

Универзитет у Београду

Грађевински факултет

Катедра за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство



## МАСТЕР РАД

Тема: Унапређење методологије прикупљања хидрауличких података за  
потребе димензионисања ППОВ

Кандидат: Жарко Живановић 671/21

Ментор: Др Дамјан Иветић

Београд, 2023.

## САДРЖАЈ:

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | Увод.....  | 7  |
|    | 1.1. Предмет истраживања .....   | 7  |
|    | 1.2. Задатак и циљеви истраживања.....   | 8  |
| 2. | Преглед литературе .....   | 9  |
|    | 2.1. Улазни подаци потребни за димензионисање ППОВ .....                         | 9  |
|    | 2.1.1. Мерење протока отпадних вода.....   | 10 |
|    | 2.1.2. Анализа квалитета отпадне воде .....                                      | 12 |
|    | 2.1.3. Проток масе .....   | 12 |
|    | 2.2. Методологија мерења протока.....  | 13 |
|    | 2.2.1. Мерење протока методом Брзина-Протицајни пресек ( $V - A$ )..             | 14 |
|    | 2.2.2. Методе мерења брзине (ЕМ, УЗВ) .....                                      | 15 |
|    | 2.2.3. Корекциони коефицијенти .....   | 17 |
|    | 2.3. Узорковање отпадних вода .....  | 17 |
|    | 2.3.1. Типови узорковања .....   | 18 |
|    | 2.3.1.1. Мануелно узорковање .....   | 19 |
|    | 2.3.1.2. Узоркивачи са перисталтичком пумпом.....                                | 19 |
|    | 2.3.1.3. Узоркивачи са вакуум пумпом .....                                       | 21 |
|    | 2.3.2. Типови узорака .....  | 22 |
|    | 2.3.2.1. Појединачни узорци .....  | 22 |
|    | 2.3.2.2. Композитни узорци.....  | 22 |
|    | 2.3.3. Типови формирања композитних узорака.....                                 | 24 |
|    | 2.3.3.1. Константна величина узорка .....  | 24 |
|    | 2.3.3.2. Узорковање пропорционално количини протекле воде.....                   | 24 |
| 3. | Методологија.....  | 26 |
|    | 3.1. Опрема коришћена у оквиру истраживања .....                                 | 26 |
|    | 3.1.1. Протокомери.....  | 27 |
|    | 3.1.1.1. ЕМ сензори .....  | 27 |
|    | 3.1.1.2. УЗВ сензори.....  | 31 |
|    | 3.1.2. Дајвери .....   | 34 |
|    | 3.1.3. Узоркивач МАХХ .....  | 36 |
|    | 3.2. Лабораторијско испитивање мерне несигурности уређаја .....                  | 38 |
|    | 3.2.1. Испитивање протокомера.....   | 38 |
|    | 3.2.2. Испитивање нивомера .....   | 41 |
|    | 3.3. Унапређење корекционих функција.....  | 42 |
|    | 3.4. Могућности унапређења помоћне опреме за монтажу и<br>комуникацију .....     | 43 |
| 4. | Резултати и дискусија.....   | 45 |
|    | 4.1. Испитивање радних карактеристика уређаја у лабораторијским<br>условима..... | 45 |
|    | 4.1.1. Испитивање сензора дубине .....   | 45 |
|    | 4.1.2. Испитивање сензора брзине.....  | 52 |
|    | 4.1.3. Анализа измереног протока .....   | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 4.1.4. Испитивање нивомера .....                               | 64 |
| 4.2. Унапређење корекционих функција за ЕМ сензоре .....       | 68 |
| 4.3. Унапређење помоћне опреме за монтажу и комуникацију ..... | 70 |
| 5. Закључак .....  | 74 |
| 6. Литература.....   | 76 |

## СПИСАК СЛИКА

|   |    |
|---|----|
| Слика 2.2.1 Попречни пресек проводника кружног облика .....   | 14 |
| Слика 2.2.2 Радни принцип равног ЕМ сензора .....   | 15 |
| Слика 2.3.1 Погодна локација за мануелно захватање узорака отпадне воде<br>помоћу телескопске шипке .....   | 19 |
| Слика 2.3.2 Ротациона осовина перисталтичке пумпе са четири цилиндра и<br>усисним цревом .....  | 21 |
| Слика 2.3.3 Боце за захватање појединачних узорака отпадне воде запремине<br>1000 mL .....  | 23 |
| Слика 3.1.1 Програмабилни контролер DC234 са каблом за конекцију и антеном за<br>даљинску комуникацију .....  | 28 |
| Слика 3.1.2 ЕМ сонда – FLAT COMPACT MODEL S са каблом за конекцију .....  | 30 |
| Слика 3.1.3 ЕМ сонда – модел FLAT 400 .....   | 30 |
| Слика 3.1.4 ЕМ сонда – модел FLAT 100 .....   | 31 |
| Слика 3.1.5 Рачунска јединица УЗВ протокомера - NIVUS РСМ Pro (лево) и крос-<br>корелациона УЗВ сонда (десно) .....   | 32 |
| Слика 3.1.6 ПРИМЕР 2 СИГНАЛНА ОБРАСЦА КОЈА СЕ ОБРАЂУЈУ У ДИГИТАЛНОМ ПРОЦЕСОРУ<br>СИГНАЛА .....  | 33 |
| Слика 3.1.7 ПРИМЕР ДИРЕКТНОГ ПОРЕЂЕЊА 2 УЗАСТОПНА СИГНАЛНА ОБРАСЦА НА ОСНОВУ<br>КОЈИХ СЕ ДОБИЈА РАСПОРЕД БРЗИНА .....   | 34 |
| Слика 3.1.8 МИКРО ДАЈВЕР СОНДА КОМПАНИЈЕ "VAN ESSEN" .....  | 35 |
| Слика 3.1.9 БАРО ДАЈВЕР КОМПАНИЈЕ "VAN ESSEN" .....   | 36 |
| Слика 3.1.10 Узоркивач са перисталтичком пумпом "МАХХ - TP5 C" (лево) и боце за<br>складиштење узорака запремине 1 L (десно) .....  | 37 |
| Слика 3.2.1 ЛАБОРАТОРИЈСКА ИНСТАЛАЦИЈА ИНСТИТУТА ЗА ХИДРОТЕХНИКУ (ЛЕВО) И<br>УСТАВА ЗА РЕГУЛИСАЊЕ НИВОА У ЛАБОРАТОРИЈСКОМ КАНАЛУ (ДЕСНО) .....                              | 39 |
| Слика 3.2.2 РАСПОРЕД ДАЈВЕРА У ЛАБОРАТОРИЈСКОМ КАНАЛУ ЗА ВРЕМЕ ИСПИТИВАЊА ....  | 42 |
| Слика 4.1.1 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT COMPACT<br>1207 ( $H_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ НИВОА ОЧИТАНОГ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА ( $H_{REF}$ )<br>..... | 46 |
| Слика 4.1.2 ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ РЕФЕРЕНТНЕ ( $H_{REF}$ ) И ИЗМЕРЕНЕ ( $H_M$ ) ДУБИНЕ – СОНДА<br>FLAT COMPACT 1207 .....   | 47 |
| Слика 4.1.3 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT COMPACT<br>1104 ( $H_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ НИВОА ОЧИТАНОГ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА ( $H_{REF}$ )<br>..... | 47 |
| Слика 4.1.4 ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНЕ ( $H_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНЕ ( $H_{REF}$ ) ДУБИНЕ – СОНДА<br>FLAT COMPACT 1104 .....  | 48 |
| Слика 4.1.5 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT COMPACT<br>1105 ( $H_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ НИВОА ОЧИТАНОГ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА ( $H_{REF}$ )<br>..... | 48 |
| Слика 4.1.6 ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНЕ ( $H_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНЕ ( $H_{REF}$ ) ДУБИНЕ – СОНДА<br>FLAT COMPACT 1105 .....  | 49 |
| Слика 4.1.7 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT 400 ( $H_M$ ) И<br>РЕФЕРЕНТНОГ НИВОА ОЧИТАНОГ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА ( $H_{REF}$ ) .....             | 49 |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Слика 4.1.8  | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНЕ ДУБИНЕ ( $H_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНЕ ( $H_{REF}$ ) – СОНДА FLAT 400 .....   | 50 |
| Слика 4.1.9  | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ FLAT 100 ( $H_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ НИВОА ОЧИТАНОГ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА ( $H_{REF}$ ).....                                  | 51 |
| Слика 4.1.10 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ FLAT 100 ( $H_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ НИВОА ОЧИТАНОГ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА ( $H_{REF}$ ) .....                                 | 51 |
| Слика 4.1.11 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА БРЗИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT СОМРАСТ 1207 ( $v_M$ ) И РЕФЕРЕНТНЕ БРЗИНЕ ( $v_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" .....     | 52 |
| Слика 4.1.12 | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНЕ ( $v_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНЕ ( $v_{REF}$ ) БРЗИНЕ – СОНДА FLAT СОМРАСТ 1207.....   | 53 |
| Слика 4.1.13 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА БРЗИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT СОМРАСТ 1104 ( $v_M$ ) И РЕФЕРЕНТНЕ БРЗИНЕ ( $v_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" .....     | 53 |
| Слика 4.1.14 | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНЕ ( $v_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНЕ ( $v_{REF}$ ) БРЗИНЕ – СОНДА FLAT СОМРАСТ 1104.....   | 54 |
| Слика 4.1.15 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА БРЗИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT СОМРАСТ 1105 ( $v_M$ ) И РЕФЕРЕНТНЕ БРЗИНЕ ( $v_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" .....     | 54 |
| Слика 4.1.16 | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНЕ ( $v_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНЕ ( $v_{REF}$ ) БРЗИНЕ – СОНДА FLAT СОМРАСТ 1105.....   | 55 |
| Слика 4.1.17 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА БРЗИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT 400 ( $v_M$ ) И РЕФЕРЕНТНЕ БРЗИНЕ ( $v_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" .....              | 55 |
| Слика 4.1.18 | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНЕ ( $v_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНЕ ( $v_{REF}$ ) БРЗИНЕ – СОНДА FLAT 400 .....   | 56 |
| Слика 4.1.19 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА БРЗИНЕ ИЗМЕРЕНЕ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT 100 ( $v_M$ ) И РЕФЕРЕНТНЕ БРЗИНЕ ( $v_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" .....              | 56 |
| Слика 4.1.20 | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНЕ ( $v_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНЕ ( $v_{REF}$ ) БРЗИНЕ – СОНДА FLAT 100 .....   | 57 |
| Слика 4.1.21 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ПРОТОКА ИЗМЕРЕНОГ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT СОМРАСТ 1207 ( $Q_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" ..... | 58 |
| Слика 4.1.22 | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНОГ ПРОТОКА ( $Q_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) – СОНДА FLAT СОМРАСТ 1207.....  | 59 |
| Слика 4.1.23 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ПРОТОКА ИЗМЕРЕНОГ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT СОМРАСТ 1104 ( $Q_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" ..... | 59 |
| Слика 4.1.24 | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНОГ ПРОТОКА ( $Q_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) – СОНДА FLAT СОМРАСТ 1104.....  | 60 |
| Слика 4.1.25 | ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ПРОТОКА ИЗМЕРЕНОГ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT СОМРАСТ 1105 ( $Q_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" ..... | 60 |
| Слика 4.1.26 | ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНОГ ПРОТОКА ( $Q_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) – СОНДА FLAT СОМРАСТ 1105.....  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| СЛИКА 4.1.27 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ПРОТОКА ИЗМЕРЕНОГ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT 400 ( $Q_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" .....                             | 62 |
| СЛИКА 4.1.28 ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНОГ ПРОТОКА ( $Q_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) – СОНДА FLAT 400 .....   | 62 |
| СЛИКА 4.1.29 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ПРОТОКА ИЗМЕРЕНОГ ПОМОЋУ СОНДЕ FLAT 100 ( $Q_M$ ) И РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) ОЧИТАНЕ ПОМОЋУ ЕТАЛОНСКОГ ПРОТОКОМЕРА МАРКЕ "KHRONE" .....                             | 63 |
| СЛИКА 4.1.30 ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНОГ ПРОТОКА ( $Q_M$ ) ОД РЕФЕРЕНТНОГ ПРОТОКА ( $Q_{REF}$ ) – СОНДА FLAT 100 .....   | 63 |
| СЛИКА 4.1.31 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНА $H_M$ ИЗМЕРЕНИХ ПОМОЋУ СОНДЕ MICRODIVER СА УЗВОДНО УСМЕРЕНИМ СЕНЗОРОМ И РЕФЕРЕНТНЕ ДУБИНЕ $H_{REF}$ ОЧИТАНЕ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА У НИВОУ СОНДЕ .....        | 64 |
| СЛИКА 4.1.32 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНА $H_M$ ИЗМЕРЕНИХ ПОМОЋУ СОНДЕ MICRODIVER СА НИЗВОДНО УСМЕРЕНИМ СЕНЗОРОМ И РЕФЕРЕНТНЕ ДУБИНЕ $H_{REF}$ ОЧИТАНЕ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА У НИВОУ СОНДЕ .....       | 65 |
| СЛИКА 4.1.33 ВРЕМЕНСКА СЕРИЈА ДУБИНА $H_M$ ИЗМЕРЕНИХ ПОМОЋУ СОНДЕ MICRODIVER СА СЕНЗОРОМ УСМЕРЕНОМ УПРАВНО НА ТОК И РЕФЕРЕНТНЕ ДУБИНЕ $H_{REF}$ ОЧИТАНЕ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА У НИВОУ СОНДЕ ..... | 66 |
| СЛИКА 4.1.34 ДИЈАГРАМ ПОРЕЂЕЊА ВРЕМЕНСКИХ СЕРИЈА ДУБИНА $H_M$ ИЗМЕРЕНИХ ПОМОЋУ MICRODIVER СОНДИ У ТРИ РАЗЛИЧИТА ПОЛОЖАЈА И РЕФЕРЕНТНЕ ДУБИНЕ $H_{REF}$ ОЧИТАНЕ НА ЗИДУ ЛАБОРАТОРИЈСКОГ КАНАЛА .....        | 67 |
| СЛИКА 4.2.1 АЛГОРИТАМ ЗА НАЛАЖЕЊЕ ОПТИМАЛНИХ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА $P_7$ И $P_8$ У ПРОГРАМУ "MATLAB" .....  | 68 |
| СЛИКА 4.2.2 ДИЈАГРАМ ЗАВИСНОСТИ ИЗМЕРЕНОГ ВРЕДНОСТИ БРЗИНЕ СА TRENDLINE ФУНКЦИЈОМ .....  | 69 |
| СЛИКА 4.3.1 ДИМЕНЗИЈЕ ТЕЛЕСКОПСКЕ ШИПКЕ КОМПАНИЈЕ "NIVUS" (ДОЛЕ) И ДВА СЕГМЕНТА ПОМОЋУ КОЈИХ ЈЕ ТЕЛЕСКОП ПРОДУЖЕН (ГОРЕ).....  | 70 |
| СЛИКА 4.3.2 ДИМЕНЗИЈЕ РАЗВУЧЕНОГ ТЕЛЕСКОПА (ГОРЕ), СПОЈЕНИХ ПРОДУЖЕТАКА (СРЕДИНА) И ПРОДУЖЕТАКА МОНТИРАНИХ НА ТЕЛЕСКОП (ДОЛЕ).....   | 71 |
| СЛИКА 4.3.3 СПОЈЕНИ СЕГМЕНТИ ЗА ПРОДУЖЕТАК ТЕЛЕСКОПА .....   | 71 |
| СЛИКА 4.3.4 РАЗВУЧЕНА ТЕЛЕСКОПСКА ШИПКА СА МОНТИРАНИМ ПРОДУЖЕЦИМА .....  | 72 |
| СЛИКА 4.3.5 КОНТРОЛЕР DC234 СА СТАНДАРДНОМ АНТЕНОМ ЗА ДАЉИНСКУ КОМУНИКАЦИЈУ .....  | 72 |
| СЛИКА 4.3.6 КОНТРОЛЕР DC234 СА АНТЕНОМ ЈАКОГ ДОМЕТА (ЛЕВО) И МОНТАЖА УРЕЂАЈА У ТЕРЕНСКИМ УСЛОВИМА СА ПРАТЕЋОМ ОПРЕМОМ (ДЕСНО) .....  | 73 |
| СЛИКА 4.3.7 АНТЕНА ИЗВУЧЕНА НА ПОВРШИНУ ТЕРЕНА И ЗАШТИЋЕНА ПОМОЋУ БЕЛЕ ПЛАСТИЧНЕ ЦЕВИ.....   | 73 |

## СПИСАК ТАБЕЛА

|  |    |
|--|----|
| ТАБЕЛА 4.1.1 СТАТИСТИЧКА И МЕРНА НЕСИГУРНОСТ СЕНЗОРА ДУБИНЕ EM СОНДИ.....  | 52 |
| ТАБЕЛА 4.1.2 СТАТИСТИЧКА И СИСТЕМАТСКА МЕРНА НЕСИГУРНОСТ СЕНЗОРА БРЗИНЕ EM СОНДИ ПРЕ И ПОСЛЕ КОРЕКЦИЈЕ БРЗИНЕ..... | 57 |
| ТАБЕЛА 4.1.3 СТАТИСТИЧКА И МЕРНА НЕСИГУРНОСТ НИВОМЕРА У 3 РАЗЛИЧИТА ПОЛОЖАЈА .....                                 | 67 |

# 1. Увод

## 1.1. Предмет истраживања

У Србији само 20 одсто општина има на располагању постројења за пречишћавање комуналних отпадних вода (ППОВ), док велики урбани центри попут Новог Сада, Ниша и главног града Београда не врше готово никакав третман отпадних вода. Непостојање ППОВ у Београду у коме живи око 2 милиона становника, чије се отпадне воде испуштају директно у реке Саву и Дунав представља велики еколошки, хигијенски и здравствени проблем. Поред тога, највећи број ППОВ који постоји у Србији користи застареле технологије, имајући у виду да су изграђене пре 30 и више година.

Употребљена вода, у складу са навикама становништва и индустрије завршава у канализационом систему, помоћу кога се спроводи до колектора и испушта директно у локална водна тела. Оваква вода са собом носи широк спектар полутаната, који представљају опасност по здравље људи и другог живог света, а притом нарушавају квалитет и равнотежу постојећих екосистема. Како би се смањио негативан утицај на животну средину и здравље, неопходно је прикупити и третирати отпадну воду, адекватним третманима на ППОВ.

Димензионисање ППОВ и усвајање адекватне технологије пречишћавања се обавља на основу података о протоку воде, врсти и количини полутаната присутних у води. У циљу прикупљања поузданих података за димензионисање, често је неопходно спровести додатне мерне кампање у фази пројектовања ППОВ, будући да постоји веома мали број мерних места опремљених за континуални мониторинг. У склопу мерне кампање врши се одабир меродавне локације у канализационој мрежи како би се обавило привремено мерење протока и захватање узорака за анализу квалитета воде. На једном мерном месту, истовремено се врши мерење протока и захватање узорака помоћу преносивих аутоматских мерних уређаја. Уређаји за мерење протока се називају протокомери, док се узорци најчешће захватају помоћу аутоматских узоркивача, посебно пројектованих за захватање узорака отпадне воде.

## 1.2.Задатак и циљеви истраживања

Правилно прикупљање података о количини и квалитету отпадних вода је од изузетне важности за пројектовање ефикасног ППОВ, а у ту сврху се користе различити мерни уређаји и пратећа опрема која служи за монтажу и употребу уређаја у теренским условима. Мерење протока отпадне воде се најчешће врши помоћу преносивих протокомера, који користе ултразвучне (УЗВ) или електромагнетне (ЕМ) сензоре. Могуће је и посредно мерење протока преко дубине воде, уколико хидраулички услови на мерном месту омогућавају дефинисање једнозначне везе између дубине и протока. Код преносивих протокомера посебни сензори мере брзину течења воде, а да би се добио податак о протоку, поред брзине је неопходно измерити дубину тока, на основу које се процењује површина протичајућег пресека. За мерење дубине се користе интегрисани или екстерни сензори нивоа који могу бити пијезорезистивни или ултразвучни.

Истраживања која су представљена у овом мастер раду се фокусирају на анализу радних карактеристика уређаја за мерење протока и дубине који су доступни на домаћем тржишту, а уједно имају широку примену у мерењу протока отпадних вода. Основни задатак испитивања су радне карактеристике равних ЕМ сонди које производи домаћа фирма "Свет инструмената", као и могућности за унапређење тачности мерења брзине, односно протока. Анализом је обухваћена и једна УЗВ сонда коју производи немачка фирма "Nivus", која је коришћена за контролна тренутна мерења протока. Сонде су анализирани у лабораторијским условима, на Институту за Хидротехнику и водно-еколошки инжењеринг, Грађевинског факултета у Београду. Поред тога, коришћени су за потребе мониторинга протока отпадних вода у оквиру пројекта изградње ППОВ у Србији који финансира компанија из Кине "CRBC" (енг. "China Road and Bridge Company"), о чему ће бити више речи у завршним поглављима рада.

С обзиром на старост и често непрописну градњу канализационе мреже у Србији, на терену се јављају различити изазови у погледу постављања и употребе мерне опреме, који захтевају модификацију постојеће опреме и помоћних алата за монтажу. Стога ће у оквиру рада бити приказано неколико примера модификације опреме, како би се унапредио квалитет прикупљања података и прошириле могућности примене уређаја.



## 2. Преглед литературе

### 2.1. Улазни подаци потребни за димензионисање ППОВ

Димензионисање ППОВ за потребе пречишћавања комуналне и индустријске отпадне воде врши се на основу података о количини отпадне воде у канализационој мрежи и података о количини загађујућих материја присутних у отпадној води.

Најбоља метода за добијање квалитетних и меродавних података је мерење на деоницама мреже којима се отпадна вода од већег броја корисника спроводи ка будућем ППОВ или ка изливном месту. Прикупљање података о количини и саставу отпадних вода захтева рад на терену, који обухвата истовремено мерење протока запремине и узорковање воде за одређивање концентрације полутаната, са крајњим циљем добијања протока масе загађујућих материја.

Проток се мери помоћу преносивих протокомера или преко нивоа, уколико постоји једнозначна веза између протока и дубине (Q-H). Преносиви протокомери се постављају на неколико одабраних мерних места и бележе податке о протоку током најмање 7 дана, а пожељно је да мерење траје што дуже. На истој локацији, паралелно са мерењем протока захватају се узорци за анализу квалитета отпадне воде. Узорци се прикупљају ручно или помоћу аутоматских узоркивача, током целокупног трајања мерења протока. Током мерних кампања потребно је измерити стање у систему током целе радне недеље (понедељак-петак), викенда, као и током кишних дана (обично барем два кишна дана).

Комбиновањем измерених вредности протока отпадне воде и концентрације полутаната добијају се подаци о укупном и просечном протоку масе за време мерења. У зависности од квалитета прикупљених података и примењених мерних метода могу се добити детаљнији подаци о протоку масе, као што су часовна оптерећења полутантима које је потребно третирати на ППОВ. Ови подаци представљају полазну тачку за одабир адекватне технологије пречишћавања и одређивање димензија објеката самог постројења, стога је важно извести правилна мерења, како би се добили што квалитетнији подаци.

### 2.1.1. Мерење протока отпадних вода

Под хидрауличким оптерећењем подразумевају се количине отпадних вода које долазе на ППОВ, а ове количине се утврђују мерењем протока запремине отпадне воде на меродавним деоницама канализационе мреже. На основу података о протоку стиче се увид у навике потрошача и они представљају један од основних параметара на основу којих се димензионише ППОВ.

У циљу добијања квалитетних и употребљивих података о протоку отпадне воде, врши се обилазак потенцијалних локација за мерење. Посматрају се услови за постављање мерне опреме и услови течења у разматраним гранама мреже, а затим узимајући у обзир неколико битних фактора врши се избор мерног места и опреме. Најважнији фактори који утичу на избор мерног места и опреме су (Godley, 2002; Иветић, 2019) :

- Хидраулички услови – избор мерне опреме првенствено зависи од услова течења (течење са слободном површином, течење под притиском или комбиновани услови течења). Поред тога на избор опреме и методе мерења утичу очекивани опсег протока и притиска, као и неустаљеност тока (брзина којом долази до промене протока). У канализационим системима се често јављају тзв. сложени услови течења, где се у кратким временским интервалима могу смењивати течење под притиском и течење са слободним нивоом.
- Карактеристике флуида – температура, електропроводност, концентрација и тип суспендованих честица у највећој мери утичу на избор мерне методе и опреме .
- Физичке карактеристике проводника – од димензија и облика попречног пресека проводника, односно цеви директно зависи избор методе мерења и мерне опреме. Ове карактеристике првенствено утичу на избор величине и облика мерних сонди, а затим и на услове монтаже опреме. Поред тога битно је обратити пажњу и на материјал зидова цеви који може утицати на неке карактеристике мерних уређаја.
- Карактеристике средине – у канализационим цевима, посебно у случају истовременог присуства комуналних и индустријских отпадних вода, присутне су бројне материје опасне по људско здравље, као и различити токсични, па чак и експлозивни гасови. Због тога је приликом избора мерног места, првенствено из безбедносних разлога јако битно обратити пажњу на карактеристике средине

и евентуално присуство опасних материја. На избор мерног места велики утицај има и приступачност у погледу постављања мерне опреме, могућност напајања инструмената и размене података са управљачком јединицом.

- Економска категорија – расположива средства имају битан утицај на избор мерне методе и опреме. Методе са високом тачношћу и поновљивошћу мерења, које пружају најквалитетније податке су обично јако захтевне и скупе, што често представља ограничавајући фактор при избору мерне опреме. Развојем преносивих мерних инструмената који су мање тачности, поновљивости и робусности, али и ниже цене, омогућено је спровођење мерења података задовољавајућег квалитета и у условима ограничених средстава.

Најчешћа метода за мерење протока отпадне воде, која је један од предмета овог рада, подразумева коришћење преносивих протокомера, који се састоје од сонде са мерним сензорима и логера за смештање и обраду података. С обзиром да се мерење изводи у канализационим цевима, које су познатог облика и димензија, до протока се може доћи мерењем брзине и дубине тока у цеви (принцип мерења Брзина-Протицајни пресека или  $V-A$ ). На основу дубине одређује се површина попречног пресека тока (протицајног пресека), која заједно са брзином течења даје тражени податак о протоку запремине.

Протокомери су опремљени сензорима који мере брзину, а могу имати интегрисан и сензор за мерење дубине, у супротном дубина се мери посебном сондом. Измерени подаци се шаљу до логера, где се записују у меморију уређаја или се шаљу директно на рачунар помоћу даљинског преноса. Сонде морају бити уроњене у ток током целокупног трајања мерења, што се постиже њиховим фиксирањем за унутрашњи зид цеви помоћу вијака или анкера, специјално дизајнираних прохромских носача (огрлица) или помоћу телескопске шипке.

Подаци о протоку се прикупљају у трајању од најмање 7 дана, са циљем одређивања дневних количина отпадне воде, као и минималних и максималних часовних протока. Обухватањем свих радних дана и викенда стиче се увид у навике становништва и индустрије у смислу продукције отпадних вода. Неопходно је мерењем обухватити барем једну кишну епизоду, како би се одредио утицај кишнице на величину протока, што је посебно битно у случају општег канализационог система, код ког се кишница и отпадне воде спроводе кроз исту цев, што је случај са већим делом канализационе мреже у Србији.

### 2.1.2. Анализа квалитета отпадне воде

Захватањем узорака отпадне воде и њиховом анализом на лицу места или у лабораторији добијају се подаци о врсти и количини загађујућих материја које су присутне у отпадној води. Састав отпадне воде, заједно са подацима о протоку пружа увид у масено оптерећење отпадних вода полутантима, а на основу ових података врши се одабир технолошког процеса пречишћавања, као и димензионисање ППОВ.

У зависности од динамике испуштања отпадних вода и технолошког процеса узорковање отпадних вода врши се узимањем композитног или тренутног узорка. Узорковање отпадне воде врши се методом 24-часовног композитног узорка, осим ако није другачије прописано, а композитни узорак може бити захваћен пропорционално времену или протоку. Мерење протока и узимање појединачних узорака се обавља аутоматски, а уколико то није могуће, узорци се захватају ручно, уз обавезно истовремено мерење протока. (Правилник – "Службени гласник РС" бр. 33/2016)

Анализа квалитета комуналне отпадне воде подразумева одређивање следећих параметара: температура, рН вредност, хемијска и биолошка потрошња кисеоника (ХПК и БПК), укупне суспендоване материје (TSS – total suspended solids), укупан азот (TN – total nitrogen), амонијум јон ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), садржај нитрата ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) и нитрита ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), укупан фосфор (TP – total phosphorus), укупна уља и масти, садржај колиформних бактерија и стрептокока фекалног порекла. У ситуацији када отпадна вода садржи и воде индустријског порекла, може се одређивати присуство сулфида, тешких метала као што су цинк, олово, баријум, жива, бакар, минерална уља и слично. Неке од ових супстанци могу бити токсичне и опасне по здравље, стога се приликом захватања узорака мора водити рачуна о безбедности свих учесника мерења.

### 2.1.3. Проток масе

Измерени подаци о протоку представљају промену запремине отпадне воде у току времена, док се анализом квалитета добија податак о врсти и маси загађујућих материја израженој у односу на запремину протекле воде. Множењем податка о протоку  $Q$  [L/s] и маси загађујућих материја [mg/L] присутних у отпадној води, добијају се подаци о

оптерећењу отпадне воде загађујућим материјама. На овај начин добијају се количине полутаната које је потребно третирати на ППОВ, које се након сређивања димензија може изразити јединицом [kg/dan].

Ова 3 податка представљају улазне податке за пројектовање и димензионисање ППОВ. На основу њих врше се процене количина и оптерећења отпадне воде које се могу очекивати током периода коришћења постројења (најчешће 20 година). Прорачун обухвата пројекције у погледу пораста броја становника и развоја индустрије, које се базирају на актуелним подацима о протоку и саставу отпадне воде (Љубисављевић, Ђукић, Бабић, 1995.).

## 2.2.Методологија мерења протока

Електромагнетни и ултразвучни протокомери који су предмет овог рада, проток мере применом методе Брзина – Протицајни пресек, која се заснива на истовременом мерењу брзине  $V_{mer}$  и дубине  $h$  тока која служи за одређивање површине протицајног пресека  $A$  ( $h$ ). Успостављањем геометријске везе између измерене дубине и површине протицајног пресека, као и везе између измерене  $V_{mer}$  и средње профилске брзине  $V$ , које се међусобно разликују, једноставно се долази до податка о протоку.

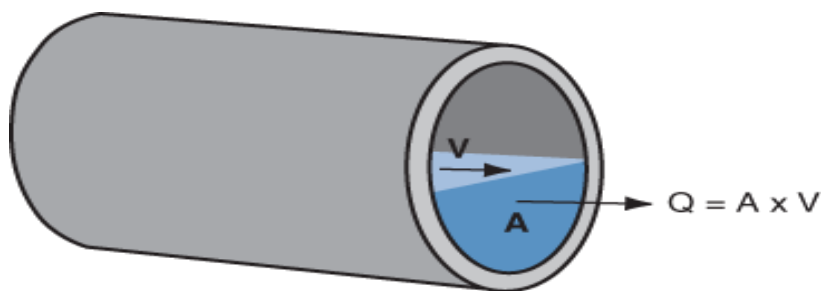
Међутим, успостављање везе између измерене и средње профилске брзине може представљати изазов и чест је извор грешака приликом мерења. Веза између ових брзина остварује се помоћу корекционе функције, употребом тзв. корекционих фактора који обухватају различите променљиве параметре који утичу на измерену брзину (Иветић, 2019.).

У наставку овог поглавља су укратко описани кључни аспекти методе Брзина–Протицајни пресек, као и принцип рада електромагнетних и ултразвучних сензора за мерење брзине, који су најчешће у употреби. Такође, пажња је посвећена и дефинисању корекционих коефицијената помоћу којих се од измерене брзине долази до средње профилске брзине, уз осврт на могућности за успостављање везе између ове две брзине.

### 2.2.1. Мерење протока методом Брзина-Протицајни пресек ( $V - A$ )

У канализационим системима се јављају сложени услови течења, као и честе промене протока, а метода брзина-протицајни пресек даје добре резултате у наведеним условима. Проток се добија као производ средње профилске брзине и површине протицајног пресека. Протокомери који користе овај метод мерења протока опремљени су сензорима за мерење брзине  $V_{\text{мер}}$  на основу које се одређује средња профилска брзина  $V$  и сензорима за мерење дубине  $h$  на основу које се рачуна површина протицајног пресека  $A(h)$ .

Сонде за мерење брзине мере брзину у непосредној близини сензора и морају бити потопљене у воду и при најмањим протоцима. Највећи изазов код ове методе представља правилно тумачење измерене брзине  $V_{\text{мер}}$  и њено претварање у средњу профилску брзину  $V$ , што је и најчешћи извор грешке приликом примене методе  $V - A$ . Како би се смањила неодређеност мерења која је последица ових фактора, уводе се корекциони коефицијенти или функције којима се дефинише веза између измерене  $V_{\text{мер}}$  и средње профилске брзине  $V$  (Иветић, 2019.).



Слика 2.2.1 Попречни пресек проводника кружног облика

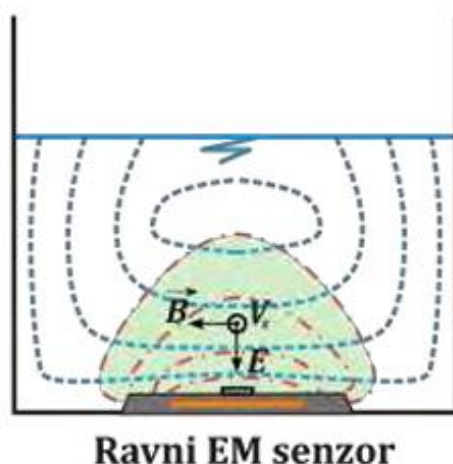
Дубина се може мерити помоћу посебних сонди са сензорима за мерење температуре и притиска или на пример применом додатног УЗВ сензора који је интегрисан у УЗВ сонду за мерење брзине. Када су познати облик и димензије колектора у коме се врши мерење, једноставно се изводи веза између измерене дубине и површине протицајног пресека. Проблем приликом мерења у канализационим системима може представљати присуство наслага у цевима, које могу значајно утицати на измерену дубину.

## 2.2.2. Методе мерења брзине (ЕМ, УЗВ)

Преносиви протокомери, као што је већ написано, опремљени су мерним сондама са сензорима за мерење брзине, при чему се истичу сонде са ЕМ или УЗВ сензорима. Саме сонде су хидраулички обликоване, тако да минимално ремеће ток воде, уз то оне су и робусне, како би издржале могуће ударе крупнијих честица.

### ЕМ сензори за мерење брзине

ЕМ сензори раде на принципу Фарадејевог закона електромагнетне индукције, према коме проводна течност која се креће кроз управно магнетно поље индукује напон на електродама сензора (Продановић, Иветић, 2019.). Приликом мерења у цевима, унутрашњи пречник цеви, снага магнетног поља и брзина тока су пропорционални, односно брзина течења проводне течности у магнетном пољу се преводи у напон, који се детектује на електродама уређаја и пропорционална је разлици измереног напона. Сигнал са сонде се затим шаље до рачунске јединице која рачуна проток преко брзине воде, мера цевовода и његове испуњености.



Слика 2.2.2 Радни принцип равног ЕМ сензора

На домаћем тржишту присутни су преносиви, равни ЕМ сензори папучасте конструкције, који производи домаћа фирма "Свет инструмената". Ови сензори спадају

у групу локалних ЕМ сензора, који мере локалну брзину у околини самог уређаја. Предности су им робусност, могућност мерења под слојем наноса и мерење широког опсега протока, од свега неколико cm/s до неколико m/s, а имају и опцију даљинског преноса података, због чега су јако корисни за мерења у канализационим системима ("Свет инструмената", 2020.).

### **УЗВ сензори за мерење брзине**

Постоји неколико различитих метода мерења брзине, односно протока помоћу сонди са УЗВ сензорима, при чему се за мерење протока отпадних вода истичу сензори који раде на принципу Доплеровог ефекта и крос-корелациони сензори.

УЗВ сензори који раде на принципу Доплеровог ефекта користе рефлексију ултразвука од делића који се крећу заједно са флуидом и који праве доплеров помак фреквенције звука (Продановић - скрипта). Сонда емитује сигнал познате фреквенције, под одређеним углом, делови овог сигнала се одбијају од честице и мехуриће у води и враћају се до сензора са различитим фреквенцијама. Овај фреквентни помак је пропорционалан брзини честица, за коју се претпоставља да је иста као брзина воде (Lagarte и сарадници, 2008.). За мерења у канализационим системима најпопуларнији су папучасти ADV (eng. Acoustic Doppler Velocimeter) сензори, који су малих димензија, једноставни за постављање и економски приступачни. Папучасте сонде са ADV сензорима имају доста већу неодређеност од сличних ЕМ сонди у присуству наноса (Продановић, Иветић 2019.).

Крос-корелациони УЗВ сензори у размаку од неколико милисекунди емитују пар кратких ултразвучних импулса, а затим сниме слике повратних сигнала који су се одбили од делића (отпада, минерала или мехурића) који се крећу заједно са водом. Поређењем ове две слике одређују се позиције честица, а затим узимајући у обзир угао под којим је емитован сигнал и временски помак честица добија се податак о њиховој брзини, за коју се претпоставља да је једнака брзини тока. Сонде су хидраулички обликоване, тако да практично не ремете ток и ови уређаји дају резултате високе тачности. УЗВ сензори имају и неколико недостатака као што су лоши резултати мерења малих протока ( $< 10$  cm/s), као и слабљење сигнала у присуству слоја наноса ("Nivus", 2011.).



### 2.2.3. Корекциони коефицијенти

Као што је већ наведено, један од главних извора грешака у мерењу код методе брзина-протицајни пресек је то што измерене брзине  $V_{\text{mer}}$ , односно податак о брзини који се бележи у логер, нису једнаки средњој профилској брзини  $V$ . Како би се грешка која настаје приликом трансформације  $V_{\text{mer}}$  у  $V$  svela на минимум, потребно је успоставити везу, односно дефинисати корекциони коефицијент  $K$  који представља везу између  $V_{\text{mer}}$  и  $V$  (Иветић, 2019.):

$$V = K * V_{\text{mer}}$$

Пожељно је да корекциони коефицијент буде што једноставнијег облика, при чему је најједноставније када је константа ( $K = \text{const}$ ). С обзиром да су сонде различитог облика и димензија, као и да користе различите сензоре (ЕМ или УЗВ), неки произвођачи уређаја дефинишу облик везе између  $V_{\text{mer}}$  и  $V$ , која је изражена корекционом функцијом (неки произвођачи само интегришу ту зависност у софтвер без могућности модификације). Вредност ове функције зависи од неколико параметара, од којих су најбитнији геометрија проводника, позиција сензора брзине у оквиру мерног места, врста сензора, хидраулички услови и карактеристике флуида (Иветић, 2019.).

Поједини параметри у оквиру корекционих функција се могу кориговати како би се мерење прилагодило геометријским захтевима мерног места. Такође, пре сваког мерења, потребно је извршити рекалибрацију мерних сонди, како би се утврдила тражена веза између брзина. Калибрација се врши тако што се у контролисаним, лабораторијским условима паралелно мери брзина помоћу сонде коју је потребно калибрисати и помоћу неког тачнијег (еталонског мерила) протока, након чега се добијени резултати пореде. Обрадом измерених резултата, успоставља се веза између  $V_{\text{mer}}$  и  $V$ , која се у појединим случајевима може побољшати корекцијом појединих параметара (Иветић, 2019.).

### 2.3. Узорковање отпадних вода

У првом делу овог поглавља дат је опис различитих начина прикупљања узорака – типова узорковања, расположиве опреме за захватање узорака и могућности њихове примене. У другом делу анализирани су различити типови узорака који се могу захватати и њихове основне карактеристике, могућности примене, као и предности и мане.

### **2.3.1. Типови узорковања**

Захватање узорака за анализу квалитета воде може се вршити мануелно или аутоматски, помоћу различитих аутоматских узоркивача. Одабрани тип узорковања и тип узорка који се захвата зависи од циљева анализе, расположиве опреме, као и од самих супстанци чије присуство се анализира.

Мануелно узорковање се најчешће користи за захватање појединачних узорака (енг. Grab samples) воде за анализу квалитета на лицу места. Користи се за анализе супстанци чије се карактеристике брзо мењају, стога захтевају хитну анализу. Узорци се захватају у пластичне или стаклене боце прописаних димензија и других карактеристика.

Аутоматски узоркивачи се користе за захватање појединачних, континуалних или композитних узорака отпадне воде. Композитни узорци се формирају захватањем појединачних узорака прописане запремине, који се могу захватати у правилним временским интервалима или сразмерно количини протекле воде. Континуални узорци се добијају континуалним захватањем воде током одређеног временског периода. (Schueller, Luzier, 2017.).

Софтвер, који је саставни део аутоматских узоркивача служи за задавање режима захватања узорака и калибрацију пумпе, а у зависности од типа и произвођача омогућава читавање различитих података о условима за време захватања узорака.

Аутоматски узоркивачи су опремљени пумпама помоћу којих се вода црпи до складишта са боцама. За транспорт воде користе се усисна црева од различитих материјала. Најчешће употребљавани типови узоркивача за потискивање воде користе перисталтичке или вакуум пумпе.

### 2.3.1.1. Мануелно узорковање

Мануелно узорковање подразумева хватање појединачних узорака воде или отпадне воде за испитивање на лицу места или у лабораторији. Комбинацијом појединачних узорака захваћених током одређеног временског периода, може се формирати композитни узорак, стога се мануелно узорковање користи као замена за аутоматске узоркиваче.

Приликом мануелног хватања узорака воде, први корак је одабир адекватне локације за хватање. Битно је да на месту хватања вода буде добро измешана, треба избегавати места где вода стагнира или је ток успорен. Најбоље је узорак захватити у средини дубине тока, у исту боцу у којој ће он бити транспортован до лабораторије. На овај начин избегава се могућност контаминације узорка приликом пресипања из боце у боцу (Schueller, Luzier, 2017.).

Боца се урања у ток тако да је отвор окренут ка узводном делу тока. Уколико локација није доступна за директно ручно хватање, боца се може закачити за шипку, дужине до 6 m или се може пунити помоћу пумпе. У случају употребе пумпе, сви њени делови који долазе у контакт са узорком морају се добро очистити пре употребе (Environmental Protection Agency, 2013.).



Слика 2.3.1 Погодна локација за мануелно хватање узорака отпадне воде помоћу телескопске шипке

### 2.3.1.2. Узоркивачи са перисталтичком пумпом

Аутоматски узоркивачи са перисталтичком пумпом се састоје од складишног дела у коме се чувају узорци воде и главе у којој је смештена перисталтичка пумпа са усисним цревом и софтверски део уређаја.

У складишном делу уређаја се налазе боце за хватање појединачних узорака, прописаних димензија и карактеристика, које зависе од особина флуида који се узоркује. Често је неопходно држати узорке на ниској температури, па неки модели имају складиште опремљено расхладним уређајем.

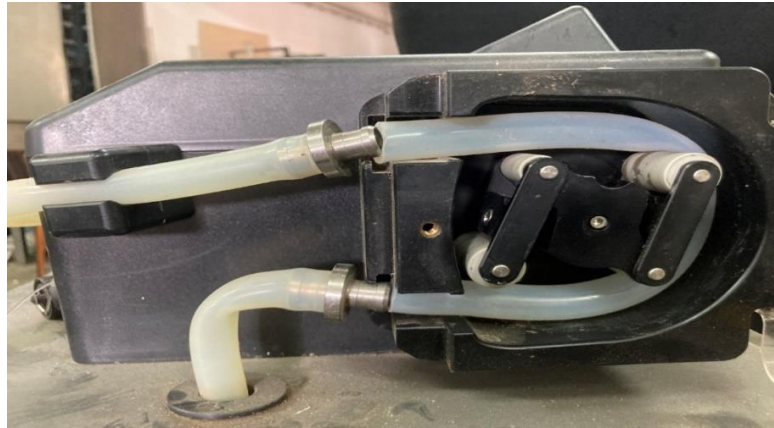
Софтверски део уређаја служи за задавање режима рада пумпе, за калибрацију пумпе, омогућава дефинисање редоследа пуњења боца, као и читавање различитих података о пуњењу. У зависности од модела, на дисплеју уређаја могу се приказивати подаци о брзини пуњења, количине захваћене воде, температуре за време пуњења итд. Помоћу дисплеја се управља пумпом, задаје се режим рада и успоставља веза између брзине ротације пумпе и количине захваћене воде.

Перисталтичке пумпе се састоје од мотора и ротационог дела пумпе – осовине са два или више цилиндара, око којих је чврсто обмотано еластично црево које спроводи захваћену воду до складишта са боцама. Ротацијом осовине пумпе цилиндри наизменично доводе до контракције црева, услед чега се ствара мехур ваздуха или воде који се помера ка крају црева. Захваћени узорак воде се директно из усисног црева спроводи у складиште. Захватању узорака претходи чишћење усисног црева од заостале воде или честица, удувавањем ваздуха у црево.

Битна предност узоркивача са перисталтичком пумпом је што захваћени узорак воде долази у контакт само са цревом кроз које се транспортује до боца, стога практично нема могућности контаминације узорка.

Кућишта ових узоркивача су прилично издржљива, а пумпа, софтверски део и сами узорци су добро заштићени од спољашњих утицаја. Правилним постављањем и калибрацијом уређаја, једноставно се обезбеђује прецизно мерење чак и на тешко приступачним локацијама. С обзиром да немају много појединачних делова, цена им је обично мања од уређаја са вакуум пумпом.

Применом усисног црева од тефлона, узоркивачи са перисталтичком пумпом могу се користити за хватање узорака воде у којој су присутне неке токсичне материје.



Слика 2.3.2 Ротациона осовина перисталтичке пумпе са четири цилиндра и уисним цревом

### 2.3.1.3. Узоркивачи са вакуум пумпом

Уређаји са вакуум пумпом су опремљени складиштем са боцама за узорке, комором за мерење запремине узорака, вакуум пумпе или компресора и уисног црева. Пре захватања узорака комора за мерење запремине и уисно црево се чисте од заостале воде и честица удубавањем ваздуха у комору. Након тога, помоћу вакуум пумпе или компресора у уисном цреву се ствара вакуум који помера воду ка узоркивачу. Комора за мерење запремине се пуни до врха, а вишак воде до жељене запремине се истискује применом притиска на комору. У последњем кораку, узорак се из коморе спроводи у боце за складиштење. На овај начин спречава се могућност контаминације узорака.

Постоји неколико битних предности узоркивача са вакуум пумпом у односу на друге типове узоркивача. Као главна предност издваја се прецизност мерења појединачних узорака. Употребом коморе за мерење запремине узорака, значајно се смањују варијације између мерења, грешка се своди на мање од 5 ml.

Вакуум пумпе могу да остваре велику уисну брзину, која овом типу узоркивача омогућава широк опсег примене. Поред тога, нема много делова који се хабају и захтевају честу замену, а с обзиром да флуид не путује кроз тело пумпе, крупније честице или чврсти комади не могу оштетити узоркивач. Компресор у вакуум узоркивачу може чистити уисно црево применом великог притиска, што је корисно када су у отпадној води присутне влакнасте честице.

## **2.3.2. Типови узорака**

У зависности од хидрауличких карактеристика отпадне воде, као и супстанци чије количине се испитују, могу се захватати појединачни (тренутни) или композитни узорци. Разликују се два начина формирања композитних узорака – узорковање са константном величином узорка и узорковање пропорционално количини протекле воде.

### **2.3.2.1. Појединачни узорци**

Појединачни или тренутни узорци представљају узорке воде или отпадне воде чије је трајање захватања ограничено на највише 15 минута. Анализом тренутних узорака стиче се увид у карактеристике воде на локацији на којој је узорак захваћен у тренутку захватања узорка. Најважнији корак приликом захватања појединачних узорака је одабир локације на којој ће узорак бити захваћен. Вода мора бити добро измешана како би узорак био репрезентативан, стога треба избегавати места где је ток успорен и долази до таложења чврстих честица или места на којима има много плутајућег отпада ("Wastewater sampling procedures", City of Greeley).

Овај тип узорака је погодно користити када постоје изражене осцилације у протоку отпадне воде или када је неопходно испитати узорак на лицу места. Поједини параметри квалитета отпадне воде као што су рН вредност, растворени кисеоник, нитрити, температура су нестабилни, њихове вредности се брзо мењају, стога захтевају да се узорак испита у што краћем року. Резултати анализе појединачних узорака дају боље резултате уколико је отпадна вода која се испитује уједначеног квалитета (Schueller, Luzier, 2017.).

### **2.3.2.2. Композитни узорци**

Композитни узорак представља мешавину појединачних узорака захваћених на истој локацији, у одређеном временском периоду. Анализом композитних узорака добија се увид у просечне карактеристике воде током периода захватања узорака.

Постоји неколико врста композитних узорака које се разликују према трајању захватања узорака које може износити 24, 6 или 2 часа. Појединачни узорци се захватају пропорционално времену у случају константних протока или пропорционално протоку када исти значајно варира у периоду захватања узорака. Трајања узорковања се могу продужити или скратити у појединим случајевима уколико је то у складу са законом. Учесталост и периодичност узорковања зависе од циљева испитивања и капацитета постојећег или планираног ППОВ, као и у зависности од протока отпадних вода на појединим изливима (Правилник – "Службени гласник РС" бр. 33/2016).

За захватање композитних узорака могу се користити аутоматски узоркивачи, са перисталтичким или вакуум пумпама, појединачни узорци се могу захватати у различите боце које се накнадно мешају у лабораторији или се користи једна боца током комплетног трајања захватања.



Слика 2.3.3 Боце за захватање појединачних узорака отпадне воде запремине 1000 ml

Формирањем композитних узорака добијају се најбољи резултати при испитивању токова са израженим осцилацијама протока или других карактеристика воде. У комбинацији са мерењем протока, анализа композитних узорака пружа детаљну слику о количини и квалитету воде која се испитује, као и о протоку масе полутаната.

### **2.3.3. Начини формирања композитних узорака**

У зависности од карактеристика које желимо да испитамо, као и карактеристика самог тока који испитујемо разликује се начин формирања композитних узорака. Појединачни узорци се могу захватати пропорционално количини протекле воде (eng. Flow-proportional) или у правилним временским интервалима (eng. Time-proportional). Избор типа формирања композитних узорака пре свега зависи од хидрауличких услова, пре свега променљивости протока, а затим и од циљева истраживања и расположиве опреме (Environmental protection agency, 2013.).

#### **2.3.3.1. Константна величина узорка**

Најједноставнији начин формирања композитних узорака је захватање појединачних узорака једнаке запремине у једнаким временским интервалима. Узорци се могу захватати у појединачне посуде које се накнадно мешају или директно у исту посуду.

Предности овог типа узорковања су што се не захтева посебна опрема за захватање узорака, као ни додатна опрема за мерење протока. Узорци се могу захватати мануелно или помоћу аутоматских узоркивача. Овако добијени композитни узорци су корисни за одређивање укупне количине неких супстанци (нпр. уља или масти) у периоду захватања. Уколико постоје значајне варијације у протоку воде овако прикупљени узорци не дају репрезентативне резултате (Schueller, Luzier, 2017.).

Узорци захваћени пропорционално количини протекле воде дају репрезентативније резултате у односу на узорковање са константном величином узорака, осим уколико су промене протока у току 24 часа мање од 10%, када разлика више није изражена. Одабир формирања композитног узорка првенствено зависи од карактеристика тока, испитиваних карактеристика, као и расположиве опреме.

#### **2.3.3.2. Узорковање пропорционално количини протекле воде**

Постоје два начина формирања композитних узорака пропорционалних количини протекле воде.



Први начин подразумева да се појединачни узорци једнаке запремине захватају након што протекне унапред дефинисана количина воде. Временски интервали између два узастопна узорка не морају бити једнаки, већ зависе од количине протекле воде, чиме се и остварује пропорционалност. Узорци се могу захватати у појединачне боце или континуално у исту боцу. Код другог начина појединачни узорци се захватају у једнаким временским интервалима, док се запремина сваког узорка усклађује са количином протекле воде. (Environmental Protection Agency, 2013.).

Узорци пропорционални количини протекле у комбинацији са мерењем протока пружа најдетаљнију слику о просечном оптерећењу тока различитим материјама у току разматраног периода. Из тог разлога овај метод има предност у односу на друге у највећем броју анализа, а посебно у случајевима изражених варијација у протоку воде за време узорковања.

Појединачни узорци се најчешће захватају специјалним аутоматским узорковачима, уз обавезно мерење протока. Пре захватања узорака узорковач и протокомер се морају калибрисати и повезати тако да се уз помоћ сигнала са протокомера контролише режим узорковања узорковачем. Мерење протока на терену се најчешће врши помоћу преносивих ЕМ или УЗВ протокомера, који се могу повезати са узорковачима.

### **3. Методологија**

У оквиру овог поглавља биће укратко описана методологија испитивања уређаја у лабораторијским условима, кратак опис испитиваних уређаја и помоћне опреме за монтажу и комуникацију, уз анализу могућности унапређења мерне методе ЕМ протокомера и помоћне опреме.

#### **3.1.Опрема коришћена у оквиру истраживања**

Током израде овог рада извршене су анализе и тестирања различите опреме која је доступна на домаћем тржишту, а користи се за потребе мерења протока и анализе квалитета отпадних вода.

Највише пажње и времена посвећено је протокомерима и то преносивим ЕМ и УЗВ сондама за мерење брзине, које су тестиране на Институту за хидротехнику Грађевинског факултета. Тестирано је неколико различитих равних ЕМ сонди домаћег произвођача, фирме "Свет инструмената" и извршена је анализа једне УЗВ сонде немачког произвођача, фирме "Nivus". Заједно са протокомерима тестирано је неколико сонди за аутоматско мерење дубине – дајвера, холандске фирме "Van Essen". У раду ће бити приказани резултати мерења који су добијени помоћу ових уређаја, као и њихово поређење са еталонским мерачем, са циљем анализе тачности измерених резултата и могућности за унапређење везе између измерене брзине и средње профилске брзине.

Поред мерних уређаја, анализирана је помоћна опрема за монтажу и теренску употребу мерних сонди, при чему је извршена модификација опреме, за потребе рада у нестандартним мерним условима. Извршена је инспекција различитих носача за сонде за мерење брзине, који су у виду огрлица које се монтирају на унутрашњи зид цеви, као и телескопске шипке фирме "Nivus" на коју се монтира сонда како би се мерење извршило са безбедне удаљености. Биће приказана и модификација ове телескопске шипке, којом је продужен њен домет, као и један пример носача за сонде за мерење дубине, који је посебно направљен за потребе мерења дубине у канализационим шахтовима.

Са аспекта анализе квалитета отпадних вода, анализиран је аутоматски узоркивач који производи немачка фирма "МАХХ", који је врло погодан за захватање композитних узорака отпадне воде. Узоркивач је опремљен перисталтичком пумпом и софтвером којим се омогућује аутоматизација процеса захватања узорака, у различите боце.

### **3.1.1. Протокомери**

С обзиром да је главни фокус овог рада мерење протока отпадних вода, односно примена опреме која се користи за мерење протока, у наредним поглављима биће дат опис основних карактеристика и принципа рада протокомера чије радне способности су тестиране у лабораторијским условима.

#### **3.1.1.1. ЕМ сензори**

Постоји неколико различитих типова локалних ЕМ сензора који се користе за мерење брзине у непосредној близини самих сензора. Папучасти ЕМ сензори служе за мерење брзине у токовима са слободном површином, али се могу користити за мерење у токовима под притиском. Састоје се од папучастог сензора, релативно малих димензија, који се помоћу специјално дизајнираних носача могу причврстити за дно или зид цеви. Магнетно поље обухвата релативно малу запремину, чија величина зависи од карактеристика проводног калема, стога се брзина мери у непосредној близини електрода (Продановић, Иветић, 2019.).

Домаћа фирма "Свет инструмената" производи равне, папучасте ЕМ сонде које су намењене мерењу протока воде у отвореним токовима, а пре свега мерењу у канализационим системима. Побудни калемови унутар самих уређаја су равни, због чега је и облик кућишта сензора танак, а по томе су и саме сонде добиле назив "равне" (Иветић, 2019.).

У лабораторији Института за хидротехнику су испитиване сонде протокомера фирме "Свет инструмената" типа "FLAT COMPACT" и то модели Flat Compact S, Flat 400, као и равна округла сонда Flat 100. Све три сонде раде по истом принципу, мере подужну

компоненту брзине, као и ниво воде, при чему су оба сензора лоцирана у истом кућишту. Као рачунску јединицу протокомери користе универзални програмабилни контролер DC234 који је способан за директна мерења над ЕМ сензорима који дају екстремно мале сигнале.



Слика 3.1.1 Програмабилни контролер DC234 са каблом за конекцију и антеном за даљинску комуникацију

Контролер DC234, приказан на слици 3.1.1. је програмиран тако да може да обрађује податке са различитих мерних сонди, а може се користити за мерења протока код течења у цевоводима или код течења са отвореним током. Рачунска јединица директно претвара микроволтни напонски сигнал са ЕМ сензора, на основу кога рачуна проток, брзину, притисак, протеклу запремину и врши испис мерних величина на дисплеј. На контролер се може монтирати антена за даљински пренос података (види се у левом углу на слици 3.1.1.), који се могу обрађивати помоћу Excel програма. Поред дисплеја постоје 2 дугмета која служе за навигацију кроз програм. Контролер се може повезати са рачунаром и помоћу апликације "DC234 server" врши се даљински пренос, архивирање, приказ и експорт података са мерног инструмента. Логер је потребе овог истраживања бележио податке о брзини, дубини и протоку у мерном каналу, а подаци о дубини и протоку су поређени са еталонским вредностима. (Иветић, 2019.) ("Свет инструмената", 2020.).

Уређај је опремљен батеријом мале потрошње и може се користити као протокомер са континуалним напајањем, а уз њега се добија комуникациони кабл и кабл за напајање. Током мерења сонда се најчешће фиксира за унутрашњи зид цеви, док се кабл спроводи по зиду транспортног система, како би што мање реметио ток. Мерни сензори морају остати потопљени и при најмањим протоцима и мора се осигурати да сонда не промени смер, што се постиже њеним фиксирањем за плочу носача ("Свет инструмената", 2020.).

Све поменуте сонде имају могућност бидирекционог мерења – мерење течења у оба смера, а произвођач наводи да је мерни опсег између  $-15\text{ m}$  и  $+15\text{ m}$ , што је велика предност ових уређаја. Поред тога номинална тачност у мерењу брзине износи  $\pm 1\%$ , док је поновљивост  $0,001\text{ m/s}$ . Могућност мерења малих брзина је јако битна приликом мерења у канализационим колекторима, посебно у случају општих канализационих система, где разлике у протоку у кишном и сушном периоду могу бити 1000:1 (Продановић, Иветић, 2019.).

### **Flat compact model S**

Модел S је због малих димензија сонде јако згодан за мерења у каналима без равног дна, односно цевима кружног облика и малих пречника. Ширина сонде је  $V_{FC,S} = 60\text{mm}$ , дужина износи  $L_{FC,S} = 300\text{ mm}$ , а висина  $H_{FC,S} = 35\text{ mm}$  и управо релативно мала ширина омогућава широку употребу сонди. Висина уређаја није занемарљива и она је последица начина паковања побудних калемова, а њен утицај на ток је смањен хидрауличким обликовањем главе сонде (Иветић, 2019.).

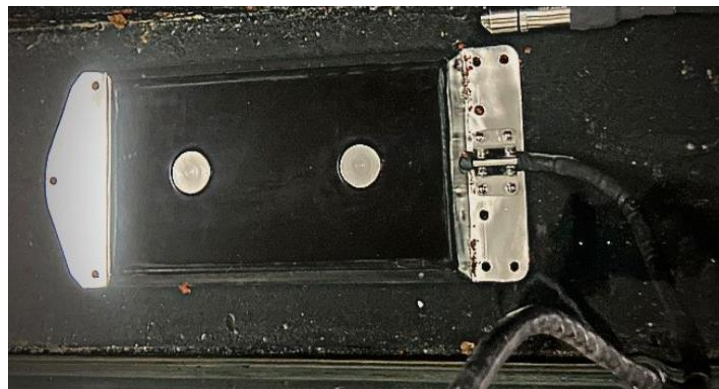
Сонда модела S се помоћу вијака, анкера или носача - огрлице причвршћује за унутрашњи зид цеви, тако да сензору буду усмерени ка узводном крају тока, а брзина се мери непосредно изнад електрода. Дубина интеграције струјног поља износи око  $40\text{ mm}$ , стога се и измерена брзина  $V_m$  разликује од тражене средње профилске брзине  $V$ . Веза између средње профилске и измерене брзине је сложена функција, у којој корекциони фактор обухвата утицаје попречног профила, присуства наноса и нивоа воде ("Свет инструмената", 2020.). Једна од тема истраживања је унапређење параметара који су укључени у корекциони фактор, у циљу добијања боље везе између измерене и средње профилске брзине, о чему ће бити више речи у наредним поглављима. На слици 3.1.2. приказана је сонда модела S.



Слика 3.1.2 EM сонда – Flat compact model S са каблом за конекцију

### Модел Flat 400

Кућиште сонде модела Flat 400 је шире, али тање од кућишта сонде модела S. Његова ширина износи  $V_{FC,S} = 160 \text{ mm}$ , дужина је  $L_{FC,S} = 280 \text{ mm}$ , док је висина сонде  $H_{FC,S} = 23 \text{ mm}$ . Овај модел се најчешће користи у већим канализационим колекторима ( $D > 800 \text{ mm}$ ) или у колекторима са равним дном. Због нешто већих димензија кућишта, овај уређај има већу контролну, односно мерну запремину, па су и резултати мерења стабилнији у односу на модел S (дубина интеграције струјног поља сонде Flat 400 износи око  $150 \text{ mm}$ ). Као веза између средње профилске и измерене брзине користи се исти корекциони фактор, за све сонде ("Иветић, 2019.).



Слика 3.1.3 EM сонда – модел Flat 400

### Модел Flat 100

За разлику од претходне две сонде чија кућишта су правоугаоне основе, кућиште сонде модела Flat 100 је кружне основе, пречника 100 mm. Направљено је од прохромског челика и заливено епокси смолом. Сензори су равни и мере проток по истом принципу као и претходна два модела, а дубина интеграције струјног поља износи око 50 mm. Још једна битна разлика у односу на друге моделе је начин монтаже. Сонде Flat 100 се монтирају са спољне стране зида цеви, тако што се у зид усече отвор кружног облика кроз који се провуче глава сонде са сензорима, док се постоље причврсти за цев помоћу вијака или анкера.



Слика 3.1.4 EM сонда – модел Flat 100

### 3.1.1.2. УЗВ сензори

Сонде са УЗВ сензорима имају широку примену у мерењу протока отпадних вода, а посебно се истичу папучасти ADV (eng. Acoustic Doppler Velocimetry) сензори и сонде које користе крос-корелационе УЗВ сензоре. У оквиру овог истраживања анализиране су радне способности једног протокомера немачке компаније "Nivus" који користи папучасту сонду са крос-корелационим УЗВ сензорима. Тестиран је модел протокомера "PCM Pro" који спада у преносиве мерне системе, који се користе за повремена мерења протока и складиштење измерених података.

Преносиви мерни систем "PCM Pro" мери проток помоћу папучасте сонде која је опремљена са 2 сензора, од којих један мери брзину воде и усмерен је тако да шаље сигнал под одређеним углом у смеру мерења, док је други сензор усмерен вертикално на горе и служи за мерење дубине. Сонда је повезана са логером на коме се налази дисплеј за тренутни приказ података, као и тастатура која служи за навигацију кроз опције. Логер се налази у водоотпорном, робусном кућишту од тврде пластике. Уз овај модел доступна је и помоћна опрема за монтажу и мерење, у виду носача – огрлице за монтажу сонде на унутрашњи зид цеви, као и телескопска шипка, помоћу које се мерење врши са безбедне удаљености. На наредној слици приказана је УЗВ крос-корелациона сонда и логер са којим се повезује - "PCM Pro".



Слика 3.1.5 Рачунска јединица УЗВ протокомера - Nivus PCM Pro (лево) и крос-корелациона УЗВ сонда (десно)

Крос-корелациони мерни метод који примењује систем "PCM Pro" је заснован на принципу ултразвучне рефлексије, стога је неопходно да у води буду присутне суспендоване честице. Сензори на мерној сонди су 2 пијезо кристала који независно један од другог функционишу као пријемник и предајник.



Ниво воде УЗВ сонда мери посредно, преко времена путовања ултразвучног сигнала (eng. Time travel), где се рачуна време које је потребно да сензор емитује и затим прими сигнал одбијен од површине воде, а које је преко брзине УЗВ сигнала у води повезано са нивоом. То се може представити једноставном формулом:

$$h_1 = 0.5 * (c * t_1) \quad (1.)$$

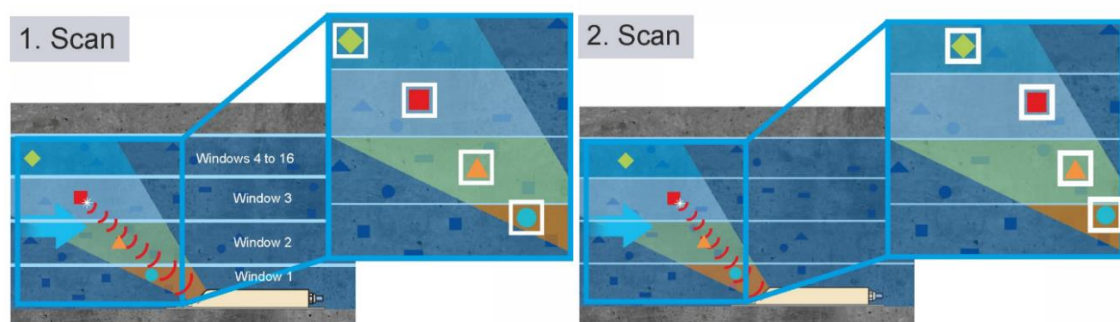
$h$  – мерени ниво

$c$  – брзина звука у води ( $c = 1480 \text{ m/s}$  на  $20^\circ\text{C}$ )

$t_1$  – време између емисије и пријема сигнала

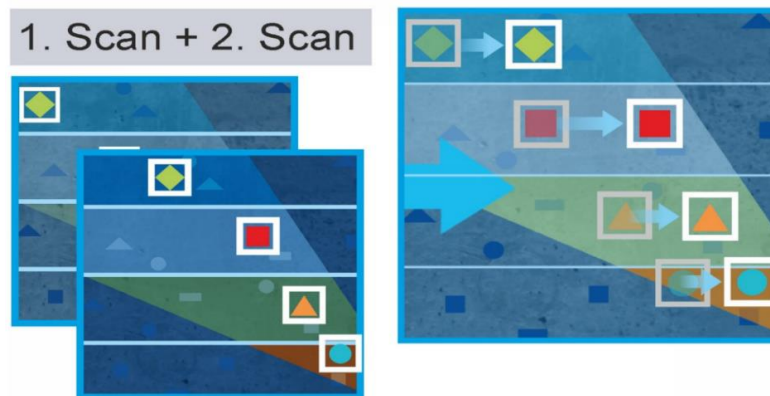
Брзина звука у води зависи од температуре воде, стога се константним мерењем температуре воде и кориговањем вредности брзине звука у складу са температуром повећава прецизност мерења.

Мерење брзине обавља се помоћу сензора који је под углом у односу на хоризонталу и усмерава се ка узводном крају тока. Сензор шаље ултразвучни сигнал под унапред дефинисаним углом, а делови тог сигнала се одбијају о честице суспендоване у води. Одбијени сигнал се детектује на сензору и чува се као сигнални образац. Квалитет одбијеног сигнала зависи од величине и облика честица суспендованих у води. Након одређеног времена сензор шаље други сигнал, који се такође чува у дигиталном процесору сигнала DSP (eng. Digital Signal Processor). Брзина се разликује по дубини, тако да се ток може поделити на неколико нивоа (профила брзине тока) у којима се померање честица од којих се сигнал рефлектује разликује.



Слика 3.1.6 Пример 2 сигнална образаца која се обрађују у дигиталном процесору сигнала

DSP затим анализира ове слике и тражи сличности на њима користећи крос-корелациони метод. Када пронађе честице које адекватно рефлектују сигнал, рачуна се брзина, тако што се узима у обзир угао емитовања сигнала, интервал између 2 емитована сигнала, као и одступање обрасца сигнала.



Слика 3.1.7 Пример директног поређења 2 узастопна сигнална обрасца на основу којих се добија распоред брзина

Овако добијени резултати брзина у различитим профилима се на крају повезују у један профил распореда брзине по дубини тока. Проток се добија на основу срачунате брзине, облика и димензија цеви, као и нивоа воде у цеви (Nivus, 2011.).

### 3.1.2. Дајвери

Дајвери (eng. Diver) су аутоматски, програмабилни логери података који служе за мерење апсолутног притиска и температуре воде, а производи их холандска компанија "Van Essen". Измерени подаци се складиште у интерној меморији уређаја и приступа им се повезивањем сонде са рачунаром. Уређај је опремљен сензором за мерење воденог притиска, сензором температуре, поменутом интерном меморијом за складиштење података и батеријом, који су смештени у водонепропусно кућиште. Дајвери мере апсолутни притисак воде, односно сензор притиска поред притиска воде мери и ваздушни притисак који делује на водену површину ("Diver – Product manual", PDF, 2016.).

Мерење нивоа помоћу дајвера је базирано на мерењу притиска којим водени стуб оптерећује сензор. Сонда мери атмосферски притисак док се не потопа у воду, након чега величина притиска је пропорционална висини воденог стуба који делује на сонду. Како би се узеле у обзир варијације у атмосферском притиску, на свакој мерној локацији поставља се тзв. баро-дајвер (eng. Baro-Diver), који служи искључиво за мерење атмосферског притиска. Ови подаци се затим могу обрадити на рачунару помоћу пратећег софтвера ("Diver – Product manual", PDF, 2016.).

Постоји неколико различитих модела дајвера, који се разликују према величини сонде, мерним способностима и меморији. Основни модел је мини дајвер (eng. Mini-Diver), чије је кућиште направљено од нерђајућег челика, са капацитетом меморије од 24 000 измерених података. За мерења у сланој води и другим агресивним срединама доступни су модели "Cera-Diver" и "CTD-Diver", чија кућишта су израђена од керамике, а капацитет меморије за оба уређаја је 48 000 ускладиштених података. Главна разлика између ова два уређаја је у томе што "CTD-Diver" има способност мерења електропроводљивости воде ("Diver – Product manual", PDF, 2016.). Модели микро дајвер (eng. Micro-Diver) и баро дајвер (eng. Baro-Diver) су предмет детаљније анализе у овом раду.



Слика 3.1.8 Микро дајвер сонда компаније "Van Essen"

Микро дајвер има сонду најмањег пречника 18 mm, наспрам 22 mm, колико износе пречници осталих модела. Кућиште је од нерђајућег челика, капацитет меморије износи 48 000 ускладиштених података. Предност микро дајвера је примена у цевима малог пречника (најмање 20 mm) ("Diver – Product manual", PDF).

Баро дајвер служи за мерење атмосферског притиска и користи се у комбинацији са осталим моделима. Измерене варијације у атмосферском притиску које се добијају помоћу баро дајвера се користе за компензацију вредности притиска воде измереног помоћу других модела дајвера. Сонда баро дајвера је од нерђајућег челика и може се користити за мерења нивоа воде до 1 m дубине. У меморију баро дајвера може да се ускладишти 48 000 појединачних мерења ("Diver – Product manual", PDF).



Слика 3.1.9 Баро дајвер компаније "Van Essen"

### 3.1.3. Узоркивач МАХХ

Узоркивач немачке компаније "Махх", ознаке TP5 C спада у аутоматске узоркиваче са перисталтичком пумпом. Робусно кућиште од тврде пластике састоји се из 2 одвојена дела – складишта за боце за узорковање и главе уређаја.

Доњи део кућишта са поклопцем на преклапање служи за складиштење узорака и у њега може стати 24 пластичне боце запремине 1 L. Неки модели имају могућност хлађења складишта, односно узорака, али фрижидерска јединица не спада у основни пакет опреме. Посебно дизајниран распоред отвора на поклопцу кућишта омогућава појединачно пуњење боца према испрограмираном распореду.



Слика 3.1.10 Узоркивач са перисталтичком пумпом "Махх - TP5 С" (лево) и боце за складиштење узорака запремине 1 L (десно)

Глава уређаја се налази изнад поклопца складишта и помоћу механичких бравица се причвршћује за доњи део кућишта. На глави уређаја налазе се рачунска јединица, перисталтичка пумпа, електроника и систем цева који повезује компоненте. Рачунску јединицу чини дисплеј и тастатура којом се врши навигација кроз програмске опције. Модел TP5 С има могућност програмирања динамике и редоследа пуњења боца, а навигацијом кроз опције могу се подешавати различити мерни параметри и режими захватања узорака. Ротор перисталтичке пумпе може се окретати у 2 смера, тако да у једном увлачи воду у складиште уређаја, а обртањем у другом смеру удувава ваздух у усисно цево, чиме се оно чисти од заостале течности или честица.

Пре сваког мерења неопходно је крпом обрисати све компоненте уређаја, опрати боце за складиштење узорака и рекалибрисати пумпу. Због прилично великих димензија кућишта (ширина = 51 cm, дубина = 46.8 cm, висина 78.7 cm), уређај захтева много простора за смештање, на шта треба обратити пажњу приликом избора мерног места.

## 3.2. Лабораторијско испитивање мерне несигурности уређаја

Како би се утврдила поузданост мерења неког мерног уређаја, неопходно је квантификовати мерну несигурност, па се у ту сврху одређују вредности статистичке и систематске мерне несигурности. Као резултат неког мерења, нпр. брзине –  $v$ , добија се  $N$  резултата мерене величине, који се могу записати у следећем облику:

$$v = v_{sr} \pm n * \delta v \quad (2.)$$

$$v_{sr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i \quad - \text{средња вредност} \quad (3.)$$

$$\delta v = u(v)_{st} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - v_{sr})^2} \quad - \text{стандардна девијација} \quad (4.)$$

$n$  – множилац мерне несигурности (најчешће  $n = 2$ ).

Праћењем наведеног поступка одређује се статистичка мерна несигурност, којом се квантификује одступање измерених вредности од средње вредности.

Да би се квантификовале систематске грешке, које су детерминистичког карактера, користи се систематска мерна несигурност, која се у случају обраде низа измерених података записује као:

$$u(v)_{sist} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - v_{et,i})^2} \quad (5.)$$

$v_{et}$  – еталонска вредност брзине

На овај начин утврђене су мерне несигурности ЕМ протокомера и дајвера. Код ЕМ протокомера одређене су мерне несигурности сензора брзине и дубине.

### 3.2.1. Испитивање протокомера

Испитивање протокомера извршено је у контролисаним условима у лабораторијском каналу Института за хидротехнику, Грађевинског факултета Универзитета у Београду.



Испитане су радне карактеристике три различите ЕМ сонде које производи "Свет инструмената" са Flat Compact сензорима, у циљу унапређења корекционе функције и то мањи модел S, средњи модел М и округла сонда Flat 100.

Лабораторијски канал је дужине 8 m, ширине 0,25 m и највеће дубине од приближно 45 cm, док се вода у канал допрема помоћу пумпе марке "Ebara" из резервоара запремине 100 m<sup>3</sup> који се налази у подруму Института. Максимални проток који се може остварити у каналу износи око 50 L/s, а његова вредност се контролише помоћу табластог вентила на доводном цевоводу.



Слика 3.2.1 Лабораторијска инсталација Института за хидротехнику (лево) и устава за регулисање нивоа у лабораторијском каналу (десно)

На низводном крају канала налази се устава, која може бити потпуно спуштена тако да се у каналу формира равно дно или подигнута у два положаја (под углом од 22,5° или 45° у односу на хоризонталну раван), чиме се ствара успор ка узводном крају канала. Као еталонско мерило протока користи се цевно ЕМ мерило, који производи фирма "Khrone" и то модел "Aquaflux F/6".

Истовремено је извршено тестирање сензора дубине и брзине ЕМ сонди. Сензори брзине су окренути ка узводном смеру тока, а сонда је помоћу конектора повезана са програмабилним контролером. Конектор се развлачи уз зидове канала, како би у што мањој мери реметио ток. Проток у каналу је у првој фази тестирања помоћу табластог затварача повећаван у распону од 0 – 40 L/s са кораком од приближно 10 L/s. При сваком повећању, достигнути проток се одржава у трајању од 5 до 10 минута, како би сонда имала довољно времена да забележи релевантан број мерења, а за то време се врши читавање вредности протока и нивоа на еталонским мерилима. Када се заврши са мерењем највећег протока у првој фази, мења се положај уставе, након чега се приступа другој фази мерења где се проток смањује по истом принципу као и током прве фазе.

Сонде фирме "Свети инструмената" мере ниво воде на основу разлике притиска на самом сензору и ваздушног притиска измереног на рачунској јединици. Површина тока зависи од измереног нивоа и облика проводника, а рачуна се решавањем полинома облика:

$$A(h) = A_0 + A_1h + A_2h^2 + A_3h^3 + A_4h^4 + A_5h^5 + A_6h^6 \quad (6.)$$

$A_i$  – коефицијенти полинома којим се интерполира површина пресека.

Уколико у цеви има муљног наноса, уношењем вредности нивоа наноса ( $h_0$ ) уређај рачуна ефективну површину воденог тока према обрасцу:

$$A_{\text{eff}}(h) = A(h) - A(h_0) \quad (7.)$$

С обзиром на ограничену дубину интеграције сензора брзине (40mm за модел S и 80 за Flat 400), а и чињеницу да се сонда смешта уз зид проводника, измерена брзина на позицији сензора ( $v_m$ ) се разликује од средње профилске брзине ( $v_{\text{avg}}$ ) која одговара средњем протоку. Однос ових брзина је сложена функција која зависи од тачке монтаже, попречног профила и нивоа воде. Програм врши апроксимативни прорачун средње брзине према следећем обрасцу:

$$V_{\text{avg}}(h) = v_m(1 + P_8 * (h/h_n)^{P7}) \quad (8.)$$



$P_7$ ,  $P_8$  – програмске константне које се емпиријски одређују тако да крива што више одговара стварном профилу. Вредност константи  $P_7$  и  $P_8$  се може мењати на самој рачунској јединици или помоћу рачунарске апликације.

Сам прорачун протока врши се према обрасцу:

$$Q = v_{avg}(h) * A_{eff}(h) \quad (9.)$$

Подешавањем вредности параметара  $P_7$  и  $P_8$ , може унапредити веза између мерене и средње профилске брзине, а самим тим и тачност измереног протока.

### 3.2.2. Испитивање нивомера

Истовремено са испитивањем протокомера типа "Flat Compact model S" извршено је испитивање нивомера, односно дајвера. Тестиране су радне карактеристике модела "Micro-Diver" и "Baro-Diver" под истим условима под којима је изведено мерење протока. "Micro-Diver" је током мерења постављен уз саму ивицу канала, како сонду не би однео ток воде, а мерења су вршена за три различита положаја дајвера у односу на ток. У првом случају сензор дајвера је усмерен ка узводном крају тока (лево на слици 3.2.2.) у другом случају је окренут бочно у односу на правац течења воде, а у трећем случају сензор је био усмерен ка низводном крају тока (десно на слици 3.2.2.). Приликом бочног постављања сонде, са њене низводне стране постављен је метални тег који спречава котрљање сонде цилиндричног облика, упркос томе након првог повећања протока дошло је до благог померања сонде.



Слика 3.2.2 Распоред дајвера у лабораторијском каналу за време испитивања

Сонда у интерну меморију бележи податке о промени нивоа који су последица промене протока, као и промене положаја уставе. По један податак се забележи на сваких 30 s, а као контрола измерених вредности користе се вредности очитане са лењира на бочном зиду канала. Након завршеног мерења сонда се помоћу USB кабла повезује са рачунаром, а подацима се приступа преко апликације Diver-Office. Добијени резултати су искоришћени за поређење измерених вредности у различитим положајима, како би се утврдило да ли измерене вредности зависе од положаја сонде и у ком положају сонда даје најбоље резултате. У наредном поглављу биће приказани измерени резултати, као и одређене вредности статистичке и систематске мерне несигурности за све 3 сонде.

### 3.3. Унапређење корекционих функција

Полазна претпоставка је да се варирањем вредности параметара  $P_7$  и  $P_8$  може унапредити тачност измерених протока (једначине 8. и 9.), тако што се експериментално дефинише веза између измерене брзине ( $v_m$ ) и средње брзине ( $v_{avg}$ ). Коришћењем програма "Matlab" написан је алгоритам којим се траже оптималне вредности параметара  $P_7$  и  $P_8$  при којима је разлика између кориговане измерене брзине  $v_m$  (једначина 8.) и референтне средње брзине  $v_{avg}$ , добијених у оквиру лабораторијских испитивања, минимална.

Први корак у алгоритму подразумева уношење почетних вредности параметара  $P_7$  и  $P_8$ , задавање опсега у оквиру ког ће се варирати њихова вредност и корак којим се та

вредност мења од минималне до максималне. Вредност параметра  $P_7$  је варирана у опсегу од 0.1 до 10, са кораком од 0.05, док је  $P_8$  варирано у опсегу од 0.05 до 5, са кораком од 0.05. У програм је затим потребно унети вредност нормалне дубине  $h_n$  очитане са рачунске јединице уређаја, као и вредности референтне брзине  $v_{ref}$  (срачунате помоћу еталонског протокомера "Khrone"), нивоа  $h_m$  и брзине  $v_m$  измерене помоћу ЕМ протокомера, преузете из програма "Excel".

Описани поступак је спроведен за све испитане ЕМ сензоре (поглавље 3.1.1.1.).

### **3.4. Могућности унапређења помоћне опреме за монтажу и комуникацију**

Подаци о протоку отпадних вода, приликом повремених мерења, прикупљају се у трајању од најмање 7 дана. За то време мерна опрема мора бити правилно постављена и фиксирана, како би се обезбедили једнаки услови мерења, а поред тога неколико пута је потребно извршити тренутна мерења, која служе као контрола. У те сврхе користи се различита помоћна опрема попут раније поменутих носача – огрлица или телескопских шипки за протокомере. Произвођачи мерне опреме, компаније "Nivus" и "Свет инструмената" производе помоћну опрему у стандардизованим величинама, међутим услови на терену често излазе ван оквира тих стандарда, што захтева модификацију опреме и доводи до њеног унапређења.

Приликом мониторинга отпадних вода, под покровитељством кинеске компаније "CRBC" у коме је учествовао тим са Грађевинског факултета, коришћена је претходно описана опрема (ЕМ и УЗВ протокомери, дајвери и телескопске шипке). Испитивање је обављено у Војводини, на територији општина Инђија, Нови и Стари Бановци и Нова и Стара Пазова, а у току обиласка терена уочени су проблеми који су захтевали унапређење појединих комада опреме.

Компанија "Nivus" производи телескопске шипке, на које се монтира УЗВ сонда, како би се тренутно мерење протока у шахтним отворима извело са површине терена, без потребе за силаском у шахт. Телескопска шипка је се састоји из 4 сегмента, појединачне дужине нешто веће од 1 m и укупне дужине од 3.95 m. Приликом извлачења сваког сегмента потребно је оставити 10 – 15 cm шипке мањег пречника увучено у шипку већег

пречника, како не би дошло до савијања шипке на спојницама. Сегменти се након извлачења фиксирају помоћу пластичног завртња.

На појединим мерним локацијама дубине у шахтним отворима су биле веће од 5 m, стога са потпуно развученом телескопском шипком није било могуће вршити безбедно мерење протока са површине терена. Како би се омогућило извођење мерења, усвојено је идејно решење Ивора Кокотовића, којим је постојећа телескопска шипка продужена за приближно 2 m додавањем два нова сегмента од полипропиленских водоводних цеви и које ће бити детаљно описано у поглављу 4.2.

Поред тога услед променљивих хидрауличких услова, као и чињенице да је средина у којој се врши мерење изузетно прљава, на сонде и опрему се могу наталожити различите врсте отпада, које могу оштетити уређај или утицати на његову способност правилног мерења, без обзира колико је уређај робустан.

Како би се омогућила правремена реакција у случају проблема са мерењем, модерне сонде су опремљене антенама за даљинску GSM или GPRS комуникацију. За потребе мерења протока у оквиру мониторинга отпадних вода о коме је било речи раније, постављен је сервер за комуникацију са мерним сондама у институту за Хидротехнику. Стандардна опрема ЕМ протокомера фирме "Свет инструмената" подразумева антене за даљинску конекцију, које се повезују са контролером DC234 преко за то посебно намењеног порта, као и софтвер за остваривање даљинске конекције и приступ измереним подацима. Уочени су проблеми у преносу података, првенствено због недовољне јачине како антене предајника, тако и сигнала мобилне телефоније. Овде су разматрана нека примењена решења за превазилажење наведених проблема.

## **4. Резултати и дискусија**

У наредних неколико поглавља биће укратко презентовани графички резултати испитивања сензора брзине и сензора дубине, уз анализу приказаних резултата и осврт на корекциону функцију и могућности њеног унапређења. Поред тога биће презентована и конкретна унапређења помоћне мерне опреме – телескопске шипке и антене за комуникацију.

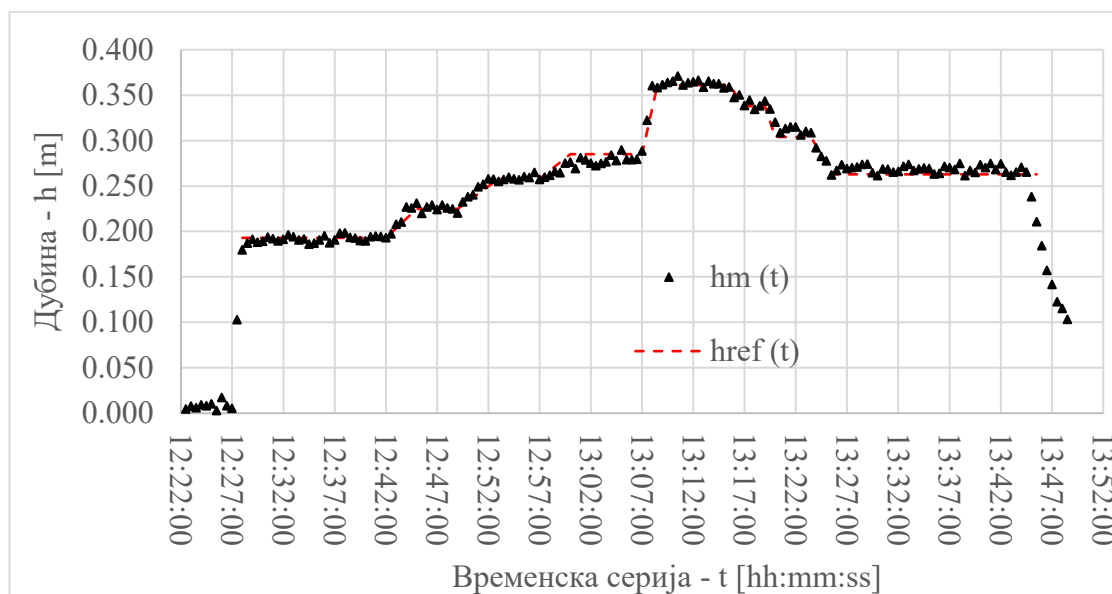
### **4.1. Испитивање радних карактеристика уређаја у лабораторијским условима**

Испитивањем ЕМ протокомера у лабораторијским условима добијене су временске серије протока, брзина и дубина, док су испитивањем дајвера добијене временске серије дубина (након компензације атмосферског притиска). Подаци су обрађени помоћу програма Еxcel, при чему су формиран дијаграми који приказују временске серије протока, брзине и дубине, као и дијаграми који приказују однос измерених величина са еталонским вредностима. Обрадом и кориговањем измерених података одређене су систематска и статистичка мерна несигурност 3 сонде Flat Compact S (ознака FLAT COMPACT 1207, FLAT COMPACT 1104 и FLAT COMPACT 1105), по једна сонда модела Flat 100 и Flat 400, као и 3 MicroDiver сонде за мерење дубине, у 3 различита положаја.

#### **4.1.1. Испитивање сензора дубине протокомера**

Сонда на сваких 30 s бележи по један податак о измереној дубини воде у лабораторијском каналу, док су истовремено очитиване референтне вредности на еталонском мерилу. Као еталоско мерило дубине коришћен је лењир на зиду лабораторијског канала, који се налази у равни са сондом. У наставку дат је графички приказ измерених резултата, у виду временских серија, као и поређење измерених резултата са референтним вредностима, очитаним на еталонском мерилу.

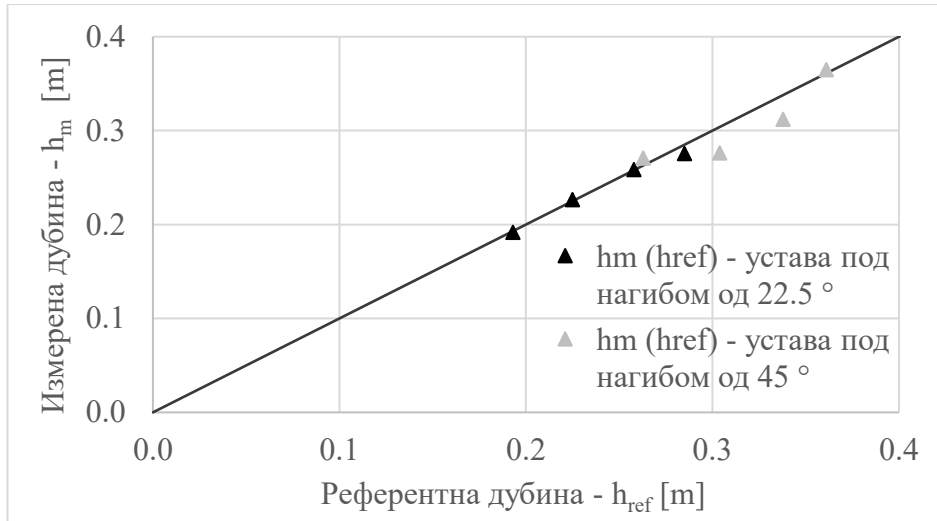
## Flat compact S



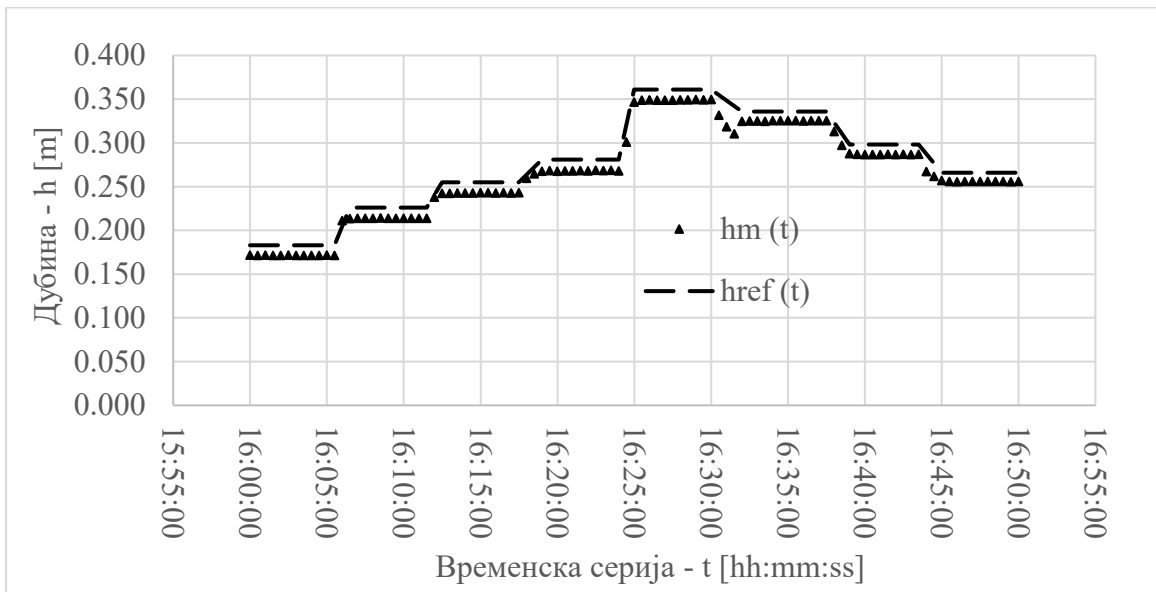
Слика 4.1.1 Временска серија дубине измерене помоћу сонде FLAT COMPACT 1207 ( $h_m$ ) и референтног нивоа очитаног на зиду лабораторијског канала ( $h_{ref}$ )

На слици се може видети да измерени подаци о дубини одговарају референтним вредностима и поуздано прате промене протока (скоковите промене дубине на дијаграму). Јасно је уочљив тренутак промене положаја уставе, при максималном протоку од приближно 40 L/s коме одговара максимална вредност дубине на дијаграму. Нешто веће осцилације измерених резултата се јављају при максималним вредностима протока, као и након промене положаја уставе са  $22.5^\circ$  на  $45^\circ$  у односу на вертикалу.

Поређењем измерене вредности дубине која се добија као средња вредност 5 узастопних измерених резултата, при свакој промени протока и референтне вредности дубине која одговара променама протока, уочава се одступање на неким измереним дубинама од референтних дубина. На слици 4.1.2. (као и на свим наредним дијаграмима зависности измерених од референтних вредности), права под углом од  $45^\circ$  у односу на хоризонталу одговара једнаким вредностима измерене и референтне дубине.

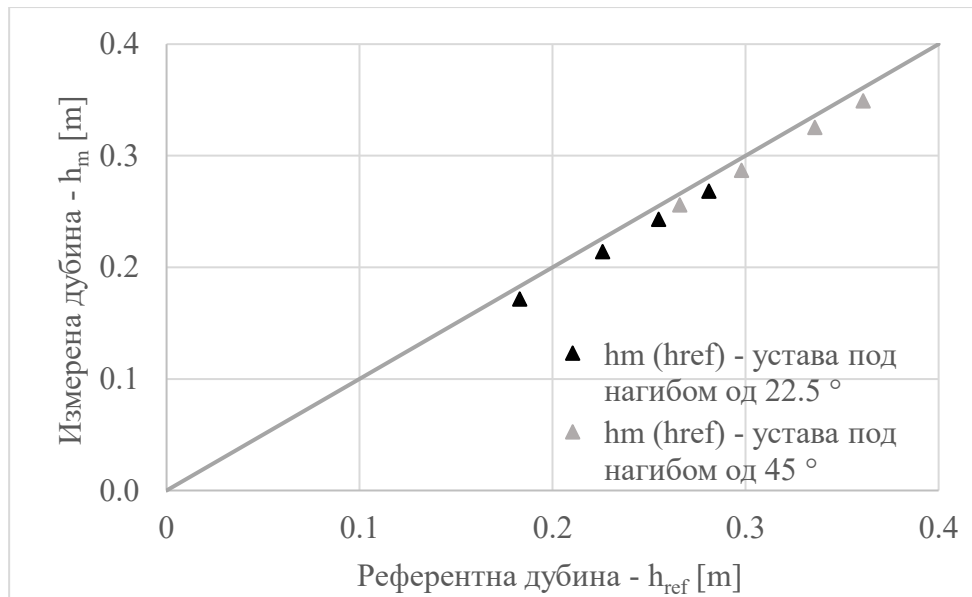


Слика 4.1.2 Дијаграм зависности референтне ( $h_{ref}$ ) и измерене ( $h_m$ ) дубине – сонда FLAT COMPACT 1207

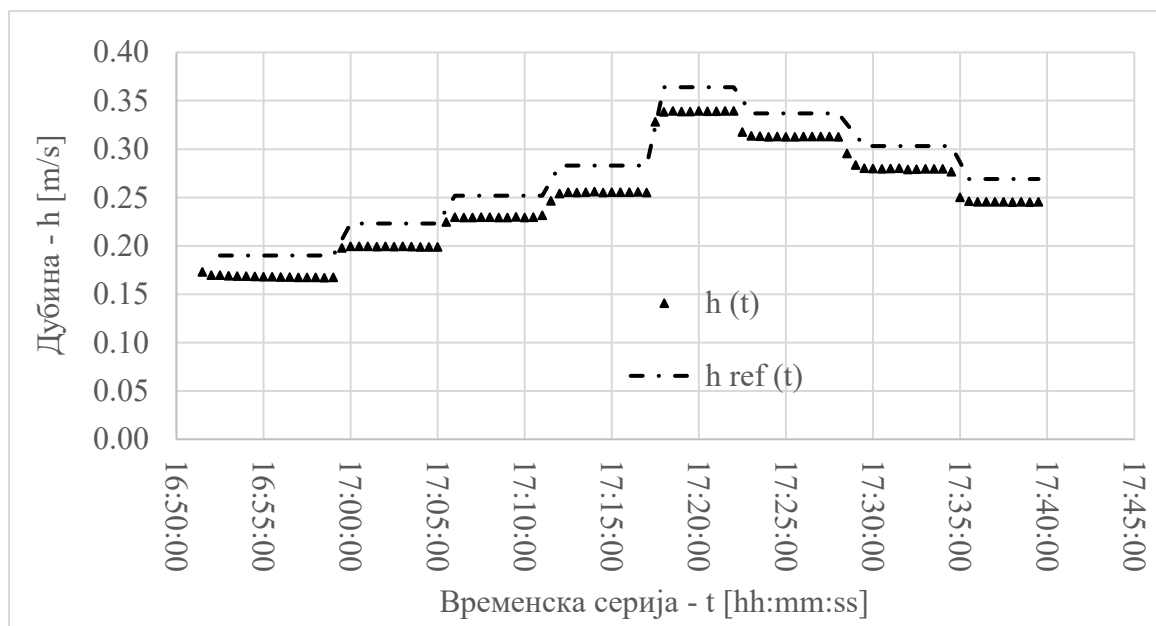


Слика 4.1.3 Временска серија дубине измерене помоћу сонде FLAT COMPACT 1104 ( $h_m$ ) и референтног нивоа очитаног на зиду лабораторијског канала ( $h_{ref}$ )

Измерене вредности дубине добијене помоћу сонде FLAT COMPACT 1104 приказане на слици 4.1.3. јасно прате промене протока, као и промену нагиба уставе, уз занемарљиве осцилације измерених података. Одступање измерене од референтне вредности је уједначено током целокупног мерења, што се може видети на слици 4.1.4.



Слика 4.1.4 Дијаграм зависности измерене ( $h_m$ ) од референтне ( $h_{ref}$ ) дубине – сонда FLAT COMPACT 1104

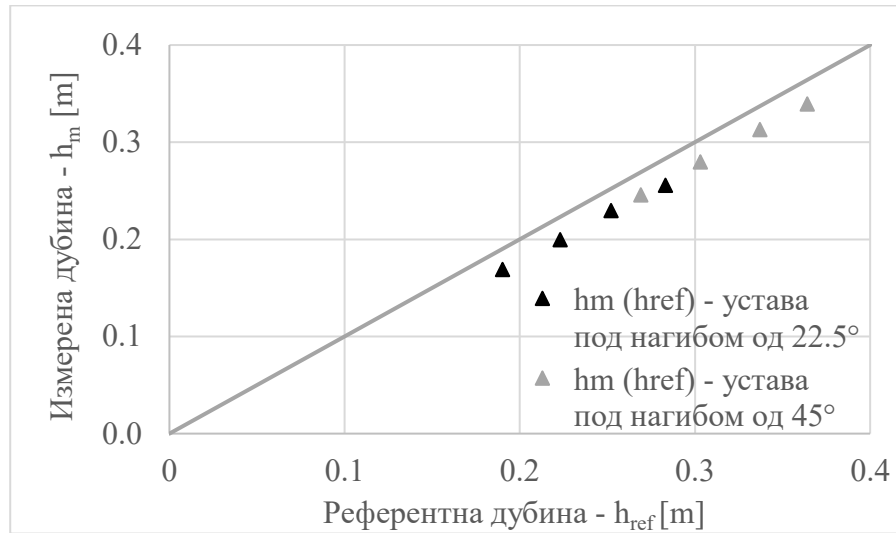


Слика 4.1.5 Временска серија дубине измерене помоћу сонде FLAT COMPACT 1105 ( $h_m$ ) и референтног нивоа очитаног на зиду лабораторијског канала ( $h_{ref}$ )

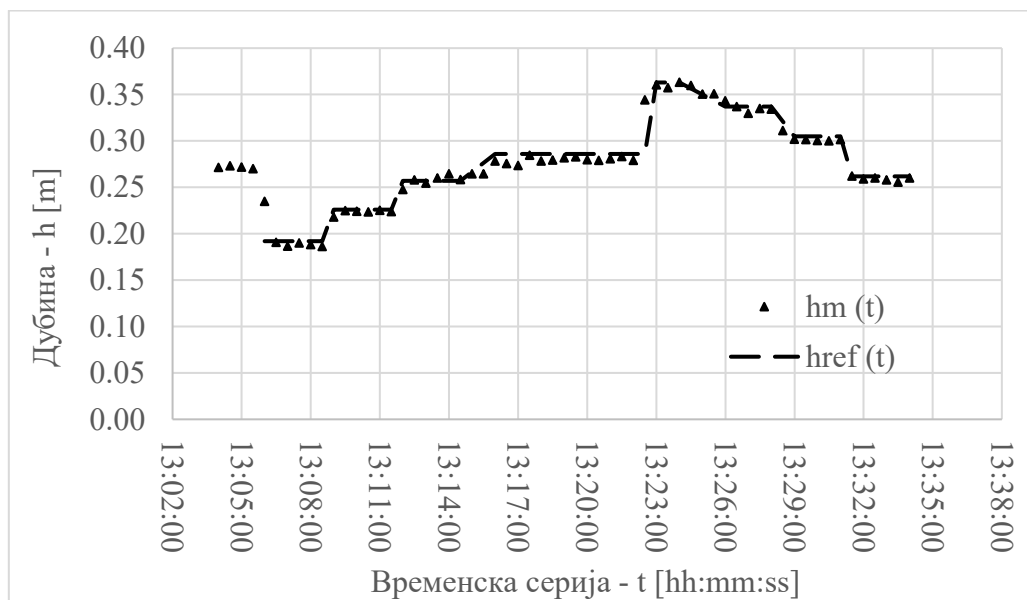
Сонда ознаке FLAT COMPACT 1105 показује сличне резултате, дубина се јасно мења са променом протока и положаја устава, уз занемарљиве осцилације и уједначено одступање од референтне дубине.



Одступање измерене вредности дубине од референтних је детерминистичког карактера. Систематске грешке попут ове се могу лако уклонити приликом обраде података.

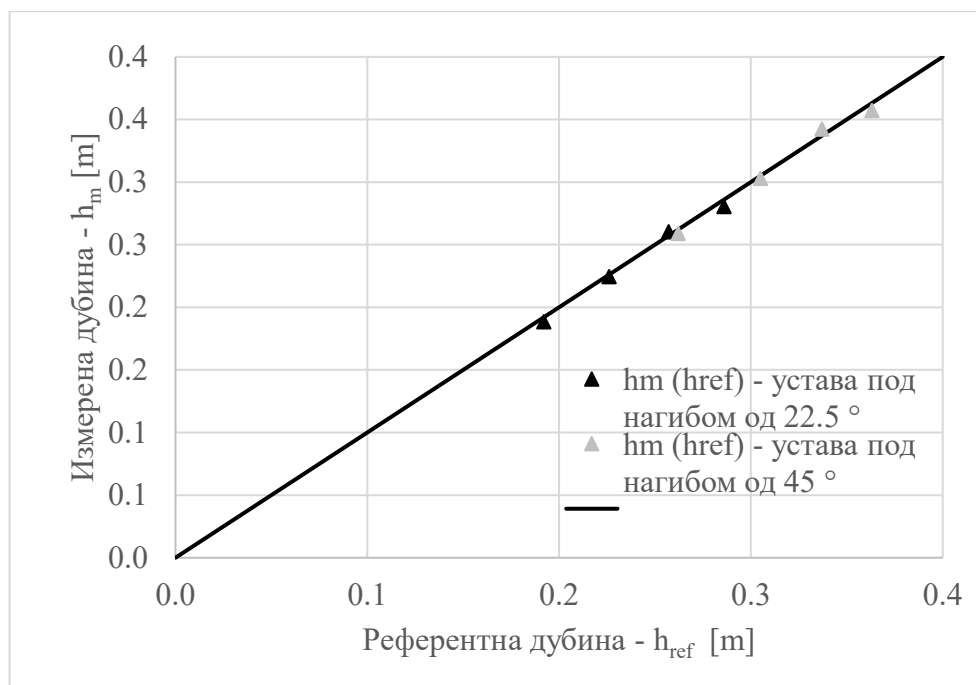


Слика 4.1.6 Дијаграм зависности измерене ( $h_m$ ) од референтне ( $h_{ref}$ ) дубине – сонда FLAT COMPACT 1105



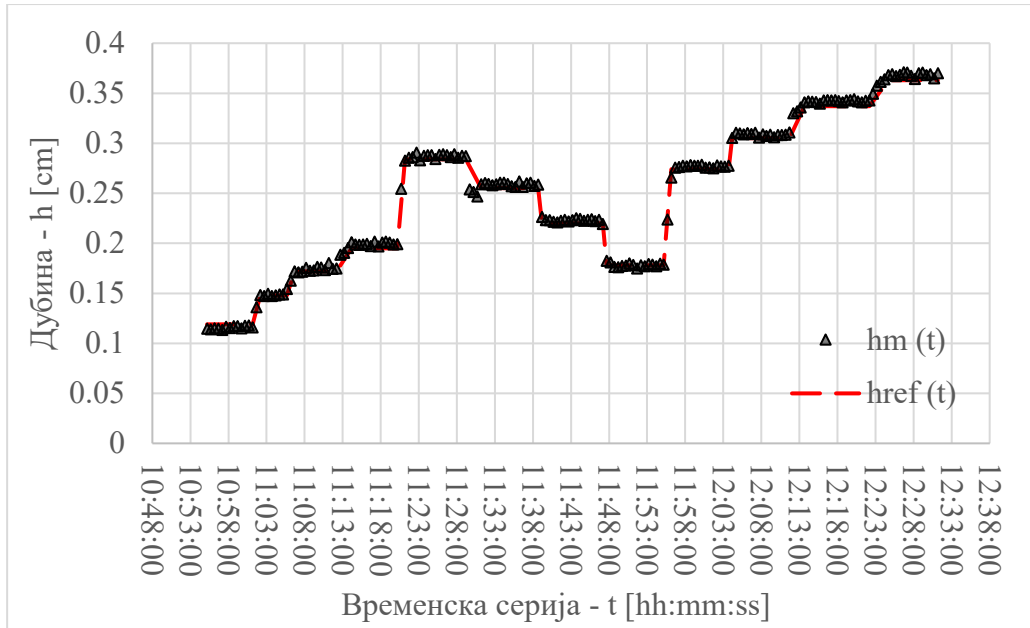
Слика 4.1.7 Временска серија дубине измерене помоћу сонде Flat 400 ( $h_m$ ) и референтног нивоа очитаног на зиду лабораторијског канала ( $h_{ref}$ )

Подаци о дубини измерени помоћу сонде Flat 400 се одлично поклапају са референтним вредностима, уз занемарљиве осцилације.

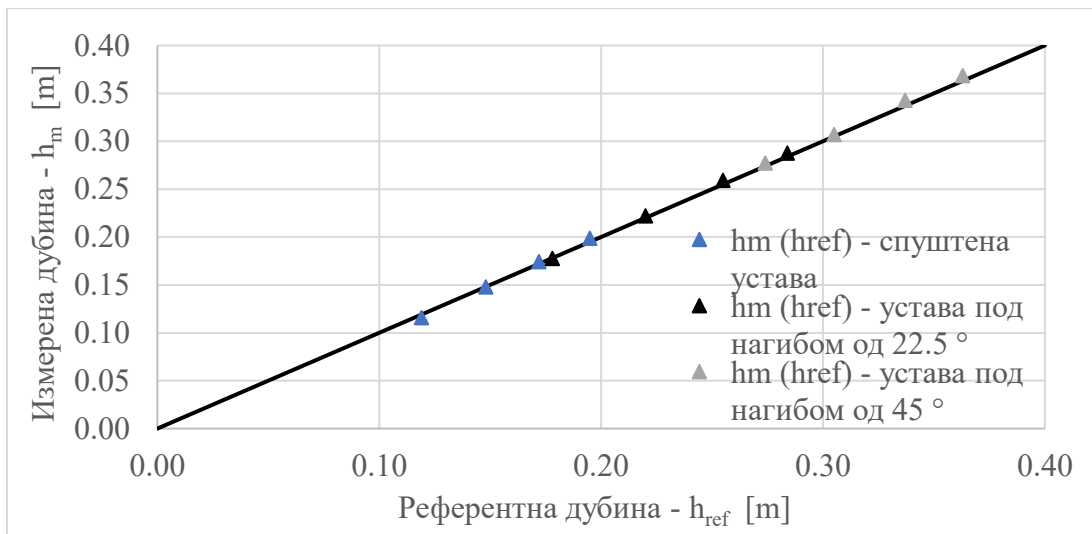


Слика 4.1.8 Дијаграм зависности измерене дубине ( $h_m$ ) од референтне ( $h_{ref}$ ) – сонда Flat 400

Тестирање свих претходно наведених сонди у лабораторијском каналу, извршено је при 2 положаја уставе у односу на хоризонталу (устава под нагибом од 25 ° и 45 °), док је сонда Flat 100 тестирана и у случају када је устава потпуно спуштена. Из овог разлога временска серија резултата је нешто дужа, а постоје и додатне 4 вредности на дијаграму зависности измерених од референтних вредности (слика 4.1.10.). Поред тога уобичајено је да се сонда Flat 100 монтира са спољашње стране цеви, док је у лабораторијском каналу постављена са унутрашње стране зида канала, што може утицати на тачност измерених вредности. Измерене вредности дубине помоћу сонде Flat 100 приказане у виду временске серије на слици 4.1.9. показују одлично поклапање са референтним и јако мале осцилације при свим протоцима и положајима уставе. Јасно се виде моменти промене положаја уставе и промене нивоа услед промене протока.



Слика 4.1.9 Временска серија дубине измерене помоћу Flat 100 ( $h_m$ ) и референтног нивоа очитаног на зиду лабораторијског канала ( $h_{ref}$ )



Слика 4.1.10 Временска серија дубине измерене помоћу Flat 100 ( $h_m$ ) и референтног нивоа очитаног на зиду лабораторијског канала ( $h_{ref}$ )

Дијаграм зависности измерених и референтних вредности, који сада има 4 додатне вредности, показује тачност измерених резултата при свим положајима устава и променама протока, с обзиром да свих 12 тачака леже на контролној оси.

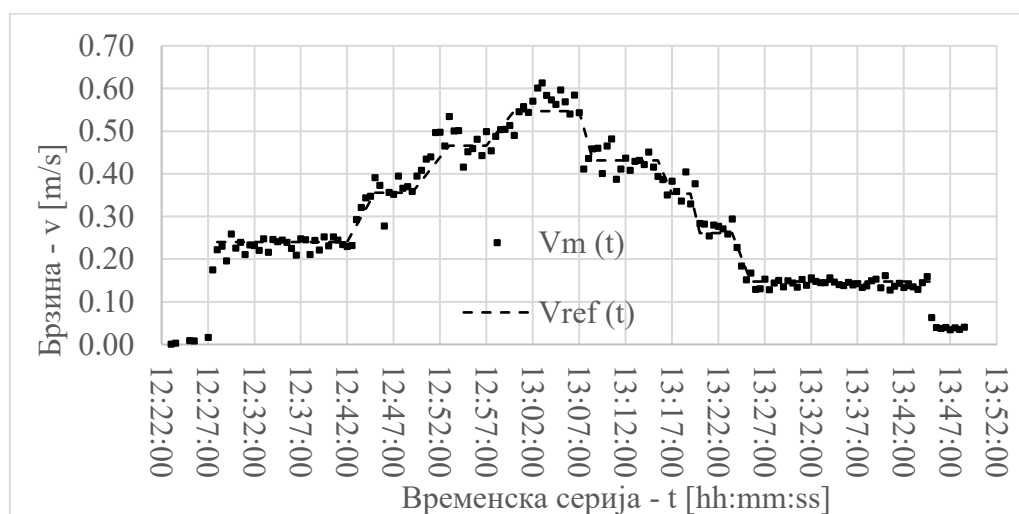
Статистичка и систематска мерна несигурност сонди Flat compact S, Flat 400 и Flat 100 дате су у наредној табели. Мерне несигурности сензора дубина срачунате су применом формула описаних у поглављу 2.3.

Табела 4.1.1 Статистичка и мерна несигурност сензора дубине ЕМ сонди

| Ознака сонде      | Статистичка мерна несигурност | Систематска мерна несигурност |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Flat Compact 1207 | 0,003                         | 0,014                         |
| Flat Compact 1104 | 0,001                         | 0,011                         |
| Flat Compact 1105 | 0,0002                        | 0,024                         |
| Flat 400          | 0,003                         | 0,004                         |
| Flat 100          | 0,001                         | 0,003                         |

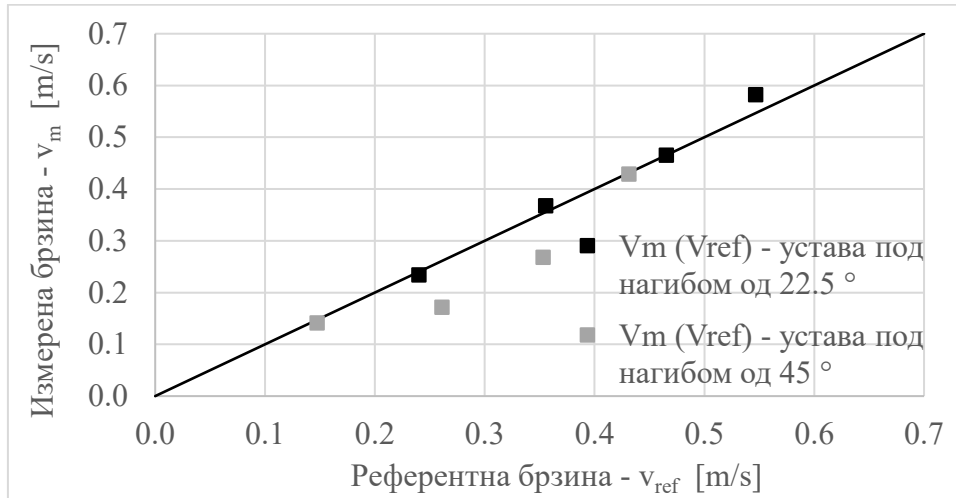
Све сонде су показале линеарност у погледу мерења дубине и јасно прате промене дубине у каналу, уз мала одступања од еталонске вредности код сонди модела S. Статистика и систематска мерна несигурност свих сонди су малог реда величина величине и задовољавају мерне потребе у лабораторијским условима.

#### 4.1.2. Испитивање сензора брзине протокомера



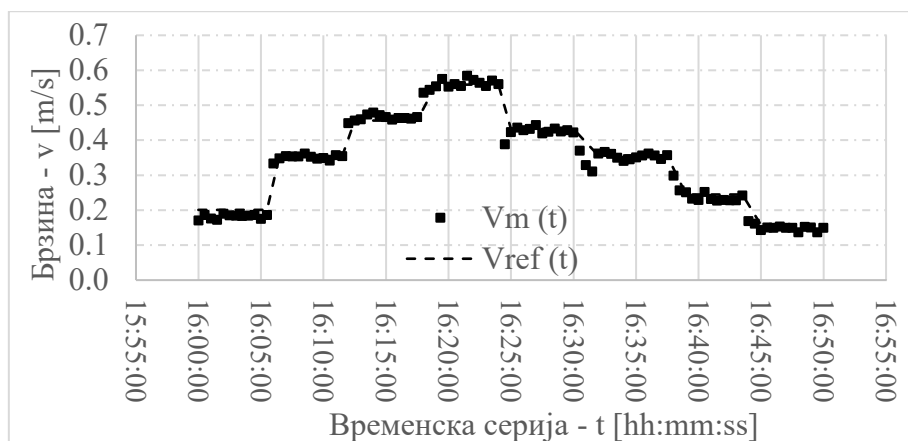
Слика 4.1.11 Временска серија брзине измерене помоћу сонде FLAT COMPACT 1207 ( $v_m$ ) и референтне брзине ( $v_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Khrone"

На слици 4.1.11. приказана је временска брзина измерених помоћу сонде FLAT COMPACT 1207, док се на слици 4.1.12. види зависност измерене од референтне брзине.

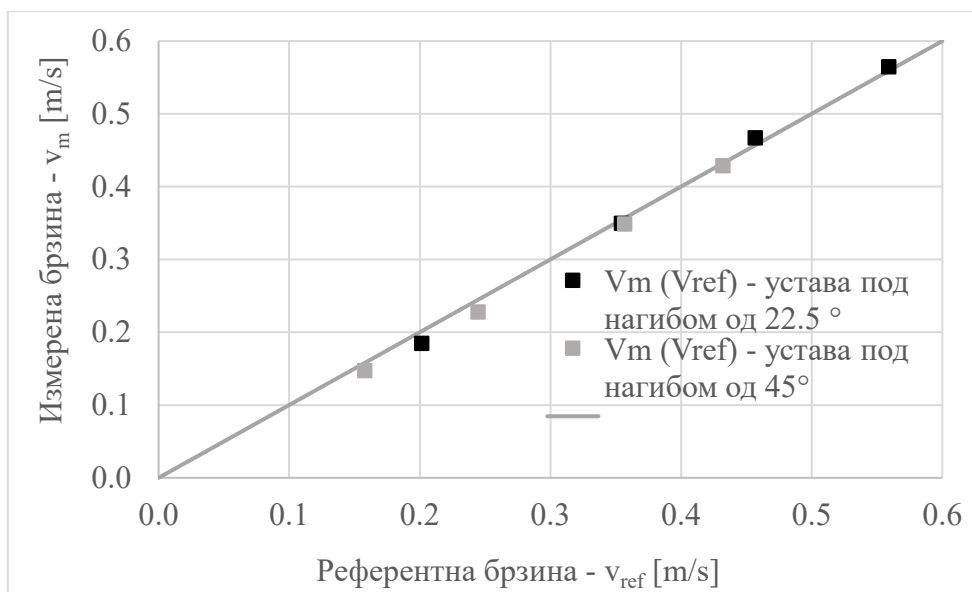


Слика 4.1.12 Дијаграм зависности измерене ( $v_m$ ) од референтне ( $v_{ref}$ ) брзине – сонда FLAT COMPACT 1207

Сонда FLAT COMPACT 1104 показује мале осцилације измерене брзине током целокупног трајања мерења, уз одлично поклапање измерене и референтне вредности, што се може видети на сликама 4.1.13. и 4.1.14.

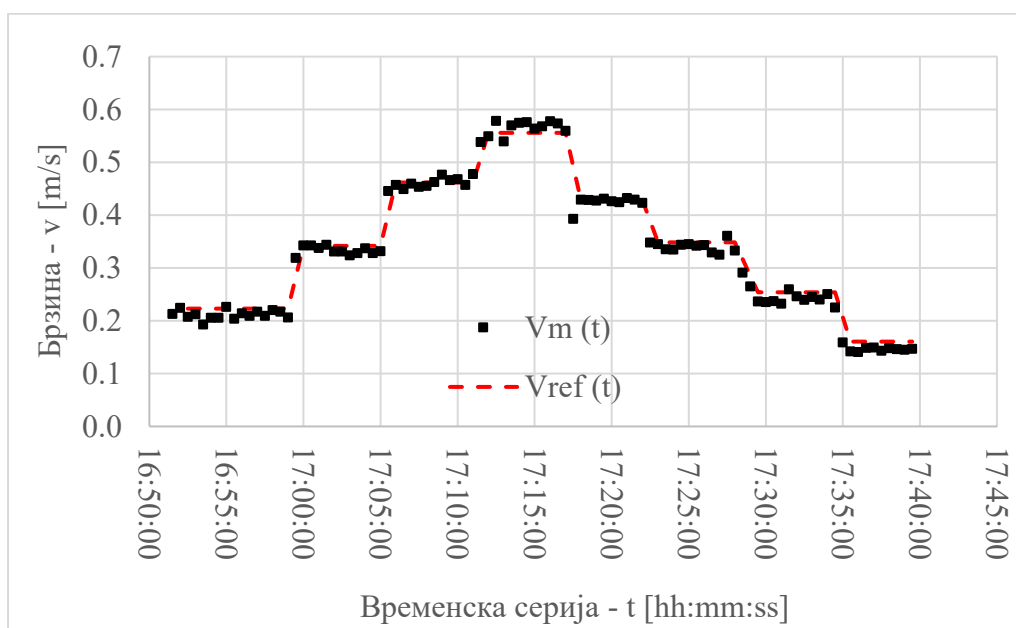


Слика 4.1.13 Временска серија брзине измерене помоћу сонде FLAT COMPACT 1104 ( $v_m$ ) и референтне брзине ( $v_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Krone"

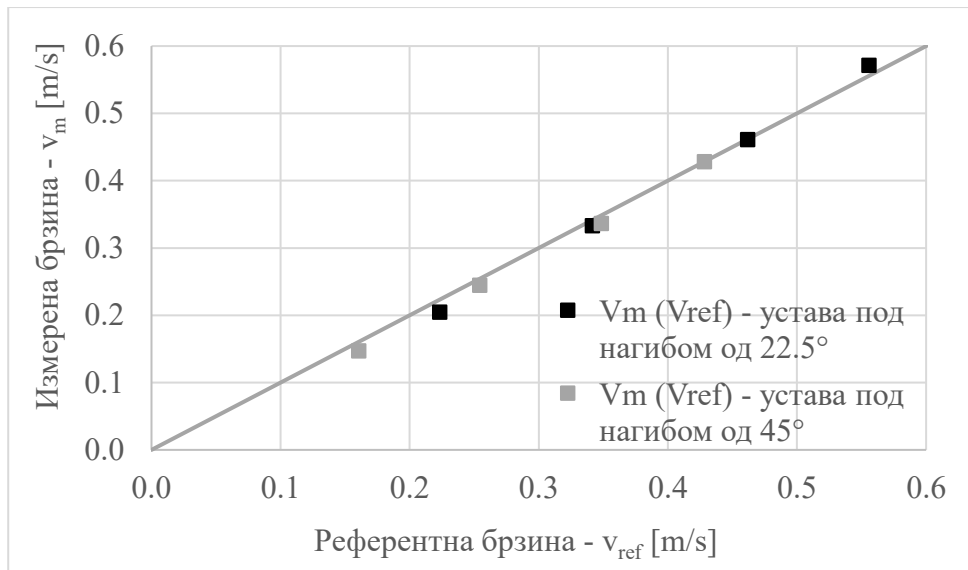


Слика 4.1.14 Дијаграм зависности измерене ( $v_m$ ) од референтне ( $v_{ref}$ ) брзине – сонда FLAT COMPACT 1104

Сонда FLAT COMPACT 1105 показује одлично полапање са референтним вредностима, уз минималне осцилације измерених вредности, као што се види на сликама 4.1.15. и 4.1.16.

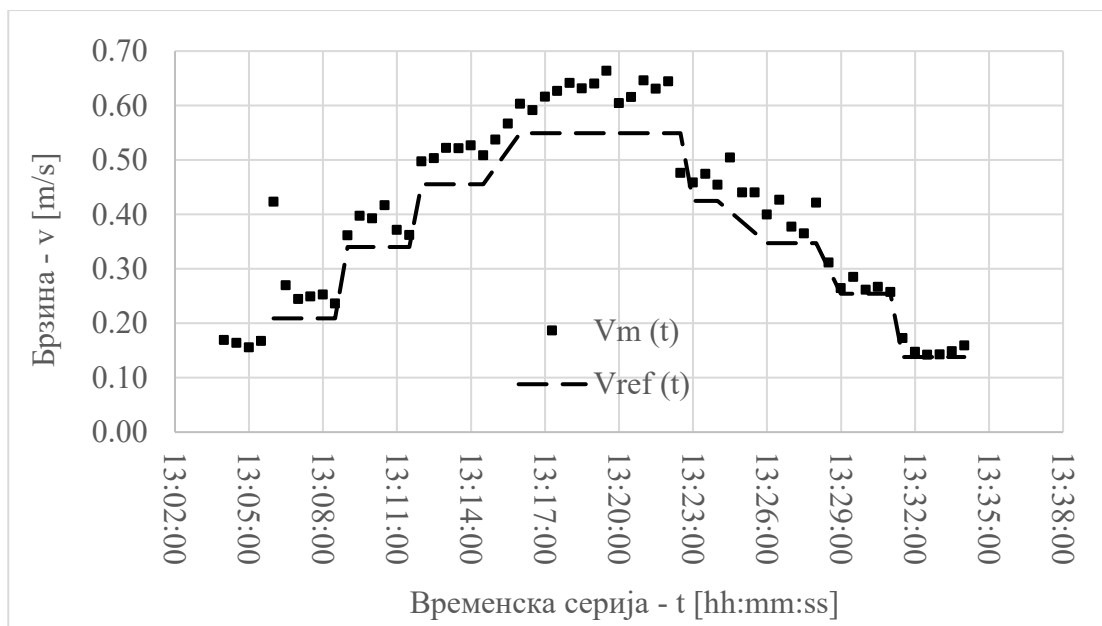


Слика 4.1.15 Временска серија брзине измерене помоћу сонде FLAT COMPACT 1105 ( $v_m$ ) и референтне брзине ( $v_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Khrone"

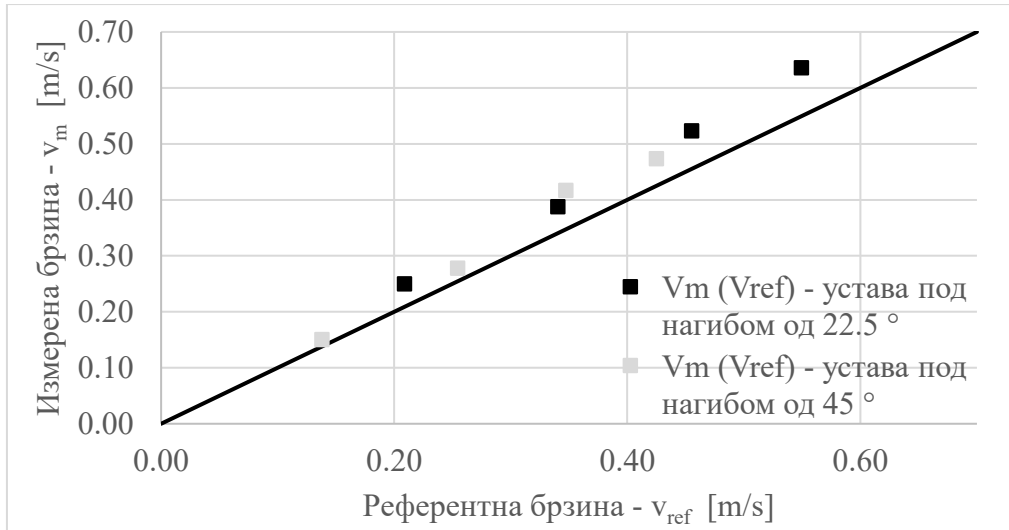


Слика 4.1.16 Дијаграм зависности измерене ( $v_m$ ) од референтне ( $v_{ref}$ ) брзине – сонда FLAT COMPACT 1105

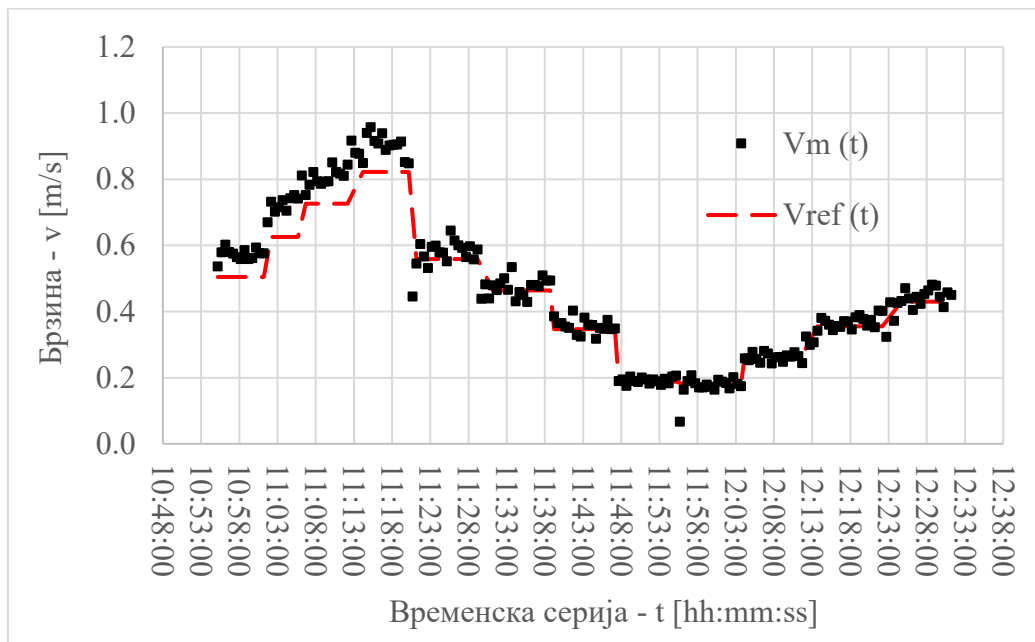
На сликама 4.1.17. 4.1.18. може се уочити одступање измерених брзина од референтних вредности, које је веће при мањим дубинама у каналу, када су брзине веће. Мерна несигурност сонде Flat 400 се повећава са повећањем протока, при чем су грешке систематске.



Слика 4.1.17 Временска серија брзине измерене помоћу сонде Flat 400 ( $v_m$ ) и референтне брзине ( $v_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Krone"



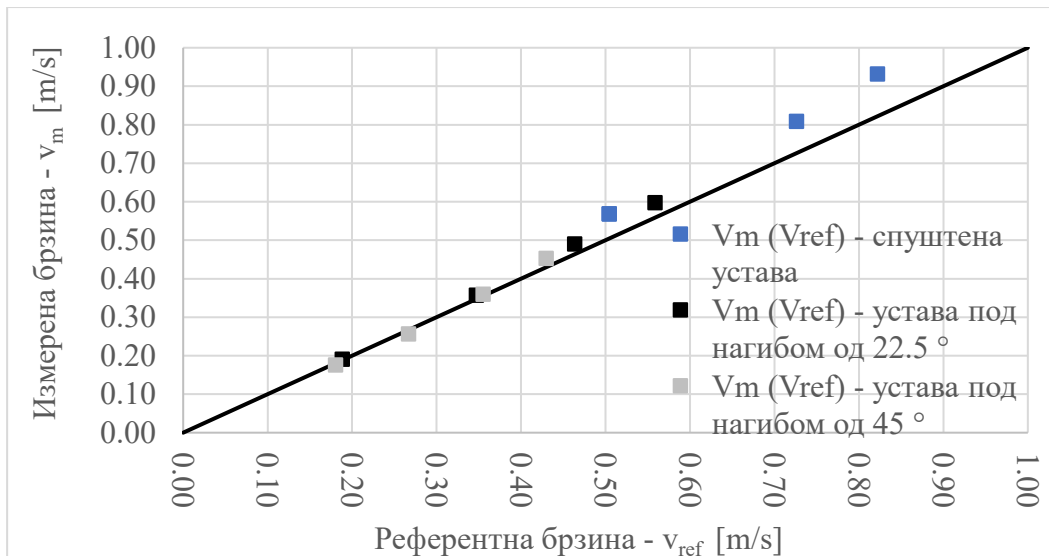
Слика 4.1.18 Дијаграм зависности измерене ( $v_m$ ) од референтне ( $v_{ref}$ ) брзине – сонда Flat 400



Слика 4.1.19 Временска серија брзине измерене помоћу сонде Flat 100 ( $v_m$ ) и референтне брзине ( $v_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Krone"

Анализом временске серије брзине измерене помоћу сонде Flat 100 примећује се да вредности показују највеће одступање од референтних када је устава спуштена, при малим дубинама (лево на дијаграму). При већим дубинама и мањим брзинама мање су последице опструјавања око сензора.





Слика 4.1.20 Дијаграм зависности измерене ( $v_m$ ) од референтне ( $v_{ref}$ ) брзине – сонда Flat 100

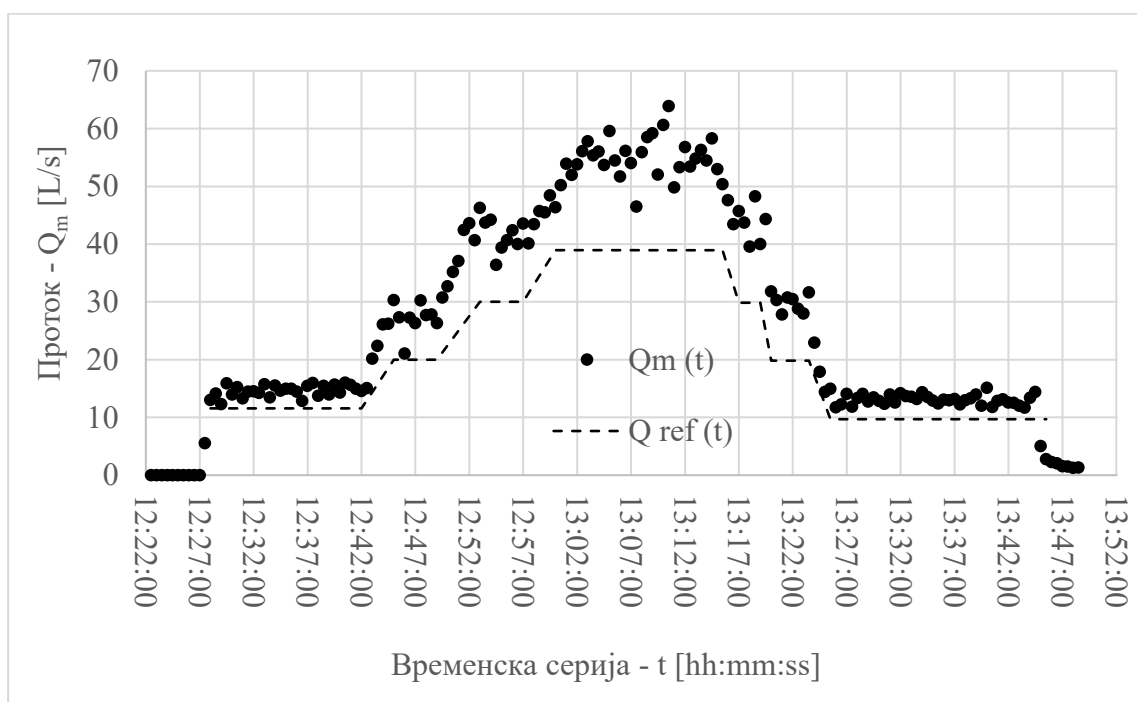
Дијаграм на слици 4.1.20. додатно показује да се измерене вредности најбоље поклапају са референтним када је устава под највећим нагибом, док је у случају спуштене уставе одступање највеће.

Табела 4.1.2 Статистичка и систематска мерна несигурност сензора брзине ЕМ сонди пре и после корекције брзине

| Ознака сонде      |           | Статистичка м. Н. | Систематска м. Н. |
|-------------------|-----------|-------------------|-------------------|
| FLAT COMPACT 1207 | $v$       | 0,2               | 0,046             |
|                   | $v_{kor}$ | 0,2               | 0,036             |
| FLAT COMPACT 1104 | $v$       | 0,007             | 0,011             |
|                   | $v_{kor}$ | 0,007             | 0,004             |
| FLAT COMPACT 1105 | $v$       | 0,007             | 0,012             |
|                   | $v_{kor}$ | 0,007             | 0,004             |
| Flat 400          | $v$       | 0,018             | 0,055             |
|                   | $v_{kor}$ | 0,018             | 0,009             |
| Flat 100          | $v$       | 0,017             | 0,054             |
|                   | $v_{kor}$ | 0,017             | 0,012             |

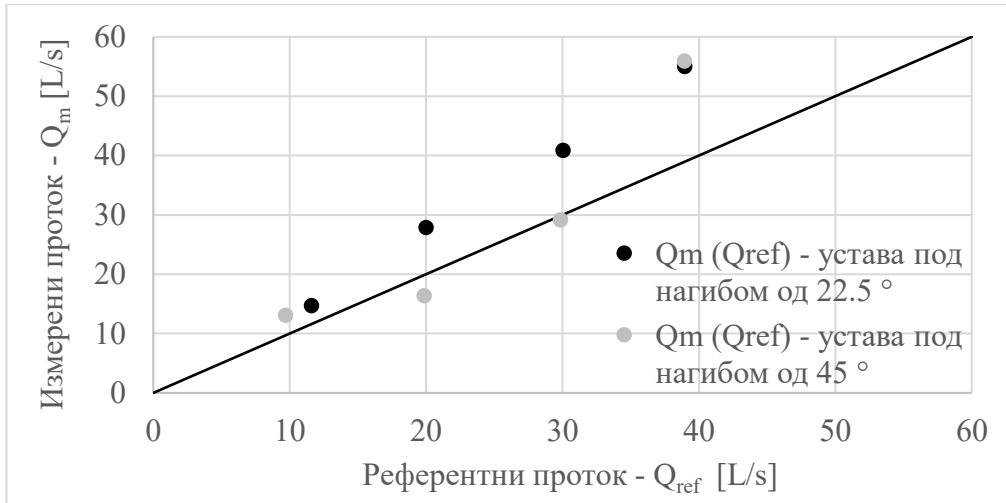
### 4.1.3. Анализа измереног протока

У оквиру овог поглавља приказане су временске серије и зависности измереног од референтног протока, чије вредности су добијене помоћу рачунске јединице DC234. Вредност измереног протока се рачуна према формулама приказаним у поглављу 3.2.1. Брзина је коригована помоћу унапред задатих вредности параметара  $P_7$  и  $P_8$ , које задаје произвођач. Из ових разлога, иако су измерене вредности дубина и брзина оригинално биле добре, протоци сада показују већа одступања. Након консултација у вези са одступањем измереног протока, са произвођачем сензора Милетом Цвитковцем, утврђено је да је корекциона функција предвиђена за мерења у кружним цевима.



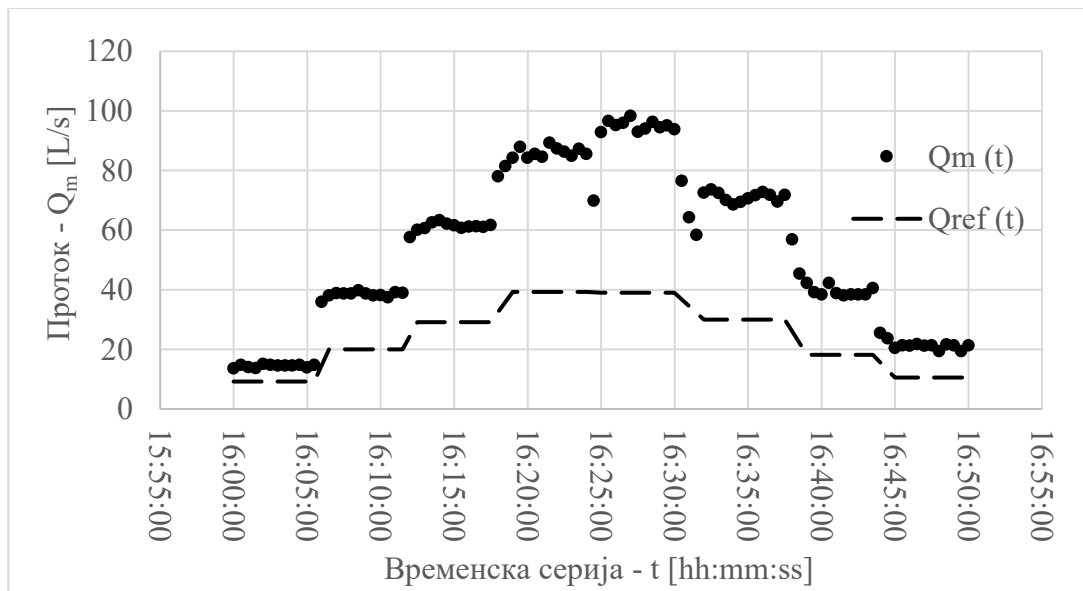
Слика 4.1.21 Временска серија протока измереног помоћу сонде FLAT COMPACT 1207 ( $Q_m$ ) и референтног протока ( $Q_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Khrone"

Сонда FLAT COMPACT 1207 приказује значајно одступање измерених протока у односу на референтну вредност, које се повећава са повећањем протока, што се може видети на дијаграмима на сликама 4.1.22 и 4.1.23.

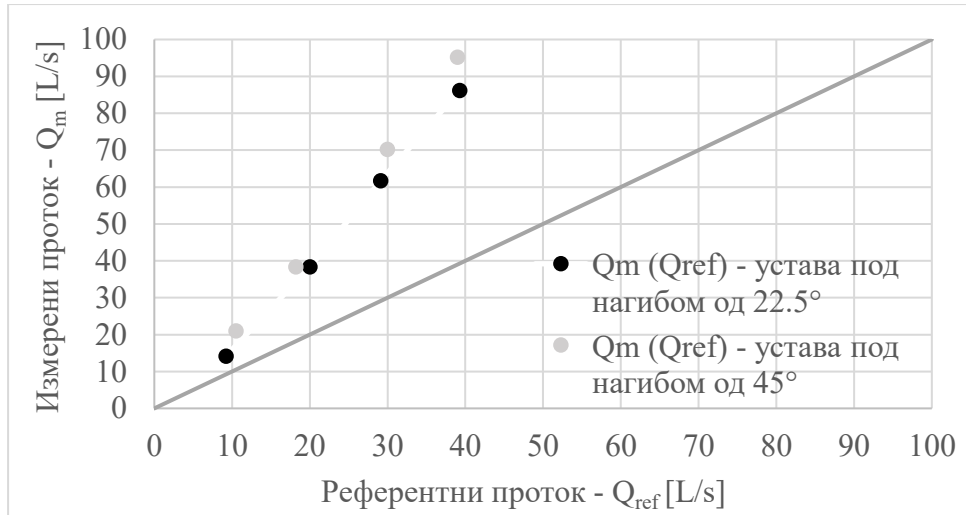


Слика 4.1.22 Дијаграм зависности измереног протока ( $Q_m$ ) од референтног протока ( $Q_{ref}$ ) – сонда FLAT COMPACT 1207

Временска серија протока измереног помоћу сонде FLAT COMPACT 1104 показује значајно одступање од референтне вредности. Одступање се равномерно повећава са порастом протока у каналу. Осцилације измерених вредности при протоцима у каналу од 20 L/s и мањим нису значајне, али расту са повећањем протока.

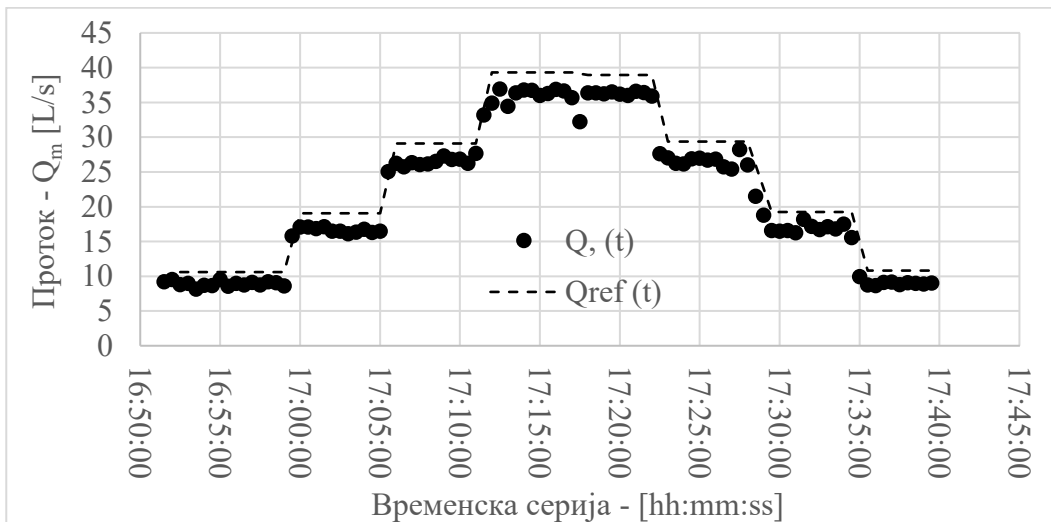


Слика 4.1.23 Временска серија протока измереног помоћу сонде FLAT COMPACT 1104 ( $Q_m$ ) и референтног протока ( $Q_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Khrone"



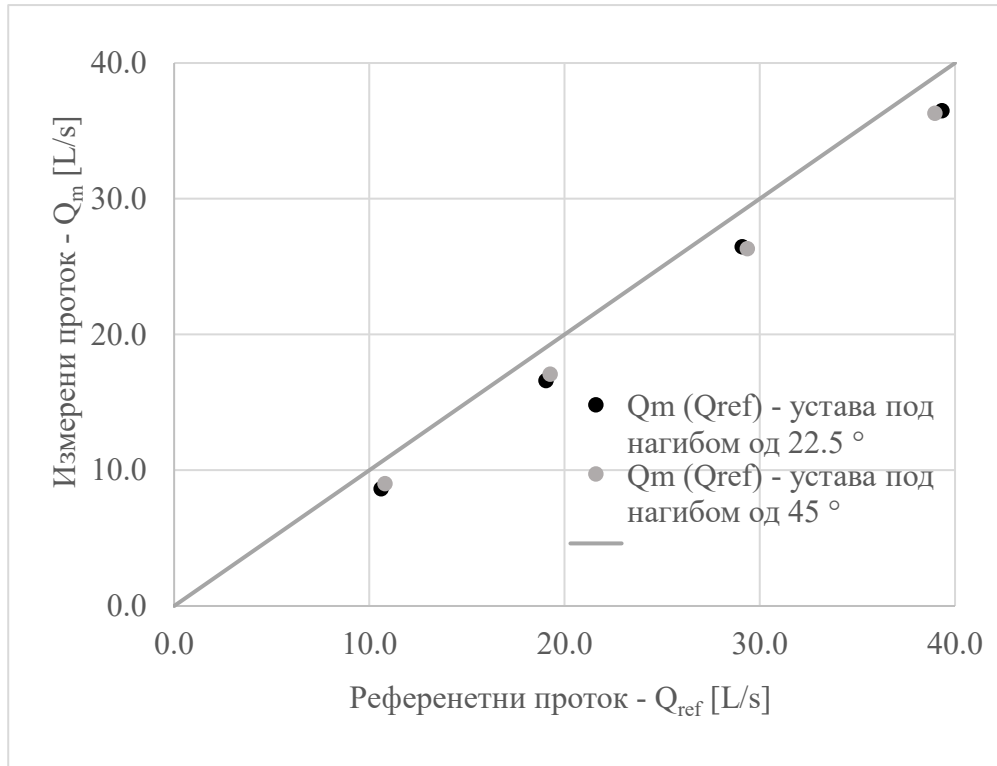
Слика 4.1.24 Дијаграм зависности измереног протока ( $Q_m$ ) од референтног протока ( $Q_{ref}$ ) – сонда FLAT COMPACT 1104

Дијаграм на слици 4.1.25. показује одступање измерене од референтне вредности, које постепено расте са повећањем протока у каналу у случају првог положаја уставе. Након промене нагиба уставе, одступање измерене од референтне вредности протока је нешто веће, али равномерно се смањује са смањењем протока у каналу, готово истом динамиком као што је растао у првој половини експеримента.



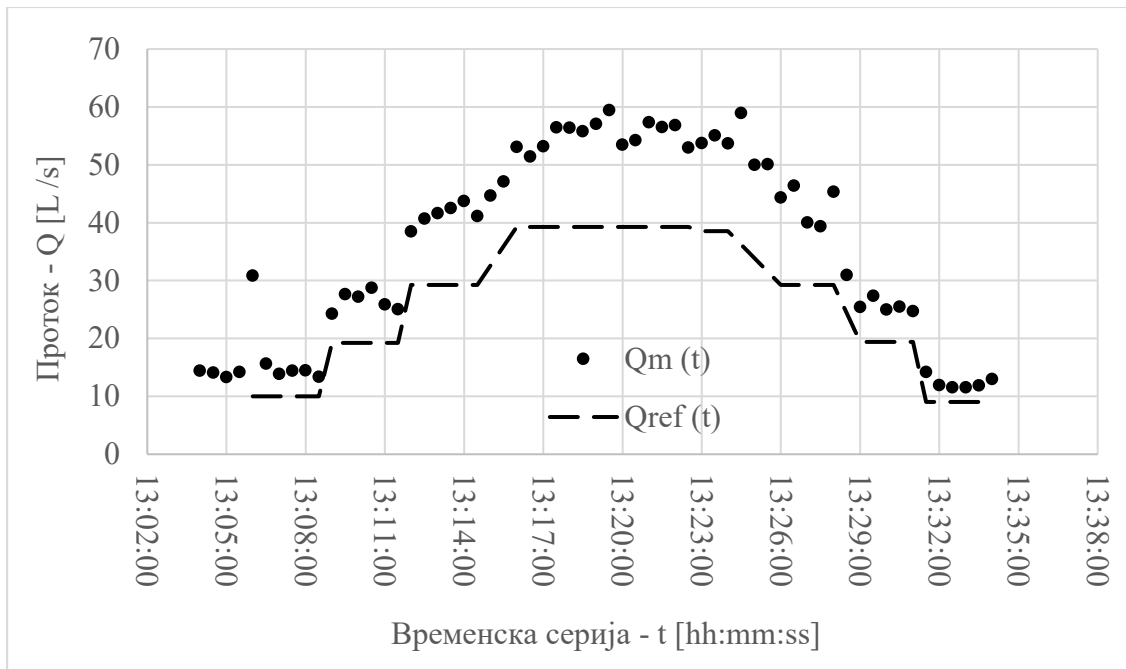
Слика 4.1.25 Временска серија протока измереног помоћу сонде FLAT COMPACT 1105 ( $Q_m$ ) и референтног протока ( $Q_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Khrone"

Вредности протока измерене помоћу сонде FLAT COMPACT 1105 значајно мање одступају од референтне вредности, као што се види на слици 4.1.27. Поред тога, уочава се да су измерене вредности мање од референтних, за разлику од вредности измерених помоћу претходне две сонде истог типа. На основу временске серије јасно се уочавају промене протока у каналу, уз мале осцилације измерених вредности.



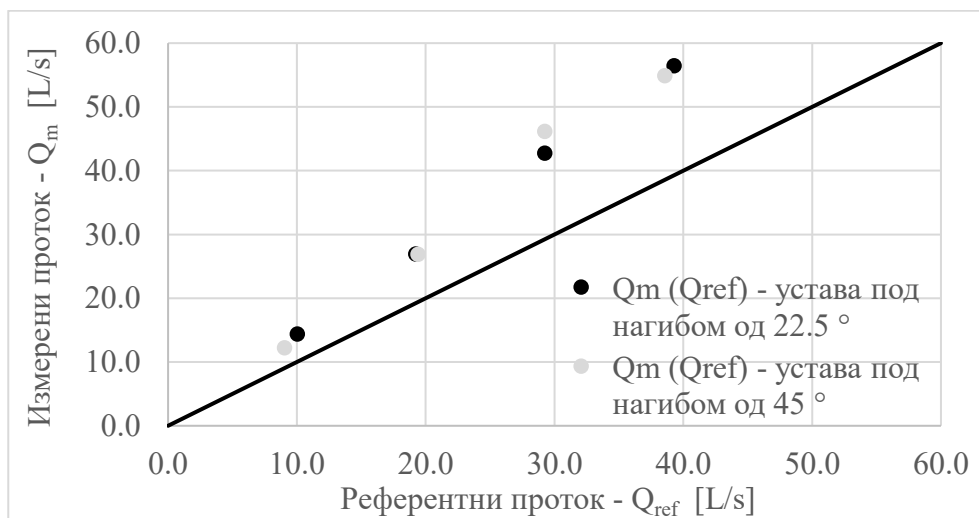
Слика 4.1.26 Дијаграм зависности измереног протока ( $Q_m$ ) од референтног протока ( $Q_{ref}$ ) – сонда FLAT COMPACT 1105

Додатним поређењем осредњених измерених вредности са референтним вредностима протока, приказаним на дијаграму на слици 4.1.27. потврђује се благо одступање измереног протока од референтног. Сонда правилно прати промене протока у каналу и да су резултати меродавни и поновљиви, односно јавља се систематска грешка која је детерминистичког карактера и може се једноставно уклонити.

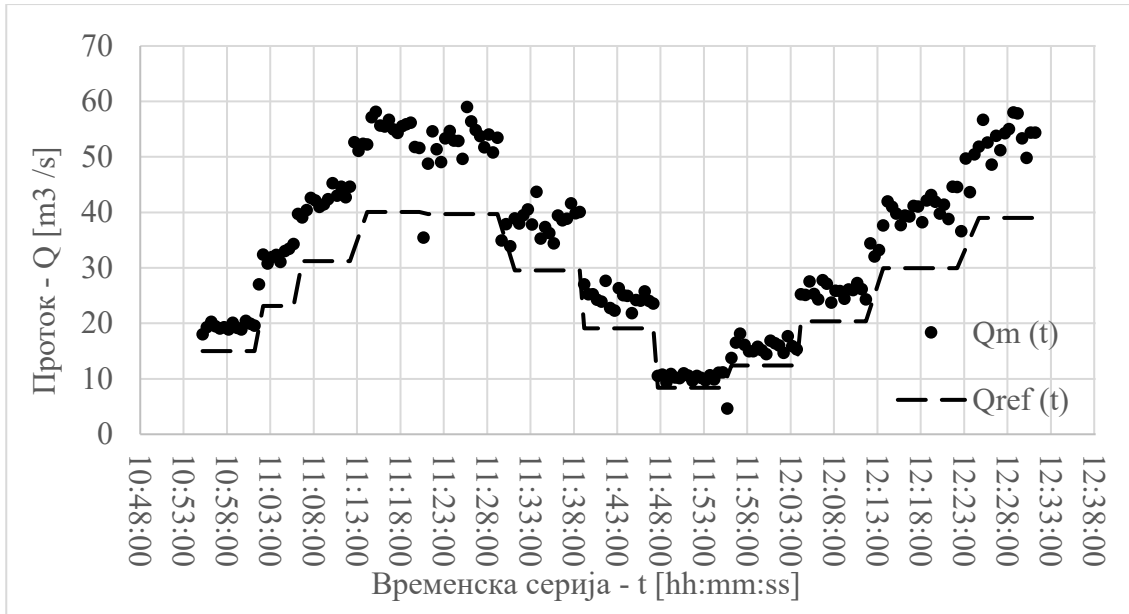


Слика 4.1.27 Временска серија протока измереног помоћу сонде Flat 400 ( $Q_m$ ) и референтног протока ( $Q_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Khrone"

Посматрањем временске серије протока измерене помоћу сонде Flat 400 примећује се да сонда даје боље резултате при малим дубинама. Одступање измерених од референтних вредности је слично при оба положаја устава.

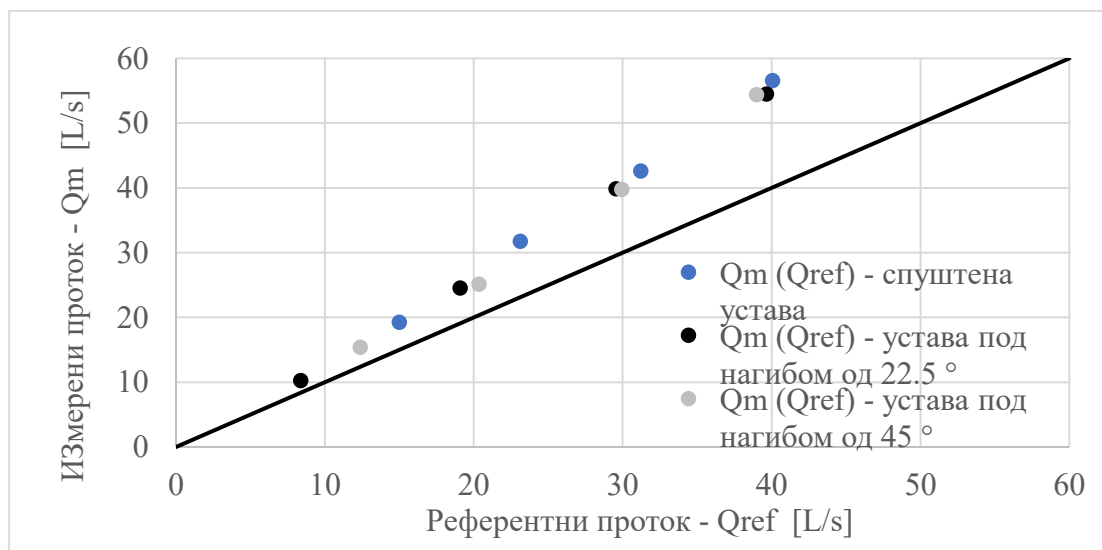


Слика 4.1.28 Дијаграм зависности измереног протока ( $Q_m$ ) од референтног протока ( $Q_{ref}$ ) – сонда Flat 400



Слика 4.1.29 Временска серија протока измереног помоћу сонде Flat 100 ( $Q_m$ ) и референтног протока ( $Q_{ref}$ ) очитане помоћу еталонског протокомера марке "Khrone"

На слици 4.1.30. примећује се да су при малим протоцима у каналу измерене вредности ближе референтним и да резултати мало осцилују. Највеће расипање измерених вредности, као и њихово највеће одступање од референтне вредности се јавља при максималном протоку, у сва три положаја устава.

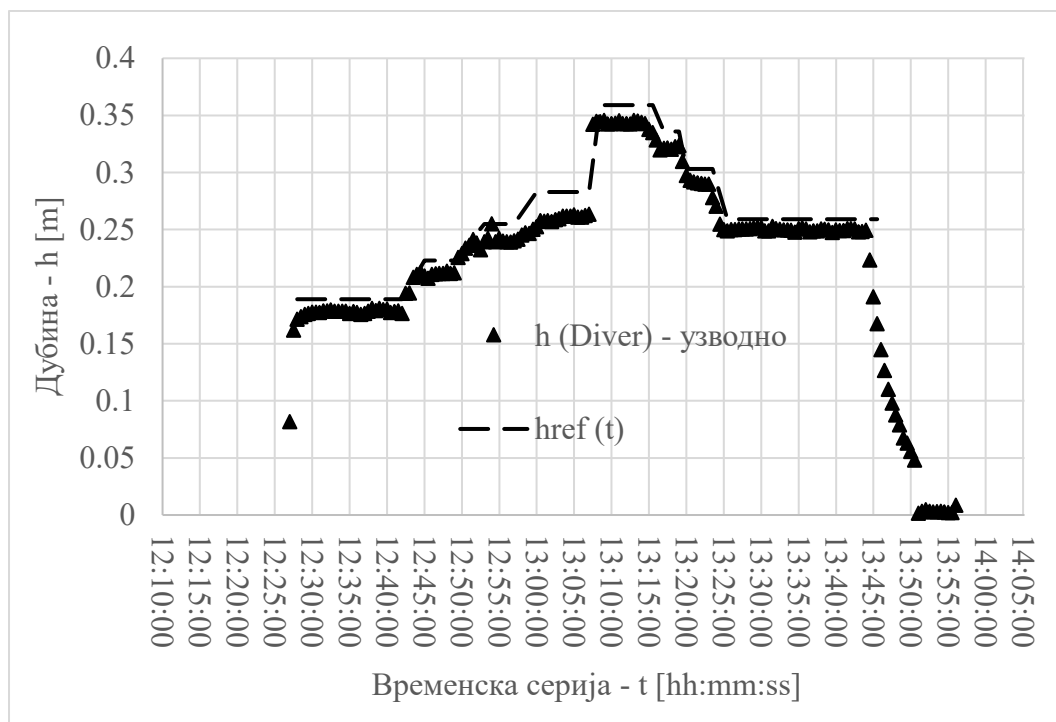


Слика 4.1.30 Дијаграм зависности измереног протока ( $Q_m$ ) од референтног протока ( $Q_{ref}$ ) – сонда Flat 100

Према распореду резултата на дијаграму на слици 4.1.30. закључује се да сонда показује блиске измерене вредности у сва три положаја уставе, када су протоци у каналу 30 L/s или већи од тога. Највећа разлика у измереним вредностима при различитим положајима уставе се јавља при најмањем протоку. Када је устава спуштена јављају се највећа одступања измерене од референтне вредности и она уједначено расту са повећањем протока у каналу.

#### 4.1.4. Испитивање нивомера

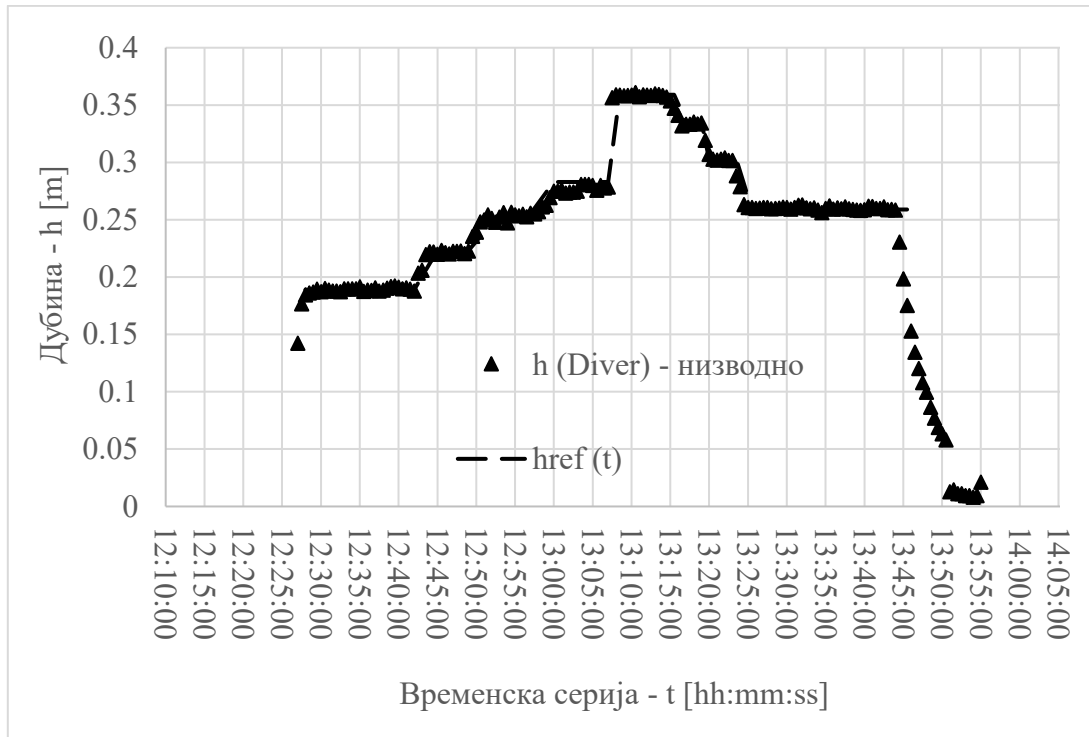
Испитивањем сонди MicroDiver у три различита положаја сензора у односу на ток воде у лабораторијском каналу, добијене су временске серије дубина. Податак о дубини бележен је на сваких 30 s, а у наставку дато је поређење измерених вредности са референтном вредношћу дубине очитане на зиду лабораторијског канала.



Слика 4.1.31 Временска серија дубина  $h_m$  измерених помоћу сонде MicroDiver са узводно усмереним сензором и референтне дубине  $h_{ref}$  очитане на зиду лабораторијског канала у нивоу сонде

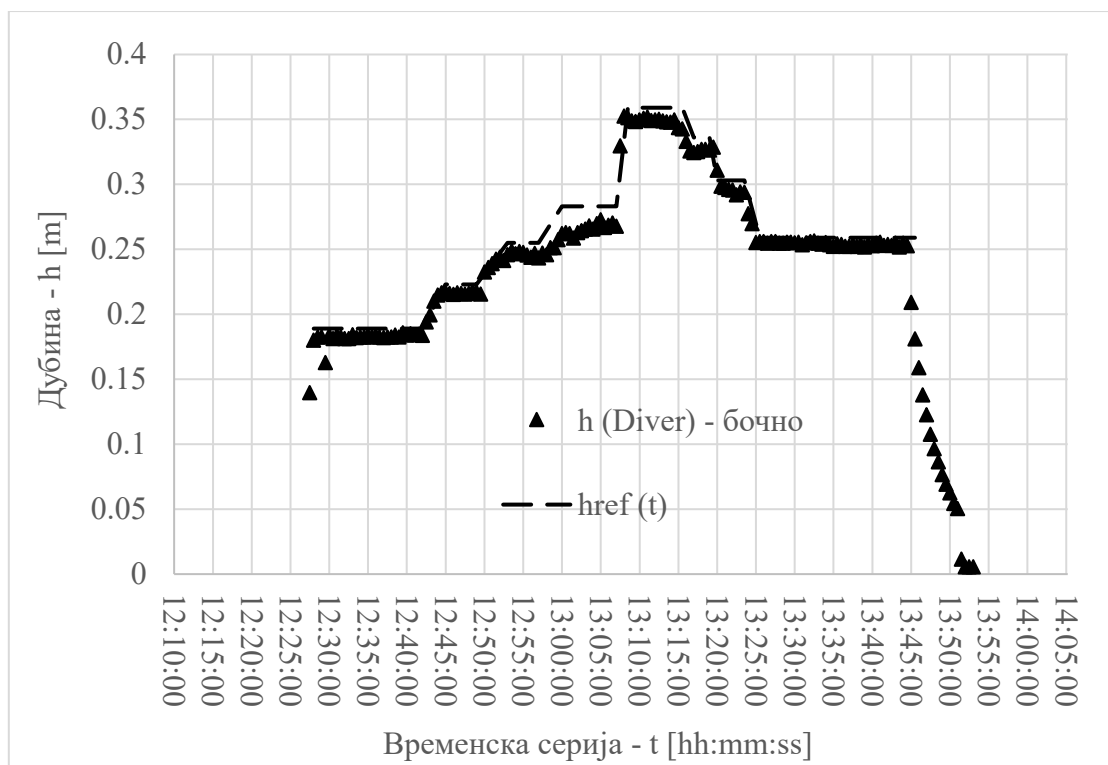


Када је сензор сонде усмерен ка узводном крају тока, измерени подаци показују одступање од референтних вредности при свим протоцима у каналу. Са слике 4.1.32. може се видети да је одступање највеће при максималном протоку у каналу и да су осцилације измерених вредности врло мале.



Слика 4.1.32 Временска серија дубина  $h_m$  измерених помоћу сонде MicroDiver са низводно усмереним сензором и референтне дубине  $h_{ref}$  очитане на зиду лабораторијског канала у нивоу сонде

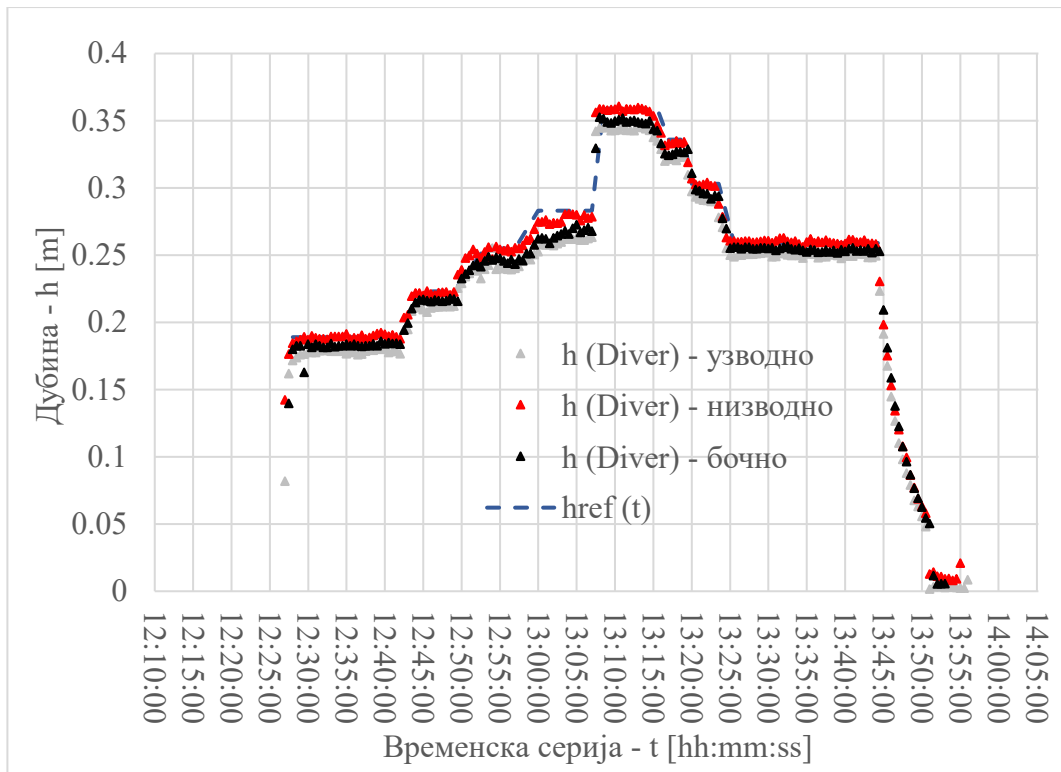
Временска серија дубина измерених сондом чији је сензор усмерен ка низводном крају канала, показује одлично поклапање измерених и референтних вредности при свим вредностима протока. Сонда прецизно прати све промене нивоа које су последица промене протока, као и промену нивоа након промене положаја уставе, када се остварују максималне дубине. Осцилације измерених података су занемарљиве током комплетног трајања испитивања.



Слика 4.1.33 Временска серија дубина  $h_m$  измерених помоћу сонде MicroDiver са сензором усмереном управно на ток и референтне дубине  $h_{ref}$  прочитане на зиду лабораторијског канала у нивоу сонде

Сонда постављена управно у односу на ток показује добро поклапање са референтним вредностима дубине при малим протоцима у каналу, док се при достизању максимално протока јавља видно одступање од референтне вредности. Због цилиндричног облика сонда при протоцима од 20 L/s и већим, услед велике брзине тока тешко задржава правилан положај у односу на ток и поред тога што је иза ње постављена препрека у виду металног тега. Поред свега наведеног, сонда успева да забележи промене нивоа при повећању и смањењу протока, као и наглу промену дубине настале променом положаја уставе.

На слици 4.1.35. дат је графички приказ поређења временских серија дубина при сва три поменута положаја сензора, као и референтна дубина. Може се приметити да се најбоље поклапање измерених и референтних вредности добија када је сензор сонде усмерен ка низводном крају тока. Највеће одступање од референтне вредности показује сонда чији сензор усмерен ка узводном крају канала, што се може сматрати најнеповољнијом позицијом приликом мерења у каналима правоугаоног облика.



Слика 4.1.34 Дијаграм поређења временских серија дубина  $h_m$  измерених помоћу MicroDiver сонди у три различита положаја и референтне дубине  $h_{ref}$  очитане на зиду лабораторијског канала

У наредној табели дате су вредности статистичке и систематске мерне несигурности MicroDiver сонде у сва три положаја.

Табела 4.1.3 Статистичка и мерна несигурност нивомера у 3 различита положаја

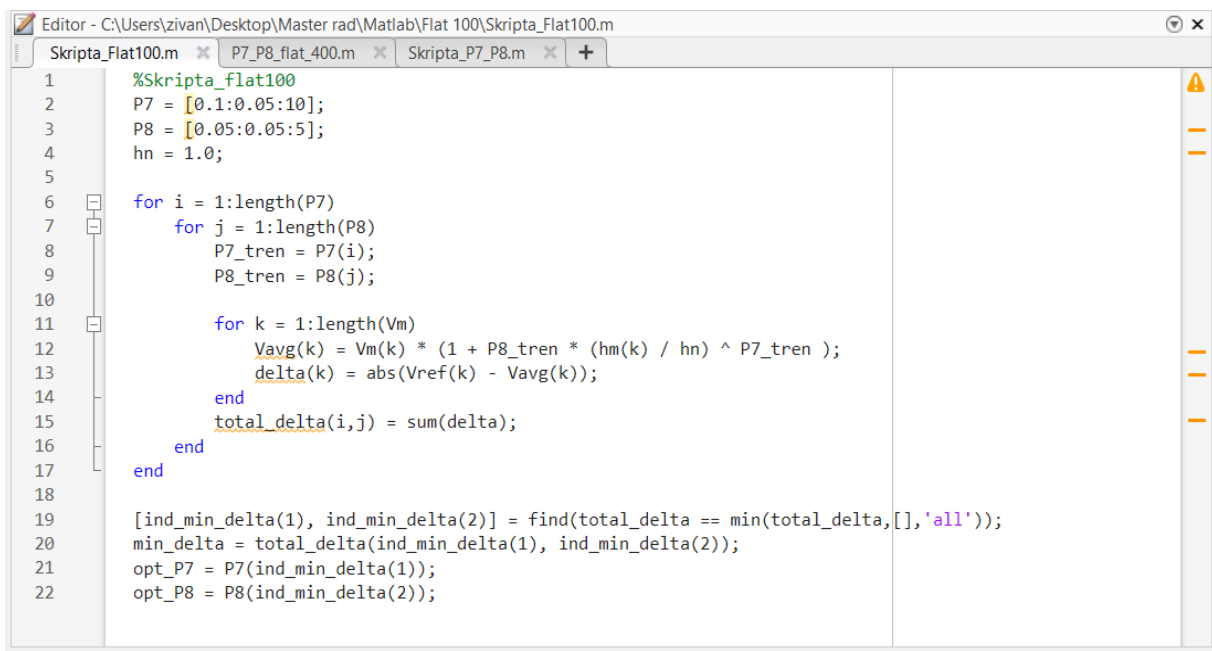
| Положај сонде     | Узводно | Низводно | Бочно |
|-------------------|---------|----------|-------|
| Статистичка м. Н. | 0,002   | 0,003    | 0,001 |
| Систематска м. Н. | 0,046   | 0,028    | 0,009 |

Највећу тачност показао је дајвер усмерен бочно у односу на ток, док је и низводно усмерен дајвер у оквиру тачности од 3% колико тврди произвођач, док је најнеповољнији случај када је дајвер усмерен узводно у односу на ток.

## 4.2. Унапређење корекционих функција за ЕМ сензоре

Након анализе измерених протока, утврђена су значајна одступања од референтних вредности, стога је анализирана могућност за унапређење корекционе функције, варирањем параметара  $P_7$  и  $P_8$  помоћу којих се остварује веза између измерене и средње профилске брзине. Помоћу две "for" петље варирају се параметри  $P_7$  и  $P_8$  у оквиру задатог опсега, са унапред задатим кораком. Трећа "for" петља служи да за сваку унету вредност измерене брзине  $v_m$  одреди вредност  $v_{avg}$  према формули (8.), као и апсолутну разлику средње и референтне брзине  $\Delta = |v_{avg} - v_{ref}|$ . Као резултат добија се низ вредности  $\Delta$  за сваку вредност измерене брзине  $v_m$  и одговарајући пар вредности  $P_7$  и  $P_8$ . Као оптималне вредности параметара  $P_7$  и  $P_8$  усвајају се оне вредности којима одговара минимално одступање  $\Delta_{min}$ .

На слици 4.2.1. приказан је алгоритам написан у програму "Matlab".



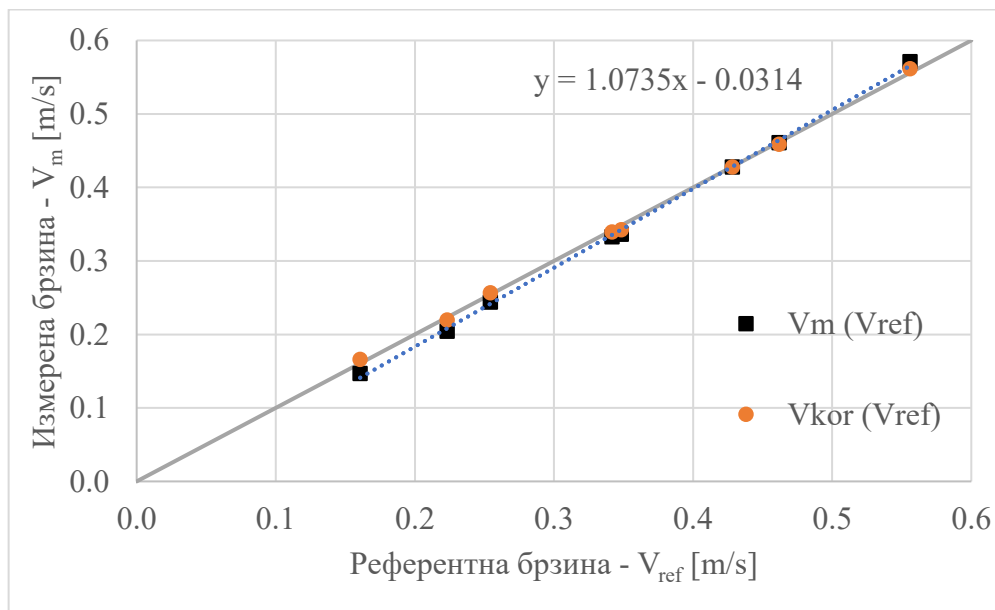
```
Editor - C:\Users\zivan\Desktop\Master rad\Matlab\Flat 100\Skrпта_Flat100.m
Skrпта_Flat100.m x P7_P8_flat_400.m x Skрпта_P7_P8.m x +
1 %Skrпта_flat100
2 P7 = [0.1:0.05:10];
3 P8 = [0.05:0.05:5];
4 hn = 1.0;
5
6 for i = 1:length(P7)
7     for j = 1:length(P8)
8         P7_tren = P7(i);
9         P8_tren = P8(j);
10
11         for k = 1:length(Vm)
12             Vavg(k) = Vm(k) * (1 + P8_tren * (hm(k) / hn) ^ P7_tren);
13             delta(k) = abs(Vref(k) - Vavg(k));
14         end
15         total_delta(i,j) = sum(delta);
16     end
17 end
18
19 [ind_min_delta(1), ind_min_delta(2)] = find(total_delta == min(total_delta,[],'all'));
20 min_delta = total_delta(ind_min_delta(1), ind_min_delta(2));
21 opt_P7 = P7(ind_min_delta(1));
22 opt_P8 = P8(ind_min_delta(2));
```

Слика 4.2.1 Алгоритам за налажење оптималних вредности параметара  $P_7$  и  $P_8$  у програму "Matlab"

Уношењем срачунатих оптималних вредности параметара  $P_7$  и  $P_8$  у рачунску јединицу протокомера, требало би да се побољша веза између  $v_m$  и  $v_{avg}$ , а самим тим и тачност срачунатог протока правоугаоном каналу.

Насупрот полазној претпоставци, уочено је да овај вид корекције не даје задовољавајуће резултате за испитане ЕМ сензоре у претходно описаним лабораторијским експериментима. Имајући наведено у виду, одлучено је да се корекција измерених брзина врши на други начин.

Приликом анализе сензора брзине извршена је корекција измерене брзине  $v_m$ , након чега је добијена коригована брзина  $v_{kor}$ . Формирањем дијаграма зависности средње вредности измерених брзина (средња вредност 5 узастопних брзина при сваком протоку) од референтне вредности брзине, помоћу програма Excel добија се линеаран низ тачака кроз које се може провући права (Trendline), која је описана линеарном функцијом, као што је приказано на наредном дијаграму.

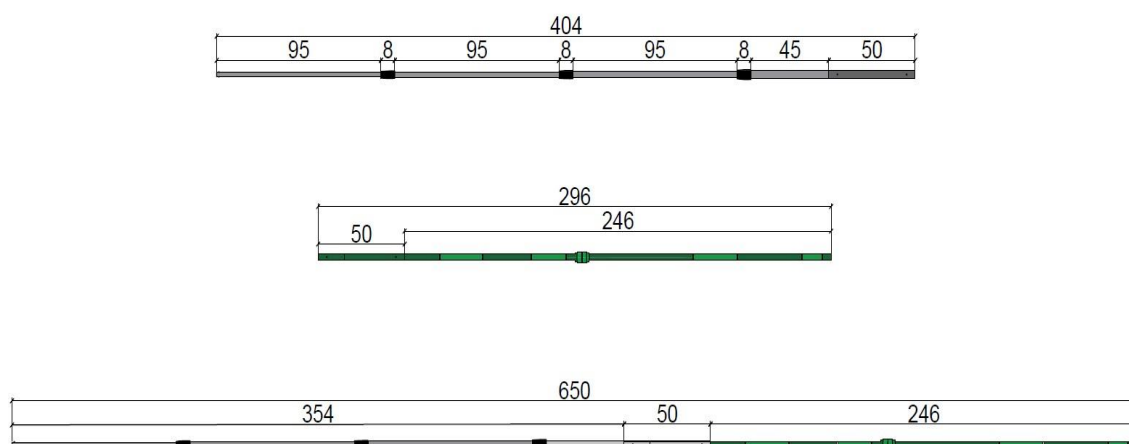


Слика 4.2.2 Дијаграм зависности измерене од референтне вредности брзине са Trendline функцијом

Вредности "y" у Trendline функцији одговара средња вредност измерене брзине  $v_m$ , док вредности "x" одговара коригована вредност брзине  $v_{kor}$ . Систематске мерне несигурности након корекција измерених брзина приказане су у табели 4.1.2.

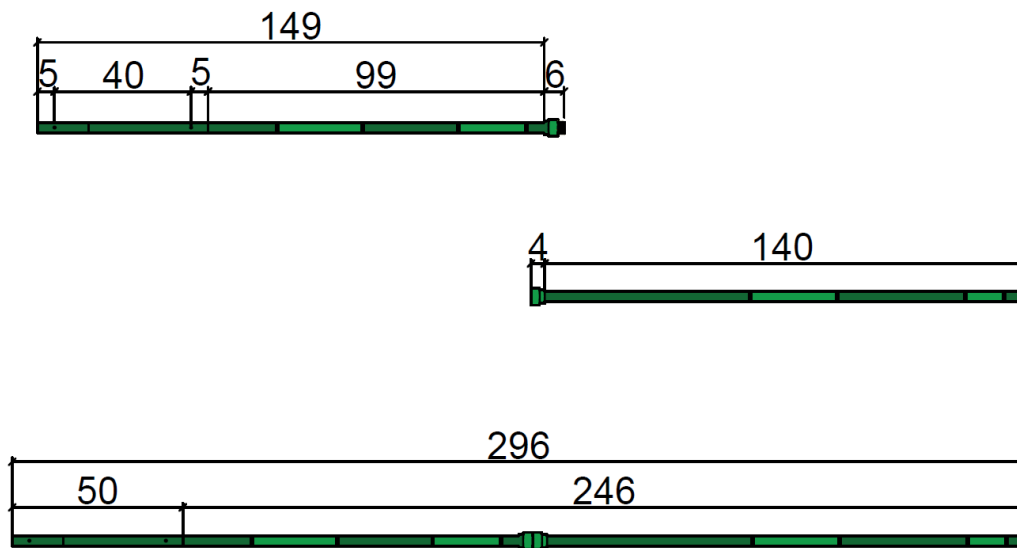
### 4.3. Унапређење помоћне опреме за монтажу и комуникацију

Телескопска шипка компаније "Nivus", помоћу које се сонда за мерење протока спушта у ток, представља користан комад помоћне опреме, јер омогућава да се тренутно мерење протока обави са површине терена. Фабрички модел је укупне дужине  $400 \pm 5$  cm, што углавном задовољава потребе корисника. Међутим на терену се могу наћи шахтни отвори дубине значајно веће од 4 m (некад чак и до 15 m), стога је у наставку поглавља дат пример модификације ове шипке, додавањем 2 сегмента, помоћу је којих је њен домен повећан за  $250 \pm 5$  cm.



Слика 4.3.1 Димензије телескопске шипке компаније "Nivus" (доле) и два сегмента помоћу којих је телескоп продужен (горе)

Сегменти приказани на слици су направљени од пластичних (полипропиленских) водоводних цеви, спољњег пречника од 3 cm. На десном крају горњег сегмента налази се спојница са спољашњим навојем, док се на левом крају сегмента у средини налази спојница са унутрашњим навојем. Леви крај горњег сегмента се у дужини од 50 cm увлачи у телескопску шипку компаније "Nivus" и на њему су избушене две рупе, на растојању од 40 cm. На истом растојању на телескопској шипци су такође избушене две рупе, које служе да се сегмент причврсти за сонду помоћу шрафова и матица.



Слика 4.3.2 Димензије развученог телескопа (горе), спојених продужетака (средина) и продужетака монтираних на телескоп (доле)

На слици 4.3.2. приказане су димензије телескопске шипке, сегмената, као и споја шипке и сегмената. Укупна дужина која износи око 650 cm се у пракси не може остварити, пошто је приликом развлачења основне телескопске шипке, неопходно оставити 10 – 20 cm сваког сегмента увучено у сегмент већег пречника, стога је ефективна дужина са наставцима  $600 \pm 10$  cm. На наредне две слике приказани су спојени сегменти, као и комплетна телескопска шипка са продужењем.



Слика 4.3.3 Спојени сегменти за продужетак телескопа



Слика 4.3.4 Развучена телескопска шипка са монтираним продужецима

Контролер DC234 је опремљен кратком антеном за GSM комуникацију јачине 1dB и одговарајућим портom на који се антена монтира, као што је приказано на слици 4.3.5. Међутим услед појаве значајне количине наслага и влажности, као и слабе мобилне телефоније на једном од мерних места у оквиру поменутог испитивања протока отпадних вода, ова антена није успела да омогући стабилну комуникацију са сервером.

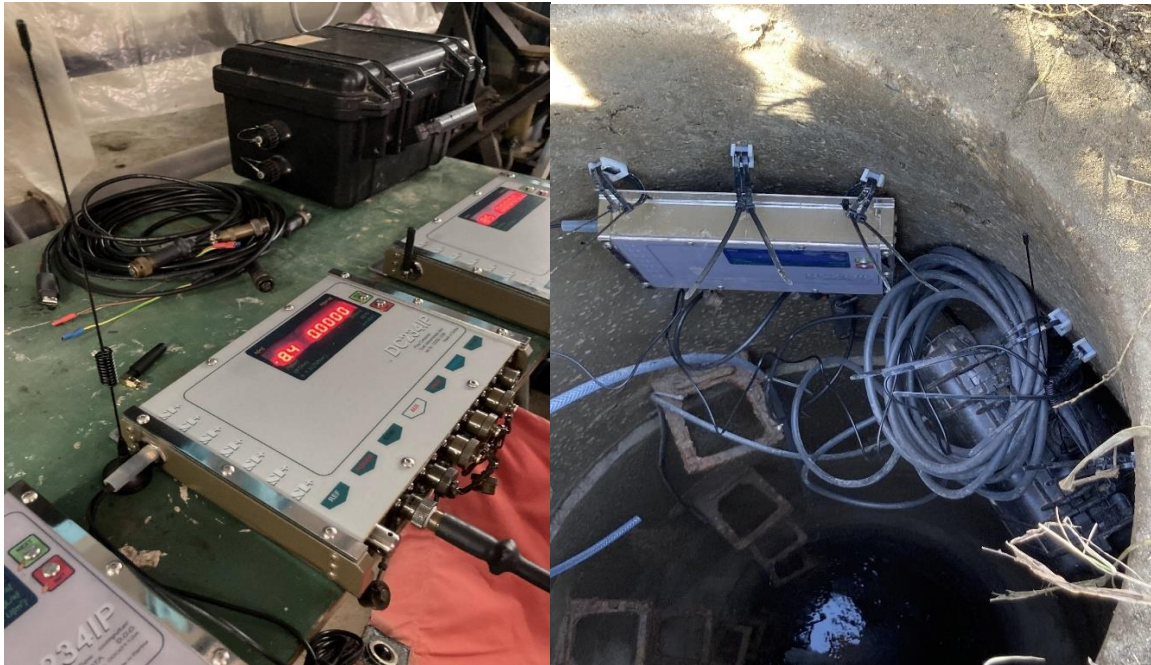


Слика 4.3.5 Контролер DC234 са стандардном антеном за даљинску комуникацију

Заменом поменуте антене, антеном јачег домета (5dB) значајно је појачан сигнал који се шаље са уређаја. Међутим, ни у таквој диспозицији проток података није био адекватан, стога су антене извучене на површину терена где је то било могуће, као што је приказано на слици 4.3.7. Превазиђен је проблем лоше технолошке развијености општине у којој



је вршено мерење, као и појаве прашинастих наслага и влажности које су ометале сигнал стандардне антене. На наредним сликама приказана је антена јачег домета, као и један пример теренске монтаже логера података и услова у којима он може да се нађе.



Слика 4.3.6 Контролер DC234 са антеном јачег домета (лево) и монтажа уређаја у теренским условима са пратећом опремом (десно)



Слика 4.3.7 Антена извучена на површину терена и заштићена помоћу беле пластичне цеви

## 5. Закључак

У овом раду анализирани су могућности за унапређење методологије мерења протока у канализационим системима применом преносивих протокомера који раде на принципу Брзина – Протицајни пресек.

Испитивањем сензора дубине равних ЕМ сонди у лабораторијским условима може се закључити да све сонде успешно прате промене нивоа настале услед промене протока и положаја устава. Одступање од еталонских вредности је нешто веће код сонди модела S, али вредности систематске мерне несигурности од 1–2 % су задовољавајуће. Свакако позитивно је то што су одступања детерминистичког карактера и лако се могу отклонити. Међутим, претходно их је потребно идентификовати што је једино могуће испитивањем уређаја у контролисаним условима. Оваква пракса је препоручљива пре сваке мерне кампање.

Сензори брзине на свим сондама детектују промене протока у каналу, уз нешто веће расипање резултата при већим протоцима. Систематска мерна несигурност измерених резултата варира између 1% колико гарантује произвођач и 5%, а након корекције резултата употребом програма Excel, систематска мерна несигурност свих сонди, осим сонде FLAT COMPACT 1207 је сведена на 1 % или мање. Претпоставка је да се разлике у мерној несигурности између сонди истог модела јављају услед неуједначеног квалитета опреме, који је последица чињенице да је сваки модел прављен ручно.

Почетна претпоставка да се побољшање тачности измерених резултата може постићи варирањем параметара корекционе функције ( $P_7$  и  $P_8$ ), показала се неуспешном. Услед детерминистичког карактера грешака које су се јавиле, коришћен је једноставнији приступ корекције брзине, применом програмског пакета "Excel" и линеарне функције "Trendline". Поред неуједначеног квалитета опреме, претпоставља се да је главни разлог одступања измерене од референтне брзине чињеница да је корекциона формула коју користи рачунска јединица "DC234" написана за цеви кружног облика, док је мерење вршено у правоугаоном каналу.

Примена дајвера омогућава врло поуздано мерење, а њихова величина их чини јако zgodним за монтажу. Испитивањем ових уређаја у лабораторијским условима у три различита положаја, може се закључити да се најбољи резултати добијају када је сонда

усмерена бочно у односу на ток (уколико није могуће поставити сонду вертикално како и произвођач препоручује).

Модификација телескопске шипке компаније Nivus се показала јако корисном, с обзиром да је повећање дужине шипке у потпуности задовољило потребе мерења протока на великим дубинама. Током мерења употребе телескопа са продужетком на терену, уочено је да се продужетак савија на споју два сегмента када се мерење врши са потпуно развученим телескопом и када је брзина тока велика. Стога се препоручује уметање круте везе у цев на споју сегмената или замена пластичног уметка крућим (нпр. алуминијумским), како би се олакшала манипулација сондом.

Контрола измерених података путем даљинског преноса се такође показала корисном, с обзиром да је већ на почетку мерења детектована сметња на једној од сонди. У случају лоше доступности мерног места и појаве већих количина наслага, комуникација се може врло једноставно и повољно побољшати употребом антене јачег домета. С обзиром да се овакве антене не могу увек монтирати директно на кућиште логера података, пожељно је размислити о њеној монтажи у условима велике влаге, прашине и скучености простора. Употребом антена у наведеним условима, као и у условима где је слаб домет мобилне телефоније, као најбоље решење показало се постављање антене појачаног домета на површину терена. На овај начин се остварује стабилна конекција и сигнал задовољавајуће јачине. Како би се антена заштитила од временских услова и животиња, препоручује се постављање заштите око антене, на пример у виду пластичне цеви, као што је приказано на слици 4.3.7.

## 6. Литература

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

Продановић, Д., Иветић, Д. 2019. Примени примене равних електромагнетних сонди за мерење протока у колекторима

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.

Љубисављевић, Д., Ђукић, А., Бабић, Б. Пречишћавање отпадних вода, 1995.

"Свет инструмената Д.О.О." 2020. Корисничка књига мерача протока с описом модела

Продановић, Д. Скрипта из предмета Мерења у хидротехници

City of Greeley Industrial Pretreatment Program, Wastewater Sampling Procedures - PDF

Правилник о начину и условима за мерење количине и испитивање квалитета отпадних вода и садржини извештаја о извршеним мерењима ("Службени гласник РС", бр. 33/2016)

U.S. Environmental Protection Agency, Science and Ecosystem Support Division 2013.

"Wastewater Sampling – Operating procedure"

Nivus – Instruction Manual for PCM Pro Measurement Device – PDF, 2011

[www.vanessen.com](http://www.vanessen.com), vanEssen Instruments – Product manual Diver – PDF

Schueller, M., Luzier, J. State Hygienic Laboratory at the University of Iowa - Basic sample collection and handling techniques, 2017