

Универзитет у Београду

Грађевински факултет

Катедра за хидротехнику и водно еколошко инжењерство



МАСТЕР РАД

Тема: Унапређење поузданости мерења протока у канализационим системима помоћу Contrast електромагнетног сензора

Кандидат: Јована Јовашевић 525/18

Ментори: Др Душан Продановић

Др Дамјан Иветић

Београд, 2019.

САДРЖАЈ

1. УВОД	8
1.1. Предмет истраживања	8
1.2. Избор методе за мерење протока	8
1.3. Задатак и циљ истраживања	9
2. МЕТОДЕ И УРЕЂАЈИ ЗА МЕРЕЊЕ ПРОТОКА	11
2.1. Метода Брзина – Протицајни пресек	11
2.2. Мерење брзина	11
2.2.1. Ултразвучни мерачи брзина	11
2.2.2. Електромагнетни мерачи брзина.....	14
2.3. Теорија ЕМ сензора	14
2.3.1. Типови ЕМ сензора	14
2.3.1.1. Цевни ЕМ сензори.....	14
2.3.1.2. Интегрални ЕМ сензори.....	15
2.3.1.3. Локални ЕМ сензори	16
2.3.1.3.1. Large Flat DC – 2.....	17
2.3.1.3.2. Flat DC – 2	18
2.3.1.3.3. Compact Flat DC – 2.....	18
2.3.2. Математички модел ЕМ сензора.....	19
2.3.2.1. Фундаментални математички модел ЕМ сензора	19
2.3.2.2. Упростићен математички модел ЕМ сензора.....	21

3. МЕТОДОЛОГИЈА	24
3.1. Експериментална опрема	24
3.2. Лабораторијске инсталације	25
3.2.1. Велики лабораторијски канал.....	25
3.2.2. Мали канал	28
3.3. Експериментална процедура у стандардним условима	30
3.3.1. Велики канал.....	30
3.3.1.1. Мерења са различитим положајима уставе.....	30
3.3.1.2. Мерења са рампом у великом каналу	32
3.3.2. Мерења у малом каналу	33
3.4. Процена мерне неодређености у стандардним условима	34
3.4.1. Еталонска неодређеност.....	35
3.4.2. Систематска неодређеност.....	36
3.4.3. Статистичка неодређеност.....	36
3.4.4. Комбинована неодређеност	37
3.5. Експериментална процедура у условима седиментације	37
3.6. Процена мерне неодређености у условима седиментације	38
4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	40
4.1. Мерна неодређеност Compact EM сонде у стандардним условима.....	40
4.1.1. Мерне неодређености у случају мерења са различитим положајима уставе и у случају мерења на малом каналу	40
4.1.2. Мерна неодређеност у случају потпуно подигнуте уставе и рампи постављених у великом каналу	43
4.1.3. Поређење радних карактеристика Compact Flat DC – 2 и Flat DC – 2 сонде у стандардним мерним условима	45
4.1.4. Резултати мерења дубина у стандардним условима	48

4.2. Мерна неодређеност Compact EM сонде у условима седиментације.....	48
4.2.1. Поређење радних карактеристика Compact Flat DC – 2 и Flat DC – 2 сензора у условима седиментације.....	54
4.2.2. Резултати мерења дубина у условима седиментације помоћу Compact EM сензора.....	56
5. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕДЛОГ БУДУЋЕГ ИСТРАЖИВАЊА	58
5.1. Закључци истраживања.....	58
5.2. Предлог будућег истраживања	59
6. ЛИТЕРАТУРА.....	61

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1: ADV Vectrino Profiler (преузето са http://www.nortekusa.com/).....	12
Слика 2.2: Лево: Цевни ЕМ сензор који се налази у подруму лабораторије Института за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду; Десно: Претварач, логер и дисплеј за Цевни ЕМ сензор	15
Слика 2.3: Large Flat DC – 2 сензор	17
Слика 2.4: Flat DC – 2 сензор.....	18
Слика 2.5: Compact Flat DC – 2 сензор	19
Слика 2.6: Примена Фарадејевог закона електромагнетне индукције на цевни ЕМ сензор	20
Слика 3.1: Compact Flat DC – 2 сензор произвођача „Свет инструмената“	24
Слика 3.2: Лабораторијска инсталација – велики канал у лабораторији Института за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду.	25
Слика 3.3: Лабораторијска инсталација као део затвореног, рецикулационог система	26
Слика 3.4: Пумпа „Ebara“ која се налази у подруму лабораторије.....	27
Слика 3.5: Табласти затварач за регулацију протока кроз лабораторијски канал.....	27
Слика 3.6: Устава постављена у великом лабораторијском каналу	28
Слика 3.7: Лабораторијска инсталација – мали канал (МК) у учионици Института за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство.....	29
Слика 3.8: Еталонско мерило - цевни ЕМ сензор „Endress Hauser“у учионици Института	29
Слика 3.9: Томсонов прелив	30

Слика 3.10: Три различита положаја уставе; слева: најнижи (VK1), средњи (VK2) и највиши (VK3).....	31
Слика 3.11: Лабораторијска инсталација – велики канал, са рампама	32
Слика 3.12: Мерење помоћу Compact EM сонде при различитим нагибима малог канала	34
Слика 3.13: Лево – сонда под слојем седимента од 80 mm; десно – сонда под слојем седимента од 35 mm.....	38
Слика 4.1: Дијаграм зависности еталонских и измерених брзина на великом каналу, за три различита положаја уставе и на малом каналу	40
Слика 4.2: Дијаграм зависности резидуала мерења брзина од дубине, еталонске брзине и Фрудовога броја.....	41
Слика 4.3: Дијаграм зависности стандардне девијације брзине од дубине, еталонске брзине и Фрудовога броја	42
Слика 4.4: Дијаграм зависности еталонских и измерених брзина на великом каналу, при потпуно подигнутој уставу и постављеним рампама.....	43
Слика 4.5: Дијаграм зависности резидуала мерења брзина од дубине, еталонске брзине и Фрудовога броја.....	44
Слика 4.6: Дијаграм зависности стандардних девијација брзина од дубине, еталонске брзине и Фрудовога броја	45
Слика 4.7: Дијаграм зависности измерених и еталонских вредности дубина у стандардним условима за мерења спроведена на великом и малом каналу	48
Слика 4.8: Вредности еталонске, некориговане систематске, статистичке и комбиноване неодређености у функцији од дубине седимента	49
Слика 4.9: Промена нагиба корекционе функције у зависности од дубине седимента..	50

Слика 4.10: Промена одсечка корекционе функције у зависности од дубине седимента	50
Слика 4.11: Дијаграми зависности еталонске и кориговане брзине за дате дубине седимента.....	52
Слика 4.12: Дијаграм коригованих неодређености у функцији дубине седимента	53
Слика 4.13: Дијаграм зависности коригованих и еталонских брзина за експерименте спроведене применом Flat сензора.....	54
Слика 4.14: Дијаграм коригованих компоненти неодређености у зависности од дубине седимента.....	55
Слика 4.15: Дијаграм зависности еталонских и измерених дубина након локалне калибрације Compact EM сензора	57

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 4.1: Еталонирање мерне неодређености у стандардним условима	46
Табела 4.2: Поређење резултата еталонирања мерне неодређености у стандардним условима између Compact Flat DC – 2 и Flat DC – 2 сонде.....	47

1. УВОД

1.1. Предмет истраживања

Основни предуслов за правилно димензионисање хидротехничких система и за адекватно управљање истим је познавање података о протоку. Међутим, најчешће је проток параметар који се најтеже мери, поготову у канализационим системима.

Многи истраживачи су се бавили развојем адекватних мерних метода, међутим, ово поље истраживања је и даље актуелно управо због низа фактора који ометају рад уређаја за мерење протока.

1.2. Избор методе за мерење протока

Избор мерне методе је повезан са различитим особинама хидрауличног система (Godley, 2002.). При избору мерне опреме, доминантни фактори које је потребно узети у разматрање су:

- 1) Хидраулички услови – избор мерне опреме директно зависи од типа течења који се може јавити на мерном месту и од опсега параметара као што су проток и притисак. Такође, мерни системи се разликују по брзини прикупљања података, што значи да је важан фактор и неустаљеност, односно брзина промене протока. Проблем представљају тзв. сложени услови течења, који се могу јавити у канализационим системима и у колекторима великих димензија и сложених попречних пресека. У канализационим системима се, по правилу, јавља течење са слободном површином, али се, нпр. услед велике количине падавина, може јавити и течење под притиском. Такође, у случају општег канализационог система постоје велике разлике протока у кишним и сушним периодима.
- 2) Карактеристике флуида: Најзначајније карактеристике су температура, електропроводљивост и концентрација суспендованих честица. За канализационе системе специфична је и појава масти, уља, биолошког и хемијског отпада у води.

- 3) Физичке карактеристике проводника: Димензије и облик попречног пресека проводника често представљају ограничавајући фактор при избору мерне опреме. Такође, при избору мерне опреме, требало би имати у виду да се храпавост цеви мења са временом и да у дужем временском периоду, може утицати на тачност података о протоку.
- 4) Карактеристике средине: канализациони системи представљају најнеповољнију средину за рад система за мерење протока. На избор мерне опреме могу утицати отровни, корозивни и експлозивни гасови, као и пливајући предмети различитих величина.
Такође, мерно место би требало одабрати тако да се омогући напајање инструмената и размена података са управљачком јединицом система.
- 5) Економска категорија – примена метода са већом тачношћу изискује и већа финансијска улагања. Неки јефтинији мерни инструменти имају лошије карактеристике у погледу тачности, поновљивости и робусности. Избор мерне опреме заснива се на прављењу компромиса између захтеване тачности и поновљивости инструмената и њихове цене.

1.3.Задатак и циљ истраживања

За мерење брзине у канализационим системима најчешће се примењују сензори који раде на принципу Доплеровог ефекта. Међутим ови сензори имају извесне проблеме са радом при малим дубинама и брзинама, као и у случају формирања седимената изнад кућишта сензора.

Као потенцијална алтернатива у овом Мастер раду анализирани су равни електромагнетни сензори и то Compact EM сензори.

Основни задатак био је детаљно испитивање радних карактеристика Compact EM сензора – тачности, поновљивости и робуности применом методе $V - A$ (Брзина – Протицајни пресек). Ова метода може се применити у широком спектру утицаја, укључујући и сложене услове струјања, какви се јављају у канализационим системима

(Коцуи и сарадници, 2010.). Робусност је испитана кроз процену капацитета сензора за рад под слојем порозног материјала.

Циљ Мастер рада је формирање корекционих функција за унапређење поузаности одређивања протока. Испитивања се надовезују на претходно спроведене експерименте где је анализиран други модел равних ЕМ сензора – Flat DC – 2 сензор. На крају рада су упоређене радне карактеристике ова два сензора.

2. МЕТОДЕ И УРЕЂАЈИ ЗА МЕРЕЊЕ ПРОТОКА

2.1. Метода Брзина – Протицајни пресек

За одређивање протока у токовима са слободном површином често се користи метода $V - A$, тј. Брзина – Протицајни пресек. Мерење протока одвија се посредно, помоћу два типа сензора постављених у оквиру мерног места. Први сензор је сензор притиска или нивоа који се користи за мерење дубина, а други сензор мери брзину. На основу података о дубини, h и претходно дефинисане релације између површине и дубине, $A(h)$, долази се до величине протицајног пресека. Одређивање дубине најчешће не представља проблем, међутим, одређивање средње профилске брзине је компликованије и осетљивије. Најчешће се на основу мерења једне или више брзина помоћу једног или више сензора, коришћењем одговарајуће екстраполационе или корекционе функције долази до податка о средњој профилској брзини (Kouyi и сарадници, 2010.).

2.2. Мерење брзина

У наставку ће бити описане најважније карактеристике ултразвучних и електромагнетних мерача брзина/протока.

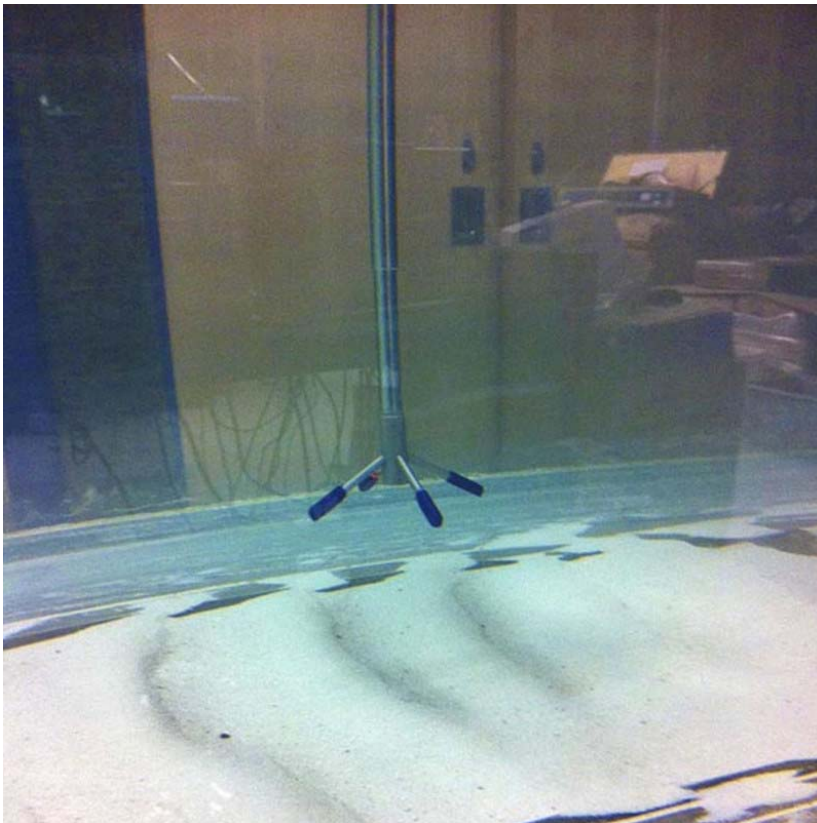
2.2.1. Ултразвучни мерачи брзина

У хидротехничким системима, за мерење брзина, односно, протока најчешће се користе ултразвучни сензори. Најпопуларнији су штапичасти ADV сензори (Acoustic Doppler Velocimeter), који се често примењују у канализационим системима због тога што су малих димензија, једноставни за постављање и економски повољни. ADV сензори су уређаји за скоро неинвазивно мерење тренутних вредности компонената брзина, у сва три координатна правца, а карактерише их предност у виду релативно велике зоне интеграције (Larrarte и сарадници, 2008.).

Употреба ADV сензора заснива се на основним хипотезама о кретању флуидних делића који се крећу истом брзином као и флуид (Larrarte и сарадници, 2008.).

ADV сензори раде на принципу Доплеровог ефекта. Приликом рефлексије ултразвука од ситних честица које се налазе у флуиду, долази до промене фреквенције. Брзина флуида је директно пропорционална промени фреквенције (Larrarte и сарадници, 2008.). Ови сензори анализирају спектар фреквенција приказујући распоред брзина унутар коничне запремине како би одредили средњу брзину унутар попречног пресека. (El Bahloulli и Larrarte, 2018.).

Ефикасна употреба ADV сензора могућа је, како у лабораторијским, тако и у теренским условима. Основни предуслов је да у води морају бити присутне суспендоване честице. Уколико у води нема довољно суспендованих честица, убацују се уситњене честице стакла приближне густине као чиста вода, тзв. Seeding (Larrarte и сарадници, 2008.).



Слика 2.1: ADV Vectrino Profiler (*преузето са <http://www.nortekusa.com/>*)

Међутим, у случају превелике концентрације суспендованих честица јављају се велике грешке у мерењима, јер долази до атенуације, односно слабљења сигнала (Hudson, 2004., Nord и сарадници, 2014.).

Прихватљива неодређеност у мерењу протока у канализационим системима креће се од 5 до 10% (Campisano и сарадници, 2013.), а неодређеност у мерењима ових сензора је чак до 30% (Иветић, 2019.). С обзиром на то да на резултате мерења доста утичу брзина и дубина, грешке у мерењима није лако поправити (El Bahlouli и Larrarte, 2018.).

Фактори који најчешће утичу на појаву великих неодређености у мерењима су:

- Неравномеран распоред концентрација суспендованих честица (Maheerala и сарадници. 2001, McIntyre и Marshall 2008., Nord и сарадници 2014);
- Отпадне воде из индустрије, које садрже велику количину уља и полутаната (Kouyi и сарадници, 2010.);
- Превелике брзине, јер у том случају долази до оштећења сензора (McIntyre и Marshall 2008.);
- Присуство мехурића ваздуха (McIntyre и Marshall 2008.);
- Храпавост – Иако је доказано да, уколико је храпавост по попречном пресеку униформна, иста не утиче на резултате мерења (Farina, 2017.), ово у теренским условима најчешће није могуће постићи;
- Седиментација преко кућишта сензора. (Maheerala и сарадници, 2001.; ИТА, 2002.; Aguilar и сарадници, 2016.). Седиментација се јавља на дисконтинуитетима хидрауличког и конструктивног карактера (Chebbo и сарадници, 1995.; Ashley и Verbanck, 1996.). Ако се ADV уређаји фиксирају за дно канала, може доћи до седиментације суспендованог наноса и осталог отпада преко кућишта сензора (Farina, 2017.). Ултразвучни таласи нису у могућности да продру кроз талог седимента од свега неколико милиметара и долази до прекида рада уређаја (Продановић и сарадници 2012).

Поред свега наведеног, ADV сензори имају и мртву зону у којој није могуће мерење брзина (El Bahlouli и Larrarte, 2018.).

2.2.2. Електромагнетни мерачи брзина

Електромагнетни мерачи брзина најчешћу примену имају у системима под притиском, због високе тачности и ниске цене, док су у системима са слободном површином нешто слабије заступљени.

2.3. Теорија ЕМ сензора

Поље теорије ЕМ технологије најинтензивније је изучавано у другој половини 20. века. Највећи број истраживања пратио је развој цевних ЕМ сензора који су пројектовани за рад у водоводним системима, односно системима под притиском. ЕМ сензори за мерење брзине/протока у отвореним токовима су такође изучавани и коришћени у пракси (Иветић, 2019.).

Без обзира да ли су поједини типови ЕМ сензора пројектовани за рад у системима под притиском или у системима са слободном површином, принцип рада им је заједнички и заснива се на Фарадејевом закону електромагнетне индукције (Иветић, 2019.).

2.3.1. Типови ЕМ сензора

У наредном делу Прегледа литературе биће наведене најважније карактеристике појединих типова ЕМ сензора.

2.3.1.1. Цевни ЕМ сензори

Цевни (конвенционални, пуноцевни) електромагнетни сензори су стандард у системима под притиском, какви су нпр. водоводни системи. Карактеристично за овај тип сензора је да целокупан попречни пресек утиче на измерени сигнал, што значи да у основи припада интегралним ЕМ сензорима, али, с обзиром на то да се примењују у системима под притиском, протицајни пресек је непроменљив, па се самим тим, на основу измереног сигнала, тј. брзине може одредити проток. (Иветић, 2019.)



Слика 2.2: Лево: Цевни ЕМ сензор који се налази у подруму лабораторије Института за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду; Десно: Претварач, логер и дисплеј за Цевни ЕМ сензор

Главна предност цевних ЕМ сензора је висока тачност и поновљивост, односно ниска мерна неодређеност протока (0,1 до 0,5%) и приступачна цена. Специфичност ових сензора је осетљивост на промену брзина (Shercliff, 1962.; Vevir, 1970.) , што је разлог за њихово постављање на праволинијским деоницама, где се очекује теоријски (логаритамски) распоред брзина. Такође, временом може доћи до промене калибрационих карактеристика, па се захтева редовна калибрација према ISO стандарду (ISO9104, 1991). (Иветић, 2019.)

Цевни ЕМ сензор коришћен је као еталонско мерило за спровођење експеримената у оквиру овог Мастер рада.

2.3.1.2. Интегрални ЕМ сензори

Код овог типа сензора, целокупан попречни пресек утиче на излазни сигнал (Steinbock и сарадници, 2016.). Мерна неодређеност није већа од 3% и може се мерити широк спектар протока, укључујући чак и мале протоке на отвореним токовима велике ширине.

Мана интегралних ЕМ сензора је висока цена уградње и експлоатације, па се стиче утисак да ће се, због тежње глобалном смањењу потрошње енергије, односно повећању

енергетске ефикасности, ови сензори све мање примењивати у будућности (Иветић, 2019.).

2.3.1.3. Локални ЕМ сензори

Заједничко за све типове локалних ЕМ сензора је да мере брзину само у њиховој непосредној околини, у знатно мањој контролној запремини, него што је то случај код интегралних ЕМ сензора. Последица овога је нижа тачност, односно виша мерна неодређеност протока (Иветић, 2019.).

Локални ЕМ сензори се могу класификовати као:

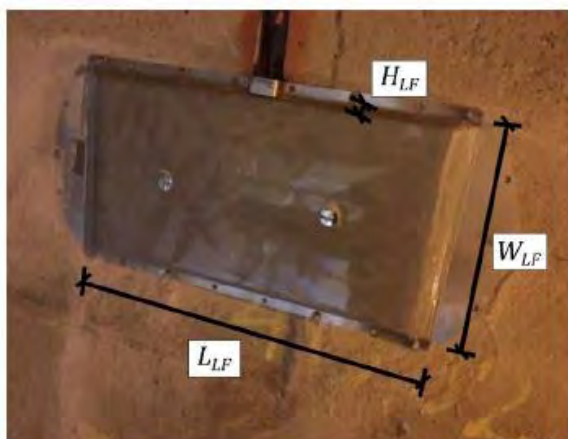
- 1) Папучасти ЕМ сензори – аутономни сензори, релативно малих димензија, који се фиксирају на дно или зид проводника и мере локалну брзину у својој непосредној околини. Величина контролне запремине зависи од карактеристика побудног калема, положаја и величине електрода и јачине електричне струје. Најчешће се примењују у токовима са слободном површином, али се могу примењивати и у системима под притиском (Иветић, 2019.).
- 2) ЕМ сензори брзине у току – у суштини сви локални ЕМ сензори који мере брзину у коначно малој запремини, која се налази на одређеној удаљености од чврсте контуре проводника. Најчешће су штапичастог облика, а могу бити фиксирани за зидове проводника или за позиционерски систем (Иветић, 2019.).
- 3) Равни ЕМ сензори су један вид папучастих ЕМ сензора. Ови сензори оригинално су пројектовани за рад у канализационим системима. Придев „равни“ односи се на облик побудних калемова унутар самих уређаја. У ову групу спадају: Compact Flat, Flat и Large Flat сензор, које производи фирма „Свет инструмената“. У зависности од модела, равни калемови различитих облика и величина су интегрисани у робусно кућиште направљено од инокс челика заливено епокси масом. Уз сензор се добија и екстерни логер података са интегрисаним NiMH акумулатором за напајање. Прикупљање података може се извршити преко серијске везе или GPRS – а. Цена Compact Flat или стандардне Flat сонде је у рангу са једносимензионалним папучастим ADV сензорима (Иветић, 2019.).

Основни предуслов за примену ових сензора је да течност поседује минималну електропроводност. Такође, потребно је проверити и тврдоћу воде, будући да при високим концентрацијама соли калцијума и магнезијума може доћи до калцификације електрода сензора. На тај начин се електроде изолују од средине, чиме се спречава генерисање напона пропорционалног брзини течења. Такође, у канализационим системима мора се узети у обзир и седиментација (Иветић, 2019.).

2.3.1.3.1. Large Flat DC – 2

Поред повољности у погледу радних карактеристика и техничких параметара, раван облик калемова омогућио је и релативно танак облик кућишта овог сензора. Иако су равни ЕМ сензори иницијално пројектовани за рад у канализационим системима, димезије Large Flat DC – 2 сензора: ширина $W_{LF} = 380$ mm, дужина $L_{LF} = 800$ mm и висина $H_{LF} = 25$ mm указују на то да је његова примена адекватнија у хидроенергетским тунелима и цевоводима.

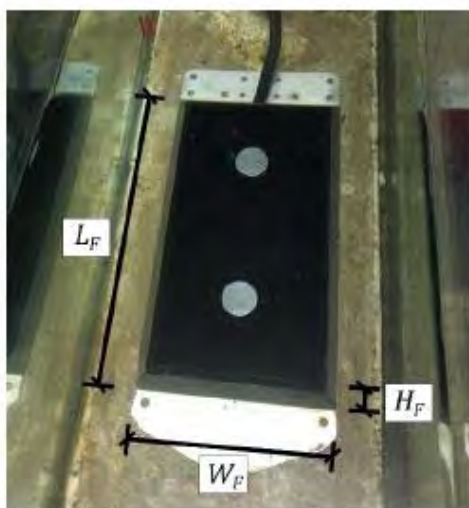
Имајући у виду велике димензије, овај сензор има и највећу контролну запремину, самим тим и најстабилнија мерења у погледу шума (Иветић, 2019.).



Слика 2.3: Large Flat DC – 2 сензор

2.3.1.3.2. Flat DC – 2

Сензор Flat DC – 2 најчешће се примењује у већим канализационим колекторима ($D > 800$ mm) и колекторима са равним дном. Димензије су: $W_F = 160$ mm, дужина $L_F = 280$ mm и висина $H_F = 23$ mm. Овај сензор има широки бидирекциони радни опсег од ± 15 m/s, што представља веома корисну карактеристику јер указује на могућност мерења веома малих брзина. Потрошња електричне енергије је променљива, под контролом корисника и зависи од јачине побудне струје и трајања узорковања. Јача побудна струја, већа фреквенција и дужи период узорковања доводе до веће стабилности у мерењу, па се у зависности од потреба корисник одлучује за компромисно решење између потрошње енергије и стабилности мерења (Иветић, 2019.).



Слика 2.4: Flat DC – 2 сензор

2.3.1.3.3. Compact Flat DC – 2

Овај тип сонде пројектован је за рад у канализационим системима, а с обзиром на своје димензије, погодан је за колекторе мањег пречника ($D < 800$ mm) или колекторе који немају равно дно.

Димензије сонде су: ширина $W_{CF} = 60$ mm, дужина $L_{CF} = 300$ mm и висина $H_{CF} = 35$ mm.

Разлика у односу на Flat DC – 2 и Large Flat DC – 2 сонде је у томе што су овде у кућишту смештени и сензор притиска и сензор брзине. Из тог разлога је нешто већа висина кућишта.



Слика 2.5: Compact Flat DC – 2 сензор

Сензор је хидраулички обликован, како би што мање утицао на струјну слику у проводнику.

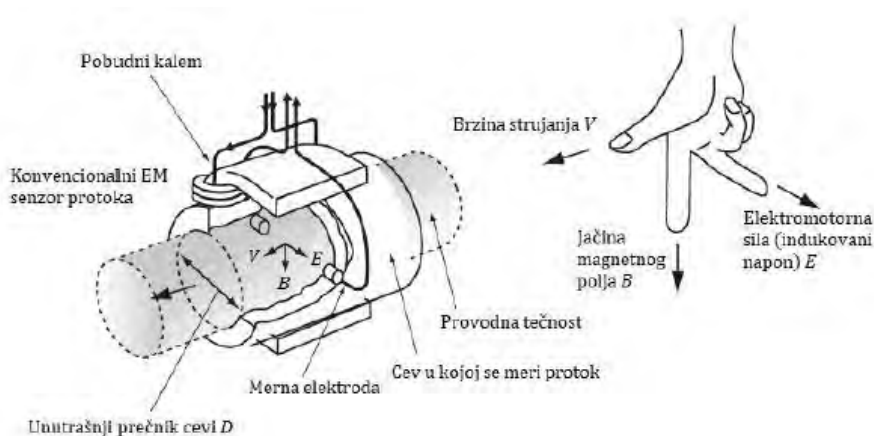
2.3.2. Математички модел ЕМ сензора

2.3.2.1. Фундаментални математички модел ЕМ сензора

Принцип рада ЕМ сензора за мерење брзине, односно протока течности заснива се на Фарадејевом закону електромагнетне индукције (Faraday, 1832.), према којем се излазни сигнал сензора (индуковани напон између електрода уређаја $U_m = U_m^1 - U_m^2$) генерише кретањем проводне течности кроз управно магнетно поље (Shercliff, 1954.; Shercliff, 1962.). Математички модел који описује Фарадејев закон електромагнетне индукције подразумева анализу феномена електромагнетизма у устаљеним условима.

Домен који се разматра је најчешће контролна или мерна запремина ЕМ сензора, означена са τ , односно запремина тока која доприноси генерисању излазног напона на

електродама U_m . Теоретски, τ може бити бесконачно велико, али у пракси само одређена коначна запремина тока утиче на индуковање излазног напона U_m .



Слика 2.6: Примена Фарадејевог закона електромагнетне индукције на цевни ЕМ сензор

За потребе математичког моделирања осетљивости конвенционалних ЕМ сензора на распоред брзина у кружним цевима, предложена је идеја да се утицај делова тока на генерисање излазног напона U_m , опише преко тежинске функције w . Наиме, узимајући у обзир чињеницу да је брзина на зидовима цеви, као и градијент потенцијала $\partial U / \partial r$, једнак нули (r – полупречник цеви), може се доћи до релације:

$$U_m^1 - U_m^2 = U_m = \int_{\tau} V(x, y, z) \cdot w \cdot d\tau \quad (2.1)$$

где је \vec{V} вектор поља брзина. Као што је приказано на слици, овај израз је изведен за цевни ЕМ сензор, што је довело до тога да τ буде тумачено као површина попречног пресека цеви која се налази под притиском. Међутим, Bevir (1970.) је сугерисао да је примереније да τ буде тумачено као контролна запремина а да се по потреби апроксимира као површина или дуж. Треба напоменути да сваки ЕМ сензор побудом калемова индукује магнетно поље просторног а не раванског карактера и да облик магнетног поља зависи од конструкције калемова. Стога је Bevir предложио ригорознији математички модел:

$$U_m = - \int_{\tau} (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{j} d\tau = \int_{\tau} \vec{V} \cdot (\vec{B} \times \vec{j}) d\tau = \int_{\tau} \vec{V} \times \vec{W} d\tau \quad (2.2)$$

при чему је \vec{B} – јачина магнетног поља, \vec{W} – тежински вектор

Вектор \vec{j} је вектор густине виртуалне струје, који се описује као густина струје која се јавља при течењу јединичне струје између електрода уређаја, без утицаја магнетног поља (Wang и сарадници, 2007.)

Увођењем концепта густине виртуалне струје омогућено је математичко и нумеричко моделирање принципа рада појединих типова ЕМ сензора (Hemp и Wyatt, 1981.). Овај математички модел изведен је за цевне ЕМ сензоре код којих је проблем дефинисања контролне запремине једноставнији, тј. контролна запремина дефинисана је зидовима цеви, у правцима управно на ток, док се у правцу тока може апроксимирати на основу домета магнетног поља (Hemp и Versteeg, 1986).

На основу једначине математичког модела (2.2) закључује се да је циљ произвођача мерних ЕМ уређаја да прилагоде магнетно поље и електроде тако да излазни сигнал не зависи од распореда брзина у току. Међутим, како је готово немогуће пројектовати и направити „идеалан“ ЕМ сензор, тежи се да сензор буде што мање осетљив на распоред брзина (Иветић, 2019.).

2.3.2.2. Упрощен математички модел ЕМ сензора

Фундаментални математички модел ЕМ сензора, којим се одзив ових уређаја описује помоћу интеграла производа три векторска поља је сложен и тешко применљив на практичне проблеме мерења протока методом $V-A$ (Иветић, 2019.).

Анализирана је могућност увођења упрошћеног математичког модела. Будући да је Фарадејев закон дефинисан правилом десне руке, главни допринос излазном сигналу даје подужна компонента векторског поља брзина V_x . Сходно наведеном, за анализу рада ЕМ сензора довољно је познавати тежинску функцију w , уместо тежинског вектора \vec{W} . Поред тежинске функције, потребно је познавати и величину контролне запремине τ . У

општем случају контролна запремина је дефинисана типом и величином побудних калемова (Иветић, 2019.).

Уколико се претпостави да распоред подужне компоненте брзине V_x не варира значајно по дужини и ширини кућишта сензора, површински и запремински интеграл се могу свести на коначни линијски интеграл, тј. на једну димензију, чиме се интеграција поља брзина и тежинске функције спроводи дуж линије управне на површину електрода. Треба напоменути да је, усвајањем овог упрошћења, анализа утицаја распореда брзина на излазни сигнал могућа само у правцу управном на електроде, односно кућиште сензора. На овај начин тежинска функција своди се на једнодимензионалну тежинску функцију $w(z)$, а контролна запремина се може описати употребом једног параметра – домет контролне запремине, τ_{max} . Домет контролне запремине дефинише се као одстојање између минималне доње и максималне горње границе линеарне интеграције. Доња граница се у општем случају одређује положајем површине електрода равних ЕМ сензора, Z_{surf} . Међутим, у случају покривке од порозног седимента, δ доња граница се дефинише као:

$$Z_L = \max \{Z_{surf}, \delta\} \quad (2.3)$$

Будући да дубина течности h , може бити и мања од збира $Z_{surf} + \tau_{max}$ горњу границу интеграције треба дефинисати на следећи начин:

$$Z_U = \min \{Z_{surf} + \tau_{max}, h\} \quad (2.4)$$

Имајући у виду наведено, измерена брзина V_{mer} се може моделирати, односно симулирати интегралом профила подужних брзина $V_x(z)$ и одговарајуће једнодимензионалне функције $w(z)$:

$$V_{mer} \cong V_{s,mer} = \frac{1}{(Z_U - Z_L)} \int_{Z_L}^{Z_U} w(z) \cdot V_x(z) dz \quad (2.5)$$

Треба напоменути да се, варирањем доње и горње границе интеграције, различити делови $w(z)$ укључују у интеграл, иако просторни распоред $w(z)$ остаје фиксиран.

Једначине (2.3) – (2.5) дефинишу упрошћени математички модел равних ЕМ сензора. Омогућавањем симулирања одзива равних ЕМ сензора, помоћу предложеног модела, олакшава се спровођење поступка локалне калибрације за разне геометријске диспозиције хидротехничких система (Иветић, 2019.).

3. МЕТОДОЛОГИЈА

3.1. Експериментална опрема

Фокус Мастер рада је испитивање радних карактеристика **Compact Flat DC – 2** електромагнетне сонде (слика 3.1) у контролисаним, лабораторијским условима. Основне карактеристике овог типа равних ЕМ сензора дате су у поглављу Преглед литературе.

Адекватно спроведена лабораторијска испитивања омогућавају минимизирање утицаја стохастичности услова средине на рад уређаја. Самим тим, могу се дефинисати узрочно – последичне везе које описују осетљивост мерног инструмента. Лабораторијска испитивања служе за еталонирање мерних карактеристика уређаја, од којих су најбитнији тачност и поновљивост. Поред тачности и поновљивости битна карактеристика је и робусност, односно способност сензора за рад под покривком од порозног седимента.



Слика 3.1: *Compact Flat DC – 2* сензор произвођача „Свет инструмента“

Сонда је постављена по подужној оси канала, као што је приказано на слици 3.1. Логер сонде је био прикључен на константан извор напајања, а подаци о брзини, дубини и импеданси су прикупљани преко серијске везе.

3.2. Лабораторијске инсталације

3.2.1. Велики лабораторијски канал

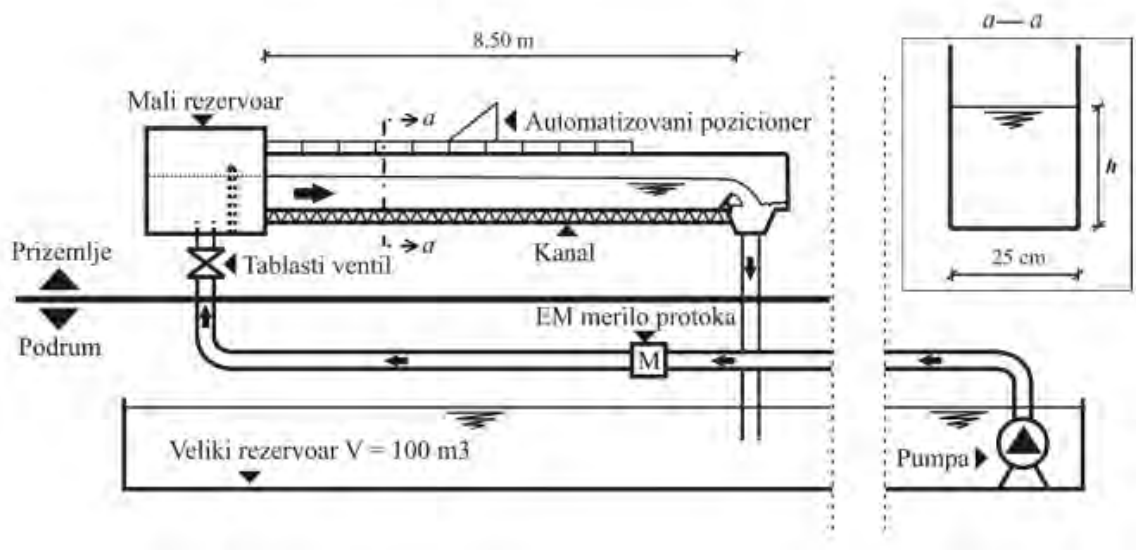
За потребе експерименталног испитивања радних карактеристика Comrast EM сонде коришћена је инсталација у лабораторији Института за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду.

Дужина канала је приближно 8 m. Попречни пресек је правоугаоног облика са ширином дна од 25 cm. Зидови канала су од стакла а дно је од алуминијума. Максимални проток је приближно 50 l/s, а највећа дубина је око 45 cm.



Слика 3.2: Лабораторијска инсталација – велики канал у лабораторији Института за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду

Мерни канал је део затвореног, рецикулационог система.



Слика 3.3: Лабораторијска инсталација као део затвореног, рециркулационог система

Поред канала, систем се састоји од доводног и одводног цевовода са регулационим и изолационим вентилима, великог и малог резервоара и пумпе са променљивим бројем обртаја.

Мали резервоар служи за умирење воде из довода, а уједно и за сваки различит проток, Q представља узводни гранични услов са константним нивоом. Вода се у мерни канал подиже из великог резервоара у подруму лабораторије, помоћу пумпе „Ebara“.

Број обртаја радног кола пумпе, а самим тим и проток у каналу може се подешавати помоћу фреквентног регулатора који се налази у приземљу лабораторије. За потребе испитивања везаног за Мастер рад, број обртаја пумпе био је подешен на 651 обртај/min.



Слика 3.4: Пумпа „Ebara“ која се налази у подруму лабораторије

Потисни цевовод изграђен је од челичних цеви пречника 200 mm, дужине око 30 m. На потисном цевоводу налази се и еталонски цевни ЕМ сензор. Такође, на цевоводу је постављен и вентил, који омогућава испуштање ваздуха из цеви. Ваздух је потребно испустити јер у супротном може утицати на резултате мерења. Пред сам улазак у мали резервоар, налази се регулациони табласти затварач, који служи за контролу протока у каналу.



Слика 3.5: Табласти затварач за регулацију протока кроз лабораторијски канал

Дубина воде у каналу може се подешавати на основу положаја уставе, која се налази на крају канала.



Слика 3.6: Устава постављена у великом лабораторијском каналу

Вода из канала поново одлази у велики резервоар и на тај начин кружи у систему.

3.2.2. Мали канал

На великом лабораторијском каналу, а са датим бројем обртаја пумпе није било могуће развити брзине веће од 1 m/s.

Како би се испитале карактеристике сонде и у случају већих брзина, коришћен је мали канал (МК) у учионици Института за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство, који је приказан на слици 3.6.

Канал је правоугаони, ширине $Bk = 12,2$ cm, са зидовима од стакла и дном од алуминијума.



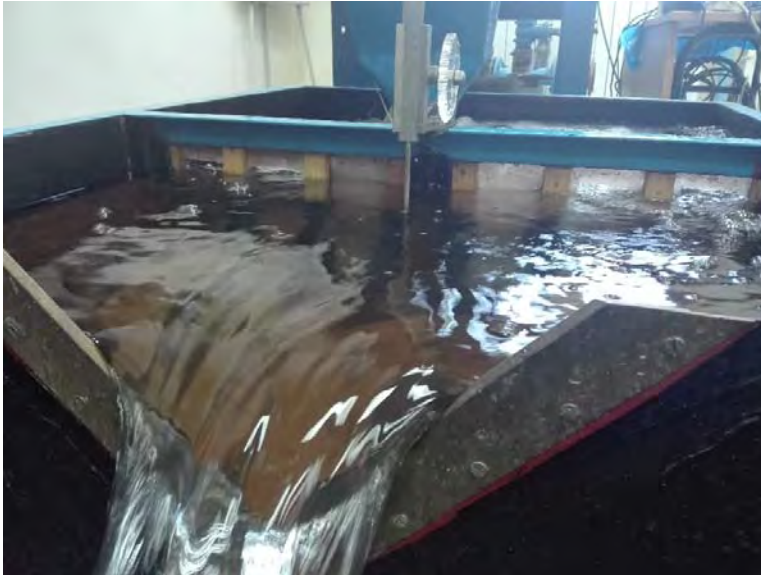
Слика 3.7: Лабораторијска инсталација – мали канал (МК) у учионици Института за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство

Као еталонско мерило, коришћен је цевни ЕМ сензор „Endress – Hauser“, који директно показује проток.



Слика 3.8: Еталонско мерило - цевни ЕМ сензор „Endress Hauser“ у учионици Института

Како не можемо бити у потпуности сигурни у тачност протока одређеног преко цевног ЕМ сензора, за поређење користимо Томсонов прелив.



Слика 3.9: Томсонов прелив

3.3. Експериментална процедура у стандардним условима

Експериментална процедура у стандардним, фактички идеалним, условима спроведена је на две лабораторијске инсталације – на великом каналу, где су спроведена мерења при различитим положајима уставе и уз присуство рампи, и на малом каналу, где је променом нагиба изазвана промена дубине и брзине.

3.3.1. Велики канал

3.3.1.1. Мерења са различитим положајима уставе

У мерном каналу достигнута је почетна дубина за $Q = 0$, а затим је проток повећан отварањем табластог вентила.

Пре мерења, достигнути су устаљени услови течења за сваки од испитаних протока. Да би се проток усталио, било је потребно у просеку око 5 min. Достигнута устаљеност

одржавана је у току 3 – 4 min. Овај период се назива „мерни период“ и означен је са j . За сваки мерни период забележена је јединствена еталонска дубина $h_{B,j}$ а на сваких 30 s забележено је i – то мерење са Comract сензором – $V_{EMV,i,j}$ и $H_{EMV,i,j}$. Поред наведених података, сонда је бележила и податке о импеданси, тј. електричној отпорности, која није предмет овог Мастер рада.

Паралелно, проток на еталонском цевном мерилу бележен је са фреквенцијом од 1Hz и наконатно осредњен, како би се добила вредност $Q_{EMF,i,j}$. Број мерења i , за сваки мерни период j , био је $n = 5$. Еталонске вредности дубина, h_B одређене су читавањем помоћу лењира који је постављен на зид канала, а чији је положај претходно проверен помоћу мерне игле. Еталонска средња брзина V_B срачуната је на основу еталонског мерења протока, који се може очитати помоћу цевног мерача протока и површине A , која се добија познатом релацијом $A(h_B)$.

$$V_B = \frac{Q_{EMF,i,j}}{A(h_B)} \quad (3.1)$$

Спроведена су три испитивања, за три различита положаја уставе – најнижи (VK1), средњи (VK2) и највиши положај уставе (VK3).



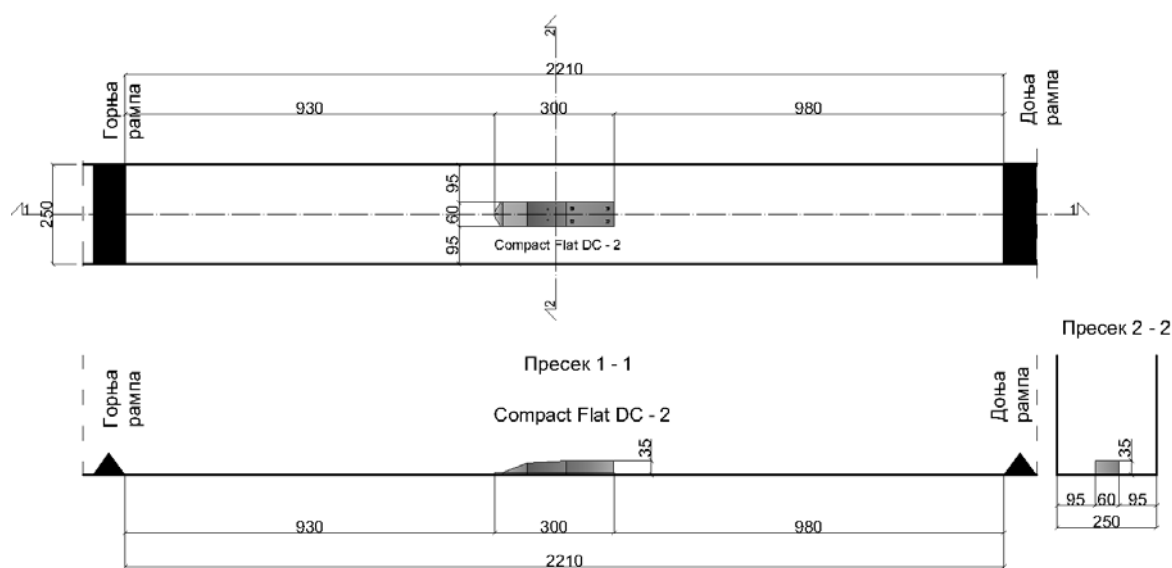
Слика 3.10: Три различита положаја уставе; слева: најнижи (VK1), средњи (VK2) и највиши (VK3)

Различити положаји уставе омогућили су испитивање радних карактеристика сензора за већи опсег брзина.

3.3.1.2. Мерења са рампом у великом каналу

Пре спровођења експеримената у условима седиментације кућишта сензора, било је потребно спровести и додатно испитивање у стандардним условима, у случају када је устава потпуно подигнута, а узводно и низводно од сонде постављене рампе. Будући да су рампе постављене и у експериментима у условима седиментације кућишта сензора, због потребе да се спречи померање слоја порозног седимента, сврха овог испитивања је да се елиминишу утицаји рампи, тј. да утицај на мерења брзине и дубине у условима седиментације кућишта сензора има искључиво порозни седимент.

Експериментална процедура је идентична као и у случају са различитим положајима уставе.



Слика 3.11: Лабораторијска инсталација – велики канал, са рампама

3.3.2. Мерења у малом каналу

Експеримент у малом каналу који се налази у учионици Института спроведен је при константном протоку. За одређивање тог протока коришћени су цевни ЕМ сензор „Endress – Hauser“ и Томсонов прелив.

Сврха експеримента је да се радне карактеристике сонде испитају за брзине веће од 1 m/s, што није било могуће спровођењем експеримената са различитим положајем устава.

Поступак мерења протока помоћу Томсоновог прелива састоји се у читавању висине преливног млаза помоћу нонијуса, што се убацује у израз за проток:

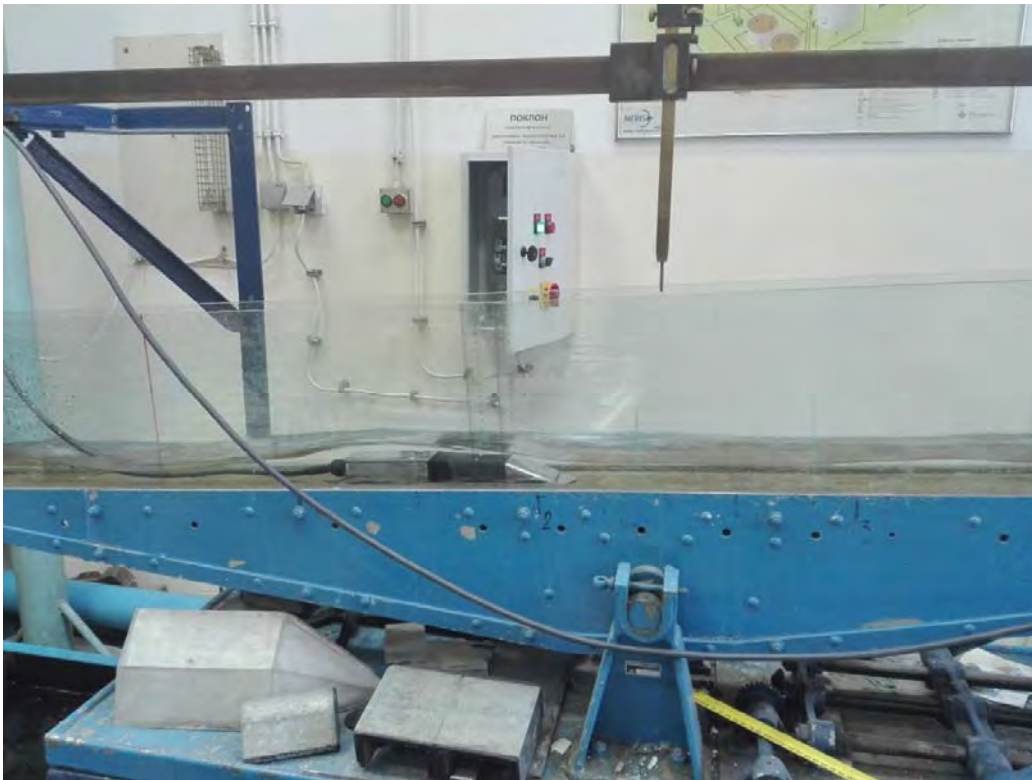
$$Q = C_Q \cdot \sqrt{2gh^5} \quad (3.2)$$

$C_Q = 0,32$ – коефицијент протока (за прелив чије се ивице секу под правим углом)

$h = 11,82$ cm – висина преливног млаза

С обзиром на то да су за еталонски проток добијене две различите вредности применом цевног ЕМ сензора и коришћењем изрази за проток преко Томсоновог прелива, као еталонски проток усвојена је средња вредност ова два протока. Еталонска брзина V_B срачуната је на основу еталонског протока и површине A , која се добија релацијом $A(h_B)$, уз помоћ дубине која се читава у каналу.

Различите брзине и дубине у каналу постигнуте су променом нагиба канала – повећањем нагиба смањује се дубина и повећава брзина.



Слика 3.12: Мерење помоћу Comract EM сонде при различитим нагибима малог канала

Да би се проток усталио, било је потребно у просеку око 5 min. Достигнута устаљеност одржавана је у току 3 min. За сваки мерни период j забележена је јединствена дубина $h_{B,j}$ а на сваких 30 s забележено је i -то мерење са Comract сензором – $V_{EMV,i,j}$ и $H_{EMV,i,j}$. Број мерења i , за сваки мерни период j , био је $n = 5$.

3.4. Процена мерне неодређености у стандардним условима

Експерименталним испитивањем долази се до података о радним карактеристикама Comract EM DC – 2 сонде – тачности, поновљивости и робусности. За квантификовање ових параметара коришћен је појам мерне неодређености.

На почетку је најбитније направити разлику између појмова „грешка“ и „мерна неодређеност“. Грешка се дефинише као одступање измерене вредности од тачне вредности. Међутим, тачна вредност се зна само приликом калибрације, док у осталим

ситуацијама не може се са сигурношћу знати колика је тачна вредност, па самим тим не може се знати ни колика је грешка мерења. Због тога се уместо појма „грешка“ користи појам „мерна неодређеност“. Најновија дефиниција мерне неодређености гласи: Мерна неодређеност је расипање око вредности која се оправдано може доделити мерној величини (Иветић, 2019.).

Као директни пандани тачности и поновљивости мерних уређаја могу се користити систематска (eng. Bias uncertainty), $u(V)_b$ и статистичка неодређеност (eng. Precision uncertainty), $u(V)_p$ (Coleman и Steele, 1995.). Поред ове две компоненте постоји још и неодређеност еталона (eng. Benchmark uncertainty), $u(V)_B$ (Иветић, 2019.).

Ове три компоненте заједно чине комбиновану неодређеност (eng. Combined uncertainty), $u(V)_c$.

3.4.1. Еталонска неодређеност

Еталонска неодређеност $u(V)_B$ може се дефинисати као минимална неодређеност која се може обезбедити за одређени податак на одређеној лабораторијској инсталацији. Неодређеност еталона позната је и као неодређеност неког система (епистемска неодређеност) (Иветић, 2019.).

Еталонску неодређеност мерења средње профилске брзине и дубине није могуће квантификовати у теренским условима и зато се мора дефинисати приликом лабораторијских испитивања, уз напомену да је ово горња граница тачности која се може обезбедити на терену (Иветић, 2019.).

Будући да је еталонска вредност средње профилске брзине добијена на основу мерења еталонског протока и површине протикајног пресека срачунате преко еталонске дубине, неодређеност еталона се дефинише по принципу пропагације неодређености за проток и дубину (Coleman и Steele, 1995., JCGM, 2008.):

$$u(V)_B = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial Q}\right)^2 \cdot u(Q)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h}\right)^2 \cdot u(h)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial w}\right)^2 \cdot u(w)^2} \quad (3.3)$$

На основу једначине може се закључити да вредност еталонске неодређености варира са измереним дубинама и протоцима и због тога је за неодређеност еталона усвојена вредност која одговара горњој граници интервала поверења од 95% и износи $u(V)_B = 0.015 \text{ m/s}$.

3.4.2. Систематска неодређеност

Систематска неодређеност измереног податка о брзини, дефинише се као разлика еталонске вредности ($\overline{V}_{B,j}$) и средње вредности i мерења у j – том мерном периоду ($\overline{V}_{EMV,j}$).

Вредност систематске неодређености серије мерења може се срачунати као стандардна грешка резидуала мерења, коришћењем једначине за квадратни корен из средњег квадратног одступања:

$$u(V)_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\overline{V}_{B,j} - \overline{V}_{EMV,j})^2}{N-2}} \quad (3.4)$$

Први корак је визуелно поређење измерених и еталонских вредности брзина, коришћењем референтне линије (линије идеалног слагања), а затим се, због сагледавања хидрауличких услова, резидуали мерења ($\overline{V}_{B,j} - \overline{V}_{EMV,j}$) наносе на график у функцији дубине, средње профилске брзине и Фрудовог броја. Ови параметри су наведени као систематски утицаји на мерења средње профилске брзине. За уклањање систематских утицаја користи се корекциона функција, како би се кориговане вредности приближиле линији идеалног слагања. Након овог корака, може се одредити коригована вредност систематске неодређености - $u(V)_{b,adj}$ (Иветић, 2019.).

3.4.3. Статистичка неодређеност

Статистичка неодређеност, $u(V)_p$ дефинише се као случајно одступање измерених брзина око средње вредности услед стохастичности електричних услова и услова средине. Вредности статистичке неодређености су процењене као стандардна девијација

$S_{EMV,j}$ од $n = 4$ мерења средње профилске брзине за N мерних периода при устаљеним условима.

Вредности стандардне девијације $S_{EMV,j}$ наносе се на график у функцији од хидрауличких параметара - дубине, средње профилске брзине и Фрудовог броја. Уколико не постоји тренд који прати зависност између ових величина, статистичка неодређеност се одређује као медијана свих срачунатих стандардних девијација $S_{EMV,j}$ (Иветић, 2019.).

3.4.4. Комбинована неодређеност

Комбинована неодређеност $u(V)_c$ одређује се као квадратни корен збира квадрата компонената неодређености – систематске, статистичке и еталонске неодређености:

$$u(V)_c = \sqrt{u(V)_B^2 + u(V)_{b,adj}^2 + u(V)_p^2} \quad (3.5)$$

3.5. Експериментална процедура у условима седиментације

Због потребе да се провери робусност Comract ЕМ сензора, тј. способност рада под слојем порозног седимента, спроведено је 10 експеримената приликом којих је сензор био прекривен слојем песка дубина $\delta_m = \{10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80 \text{ mm}\}$. Песак није вештачки сабијан, само је горња површина поравната како би се постигла константна дубина седимента δ_m у целој тест зони.

Употреба песка је оправдана с обзиром на то да је већина седимената у кишним канализацијама (и нешто мање у општим канализационим системима) неорганског порекла и растресита, тј. некохерентна (Butler и сарадници, 2003.).

Узводно и низводно од сензора постављене су рампе, као што је приказано на слици 3.11, а устава је потпуно подигнута.



Слика 3.13: Лево – сонда под слојем седимента од 80 mm; десно – сонда под слојем седимента од 35 mm

Експериментална процедура је идентична као у стандардним условима рада сензора, с тим што је максимална средња профилска брзина ограничена на 0,3 m/s, јер би у супротном дошло до покретања наноса и формирања наносних формација – дина, које осим промене хидрауличких услова у каналу (Banasiak, 2008.), изазивају и неконтролисане просторне и временске варијације дубине седимента. Услед рестрикције воде иза круна дина, мерења равном сондом губе линеарност (Иветић, 2019.), што доводи до великих мерних неодређености.

3.6. Процена мерне неодређености у условима седиментације

Да би се одредио капацитет било ког сензора брзине за рад под покривком од порозног седимента, неопходна је одговарајућа процедура за еталонирање мерне неодређености, која би требало да одговори на питање: Колико тачно сонда може да измери брзину под покривком од одређеног материјала и одређене дубине?

За еталонирање мерне неодређености Compact EM сензора у условима седиментације предложен је линеарни регресиони модел (CFM – Correction Function Model). Основна претпоставка за примену овог модела је да се систематски утицај порозног седимента може редуковати преко одговарајућих линеарних корекционих функција f_c , која је дефинисана преко два параметра – нагиба α и одсечка β . Нагиб дефинише појачање

измерене вредности (средње профилске брзине), а одсечак представља клизање нуле услед присуства порозног седимента (Иветић, 2019.).

Предложена је процедура за еталонирање мерне неодређености:

- 1) Анализа мерне неодређености – еталонирање мерне неодређености на сваком m – том скупу измерених података
- 2) Дефинисање корекционих функција. Свака функција има облик:

$$\overline{V}_{B,k,m} = \frac{\overline{V}_{EMV,k,m} - \beta_m}{\alpha_m} \quad (4.1)$$

- 3) Провера тренда – уколико је тренд присутан, потребно је дефинисати одговарајући математички модел
- 4) Дефинисање граница примене модела параметара α и β . Претпоставља се да при малим дубинама порозног седимента неће доћи до битнијег утицаја на рад сензора. Вредност δ_m при којима долази до појаве систематске неодређености дефинише доњу границу применљивости модела. При великим дубинама седимента долази до изражене атенуације, тј. слабљења сигнала, што представља горњу границу применљивости модела
- 5) Моделирање параметара корекционих функција, α и β – примена регресионе анализе над параметрима корекционих функција, чији су резултат два нова мета модела за предикцију параметара $\alpha_{m,mod} = f_{amp}(\delta_m)$ и $\beta_{m,mod} = f_{zero}(\delta_m)$. Дефинисањем ових модела дефинише се и модел корекционе функције.
- 6) Валидација модела корекционе функције – корекција измерених брзина применом CFM – а.
- 7) Процена применљивости CFM – а – заснива се на примени емпиријског критеријума према коме је модел применљив до оне дубине седимента до које је њена коригована комбинована неодређеност мања од двоструке вредности кориговане комбиноване неодређености у стандардним условима. (Иветић, 2019.)

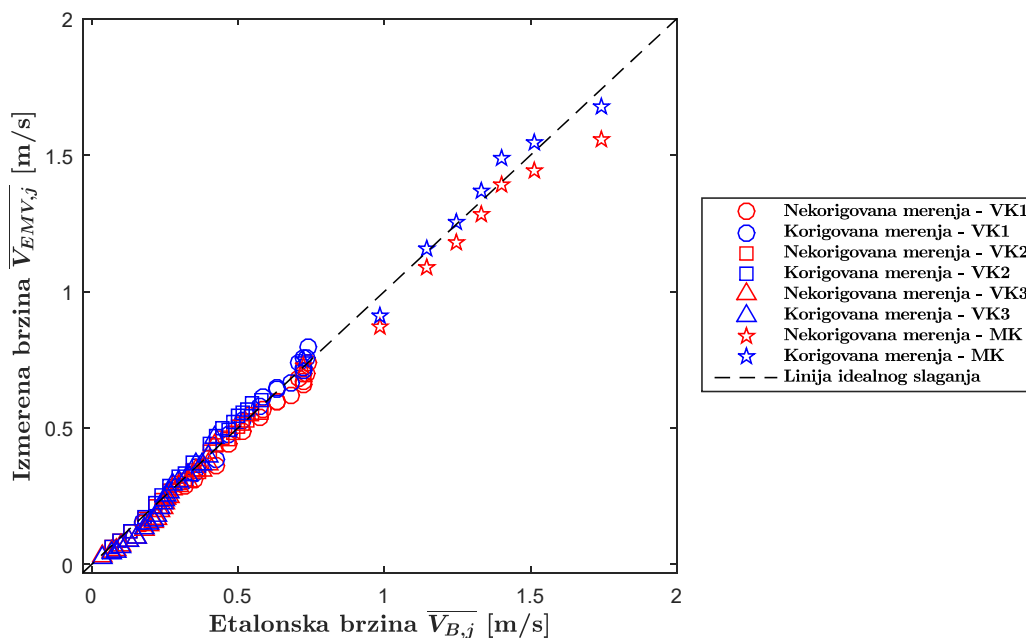
4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

4.1. Мерна неодређеност Compact EM сонде у стандардним условима

4.1.1. Мерне неодређености у случају мерења са различитим положајима уставе и у случају мерења на малом каналу

Након спроведених експерименталних испитивања на великом каналу при различитим положајима уставе и на малом каналу при различитим нагибима дна канала, добијени су резултати у виду еталонске и брзине измерене помоћу Compact EM сонде.

Прво је извршена визуелна инспекција резултата на графику који приказује однос измерене и еталонске брзине.



Слика 4.1: Дијаграм зависности еталонских и измерених брзина на великом каналу, за три различита положаја уставе и на малом каналу

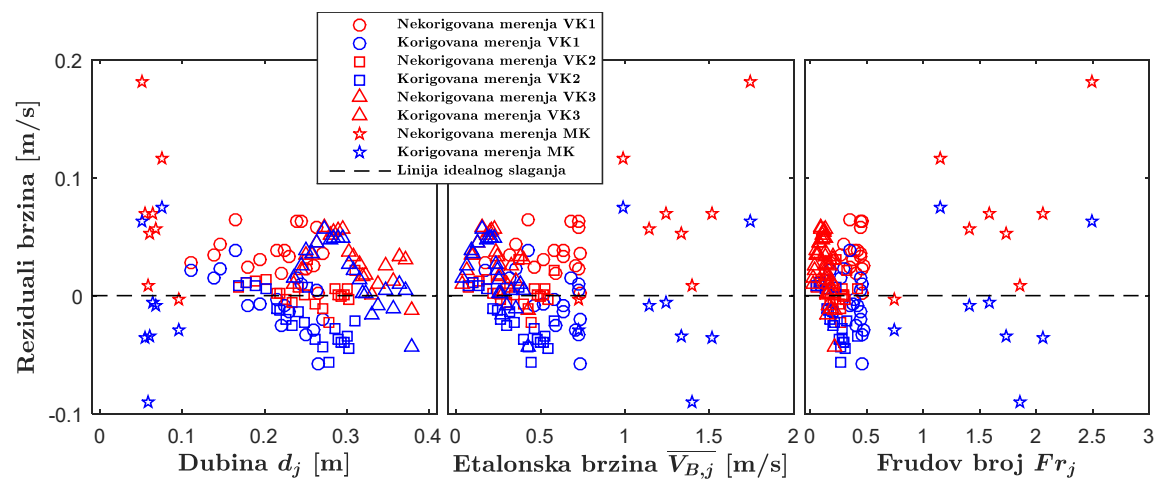
Може се приметити да измерене брзине за цео опсег мерења имају добро поклапање са еталонским вредностима брзина, чак и без корекције излазног сигнала. Такође, за исти

опсег мерења, уочава се и задовољавајућа линеарност сензора у мерењу брзина. Ово је посебно изражено у случају мањих брзина.

С обзиром на то да мерења сонде показују линеарност, корекциона функција за редуковање систематских утицаја мерења може се представити у линеарном облику. Након корекције за цео испитани опсег брзина постоји добро поклапање експерименталних тачака са линијом идеалног слагања.

Корисно је напоменути следеће: Различити положаји уставе омогућили су да се експерименти спроведу за знатно већи опсег брзина него уколико би био само један положај уставе. Претпостављено је да, осим овога, уставе немају других битнијих утицаја, те је за све три групе мерења коришћена иста корекциона функција. Са друге стране, у малом и великом лабораторијском каналу разликују се димензије инсталације, нагиб, режим течења итд. Због тога је на резултате мерења на малом лабораторијском каналу примењена друга корекциона функција. Коришћењем исте корекционе функције, не би се добило најбоље поклапање измерених и еталонских брзина.

Да би се установила природа, тј. порекло систематских утицаја хидрауличких параметара, на Слици 4.2 приказане су зависности резидуала мерења од дубине, еталонске брзине и Фрудовог броја.



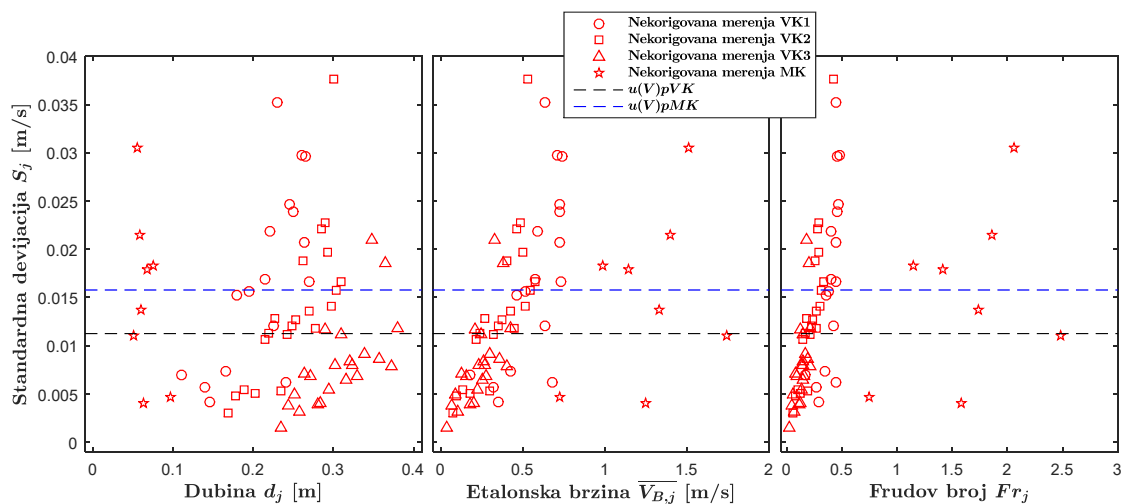
Слика 4.2: Дијаграм зависности резидуала мерења брзина од дубине, еталонске брзине и Фрудовог броја

На дијаграму се уочава релативно јасна зависност резидуала брзина и разматраних хидрауличких параметара.

Може се уочити да вредности резидуала опадају са повећањем дубине, смањењем брзине и смањењем Фрудовог броја, што одговара ситуацији када се јавља миран режим течења.

Треба напоменути да се редуковањем систематске неодређености ЕМ сонда практично локално калибрише на услове у мерном каналу (Иветић, 2019.).

За процену статистичке неодређености претходно је потребно извршити визуелну инспекцију дијаграма који је приказан на Слици 4.3, а који приказује зависност стандардне девијације од хидрауличких параметара – дубине, еталонске средње профилске брзине и Фрудовог броја.



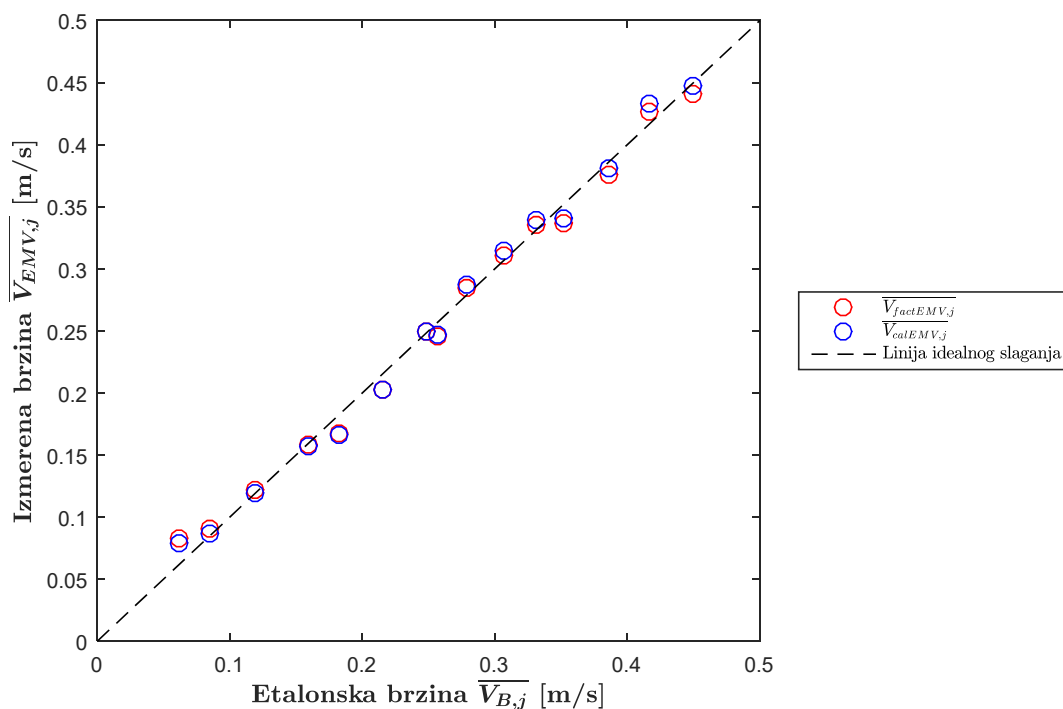
Слика 4.3: Дијаграм зависности стандардне девијације брзине од дубине, еталонске брзине и Фрудовог броја

Може се уочити да између стандардне девијације брзине и дубине воде у каналу не постоји јасно изражена корелација. Између стандардне девијације и еталонске брзине, као и између стандардне девијације и Фрудовог броја постоји растући тренд. Претпоставља се да са порастом брзине, одвајање турбулентних вртлога почиње значајније да утиче на резултате мерења, али су потребна даља испитивања како би се та претпоставка потврдила (Иветић, 2019.).

Комбинована неодређеност добија се на основу систематске, статистичке и еталонске неодређености у стандардним условима. То је у ствари комбинована неодређеност која важи за идеалне услове и представља минималну неодређеност која се може јавити.

4.1.2. Мерна неодређеност у случају потпуно подигнуте уставе и рампи постављених у великом каналу

Као што је већ наведено, спровођење експеримената у стандардним условима уз присуство рампи у каналу, омогућава формирање калибрационе функције помоћу које ће се у условима седиментације елиминисати утицаји рампи и узети у обзир само утицај порозног седимента на процену мерне неодређености.

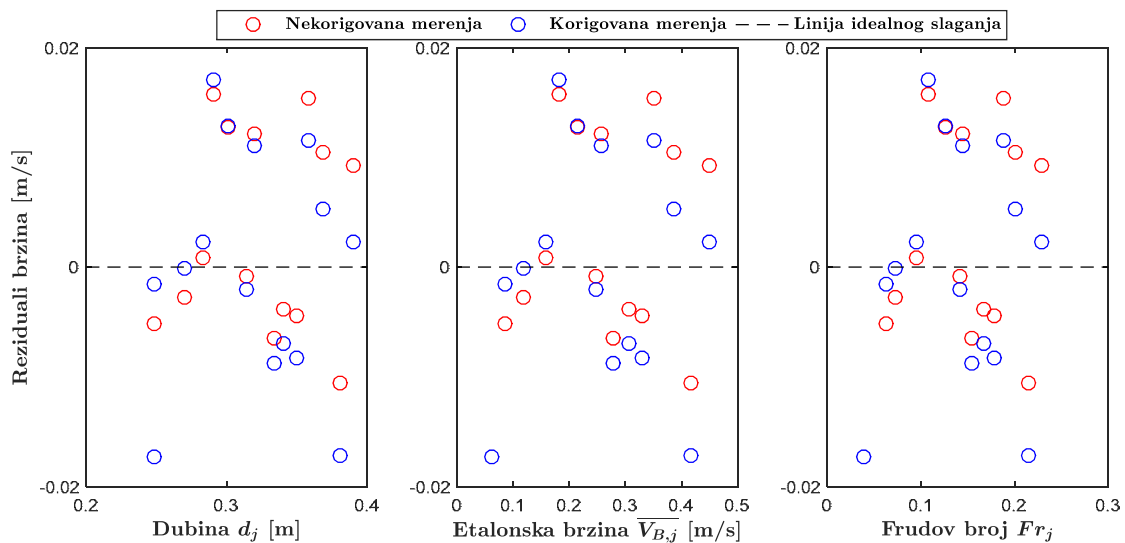


Слика 4.4: Дијаграм зависности еталонских и измерених брзина на великом каналу, при потпуно подигнутој устави и постављеним рампама

Визуелном инспекцијом дијаграма са слике 4.4 може се закључити слично као и у претходном подпоглављу, тј. да се и кориговане и некориговане вредности измерених

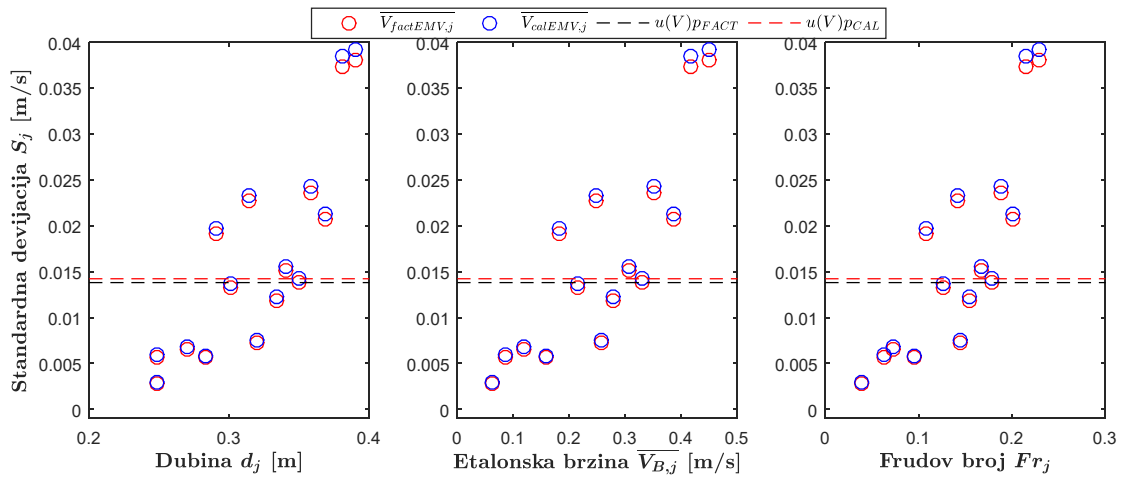
брзина добро поклапају са еталонским вредностима средњих профилских брзина и да Comract EM сонда показује задовољавајућу линеарност за дати опсег брзина.

Дијаграм на слици 4.5 показује зависност резидуала брзина од дубине, еталонске средње профилске брзине и Фрудовог броја. Не може се уочити јасна корелација између резидуала брзина и наведених хидрауличких параметара. За јасније дефинисање ових корелација потребно је спровести већи број мерења.



Слика 4.5: Дијаграм зависности резидуала мерења брзина од дубине, еталонске брзине и Фрудовог броја

На слици 4.6 приказана је зависност стандардне девијације мерења брзина од дубине, еталонске брзине и Фрудовог броја. На дијаграму се не може уочити корелација између стандардне девијације и наведених параметара и због тога се вредност статистичке неодређености усваја као медијана стандардних девијација свих мерења. Медијана је вредност стандардне девијације која се најчешће понавља.



Слика 4.6: Дијаграм зависности стандардних девијација брзина од дубине, еталонске брзине и Фрудовог броја

4.1.3. Поређење радних карактеристика Compact Flat DC – 2 и Flat DC – 2 сонде у стандардним мерним условима

У наредној табели приказани су резултати експеримената спроведених коришћењем Compact EM сензора у стандардним условима – систематска, статистичка, еталонска и комбинована неодређеност. Поред неодређености, наведене су корекционе функције у случају мерења на великом каналу (VK), при различитим положајима уставе, затим у случају када постоје узводна и низводна рампа у великом каналу и коначно, у случају мерења на малом каналу.

Мерно место	Број мерних периода	Корекциона функција	Некоригована систематска неодређеност [m/s]	Коригована систематска неодређеност [m/s]	Статистичка неодређеност [m/s]
VK	60	(V - 0.0069)/0.9164	0.0314	0.0293	0.0113
MK	8	(V - 0.050)/0.900	0.1017	0.0594	0.0158
VK + рампа	15	(V - 0.006)/0.9708	0.0109	0.0109	0.0138
Мерно место	Број мерних периода	Корекциона функција	Еталонска неодређеност [m/s]	Некоригована комбинована неодређеност [m/s]	Коригована комбинована неодређеност [m/s]
VK	60	(V - 0.0069)/0.9164	0.015	0.0365	0.0348
MK	8	(V - 0.050)/0.900	0.015	0.104	0.0633
VK + рампа	15	(V - 0.006)/0.9708	0.015	0.0234	0.0234

Табела 4.1: Еталонирање мерне неодређености у стандардним условима

Може се приметити да је најмања комбинована коригована мерна несигурност у стандардним условима, у случају када су мерења спроведена на великом каналу, при потпуно подигнутој устави и са рампама. Ово је и очекиван резултат с обзиром на то да се при подигнутој устави јављају највеће дубине, односно најмање брзине. Самим тим, као што је већ и наведено, јављају се и мање мерне неодређености. Потребно је напоменути да се коригована и некоригована мерна несигурност у овом случају не разликују (или се разликују занемарљиво мало) из разлога што је калибрацијом било могуће поправити само статистичку мерну неодређеност, која је пре калибрације износила 0,0142.

Такође, извршено је поређење радних карактеристика Compact Flat DC – 2 и Flat DC – 2 сонде за случај мерења при различитим положајима уставе.

<i>Тип сензора</i>	<i>Број мерних периода</i>	<i>Корекциона функција</i>	<i>Некоригована систематска неодређеност [m/s]</i>	<i>Коригована систематска неодређеност [m/s]</i>	<i>Статистичка неодређеност [m/s]</i>
Compact Flat	60	(V - 0.0069)/0.9164	0.0314	0.0293	0.0113
Flat	114	(V - 0.020)/0.790	0.128	0.015	0.006
<i>Тип сензора</i>	<i>Број мерних периода</i>	<i>Корекциона функција</i>	<i>Еталонска неодређеност [m/s]</i>	<i>Некоригована комбинована неодређеност [m/s]</i>	<i>Коригована комбинована неодређеност [m/s]</i>
Compact Flat	60	(V - 0.0069)/0.9164	0.015	0.0365	0.0348
Flat	114	(V - 0.020)/0.790	0.015	0.129	0.023

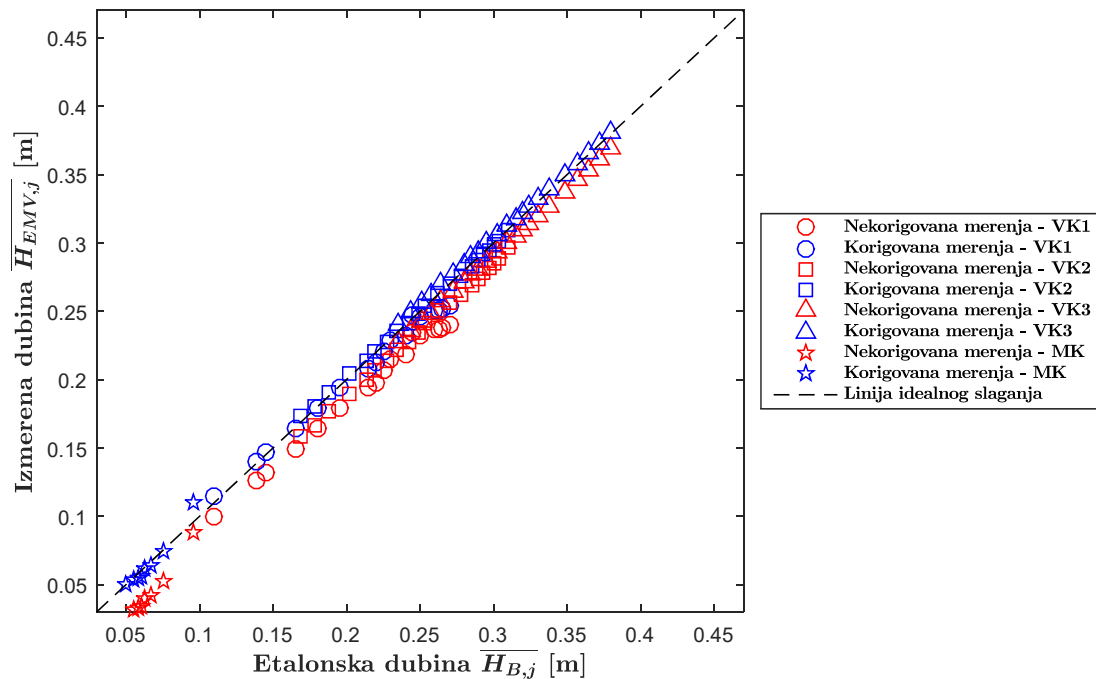
Табела 4.2: Поређење резултата еталонирања мерне неодређености у стандардним условима између Compact Flat DC – 2 и Flat DC – 2 сонде

На основу резултата приказаних у табели може се приметити да Compact EM сонда има боље поклапање некоригованих измерених вредности са еталонским вредностима брзина него Flat сонда, што се може видети кроз вредности некориговане комбиноване неодређености. Након калибрације, Flat сонда има мање вредности кориговане комбиноване неодређености него Compact EM сонда.

Међутим, вредности комбинованих неодређености у стандардним условима представљају минималне вредности неодређености које се могу јавити у датом мерном систему. Од практичног значаја је еталонирање мерне неодређености у условима седиментације, какви се, по правилу, јављају у канализационим системима. Тек тада ће бити могуће дефинисање радног опсега сонде.

4.1.4. Резултати мерења дубина у стандардним условима

За потребе Мастер рада паралелно са мерењем брзина спроведена су и мерења дубина. Извршена је визуелна инспекција дијаграма зависности еталонске и мерене дубине, који је приказан на наредној слици. Корекција излазног сигнала Compact EM сензора извршена је на идентичан начин као за случај корекције измерених брзина.



Слика 4.7: Дијаграм зависности измерених и еталонских вредности дубина у стандардним условима за мерења спроведена на великом и малом каналу

Може се приметити да након калибрације измерене вредности дубина имају добро поклапање са еталонским вредностима дубина. Као што је био случај код мерења брзина, и у овом случају сонда показује задовољавајућу линеарност.

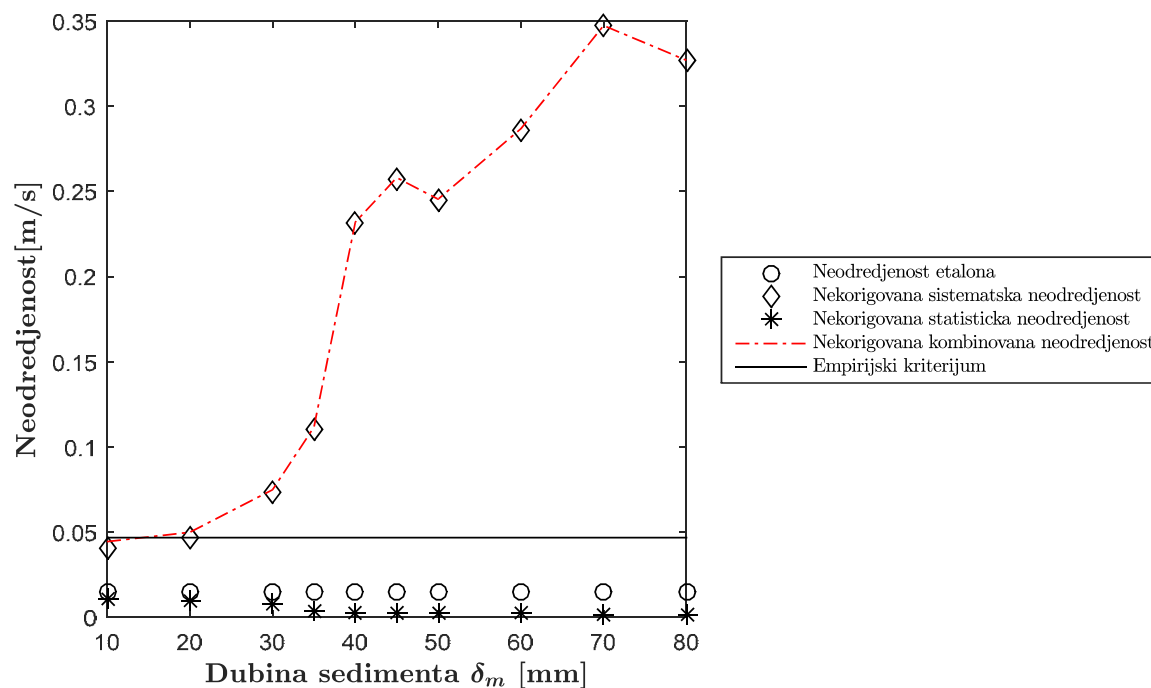
4.2. Мерна неодређеност Compact EM сонде у условима седиментације

Након спроведених експерименталних испитивања, извршена је визуелна инспекција резултата. Уочено је да није било прекида у раду уређаја, али да је, у зависности од дубине порозног седимента, дошло до атенуације сигнала.

Применом експерименталне методе у стандардним условима, дефинисана је корекциона функција помоћу које се елиминише утицај рампи на резултате мерења.

CFM модел је валидиран кроз следеће кораке:

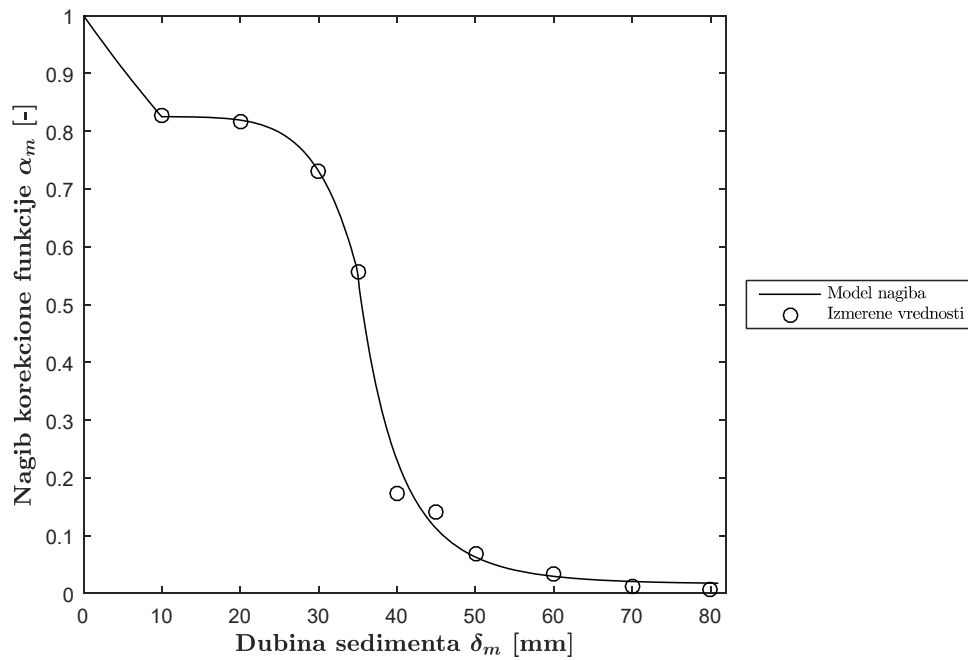
- 1) Анализа мерне неодређености: вредности компонената неодређености у зависности од дубине седимента приказане су на следећем дијаграму:



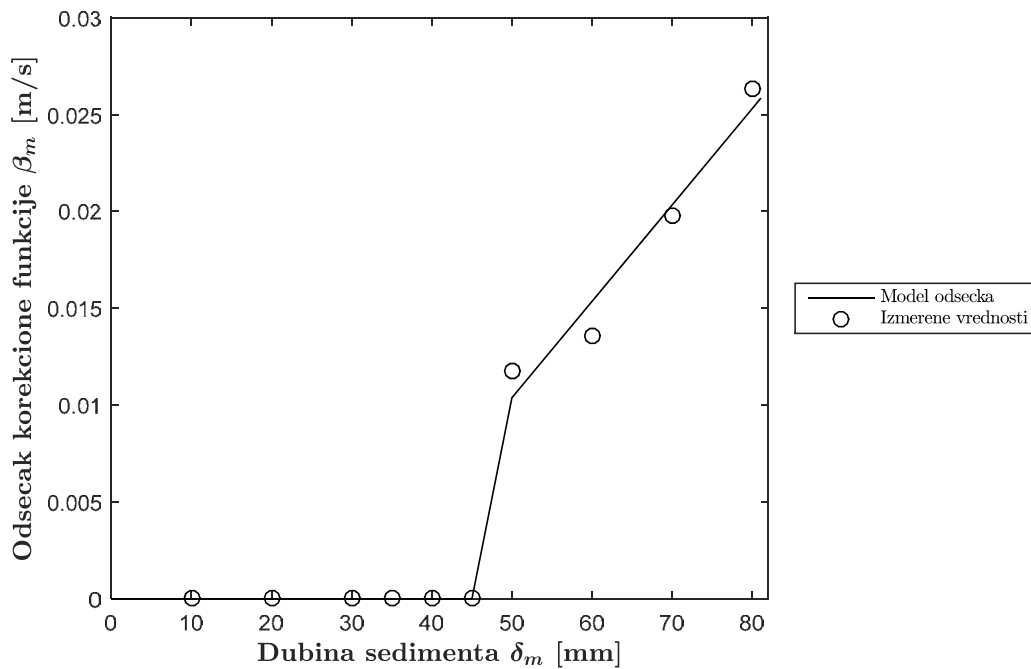
Слика 4.8: Вредности еталонске, некориговане систематске, статистичке и комбиноване неодређености у функцији од дубине седимента

Може се приметити да вредности систематске неодређености значајно расту са повећањем дубине седимента.

- 2) Дефинисање корекционих функција: На сликама 4.9. и 4.10. редом су приказане промене нагиба и одсечка у функцији од дубине седимента.



Слика 4.9: Промена нагиба корекционе функције у зависности од дубине седимента



Слика 4.10: Промена одсечка корекционе функције у зависности од дубине седимента

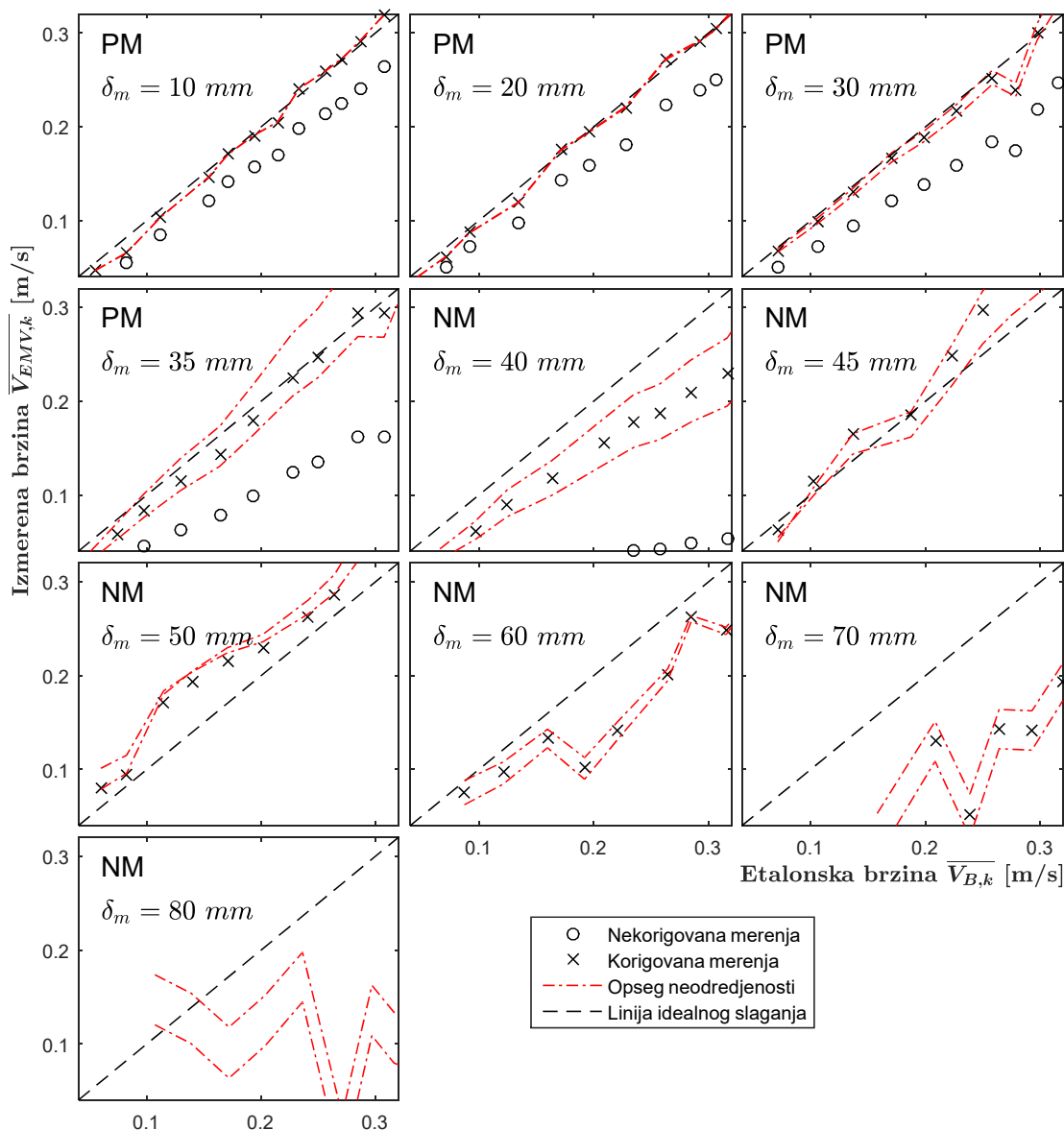
- 3) Провера тренда: може се приметити да параметар одсечка има вредност 0 за дубине седимента $\delta_m \leq 45$ mm. Потребно је нагласити да првобитна вредност параметра одсечка корекционе функције није била 0 за дати опсег дубина седимента, већ негативна вредност и да је вредност параметра нагиба имала опадајући карактер већ при дубини седимента од $\delta_m = 10$ mm. Како нема довољно података за физичко тумачење појаве оваквих вредности параметара одсечка и нагиба, извршена је корекција параметра одсечка тако што је усвојено да вредности параметра одсечка, за дубине седимента $\delta_m \leq 45$ mm буду једнаке 0, а да се на основу тога одреде вредности параметра нагиба. У случају дубина седимента $\delta_m > 45$ mm, параметар одсечка показује линеарни карактер, а параметар нагиба степени карактер.
- 4) Дефинисање граница примене модела параметара α и β : На основу визуелне инспекције дијаграма на сликама 4.8., 4.9. и 4.10. може се уочити да параметар нагиба опада и при најмањим дубинама порозног седимента, што значи да не постоји зона у којој не долази до атенуације. Потребно је кориговати излазни сигнал, како би се донео коначан закључак о граници применљивости модела.
- 5) Моделирање параметара корекционих функција α и β : Може се приметити да је параметар нагиба могуће апроксимирати помоћу 3 функције:
- За $\delta_m < 10$ mm нагиб линеарно опада, што значи да се већ при најмањим дубинама седимента уочава слабљење сигнала.
 - За $\delta_m > 10$ mm нагиб се може апроксимирати помоћу две функције облика $a \cdot \delta_m^b + c$ при чему су a , b и c параметри тих функција

Параметар одсечка корекционе функције има вредност 0 за дубине седимента $\delta_m \leq 45$ mm, док се за веће дубине седимента може апроксимирати помоћу две линеарне функције облика $a \cdot \delta_m + b$.

- 6) Валидација CFM – а: Локално калибрисани резултати мерења брзине $\overline{V_{EMV,k,m}}$ су кориговани уз помоћ CFM – а за сваки m – ти подскуп података. За сваку испитану дубину седимента, коришћењем моделираних параметара одсечка и нагиба добијене су кориговане вредности брзина $\overline{V_{EMV,kor,m}}$. Мерење дубине песка такође доноси одређену мерну несигурност. Како би се дефинисао опсег

коригованих вредности брзина, првобитно су одређени параметри нагиба и одсечка за δ_m , $\delta_m - 1$ mm и $\delta_m + 1$ mm, јер је претпостављено да несигурност у одређивању дубине порозног седимента износи ± 1 mm.

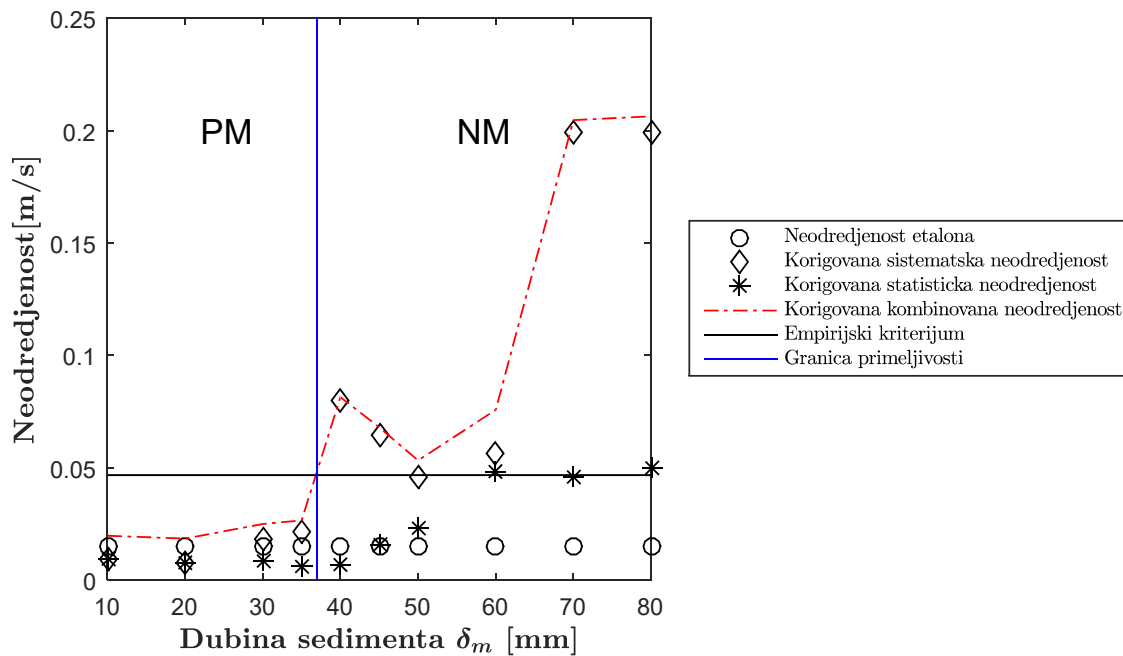
На наредном дијаграму су представљени резултати одређивања коригованих вредности брзина и опсег у којима се те кориговане вредности могу наћи.



Слика 4.11: Дијаграми зависности еталонске и кориговане брзине за дате дубине седимента

На приложеној слици 4.11. може се уочити да Comract EM сензор показује задовољавајућу линеарност при дубинама седимента мањим од 40 mm, што је и оквирна граница применљивости модела (PM – применљивост модела). За дубине веће од 40 mm, модел није примељив (NM – неприменљивост модела) .

- 7) Процена применљивости CFM – а. Након одређивања компонената неодређености над коригованим мерењима брзина, процењена је применљивост CFM – а. Резултати су дати на слици 4.12.

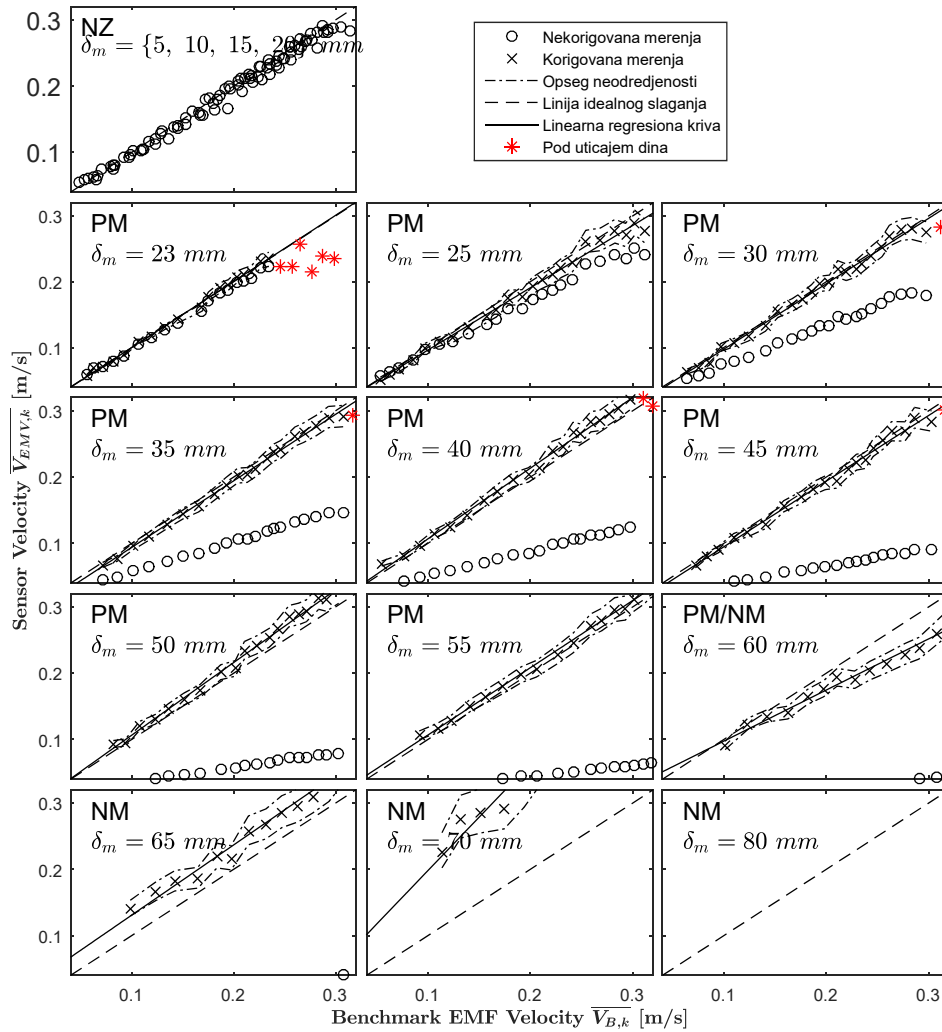


Слика 4.12: Дијаграм коригованих неодређености у функцији дубине седимента

Може се приметити смањење комбиноване неодређености након корекције излазног сигнала. За процену применљивости модела коришћен је емпиријски критеријум према којем је модел примељив уколико је коригована комбинована неодређеност за неку дубину порозног седимента мања од двоструке вредности комбиноване неодређености након локалне калибрације сензора. То значи да је у овом случају Comract EM сензор може применити за мерења под слојем порозног седимента дубине од највише 37 mm, што је у складу и са дијаграмима приказаним на слици 4.11.

4.2.1. Поређење радних карактеристика Compact Flat DC – 2 и Flat DC – 2 сензора у условима седиментације

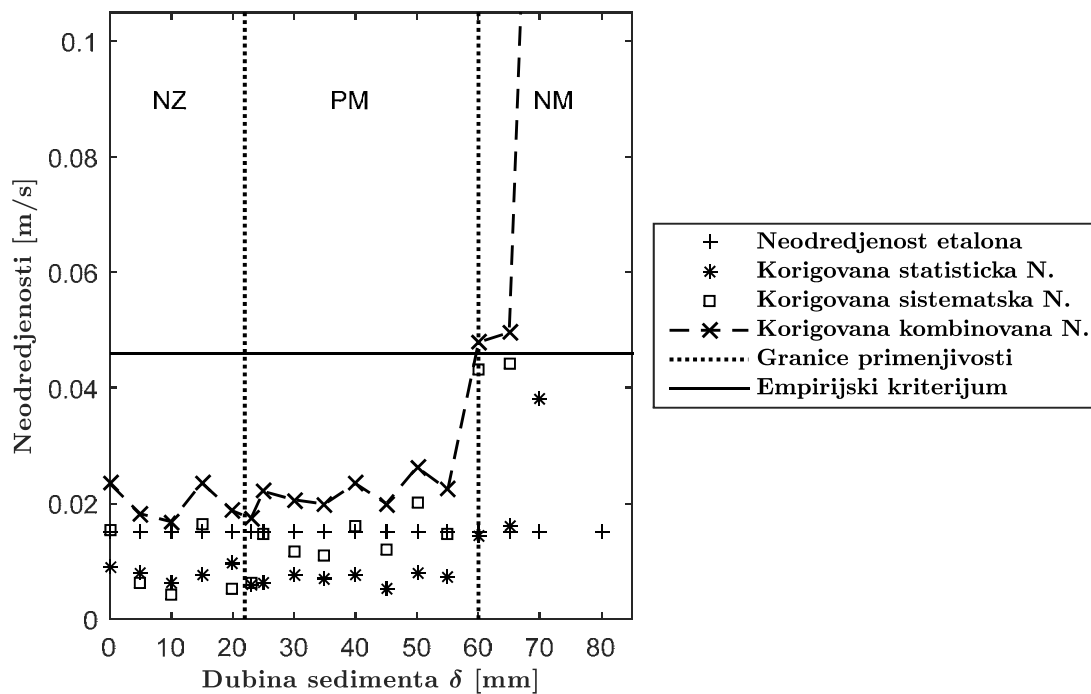
На сликама 4.13. и 4.14. приказани су дијаграми корекција брзина под слојем порозног седимента и дијаграм коригованих неодређености у зависности од дубине седимента у случају испитивања радних карактеристика Flat DC – 2 сензора.



Слика 4.13: Дијаграм зависности коригованих и еталонских брзина за експерименте спроведене применом Flat сензора

Дијаграми на слици 4.13. показују да Flat EM сензор поседује боље радне карактеристике у условима седиментације него Compact сензор. Овај сензор је линеаран под покривком од порозног седимента дубине до 60 mm.

Такође, може се приметити да ова сонда губи линеарност у случају појаве наносних формација. Треба напоменути да су у Мастер раду елиминисана мерења у којима је дошло до покретања наноса због претпоставке о нелинеарности сензора брзине у таквим условима.



Слика 4.14: Дијаграм коригованих компоненти неодређености у зависности од дубине седимента

Дијаграм на слици 4.14 приказује кориговане компоненте неодређености у зависности од дубине седимента. Дијаграм је подељен на 3 зоне:

- За дубине порозног седимента од 0 до 22 mm претпоставља се да седимент не утиче на излазни сигнал, те се ово може назвати „Непоремеђена зона“ (NZ). Compact EM сонда нема ову зону будући да порозни седимент утиче на излазни сигнал и при најмањим дубинама.

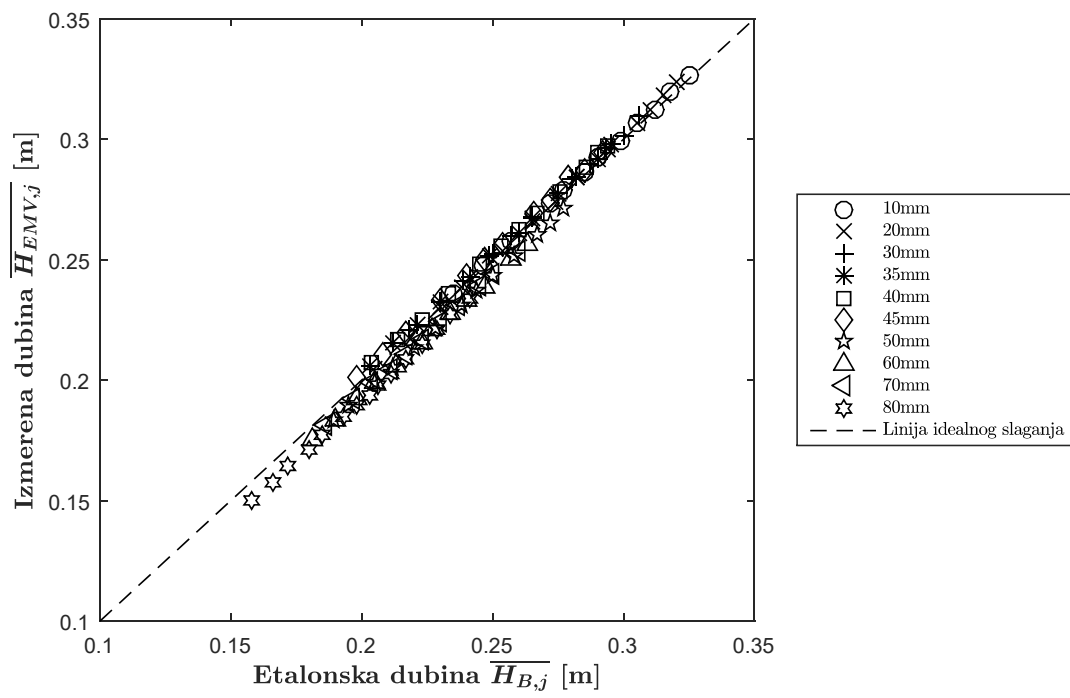
- За дубине порозног седимента од 22 до 60 mm порозни седимент утиче на излазни сигнал, што се може видети кроз повећање систематске неодређености. Применом већ наведеног емпиријског критеријума дефинисана је горња граница примене овог сензора која износи 60 mm. Област ограничена доњом и горњом границом применљивости назива се Област применљивости модела (PM). Comract EM сонда је применљива до дубине порозног седимента од 37 mm.
- За дубине порозног седимента веће од 60 mm модел није применљив (NM – неприменљивост модела).

4.2.2. Резултати мерења дубина у условима седиментације помоћу Comract EM сензора

Паралелно са мерењем брзине у условима седиментације, спроведено је и мерење дубине помоћу Comract EM сонде. Процедура за мерење дубине слична је као у условима без седиментације, уз битну разлику. Наиме, Comract EM сонда мери укупну дубину, дакле дубину воде и дубину порозног седимента. За дефинисање контролне запремине, доња граница интеграције дефинише се према изразу 2.3, те је од укупне дубине, за даљу анализу потребно одузети дубину порозног седимента.

На слици 4.15. приказан је дијаграм зависности еталонских дубина и дубина добијених након локалне калибрације сензора, за све дубине порозног седимента.

На приказаној слици може се уочити добро поклапање измерене и еталонске дубине већ након локалне калибрације сензора. Може се уочити и да за веће дубине порозног седимента постоји одређена систематска грешка, међутим, с обзиром на то да Comract сензор брзине за те дубине седимента не даје поуздане резултате, односно да CFM није применљив, те се ни проток не може одредити са већом поузданошћу, нема потребе за даљом корекцијом дубина.



Слика 4.15: Дијаграм зависности еталонских и измерених дубина након локалне калибрације Compact EM сензора

5. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕДЛОГ БУДУЋЕГ ИСТРАЖИВАЊА

За мерење протока у канализационим системима још увек се најчешће примењују сензори који раде на принципу Доплеровог ефекта, иако је бројним научним истраживањима показано да поседују високу мерну неодређеност због низа фактора који ометају њихов рад.

У овом Мастер раду анализирана је могућност примене Compact EM сензора за мерење протока у канализационим системима, као алтернативно решење примени ADV сензора.

5.1. Закључци истраживања

Испитивањем радних карактеристика Compact EM сензора у стандардним и у условима седиментације дошло се до следећих закључака:

- У стандардним условима Compact EM сензор показује задовољавајућу линеарност у мерењу брзина. Такође, Compact EM сензор у стандардним условима показује ниску мерну неодређеност брзина чак и без претходне корекције сигнала.
- У условима седиментације кућишта сензора примећено је слабљење излазног сигнала већ при најмањим дубинама слоја порозног седимента
- Показано је да је модел CFM – а применљив за дубине седимента до 37 mm. За веће дубине сензор показује нелинеарност мерења брзина. Треба напоменути да ово важи у случају равне површине покривке од порозног седимента. Наиме, у случају појаве наносних формација, претпоставља се да Compact сензор неће поседовати линеарност мерења брзина.
- Compact EM сензор показује задовољавајућу линеарност мерења дубина у стандардним условима и у условима седиментације, при свим дубинама порозног седимента.

Поређењем радних карактеристика Compact Flat и Flat EM сензора дошло се до закључака да:

- Flat сензор такође показује линеарност мерења у стандардним условима, али има знатно слабије поклапање измерених и еталонских брзина без корекције сигнала. Међутим, након корекције уочавају се ниже вредности комбиноване мерне неодређености брзина у односу на Compact сензор.
- У условима седиментације кућишта сензора показано је да Compact сензор не поседује непоремећену зону мерења, с обзиром на то да излазни сигнал слаби и при најмањим дубинама порозног седимента. Са друге стране, порозни седимент у случају Flat сензора утиче на излазни сигнал тек за дубине седимента веће од 22 mm.
- Област примељивости CFM – а код Compact сензора је мања него код Flat сензора.

Лабораторијским испитивањима дата је основа за даљи рад. Може се закључити да Compact сензор поседује капацитет за примену у канализационим системима, али потребна су додатна теренска испитивања у циљу коначне потврде могућности примене овог сензора у канализационим системима.

5.2. Предлог будућег истраживања

Имајући у виду да је уочено слабљење излазног сигнала и при најмањим дубинама седимента, потребно је извршити додатна испитивања у циљу откривања узрока ове појаве.

С обзиром на то да су у Мастер раду формиране функције за корекцију излазног сигнала Compact сензора, следећи корак је формирање недостајућих техничких параметара, а то су домет контролне запремине, τ_{max} и тежинска функција, w , на основу упрошћеног математичког модела који је описан у поглављу Преглед литературе.

Наредни корак у истраживању је примена Compact EM сонде у теренским условима, што представља и коначан корак у испитивању могућности самосталне примене овог сензора у сложеним условима течења, какви се јављају у канализационим системима.

Поред наведеног, једна од могућности примене Comracт сензора је и у комбинацији са другим мерачима брзина, нпр. са ADV или другим типовима ЕМ сензора.

6. ЛИТЕРАТУРА

Иветић, Д. 2019. *Одређивање протока течности у сложеним условима струјања применом равних електромагнетних сензора – докторска дисертација – Грађевински факултет Универзитета у Београду*

El Bahloulli, A., Larrarte, F., 2018 *Proposal for improving discharge quantification in urban drainage – Flow measurement and instrumentation 60 (51 – 56)*

Farina, G., Bolognesi, M., Alvisi, S., Franchini, M., Pellegrinelli, A., Russo, P., 2017. *Estimating discharge in drainage channels through measurements of surface velocity alone; A case study – Flow measurement and instrumentation 54 (205 – 209)*

Aguilar, M.F., McDonald, W.M., Dymond, R.L., 2016. *Benchmarking laboratory observation uncertainty for in – pipe storm sewer discharge measurements – Journal of Hydrology 534 (73 – 86)*

Steinbock, J., Weissenbrunner, A., Juling, M., Lederer, T., Thamsen, P.U., 2016. *Uncertainty evaluation for velocity – area method – Flow measurements and instrumentation, 48. (51-56)*

Nord, G., Gallart, F., Gratiot, N., Soler, M., Reid, I., Vachtman, D., Latron, J., Martin – Vide, J.P., Larrone, J.B., 2014. *Aplicability of acoustic Doppler devices for flow velocity measurements and discharge estimation in flows with sediment transport – Journal of Hydrology 509 (504 – 518)*

Campisano, A., Cabot Ple, J., Muschalla, D., Pleau, M., Vanrolleghem, P.A., 2013. *Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater system – Urban water Journal, 10(5) (300 – 311)*

Prodanović, D., Đačić, A., Branislavljević, N., Rukavina, J., 2012. *Laboratory tests of ultrasound and electromagnetic devices for flow measurement in sewer systems – Current issues in water supply and sewage 2012, Bol on Brač*

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*

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

McIntyre, N., Marshall, M., 2008. *Field verification of bed – mounted ADV meters – ICE (Institution of Civil Engineers)(199 – 206)*

Larrarte, F., Bardiaux, J.B., Battaglia, P., Joannis, C., 2008. *Acoustic Doppler flow – meters: A proposal to characterize their technical parameters – Flow measurement and instrumentation 19 (261 – 267)*

Wang, J.Z., Tian, G.Y., Lucas, G.P., 2007. *Relationship between velocity profile and distribution of inducted potential for an electromagnetic flow meter – Flow measurement and instrumentation 18(2) (99 – 105)*

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

Godley, A., 2002. *Flow measurement in partially filled closed conduits – Flow measurement and instrumentation 13 (197 – 201)*

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

Maheepala, U.K., Takyi, A.K., Perera, B.J.C., 2001. *Hydrological data monitoring for urban stormwater drainage systems - Journal of Hydrology 245 (1 – 4) (32 – 47)*

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

Chebbo, G., Bachoc, A., Laplace, D., Le Guennec, B., 1995. *The transfer of solids in combined sewer network – Water science and technology 31 (7) (95 – 105)*

Coleman, H.W., Steele, W.G., 1995. *Engineering application of experimental uncertainty analysis – AIAA Journal 33 (10) (1888 – 1896)*

Hemp, J., Versteeg, H.K., 1986. *Prediction of electromagnetic flowmeter characteristics – Journal of Physics D: Applied Physics 19(8) (1459)*

Hemp, J., Wyatt, D.G., 1986. *A basis for comparing the sensitivities of different electromagnetic flowmeters to velocity distribution – Journal of Fluid Mechanics 112 (189 – 201)*

Bevir, M.K., 1970 *The theory of inducted voltage electromagnetic flowmeter – Journal of Fluid Mechanics 43(3) (577 – 590)*

Shercliff, J.A., 1962 *The theory of electromagnetic flow – measurement – CUP Archive*

Shercliff, J.A., 1954 *Relation between the velocity profile and the sensitivity of electromagnetic flowmeters – Journal of Applied Physics 25(6) (817 – 818)*

Faraday, M., 1832. *V. Experimental researches in electricity – Philosophical Transactions of the Royal Society of London 122 (125 – 162)*