

Универзитет у Београду - Грађевински факултет  
Одсек за хидротехнику и водно-еколошко инжењерство



**МАСТЕР РАД**

**ТЕМА:**

**Анализа рада акустичног Доплер сензора брзине у једној тачки**

**Кандидат:**

**Јован Ђорђевић 593/15**

**Ментор:**

**Проф. др Душан Продановић**

**Београд, 2019.**

# Садржај

<b>1</b>	<b>Увод .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Преглед литературе.....</b>	<b>5</b>
2.1	Акустична доплер сонда .....	5
2.2	Проблеми у раду.....	6
	Близина чврсте контуре .....	7
	Алијасинг .....	7
	Доплеров шума .....	8
<b>3</b>	<b>Методологија .....</b>	<b>9</b>
3.1	Лабораторијска инсталација.....	9
	Рециркулациони резервоар.....	9
	Отворени канал.....	10
3.2	Утицај салинитета на рад АДА сензора .....	12
3.3	Анализа утицаја близине чврсте контуре на рад АДА сензора .....	16
	Утицај дна на рад .....	16
	Утицај бочних ивица на рад.....	17
	Додатно мерење.....	19
3.4	Анализа рада у отвореном каналу.....	20
3.5	Могућност уклањања пикова .....	21
<b>4</b>	<b>Резултати и дискусија.....</b>	<b>25</b>
4.1	Утицај салинитета на рад АДА сензора .....	25
4.2	Анализа утицаја близине чврсте контуре на рад АДА сензора .....	30
	Утицај дна на рад .....	30
	Утицај бочних ивица на рад.....	31

Додатно мерење.....	33
4.3 Анализа рада у лабораторијском каналу.....	35
4.4 Могућност уклањања пикова .....	36
<b>5 Закључци .....</b>	<b>38</b>
<b>6 Литература.....</b>	<b>39</b>

# 1 Увод

Брзина воде често представља најзначајнију физичку карактеристику водотока што за последицу има константно усавршавање и развој мерне опреме којом би се та брзина могла измерити. Постоји читава лепеза инструмента за мерење брзине протока и најчешће се за карактеристичне случајеве користе одређени мерачи. Методе за мерење брзине које су до сада развијене имају потешкоће приликом мерења у теренским условима, услови за њихов рад су тешко оствариви. Ограничења произвођач а изван тог опсега, уређаји дају знатно лошије резултате. Хидрауличка лабораторија Грађевинског факултета поседује мераче брзине, новије генерације а један од њих је „Vectrino+“ произвођача „Nortek“ (Nortek, 2009). Обрађена је у овом раду како бисмо боље упознали њене карактеристике и проверили закључке истраживача који су је такође користили у својим анализама. Методе за мерење брзине које су до сада развијене имају проблема приликом мерења на природним водотоцима. „Vectrino+“ сонда је препоручена за лабораторијске и физичке канале, па нам је циљ да то проверимо.

Коришћена „Vectrino+“ сонда мери брзине у једној тачки, али ћемо померањем по вертикали покушати да снимимо брзине у више тачака. Овако добијене брзине можемо употребити како бисмо сагледали распоред брзина по попречном пресеку, а из тога се може одредити средња брзина или неки карактеристичан локални феномен.

У Поглављу 2. овог рада, посећена је пажња досадашњој литератури чија је тема изучавања блиско повезана са АДА методом мерења. Такође је пажња усмерена ка истраживачким радовима који су велику пажњу посветили откривању проблема приликом коришћења АДА методе и још важније, отклањању проблема приликом рада. Други део проблема који се јавља приликом коришћења ове методе представља обраду снимљеног сигнала, а све у циљу уклањања штетних утицаја који лоше утичу на мерење.

Поглављем 3. описане су лабораторијске инсталације коришћене у овом раду. Дефинисане су њихове могућности и зона примене и узајамни утицај АДА сонде и инсталације. Даље у раду је анализирано како „Vectrino+“ сонда ради у граничним условима, а након тога је објашњено како ћемо извести мерење у отвореном каналу. Последња област у овом поглављу се бави обрадом сигнала и његовим „чишћењем“ од штетних примеса. Не смемо заборавити да су резултати циљ сваког мерења.

У Поглављу 4. су обрађене све раније претпоставке и анализиран рад сонде на лабораторијској инсталацији. Практично смо применили упутства истраживача на основу прочитаних научних радова и анализирали сонду и инсталацију. У овом поглављу се могу видети резултати и феномени откривени након анализирања истих. Приказано је како се сонда може искористити у каналу да би се снимила брзина у попречном профилу а након тога и обрада добијеног сигнала.

Закључке свих анализа су приказане у Поглављу 5. Неке анализе смо искористили како би потврдили смернице и упутства научника који су у свом раду користили исту сонду. Открили смо како сонда и инсталације утичу међусобно на функционисање и који су максимални домети заједничког рада. Разлози због којих је „Vestriino+“ сонда обрађена овим радом и смернице за нека наредна мерења, могу се наћи у овом поглављу.

## 2 Преглед литературе

### 2.1 Акустична доплер сонда

Тренутно као најнапреднији ммерачи се користе Ласер Доплер Бризиномери (eng. Laser Doppler Velocimeter – LDV) и метода праћења честица (eng. Particle Image Velocimetry – PIV), али су и ове методе лимитиране, нарочито у теренским условима где услед велике количине суспендованог наноса, нечистоћа и чврстог отпада не дају валидне резултате.

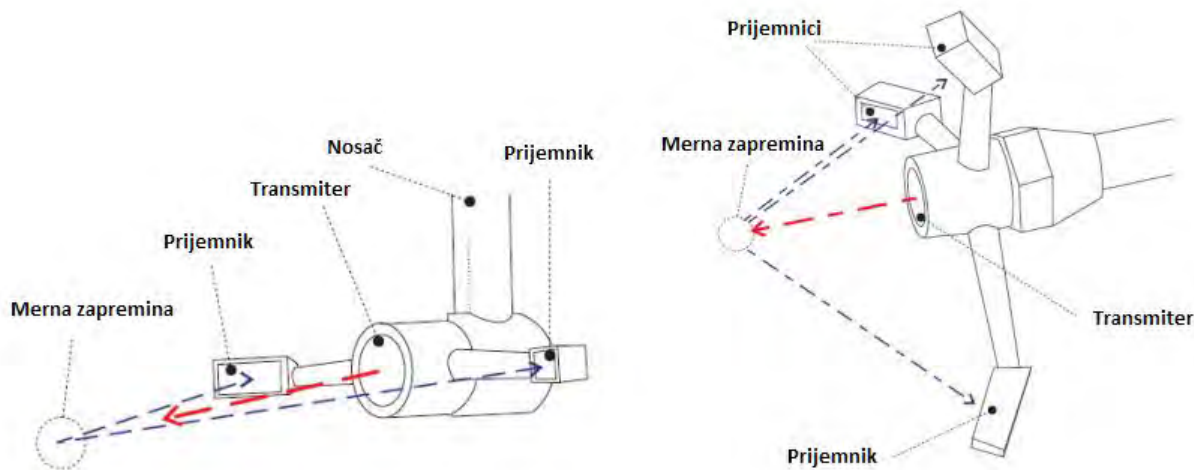
У овом раду је коришћен ултразвучни Акустични Доплер Анемометар АДА (eng. Acoustic Doppler Velocimeter – ADV) који је због својих карактеристика доста заступљенији од претходно поменутих, како у лабораторијским тако и у теренским условима (Khorsandi и сарадници, 2012.). Најчешће се користи за одређивање профила брзина у речним токовима и у оквиру хидротехничких објеката зарад прорачуна протока.

АДА је уређај за даљинско мерење тренутних вредности компонената вектора брзине, у сва три координатна правца, оригинално развијен за употребу на физичким моделима (Voulgaris & Trowbridge, 1998).

Принцип рада АДА сонде заснива се на ефекту Доплеровог помака. Трансмитер емитује кратке акустичне пулсаве кроз воду од чега се део акустичне енергије одбија и прелама од суспендованих честица које се налазе у води. У случају да водоток не садржи природне честице потребно је додати вештачке, како би се омогућио рад сонде.

Део сонде који се потапа у воду и служи за мерење брзине састоји се од једног трансмитера и два, три или четири пријемника распоређена под углом од 90, 120, 180 степени, формирајући круг око трансмитера. Пријемници су закривљени тако да се фокусирају ка јединственој мерној запремини која је у зависности од типа сонде удаљена 5 до 15cm од главе трансмитера. Мерна запремина се обично представља цилиндром или елипсом пречника до 8mm и висине до 15mm.

Величина мерне запремине у којој се врши узорковање одређује се дужином преносног импулса, ширином пријемних „прозора“ и са пријемним и предајним снопом таласа (Lohmann et al., 1994). Стварни хоризонтални облик се може дефинисати само нумеричким интеграљењем. Бројна мерења нису показала значајну разлику у прикупљеним резултатима ако се узме у обзир поменута разлика хоризонталног облика мерне запремине. Вертикална димензија мерне запремине је значајнија од хоризонталне димензије, како би се исправно позиционирала АДА сонда.



Слика 1. Различите диспозиције АДА сонди; Лево) варијанта са две пријемне главе; Десно) варијанта са три пријемне главе

Код 3D сонде сваки од пријемника је задужен за мерење брзине у три независна правца ( $x, y, z$ ), док четврти пријемник има улогу да коригује све три вредности чиме се поправљају измерене величине. Зона у којој се налази контролна запремина је на 50mm од емитера чиме је дефинисано и минимално растојање сонде од дна приликом мерења.

Мерна глава код 2D сонде је другачије конструисана него код 3D сонде због чега је преваходно намењена за мерење брзине уз чврсту ивицу. Код 2D сонде се контролна запремина налази са бочне стране што омогућава да се сонда позиционира ближе ивици канала. Принцип рада је сличан као код 3D сонде, основна разлика је да четири пријемника бележе брзине у два правца ( $x, z$ ).

## 2.2 Проблеми у раду

Робусна и практична примена АДА сонде доводе до тога да се веома често примењује. Приликом мерења се могу јавити и одређени проблеми, који се могу отклонити у припреми мерења или додатном обрадом након добијених сирових података. Проблеми настали током мерења су наследни и настали услед физике процеса који се користи у АДА методи. Да би се умањиле мане коришћења ове методе, потребно је вршити мерења у пројектованим условима. Многи истраживачи су у својим радовима обрађивали теме које се тичу уочавања грешака у мерењима, као и развијање алгоритама за њихово отклањање.

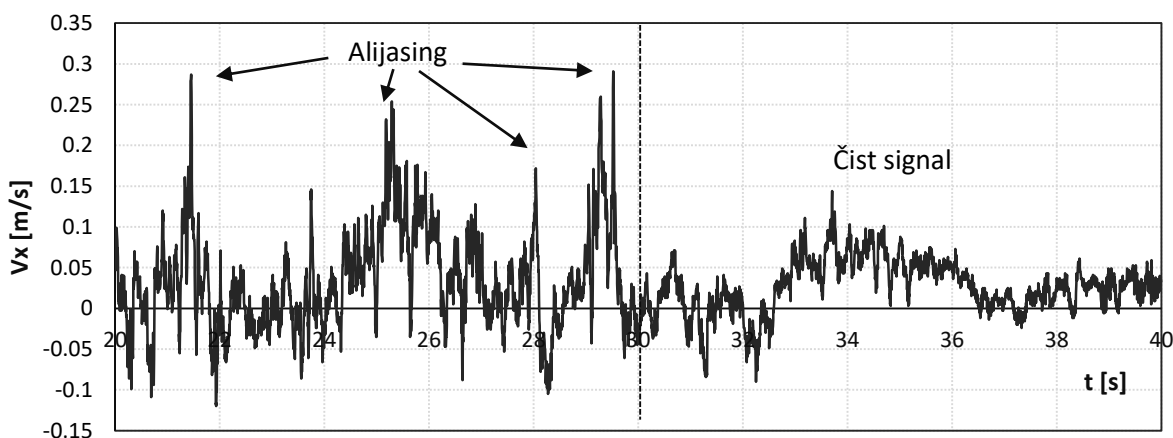
## Близина чврсте контуре

Проблеми који се могу јавити приликом мерења а последица су мерења ван препорученог опсега произвођача, сврставамо у такозвана практична ограничења методе. Једно од наведених ограничења представља и близина чврсте контуре, како у вертикалној тако и у хоризонталној равни. Препоручује се да чврста контура буде удаљена од мерне запремине барем 3 до 4.5 cm у оба правца (Chanson, 2008). Примећено је да параметар који дефинише квалитет сигнала, однос шум/сигнал (енг. Signal to Noise Ratio – SNR) пада испод 15 dB уколико није испуњен овај услов што доводи до погрешних процена компонената брзине.

## Алијасинг

Принцип рада АДА сонде је објашњен раније, у области 2.1. Ако се мерења изводе на водотоцима која не садрже честице од којих би се одбијали таласи, потребно је „засејавање“ вештачким опилцима. Засејавање се може извести природним или вештачким честицама. Најбољи резултати се добијају применом комерцијалних боросиликатних микронских сфера „Spherical 110P8“ произвођача Potters, или органског мастила „Dytex Dye“ произвођача Tintex (Chanson, 2008; Иветић и сарадници, 2016). Уколико се испуне услови „засејавањем“ и обезбеди довољна количина суспендованих честица, избегава се алијасинг Доплеровог сигнала.

Алијасинг Доплеровог сигнала се може представити као погрешна процена фреквенције односно фазе одбијеног сигнала. Доплеров уређај мери фазни помак између два акустична пулса који мора лежати у опсегу од  $180^\circ$  до  $-180^\circ$ , уколико се фазни помак нађе изван овог опсега АДА уређај даје погрешан податак о брзини. Приликом алијасинга, на корисничком екрану се јављају пикови са екстремним вредностима (Слика 2.). Ова појава је лако уочљива и током мерења те је могуће отклонити проблем „у ходу“.



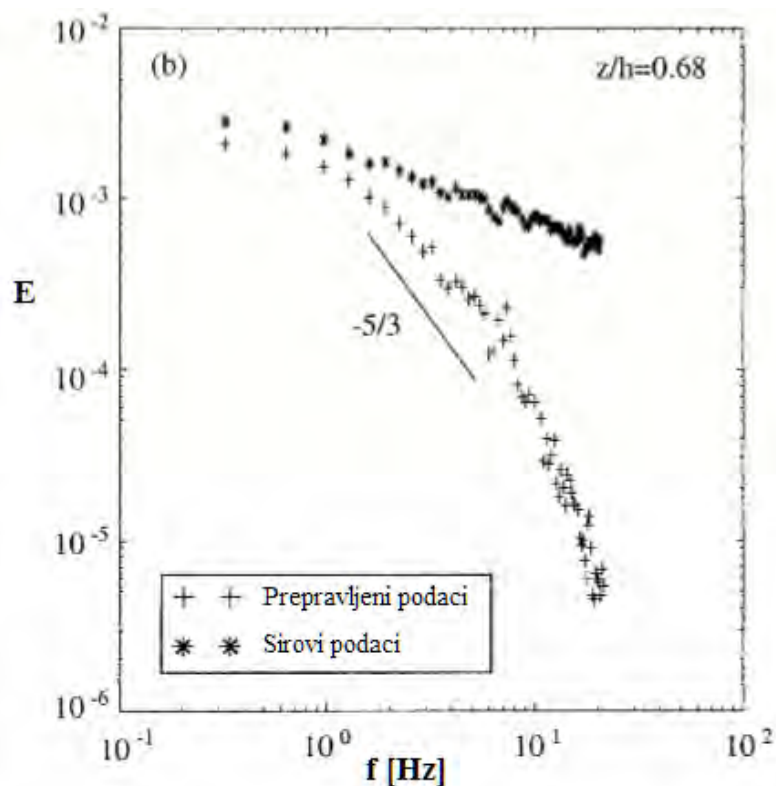
Слика 2. Приказ појаве алијасинга Доплеровог сигнала на серији података



Управо због наведених проблема који се јављају током мерења развијени су алгоритми који се користе за „чишћење“ сигнала. Сваки алгоритам се састоји из два независна корака, у првом се детектују пикови који представљају погрешан податак, а у другом се тај погрешан податак замењује процењеном тачнијом вредношћу. У овом раду ће бити обрађена четири алгоритма за „обраду“ сигнала. Сва четири су саставни делови алата *DespikingADA.m* који је развијен за потребе истраживања на Грађевинском факултету.

### Доплеров шума

Појава Доплеровог шума је присутна у случају мерења турбулентних карактеристика било којим уређајем које се заснива на Доплеровом принципу (García и сарадници, 2005). Услед расипања послатих пулсева и времена које честице суспензије проведу у контролној запремини јавља се шум који утиче на резултате мерења. Доплеров шум је по карактеристикама сличан „белом“ шуму, пошто њихово присуство не утиче на средњу брзину, али је утицај значајно изражен на енергетском спектру у зони великих фреквенција (Слика 3.).



Слика 3. Енергетски спектар сирових података и након примене алгоритма предложеног од стране Hurther и Lemин (2001)

## 3 Методологија

### 3.1 Лабораторијска инсталација

У овом раду смо користили делимично прилагођене лабораторијске инсталације. Први део експеримената је изведен у рециркулационом резервоару, а други део у отвореном каналу. Обе инсталације су део хидрауличке лабораторији на Грађевинском факултету.

#### Рециркулациони резервоар

Инсталација се састоји од резервоара димензија 145,5 x 56,5cm у који је монтиран електро мотор марке Panther Martin 12V, а по дужини резервоара налази се пластична преграда која омогућава кружење воде приликом рада мотора. АДА сонда је причвршћена за колица која имају могућност да се померају по дужини и ширини резервоара.



Слика 4. Фотографија рециркулационог резервоара током пуњења водом

Резервоар је пре извођења експеримената очишћен и сипана је чиста вода, како бисмо имали тачне улазне податке. Након пуњења и монтирања свих елемената инсталације, примењене су одређене корекције које су дале позитивне резултате, а детаљно их је описао Никола Перић у свом Мастер раду. Инсталација је напуњена водом са чесме па је било потребно „засејавање“ како бисмо избегли појаву алијасинга Доплеровог сигнала. У воду смо сипали 8,8gr сидинга, али смо током тестирања инсталације установили да је присутан алијасинг сигнала те смо додали још 5,7gr. Након додавања сидинга, сигнал је био без пикова екстремних вредности, а инсталација спремна за експерименте.

### Отворени канал

Други део мерења изведен је на инсталацији у чијем саставу је отворени канал дужине 8,0m и ширине 0,25m. Зидови канала су направљени од стакла, а дно од алуминијума. Максимални проток у каналу је 50L/s а максимална дубина око 45cm. АДА сонда је предвиђена за мерења у дугачким каналима те очекујемо да у овој инсталацији омогућимо значајно боље услове од базена, те снимањем брзина у више тачака одредимо распоред брзина по пресеку.

Рециркулациони систем у чијем саставу се налази отворени канал обухвата и базен велике запремине одакле се вода потискује пумпом кроз цевовод до мањег резервоара за умирење. Умирена вода улази у канал који се завршава испустом и вода се враћа у велики базен. У велики базен је постављена пумпа која покреће воду у систему, а на цевовод је монтиран електромагнетни мерач протока. На крају цевовода, пред улазак у умиривач, налази се затварач који служи за регулацију протока и успостављања жељених услова у каналу.



Слика 5. Слика инсталације са отвореним каналом

Инсталација, као што је напоменуто, у свом саставу има и велики базен са довољном количином воде да би инсталација функционисала. Није могуће очистити инсталацију, као у случају рециркулационог резервоара, него смо принуђени да тестирања вршимо са водом и инсталацијом која није потпуно чиста. Вода је делимично запрљана, али како се инсталација простире на два нивоа лабораторије, крупније честице се исталожавају у великом базену у подруму.

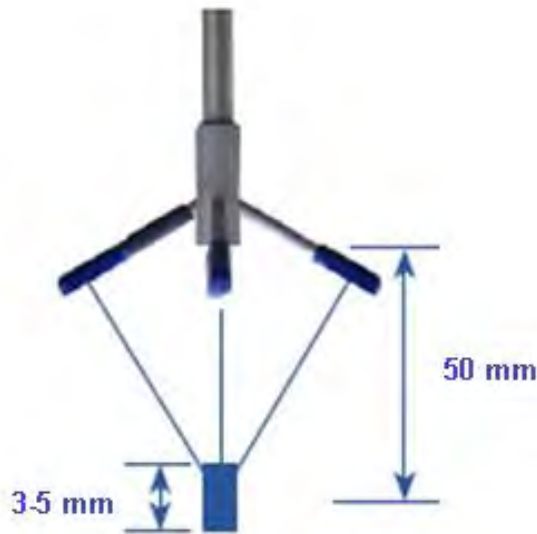
Пробним мерењем је утврђено да вода не садржи честице да би се мерење несметано одвијало. Као и код рециркулационог резервоара, морали смо да извршимо „засејавање“ воде, али је додатни проблем представљала конструкција систем. Количина воде у инсталацији је велика, а сидинг се исталожава пре него што се врати у канал. Овај проблем смо решили постављањем малог резервоара узводно од мерног места, а у њему направљена мешавина воде и сидинга. Резервоар на дну има славину те омогућава контролисано испуштање већ помешаног сидинга са водом.



Слика 6. Фотографија резервоара са мешавином сидинга и воде

### 3.2 Утицај салинитета на рад АДА сензора

Удаљеност мерне запремине од дна јавља се често као проблем када се мере брзине при самом дну да би се одредиле тангенцијални напони које утичу на пронос наноса. Мерења се осим у лабораторијским условима врше на водотоцима који не пружају могућност за једноставно позиционирање сонде по дубини. Због тога software који је задужен за рад сонде има инсталирану команду Distance Check помоћу које се добија тачна позиција мерне запремине сонде. Трансмисер шаље сигнал који се одбија од дна и детектује на пријемницима сонде. На основу времена за које се послати талас детектује на пријемницима у software-у се једноставном конверзијом добија удаљеност сонде од дна. Не сме се заборавити да командом Distance Check дефинишемо позицију централне мерне главе, а позиција мерне зоне ће се одредити ако добијену позицију мерне главе умањимо за 5cm. На слици 6. графички је приказана позиција мерне зоне у односу на пријемнике и предајник.



Слика 7. Шематски приказ позиције и величине мерне запремине у односу на мерну главу АДА сонде

Брзина простирања таласа у води је најбитнија за правилан рад АДА сонде. Познато је да салинитет значајно утиче на густину воде, а у зависности од густине воде мења се и брзина простирања таласа у флуиду. Једначина којом се израчунава брзина простирања таласа  $C$  (енг. Sound Of Speed - SOS) је:

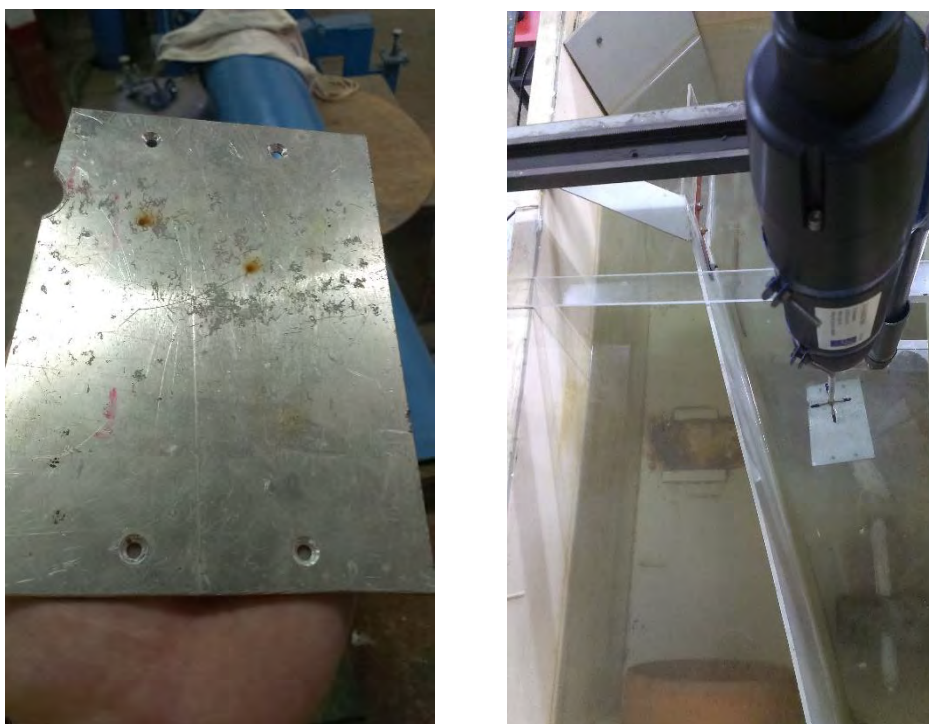
$$C = 1444.5 + 4.6t - 0.04447t^2 + 0.01821d + 1.31115 (\eta - 34) \text{ [m/s]}$$

Где је са  $t$  обележена температура воде у  $^{\circ}\text{C}$ ,  $d$  представља дубину воде од површине до дна изражену у  $\text{m}$ , а  $\eta$  је сланост воде у  $\%$ . Пре самог покретања рада software-а могуће је унети претпостављену брзину простирања таласа, а друга опција је да се унесе салинитет воде на основу чега ће сонда сама израчунати тачну вредност брзине  $C$ .

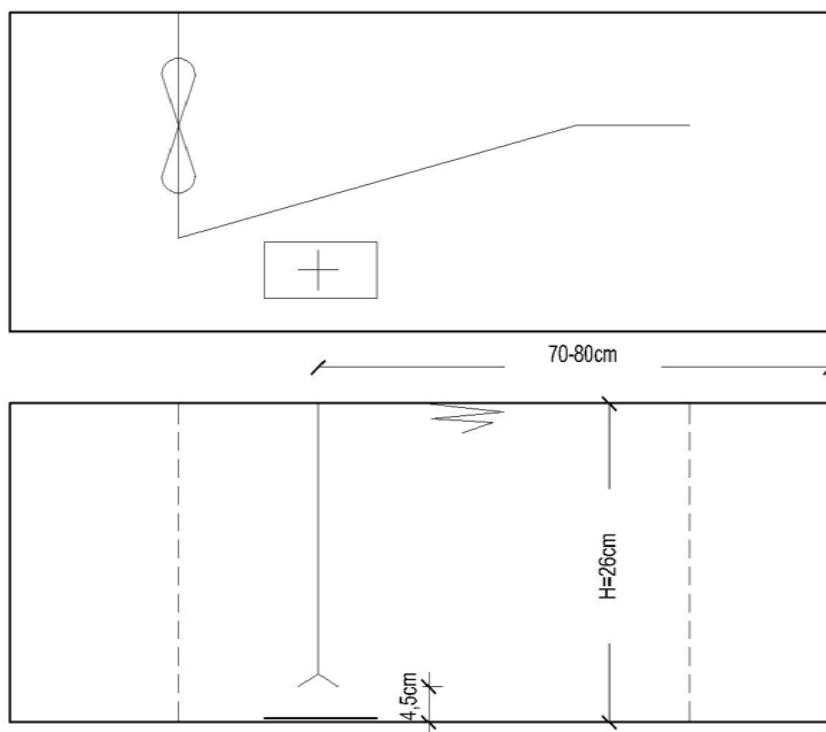
У овом експерименту је анализиран утицај салинитета на вредност брзине простирања талас, а индиректно и на дефинисање позиције командом Distance Check. Прва мерења опцијом Distance Check су вршена за  $C = 1310 \text{ m/s}$ , што је брзина простирања таласа у ваздуху. За друго мерење смо улазне податке  $t=19.64^\circ\text{C}$  и  $\eta=0\%$  уврстили у претходну једначину и добили вредност  $C \approx 1470 \text{ m/s}$ . У трећем мерењу смо ставили да је салинитет једнак нули (Measured Salinity = 0) из чега је сонда сама израчунала брзину  $C$ .

АДА сонда је намењена да се користи у природним водотоцима и у лабораторијским инсталацијама. Лабораторијски канали су најчешће направљени од вештачких материјала (пластика, метал, стакло) а код природних се дно разликује у зависности од наноса. Поред утицаја салинитета у оквиру истог експеримента анализиран је утицај храпавости дна канала на рад команде Distance Check. Проверен је рад Distance Check функције сензора, при различитим параметарским подешавањима за салинитет воде, у оригиналној диспозицији са „дуплим дном“ као и са глатком и храпавом плочом. Еталонско одређивање позиције сонде је вршено помоћу метра са милиметарском поделом. Мерења су вршена док вода мирује, на сваких 0.5 cm почевши од површине воде до дна, а након тога поновљено је мерење али у супротном смеру од дна ка површини.

- **Оригинална диспозиција са дуплим дном** - Први циклус мерења је изведен са десне стране преграде, у делу каде са дуплим дном. План је био да прво мерење изведемо на основној инсталацији тј. са дуплим дном од плексигласа. Позиционирањем главе сонде у неколико тачака у зони 5-15cm од дна, обистиниле су се сумње да сонда показује резултате који се могу сврстати у нетачне. Најчешће се јављала грешка да опција Distance Check мери дубину дупло већу од дубине очитане на контролној мерној траци. Ретко се може десити да се мерење врши у каналу са дуплим дном од плексигласа те је коригована инсталација у потрази за валидним резултатима.
- **Глатко метално дно** - Позиција сонде је идентична као при претходном мерењу, али је на дно испод сонде постављена глатка метална плоча (Слика 7.). Дебљина плоче је 2,5mm, а дубина воде на месту мерења је 26cm. Проверава се дубина на сваких 0,5 cm од површине воде до дна.



Слика 8. Лево) фотографија глатке металне плоче; Десно) Фотографија инсталације током тестирања са глатком металном плочом



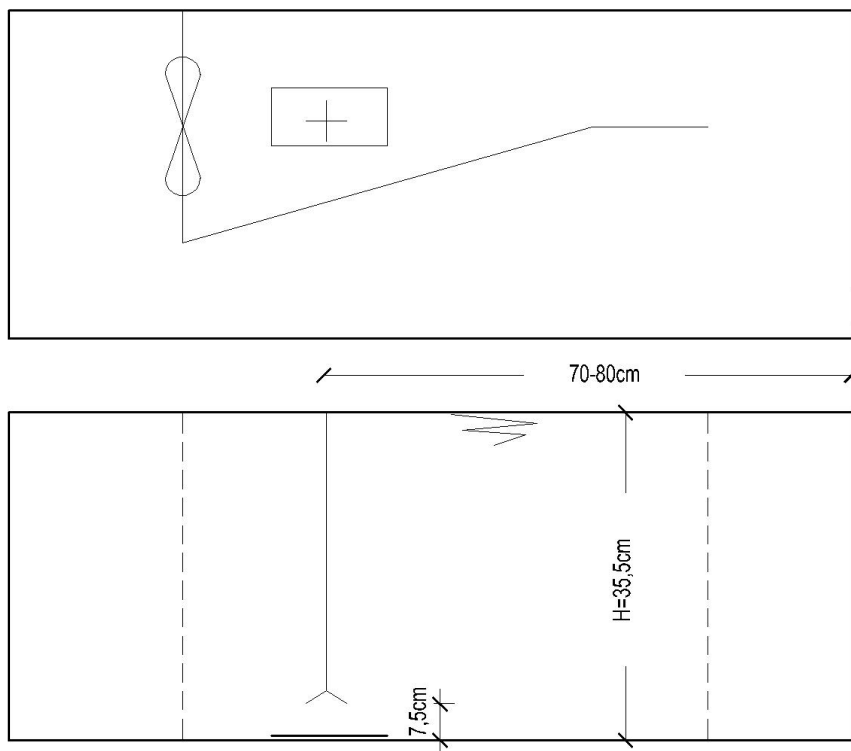
Слика 9. Фотографија и шематска поставка инсталације током мерења са глатком плочом

- **Храпаво метално дно** - Следећи циклус мерења изведен је са храпавом металном плочом на дну. Позиција сонде је са супротне стране преграде у одосу на претходна мерења. Дебљина плоче је 2,5mm, а дубина воде је 35,5cm. Мерења су вршена на сваких 1cm за разлику од претходних. Ова промена је усвојена да би се убрзао екперимент, а под претпоставком да се не утиче на резултате експеримента.



Слика 10. Лево) Фотографија храпаве плоче; Десно) Фотографија инсталације током тестирања са храпавом металном плочом



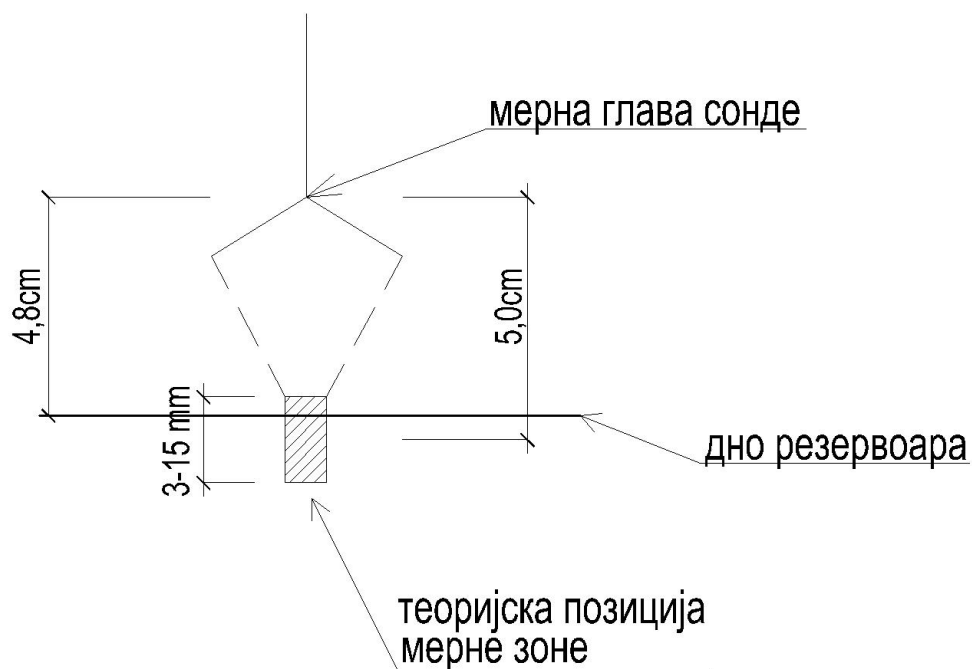


Слика 11. Фотографија и шематска поставка инсталације током мерења са храпавом плочом

### 3.3 Анализа утицаја близине чврсте контуре на рад АДА сензора

#### Утицај дна на рад

Почетна препорука за позиционирање мерне запремине је 3 до 4,5cm од чврсте контуре, али покушавамо да тестирамо нашу инсталацију у граничним условима и дефинишемо границу која омогућава да се максимално приближимо дну а да при томе измеримо профилну брзину у тачки. У области 3.2. је скренута пажња да се мерна зона АДА сонде налази 5cm испод мерне главе сонде. Прво мерење је изведено у најнижем положају када је сонда на 4,8cm од дна. Теоретски гледано, при овом растојању мерна зона се налази на самом дну а једним делом је и нарушена чврстом контуром резервоара.

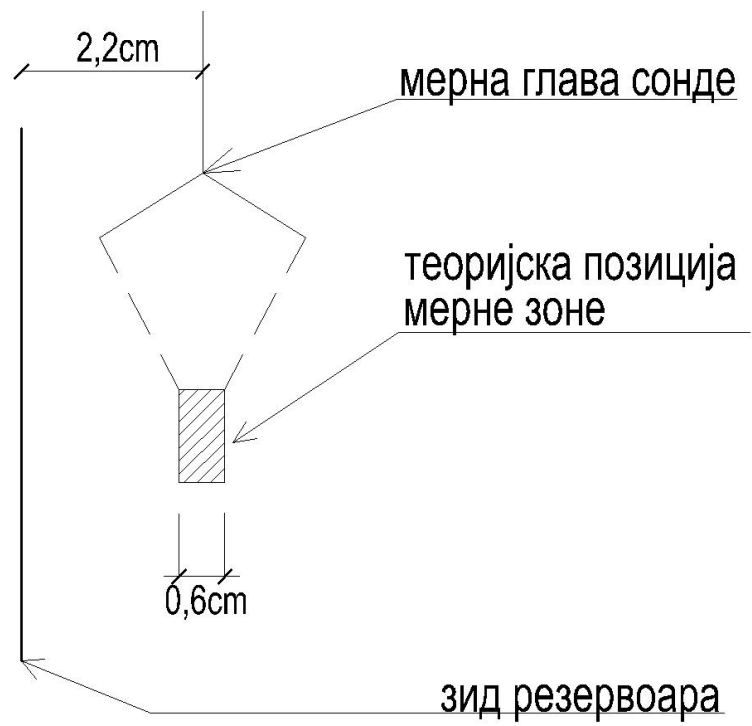


Слика 12. Теоријска позиција мерне зоне при мерењу брзине у најнижој позицији сонде

Тестирање сонде је извршено у два упоредна мерења код којих је вредност параметра  $SOS$  била  $1310\text{m/s}$ , односно  $1470\text{m/s}$ , при константној фреквенцији узорковања од  $50\text{Hz}$ . Приликом позиционирања, метар је кориштен за проверу команде Distance Check.

### Утицај бочних ивица на рад

Након дефинисања граничне зоне по дубини следи тестирање рада сонде у близини бочних ивица канала. Препорука за одстојење мерне запремине од зида је идентична као у претходној области, али циљ овог тестирања је да проверимо тврђе са којима смо започели екперимент као и да боље упознамо могућности наше инсталације. Такође, вршимо мерења за  $SOS = 1310\text{m/s}$  и  $SOS = 1470\text{m/s}$  при фреквенцији узорковања  $50\text{Hz}$ . Очекујући различите резултате, пошто лева (спољна) и десна (преградна) ивица нису паралелне, вршимо одвојена тестирања уз једну и другу ивицу. Глава сонде се налази на  $21.3\text{cm}$  од дна како би се избегао утицај чврсте контуре, а уједно мериле брзине у средини тока. Дубина воде у кади је  $27\text{cm}$ .



Слика 13. Шематски приказ и фотографија позиције сонде приликом мерења уз ивицу базена

## Додатно мерење

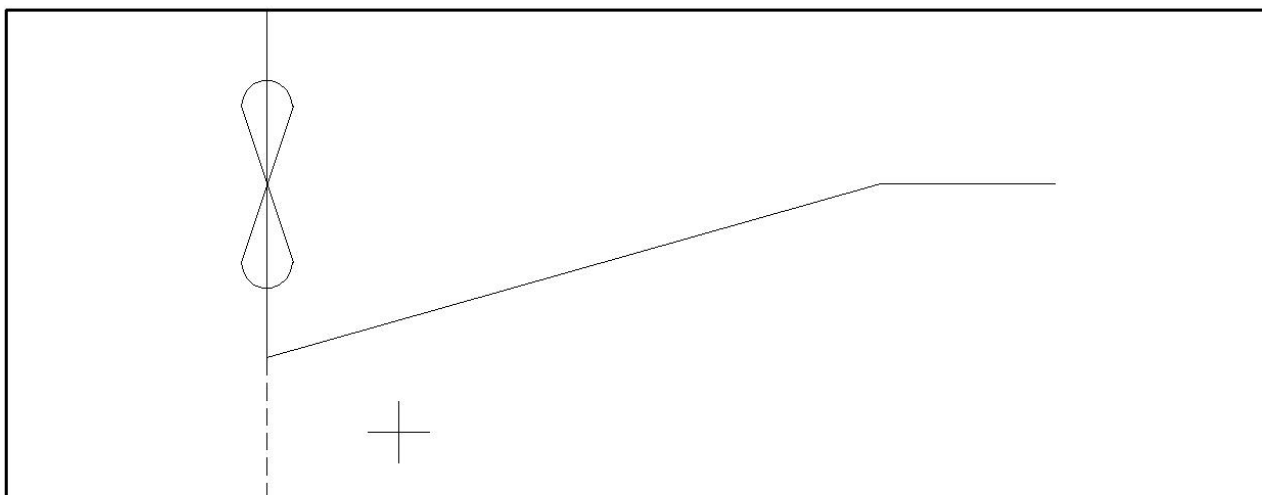
Мерење АДА сондом је најсигурније ако се испоштују све препоруке произвођача и не мери у областима за које се може рећи да су граничне зоне мерења. У наведеним зонама сонда не пружа максимум својих перформанси али не мора значити да је у њима мерење и немогуће извести. Граничне зоне увек представљају додатни изатов за екпериментисање, зато што се често не могу постићи идеални услови, поготово ако се мерење врши на природним водотоцима. Као и код претходних испитивања и овом ћемо вршити тестирања у нестандартним условима. До сада нам је примарни циљ био провера могућности сонде у рецикулационом базену а сада ћемо пробати да позиционирамо сонду унутар препоручене области, али ћемо мењати услове течења. Покушћемо да испитамо граничне могућности инсталације, односно читаваћемо брзине приликом покретања фазе мировања или приликом умиривања.

1) Први покушај је био да се постави дрвена плоча у продужетку средишње преграде како би се продужило путовање воде од мотора до сонде, а самим тим и истрошила енергија коју поседује турбулентно течење.

2) Другим тестирањем смо покушали да снимимо брзине када мотор не ради, вода у резервоару мирује, а носач за сонду померамо заједно са сондом.

3) У наредном експерименту смо такође искључили мотор који покреће воду у резервоару. Сонда је фиксирана на носач са супротне стране преграде у односу на мотор, а вода се покреће ручно. Покушавамо да кретање воде обезбедимо завеслајима тако што дрвену плочу користимо као весло.

4) Последње тестирање, је мало комплексније од претходна три и заснива се на покретању и гашењу мотора. У инсталацију смо додали пластичну преграду са рупицама низводно од сонде, како бисмо смањили утицај повратног течења. Циљ испитивања је да забележимо покретање и умиривање воде у резервоару. Прикупљање података започиње док вода у резервоару мирује, након одређеног времена покреће се мотор који резултује покретање воде и сонда читава брзине. Сви наведени експерименти су поновљени са фреквенцијом узорковања од 100Hz и 150Hz, да би се на крају компарацијом дошло до најбољег сигнала који сонда снима.



Слика 14. Позиција АДА сонде и преграде са рупицама

### 3.4 Анализа рада у отвореном каналу

Након завршених тестирања у рецикулационом базену, мерења су настављена у отвореном каналу. Наведени канал омогућава знатно боље услове за мерење АДА сондом, те је циљ мерења био да се оне искористе, и измери распоред брзина тока по читавом попречном пресеку. Посебно је анализиран распоред брзина изнад равне ЕМ сонде, постављене унутар самог канала. Резултати анализе распореда брзина представљених у овом раду су коришћени и за потребе испитивања рада равних ЕМ сензора (Иветић, 2019). Постављањем ЕМ сонде на дно канала употпуњена су мерења и омогућено да се сниме распоред брзина, а након тога и моделира. ЕМ сонда мери брзине у зони изнад електрода због чега је усвојено да се мерења АДА сондом изврше у неоклико тачака како би се упоредили резултати.

АДА сонда је фиксирана за носач позиционера инсталираног на врху канала. Позиционер је точковима ослоњен на шине те се кретање дуж канала обавља ручно док се прецизно позиционирање по попречном профилу врши помоћу за то намењеног софтвера. У софтверу се дефинишу тачке у којима ће се мерити сондом, тако да се сонда аутоматски позиционира у жељени положај.

### 3.5 Могућност уклањања пикова

Технологија мерења и мерна опрема се свакодневно усавршавају, али ретко када је могуће користити измерене величине без додатне обраде сигнала. Сирови сигнал који сонда чита при мерењу увек садржи примесе које могу значајно утицати на тачност резултата. Најчешћи узроци за појаву поменутих грешка су алијасинг Доплеровог сигнала и Доплеров шум.

Алијасинг Доплеровог сигнала се јавља у два случаја: услед недовољне количине суспендованих честица у мерној запремини или због мерења брзина која је изван дефинисаног опсега уређаја. Корисник лако може уочити појаву алијасинга која се у поређењу са стварним вредностима разликује због својих екстремних вредности, односно појаве пикова. Први корак након појаве пикова је да се повећа опсег брзина у којем АДА сонда мери. Уколико се проблем понавља други корак је да се „засејавањем“ (додавањем вештачких честица) повећа концентрација суспензије.

Min/max filter (Nikora i Goring 2000.) – представља најједноставнији алгоритам за детекцију алијасинга који је обрађен у овом раду. На основу измерених вредности израчунавају се минимални и максимални праг који представљају границу изван које се налазе лоши резултати. Мин/макс праг се добијају изразима:

$$u_{min} = \bar{u} - \sqrt{2 \ln(N)} \sigma_u$$

$$u_{max} = \bar{u} + \sqrt{2 \ln(N)} \sigma_u$$

Где је  $\bar{u}$  средња брзина у X правцу, N представља број измерених података а  $\sigma_u$  је стандардна девијација за брзину  $u$  у X правцу.

Acceleration filter (Nikora i Goring 2000.) – заснива се на тврдњама да је убрзање честице у водотоку пропорционално гравитационом убрзању  $g$  и да су истог реда величина. Убрзање се израчунава помоћу израза  $a_i = (u_i - u_{i-1})/\Delta t$  за сваку компоненту брзине одвојено, а праг за издавања пикова изразом  $a_{max} = k_g g$ . Константа  $k_g = \lambda \sigma_a/g$  по препоруци аутора може се усвојити у опсегу 1 – 2. У овом алгоритму пикови су дефинисани следећим условима:

$$1) a_{x,i} > k_g g \quad \text{и} \quad u_i > \bar{u} + k_\sigma \sigma_u$$

$$2) a_{x,i} < -k_g g \quad \text{и} \quad u_i < \bar{u} - k_\sigma \sigma_u$$

Варирање вредности константе  $k_\sigma$  не утиче значајно на крајње резултате, али је препоручена вредност једнака 1.5.

Phase-space filter (Goring i Nikora 2002.) – је најефикаснији и најчешће се користи приликом обраде сигнала добијених АДА сондом. Метода се заснива на примени дијаграма фаза-простор на којима се приказује зависност променљивих и њихових извода. За сваку компоненту брзине се користе одвојени дијаграми и свака измерена брзина приказује се као тачка, а све тачке формирају облак који је ограничен елипсом. Све тачке које се нађу изван елипсе, сматрају се пиковима и елиминишу се из серије мерења. Итеративним поступком се у сваком кораку прерачунава елипса и избацују се тачке ван ње, док у последњој итерацији све тачке не буду унутар елипсе. У наставку ће бити приказани кораци алгоритма:

-У првом кораку прорачунава се први и други извод измерених брзина:

$$\Delta u_i = (u_{i+1} + u_{i-1})/2$$

$$\Delta^2 u_i = \frac{(\Delta u_{i+1} + \Delta u_{i-1})}{2}$$

-У другом се израчунавају стандардне девијације  $\sigma_u$ ,  $\sigma_{\Delta u}$ ,  $\sigma_{\Delta^2 u}$ , за променљиве  $u_i$ ,  $\Delta u_i$  и  $\Delta^2 u_i$ .

-Трећи корак алгоритма подразумева да се за сваки пар променљивих ( $u_i$  и  $\Delta u_i$ ;  $\Delta u_i$  и  $\Delta^2 u_i$ ;  $u_i$  и  $\Delta^2 u_i$ ) израчунају елипсе након чега ће се одвојити пикови од исправних резултата:

$$(\lambda_U \sigma_u)^2 = a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta$$

$$(\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u})^2 = a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta$$

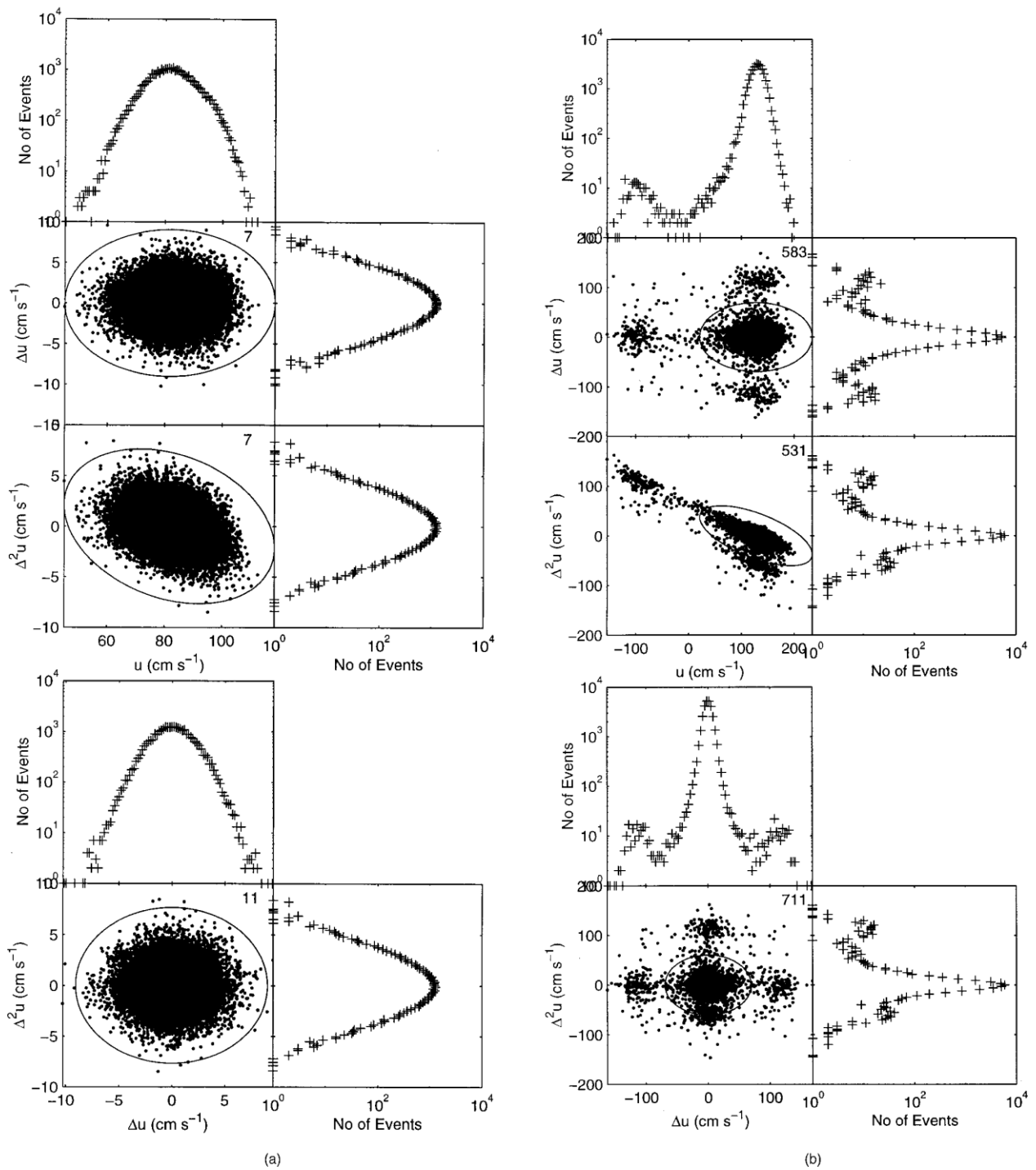
Са  $a$  и  $b$  су означене дужа и краћа оса елипсе и мењају се у зависности од вредности које се приказују на графику. Угао ротације у односу на главну осу  $\theta$  израчунава се помоћу крос-корелације:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sum u_i \Delta^2 u_i}{\sum u_i^2} \right)$$

Променљива  $\lambda_U = \sqrt{2 \ln n}$  представља универзални праг, док је са  $n$  означен број података који се користи у прорачуну.

-Последњи корак алгоритма служи да би се пикови заменили процењеним тачним вредностима.

Итеративни поступак се понавља док се не очисте сви пикови, односно док број исправних резултата не постане константан.



Слика 15. а) Резултати након примене "Phase-Space Threshold filter"; б) Контаминирани резултати пре замене пикова



Velocity correlation filter (Goring i Nikora 2002.) – заснива се на идејама претходно обрађеног алгоритма, с тим што се сада користе дијаграми на којима се приказује међусобна зависност компонената брзине. Ова метода се разликује од претходне у томе што се детектовани пикови детектују током итерација, али се не избацују. Уклањање свих лоших резултата се врши на крају када се заврши процес детекције. Аутори наводе ову промену као значајан напредак у обради, нарочито код изражено турбулентних водотока где се детектовани лоши резултати замењују такође лошим резултатом чиме се продужава итеративни поступак.

Претходно обрађене методе су подразумевале одвојене алгоритме за сваку компоненту брзине. У овој методи се обрађују заједно из чега следи да детекцијом пика све три компоненте међају лош резултат. Још једна добра карактеристика ове методе је да детекција лоших сигнала не зависи од фреквенције узорковања, што даје предност мерењима код којих је фреквенција узорковања ниска. Са друге стране на овај начин се губи могућност да се диференцирањем сигнала изразе високе фреквентне компоненте. Идентично као у претходном алгоритму добри подаци се налазе унутар елипсоида дефинисаног помоћу универзалног прага  $\lambda_U$ . У наставку ће бити приказани кораци алгоритма за раван флукуација компонената брзина  $u' - v'$ .

Центар елипсоида и угао ротације у односу на главну осу  $\theta$  рачунају се коришћењем линеарне регресије. Из услова да је средња вредност флукуације  $\sum u' = \sum v' = 0$  могу се одредити коефицијенти  $m$  и  $b$  у једначини праве  $v' = mu' + b$ :

$$b = 0$$

$$m = \tan \theta = \frac{\sum u'_i v'_i}{\sum u'^2_i} = \frac{\overline{u'v'}}{\overline{u'^2}}$$

Прорачун велике и мале осе елипсоида у одговарајућој равни, израчунава се:

$$a^2 = \frac{(\lambda_U \sigma_u \cos \theta)^2 - (\lambda_U \sigma_v \sin \theta)^2}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta}$$

$$b^2 = \frac{(\lambda_U \sigma_v \cos \theta)^2 - (\lambda_U \sigma_u \sin \theta)^2}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta}$$

Итеративним поступком се уклањају сви подаци који су детектовани а носе грешку услед алијасинга. Након уклањања пикови се замењују процењеним тачним вредностима

## 4 Резултати и дискусија

### 4.1 Утицај салинитета на рад АДА сензора

**Оригинална диспозиција са дуплим дном** – Већ је напоменуто (3.2.) да су резултати у неколико тестираних позиција били лоши, па нећемо ни обрађивати резултате. Проблем се јављао због дуплог дна од плексигласа унутар рецикулационог резервоара. Мерном траком је вршена позиција сонда, а команда Distance Check је израчунавала дубине дупло веће.

**Глатко метално дно** – На графику 1. су приказани резултати мерења дубине када се испод сонде налази глатка метална плоча. Услед различитих вредности брзине простирања таласа добијени су различити резултати. Приликом обимнијих мерења за које се дубина користи као улазни податак, добијена одступања могу значајно утицати на измерене вредности.

Црна линија на графику представља дубине измерене метром. Најмања одступања од стварне, метром измерене дубине, настају када је вредност Measured Salinity једнак нули, а брзину простирања таласа software израчуна (розе линија). Минимална одступања су настала и подешавањем  $C=1470\text{m/s}$  (жута линија). Грешке које се јављају у претходним мерењима, могу се сврстати у мале грешке. Веће одступања, око 10% од мерене дубине, јавља се када је вредност  $C=1310\text{m/s}$  (плава линија).

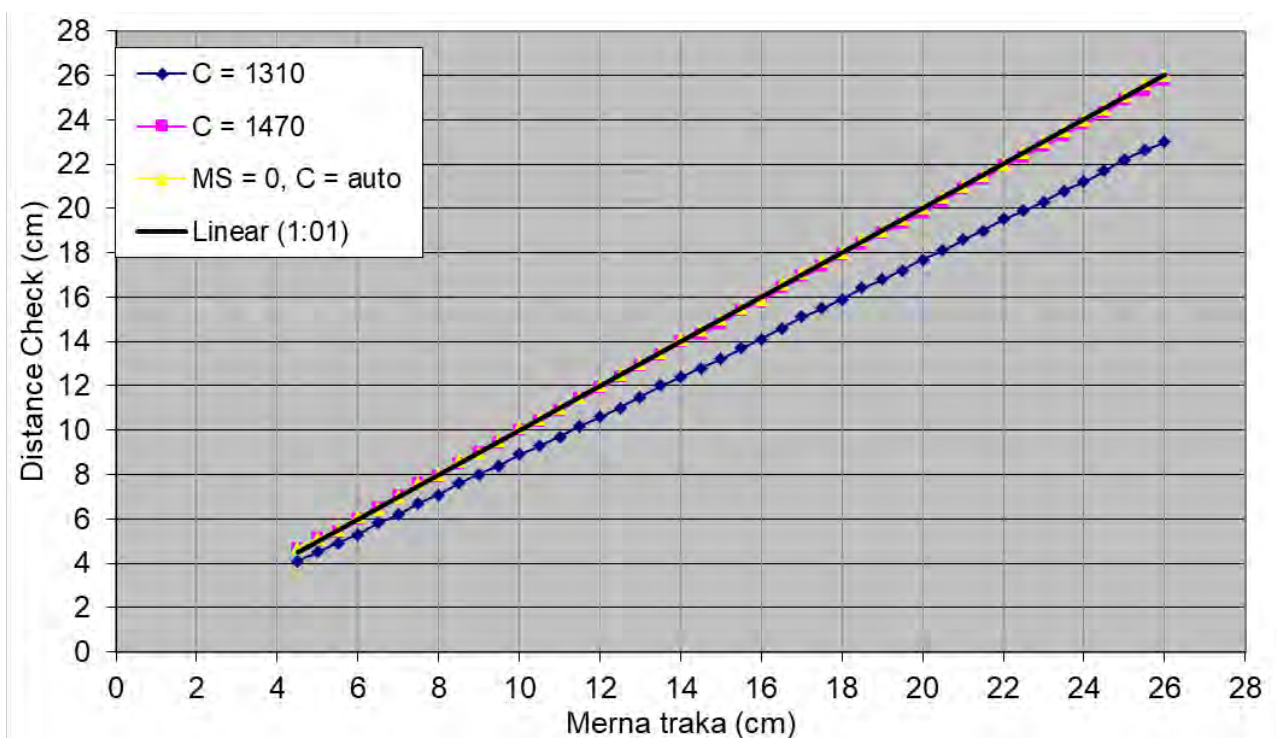


График 1. График са резултатима тестирања са глатким металним дном

Табела 1. Табела са резултатима тестирања са глатким металним дном

Merna traka (cm)	Distance Check (cm)		
	C=1310	C=1470	MS 0
4.5	4	4.4	4.5
5	4.4	5	5
5.5	4.8	5.4	5.5
6	5.3	6	6
6.5	5.8	6.5	6.5
7	6.3	7	7.1
7.5	6.7	7.5	7.5
8	7.1	8	8.1
8.5	7.6	8.5	8.6
9	8.1	9.1	9.1
9.5	8.4	9.5	9.5
10	8.9	10	10.1
10.5	9.4	10.5	10.6
11	9.8	10.9	11
11.5	10.2	11.5	11.5
12	10.7	12	12.1
12.5	11.1	12.4	12.5
13	11.5	12.9	13
13.5	11.9	13.4	13.5
14	12.4	13.9	14
14.5	12.8	14.4	14.5
15	13.2	14.8	14.9
15.5	13.7	15.3	15.4
16	14.2	15.9	16
16.5	14.6	16.4	16.5
17	15	16.9	17
17.5	15.5	17.4	17.5
18	15.9	17.9	18
18.5	16.2	18.2	18.4
19	16.8	18.9	19
19.5	17.2	19.3	19.5
20	17.7	19.9	20
20.5	18.1	20.3	20.5
21	18.6	20.9	21.1
21.5	19	21.3	21.5
22	19.5	21.8	22
22.5	19.9	22.3	22.5
23	20.3	22.8	23
23.5	20.8	23.3	23.5
24	21.2	23.8	24
24.5	21.6	24.3	24.5
25	22.1	24.8	25
25.5	22.6	25.3	25.5
26	23	25.9	26

Закључак овог тестирања је да подешавањем  $MS=0$ , избегавамо ситуације које могу довести до грешака приликом мерења. Сونда помоћу свог software-а подешава параметре тако да резултати мерења буду потпуно тачни или имају одступање од 1mm што је у већини мерења занемарљива грешка. Током анализе се дешавало да сонда региструје сигнал лошег квалитета у појединим тачкама. Претпоставка је да на лош квалитет сигнала утиче сувише глатка површина, па смо померањем сонде на задрљани део плоче добијали сигнал задовољавајућег квалитета (Слика 16.).



Слика 16. Фотографија глатке еталне плоче са обележеном задрљаном зоном

**Храпаво метално дно** - Резултати мерења са храпавом металном плочом се не разликују значајно од претходног мерења. Приказани су резултати мерења од површине до дна као доказ да нема утицаја на саму сонду. Једина аномалија примећена је на око 10cm од дна. Сонда је приказивала дупло веће дужине од метром измерених дужина. Закључено је да се у зони тачно испод сонде налази сјајнији део плочице, због чега је сонда грешила. Померањем плочице или прекривање крпом, отклонило је проблем и настављено је мерење.

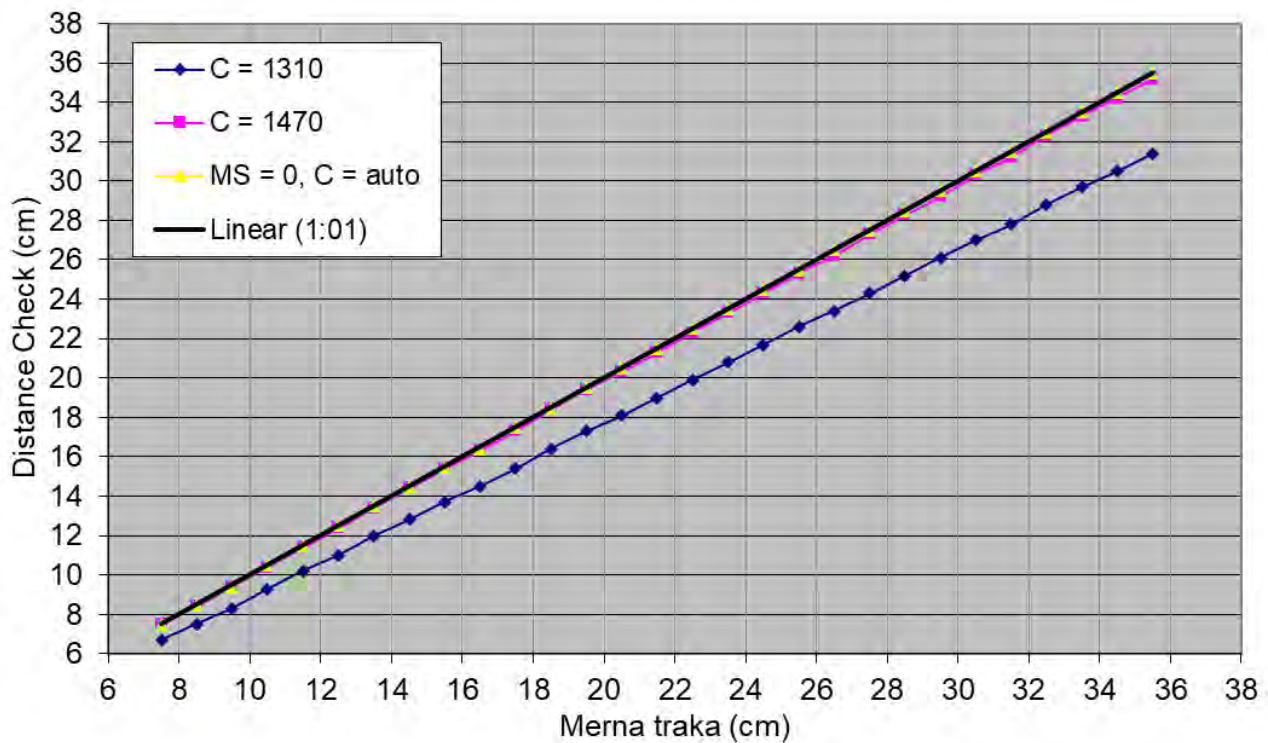


График 2. График са резултатима тестирања са храпавим металним дном

Табела 2. Табела са резултатима тестирања са храпавим металним дном

Merna traka (cm)	Distance check (cm)		
	C=1310	C=1470	MS 0
35.5	31.4	35.2	35.5
34.5	30.5	34.2	34.5
33.5	29.7	33.3	33.5
32.5	28.8	32.3	32.5
31.5	27.8	31.2	31.5
30.5	27	30.3	30.5
29.5	26.1	29.2	29.5
28.5	25.2	28.3	28.5
27.5	24.3	27.3	27.5
26.5	23.4	26.2	26.5
25.5	22.6	25.3	25.5
24.5	21.7	24.3	24.5
23.5	20.8	23.3	23.5
22.5	19.9	22.3	22.5
21.5	19	21.3	21.5
20.5	18.1	20.3	20.5
19.5	17.3	19.4	19.5
18.5	16.4	18.4	18.5
17.5	15.4	17.3	17.5
16.5	14.5	16.3	16.4
15.5	13.7	15.4	15.5
14.5	12.8	14.4	14.5
13.5	12	13.4	13.5
12.5	11	12.4	12.5
11.5	10.2	11.4	11.5
10.5	9.3	10.4	10.5
9.5	8.3	9.4	9.4
8.5	7.5	8.4	8.5
7.5	6.7	7.5	7.5

Закључак експеримента је као и приликом мерења са глатком плочицом. Доказали смо претходним мерењима да резултати добијени за  $C=1470\text{m/s}$  и  $MS=0$  су скоро идентични. Све наредне анализе су изведене за  $C=1470\text{m/s}$  и  $C=1310\text{m/s}$ , али ће бити презентоване само резултати за  $C=1470\text{m/s}$ .

## 4.2 Анализа утицаја близине чврсте контуре на рад АДА сензора

### Утицај дна на рад

У претходном експерименту је установљено да сонда може одредити дубину са великим степеном прецизности чак и у случају када се приближи самом дну. На основу тих резултата покушали смо да дефинишемо шта се дешава када сонду примакнемо превише близу дна и меримо брзине.

Почетна позиција сонде у којој је вршено мерење је ручно дефинисана на 4.8cm од дна, а параметар  $SOS = 1470m/s$ . На графику се читава сигнал без шума, за брзине у правцу тока. Закључак мерења је да се на овако малом растојању сонде од дна, могу мерити профилне брзине, а прикупљени подаци могу сматрати исправним. Потврда за то је вредност параметра SNR која означава квалитет сигнала. Током тестирања је вредност SNR константно била око 23dB.

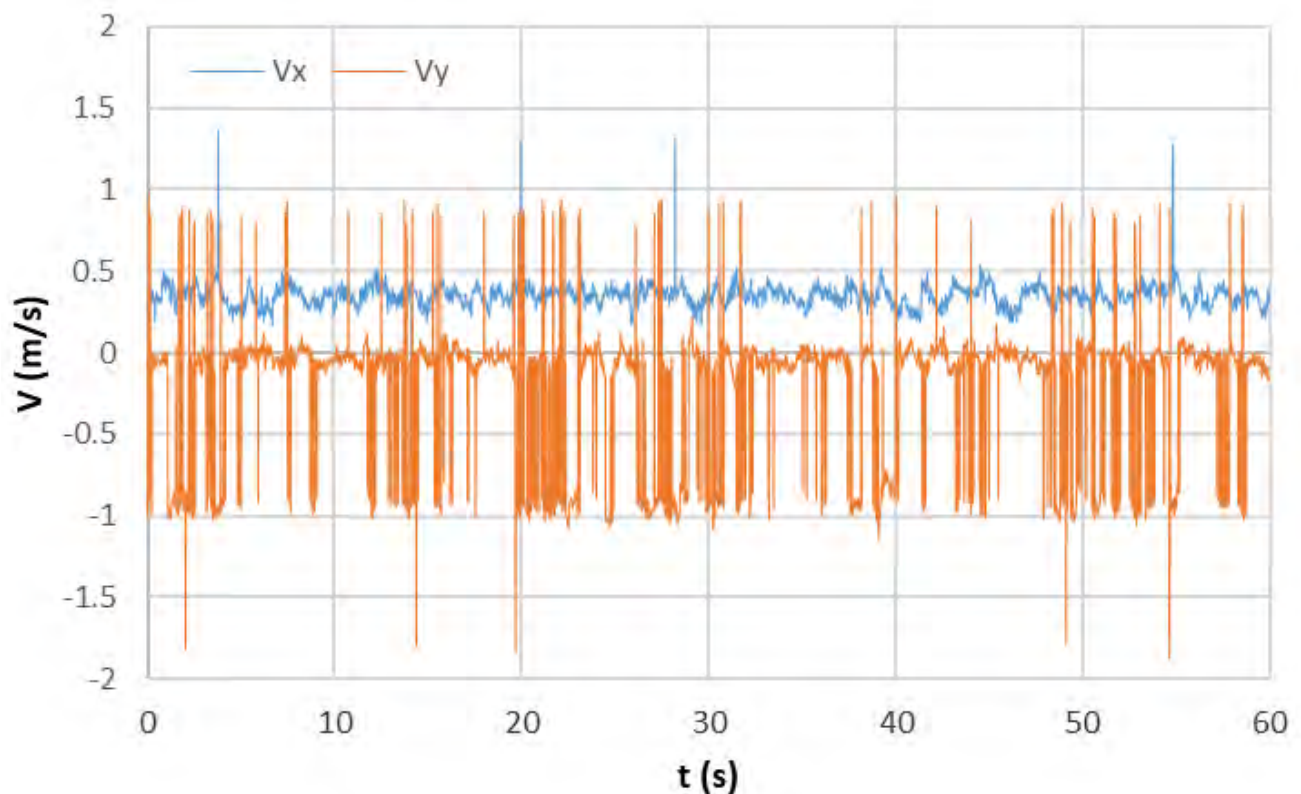


График 3. Мерење брзине у рецикулационом резервоару, позиција сонде на 4,8cm од дна, фреквенција узорковања 50Hz

Феномен који се јавља приликом мерења је да опција Distance Check у овој позицији показује вредност 7.4cm за  $SOS = 1310m/s$ , а 8.25cm за  $SOS = 1470m/s$ . Позиција на којој је могуће мерити уз  $SOS = 1310m/s$  налази се на 6.3cm од дна, односно 8.7cm за команду Distance Check. Такође, очекивано је да ће сигнал који сонда записује бити бољег квалитета како се повећава растојање од дна, међутим на растојању од 7.3cm забележен је сигнал изузетно лошег квалитета за обе вредности SOS. Наведене појаве нису тема овог рада, али би се могле додатно проверити и разрадити неким наредним радом.

### Утицај бочних ивица на рад

Мерење уз леву ивицу је почело постављањем сонде у позицију када пријемници скоро додирују ивицу каде. У овом случају предајник се налази на 2.2cm, а планирано је да се тестирање изврши до удаљености од 5cm. Иако је препорука да се сонда не позиционира у близини чврсте контуре, резултати су на свим позицијама били добри уз присуство шума који се лако елиминише приликом обраде података.

На графику су приказане измерене профилне брзине на растојању 2.2cm од ивице, при SOS на 1470m/s. Плава крива означава брзине у правцу тока, а наранџаста приказује брзине управно на правац тока. На графицима се види да су брзине тока око 0.35m/s, а шум који се јавља је у опсегу  $\pm 0.2m/s$ . Управно кретање воде је занемарљиво, а шум који се јавља је као и у претходном случају око  $\pm 0.2m/s$ .

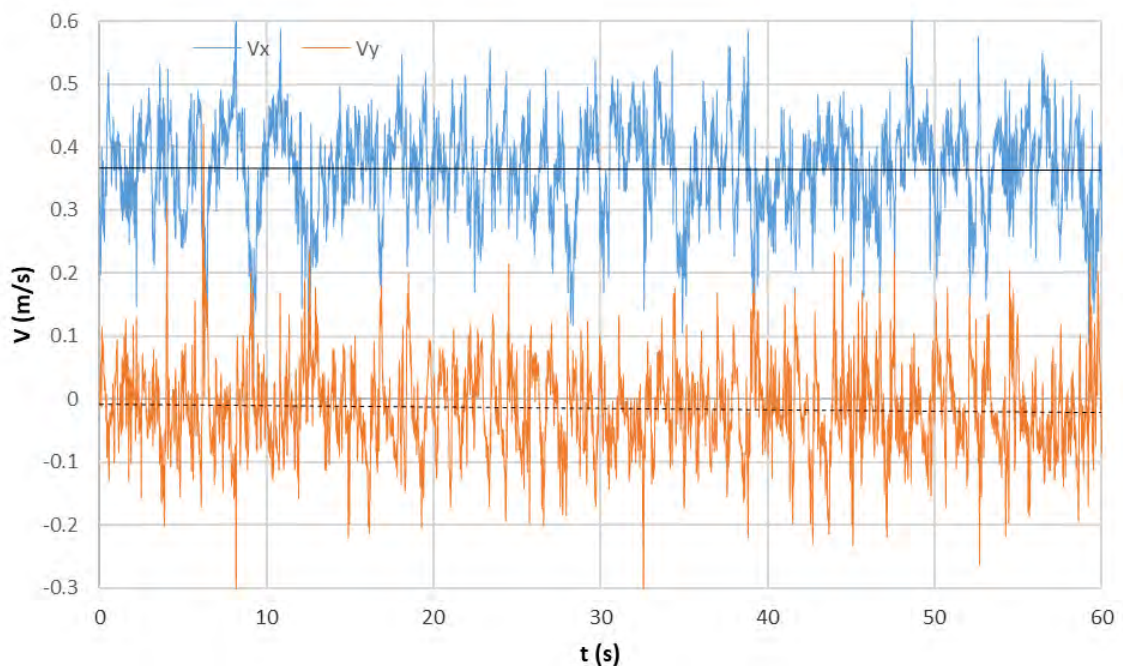


График 4. Мерење брзине у рецикулационом резервоару, позиција сонде на 2,2cm од леве ивице, фреквенција узорковања 50Hz



На наредна два графика су приказане брзине за обе вредности параметра SOS, али је растојање сонде 5cm од ивице. Примећује се да је већи утицај турбулентног кретања на растојању од 5cm, али се средња вредност профилне брзине није значајно променила. Закључак овог тестирања је да сонда приказује добре резултате и на растојању мањем од препорученог. Вероватно велики утицај на квалитет резултата има и што су ивице каде од пластике. Већина канала у којма се врше мерења су од бетона и требало би резултате овог тестирања узети са резервом. Мерења су вршена у лабораторијским условима и немогуће их је извести ван лабораторије.

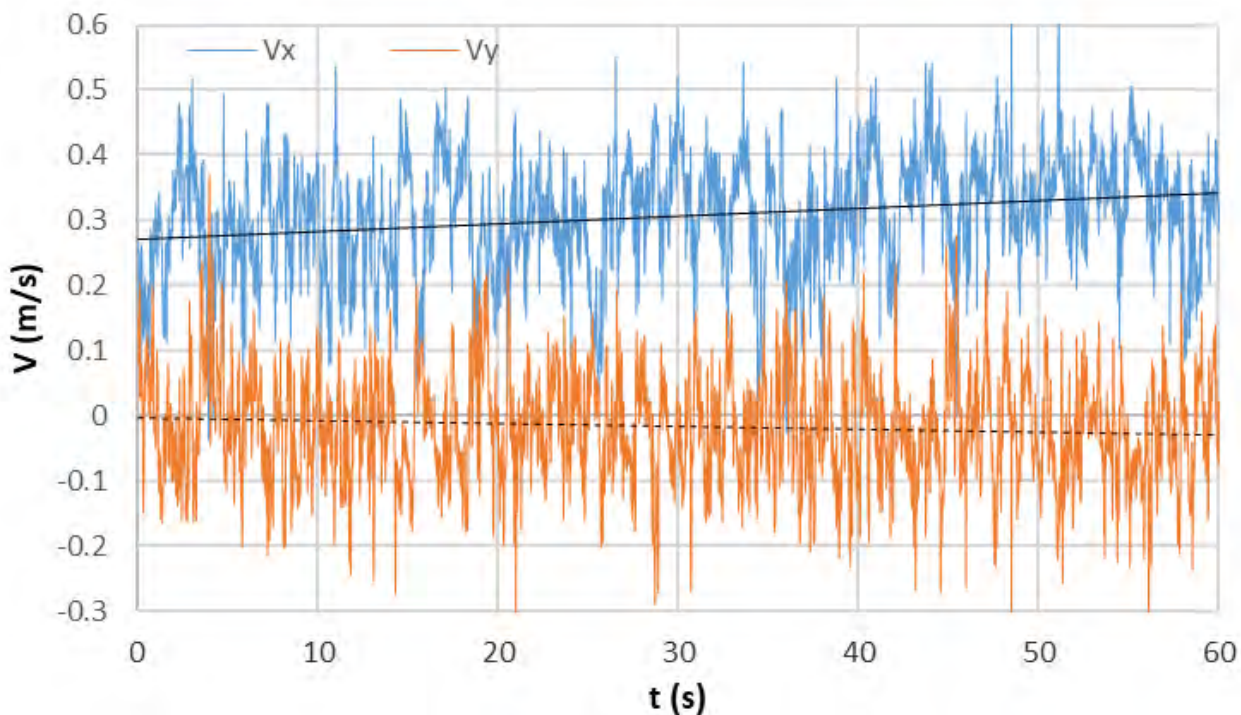
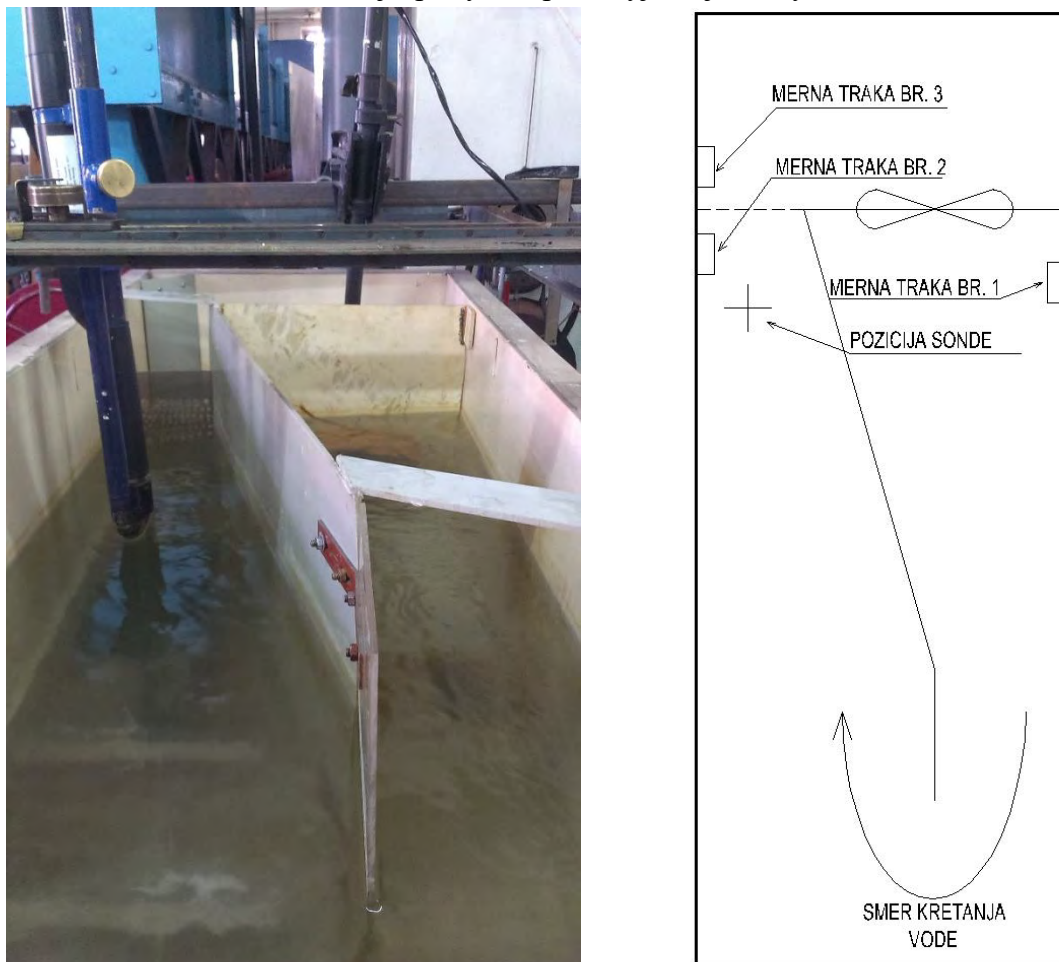


График 5. Мерење брзине у рецикулационом резервоару, позиција сонде на 5cm од леве ивице, фреквенција узорковања 50Hz

Уз десну ивицу се појавио технички проблем због конструкције саме инсталације тако да није било могуће позиционирати мерну главу сонде ближе од 5.5cm од зида. Знајући тестиране карактеристике сонде уз леву ивицу, ово је била зона у којој сонда показује добре резултате, а мерењем смо потврдили наше претпоставке.

### Додатно мерење

У првих 10-ак секунди док брзина воде расте утицај шума на сигнал је мали, разлог томе је што турбуленције које производи мотор још нису стигле до сонде. Након тог почетног периода јављали су се лоши сигнали о којима је већ било речи. Овај део експеримента је због своје специфичности снимљен камером из више позиција, где се јасно примећује да у тренутку када талас стиже до сонде на дијаграму се примећује појава шума.



Слика 17. Фотографија и скица инсталације током експеримента

На првом графику је приказано како вода мирује до око 16 секунди од почетка снимања сондом. Изражени су пикови зато што је вода у кади засејана сидингом, а при мировању воде сидинг почиње да се слеже на дно. Квалитет сигнала се поправља чим се покрене вода и тај део је уочљив на графику на шеснаестој секунди. Након покретања мотора брзина воде расте на 0.15m/s, константна је неколико секунди, а након тога изражени су утицаји мотора који се простиру до сонде. Сигнал на графику се вратио у почетно стање након гашења мотора и заустављања воде у кади.

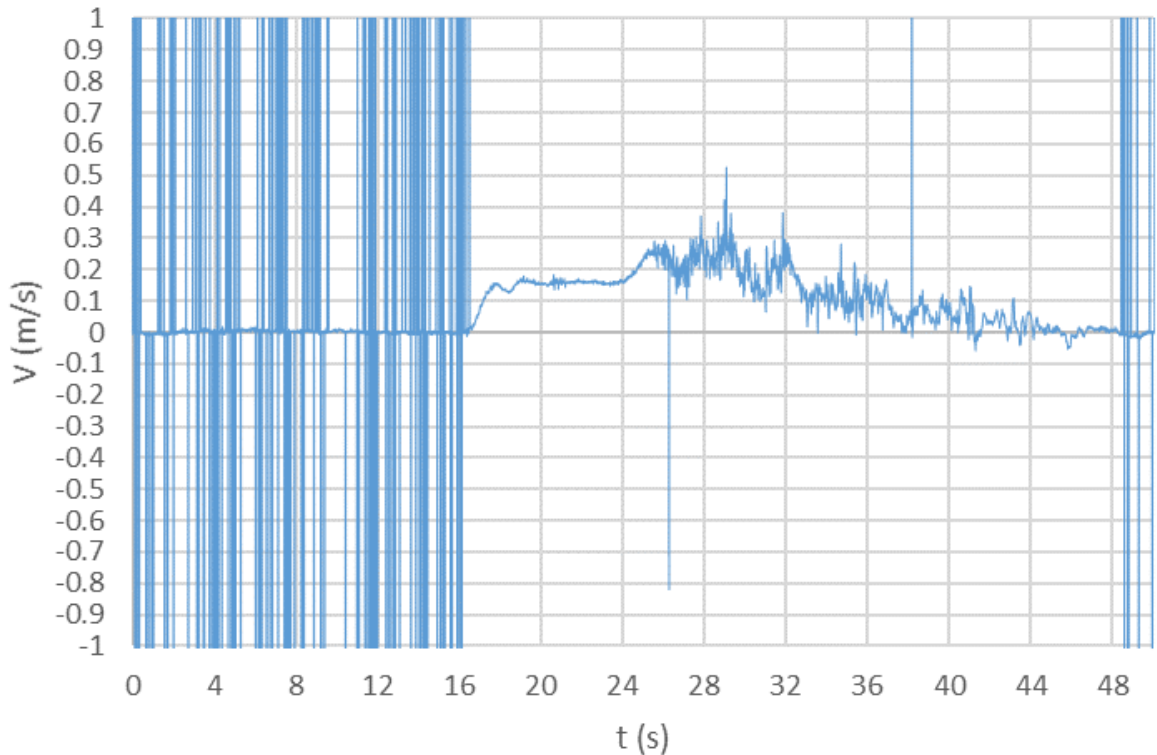


График 6. Брзина у тачки након покретања мотора

Проблем који до сада нисмо успевали да докажемо је утицај мотора на кретање воде и геометрија базена која неповољно утиче. Кроз сва претходна мерења се јављао шум који нисмо успели да уконио, а претпоставка је била да потиче од пропелера. График 5. доказује наше претпоставке и потврђује да АДА сонда може снимати чистији сигнал, без лоших примеса, ако се омогуће бољи услови за мерење.

Разумевање овог открића лакше ће се објаснити ако замислимо да је вода у кади издељена на мење сегменте. Покретањем мотора вода у зони пропелера се прва помера и потискује воду испред и тако док не направи пун круг око преграде и дође на почетну позицију. Вода у зони пропелера прва „осећа“ утицај вртлога насталих окретањем пропелера и само део тих утицаја успева да истроши док не стигне до сонде. Тај утицај се примећује и на графику. Од шеснаесте секунде, када се вода покрене, поред сонде пролази вода коју не покреће директно пропелер, већ је потискује вода „обогачена“ утицајем вртлога. Након 7.5 секунди од покретања мотора, односно 23.5s на графику, поред сонде пролазе сегменти воде који су били уз пропелер док је вода мировала. Ову појаву региструјемо повећањем брзине кретања, а након 25s турбуленције својим утицајем потпуно ремете кретање воде.

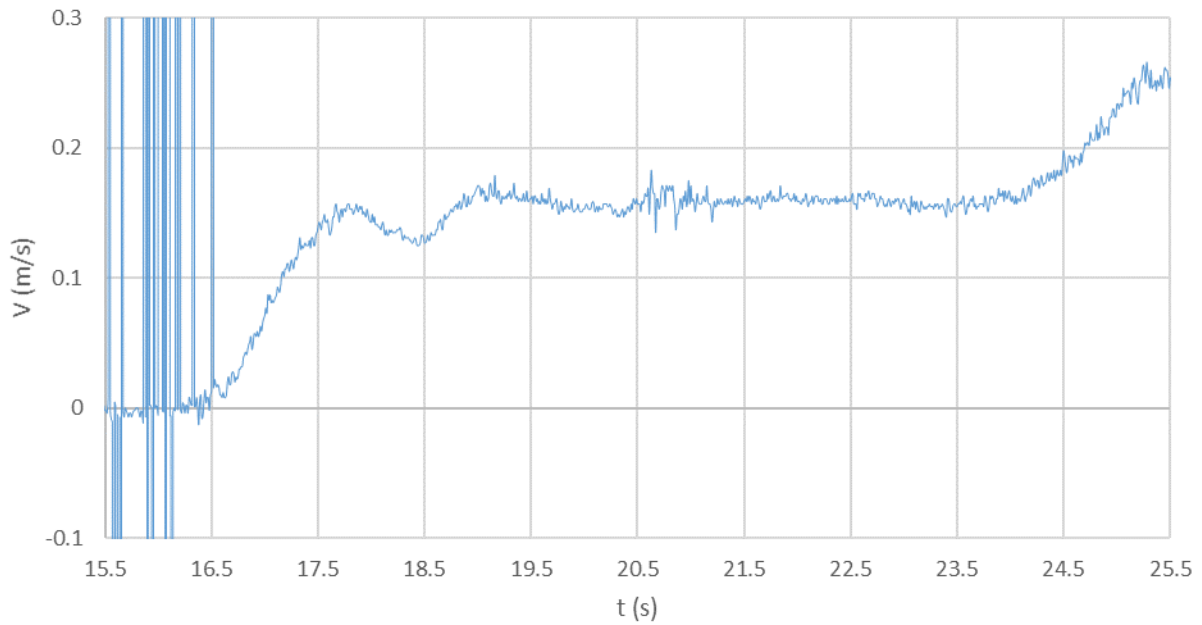


График 7. Исечак снимљене брзине током експеримента са покретањем мотора

#### 4.3 Анализа рада у лабораторијском каналу

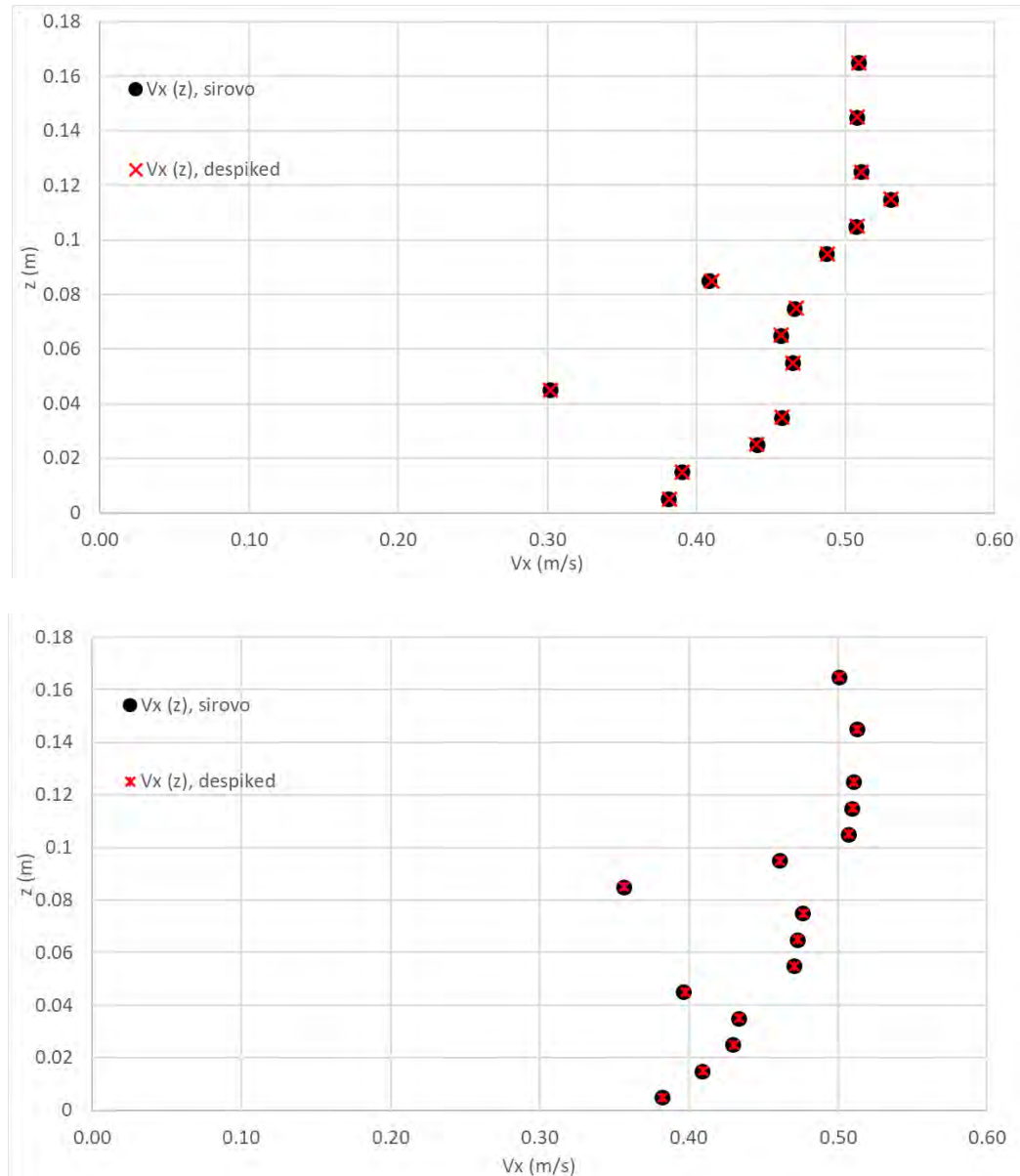
Мерења су извршена каналу при протоку  $Q=33,3L/s$  и дубини воде  $H=32,4cm$ . Позиционирање АДА сонде је вршено у односу на ЕМ сонду, чија је дебљина  $2,2cm$ . Почетна позиција сонде је на  $5cm$  изнад ЕМ сонде. Мерене су брзине у тачки у три одабране вертикале (CVP1, CVP2, CVP3). Положај вертикала је дефинисана тако да су CVP1 и 3 изнад електрода ЕМ сонде, док је CVP2 између њих.



Слика 18. Шематски приказ положаја Централних вертикалних профила изнад ЕМ сензора, коришћених за мерење подужне компоненте брзине помоћу АДА сензора (Иветић, 2019)

#### 4.4 Могућност уклањања пикова

Снимљене брзине у отвореном каналу смо „очистили“ једним од алгоритама (Nikora i Goring 2000.) приказаних раније (3.5.). На графику 7. су приказане брзине пре и после елиминасања пикова екстремних вредности. Уклоњени пикови су након детекције замењени интерполованим подацима, а интерполација је извршена помоћу кубног полинома. Анализом графика може се уочити да алгоритам није дао велики утицај у поређењу са сировим сигналом.



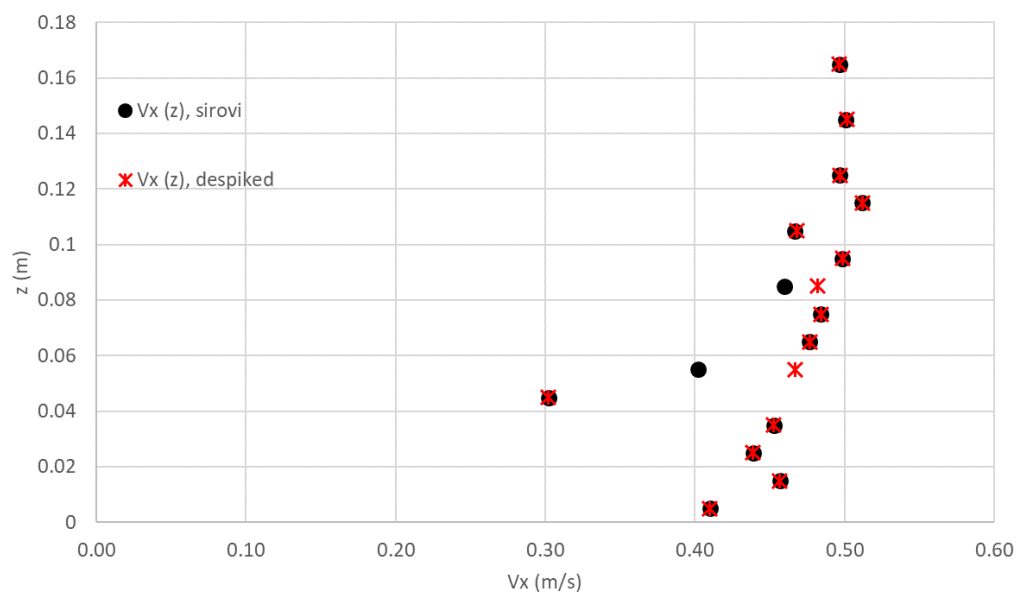


График 8. Брзине у отвореном каналу редом у тачкама CVP1, CVP2 и CVP3; црним маркерима обележени су сирови подаци а црвеним обрађени

## 5 Закључци

Брзина водотока је величина помоћу које је могуће разумети многе феномене који се формирају у водотоку. АДА сонда мери брзине даљински, не реметећи струјну слику водотока, а мерење врши са великом тачношћу. Наведени су само неки од разлога зашто је одлучено да се овај рад бави АДА сондом, њеним могућностима, анализом рада у оптималним условима и ван њих. Анализирана је „Vectrino+“ сонда, а то је инструмент великих могућности и широке примене. Користили смо је у режираним граничним условима како бисмо њене могућности тестирали на инсталацијама у хидрауличкој лабораторији.

У оквиру овог рада је анализиран утицај салинитета, односно густина воде на рад АДА сензора. Анализирани су резултати мерења удаљености сонде од дна резервоара функцијом Distance Check која је саставни део software-а уз „Vectrino+“ сонду. Измерене резултате смо проверавали мерном траком са милиметарском провером и уставновљено је да функција Distance Check најбоље резултате показује када се подеси Measured Salinity = 0. Одабиром ове опције, software сам израчунава брзину простирања таласа за услове у којима се врши мерење. У овој анализи смо такође проверавали како на квалитет сигнала који детектује АДА сонда, утиче подлога изнад које се мери. Закључак је да испод сонде не би требало да буде прозирна контура, као што је плексиглас у рециркулационом базену. Анализирањем резултата је закључено да је квалитет сигнала лошији уколико се на дну налази добро углачана површина.

Установљене су минималне разлике резултата при брзини прстирања звука 1470m/s, у односу на брзину звука приликом подешавања Measured Salinity = 0. Са овим закључком смо се даље водили и приказали резултате. Наредном анализом је приказано је како на АДА сонду утиче близина чврсте контуре (дно и ивица резервоара) приликом мерења брзине протока у тачки. Закључак је да сонда на инсталацији у којој је мерено, бележи добре резултате и када је мерна зона уз контуру. Треба бити обазрив приликом експлоатације АДА сонде, нарочито ако се мерење врши у природном водотоку. Анализиран је утицај чврсте контуре од глатког материјала те се не може рећи да је репрезентативан пример за наредна истраживања у неким другим условима. Из искуства произвођача и других корисника знали смо да је за правилан рад сонде потребно присуство суспензије, а унутар додатних мерења смо потврдили њихове тврдње.

Услови у отвореном каналу су знатно повољнији за мерење брзине у тачки АДА сондом од услова у рециркулационом базену. Брзине у тачки смо снимали у више положаја на ветикали, па смо њиховим повезивањем у једно мерење, као резултат добили распоред брзина по вертикали. Приказали смо и једну од метода за обраду сигнала која нам служи да уклонимо штетне утицаје Доплеровог шума.

## 6 Литература

Cea, L., Puertas, J., & Pena, L. (2007). Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV. *Experiments in fluids*, 42(3), 333-348.

Chanson, H. (2008). Acoustic Doppler velocimetry (ADV) in the field and in laboratory: practical experiences

García, C. M., Cantero, M. I., Niño, Y., & Garcia, M. H. (2005). Turbulence measurements with acoustic doppler velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1062-1073.

Goring, D. G., & Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of hydraulic engineering*, 128(1), 117-126.

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.

Ivetić, D., Đorđević, J., & Prodanović, D. (2016). Aspects of water velocity measurements with acoustic Doppler velocimetry. *Vodoprivreda*, 48(4-6), 181-190.

Ivetić, D. M. (2019). *Određivanje protoka tečnosti u složenim uslovima strujanja primenom ravnih elektromagnetnih senzora* (Doctoral dissertation, Univerzitet u Beogradu-Građevinski fakultet).

Khorsandi, B., Mydlarski, L., & Gaskin, S. (2012). Noise in turbulence measurements using acoustic Doppler velocimetry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(10), 829-838.

Lohrmann, A., Cabrera, R., & Kraus, N. C. (1994, August). Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use. In *Fundamentals and advancements in hydraulic measurements and experimentation* (pp. 351-365). ASCE.

Nortek, A. S. (2009). Vectrino velocimeter user guide. *Nortek AS, Vangkroken, Norway*, 621.

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.