upotreba mehaničkih uređaja, kao merne igle, se pokazala problematičnom, budući da je ovaj tip instrumenata sklon ka zadržavanju čvrstih predmeta koji plutaju kanalizacijom (Lawler, 2008). Kao pouzdana alternativa, trenutno se ispituje mogućnost upotrebe akustičnih senzora odstojanja, postavljenih na slobodnu površinu toka (Larrarte i saradnici, 2016; Carnacina i saradnici, 2017; Lepot i saradnici, 2017). Sami senzori imaju mogućnost da obezbede prostornu procenu dubinu sedimenta sa mernom neodređenošću od oko 4% (Lepot i saradnici, 2017).

Međutim, korisno je napomenuti da pored samog održavanja senzora kao i obrade izmerenog signala, problem predstavlja i konstruktivno rešenje koje omogućava održavanje akustičnog senzora na slobodnoj površini vode u okviru mernog mesta. Jedan od mogućih pristupa je upotreba teleskopskog nosača akustičnog senzora, gde se uz

pomoć baždarenog kabla sa enkoderom u svakom trenutku precizno meri odstojanje od referentne tačke do akustičnog senzora (Slika 5.30) (Larrarte i saradnici, 2016).

5.3.5.2 MOGUĆNOST KORIŠĆENJA MERENJA UNUTRAŠNJE IMPEDANSE

Jedna od mogućih alternativa u proceni dubine sedimenta iznad kućišta ravnog EM senzora, predstavlja upotreba merenja impedanse R pomoću samog ravnog EM senzora. Naime, kao jedan od mehanizama za detekciju problema pri radu sa ravnim EM sensorima, proizvođač „Svet instrumenata“ je u same uređaje implementirao mogućnost merenja impedanse (ili ukupna otpornost) R između elektroda senzora. Ideja je da će se pojava prepreka, ili smetnji, formiranom toku struje između elektroda detektovati povećanjem otpornosti.



Slika 5.31 Izmerene i osrednjene vrednosti impedanse R u zavisnosti od dubine poroznog, peščanog sedimenta δ , dobijenih pri ispitivanju robusnosti ravnih EM senzora.

Tokom eksperimentalnog ispitivanja robusnosti senzora, predstavljenih u poglavlju 4.2, kontinuirano je beležena vrednost R , sa prethodno usvojenom frekvencijom uzorkovanja od 30 s. Za svaku ispitanu dubinu sedimenta δ , kompletan niz merenja vrednosti R (za sve ispitanne brzine) je osrednjen. Ovako osrednjene vrednosti su prikazane na Slici 5.31

u zavisnosti od dubine sedimenta δ . Sa priloženog grafika se može uočiti da postoji nelinearna funkcionalna zavisnost između R i δ . Dubine sedimenta manje od Z_{surf} su dovele do blagog porasta impedanse R . Međutim čim je sediment prekrrio elektrode senzora, došlo je do naglog skoka vrednosti R .

Dobijeni rezultati su svakako obećavajući sa aspekta primene ravnih EM senzora u uslovima sedimentacije. Imajući u vidu da na vrednost impedanse pored prisustva sedimenta, mogu uticati i ostali faktori (npr kalcifikacija), neophodno je sprovesti dodatna istraživanja koja će ukazati na mogućnost primene ove veličine u proceni dubine sedimenta δ . Detaljniji opis predloga daljih istraživanja, vezanih za upotrebu impedanse R u proceni dubine sedimenta, je dat u zaključnom poglavlju 7.2.

6 TERENSKA ISPITIVANJA

Finalni aspekt ispitivanja ravnih EM senzora, odnosno istraživanja mogućnosti unapređenja tačnosti merenja protoka u složenim uslovima strujanja, predstavljaju terenska ispitivanja. U prethodnim poglavljima, fokus je postavljen na laboratorijsko ispitivanje radnih karakteristika (poglavlja 4.1 i 4.2), kao i na definisanje uprošćenog matematičkog modela koji opisuje radni princip senzora, odnosno procedure sa određivanjem tehničkih parametara predloženog uprošćenog matematičkog modela (poglavlje 5.2). Konačno, predložena je procedura za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora u okviru opšteg postupka projektovanja mernog mesta za merenje protoka u složenim uslovima strujanja (poglavlje 5.3). Dobijeni rezultati, kao i izvedeni zaključci, su formirali bazu za unapređenje primene ravnih EM senzora u praksi.

Ravni EM senzori, proizvođača „Svet instrumenata“, se poslednjih desetak godina, u ograničenoj meri, primenjuju u hidrotehničkoj praksi. Korisnici su uglavnom javna komunalna preduzeća, koja pokrivaju delatnost kanaliziranja kišnih i fekalnih voda, kao i elektroprivredna preduzeća koja rukovode radom hidroenergetskih sistema. Većina navedenih preduzeća je iz Republike Srbije, dok je određeni deo i iz Republike Srpske, odnosno Crne Gore.

Tokom izrade ove disertacije, projektovana su, i izvedena, tri merna sistema za merenje protoka u okviru kompleksnog vodoprivrednog sistema „Hidroelektrane na Trebišnjici“ (HET), odnosno odgovarajućeg podsistema Gornji Horizonti, u Republici Srpskoj. Jedinstveno, za izvedene merne sisteme, je da je zahtevana visoka tačnost u merenju protoka, kao i da su hidraulički i fizički uslovi takvi, da se ovaj tip problema može klasifikovati kao određivanje protoka u složenim uslovima strujanja. Imajući navedeno u vidu, kroz učestvovanje u projektovanju ovih sistema i naknadne obrade prikupljenih podataka, omogućena je sveobuhvatnija analiza mogućnosti ravnih EM senzora što predstavlja dodatnu vrednost istraživanja predstavljenih u ovoj disertaciji.

U ovom poglavlju su predstavljene osnovne karakteristike vodoprivrednog sistema HET (poglavlje 6.1), kao i izvedenih mernih sistema na derivacionim tunelima koji spajaju

Dabarsko i Fatničko polje (DP – FP) kao i Fatničko polje sa Bilećkom akumulacijom (FP – BA). Zatim, na osnovu podataka prikupljenih u određenom mernom periodu, na derivacionom tunelu DP – FP, ispitana je mogućnost verifikacije predloženog postupka lokalne kalibracije izvedenog mernog sistema kroz upotrebu privremenog, kontrolnog mernog sistema (poglavlje 6.2). Konačno, analizirani su i pojedini interesantni aspekti primene predložene metodologije, uočeni tokom projektovanja i monitoringa izvedenih sistema (poglavlje 6.3).

6.1 VODOPRIVREDNI SISTEM „HIDROELEKTRANE NA TREBIŠNJICI“

Vodoprivredni sistem „Hidroelektrane na Trebišnjici“ (HET) je jedan od najsloženijih vodoprivrednih sistema na prostoru bivše Jugoslavije. Kompleksnost ovog sistema je uslovljena specifičnim geografskim, geološkim, hidrološkim, ali i političkim uslovima. U okviru definisanih planova razvoja elektroprivrednog sistema Republike Srpske, HET ima veliki značaj. Takođe, ovaj sistem ima ključnu regionalnu ulogu i u ostalim aspektima vodoprivrede, kao što su navodnjavanje, vodosnabdevanje i zaštita od poplava. U nastavku su ukratko opisane opšte karakteristike ovog sistema, dok je poseban osvrt dat na derivacione tunele DP – FP i FP – BA u okviru podsistema Gornji Horizonti, odnosno na izvedene sisteme za merenje protoka u okviru ovih tunela.

6.1.1 OPŠTE KARAKTERISTIKE SISTEMA

Šire područje sliva reke Trebišnjice odlikuju specifični hidrološki i hidrogeološki fenomeni, zbog čega dugo privlači pažnju stručne javnosti. Osnovne karakteristike hidrološkog režima ovog područja su obilje voda u jesensko-zimskom periodu i oskudica u vegetacionom periodu. U kontekstu hidroenergetskog potencijala, pored rečnih tokova, značajna su i kaskadno poređana i hidrološki zatvorena kraška polja, koja se pružaju od kote oko 950 mm, do 220 mm. Treba napomenuti da je područje sliva reke Trebišnjice, jedno od najbogatijih padavinama u Evropi, gde visina godišnjih padavina u proseku iznosi oko 1800 mm.

Osnovni koncept upravljanja i zaštite od voda, na širem prostoru sliva reke Trebišnjice, usvojen je vodoprivrednom osnovom iz 1958. godine. Prema usvojenom konceptu, predviđeno je da se na području hidrosistema Trebišnjica izgradi sedam hidroelektrana sa pet akumulacija. Pored hidroenergetskog korišćenja vode, izgradnjom sistema se između ostalog omogućava navodnjavanje oko 240 km² obradivih površina, kao i povećanje kapaciteta vodovodnih sistema. Shematski prikaz trenutnog stanja sistema HET je prikazan na Slici 6.1.

Sistem je podeljen na osnovne podsisteme: Donji Horizonti i Gornji Horizonti. Samo izvođenje objekata sistema HET je sprovedeno u fazama. U prvoj fazi su izgrađeni sledeći objekti u okviru podsistema Donji Horizonti:

- HE Dubrovnik sa dovodnim tunelom, branom Gorica i razvodnim postrojenjem (objekti su pušteni u pogon 1965.godine). Izgradnjom brane Gorica, formirano je Trebinjsko jezero.
- HE Trebinje 1 (dva agregata) sa branom Grančarevo (objekti su pušteni u pogon 1968. godine). Izgradnjom brane Grančarevo, formirano je Bilečko jezero. Treći agregat u HE Trebinje 1 montiran je i pušten u pogon 1975.godine.

U drugoj fazi, izgrađeni su objekti:

- RHE Čapljina sa dovodnim kanalom kroz Popovo polje (objekti su pušteni u pogon 1979.godine).
- HE Trebinje 2 (agregat je pušten u pogon 1981.godine), kao pribransko postrojenje uz branu Gorica.

Poseban deo sistema HET, čini podsistem Gornji horizonti. Konceptualno, podsistem Gornji Horizonti, treba da na optimalan način iskoristi velike visinske razlike, i relativno male udaljenosti između više kraških polja: Nevesinjsko, Gatačko, Bilečko, Fatničko i Dabarsko. U okviru ovog podsistema, sa ciljem iskorišćavanja hidroenergetskog potencijala, predviđena je izgradnja tri nove hidroelektrane: HE Nevesinje, HE Dabar i HE Bileća. Do sada su izgrađeni sledeći objekti:

- Derivacioni tunel Dabarsko polje - Fatničko polje (DP – FP), koji je pušten u pogon 1986.godine. Tunel DP - FP u sadašnjoj fazi ima funkciju prevođenja dela voda Dabarskog polja u Fatničko polje. Nakon izgradnje sistema Gornji horizonti, obavljace funkciju prevođenja voda koje kanalom dolaze od HE Dabar. U blizini izlazne građevine tunela u Fatničkom polju, postavljen je stalni sistem za merenje protoka, V – A pristupom, sa četiri Large Flat DC-2 EM senzora i dva senzora pritiska (više detalja u poglavlju 6.1.2.3).



Slika 6.1 Šematski prikaz trenutnog stanja razvoja sistema Hidroelektrane na Trebišnjici (CUW-UK i ICCI Limited, 2004).

- Derivacioni tunel Fatničko polje – Bilećka akumulacija (FP – BA), je pušten u pogon 2006. godine. Tunel FP – BA u sadašnjoj fazi ima funkciju prevođenja dela voda Fatničkog polja u Bilećku akumulaciju. Nakon izgradnje sistema Gornji horizonti, obavljaće funkciju dovodnog tunela za HE Bileća. Stalni sistemi za merenje protoka, V – A pristupom, sa po četiri Large Flat DC-2 EM senzora i dva senzora pritiska su postavljeni u okviru ulazne (Fatničko polje - profil Pađeni, poglavlje 6.1.2.4) i izlazne građevine (Bilećka akumulacija - profil Čepelica, poglavlje 6.1.2.5).

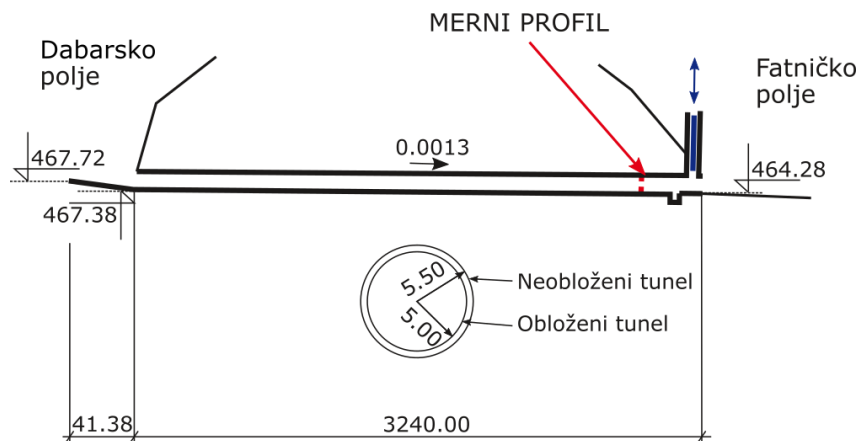
Iako je sistem HET originalno koncipiran, i u početnim fazama građen, kao jedinstven tehnološki sistem, objekti HET-a sada pripadaju različitim elektroprivredama: Elektroprivredi Republike Srpske (ERS), Elektroprivredi Herceg Bosne (EP HZ HB) i Hrvatskoj elektroprivredi (HEP). Ova činjenica dodatno usložnjava uslove eksploatacije sistema.

U okviru narednih podpoglavlja, predstavljen je opis osnovnih geometrijskih, fizičkih i hidrauličkih karakteristika derivacionih tunela DP – FP i FP – BA. Kroz predstavljeni opis, apostrofirane su specifičnosti tunela koje utiču na pojavu tzv. složenih uslova tečenja. Ovakvi uslovi tečenja nameću primenu posebnih pristupa (razmatranih u ovoj disertaciji) u projektovanju odgovarajućih sistema za merenje protoka. Jedna od pomenutih specifičnosti jeste i pojava kombinovanih uslova tečenja, odnosno mogućnost tečenja sa slobodnom površinom i pod pritiskom. Tečenje sa slobodnom površinom se u oba tunela javlja pri manjim protocima, dok se pri većim protocima, ili u određenim uslovima zatvorenosti regulacionih ustava, javlja tečenje pod pritiskom.

6.1.1.1 DERIVACIONI TUNEL DABARSKO POLJE – FATNIČKO POLJE

Derivacionim tunel DP – FP se, u trenutnoj fazi razvoja sistema Gornji Horizonti, sprovodi se prevođenje vode iz Dabarskog polja u Fatničko (i dalje tunelom FP – BA u Bilećko jezero). U ovom tunelu karakteristična je pojava bidirekcionog tečenja, budući da se u određenim periodima, kada je nivo vode u Fatničkom polju viši od nivoa u Dabarskom polju, javlja tečenje u povratnom smeru. U osnovnom smeru tečenja (ka Fatničkom polju) javljaju se kombinovani uslovi tečenja, odnosno kombinacija tečenja sa slobodnom površinom i tečenja pod pritiskom. Maksimalni protok u osnovnom smeru je

procenjen na oko 50 m³/s. U povratnom smeru, moguće je samo tečenje pod pritiskom maksimalnim proticajem od oko 40 m³/s. Osnovne geometrijske karakteristike tunela su prikazane na Slici 6.2.



Slika 6.2 Šematski prikaz osnovnih geometrijskih karakteristika derivacionog tunela
Dabarsko polje – Fatničko polje

Većim delom trase tunel je probijen kroz čvrstu stensku masu, gde nije bilo neophodno podgrađivati tunelski otvor, odnosno izvoditi betonsku oblogu koja je predviđena projektom za izgradnju tunela. Na deonicama tunela, okarakterisanim lošijim geološkim uslovima, izvedena je betonska obloga sa svetlim otvorom od 5,0 m. Ukupno je izbetonirano, oko 815 m tunela, odnosno 25% ukupne dužine tunela. Na preostalim deonicama tunela, dužine oko 2400 m, tunel nije betoniran. Prečnik svetlog otvora u nebetoniranim delovima tunela iznosi u proseku oko 5,5 m. Treba napomenuti da je hrapavost tunela daleko veća u neobloženim deonicama, u odnosu na obložene delove.

Ulaznu građevinu tunela (Dabarsko polje) čine armirano-betonski (AB) uvodni kanal, otvor bez rešetki i plato iznad samog ulaza, na kome je predviđena montaža oprema za rad ulivne građevine. Kota dna tunela na mestu ulazne građevine je 467,38 mm. Izlazna građevina (Fatničko polje) je AB konstrukcija (Slika 6.3), koja se sastoji se od niše, u kojoj se nalaze tablasti zatvarač kojim se zatvara protok kroz tunel, pravougaoni izliv i odvodni kanal promenljivog trapeznog preseka. Kota dna tunela na mestu izliva je 464,28 mm. Predviđeno je da se protokom kroz tunel upravlja (ima protoka/nema protoka) tablastim zatvaračem na izlazu tunela.



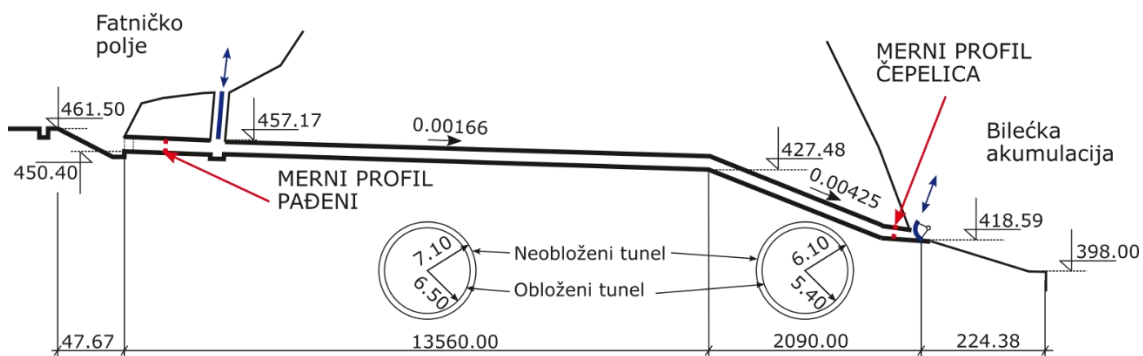
Slika 6.3 Izlazna građevina derivacionog tunela Dabarsko polje – Fatničko polje: (Levo) Pogled iz odvodnog kanala u Fatničkom polju; (Gore desno) Pogled iz tunela na odvodni kanal; (Dole desno) Zadržavanje vučenog nanosa neposredno uzvodno od izlazne građevine.

6.1.1.2 DERIVACIONI TUNEL FATNIČKO POLJE – BILEĆKA AKUMULACIJA

Derivacioni tunel Fatničko polje – Bilećka akumulacija predstavlja osnovni objekat za transport privremeno akumulisane vode u Fatničkom polju do Bilećkog jezera. Izgradnja samog objekta je započeta 1986. godine, ali je prekinuta usled početka ratnih dejstava na ovom prostoru. Izgradnja je nastavljena 2002. godine, dok je probijanje tunela okončano 2005. godine. Nakon završetka realizacije planiranih objekata HET, odnosno podsistema Gornji Horizonti, derivacioni tunel FP – BA će preuzeti ulogu dovodnog tunela HE Bileća. Slično kao i u tunelu DP – FP, ovde se javljaju kombinovani uslovi tečenja, odnosno pri nižim protocima javlja se tečenja sa slobodnom površinom dok se pri višim

protocima, kao i slučaju delimične zatvorenosti nizvodne regulacione ustave, javlja tečenje pod pritiskom. Maksimalni protok u tunelu je procenjen na oko $110 \text{ m}^3/\text{s}$.

Prema geometrijskim karakteristikama, u tunelu se razlikuju tzv. uzvodna i nizvodna deonica. Osnovne geometrijske karakteristike ovih deonica su prikazane na Slici 6.4, i navedene su u nastavku:



Slika 6.4 Šematski prikaz osnovnih geometrijskih karakteristika derivacionog tunela Fatničko polje – Bilećka akumulacija



Slika 6.5 Ulaz u derivacioni tunel Fatničko polje – Bilećka akumulacija

Većim delom trase tunel je probijen kroz čvrstu stensku masu, gde se stabilnost tunelskog otvora može obezbediti bez betoniranja. U prvoj fazi izgradnje tunela, izvršeno je oblaganje tunela na 20% njegove ukupne dužine, na deonicama koje su u toku gradnje

procenjene kao najslabije. U sledećoj fazi je planirana izgradnja tunelske obloge na celokupnoj dužini. Pored stabilnosti tunela, betoniranjem deonica smanjuje se gubici (i dobici) vode iz tunela (i u), koji su posledica geoloških karakteristika probijenih stena. Kako bi se kvantifikovali navedeni gubici kroz monitoring bilansa (poglavlje 6.3.2), u ovom tunelu su izvedeni sistemi za merenje protoka, i na ulazu i na izlazu.



Slika 6.6 Prelazak sa kružnog na pravougaoni presek na mestu tablastih zatvarača neposredno nizvodno od ulazne građevine

Ulazna građevina tunela se nalazi pored ponorske zone „Pasmica“. Ona se sastoji od AB taložnice sa pragom, silazne rampe, otvora na kome je predviđena montaža rešetki i platoa na kome je komandna zgrada. Taložnica je spojena sa silaznom rampom, preko horizontalnog AB prelivnog praga na koti 461,50 mm, širine u dnu 17,9 m. Silazna rampa je dužine 39 m, nagiba 29,2% i završava se na koti 450,63 mm sa širinom u dnu 11,20 m. Nakon toga, na koti 450,40 mm počinje ulaz u tunel se dva pravougaona otvora i razdeonim zidom. Svaki otvor je širine 4,97 i visine 8 m koja se postepeno smanjuje na visinu 6,77 m (Slika 6.5). Nizvodno od ulaza u tunel, nalaze se dva tablasta zatvarača (Slika 6.6). Glavni nizvodni zatvarač je sa hidrauličkim pogonom. Nizvodno od zatvarača, nalazi se aeracioni otvor dimenzija 4 * 5 m. Kroz aeracioni otvor je moguće pristupiti delu tunela nizvodno od glavnog zatvarača.



Slika 6.7 Izlazna građevina derivacionog tunela Fatničko polje – Bilećka akumulacija:
Gore levo) Pogled iz brzotoka na zatvaračnicu; Gore desno) Pogled na suženi izlaz iz
tunela; Dole) Oštećenje zida brzotoka usled pojave kavitacije.

Tunel se završava izlaznom građevinom i ispusnom štolnom koja je dalje brzotokom povezana sa akumulacijom Bileća. Ukupna dužina brzotoka, računajući od izlaznog portala tunela, je 173,55 m. U okviru izlazne građevine tunel se sužava na pravougaoni presek dimenzija 2,2 * 2,1 m. Na kraju suženja, odnosno celog tunela, nalazi se segmentna regulaciona ustava sa hidrauličkim pogonom. Ustavom se vrši regulacija režima isticanja vode iz tunela, a time i režima tečenja vode kroz tunel. Nažalost, samo suženje smanjuje proticajni kapacitet celog tunela za nekih 30 m³/s. Naime, usled pojave velikih brzina

značajan deo potencijalne energije se transformiše u kinetičku, koja uslovno rečeno „potroši“ raspoloživi kapacitet tunel. Takođe, uočeno je blago oštećenje zidova izlaznog brzotoka (Slika 6.7) usled pojave kavitacije pri strujanju sa velikim brzinama.

6.1.2 IZVEDENI SISTEMI ZA MERENJE PROTOKA

Prema usvojenoj strategiji unapređenja operativnog upravljanja proizvodnjom i vodama sistema HET, 2012. godine je projektovan i delimično realizovan sistema za monitoring meteoroloških, hidroloških i hidrogeoloških podataka, zajedno za predikcionim modelom dotoka u akumulacione prostore podsistema Gornji Horizonti. Predikcioni model predstavlja osnovu HidroInformacionog sistema „Trebišnjica“ (HIS Trebišnjica), čiji je zadatak da u budućem razvoju obezbedi dodatne funkcionalnosti u smislu strateškog planiranja i operativnog upravljanja. Za adekvatnu upotrebu HIS Trebišnjica, od ključnog je značaja obezbediti kontinualna merenja protoka u derivacionim tunelima: DP – FP i FP – BA. Kako je u prvobitnim projektima fokus stavljen na meteorološke stanice, 2017. i 2018. godine, su projektovana i izvedena tri stalna sistema za merenje protoka u okviru tunela DP – FP i FP – BA.

Imajući u vidu pojavu kombinovanih uslova tečenja, kao i činjenicu da je zahtevana visoka tačnost novih mernih sistema za merenje protoka (reda veličine 1%), neophodno je bilo obezbediti paralelno merenje dubine h i srednje profilske brzine V , odnosno primeniti V-A pristup. Merenje dubine u kombinovanim uslovima tečenja se može posredno, ali efikasno, sprovesti uz pomoć pjezorezistivnih senzora pritiska. Pjezorezistivni senzori pritiska se ugrađuju u dno provodnika, pri čemu treba obezbediti zaštitu samog senzora od fizičkog oštećenja kao i mogućnost samoispiranja. Sa druge strane, ključan problem je bio pronaći robusno rešenje za merenje srednje profilske brzine. U poglavlju 2.2.3 je predstavljena primena akustične metode sa više putanja kao jednog od mogućih rešenja u ovim slučajevima,. Međutim, rad ovakvog sistema u uslovima kakvi se javljaju u tunelima DP – FP i FP – BA, može biti otežan zbog uvlačenja vazduha u tok. Takođe, tačnost ovih uređaja naglo opada pri niskim brzinama tečenja. Konačno, imajući u vid potrebu za većim brojem parova akustičnih primopredajnika (putanja), za adekvatnu realizaciju ovakvog rešenja potrebna su veća finansijska sredstva nego u slučaju izvedenog sistema. Kao alternativa, za kontinualno merenje srednje

profilske brzine u tunelima, izabrani su ravni EM senzori proizvođača „Svet instrumenata“. Da bi se obezbedila visoka tačnost u merenjima srednje profilske brzine, za svaki ugrađeni ravni EM senzor je sproveden postupak lokalne kalibracije, predstavljen u ovoj disertaciji.

U okviru svakog izvedenog mernog mesta, instaliran je permanentni osnovni merni sistem koji se sastoji od dva pijezezistivna senzora pritiska, ugrađena u dno tunela, i četiri Large Flat DC-2 EM senzora (poglavlje 3.1) postavljena na zidovima tunela. Pored osnovnog sistema, u svakom tunelu je instaliran i privremeni kontrolni merni sistem sačinjen od dva lokalna EM senzora brzine u toku, „Ajkulino krilo“ (poglavlje 3.2). Imajući u vidu da je operacioni princip, kao i režim rada, osnovnih i kontrolnih mernih sistema isti za sva tri izvedena merna mesta, opis ovih sistema je izdvojen i predstavljen u narednim podpoglavljima 6.1.2.1 i 6.1.2.2, respektivno. Nakon toga, dat je opis lokalnih specifičnosti svakog izvedenog mernog sistema, kao celine, u potpoglavljima 6.1.2.3 (Tunel DP-FP), 6.1.2.4 (Tunel FP-BA profil Pađeni) i 6.1.2.5 (Tunel FP-BA profil Čepelica).

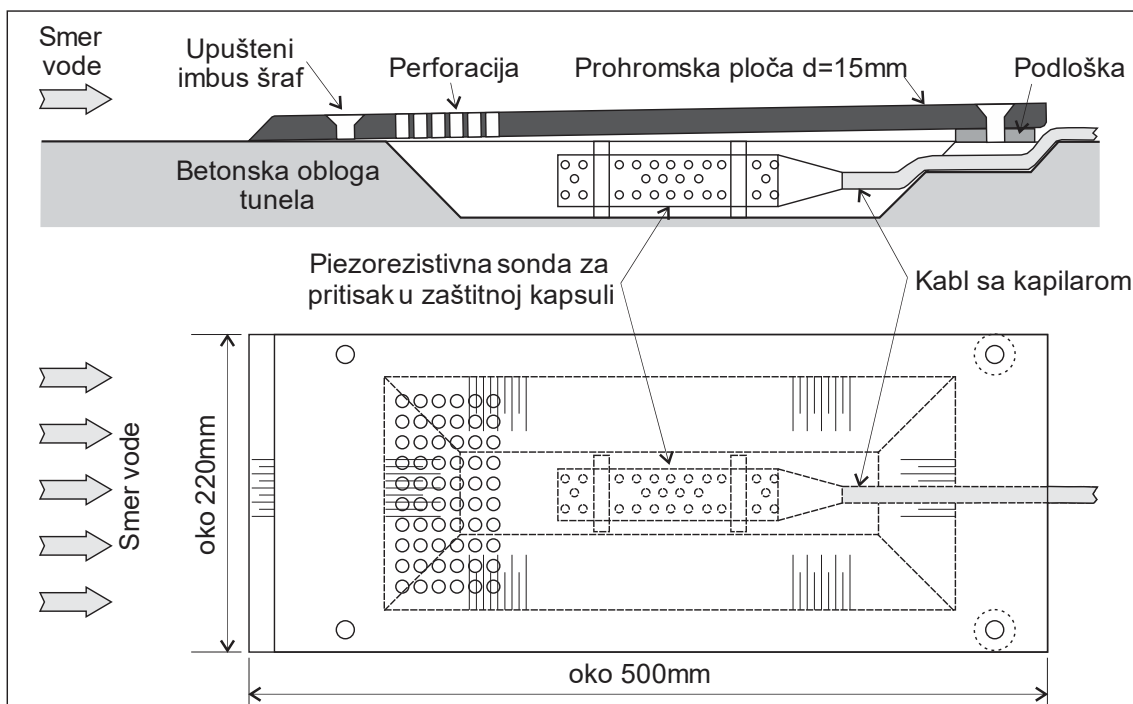
6.1.2.1 OSNOVNI MERNI SISTEM

Osnovni sistem za merenje protoka (OMS), zapravo predstavlja stalni sistem čiji je zadatak da obezbedi kontinualno merenje protoka u derivacionim tunelima, tokom perioda eksploatacije. U okviru svakog od izvedenih osnovnih sistema za merenje protoka instalirana su dva pijezezistivna senzora pritiska i četiri velike ravne EM sonde. Napojni i signalni kablovi su provučeni kroz niše u zidovima tunela i izvedeni kroz vertikalnu bušotinu do kontrolne, logerske i napojne jedinice koja se nalazi na površini. Niše, odnosno kablovi unutar niša, su zaštićene prohromskim limom, dok su vertikalne bušotine zaptivene prohromskim flanšama.

Pijezezistivni senzori pritiska su korišćeni za merenje dubina, posredno preko visine pritiska. Do instaliranih senzora pritiska sproveden je kabl unutar kojeg se nalazi kapilara za dovođenje atmosferskog pritiska. Senzori pritiska su instalirani u posebne niše na dnu tunela i zaštićeni perforiranim prohromskim limom. Oblik niše je tako izveden, da omogućava samoispiranje, čime je senzor obezbeđen od zatrpavanja (Slika 6.8). Tokom

sušnog perioda, moguće je ispiranje i čišćenje prostora oko sonde u okviru postupka redovnog održavanja sistema.

Četiri Large Flat DC-2 EM sonde su instalirane na zidovima tunela, tako da se dve nalaze na donjoj polovini polukruga poprečnog preseka, a dve u gornjoj polovini, formirajući oblik slova X (Slika 6.9). Budući da se tokom sušnog perioda vrši redovno održavanje kao i betoniranje obloge na oba tunela, senzori brzine su morali da se izdignu od samog dna tunela zbog prolaska teške mehanizacije. Kako pri malim dubinama, ravni EM senzori nisu potopljeni, procena protoka se za određeni opseg dubina obavlja nivometrijski, preko $Q - h$ veze određene na osnovu poslednjeg redovnog merenja protoka. Pri potapanju donjeg para ravnih EM senzora, aktivira se redovni režim merenja protoka, pristupom $V - A$.



Slika 6.8 Šematski prikaz koncepta ugradnje pijezezistivnih senzora pritiska u derivacionim tunelima DP – FP i FP - BA.

U okviru samog osnovnog sistema za merenje protoka, senzori su grupisani u odgovarajuće podsisteme. Dva ravna senzora sa desne strane tunela (gledano u osnovnom smeru tečenja) čine podsistem za merenje brzine V_A , dok dva senzora sa leve 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:

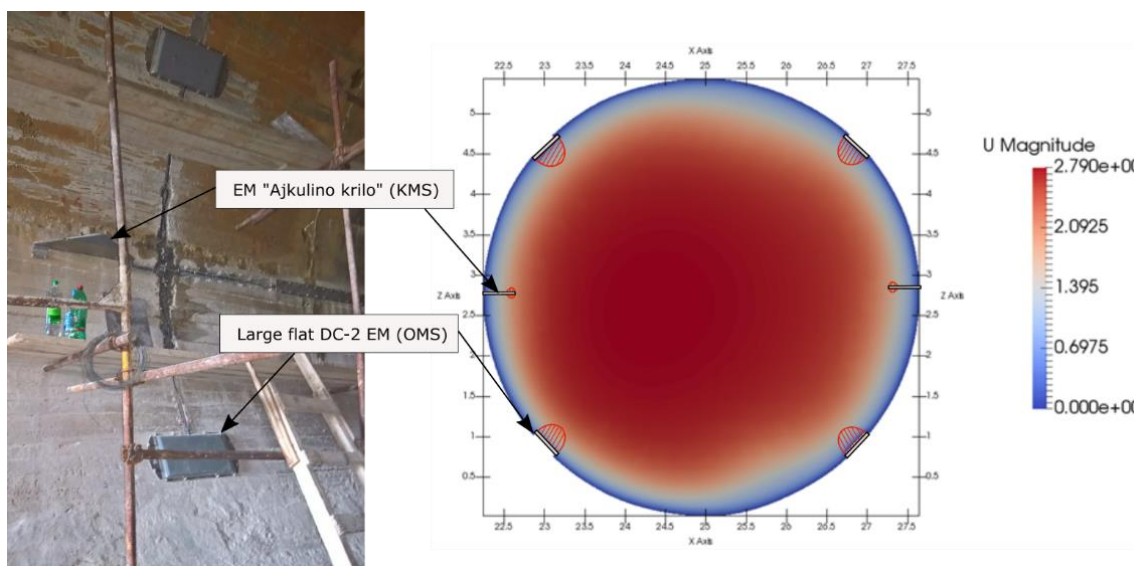
$$V_A = \frac{V'_A + V''_A}{2}; V_B = \frac{V'_B + V''_B}{2} \quad (6.1)$$

Gde su V'_A i V''_A , V'_B i V''_B 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 V , 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 :

$$V_{mer} = \frac{V_A + V_B}{2}; h_{mer} = \frac{h_A + h_B}{2} \quad (6.2)$$

Treba imati u vidu da su za analizu izmerenih vrednosti, kao i procenu protoka, 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} , protok se može odrediti koristeći j-nu (5.12). Odgovarajuće korekzione funkcije K za korelaciju izmerene brzine V_{mer} sa srednjom profilskom brzinom su dobijene na osnovu sprovedenog postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora. Takođe, veoma bitnu ulogu u definisanju korekcionih funkcija su imali i rezultati merenja brzina pomoću kontrolnog mernog sistema. Jednodimenzionalna težinska funkcija Large Flat DC-2 EM senzora je definisana od strane proizvođača „Svet instrumenata“ na osnovu merenja rasporeda korisne komponente magnetnog polja B_y iznad elektroda. Rasporedi brzina na mernim mestima, za procenjene opsege protoka i dubina, su dobijeni kombinacijom opšteg postupka (upotrebe analitičkih obrazaca – poglavlje 5.3.2.1) i posebnog postupka (upotreba numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja - poglavlje 5.3.2.2). Imajući u vidu pojavu velikih protoka u derivacionim tunelima, odnosno visokih Rejnoldsovih brojeva, uočeno je da je pri sprovođenju numeričkih simulacija neophodno obezbediti značajne računarske resurse kako bi se na adekvatan način simuliralo tečenje u graničnom sloju toka. Sa druge strane, raspored brzina u graničnom sloju toka je ključan za sprovođenje postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora brzine. Stoga, pri

određivanju rasporeda brzina, veća težina je data opštem postupku. Specifičnosti primene numeričkih simulacija prostornog tečenja su detaljnije analizirane u poglavlju 6.3.1.



Slika 6.9 Prikaz položaja ravnih EM senzora, u okviru OMS, kao i EM senzora „Ajkulino krilo“, u okviru KMS, zajedno sa odgovarajućim kontrolnim zapreminama (Crvena šrafura).

6.1.2.2 KONTROLNI MERNI SISTEM

U prvih godinu dana eksploatacije izvedenih mernih sistema, merenja srednje profilske brzine V su se obavljala pomoću dva sistema: osnovnog (OMS) i kontrolnog (KMS). Dok je osnovni merni sistem permanentan, kontrolni sistem za merenje srednje profilske brzine je namenjen samo za privremenu upotrebu. Osnovna namena kontrolnog sistema je obezbeđivanje dodatnih podataka o rasporedu brzina potrebnih za lokalnu kalibraciju osnovnog sistema. Kontrolni sistem na izvedenim mernim mestima su činile dva lokalna EM senzora brzine u toku, „Ajkulino krilo“. Ovi senzori su instalirani na zidovima tunela, na polovini visine tunela, odnosno na polovini odstojanja između desnog (A) i levog (B) para podsistema velikih ravnih EM senzora (Slika 6.9).

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. Konačno EM „Ajkulino krilo“, za razliku od ravnih EM senzora ne integriše polje brzine u pravcu najvećih gradijenata.

Brzina dobijena pomoću EM sonde „Ajkulino krilo“ koja je postavljena na desni bok tunela je označena sa $V_{kont,A}$, dok je $V_{kont,B}$ brzina izmerena sa sondom na suprotnoj strani tunela. Osrednjavanjem signala sa oba „Ajkulina krila“ dobija se:

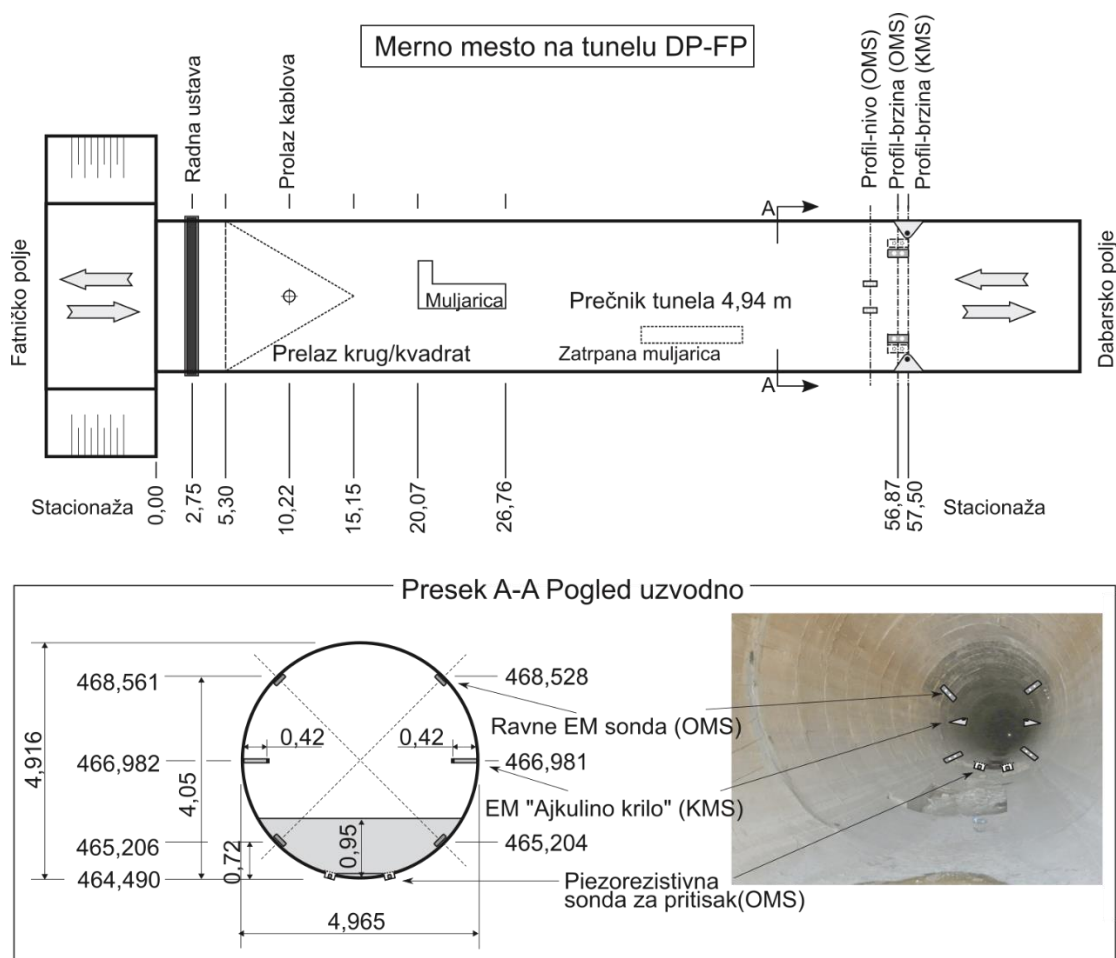
$$V_{kont,mer} = \frac{V_{kont,A} + V_{kont,B}}{2} \quad (6.3)$$

Gde je $V_{kont,mer}$ izmerena brzina pomoću kontrolnog sistema za merenje. Merenje srednje profilske brzine pomoću kontrolnog mernog sistema je svakako tačnije od merenja pomoću osnovnog mernog sistema, ukoliko se ne primene odgovarajuće korekzione funkcije. Međutim, imajući u vidu lokalni karakter merenja $V_{kont,mer}$, neophodno je takođe definisati i posebne korekzione funkcije za ovaj tip senzora. Odgovarajuće korekzione funkcije za određivanje srednje profilske brzine pomoću EM senzora „Ajkulino krilo“ kontrolnog mernog sistema, su takođe dobijene postupkom lokalne kalibracije, na sličan način kao i slučaju velikih ravnih EM senzora. Treba napomenuti da usled konstrukcije „Ajkulino krilo“ i mogućnosti merenja dublje u jezgru toka, očekivane su manje vrednosti i manje varijacije korekcionih funkcija u odnosu na ravne EM senzore.

6.1.2.3 DERIVACIONI TUNEL DABARSKO POLJE – FATNIČKO POLJE

Merno mesto u okviru derivacionog tunela DP – FP je izvedeno neposredno uzvodno od izlazne građevine tunela, koja se nalazi u Fatničkom polju (Jaroslav Černi, Građevinski Fakultet i Svet instrumenata, 2017a). Kako bi se definisala adekvatna mikrolokacija mernog mesta, neophodno je sagledati geometrijske karakteristike u okolini izlazne građevine. Naime na samom izlazu iz tunela javlja se prelaz sa kružnog na pravougoni poprečni presek. Uzvodno od prelaznog dela tunela, u dnu tunela nalaze se dve muljarice, koje mogu da utiču na raspored brzina. Kako bi se izbegli uticaji navedenih detalja, merno mesto je izvedeno oko 57 m uzvodno od izlaza tunela u Fatničko polje (Slika 6.10). Kako

muljarice ne bi remetile tačnost merenja protoka, pri tečenju u povratnom smeru, predloženo je naknadno zatrpavanje.



Slika 6.10 Šematski prikaz izvedenog mernog mesta u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela DP – FP u Fatničkom polju (Razmera za dužinu i prečnik tunela je distordovana).

Pri sprovođenju građevinskih i montažnih radova u okviru ovog mernog mesta, nije došlo do pojave značajnijih odstupanja od projektovanog stanja (Slika 6.10 i Slika 6.11). Donji par ravnih EM senzora je postavljen na visini od 0,72 m, dok je gornji par instaliran na visini od 4,05 m. U toku prvih godina dana eksploatacije, u okviru mernog mesta su privremeno bila instalirana i dva EM senzora brzine u toku „Ajkulino krilo“. Merenja brzine, dubine i konačno protoka pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema, sa ovog mernog mesta, su iskorišćena za verifikaciju postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora. Detaljan opis postupka verifikacije je dat u okviru poglavlja 6.2.

Merni sistem u okviru tunela DP - FP je trenutno u funkciji i kontinualno beleži izmerene podatke sa vremenskim korakom od 2 min. Nivometrijsko merenje protoka se koristi u opsegu dubina od 0 – 0,95 m. Maksimalni zabeleženi protok na ovom profilu, u osnovnom smeru tečenja ka Fatničkom polju, je iznosio oko 40 m³/s. U povratnom smeru tečenja maksimalni zabeleženi protok je iznosio oko 30 m³/s.



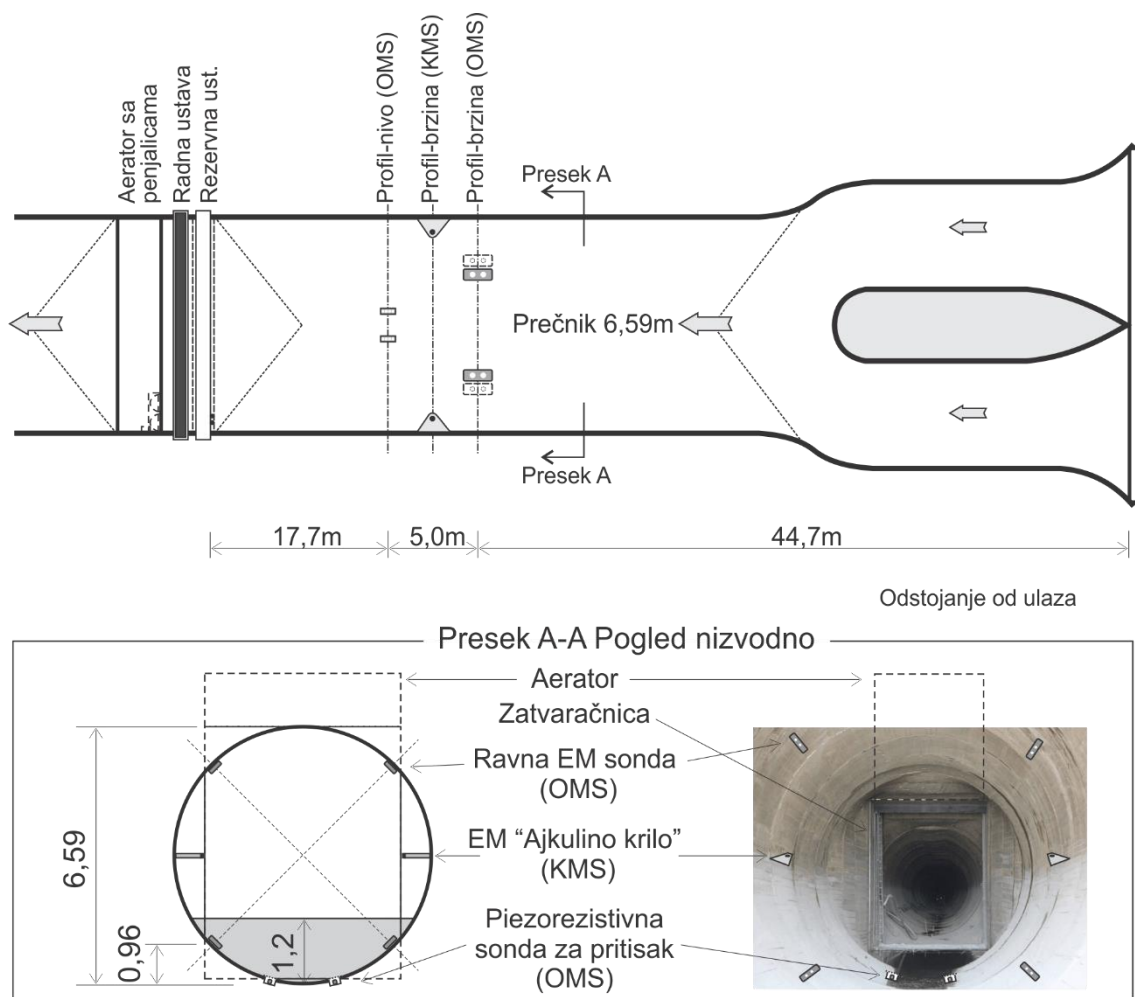
Slika 6.11 Detalji izvedenog mernog mesta u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela DP – FP u Fatničkom polju: Levo) Prelaz sa kružnog na pravougaoni poprečni presek (Pogled ka DP), Desno Gore) Ugrađeni Large Flat DC-2 EM senzor (EM-A2) i Desno Dole) EM senzor brzine u toku „Ajkulino Krilo“(EM kontrolna – A).

6.1.2.4 DERIVACIONI TUNEL FATNIČKO POLJE – BILEĆKA AKUMULACIJA:

MERNO MESTO PAĐENI (ULAZ)

U okviru derivacionog tunela FP – BA izvedena su dva merna mesta: 1.) Merno mesto Pađeni koje se nalazi neposredno nizvodno od ulazne građevine u Fatničkom polju i 2.)

Merno mesto Čepelica koje se nalazi uzvodno od izlazne građevine i brzotoka koji transportuje vodu u Bilećku akumulaciju.



Slika 6.12 Šematski prikaz izvedenog mernog mesta Pađeni u neposrednoj blizini ulazne građevine tunela FP – BA u Fatničkom polju (Razmera za dužinu i prečnik tunela je distordovana).

Pri odabiru mikrolokacije mernog mesta Pađeni, posebna pažnja je posvećena nekolicini specifičnih geometrijskih karakteristika u ovom delu tunela (Jaroslav Černi, Građevinski Fakultet i Svet instrumenata, 2017b). Naime nizvodno od zatvaračnice (Slika 6.12), nakon prelaza iz pravougaonog u kružni presek, kružni segmenti obloge tunela su izvedeni tako da se pojavila značajno smicanje između susednih segmenata. Samim tim, na ovom mestu je očekivana pojava značajnih vrtložnih tragova koji potencijalno da naruše tačnost merenja protoka. Zbog toga merno mesto je izvedeno uzvodno od zatvaračnice. Međutim, ovaj segment tunela je relativno kratak, ukupne dužine od

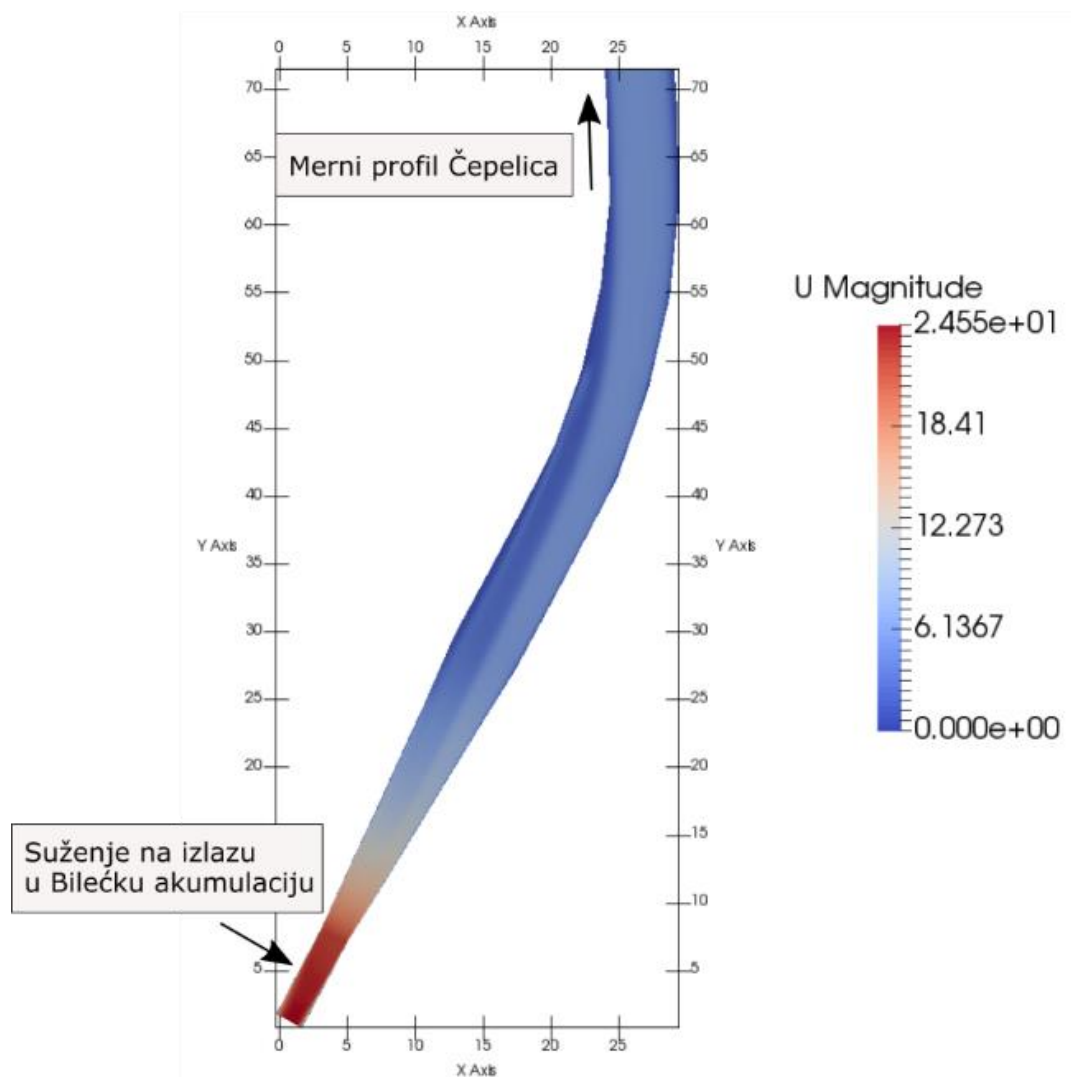
početka razdeonog zida do zatvaračnice, od svega 67,4 m. Kako bi se minimizirao uticaj razdeonog zida, i pritom izbegao uticaj prelaza sa kružnog na pravougoani presek, merno mesto je izvedeno na udaljenosti od 48,5 m od ulaznog profila (Slika 6.12 i Slika 6.13).



Slika 6.13 Detalji izvedenog mernog mesta Pađeni u neposrednoj blizini ulazne građevine tunela FP – BA u Fatničkom polju: Levo) Podsystem Large Flat DC-2 EM senzor (EM-B1 i EM-B2) i EM senzor brzine u toku „Ajkulino Krilo“ (EM kontrolna – B), Desno) Merno mesto tokom montaže.

Pri sprovođenju građevinskih i montažnih radova u okviru ovog mernog mesta, došlo je do pojave odstupanja od projektovanog stanja (Slika 6.13). Donji par ravnih EM senzora je postavljen na visini od 1,61 m, čime je ostvareno odstupanje od projektovane dubine od 0,96 m. Gornji par je instaliran na visini od 4,94 m, opet odstupajući od originalno projektovane visine od 5,63 m. U toku prvih godina dana eksploatacije, u okviru mernog mesta su privremeno bila instalirana i dva EM senzora brzine u toku „Ajkulino krilo“.

Merni sistem u okviru profila „Pađeni“ je trenutno u funkciji i kontinualno beleži izmerene podatke sa vremenskim korakom od 2 min. Zbog odstupanja u visini ugradnje donjeg para ravnih EM senzora, nivometrijsko merenje protoka se koristi u nešto većem opsegu dubina 0 – 1,8 m. Maksimalni zabeleženi protok na ovom profilu je iznosio oko $105 \text{ m}^3/\text{s}$.

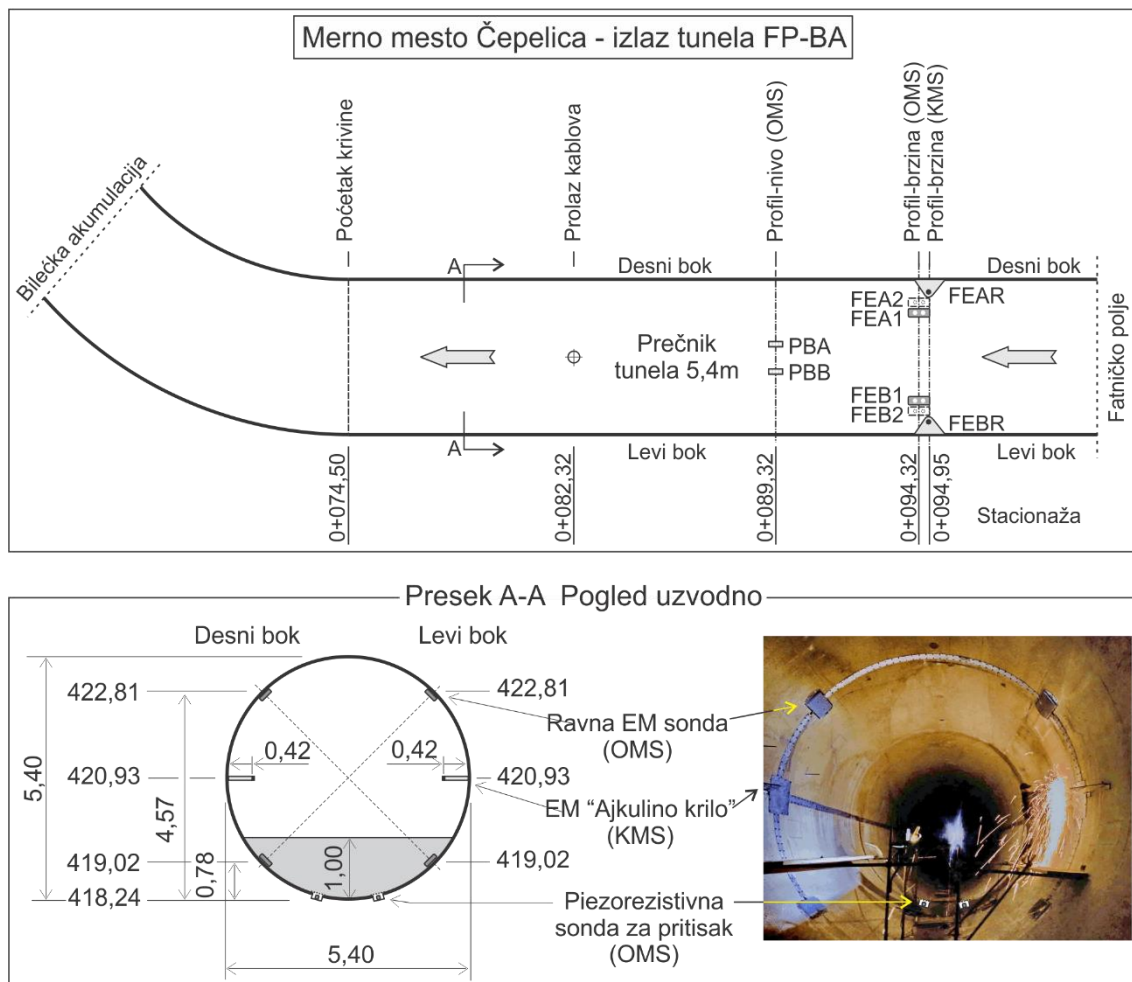


Slika 6.14 Uticaj krivine na raspored brzina nizvodno od mernog mesta Čepelica, u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela FP – BA u Bilećkom polju.

6.1.2.5 DERIVACIONI TUNEL FATNIČKO POLJE – BILEĆKA AKUMULACIJA: MERNO MESTO ČEPELICA (IZLAZ)

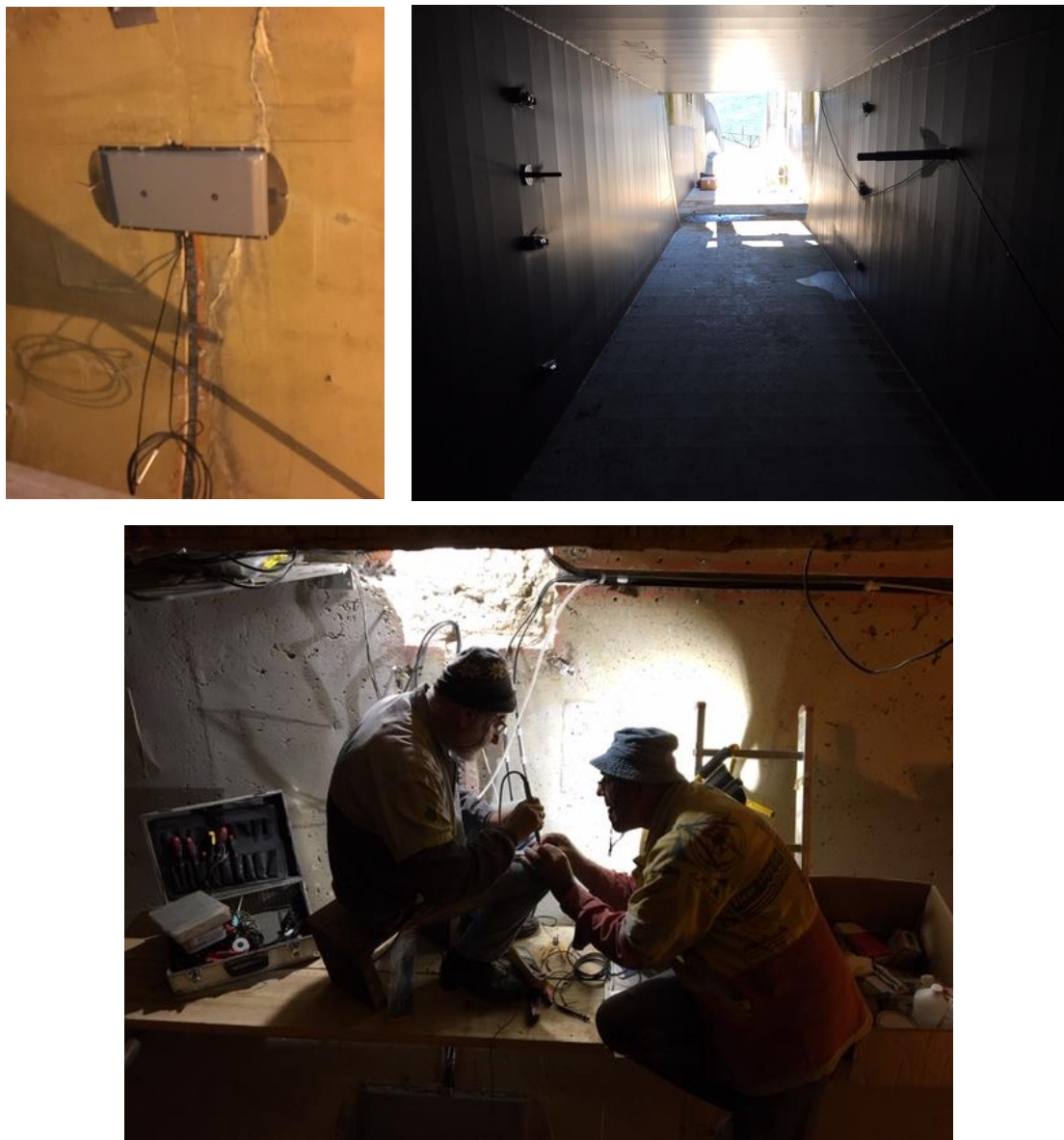
Mikrolokacija mernog mesta Čepelica se nalazi na većoj udaljenosti od izlaza tunela (ili ulaza), u odnosu na prethodna dva merna mesta (Jaroslav Černi, Građevinski Fakultet i Svet instrumenata, 2018). Naime u horizontalnoj ravni, može se uočiti da na samom kraju derivacionog tunela FP – BA, uzvodno od suženja, postoji krivina (Slika 6.14). Uzvodno od krivine postoji prava deonica, sa stabilnom geometrijom, na dužini od približno 50 m. Uzvodno od ove deonice, nalazi se neobložena deonica tunela sa promenljivim, i značajno

većim, poprečnom presekom. Kako bi se minimizirao uticaj zakrivljenosti strujnica (usled skretanja toka – Slika 6.14), kao i prelaza sa neobloženog na obloženi segment tunela, merno mesto je izvedeno na udaljenosti od oko 95 m od nizvodnog izlaznog profila (Slika 6.15 i Slika 6.16).



Slika 6.15 Šematski prikaz izvedenog mernog mesta Čepelica u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela FP – BA u Bilećkom polju (Razmera za dužinu i prečnik tunela je distordovana).

Pri sprovođenju građevinskih i montažnih radova u okviru ovog mernog mesta, nije došlo do pojave značajnih odstupanja od projektovanog stanja (Slika 6.15). Donji par ravnih EM senzora je postavljen na visini od 0,78 m, dok je gornji par instaliran na visini od 4,57 m. U toku prvih godina dana eksploatacije, odnosno trenutno, u okviru mernog mesta su privremeno instalirana i dva EM senzora brzine u toku „Ajkulino krilo“.



Slika 6.16 Detalji izvedenog mernog mesta u neposrednoj blizini izlazne građevine tunela FP – BA u Bilećkom polju: Gore Levo) Ugrađeni Large Flat DC-2 EM senzor (EM-B2), Gore Desno) Oštećena oprema prethodno izvedenog mernog mesta u suženju i Dole) Prevezivanje napojnih i signalnih kablova „Svet instrumenata“.

Merni sistem u okviru profila „Čepelica“ je trenutno u funkciji i kontinualno beleži izmerene podatke sa vremenskim korakom od 2 min. Nivometrijsko merenje protoka se koristi u opsegu dubina od 0 – 1,0 m. Maksimalni zabeleženi protok na ovom profilu je iznosio oko 80 m³/s. Imajući u vidu da je zabeleženo očekivano odstupanje od merenja sa ulaznog profila „Pađeni“, konstatovano je da se značajna količine vode gube u tunelu,

procurivanjem u podzemne kaverne. Detaljniji opis ovog fenomena je dat u poglavlju 6.3.2.

6.2 VERIFIKACIJA POSTUPKA LOKALNE KALIBRACIJE:

PRIMER TUNELA DABARSKO POLJE – FATNIČKO POLJE

Kako bi se obezbedili dodatni podaci o rasporedu brzina u analiziranim derivacionim tunelima, u okviru svih izvedenih sistema za merenje protoka u sistemu HET, privremeno su korišćeni EM senzori brzine u toku, „Ajkulino Krilo“. Na svakom mernom mestu, instalirana su dva EM senzora „Ajkulino Krilo“, čineći privremeni kontrolni merni sistem (KMS) (poglavlje 6.1.2.2). Na ovaj način, u ograničenom periodu vremena, omogućeno je prikupljena više podataka o brzinama u tunelu, pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema, neophodnih za adekvatnu analizu strujne slike u tunelima. U ovom poglavlju je analizirana mogućnost upotrebe izmerenih podataka o brzini tečenja, pomoću OMS-a i KMS-a, za potrebe verifikacije postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora. Za primer je izabran tunel DP-FP, budući da se u njemu pored kombinovanih uslova, javlja i bidirekciono tečenje. Analiziran je rad mernog sistema u okviru derivacionog tunela DP-FP, u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018.

U poglavlju 5.3.4 je predložena generalna procedura za sprovođenje postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora. Jedna od osnova za primenu ovog postupka je poznavanje rasporeda brzina u okviru mernog mesta, za merodavne opsege hidrauličkih uslova. U praksi, retko kad se može pouzdano proceniti raspored brzina, zbog čega je predloženo da se u okviru primene postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora, obezbedi verifikacija dobijenih rezultata odnosno odgovarajućih korekcionih funkcija K . U opštem slučaju, verifikaciju treba sprovesti poređenjem rezultata rada ravnih EM senzora sa rezultatima etalonskog mernog instrumenta. Međutim, u složenim uslovima tečenja kakvi se javljaju u derivacionim tunelima DP – FP i FP – BA, izuzetno je teško obezbediti etalonsko merenje srednje profilske brzine. Umesto toga, za verifikaciju su korišćeni rezultati, dobijeni pomoću EM senzora „Ajkulino krilo“, odnosno KMS-a. Imajući u vidu da ovaj tip senzora dublje prodire u tok vode, opravdano se može pretpostaviti da je odgovarajuća izmerena brzina $V_{kont,mer}$ tačnija procena srednje profilske brzine V , u

odnosu na merenja ravnih EM senzora, odnosno OMS-a, V_{mer} . Kako su princip rada i tehnički parametri ravnih EM senzora i „Ajkulino krilo“ poznati, moguće je postupkom lokalne kalibracije definisati odgovarajuće korekzione funkcije za oba tipa senzora, K i K_{kont} . Odnos korekcionih funkcija ova dva tipa senzora, bi trebao da bude obrnuto proporcionalan odnosu izmerenih brzina, $V_{kont,mer}$ i V_{mer} . Koristeći ovu činjenicu, analizirana je mogućnost verifikacije postupka lokalne kalibracije, upotrebom KMS-a, odnosno EM senzora brzine u toku „Ajkulino krilo“ (Ivetić i saradnici, 2018).

6.2.1 METODOLOGIJA

Osnove metodologije za verifikaciju postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora, korišćenjem kontrolnog mernog sistema, sačinjenog od EM senzora „Ajkulino krilo“, su predstavljene u narednim podpoglavljima.

6.2.1.1 LOKALNA KALIBRACIJA RAVNIH EM SENZORA

Predlog procedure za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora je dat u okviru poglavlja 5.3.4. Delovi ovog postupka se sprovode u okviru prethodnih koraka, procedure za projektovanje sistema za merenje protoka u složenim uslovima.

Prvo, u okviru Globalne (Integralne) analize hidrotehničkog sistema, u ovom slučaju derivacionog tunela DP – FP, procenjeni su maksimalni protoci u osnovnom i povratnom smeru tečenja, 50 i 40 m³/s, respektivno. Zatim, potrebno je za merodavne opsege protoka, proceniti raspored brzina na mernom mestu. Imajući u vidu da se u ovom tunelu u većini vremena, javlja tečenje pod pritiskom (u oba smera), iz analize je izostavljen slučaj tečenja sa slobodnom površinom. Muljarice u dnu tunela DP-FP, u trenutnom stanju, ne utiču značajno na brzine tečenja na samom mernom mestu. Uticaj muljarica na raspored brzina je analiziran upotrebom posebnog postupka (poglavljje 5.3.2.2). Iako je konstatovano da muljarice ne izazivaju posebne poremećaje, rezultati primene ovog postupka su dovedeni u pitanje, o čemu će više reči biti u poglavlju 6.3.1. Na osnovu prethodnih konstatacija zaključeno je da se raspored brzina može adekvatnije proceniti upotrebom opšteg postupka (poglavljje 5.3.2.1), odnosno analitičkih obrazaca za slučaj

tečenja pod pritiskom. Raspored brzina je modeliran uz pomoć tzv. eksponencijalnog zakona za kružni provodnik (Pope, 2008):

$$V_x(z) = V \left(\frac{2z}{D} \right)^{1/n} \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \quad (6.4)$$

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

$$n_1 = 0.5261(\log Re)^2 - 3.853 \log Re + 13.1537 \quad (6.5)$$

$$n_2 = 1 + \sqrt[6]{\frac{Re}{60}} \quad (6.6)$$

Deo proticajnog preseka tunela u kojem je neophodan raspored brzina je ograničen na region uz čvrstu konturu, konkretno na nekih 40 cm od zidova, budući da se u tom regionu nalaze kontrolne zapremine velikih ravnih EM senzora i EM senzora „Ajkulino krilo“.

Za simuliranje odziva ravnih EM senzora $V_{S,mer}$, ali i EM senzora „Ajkulino krilo“ $V_{S,kont,mer}$ korišćen je uprošćeni matematički model, definisan j-nama (5.3) – (5.5). Treba napomenuti da se u slučaju „Ajkulino krilo“ integracija obavlja po pravcu upravnom na liniju koja spaja ova dva senzora, odnosno upravnom na samo telo senzora. U ovom pravcu gradijenti podužne komponente brzine V_x su daleko manji nego u pravcu integraljenja ravnih EM senzora. Praktično, ovaj tip senzora meri brzinu na udaljenosti koja odgovara odstojanju od zida do elektroda senzora. Preduslov za korišćenje uprošćenog modela, je poznavanje tehničkih parametara oba tipa senzora. Za slučaj Large Flat DC-2 EM senzora, kao i „Ajkulino krilo“, tehnički parametri su definisani od strane proizvođača.

Nakon proračuna opsega simuliranih odziva, na osnovu upotrebe različitih analitičkih obrazaca, za ravne EM senzore (OMS), $V_{S,Nik}$ i $V_{S,Pop}$, odnosno „Ajkulino krilo“, $V_{S,kont,Nik}$ i $V_{S,kont,Pop}$, moguće je definisati odgovarajuće korekzione funkcije. Odnos srednje profilske brzine V i simuliranih odziva ravnog EM senzora, $V_{S,Nik}$ i $V_{S,Pop}$, definiše korekzione funkcije K_{Nik} i K_{Pop} . Slično, odnos srednje profilske brzine V i

simuliranih odziva EM senzora „Ajkulino krilo“, $V_{S,kont,Nik}$ i $V_{S,kont,Pop}$, definiše korekzione funkcije $K_{kont,Nik}$ i $K_{kont,Pop}$. Imajući u vidu konstrukciju i položaj i veličinu kontrolnih zapremina korišćenih senzora, očekuje se da vrednosti korekcionih funkcija izvedenih za EM senzore „Ajkulino krilo“, imaju blaži gradijent i manje vrednosti od funkcija izvedenih za ravne EM senzore.

6.2.1.2 ANALIZIRANI PERIOD RADA OSNOVNOG I KONTROLNOG MERNOG SISTEMA

Podaci izmereni pomoću OMS i KMS u okviru tunela DP - FP, korišćeni za verifikaciju postupka lokalne kalibracije, su prikupljeni u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018. Tipično, u ovom periodu dolazi do akumulacije vode u Dabarskom i Fatničkom polju, usled otapanja snežnog pokrivača i pojave prolećnih kiša. Samim tim, usled razlike visinskih kota i nivoa u akumulacijama, dolazi do pojave tečenja u derivacionim tunelima u okviru sistema HET. Za ovaj rad je posebno interesantno bidirekciono tečenje koje se javlja u tunelu DP-FP.

6.2.1.3 VERIFIKACIJA POMOĆU KONTROLNOG MERNOG SISTEMA

Lokalna kalibracija, kao postupak kojim se definišu odgovarajuće korekzione funkcije za korelisanje izmerenih brzina sa srednjom profilskom brzinom V , je sprovedena za Large Flat DC-2 EM senzora (OMS) i EM senzore „Ajkulino krilo“ (KMS). Definisanjem odgovarajućih korekcionih funkcija, K i K_{kont} moguće je proceniti srednju profilsku brzinu V pomoću dva odvojena sistema, OMS i KMS, koristeći sledeću relaciju:

$$V = K \cdot V_{mer} = K_{kont} \cdot V_{kont,mer} \quad (6.7)$$

Pod pretpostavkom da j-na (6.7) važi za ceo merodavan opseg protoka i imajući u vidu da se u periodu rada oba sistema (OMS i KMS) na mernom mestu dobijaju izmerene vrednosti brzine V_{mer} i $V_{kont,mer}$, odnos izmerenih brzina ujedno definiše i recipročan odnos korekcionih funkcija:

$$\frac{K}{K_{kont}} = \frac{V_{kont,mer}}{V_{mer}} \quad (6.8)$$

Verifikacija predloženog postupka lokalne kalibracije korišćenih EM senzora je upravo sprovedena na osnovu gore-prikazane relacije. Na osnovu izmerenih brzina V_{mer} i $V_{kont,mer}$, osrednjenih na časovnom nivou radi eliminacije uticaja fluktuacija, definisan je odgovarajući odnos $V_{kont,mer}/V_{mer}$. Dobijeni odnos izmerenih brzina je upoređen sa sračunatim odnosima korekcionih funkcija K/K_{kont} , dobijenim upotrebom dva različita obrazca (j-ne (6.5) i (6.6) za opisivanje rasporeda brzina pri tečenju pod pritiskom u tunelu DP-FP. Na osnovu pretpostavke da navedeni odnosi trebaju biti jednaki u celom opsegu merodavnih hidrauličkih uslova, iz dobijenih rezultata su izvedeni odgovarajući zaključci. Poređenje navedenih odnosa je vršeno prema vrednosti simulirane ($V_{S,kont}$) i izmerene brzine ($V_{kont,mer}$) pomoću EM senzora „Ajkulino krilo“. Razlog leži u činjenici, da je, usled oblika konstrukcije i principa rada senzora, ovaj podatak smatran najpouzdanijim.

6.2.2 REZULTATI I DISKUSIJA

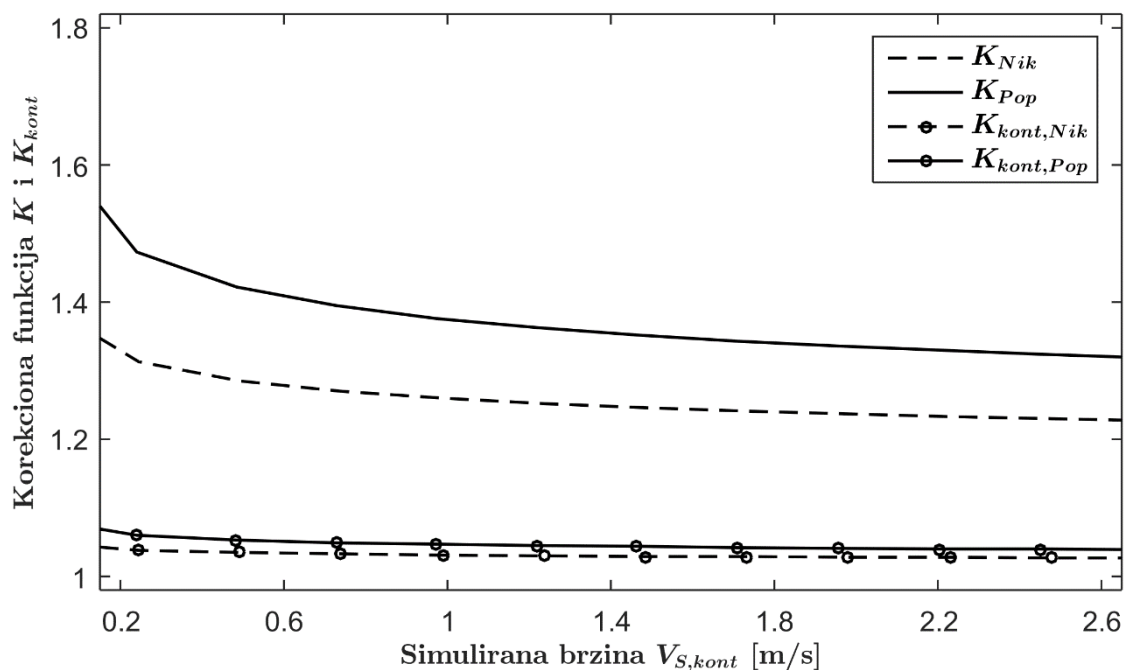
U narednim poglavljima su predstavljeni rezultati postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora i EM senzora „Ajkulino krilo“, kao i analiza podataka izmerenih pomoću OMS i KMS u okviru tunela DP - FP. Konačno predstavljeni su rezultati verifikacije postupka lokalne kalibracije.

6.2.2.1 LOKALNA KALIBRACIJA RAVNIH EM SENZORA

U okviru postupka lokalne kalibracije korišćenih EM senzora, neophodno je bilo proceniti raspored brzina na mernom mestu, primenom analitičkog eksponencijalnog zakona (6.4) sa dva različita obrazca za vrednost samog eksponenta n (j-ne (6.5) i (6.6). Primenom j-ne (6.5). dobijaju se veće vrednosti eksponenta, u odnosu na j-nu (6.6), a samim tim i raspored brzina je „ravnomerniji“. Postupak lokalne kalibracije je sproveden za opseg protoka $Q = 1 - 55 \text{ m}^3/\text{s}$. Dobijeni rezultati u vidu korekcionih funkcija K_{Nik} i K_{Pop} , za slučaj ravnih EM senzora, i $K_{kont,Nik}$ i $K_{kont,Pop}$, za slučaj EM senzora „Ajkulino krilo“, su prikazani u zavisnosti od simulirane vrednosti izmerene brzine pomoću kontrolnog mernog sistema $V_{S,kont}$ (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 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 simulirani odziv „Ajkulinog krila“ može uzeti kao referentna veličina za poređenje korekcionih funkcija.

Koristeći uprošćeni matematički model ravnih EM senzora (5.3) – (5.5), kao i odgovarajuće tehničke parametre Large Flat DC-2 EM senzora i „Ajkulinog krila“, 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 n (j-ne (6.5) i (6.6), za Large Flat DC-2 EM senzor su dobijene dve korekzione funkcije K_{Nik} i K_{Pop} , prikazane na Slici 6.17. Slično, i odgovarajuće korekzione funkcije za EM senzor „Ajkulino krilo“, $K_{kont,Nik}$ i $K_{kont,Pop}$, su prikazane na Slici 6.17.



Slika 6.17 Vrednosti korekcionih funkcija za Large Flat DC-2 EM senzore (OMS) i EM senzore „Ajkulino krilo“ (KMS) dobijene u postupku lokalne kalibracije, za uslove u tunelu DP – FP.

Iz prikazanih rezultata, interesantno je apostrofirati nekoliko značajnih karakteristika. Prvo, uočava se da je gradijent korekcionih funkcija, u analiziranom opsegu brzina, u proseku sedam puta veći za ravne EM senzora nego za „Ajkulina krila“. Razlog leži u činjenici da ravni EM senzori unutar kontrolne zapreminu integrale polje brzine u zidnom

regionu tečenja, u pravcu najvećih gradijenata podužne komponente brzine V_x . Sa druge strane „Ajkulina krila“ mere brzinu na otprilike 0.42 m od čvrste konture, u značajno manjoj kontrolnoj zapremini, u pravcu upravnom na pravac pojave velikih gradijenata V_x .

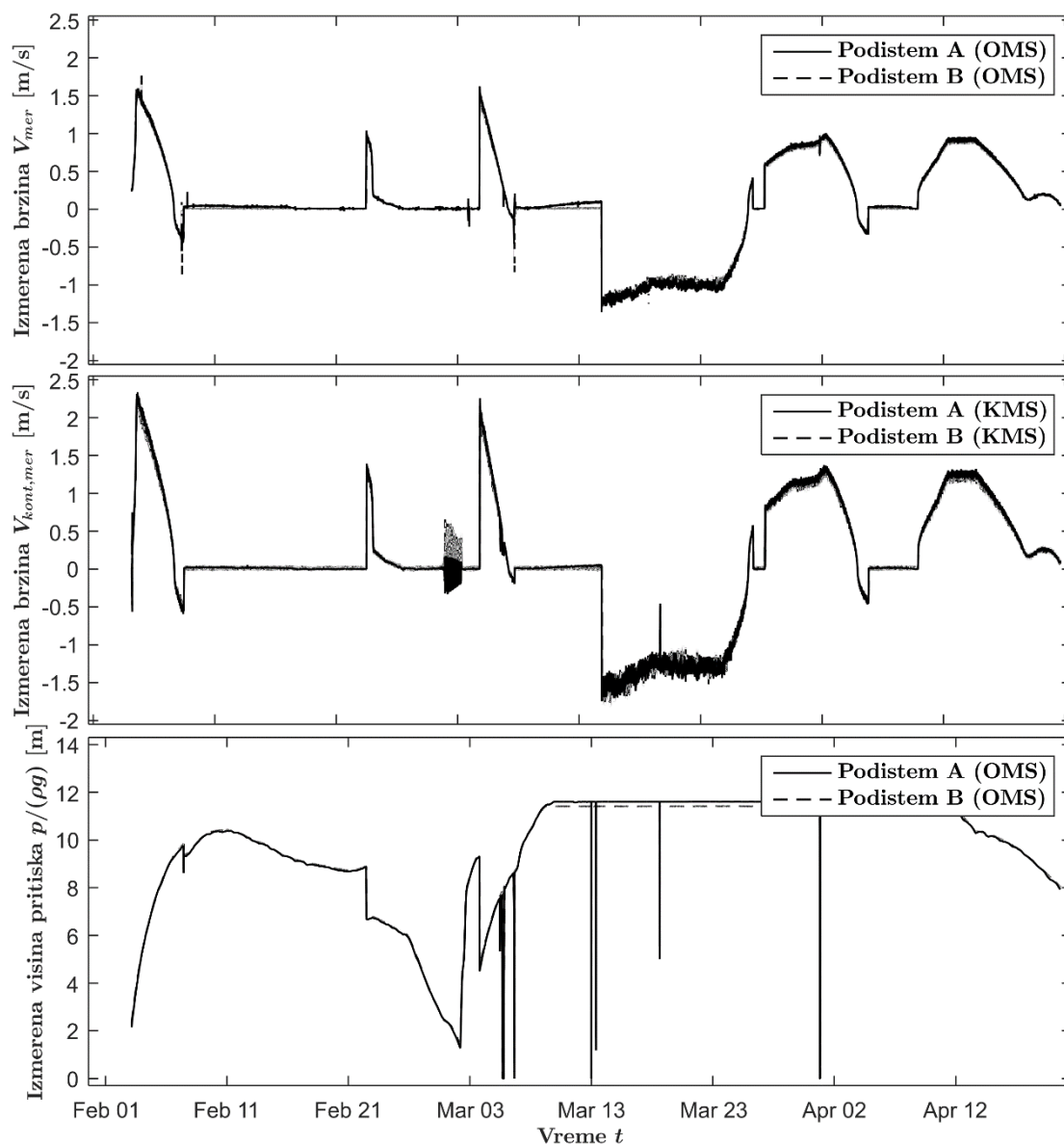
Isti razlog se može pripisati i za pojavu značajne razlike u vrednostima korekcionih funkcija, sračunatih za oba tipa senzora. Svakako, EM senzor „Ajkulino krilo“ meri brzinu koja je približnija srednjoj profilskoj brzini, zbog čega je opravdana upotreba ovog uređaja za verifikaciju postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora. Međutim ne treba zanemariti činjenicu, da je ovde pokazano da vrednosti brzine izmerene pomoću ovog senzora, treba korigovati pomoću odgovarajuće korekcionne funkcije (za 3-8%), kako bi se dobila adekvatna procena srednje profilske brzine V .

Na Slici 6.17 primećuje se i značajno odstupanja između vrednosti korekcionih funkcija, dobijenih pomoću dva različita analitička obrazca za eksponent n (j-ne (6.5) i (6.6)). Budući, da nije moguće unapred poznavati koji analitički obrazac adekvatnije opisuje raspored brzina na proizvoljnom mernom mestu, može se zaključiti da je preporučljivo ispitati više mogućnosti kako bi se dobio što pouzdaniji rezultat lokalne kalibracije. Ukoliko uslovi dozvoljavaju, uputno je proceniti raspored brzina i primenom numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja (poglavlje 5.3.2.2).

6.2.2.2 ANALIZA SNIMLJENIH PODATAKA

U periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018., OMS i KMS su kontinualno beležili podatke o brzinama (V_A i V_B - OMS, $V_{kont,A}$ i $V_{kont,B}$ - KMS) i dubinama (h_A i h_B - OMS) sa vremenskim intervalom od $\Delta t = 2$ min. Izmerene brzine V_A , V_B , $V_{kont,A}$ i $V_{kont,B}$ kao i dubine h_A i h_B , za razmatrani period su prikazane na Slici 6.18. Treba napomenuti da je radni opseg senzora pritiska, približno odgovara visini pritiska od 12 m, što znači da su sve dubine, odnosno visine pritiska veće od 12 m zabeležene sa ovom vrednošću.

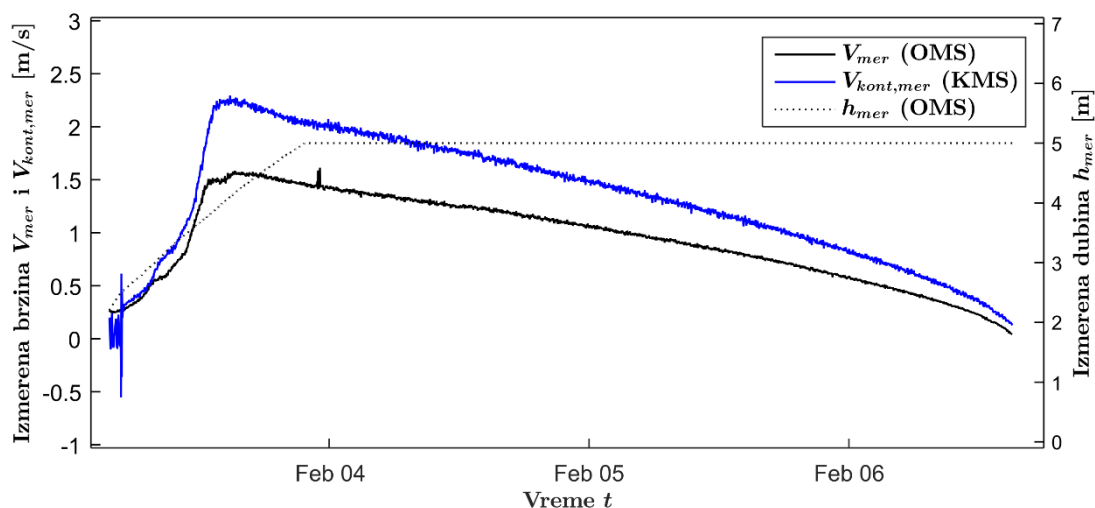
Na prikazanim dijagramima se može uočiti da je u razmatranom periodu zabeleženo pet događaja u kojima je tečenje bilo u osnovnom smeru, ka Fatničkom Polju, i jedan u povratnom smeru, ka Dabarskom polju. Imajući u vidu da se radi o velikoj količini podataka, radi preglednosti, izdvojena su tri karakteristična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



Slika 6.18 Brzine i dubine izmerene pomoću Osnovnog i Kontrolnog Mernog Sistema (OMS i KMS) u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018, na derivacionom tunelu DP-FP.

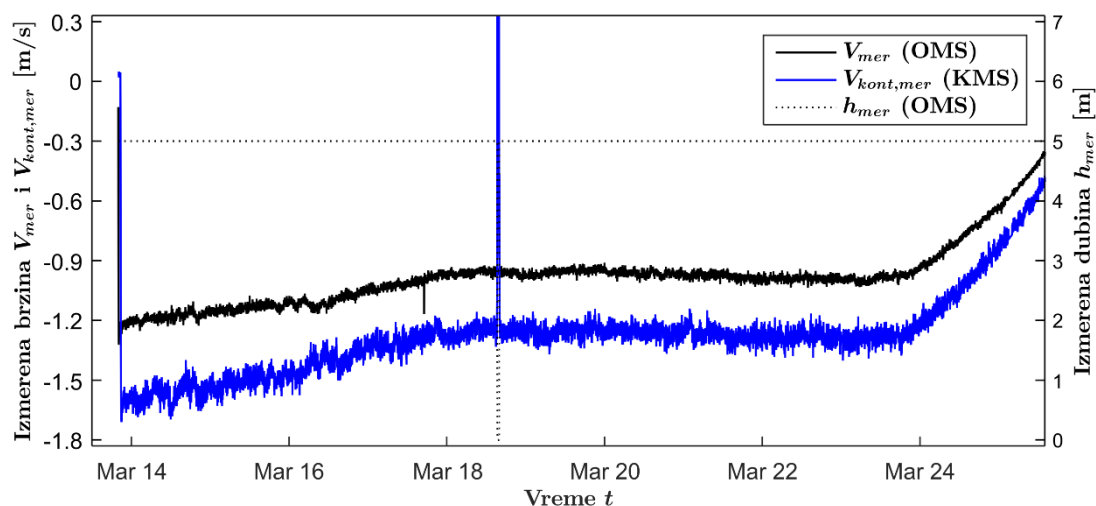
1. *Period 3.2.2018 – 6.2.2018 (Prvi događaj):* u ovom kratkom periodu, merni sistemi su zabeležili značajnu evakuaciju vode iz Dabarskog polja u Fatničko polje. Ovaj događaj je karakterističan po tome što je u njemu zabeležena maksimalna brzina za razmatrani merni period. Maksimalna brzina je dostignuta u periodu od 10 h od početka tečenja, gde je nakon toga u ostatku 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} (6.2). Po sličnom postupku, koristeći $V_{kont,A}$ i $V_{kont,B}$, sračunata je izlazna brzina sa kontrolnog mernog sistema $V_{kont,mer}$ (6.3). Izlazni signali V_{mer} , h_{mer} i $V_{kont,mer}$ za prvi događaj su prikazani na Slici 6.19. Radi preglednosti h_{mer} je ograničeno na 5 m, što odgovara visini tunela, odnosno maksimalnoj dubini.

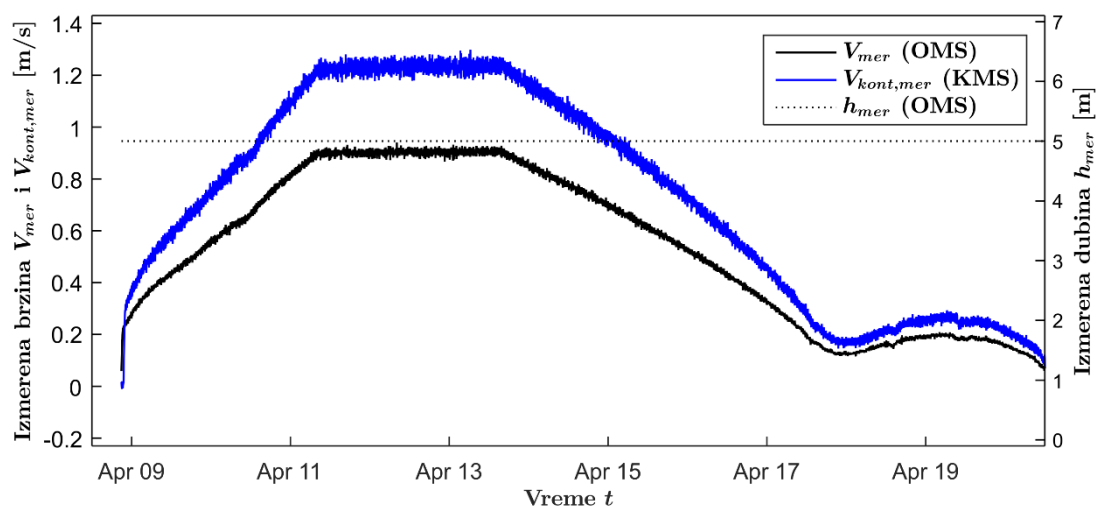


Slika 6.19 Brzine V_{mer} i $V_{kont,mer}$, i dubina h_{mer} zabeležene tokom prvog događaja u periodu od 3.2.2018 do 6.2.2018 korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema (OMS i KMS).

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 povratnom smeru. Takođe, zabeležena je maksimalna negativna brzina za razmatrani merni period. Maksimalna brzina je zabeležena na samom početku, gde je nakon toga, u ostatku vremena, 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 6.20. Radi preglednosti h_{mer} je ograničeno na 5 m što odgovara visini tunela, odnosno maksimalnoj dubini.



Slika 6.20 Brzine V_{mer} i $V_{kont,mer}$, i dubina h_{mer} zabeležene tokom drugog događaja u periodu od 13.3.2018 do 25.3.2018, korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema (OMS i KMS).



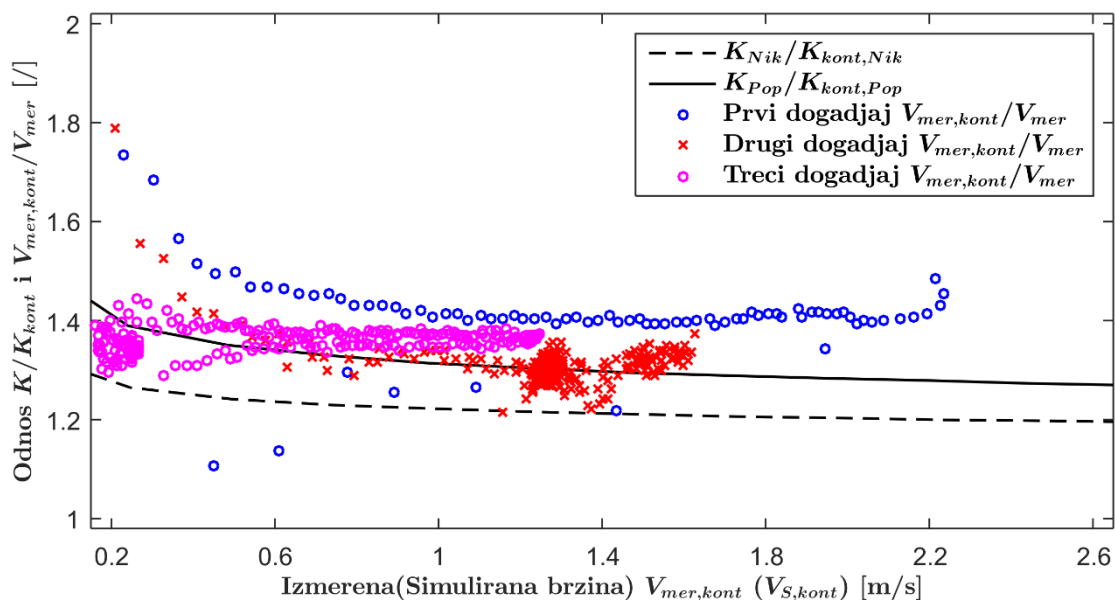
Slika 6.21 Brzine V_{mer} i $V_{kont,mer}$, i dubina h_{mer} zabeležene tokom drugog događaja u periodu od 8.4.2018 do 20.4.2018, korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema (OMS i KMS).

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. 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

6.21. Radi preglednosti h_{mer} je ograničeno na 5 m što odgovara visini tunela, odnosno maksimalnoj dubini.

6.2.2.3 VERIFIKACIJA POMOĆU SNIMLJENIH PODATAKA

Za potrebe verifikacije postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora, 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 mernih sistema (3.2.2018 do 22.4.2018.) 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 ($V_{kont,mer}$).



Slika 6.22 Vrednosti odnosa korekcionih funkcija za ravne EM senzore i EM senzore „Ajkulino krilo“ dobijenih postupkom lokalne kalibracije zajedno sa recipročnim odnosima brzina izmerenih tokom tri karakteristična događaja u tunelu DP – FP.

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, sračunat je odnos izmerenih brzina $V_{kont,mer}/V_{mer}$ čija vrednost treba da odgovara recipročnoj vrednosti odnosa korekcionih funkcija K/K_{kont} (j-na (6.8)). Dobijeni rezultati su prikazani na Slici 6.22. Na isti dijagram, nanoseni su i rezultujući odnosi korekcionih funkcija za osnovni i kontrolni merni sistem

$K_{Nik}/K_{kont,Nik}$ i $K_{Pop}/K_{kont,Pop}$, dobijeni preko postupka lokalne kalibracije, korišćenjem dva različita obrazca sa analitički raspored brzina, j-ne (6.4) i (6.5) i j-ne (6.4) i (6.5) respektivno.

Vizualnim poređenjem rezultata, dobijenih pomoću dva potpuno nezavisna postupka, može se doći do nekoliko interesantnih zaključaka. Prvo, ukoliko se posmatraju sami zabeleženi događaji, može se uočiti da vrednosti odnosa izmerenih brzina $V_{kont,mer}/V_{mer}$ 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. Ravni EM senzori, koji integrale brzine u zidnom regionu, su 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 izmerenih brzina $V_{kont,mer}/V_{mer}$ 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.

Ukoliko se analiziraju samo rezultati lokalne kalibracije, može se uočiti da je trend dobijen primenom dva različita analitička obrazca, skoro identičan. Pri minimalnoj brzini (min. Reynoldsov broj), odnos korekcionih funkcija $K_{Nik}/K_{kont,Nik}$ i $K_{Pop}/K_{kont,Pop}$ 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. Prosečna vrednost odnosa korekcionih funkcija za Nikuradzeov (6.5) obrazac iznosi 1.22, dok za drugi analitički obrazac (6.6) ona iznosi 1.31. U poređenju sa odnosom izmerenih brzina, $V_{kont,mer}/V_{mer}$, odnosi korekcionih funkcija dobijenih putem lokalne kalibracije imaju niže vrednosti. Pretpostavlja se da je jedan od razloga za ovo odstupanje, neadekvatno definisana težinska funkcija w Large

Flat DC-2 EM senzora (procenjena na osnovu merenja B_y). Iako je u poglavlju 5.2.2.4, ustanovljeno da postoji jasna funkcionalna zavisnost između w i B_y , preko j (gustine virtualne struje), dalja istraživanja su neophodna kako bi se adekvatnije sagledala i modelirala funkcija j . Drugi razlog može biti precenjenost brzina u graničnom sloju toka, dobijena upotrebom analitičkih obrazaca za opisivanje rasporeda brzina. Kombinacija ova dva uticaja je dovela do toga da su simulirani odziv OMS-a bili precenjeni, što je dalje dovelo do nešto nižih vrednosti odgovarajućih korekcionih funkcija K_{Nik} i K_{Pop} .

U direktnom poređenju rezultata dva nezavisna postupka, treba imati na umu da su unutar lokalne kalibracije implicitno pretpostavljeni ustaljeni uslovi tečenja, dok se na terenu zapravo javljaju neustaljeni uslovi tečenja. Međutim, opšti trendovi, dobijenih preko jednog i drugog postupka, su dosta slični. Poređenjem prosečnih vrednosti korekcionih funkcija, može se zaključiti da je bolje slaganje između između izmerenih vrednosti i rezultata lokalne kalibracije dobijene primenom j -na (6.4) i (6.5) za opisivanje rasporeda brzina. Nikuradzeov analitički obrazac (j -na (6.5) opisuje profil brzina ravnomernijim rasporedom nego j -na (6.6), što usled hrapavosti obloge tunela i pojave neustaljenosti, ne odgovara stvarnim uslovima.

6.2.3 ZAKLJUČCI

U ovom poglavlju je analizirana mogućnost verifikacije postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora, upotrebom kontrolnog mernog sistema sačinjenog od EM senzora brzine u toku „Ajkulino krilo“. Koristeći činjenicu da odnos brzina izmerenih tokom eksploatacije OMS-a i KMS-a, $V_{kont,mer}/V_{mer}$, treba da bude jednak recipročnom odnosu odgovarajućih korekcionih funkcija K/K_{kont} , ispitana je opravdanost primene postupka lokalne kalibracije za definisanje odgovarajuće korelacije između izmerene brzine V_{mer} i srednje profilske brzine V . Analiziran je period rada OMS-a i KMS-a, izvedenih u okviru tunela DP-FP, od 3.2.2018 do 22.4.2018. Na osnovu prikazanih rezultata, izvedeno je nekoliko opštih zaključaka koji imaju praktični značaj za buduća istraživanja, ali i primenu EM senzora u složenim uslovima strujanja:

- 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. U rezultatima je uočeno da u periodima porasta protoka, mere veću brzinu, dok pri opadanju protoka, mere manju brzinu od one koja bi odgovarala slučaju ustaljenog tečenja. Dodatna istraživanja su neophodna kako bi se detaljnije opisao uticaj neustaljenosti toka na merenja brzine pomoću ravnih EM senzora V_{mer} .
- 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. Međutim, usled izbačene i osetljivije konstrukcije „Ajkulino krilo“, ovi uređaji su manje otporni na fizička oštećenja od ravnih EM senzora (opasnost od leda, plutajućeg otpada i prolaska teške mehanizacije). Zbog toga oni nisu korišćeni u okviru stalnog osnovnog mernog sistema, već kao privremena podrška u postupku lokalne kalibracije ravnih EM senzora.
- Primenom postupka lokalne kalibracije moguće je definisati vrednosti korekcionih funkcija za Ravne EM senzore, kojima se izmerena brzina V_{mer} dovodi u vezu za srednjom profilskom brzinom V . Treba imati u vidu da ovim postupkom nije moguće kvantifikovati uticaj neustaljenosti tečenja na pokazivanje ravnih EM senzora.
- Lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora je moguće verifikovati pomoću kontrolnog mernog sistema, sačinjenog od EM senzora „Ajkulino krilo“. U poređenju sa izmerenim vrednostima, korekzione funkcije dobijene postupkom lokalne kalibracije su pokazale zadovoljavajuće slaganje.
- Kalibracijom isključivo pomoću kontrolnog mernog sistema, moguće je definisati odgovarajuću relaciju kojom se za lokalne geometrijski i hidraulički uslove, merenja brzine pomoću ravnih EM senzora V_{mer} mogu korigovati do nivoa tačnosti koji se dobija primenom KMS-a, odnosno EM senzora „Ajkulino krilo“ $V_{kont,mer}$.

Imajući u vidu da se postupkom lokalne kalibracije ne mogu obračunati efekti neustaljenosti na merenja brzine pomoću ravnih EM senzora, dok se sa druge strane kalibracijom preko 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:

$$V = \overbrace{K_{kont,Pop}}^{\text{Lokalna kal.}} \cdot \overbrace{K/K_{kont}}^{\text{Kal. kont. merni sistem}} \cdot V_{mer} \quad (6.9)$$

Konačna agregirana korekciona funkcija bi zapravo bila proizvod korekcione funkcije za „Ajkulino krilo“ dobijene pomoću lokalne kalibracije i odnosa korekcionih funkcija dobijenih na osnovu merenja pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema. Upotrebom predloženog postupka, tačnost izmerene srednje profilske brzine se može dovesti do nivoa od oko 5%. Bez upotrebe kontrolnog mernog sistema, tačnost izmerene srednje profilske brzine je nešto niža, reda veličine 5 – 10%. Prikazana analiza je fokusirana na neodređenost korelacije između izmerene brzine V_{mer} i srednje profilske brzine V . Ovde treba napomenuti da u okviru neodređenosti izmerene srednje profilske brzine V treba uvrstiti i neodređenost koja potiče od radnih karakteristika ravnih EM senzora (poglavlje 4.1). Konačno na neodređenost izmerenog protoka Q pored srednje profilske brzine V , utiče i neodređenost procenjene površine proticajnog preseka A preko izmerene dubine h .

6.3 DODATNI ASPEKTI PRIMENE PREDLOŽENE

METODOLOGIJE

Terenska ispitivanja rada ravnih EM senzora, kao i primena predložene metodologije za lokalnu kalibraciju EM senzora u okviru mernih sistema izvedenih na derivacionim tunelima sistema HET, su doprineli boljem sagledavanju problematike merenja protoka u složenim uslovima strujanja. Pored toga, otvorena su nova naučna pitanja koja će poslužiti za definisanje pravaca budućih istraživanja. Konačno, iako su ovi sistemi

relativno kratko u funkciji, dobijeni rezultati su praktično već opravdali uloženu investiciju.

U okviru ovog poglavlja, fokus je stavljen na pojedine interesantne aspekte primene predložene metodologije za merenje protoka u složenim uslovima tečenja. Prvi se bavi problemom ostvarivanja numeričkih simulacija turbulentnog tečenja pri velikim Reynoldsovim brojevima, kakvi se javljaju u tunelima DP – FP i FP – BA (poglavljje 6.3.1). Iako same numeričke simulacije turbulentnog tečenja predstavljaju vredan alat u hidrotehničkim analizama, i u ovim istraživanjima su korišćeni kao podrška u proceni rasporeda brzina, ovde je prikazana „druga strana medalje“. Drugi predstavlja sažetak analize koja je motivisana dobijenim rezultatima merenja protoka na ulaznom i izlaznom profilu, derivacionog tunela FP – BA (poglavljje 6.3.2). Naime, jedan od pristupa za proveru tačnosti rada sistema za merenje protoka je poređenje trenutno izmerenih vrednosti na ulazu i izlazu određenog hidrotehničkog provodnika (tzv. bilansna metoda). Praćenjem bilansa na u okviru derivacionog tunela FP – BA, uočen je značajan gubitak vode u tunelu, kroz razliku u protocima na ulaznom i izlaznom profilu, zbog čega je sproveden dodatan terenski eksperiment pražnjenja tunela kako bi se procenile lokacije problematičnih odvoda.

6.3.1 NUMERIČKE SIMULACIJE TURBULENTNOG TEČENJA PRI VELIKIM REYNOLDSOVIM BROJEVIMA

U okviru konceptualnog opisa osnovnih mernih sistema (poglavljje 6.1.2.1), navedeno je da je u okviru postupka lokalne kalibracije raspored brzina definisan kombinacijom opšteg postupka, odnosno primene analitičkih obrazaca, i posebnog postupka, odnosno primene numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja.

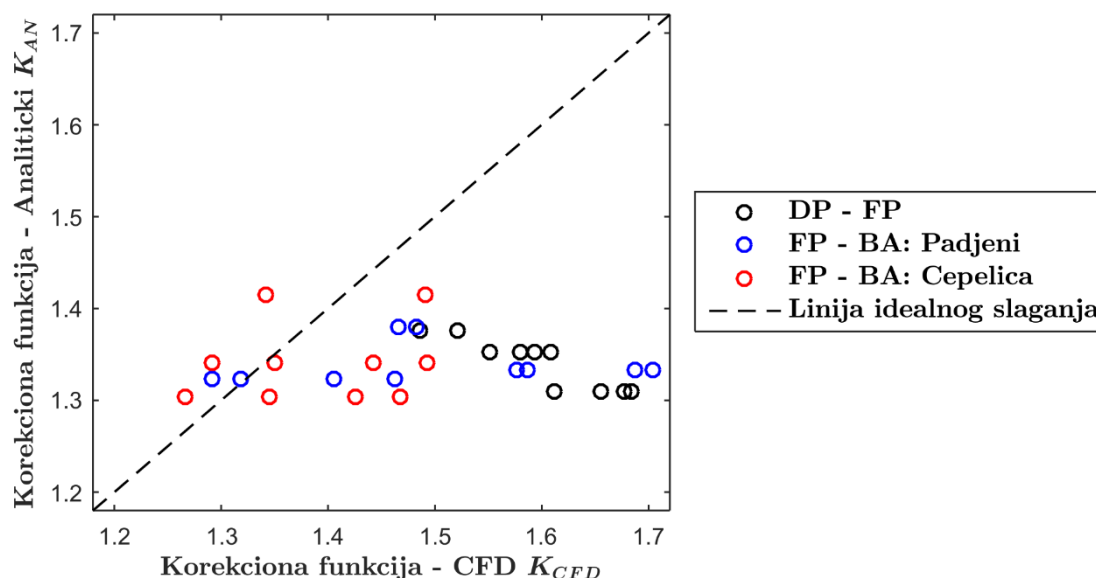
Numeričke simulacije prostornog tečenja u okolini izvedenih mernih mesta, su sprovedene pomoću programskog paketa OpenFOAM (Weller i ostali, 1996). Prostorni raspored brzina je definisan za nekoliko protoka u okviru svakog izvedenog mernog mesta. U svim simulacijama, izdvojen je segment tunela u okolini mernog mesta, prosečne dužine 100 m koji je predstavljao prostorni domen analize. Na uzvodnom preseku implementiran je granični uslov u vidu rasporeda brzina, dok je na nizvodnom

preseku zadat granični uslov konstantnog pritiska. Korišćeni su modeli turbulencije koji se zasnivaju na primeni Rejnoldsovih jednačina i vrtložne viskoznosti. Konkretno ispitana su dva najpopularnija modela turbulencije: tzv. „ostvarljivi“ $k - \varepsilon$ model (Shih i ostali, 1995) kao i $k - \omega$ transport smičućih napona (eng. Shear Stress Transport – SST) (Menter, 1994). Granični uslovi u vidu dubina i srednje profilske brzine, su definisani upotrebom linijskih ustaljenih modela tečenja sa slobodnom površinom ili pod pritiskom. Za simuliranje tečenja sa slobodnom površinom, uticaj slobodne površine je modeliran uz pomoć „Tvrđog poklopca“ (eng. Rigid Lid). Isključivo su ispitivani slučajevi ustaljenog tečenja.

Originalni koncept primene postupka lokalne kalibracije se oslanjao na primenu numeričkih simulacija za dobijanje potrebnih podataka o rasporedu brzina (Ivetić i saradnici, 2017). Međutim tokom rada otkriveno je nekoliko problema, koji otežavaju adekvatnu primenu ovog alata u okviru postupka lokalne kalibracije. U finalnoj formi, rezultati numeričkih simulacija su korišćeni uglavnom za procenu asimetričnosti u rasporedu brzina. Ključni problemi u primeni numeričkih simulacija su navedeni u nastavku:

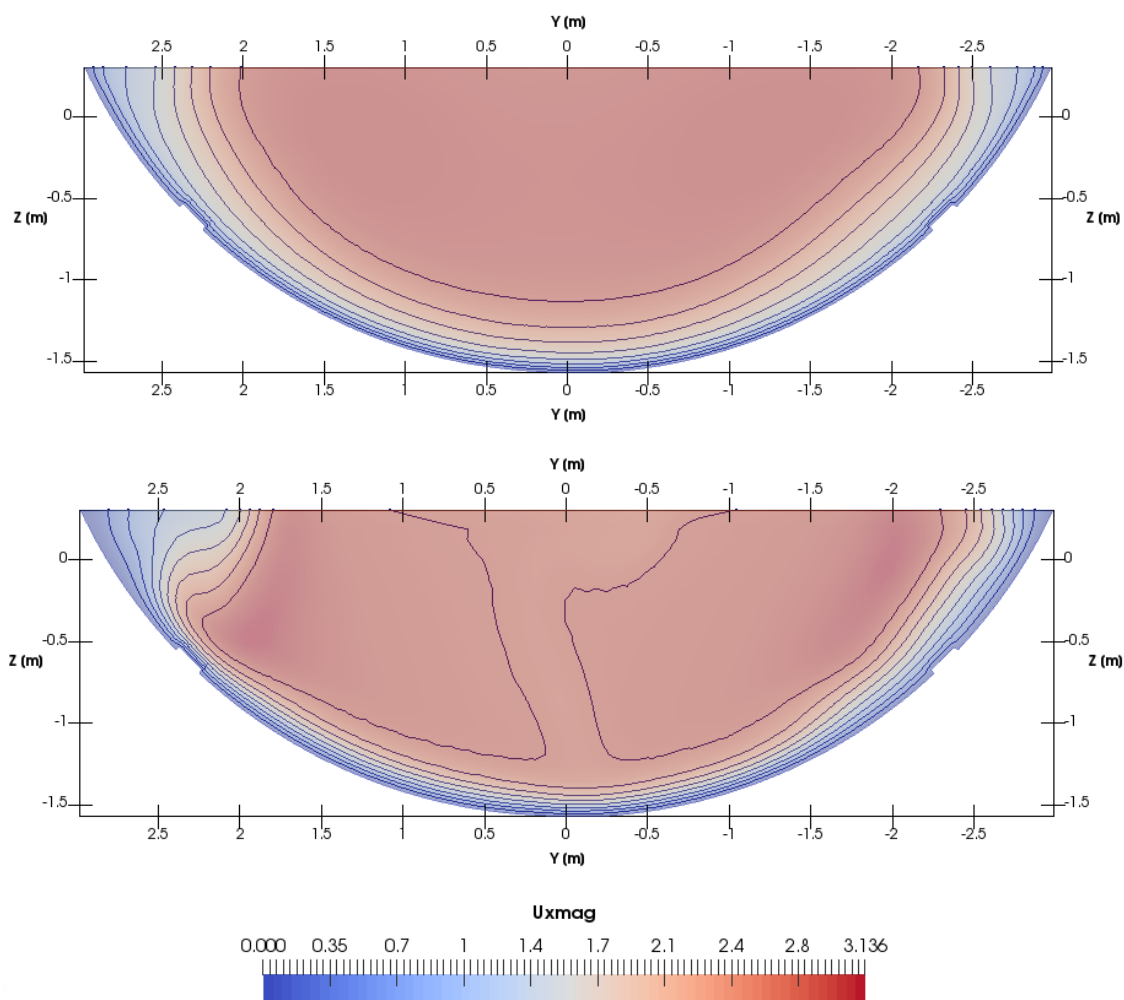
- *Visoki Rejnoldsovi brojevi* – dominantan problem u slučaju derivacionih tunela DP – FP i FP – BA, predstavljaju visoki Rejnoldsovi brojevi koji se javljaju u eksploatacionim uslovima. Naime, u analiziranim slučajevima, minimalni Rejnoldsov broj je iznosio 5.092.958 (protok od 20 m³/s u tunelu DP – FP) dok je maksimalni iznosio 20.567.715 (protok od 105 m³/s u tunelu FP – BA na profilu Pađeni). Da bi se obezbedila konvergencija numeričke simulacije, neophodno je definisati odgovarajuću računsku mrežu, gde je veličina računskih ćelija obrnuto proporcionalna vrednosti Rejnoldsovog broja (Wilcox, 1998). Primera radi, da bi se sprovela simulacija strujanja u svim slojevima ($y^+ = 1$ na granici), neophodno je obezbediti visinu ćelija na čvrstoj granici od 0.03 mm (za minimalan Rejnoldsov broj) do 0.01 mm (za maksimalan Rejnoldsov broj). Ukoliko se pak sprovodi simulacija sa upotrebom zidnih funkcija ($y^+ = 100$ na granici), visina ćelija je nešto veća i varira između 3 i 1 mm. Međutim, ako se uzme u obzir veličina prostornog domena, dolazi se do zaključka da adekvatna računaska mreža treba da se sastoji od nekoliko desetina, ili čak stotina, miliona ćelija. Za

definisanje ovakvih mreža kao i sprovođenje numeričkih simulacija potrebni su izuzetni računarski kapaciteti. U sprovedenim simulacijama, minimalan broj računskih ćelija je bio 4.000.000 dok je maksimalan bio 18.000.000.



Slika 6.23 Poređenje vrednosti korekcionih funkcija za ravne EM senzore dobijenih primenom numeričkih simulacija (CFD) i analitičkih obrazaca za opisivanje rasporeda brzina u derivacionim tunelima DP-FP i FP-BA.

Kao posledica ove činjenice, validnost dobijenih rezultata, pogotovo u graničnom sloju, je diskutabilna. Radi ilustracije disperzije rezultata, na Slici 6.23 je prikazano poređenje između vrednosti korekcionih funkcija dobijenih uz pomoć numeričkih simulacija K_{CFD} i vrednosti dobijenih primenom analitičkih obrazaca za opisivanje rasporeda brzina, K_{AN} . Može se uočiti da za iste uslove tečenja, K_{CFD} u proseku ima 25 % veće vrednosti od K_{AN} . Imajući u vidu rezultate prikazane u okviru poglavlja 6.2, prilikom sprovođenja postupka lokalne kalibracije pretpostavilo se da se veća pouzdanost može obezbediti primenom K_{AN} . Ukoliko se uzme u obzir da je prosečno računarsko vreme za sprovođenje simulacije ustaljenog tečenja, na 12 jezgara Intel Xeon procesora, iznosilo oko 6 sati, može se zaključiti da je primena numeričkih simulacija za potrebe simuliranja prostornog turbulentnog tečenja sa visokim Rejnoldsovim brojevima, i dalje daleko od široke inženjerske upotrebe.



Slika 6.24 Raspored brzina u mernom profilu Pađeni dobijen primenom numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja: Gore) Rezultati primene „ostvarljivog“ $k - \epsilon$ model turbulencije; Dole) Rezultati primene modela $k - \omega$ transport smičućih napona.

- *Modeliranje tečenja u zavetrini čvrstih granica* - Jedan od standardnih problema u primeni numeričkih simulacija prostornog turbulentnog tečenja je modeliranje vrtložnih fenomena koji se javljaju u zavetrini čvrstih kontura. Ovde, sami fenomeni nisu od interesa, već je fokus na adekvatnom reprezentovanju odgovarajućih efekata na raspored brzina u mernom profilu. U okviru istraživanja, korišćena su dva modela turbulencije, „ostvarljivi“ $k - \epsilon$ model i $k - \omega$ transport smičućih napona. Na Slici 6.24 su prikazani rezultati numeričkih simulacija za protok od $20 \text{ m}^3/\text{s}$ u tunelu FP – BA na profilu Pađeni. Može se uočiti da na gornjoj slici koja odgovara rezultatima dobijenim pomoću „ostvarljivog“ $k - \epsilon$ model,

uticaj razdeonog zida na raspored brzina praktično ne postoji. Sa druge strane, model $k - \omega$ transport smičućih napona prikazuje značajan uticaj razdeonog zida.

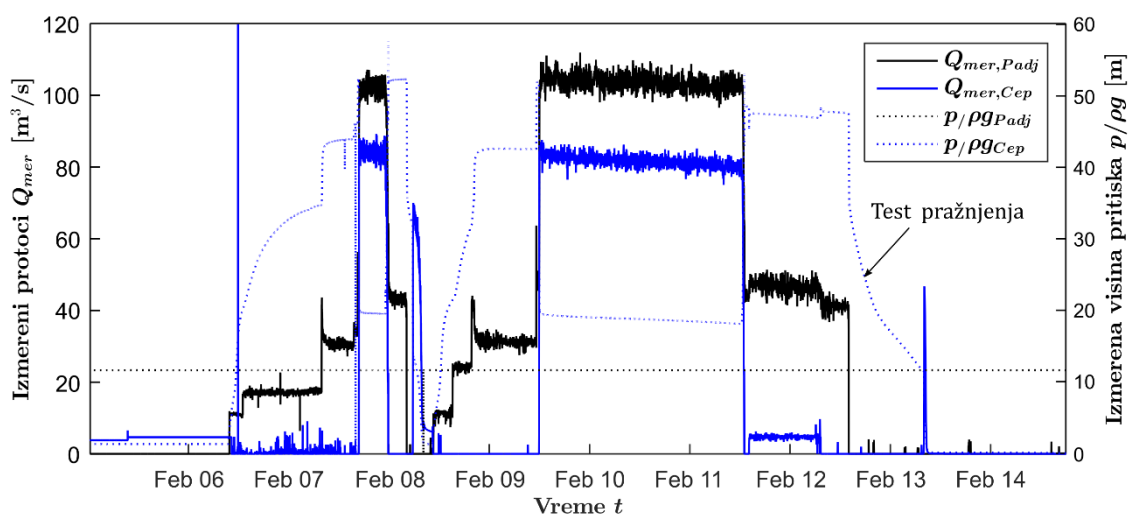
Navedeni negativni aspekti primene numeričkih simulacija turbulentnog tečenja svakako ne umanjuju vrednost ovog alata. Ključan aspekt primene CFD-a je kalibracija samog numeričkog modela, dok je ovde analizirana mogućnost kalibracije mernih instrumenata, posredno preko CFD-a. Imajući u vidu princip rada ravnih EM senzora, a i „Ajkulino krilo“, postoji potencijal da se zapravo u periodu rada i osnovnog i kontrolnog mernog sistema, kalibriše sam numerički model koji bi se kasnije tokom eksploatacije koristio kao podrška osnovnom mernom sistemu. Svakako, treba razmotriti ovu mogućnost u okviru budućih istraživanja.

6.3.2 PROCURIVANJE VODE IZ DERIVACIONOG TUNELA FATNIČKO POLJE – BILEĆKA AKUMULACIJA

U toku gradnje derivacionog tunela FP - BA, u kišnim periodima, registrovan je doticaj iz stenskog masiva duž tunela. Ovo je posledica izražene karstifikacije terena, zbog čega se značajne količine vode dreniraju iz brdskog masiva u sam tunel. Na osnovu toga, procenjeno je da i prilikom tečenja u tunelu (pod pritiskom), određena količina vode procuruje u brdski masiv i gubi se iz tunela. Količine vode koje se dreniraju u tunel ili procuruju iz njega, su bile nepoznate pre instaliranja mernih sistema na profilima Pađeni i Čepelica.

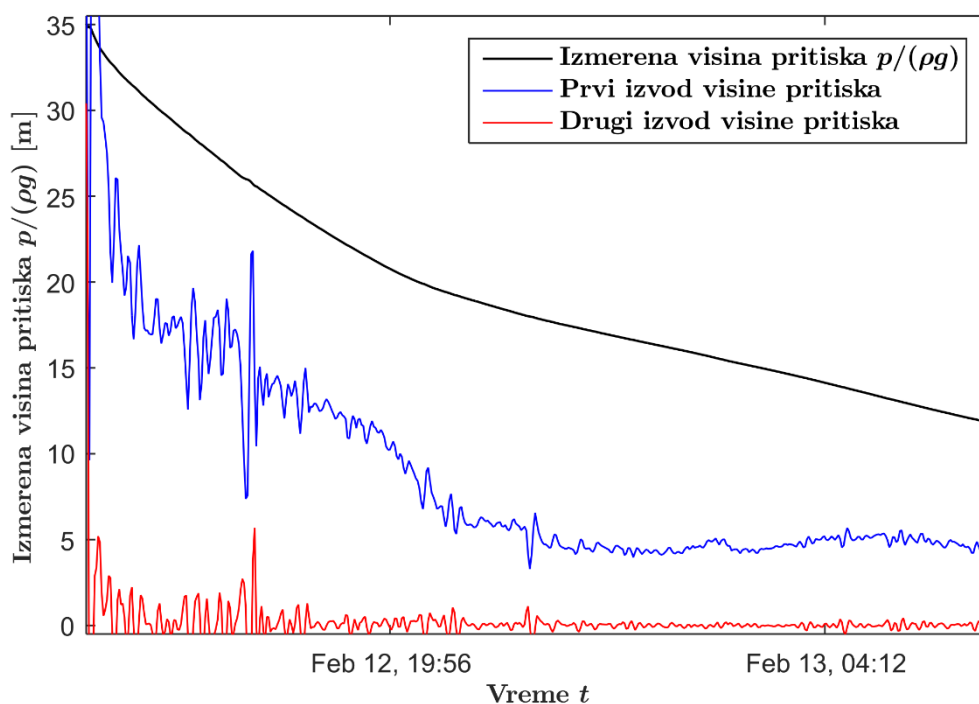
Kako bi se procenila navedene količine vode, a ujedno i proverila pouzdanost izvedenih sistema, praćen je bilans vode u samom tunelu pomoću izmerenih podataka o protoku. Podaci zabeleženi tokom dosadašnjeg perioda eksploatacije izvedenih mernih sistema, na ulaznom profilu Pađeni (poglavlje 6.1.2.4) i na izlaznom profilu Čepelica (poglavlje 6.1.2.5), su ukazali na neočekivano značajna odstupanja u izmerenim protocima (Slika 6.25). Naime, za isti merni period na ulaznom profilu Pađeni zabeležen je maksimalni protok od $105 \text{ m}^3/\text{s}$ i visina pritiska od 11,6 m, dok je na izlaznom profilu Čepelica izmeren maksimalni protok od $80 \text{ m}^3/\text{s}$ i visina pritiska od 18,3 m (razlika protoka $25 \text{ m}^3/\text{s}$). U periodima kada je izlazna ustava bila pritvorena, zabeležena je razlika protoka od čak $38 \text{ m}^3/\text{s}$. Međutim, pritvaranjem nizvodne ustave podignut je pritisak na većem

delu tunela, tako da je na profilu Čepelica zabeležena visina pritiska 46 m. Na osnovu izmerenih podataka, konstatovano je da se u samom tunelu javlja značajan gubitak vode, proporcionalan visina pritiska izmerenoj na nizvodnom profilu $p/\rho g_{Cep}$. Može se pokazati da gubici vode ΔQ (razlike izmerenih protoka) rastu sa eksponentom u odnosu na porast $p/\rho g_{Cep}$. Gubitak vode je takođe posledica karstifikacije terena, gde se u okviru neobloženih segmenata tunela omogućava oticaj vode u podzemne kaverne kroz otvore u zidovima tunela.



Slika 6.25 Protoci i visine pritiska izmereni na ulazu (Pađeni) i izlazu (Čepelica) derivacionog tunela FP – BA, u periodu od 5.2.2019 do 14.2.2019.

Imajući u vidu da je ovaj gubitak prema izmerenim podacima dostizao značajnu vrednost od $38 \text{ m}^3/\text{s}$, investitor (HET) je zajedno sa firmom „Svet instrumenata“ sproveo terenski eksperiment kako bi se procenili položaji navedenih otvora, koji predstavljaju odvode unutar samog tunela. U okviru eksperimenta pražnjenja, zatvorena je nizvodna regulaciona ustava tunela FP – BA, kako bi se tunel napunio vodom doteklom iz Fatničkog polja. Kada je tunel bio napunjen, zatvorena je i uzvodna ustava, kako bi se sprečio doticaj dodatnih količina vode u tunel (test pražnjenja je započetom sredinom 12.2. – Slika 6.25). Koristeći pijezeorezistivne senzore pritiska u okviru mernog sistema izvedenog na profilu Čepelica, beležen je pad visine pritiska sa vremenskim korakom od $\Delta t = 2 \text{ min}$. Pad visine pritiska, izmeren tokom testa pražnjenja je posebno prikazan na Slici 6.26.



Slika 6.26 Rezultati terenskog eksperimenta praženjenja derivacionog tunela FP – BA, radi procena položaja otvora u zidovima neobloženih segmenata tunela.

Kako bi se procenila visinska kota na kojoj se nalazi otvori, sračunat je prvi izvod pada visine pritiska. Pomoću prvog izvoda pada visine pritiska omogućava se analiza gradijenta pada visine pritiska. Slično, drugi izvod pada visine pritiska omogućava analizu gradijenta promene visine pritiska. Sračunate vrednosti prvog i drugog izvoda su takođe prikazane na Slici 6.26. Na osnovu dobijenih rezultata konstatovano je da se značajan odvod nalazi na 20 m visine od kote senzora pritiska na profilu Čepelica. Pri ovoj visini pritiska može se uočiti promena karaktera oticanja, kao i značajan pad prvog izvoda visine pritiska. Takođe pri visini pritiska od oko 26 m, zabeležena je oscilacija u karakteru dreniranja tunela. Ova oscilacija je okarakterisana kao posledica dreniranja vode iz tunela u neku podzemnu akumulaciju, i kasnije vraćanje iz akumulacije u sam tunel.

Prikazana analiza ukazuje na praktičan značaj izvedenih mernih mesta u okviru derivacionog tunela FP – BA. Pored detekcije značajnog gubitka vode pomoću izmerene razlike u protocima na ulaznom i izlaznom mernom profilu, merni sistem Čepelice je iskorišćen i za detekciju položaja otvora u neobloženim segmentima tunela.

7 ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Poslednje poglavlje je posvećeno rezimiranju naučnog doprinosa disertacije, odnosno identifikovanju ključnih zaključaka proisteklih iz predstavljenih istraživanja. Takođe, na osnovu dobijenih rezultata i stečenog iskustva, definisane su preporuke za buduća istraživanja na polju primene ravnih EM senzora za određivanje protoka u hidrotehničkim sistemima.

7.1 ZAKLJUČCI

Osnovni cilj ove disertacije je unapređenje metodologije za merenje protoka vode primenom ravnih EM senzora u hidrotehničkim sistemima, u uslovima tečenja sa slobodnom površinom i pod pritiskom. U istraživanjima su korišćeni ravni EM senzori domaćeg proizvođača merne opreme „Svet instrumenata“. Ravni EM senzori se koriste za određivanje srednje profilske brzine V , na osnovu koje se u okviru pristupa $V - A$ računa Q . Ključan doprinos neodređenosti tako sračunatog protoka Q , upravo potiče iz toga što se srednja profilska brzina V ne meri direktno, već se određuje na osnovu neke lokalno izmerene brzine V_{mer} . Neodređenost srednje profilske brzine V ima dve komponente: 1.) neodređenost koja potiče od samog instrumenta i 2.) neodređenost veze između izmerene brzine V_{mer} i srednje profilske brzine V . U slučaju ravnih EM senzora, kontrolna zapremina je značajno manja nego u slučaju konkurentnih ADV senzora, zbog čega je potrebno posebnu pažnju obratiti na 2.) komponentu neodređenosti.

Poseban fokus istraživanja je na slučajevima merenja protoka u složenim uslovima tečenja, gde se javljaju dodatni faktori koji negativno utiču na rad merne opreme i pouzdanost izmerenih podataka. Jedan od primera sistema gde se javljaju složeni uslovi tečenja su kanalizacioni sistemi, gde je pored velike varijacije protoka, specifična i pojava raznog suspendovanog i vučenog nanosa, masti, ulja itd. Poseban izazov u kanalizaciji, predstavlja kontinualno merenje protoka, imajući u vidu česte pojave sedimentacije preko kućišta senzora. Složeni uslovi tečenja se javljaju i u velikim provodnicima, kao i provodnicima sa složenom geometrijom, kakvi se mogu javiti u okviru hidroenergetskih

sistema. Karakterističan problem u ovim slučajevima je određivanje srednje profilske brzine V , na osnovu brzine V_{mer} izmerene u relativnoj maloj, i neretko nereprezentativnoj, kontrolnoj zapremini.

Kako bi se obezbedila adekvatna polazna tačka za poboljšanje pouzdanosti merenja protoka pomoću ravnih EM senzora, u ovom radu su u prvom koraku definisane radne karakteristike senzora, primenom adekvatne metodologije u kontrolisanim uslovima. Naime, konstatovano je da se primenom ISO standarda 3455, za fabričku kalibraciju, unosi greška u proceni tačnosti (sistematske neodređenosti merenja) ravnih EM senzora, budući da se senzor kalibriše u homogenom rasporedu brzina, koji se ne javlja u realnim uslovima uz čvrstu konturu. Zbog toga je sprovedena serija eksperimenata u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu (poglavlje 4.1). Korišćenjem, u osnovi iste, procedure za etaloniranje merne neodređenosti, prethodno primenjene na papučastim ADV sensorima, omogućeno je nepristrasno poređenje radnih karakteristika ova dva tipa mernih uređaja. Tokom eksperimenata, korišćena je minimalna pobudna struja ravnih EM senzore. Na ovaj način, dobijeni su najnepovoljniji rezultati merenja, sa aspekta stabilnosti i ponovljivosti. Uprkos tome, na osnovu dobijenih rezultata, konstatovano je da ravni EM senzori (konkretno model Flat DC-2 EM) poseduju niz prednosti u odnosu na papučaste ADV uređaje. Prvenstveno, pokazano je da mogu da rade u širem opsegu hidrauličkih uslova, odnosno pri malim brzinama i malim dubinama. Ovo je posebno korisno u kombinovanim kanalizacionim sistemima, gde se javljaju složeni uslovi strujanja, između ostalog usled velike varijacije protoka. Zatim, uočeno je da su EM senzori najmanje 2,4 puta ponovljiviji od papučastih ADV senzora. Sa druge strane, uočeno je da se fabričkom kalibracijom, prema ISO standardu 3455, unosi sistematska neodređenost u izmerene podatke. Međutim, imajući u vidu linearan odziv u ispitanom opsegu protoka ova neodređenost se može efikasno redukovati linearnim korekcionim funkcijama.

Budući da se radni princip ravnih EM senzora zasniva na Faradejevom zakonu indukcije, koji je otporniji na smetnje od primene Doplerovog efekta kod ADV senzora, ispitana je i robusnost ovih uređaja, kao posebne radne karakteristike (poglavlje 4.2). Naime u kontrolisanim laboratorijskim uslovima, proveren je kapacitet uređaja za rad u uslovima sedimentacije poroznog nanosa, kao i slučaju zadržavanja plastičnih kesa na kućištu. Na

osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da prisustvo poroznog sedimenta dovodi do pojave sistematske neodređenosti izmerene brzine, gde je vrednost neodređenosti proporcionalna dubini sedimenta, odnosno smanjenju efektivne kontrolne zapremine. Međutim, za razliku od ADV-a, ravni EM senzori u ovim uslovima mogu da proizvedu izlazni signal proporcionalan srednjoj profilskoj brzini V . Kako bi se eliminisao navedeni sistematski uticaj, u okviru ove disertacije je razvijen linearni regresioni model, odnosno model korekcionih funkcija CFM. Ukoliko bi se na mernom mestu obezbedilo merenje nanosa u realnom vremenu, primenom CFM-a moguće je minimizirati uticaj poroznog sedimenta i obezbediti pouzdana merenja V . Sa druge strane, u slučaju zadržavanja plastičnih kesa na kućištu ravnih EM senzora, dolazi do prekida kontakta između elektroda i protočne vode, kao nosioca naelektrisanja, i samim tim do velike neodređenosti izmerenih podataka. U ovim slučajevima, neophodno je očistiti uređaj kako bi se nastavilo adekvatno merenje.

Nakon ispitivanja radnih karakteristika ravnih EM senzora, fokus istraživanja je prebačen na unapređenje tačnosti korelacije između lokalno izmerene brzine V_{mer} i srednje profilske brzine V . Imajući u vidu mane tradicionalnih pristupa za definisanje ove korelacije, ovde je data prednost pristupu nazvanom „Lokalna kalibracija“ preko kojeg se, koristeći matematički model senzora, može modelirati odziv senzora u lokalnim terenskim uslovima $V_{S,mer}$ i kasnije korelisati sa srednjom profilskom brzinom V . Za primenu postupka lokalne kalibracije neophodno je poznavati tehničke parametre, i odgovarajući matematički model koji definiše operacioni princip senzora. Fundamentalni princip rada EM senzora se matematički opisuje nelinearnom integracijom proizvoda tri vektorska polja – magnetnog, gustine struje i polja brzine, u kontrolnoj zapremini senzora. Ključan problem ovog modela se ogleda u njegovoj složenosti, koja sprečava širu praktičnu primenu.

Kako bi se to prevazišlo, u radu je analizirana ideja usvajanja novog, uprošćenog matematičkog modela ravnih EM senzora. Kao prvi korak u analizi, sprovedeno je sistematsko mapiranje magnetnog polja ravnih EM senzora na osnovu kojih je definisan prostorni raspored generisanog magnetnog polja (poglavlje 5.1). U slučaju korišćenog ravnog EM senzora ključan doprinos u generisanju izlaznog napona U_m , potiče od Y komponente magnetnog polja B_y . Uočeno je da su najveće magnitude B_y uz same

elektrode, kao i da eksponencijalno opadaju sa porastom rastojanja. Imajući u vidu raspored magnetnog polja, kao i oblik konstrukcije ravnog EM senzora, predložena je upotreba uprošćenog matematičkog modela, definisanog sa samo dva tehnička parametra, težinskom funkcijom w i maksimalnim dometom kontrolne zapremine τ_{max} . Zatim na osnovu eksperimentalnog ispitivanja rada ravnih EM senzora pod poroznim sedimentom, kao i dodatnog mapiranja polja brzina unutar kontrolne zapremine senzora, definisana je i proverena metodologija za eksperimentalno određivanje ovih parametara (poglavlje 5.2). Zaključeno je da brzine uz same elektrode daju dominantan doprinos izlaznom signalu, i da sa porastom odstojanja, doprinos brzina eksponencijalno opada. Takođe, domet kontrolne zapremine korišćenog Flat DC-2 EM senzora τ_{max} je svega 8,7 cm. Primenom izvedenih tehničkih parametara i uprošćenog matematičkog modela, zaključeno je da se može verodostojno modelirati rad ravnih EM senzora.

Definisanjem praktičnijeg matematičkog modela ravnih EM senzora, kao i odgovarajućih tehničkih parametara, omogućena je primena postupka lokalne kalibracije ovog tipa uređaja, sa ciljem pouzdanog definisanja korelacije K između izmerene V_{mer} i srednje profilske brzine V . Postupak lokalne kalibracije je razmotren u kontekstu projektovanja mernog mesta, gde su identifikovani ključni koraci neophodni za primenu ovog postupka (poglavlje 5.3). Nakon definisanja opsega hidrauličkih veličina koje se mogu javiti na mernom mestu, ispitana je upotreba analitičkih obrazaca i numeričkih simulacija za definisanje rasporeda brzina unutar kontrolnih zapremina ravnih EM senzora na budućem mernom mestu. Korišćenjem prethodnog definisanog modela senzora, moguće je modelirati odziv $V_{S,mer}$ za određene hidrauličke uslove i konačno odgovarajuću korekcionu funkciju za dobijanje srednje profilske brzine V .

Poslednji analizirani aspekt je terensko ispitivanje rada ravnih EM senzora i primene predložene metodologije za lokalnu kalibraciju. Tokom izrade ove disertacije, projektovana su i izvedena tri merna sistema za merenje protoka u okviru kompleksnog vodoprivrednog sistema „Hidroelektrane na Trebišnjici“ (HET), odnosno odgovarajućeg podsistema Gornji Horizonti, u Republici Srpskoj (poglavlje 6.1). U okviru svakog mernog sistema postavljena su četiri velika ravna EM senzora i dva pijezorezistivna senzora pritiska. Analizirana je mogućnost verifikacije postupka lokalne kalibracije, na primeru mernog sistema u derivacionom tunelu Dabarsko Polje – Fatničko Polje,

karakterističnom po pojavi bidirekcionog toka i kombinovanih uslova tečenja (poglavlje 6.2). Za verifikaciju je korišćen kontrolni merni sistema sačinjen od dva EM senzora „Ajkulino krilo“. Direktno su poređeni odnosi izmerenih brzina pomoću „Ajkulinog krila“ i ravnih EM senzora $V_{kont,mer}/V_{mer}$, pri karakterističnim zabeleženim događajima, sa recipročnim odnosom odgovarajućih korekcionih funkcija K/K_{kont} . Konstatovano je da su oba tipa senzora davali stabilan signal u složenim uslovima strujanja. Takođe, uočena je da se postupkom lokalne kalibracije može obezbediti pouzdanija procena srednje profilske brzine V . Sa druge strane, primećeno je da pod uticajem neustaljenosti toka dolazi do povećanja neodređenosti izmerene brzine V . Konačno, zaključeno je da se optimalan oblik korekcionih funkcija za ravne EM senzore dobija kombinacijom primene privremenog kontrolnog mernog sistema i postupka lokalne kalibracije.

Kroz terenska ispitivanja na derivacionim tunelima sistema HET, razmotreni su i dodatni aspekti primene postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora (poglavlje 6.3). Naime na osnovu sprovedenih numeričkih simulacija, ustanovljeno je da je primena ovog računarskog alata za definisanje rasporeda brzina, u uslovima gde se javljaju visoki Reynoldsovi brojevi, i dalje nije široko dostupna inženjerima. Uslovi tečenja su simulirani za izabrane hidrauličke uslove, na svim mernim mestima izvedenim u okviru HET. Jedan od ključnih problema predstavlja potreba za snažnim računarskim resursima, koji neretko nisu dostupni. Takođe, imajući u vidu odstupanja u dobijenim rezultatima, u odnosu na rezultate dobijene primenom standardnih analitičkih obrazaca, konstatovana je potreba za kalibracijom samih numeričkih modela. Umesto da se preko numeričkog modela tečenja kalibrišu ravni EM senzori, predlaže se kalibracija numeričkih modela korišćenjem rezultata izmerenih pomoću više ravnih EM senzora. Sa druge strane, prikazan je interesantan praktičan primer dodatne vrednosti koja se dobija korišćenjem pouzdanih sistema za merenje protoka. Na derivacionom tunelu Fatničko polje – Bilećka akumulacija, kroz praćenje razlike izmerenih protoka i visina pritisaka, na ulazu i izlazu iz tunela, kvantifikovane su količine vode koje se gube u karstu, procurivanjem iz tunela. Uočeno je da sa porastom pritiska u tunelu, rastu i gubici vode na procurivanje. Sprovedenjem testa pražnjenja tunela, omogućeno je i lociranje ključnih odvoda u tunelu, čime se definisani prioriteti u budućim radovima na betoniranju obloge ovog derivacionog tunela.

7.2 PREPORUKE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Primena ravnih EM senzora za merenje protoka u hidrotehničkim sistemima je u naučnoj literaturi, relativno neistražena oblast. Predstavljena istraživanja na polju primene ravnih EM senzora za merenje protoka u složenim uslovima strujanja, su dovela do novih saznanja, međutim takođe su i otvorila nekolicinu novih istraživačkih pitanja.

Sa aspekta određivanja radnih karakteristika senzora, konstatovano je da ISO standard 3455 nije u potpunosti adekvatan za fabričku kalibraciju ovog tipa uređaja. Iako se primenom ovog standarda, kalibracija sprovodi u konstantnim, ponovljivim i poznatim uslovima, oni ne odgovaraju hidrauličkim uslovima koji se javljaju u praksi. Shodno tome, korisno je definisati i po mogućstvu standardizovati novi postupak za kalibraciju ravnih EM senzora, kojim bi se adekvatno obračunali rasporedi brzina koji se javljaju uz čvrstu konturu provodnika.

Takođe, prilikom laboratorijskog ispitivanja Flat DC-2 EM senzora, uočen je porast statističke neodređenosti izmerenih brzina koji je pripisan ne-hidraulički oblikovanim ivicama kućišta. Izvođenjem konstrukcije sa hidraulički oblikovanim kućištem potencijalno se može poboljšati, već odlična, ponovljivost ovih uređaja. Konstrukcija najnovijeg Compact Flat DC-2 senzora (Slika 3.1) je upravo izvedena na ovaj način, i preliminarni rezultati ispitivanja potvrđuju iznesenu tvrdnju. U saradnji sa proizvođačem „Svet instrumenata“, potrebno je razmotriti dodatna istraživanja u budućnosti.

Posebnu prednost ravnih EM senzora predstavlja mogućnost za radom pod nanosom poroznog sedimenta. Prikazani rezultati se mogu tumačiti samo kao preliminarni, budući da su dobijeni na osnovu laboratorijskog ispitivanja, gde je korišćen rečni pesak kao sediment. U daljim istraživanjima potrebno je ispitati rad senzora pod sedimentima, koji po sastavu više odgovaraju sedimentima koji se javljaju u kanalizacionim sistemima. Posebno je od interesa ispitati uticaj poroznosti sedimenta na izlazni signal senzora. Takođe, neophodno je sprovesti odgovarajuća terenska ispitivanja kojim bi se u praksi verifikovala primena modela korekcionih funkcija za minimiziranje sistematskog uticaja sedimenta.

Sa ciljem sprovođenja potrebnih terenskih ispitivanja, potrebno je obezbediti i merenje dubine sedimenta u realnom vremenu, iznad samog senzora. U poglavlju 5.3.5.2, prikazani su preliminarni rezultati upotrebe merenja impedanse kao parametra za definisanje dubine sedimenta. Zaključeno je da postoji jasna zavisnost između osrednjene impedanse i dubine sedimenta. Međutim, budući da na izmerenu vrednost impedanse utiču i drugi faktori, kao što su elektroprovodnost i pojava kalcifikacije elektroda senzora, dalja ispitivanja su neophodna kako bi se razgraničili ovi uticaji od uticaja prisustva sedimenta.

U poglavlju 5.2 predložena je eksperimentalna metodologija za određivanje tehničkih parametara ravnih EM senzora. Mana predložene metodologije se ogleda u tome što su za njenu primenu potrebni određeni laboratorijski kapaciteti i dosta vremena. Imajući u vidu da su merenja korisne komponente magnetnog polja B_y znatno jeftinija i brža, potrebno je ispitati mogućnost suve kalibracije ravnih EM senzora. Kroz suvu kalibraciju, moguće je definisati tehničke parametre senzora na osnovu izmerenih vrednosti B_y i odgovarajućeg modela koji opisuje raspored osrednjene gustine virtuelne struje j . Iako je na osnovu eksperimentalno određene težinske funkcije w i izmerenog rasporeda B_y , iznad elektrode, predložen model razdelnika napona za opisivanje rasporeda j , detaljnija ispitivanja ovog i drugih modela senzora su neophodna.

Primena postupka lokalne kalibracije ravnih EM senzora u terenskim uslovima je ukazala na potencijalne mane ovog pristupa. Prvenstveno, uočeno je da je neophodno naći odgovarajući način za inkorporiranje uticaja neustaljenosti toka na vrednosti izvedenih korekcionih funkcija K . Detaljnije analize, prvenstveno u pogledu primene numeričkih simulacija neustaljenog tečenja, bi mogle da otkriju efekat neustaljenosti na raspored brzina u kontrolnim zapreminama ravnih EM senzora. Za analizu ove vrste neophodni su značajni računarski kapaciteti za sprovođenje odgovarajućih numeričkih simulacija i mogućnost kalibracije samih numeričkih modela. Kako bi se smanjila računarska zahtevnost numeričkih modela, korisno je dalje ispitati primenu tzv. hibridnih numeričkih modela, u kojima se u samo malom prostornom domenu detaljno rešava strujna slika. Sa druge strane kalibracija numeričkih modela, u složenim uslovima strujanja, je često nedostupna. U poglavlju 6.2, predložena je kalibracija numeričkog modela upravo korišćenjem ravnih EM senzora (stalnog mernog sistema) i „Ajkulino krilo“

(privremenog mernog sistema). Ukoliko bi se na ovaj način obezbedio kalibrisan model neustaljenog tečenja, dalje bi se, na osnovu njega, mogli kvantifikovati efekti neustaljenosti na merenja brzine pomoću ravnih EM senzora. Posebna istraživanja na polju primene numeričkih simulacija turbulentnog tečenja su neophodna za ispitivanje ove mogućnosti.

8 LITERATURA

Aakti, B., Staubli, T. and Abgottspon, A., 2014. Discharge Measurement in a Short Intake with a Converging Section—a case study. In *Proc. 18th International Seminar on Hydropower Plants*.

Aberle, J. (Ed.), Rennie, C. (Ed.), Admiraal, D. (Ed.), Muste, M. (Ed.). 2017. *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management*. London: CRC Press.

AFNOR, 2014. *Management and Control of Operational Activities in Drain and Sewer Systems Outside Buildings – Part 1: Cleaning*.

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.

Ahn, Y.C., Do Oh, B. and Kim, M.H., 2003. A current-sensing electromagnetic flowmeter for two-phase flow and numerical simulation of the three-dimensional virtual potential distribution: I. Fundamentals and annular flow. *Measurement Science and Technology*, 14(3), p.239.

Airy, S.G.B., 1879. *Theory of Errors of Observation*. Macmillan, London.

Alexander, K., 1939. Apparatus for measuring fluid flow. *U.S. Patent 2,149,847*.

Al-Rabeth, R.H. and Baker, R.C., 1986. On the ability to dry calibrate an electromagnetic flowmeter. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 19(3), p.203.

Angrisani, L., Baccigalupi, A. and Moriello, R.S.L., 2009. Ultrasonic-Based Distance Measurement Through Discrete Extended Kalman Filter. In *Kalman Filter Recent Advances and Applications*. InTech.

Ashley, R.M. and Verbanck, M.A., 1996. Mechanics of sewer sediment erosion and transport. *Journal of hydraulic research*, 34(6), pp.753-770.

Ashley, R.M., Bertrand-Krajewski, J.L., Hvitved-Jacobsen, T. and Verbanck, M. eds., 2004. *Solids in sewers*. IWA Publishing.

Baker, R.C., 2005. *Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Cambridge University Press.

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 Deletić (Vol. 1). Paris: UNESCO Publishing and Taylor & Francis.

Bevir, M.K., 1970. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), pp.577-590.

Bevir, M.K., 1971. Sensitivity of electromagnetic velocity probes. *Physics in Medicine & Biology*, 16(2), p.229.

Bevir, M.K., O'sullivan, V.T. and Wyatt, D.G., 1981. Computation of electromagnetic flowmeter characteristics from magnetic field data. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 14(3), p.373.

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.

Bonakdari, H., 2006. *Modélisation des écoulements en collecteurs d'assainissement: application à la conception de points de mesures* (Doctoral dissertation, Caen).

Bonakdari, H., Larrarte, F., Lassabatere, L. and Joannis, C., 2008. Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows. *Environmental Fluid Mechanics*, 8(1), pp.1-17.

Buffin-Bélanger, T., & Roy, A. G. 2005. 1 min in the life of a river: Selecting the optimal record length for the measurement of turbulence in fluvial boundary layers. *Geomorphology*, 68(1-2), 77-94.

Butler, D., May, R. and Ackers, J., 2003. Self-cleansing sewer design based on sediment transport principles. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(12), 276-282.

-
- Camnasio, E. and Orsi, E., 2010. Calibration method of current meters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(3), pp.386-392.
- 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.
- Carnacina, I., Larrarte, F. and Leonardi, N., 2017. Acoustic measurement and morphological features of organic sediment deposits in combined sewer networks. *Water research*, 112, pp.279-290.
- Cea, L., Puertas, J., & Pena, L. 2007. Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV. *Experiments in Fluids*, 42(3), 333–348.
- Cha, J.E., Ahn, Y.C. and Kim, M.H., 2002. Flow measurement with an electromagnetic flowmeter in two-phase bubbly and slug flow regimes. *Flow measurement and instrumentation*, 12(5-6), pp.329-339.
- Chanson, H. 2008. Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) in the field and in laboratory: Practical examples. *International Meeting on Measurements and Hydraulics of Sewers*, Brisbane, Australia.
- Charles, R., Goodhue, D. 2017 (16.1.2017). "Three Keys utility workers die in wastewater trench". *Miami Herald*. Preuzeto 19.2.2019
- Chauhan, M.S., Kumar, V., Dikshit, P.K.S. and Dwivedi, S.B., 2014. Comparison of discharge data using ADCP and current meter. *Int J Adv Earth Sci*, 3(2), pp.81-86.
- Chebbo, G., Bachoc, A., Laplace, D. and Le Guennec, B., 1995. The transfer of solids in combined sewer networks. *Water science and technology*, 31(7), pp.95-105.
- Clemmens, A.J. and Wahlin, B.T., 2006. Accuracy of annual volume from current-meter-based stage discharges. *Journal of hydrologic engineering*, 11(5), pp.489-501.
- Ćočić, A., 2013. *Modeliranje i numeričke simulacije vihornih strujanja*. Doktorska disertacija odbranjena na Mašinskom Fakultetu, Univerziteta u Beogradu.

Cohn, T.A., Kiang, J.E. and Mason Jr, R.R., 2012. Estimating discharge measurement uncertainty using the interpolated variance estimator. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), pp.502-510.

Coleman, H.W. and Steele, W.G., 1995. Engineering application of experimental uncertainty analysis. *AIAA journal*, 33(10), pp.1888-1896.

Costa, J.E., Cheng, R.T., Haeni, F.P., Melcher, N., Spicer, K.R., Hayes, E., Plant, W., Hayes, K., Teague, C. and Barrick, D., 2006. Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resources Research*, 42(7).

Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Haeni, F.P., Melcher, N.B., Thurman, E.M., Plant, W.J. and Keller, W.C., 2000. measuring stream discharge by non-contact methods: A Proof-of-Concept Experiment. *Geophysical Research Letters*, 27(4), pp.553-556.

Crabtree, R.W., 1989. Sediments in sewers. *Water and Environment Journal*, 3(6), pp.569-578.

CUW-UK, ICCI Limited., 2004. *Analysis of the effects of water transfer through the tunnel Fatničko Polje – Bileća reservoir on the hydrologic regime of Bregava River in Bosnia and Herzegovina.*

Cvitkovic, M., Prodanović, D., Vučurević, V. 2010. Elektromagnetne sonde za merenje protoka otpadnih voda – primer Beogradske kanalizacije. 10. *Međunarodna konferencija Vodovodni i kanalizacioni sistemi*, Jahorina, Republika Srpska.

Demuth, H.B., Beale, M.H., De Jess, O. and Hagan, M.T., 2014. *Neural network design*. Martin Hagan.

Dobriyal, P., Badola, R., Tuboi, C. and Hussain, S.A., 2017. A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management. *Applied Water Science*, 7(6), pp.2617-2628.

EC (2000). Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council of October 23 establishing a framework for community action in the field of Water policy. *Official Journal of the European Communities*, L327/1-L327/72. 22. 12. 2000.

-
- El Bahlouli, A. and Larrarte, F., 2018. Proposal for improving discharge quantification in urban drainage. *Flow Measurement and Instrumentation*, 60, pp.51-56.
- Engel, L., 1967. Uber ein induktives verfahren zur durchflussmessung in offenen gerinnen, *Acta Imeco*.
- Eugene, M., Erdco Eng Corp, 1954. Magnetic type flowmeter. *U.S. Patent 2,696,737*.
- Faraday, M., 1832. V. Experimental researches in electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 122, pp.125-162.
- Fu, X., Hu, L., Lee, K.M., Zou, J., Ruan, X.D. and Yang, H.Y., 2010. Dry calibration of electromagnetic flowmeters based on numerical models combining multiple physical phenomena (multiphysics). *Journal of Applied Physics*, 108(8), p.083908.
- García, C. M., Cantero, M. I., Niño, Y., & García, M. H. 2005. Turbulence Measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1062–1073.
- Gils, H., 1970. Discharge measurement in open water by means of magnetic induction. In *Symposium on hydrometry*, Koblenz.
- Godley, A. 2002. Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 197-201.
- Goring, D.G. and Nikora, V.I., 2002. Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), pp.117-126.
- Grenander, U. and Rosenblatt, M., 2008. Statistical analysis of stationary time series (Vol. 320). *American Mathematical Soc.*
- Gruber, P., Staubli, T., Widmer, M., Lüscher, B., Widmer, C. and Roux, L., 2009. Multipath acoustic discharge measurement in non-standard situations.
- Guo, J. and Julien, P.Y., 2003. Modified log-wake law for turbulent flow in smooth pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), pp.493-501.

-
- Guo, J., 2014. Modified log-wake-law for smooth rectangular open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), pp.121-128.
- Guo, J., 2017. Eddy viscosity and complete log-law for turbulent pipe flow at high Reynolds numbers. *Journal of Hydraulic Research*, 55(1), pp.27-39.
- Hajdin, G., 1977. *Mehanika fluida: Osnove*. Građevinski fakultet Univerziteta.
- Harremoës, P., Capodaglio, A.G., Hellström, B.G., Henze, M., Jensen, K.N., Lynggaard-Jensen, A., Otterpohl, R. and Søbørg, H., 1993. Wastewater treatment plants under transient loading-Performance, modelling and control. *Water Science and Technology*, 27(12), p.71.
- Heiner, B.J. and Vermeyen, T.B., 2012. Laboratory evaluation of open channel area-velocity meters. *US Bureau of Reclamation*, Denver, CO, p.15.
- Hemp, J. and Versteeg, H.K., 1986. Prediction of electromagnetic flowmeter characteristics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19(8), p.1459.
- Hemp, J. and Wyatt, D.G., 1981. A basis for comparing the sensitivities of different electromagnetic flowmeters to velocity distribution. *Journal of Fluid Mechanics*, 112, pp.189-201.
- Herschy, R.W. and Newman, J.D., 1974, December. Electromagnetic river gauging. In *Symposium on River Gauging by Ultrasonic and Electromagnetic Methods*. Water Research Centre and Department of Environmental Water Data Unit.
- Herschy, R.W., 1978. *Hydrometry: Principles and Practice*. NY John Wiley & Sons.
- Hrabak, D., Pryl, K., Krejčík, J. and Richardson, J., 1998. Calibration of flowmeters using FLOW-3D software. In *Nouvelles technologies en assainissement pluvial. Conference internationale*.
- Hu, H., Wang, C., Li, H. and Gao, F., 2016, July. Geometric calibration experiences of ultrasonic flowmeters installed in hydropower stations in China. In Proc. *IGHM2016* (pp. 1-16).

Hudson, J.A., 2004. The impact of sediment on open channel flow measurement in selected UK experimental basins. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(1), pp.49-58.

Hughes, A.W., Longair, I.M., Ashley, R.M. and 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), pp.1-12.

Hultmark, M., Vallikivi, M., Bailey, S.C.C. and Smits, A.J., 2013. Logarithmic scaling of turbulence in smooth-and rough-wall pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 728, pp.376-395.

Hurther, D., & Lemmin, U. (2001). A correction method for turbulence measurements with a 3D acoustic doppler velocity profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(3), 446–458.

Iooss, B., Lhuillier, C. and Jeanneau, H., 2002. Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: uncertainties due to flow profile and fluid turbulence. *Ultrasonics*, 40(9), pp.1009-1015.

Ishikawa, I. and Oota, H., Yokogawa Electric Corp, 2004. Electromagnetic flowmeter. *U.S. Patent* 6,804,613

ISO3455, 2007. *Calibration of rotating-element current-meters in straight open tanks*, International Organization for Standardization.

ISO9104, 1991. *Measurement of fluid flow in closed conduits-Methods of evaluating the performance of electromagnetic flow-meters for liquids*, International Organization for Standardization.

ITA, 2002. Optimal flow measurement, understanding selection, application, installation and operation of flowmeters. In: *Proceedings of ITA Workshop WK02FM-002*. Henderson, USA: Instrumentation Testing Association.

Ivetić, D., Đorđević, J. i Prodanović D. 2016. Aspekti merenja brzine vode akustičnom Dopler Anemometrijom. *Vodoprivreda*, 282-284 (4-6), 181-190.

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.

Ivetić, D., Prodanović, D. i Cvitkovic, M. 2018. Merenje protoka vode u tunelima pri kombinovanim uslovima tečenja: primer tunela Dabarsko Polje - Fatničko Polje, 18. *Savetovanje SDHI I SDH*, 25 – 26. Oktobar 2018, Niš, Srbija.

Ivetić, D., Prodanović, D., Stojadinović, L., Cvitkovic, M., 2017. Unapređenje metodologije merenja protoka pomoću ravnih elektromagnetnih senzora brzine. *Vodoprivreda*, 49(285-287), pp. 93-102.

Jan, C.D., Wang, J.S. and Chen, T.H., 2006. Discussion of “Simulation of Flow and Mass Dispersion in Meandering Channels” by Jennifer G. Duan. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), pp.339-341.

Jaroslav Černi, Građevinski Fakultet i Svet instrumenata, 2017a. *Sistem za merenje protoka vode na tunelu DP-FP, Projekat Izvedenog Stanja*. Investitor: Hidroelektrane na Trebišnjici.

Jaroslav Černi, Građevinski Fakultet i Svet instrumenata, 2017b. *Sistem za merenje protoka vode na tunelu FP-BA: Profil Pađeni*, Projekat Izvedenog Stanja. Investitor: Hidroelektrane na Trebišnjici.

Jaroslav Černi, Građevinski Fakultet i Svet instrumenata, 2018. *Sistem za merenje protoka vode na tunelu FP-BA: Profil Čepelica*, Projekat Izvedenog Stanja. Investitor: Hidroelektrane na Trebišnjici.

Jeanbourquin, D., Sage, D., Nguyen, L., Schaeli, B., Kayal, S., Barry, D. A., Rossi, L. (2011) Flow measurements in sewers based on image analysis: automatic flow velocity algorithm. *Water Science & Technology*, 64 (5), 1108-1114.

Joint committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. International Organization for Standardization.

Kavvas, M., 2002. An appraisal of sewer system problems in developing countries. *Water policy*, 4(2), pp.119-135.

Khorsandi, B., Mydlarski, L., & Gaskin, S. (2012). Noise in Turbulence Measurements Using Acoustic Doppler Velocimetry, (October), 829–838.

Klepiszewski, K., Sollicec, L. and Bayer, T., 2017. Flow monitoring under complex flow conditions using multiple sensors and COSP technology. In *14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, September 10 – 15 2017, Prague, Czech Republic.

Kline, S. J., McClintock, F., 1953. Describing uncertainties in single - sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1), pp.3-8.

Koelling, C., 1996. SIMK-A new finite element model significantly improves the accuracy of flow measurements in sewers. In *7th international conference on urban storm drainage* (pp. 665-70).

Kohonen, T., 2012. *Self-organization and associative memory* (Vol. 8). Springer Science & Business Media.

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.

Kouyi, G. L., Besson, F., Bier, M. A., Chocat, B., & Lucchinacci, P. (2010). Assessment of flow rate in a complex sewer pipe by means of a water depth sensor and modelling. *NOVATECH 2010*.

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.

Larrarte, F. and Chanson, H., 2008. Experiences and Challenges in Sewers: Measurements and Hydrodynamics. In *International Meeting on Measurements and Hydraulics of Sewers IMMHS'08*, Summer School GEMCEA/LCPC (pp. 1-114). Department of Civil Engineering at The University of Queensland.

Larrarte, F., Bardiaux, J.B., Battaglia, P. and Joannis, C., 2008. Acoustic Doppler flowmeters: a proposal to characterize their technical parameters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(5), pp.261-267.

Larrarte, F., Jaumouillié, P. and Joannis, C., 2004. Computational Fluid Dynamics: an aid for designing the instrumentation of sewer sections. In *Conférence internationale sur les nouvelles technologies en assainissement pluvial*.

Larrarte, F., Szturycz, E., Lebouc, L. and Riochet, B., 2016. New technique for continuous monitoring of sediment height. *Flow Measurement and Instrumentation*, 49, pp.40-45.

Lawler, D.M., 2008. Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of the new PEEP-3T system. *Geomorphology*, 93(1-2), pp.17-39.

Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X. and Dramais, G., 2012. Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, pp.18-29.

Leeungculsatien, T. and Lucas, G.P., 2013. Measurement of velocity profiles in multiphase flow using a multi-electrode electromagnetic flow meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 31, pp.86-95.

Lepot, M., Pouzol, T., Aldea Borruel, X., Suner, D. and Bertrand-Krajewski, J.L., 2017. Measurement of sewer sediments with acoustic technology: from laboratory to field experiments. *Urban Water Journal*, 14(4), pp.369-377.

Li, Y.B., Lin, Z.Q., Hu, S.J. and Chen, G.L., 2007. Numerical analysis of magnetic fluid dynamics behaviors during resistance spot welding. *Journal of Applied Physics*, 101(5), p.053506.

Luntta, E. and Halttunen, J., 1989. The effect of velocity profile on electromagnetic flow measurement. *Sensors and Actuators*, 16(4), pp.335-344.

Lüscher, B., Staubli, T., Tresch, T. and Gruber, P., 2008. Optimizing the acoustic discharge measurement for rectangular conduits. Proc. *IGHM2008*, Milano, Italy.

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.

Mao, F., Clark, J., Buytaert, W., Krause, S. and Hannah, D.M., 2018. Water sensor network applications: Time to move beyond the technical?. *Hydrological Processes*, 32(16), pp.2612-2615.

Marushchenko, S., Gruber, P. and Staubli, T., 2016. Approach for acoustic transit time flow measurement in sections of varying shape: Theoretical fundamentals and implementation in practice. *Flow Measurement and Instrumentation*, 49, pp.8-17.

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.

Menter, F.R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), pp.1598-1605.

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.

Michalski, A., 2000. Flow measurements in open irrigation channels. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 3(1), pp.12-16.

Michalski, A., Starzynski, J. and Wincenciak, S., 1998. Optimal design of the coils of an electromagnetic flow meter. *IEEE Transactions on magnetics*, 34(5), pp.2563-2566.

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.

Michalski, A., Starzynski, J. and Wincenciak, S., 2002. 3-D approach to designing the excitation coil of an electromagnetic flowmeter. *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, 51(4), pp.833-839.

Moffat, R.J., 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental thermal and fluid science*, 1(1), pp.3-17.

-
- Mueller, D. S., Abad, J. D., Garcia, C. M., Gartner, J. W., Garcia, M. H., & Oberg, K. A. (2007). Errors in acoustic Doppler profiler velocity measurements caused by flow disturbance. *Journal of hydraulic Engineering*, 133(12), 1411-1420.
- Muste, M. (Ed.), Lyn, D. (Ed.), Admiraal, D. (Ed.), Ettema, R. (Ed.), Nikora, V. (Ed.), Garcia, M. (Ed.). (2017). *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management*. London: CRC Press.
- Newman, J.D., 1983. Advances in gauging open channels and rivers using ultrasonic and electromagnetic methods. In *International Symposium on Hydrometeorology* June 13-17, 1982, Denver, Colorado. American Water Resources Association, 1983. p 15-26.
- Nezu, I. and Nakagawa, H., 1993. *Turbulence in open channels*. IAHR/AIRH Monograph. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Nezu, I. and Rodi, W., 1986. Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(5), pp.335-355.
- Nikora, V.I. and Goring, D.G., 1998. ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(6), pp.630-634.
- Nikuradse, J. (1932). *VDI Forschungsheft*.
- Nivus (1999). *Installation manual Doppler pipe sensors and wedge sensors*; 49 p.
- Nord, G., Gallart, F., Gratiot, N., Soler, M., Reid, I., Vachtman, D., Latron, J., Martín-Vide, J.P. and Laronne, J.B., 2014. Applicability of acoustic Doppler devices for flow velocity measurements and discharge estimation in flows with sediment transport. *Journal of hydrology*, 509, pp.504-518.
- Nortek, A.S., 2009. *Vectrino velocimeter user guide*. Nortek AS, Vangkroken, Norway, 621.
- Ogden, F.L., Creel, J.N., Kempema, E.W. and Crouch, T.D., 2017. Sedimentation Effects on Triangular Short-Crested Flow-Measurement Weirs. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(8), p.04017020.

Paul, J.D., Buytaert, W., Allen, S., Ballesteros-Cánovas, J.A., Bhusal, J., Cieslik, K., Clark, J., Dugar, S., Hannah, D.M., Stoffel, M. and Dewulf, A., 2018. Citizen science for hydrological risk reduction and resilience building. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(1), p.e1262.

Pollert, J. and Bares, V., 2002. Determination of velocity fields in a circular sewer. *In international conference on sewer operation and maintenance*.

Pope, S.B., 2008. *Turbulent flows*. Cambridge university press.

Prodanović, D., Djačić, A., Branisavljević, N. and Rukavina J., 2012. Laboratory tests of ultrasound and electromagnetic devices for flow measurements in sewer systems. *Current issues in water supply and sewage 2012*, Bol on Brač (In Serbian/Croatian language).

Rafiq, M.Y., Bugmann, G. and Easterbrook, D.J., 2001. Neural network design for engineering applications. *Computers & Structures*, 79(17), pp.1541-1552.

Rantz, S.E., 1982. Measurement and computation of streamflow: Vol. 1. Measurement of stage and discharge; Vol. 2. Computation of discharge. *US Geological Survey Water Supply Paper*, 2175, p.681.

Roy, A.H., Wenger, S.J., Fletcher, T.D., Walsh, C.J., Ladson, A.R., Shuster, W.D., Thurston, H.W. and Brown, R.R., 2008. Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States. *Environmental management*, 42(2), pp.344-359.

Sarasota, 1992. Electronic flow gauges for open channels, *Technical Bulletin*.

Schott, T., Wutrich, B. 2012. METAS Calibrates Hydrometric Measuring Instruments, *Journal of Metrology METinfo*, 18(2), pp. 1-11.

Schütze, M., Butler, D., Beck, M.B. and Verworn, H.R., 2002. Criteria for assessment of the operational potential of the urban wastewater system. *Water science and technology*, 45(3), pp.141-148.

Shercliff, J.A., 1954. Relation between the velocity profile and the sensitivity of electromagnetic flowmeters. *Journal of Applied Physics*, 25(6), pp.817-818.

- Shercliff, J.A., 1962. *The theory of electromagnetic flow-measurement*. CUP Archive.
- Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., 1995. A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), pp.227-238.
- Skipworth, P.J., Tait, S.J. and Saul, A.J., 1999. Erosion of sediment beds in sewers: Model development. *Journal of environmental engineering*, 125(6), pp.566-573.
- Smith, C.G. and Slepian, J., 1917. Electromagnetic ship's log. *U.S. Patent* 1,249,530.
- 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), p.29.
- Soupir, M.L., Mostaghimi, S. and Mitchem Jr, C.E., 2009. A Comparative Study of Stream-Gaging Techniques for Low-Flow Measurements in Two Virginia Tributaries. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(1), pp.110-122.
- Spalart, P.R., 2000. Strategies for turbulence modelling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(3), pp.252-263.
- 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.
- Stojadinović, L., Ivetić, D. I Prodanović, D., 2018. Laboratorijsko ispitivanje magnetnog polja ravnih elektromagnetnih senzora, 18. *Savetovanje SDHI I SDH*, 25 – 26. Oktobar 2018, Niš, Srbija.
- Surutka, J.V., 1984. *Osnovi elektrotehnike: Deo 3: Elektromagnetizam*. Naučna knjiga.
- Svet instrumenata, 2018. Flat DC2.34 EMV. Podaci o proizvodima. Preuzeto sa <<http://www.si.co.rs/index-e.html>>.
- Tresch, T., Gruber, P. and Staubli, T., 2006, July. Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. In Proc. *IGHEM2006* (pp. 1-16).

Tresch, T., Lüscher, B., Staubli, T. and Gruber, P., 2008, September. Presentation of optimized integration methods and weighting corrections for the acoustic discharge measurement. In Proc. *Italy 7th Int. Conf. Hydraulic Efficiency Meas.* (pp. 2-6).

Voulgaris, G. and Trowbridge, J.H., 1998. Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(1), pp.272-289.

Voulgaris, G., & Trowbridge, J. H. (1998). Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(1), 272–289.

Wagner, T.P., 2017. Reducing single-use plastic shopping bags in the USA. *Waste Management*, 70, pp.3-12.

Wang, J.Z., Tian, G.Y. and Lucas, G.P., 2007. Relationship between velocity profile and distribution of induced potential for an electromagnetic flow meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 18(2), pp.99-105.

Wang, X., Wang, Z.Y., Yu, M. and Li, D., 2001. Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-law and wake-law. *Journal of Hydraulic Research*, 39(2), pp.211-217.

Watral, Z., Jakubowski, J. and Michalski, A., 2015. Electromagnetic flow meters for open channels: Current state and development prospects. *Flow measurement and Instrumentation*, 42, pp.16-25.

Webber, N.B., 2014. Fluid Mechanics for Civil Engineers, Chapman and Hall, London.

Wilcox, D.C., 1998. *Turbulence modeling for CFD* (Vol. 2, pp. 103-217). La Canada, CA: DCW industries.

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), p.466.

Yang, S.Q. and McCorquodale, J.A., 2004. Determination of boundary shear stress and Reynolds shear stress in smooth rectangular channel flows. *Journal of hydraulic engineering*, 130(5), pp.458-462.

Young, F.B., Gerrard, H. and Jevons, W., 1920. XIII. On electrical disturbances due to tides and waves. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 40(235), pp.149-159.

Zhang, X.Z. and Li, Y., 2004. Calculation of the virtual current in an electromagnetic flow meter with one bubble using 3D model. *ISA transactions*, 43(2), pp.189-194.

BIOGRAFIJA

Damjan Ivetić je rođen u Beogradu 24.03.1988. Osnovnu školu „Filip Kljajić Fića“ na Banovom Brdu, opština Čukarica, je pohađao od prvog do šestog razreda, i nakon pauze, i osmi razred zajedno sa maturom. Sedmi razred osnovne škole je završio u Ekseteru u Engleskoj (pokrajina Devon). Nakon toga pohađao je i maturirao u Trinaestoj beogradskoj gimnaziji, prirodno-matematički smer.

Građevinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, upisuje 2007/2008 kao budžetski student. Osnovne akademske studije je završio 2011. godine na odseku za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo sa prosekom 9,55. Za vreme osnovnih akademskih studija u školskoj 2008/2009, na osnovu ostvarenog proseka, bio je korisnik univerzitetske stipendije. Kasnije u školskim godinama 2009/2010 i 2010/2011, bio je korisnik stipendije „Fonda za razvoj naučnog i umetničkog podmlatka“. Nakon završenih osnovnih akademskih studija, boravio je na stručnoj praksi u Belfastu, Severnoj Irskoj. Tokom prakse, bavio se eksperimentalnim radom iz oblasti marinske hidraulike u hidrauličkoj laboratoriji Kvins Univerziteta u Belfastu (eng. Queen’s University in Belfast).

Školske 2011/2012 godine upisuje diplomske akademske (master) studije na građevinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, na odseku za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo. Tokom master studija bio je korisnik stipendije „Fonda za mlade talente“. Do zvanja master inženjer građevinarstva dolazi 2012. godine, uz ostvaren prosek na studijama od 10,00.

Školske 2012/2013 godine upisuje doktorske studije na Građevinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu. Na doktorskim studijama je uspešno položio sve ispite uz ostvaren prosek na studijama od 10,00. Kandidat 01.01.2013. god. zasniva radni odnos na Građevinskom fakultetu u zvanju asistenta – studenta doktorskih studija za uže naučne oblasti Mehanika nestišljivih fluida i Hidraulika i Ekološko inženjerstvo. Angažovan je u realizaciji nastave na predmetima Mehanika fluida i Osnove ekološkog inženjerstva, u okviru osnovnih akademskih studija. Na diplomskim akademskim studijama, angažovan

je na predmetu Merenja u hidrotehnici. U dosadašnjim studentskim anketama o radu nastavnika i predavača ocenjen je visokim ocenama. Upravo na predlog studenata, kandidat je učestvovao kao član stručnog žirija u evropskom finalu takmičenja studenata tehnike „EBEC“ u organizaciji međunarodnog studentkog udruženja „BEST“ održanog u Beogradu 2016. god. Takođe, po pozivu, kandidat je držao predavanja otvorenog tipa studentima Građevinskog fakulteta u organizaciji studentskog udruženja „IACES”.

Pored obaveza u nastavi angažovan je kao istraživač na projektu „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture“ pod evidencionim brojem TR37010 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Aktivno učestvuje i na izradi projektno-tehničke dokumentacije, koje Građevinski fakultet realizuje preko Instituta za hidrotehniku i vodno-ekološko inženjerstvo, pogotovo iz oblasti vodovodnih i kanalizacionih sistema, kao i projektovanja mernih stanica na hidrotehničkim objektima. Kandidat je uspešno završio obuku za „Zaštitu u radu sa izvorima jonizujućeg zračenja“ u organizaciji instituta Karajović, čime je sertifikovan za korišćenje uređaja sa rendgenskim i xis-zracima.

Autor je i koautor četiri rada u časopisima indeksiranim na SCI listi, kao i većeg broja radova u domaćim časopisima, na međunarodnim i domaćim naučnim i stručnim skupovima.

Posедуje odlično znanje Engleskog jezika, kako u pisanju tako i u govoru, a služi se i raspoláže osnovnim znanjem ruskog jezika.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Дамјан Иветић

Број индекса 920/12

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Одређивање протока течности у сложеним условима струјања применом равних електромагнетних сензора

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 6. јун 2019

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора	Дамјан Иветић
Број индекса	920/12
Студијски програм	Грађевинарство
Наслов рада	Одређивање протока течности у сложеним условима струјања применом равних електромагнетних сензора
Ментор	проф. др Душан Продановић, дипл. грађ. инж.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 6. јун 2019

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Одређивање протока течности у сложеним условима струјања применом равних електромагнетних сензора

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- 3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 6. јун 2019

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.