

Грађевински факултет Универзитета у Београду
Одсек за хидротехнику и водно – еколошко инжењерство



Мастер рад

Тема:

Систем за континуално мерење параметара квалитета воде са дела експерименталног слива на Грађевинском факултету у Београду

Ментор:
проф. др Душан Продановић

Студент:
Марко Милошевић 599/13

Београд, 2015.

САДРЖАЈ:

1	УВОД	3
2	ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ	4
2.1	Београдски експериментални слив	4
2.2	Израда мерне кутије за воду са крова Института	5
2.3	Преглед метода мерења протока	7
2.4	Сонде за мерење параметара квалитета воде	8
2.4.1	<i>Сонда за мерење рН вредности</i>	8
2.4.2	<i>Сонда за мерење проводљивости</i>	9
2.4.3	<i>Сонда за мерење мутноће</i>	11
3	ОПИС ДИСПОЗИЦИЈЕ СИСТЕМА	14
3.1	Прављење и одређивање димензија физичког модела (мерне кутије)	14
3.1.1	<i>Димензионисање и позиционирање кружног прелива</i>	17
4	РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА ВОДЕ	19
4.1	Експериментална мерења за случај испирања мерне кутије чистом водом	19
4.1.1	<i>Експериментална мерења рН вредности</i>	19
4.1.2	<i>Експериментална мерења специфичне проводљивости, κ_s</i>	22
4.1.3	<i>Експериментална мерења мутноће као параметра квалитета воде</i>	23
4.2	Експериментална мерења за случај импулсног оптерећења	27
4.2.1	<i>Експериментална мерења рН вредности при импулсном оптерећењу</i>	27
4.2.2	<i>Експериментална мерења специфичне проводљивости, κ_s, при импулсном оптерећењу</i>	28
4.2.3	<i>Експериментална мерења мутноће при импулсном оптерећењу</i>	29
4.3	Лабораторијски раствори коришћени у експериментима	30
4.3.1	<i>Лабораторијски раствор константне рН вредности</i>	30
4.3.2	<i>Лабораторијски раствор константне специфичне проводљивости, κ_s</i>	31
4.3.3	<i>Лабораторијски раствор са константном вредности параметра мутноће</i>	32
5	МОДЕЛИРАЊЕ РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНАТА	33
5.1	Предложени модел транспорта загађене воде кроз мерну кутију	33
5.2	Аналитичко решење	34

5.3	Резултати	37
5.3.1	<i>Резултати и дискусија моделирања параметра рН вредности.....</i>	38
5.3.2	<i>Резултати и дискусија моделирања параметра специфичне проводљивости.....</i>	38
5.3.3	<i>Резултати и дискусија моделирања параметра мутноће.....</i>	40
6	ПРАВЦИ БУДУЋЕГ ИСТРАЖИВАЊА	44
6.1	Мерење промена параметара рН вредности и мутноће при већим протоцима .	44
6.1.1	<i>Резултати и дискусија математичког моделирања за експериментална мерења параметара рН и електро – проводности при већим протоцима</i>	48
6.2	Предлози за даља истраживања	49
7	ЛИТЕРАТУРА	50

1 УВОД

На Грађевинском факултету у Београду је формиран експериментални слив за изучавање отицаја са урбаних површина. У досадашњем развоју слива, направљен је двостепени уређај за мерење количине воде (хидрограма отицаја) са крова. Потребно је направити одређене модификације на постојећем уређају и поставити сонде за мерење параметара квалитета воде: рН вредност, мутноћа и електропроводљивост. Да би се обезбедило што поузданије мерење параметара, потребно је изучити основне принципе рада сонди и пројектовати одговарајућу мерну кутију тако да обезбеди најбоље услове мерења. При томе, треба направити баланс између потребног простора за за добро функционисање комбинације три сонде и што мање укупне запремине кутије, како би мерења што више одговарала динамици промена на самом сливу. У оквиру мастер рада провера динамике ће се вршити за сваку од три наведене варијабле понављајући по три мерења. Мерења ће обухватити два случаја: (1) испирање мерне кутије чистом водом, када је претходно била напуњена воденим раствором познатог садржаја и (2) импулсним оптерећењем, односно сипањем концентрованог воденог раствора познате садржине у устаљени режим протока кроз кутију (која је претходно садржала само чисту воду). На основу обављених мерења треба направити и калибрисати математички модел неустаљеног течења у мерној кутији. Сврха модела је успостављање везе између стварне улазне концентрације и измерених вредности, односно могућност инверзне трансформације мерења како би се уклонио утицај саме кутије и обезбедили поузданији подаци (то укључује ублажење концентрације загађења услед мешања са заосталом водом, неуниформно течење и тд.). У оквиру мастер рада, а на основу добијених резултата потребно је дати закључке и смернице за даља истраживања.

2 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

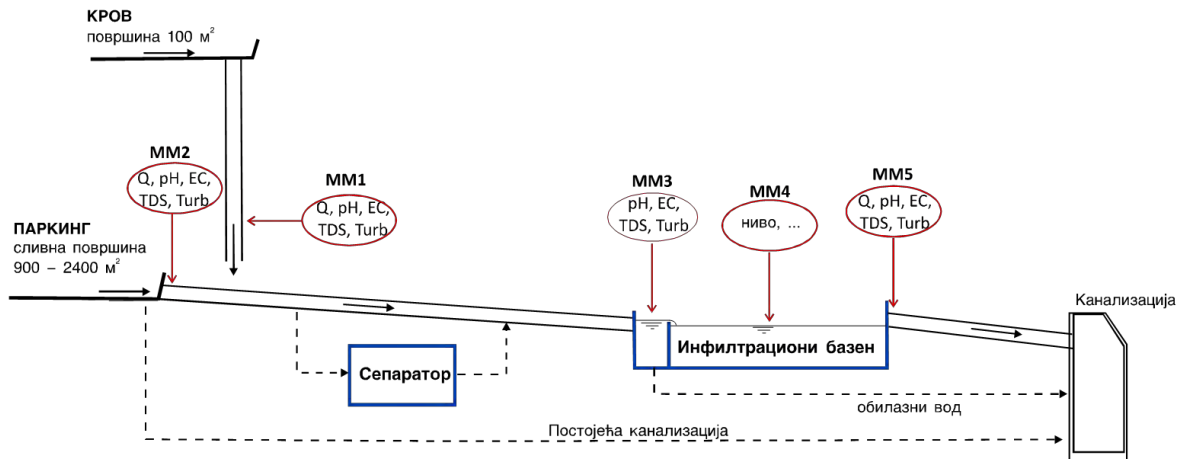
2.1 Београдски експериментални слив

У оквиру мастер рада важно је дати опис експерименталног слива у дворишту Грађевинског факултета у Београду. Предвиђено је да се на овом сливу испитају могућности за смањење количине отицаја са урбаних површина као и *побољшање његовог квалитета* пре испуста у канализациони систем. Слив се састоји од две врсте непропусних површина – паркинга испред зграде површине до 2400 м² и мањег дела кровне површине (метлни кров површине 100 м² – слика 2.1.1) и мањим делом од травнате површине.



Слика 2.1.1: Део крова Института за хидротехнику површине 100 м² који служи као репрезентативан узорак за анализу протока кишинице са кровова

На следећој слици се даје схематски приказ система за контролу отицаја усвојен на експерименталном сливу Грађевинског факултета у Београду, заједно са предвиђеним местима за мерења и захватање узорака отицаја за анализу квалитета.

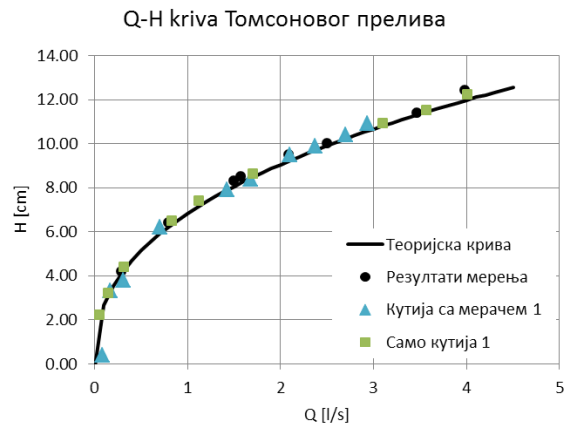
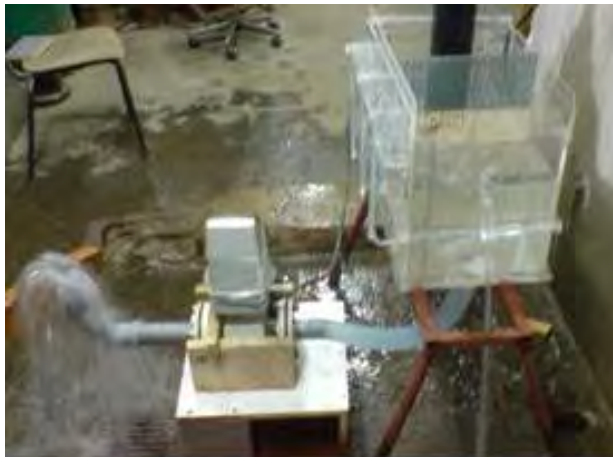


Слика 2.1.2. Схематски приказ експерименталног слива са планираним местима за мерење отицаја и квалитета воде

2.2 Израда мерне кутије за воду са крова Института

За потребе успостављања експерименталног слива у Београду, било је потребно конструисати мерну кутију која би имала двојаку функцију: мерење протока и захватање узорака и/или континуално мерење квалитета кишнице са кровног дела слива.

Спроведена су моделска испитивања различитих диспозиција мерних елемената (кутија са отворима на различитим висинама, потопљена цев са електромагнетним мерачем, мерна кутија са Томсоновим преливом) и изабрано је решење које је успело да испуни два супротна захтева: да се мере што већи протоци (за повратни период од 2 године са посматрану кровну површину од око 100 m^2 је процењено 3.5 L/s) који захтевају слободно преливање, и што мањи протоци који носе тзв. First flush, одн. прво спирање загађења са слива (усвојено за ову сливну површину око 0.02 L/s), који не могу прецизно бити мерени при слободном преливању. Такође је било потребно направити мерни елемент такав да не узрокује непогоде при екстремним условима (поплаве, или загушење олука) – догађај који је послужио за димензионисање екстрема је 30/05/2013 – када је одређен максимални проток од 5.4 L/s . Изабрано је решење са комбиновањем слободног преливања преко троугаоног прелива и истицања кроз потопљену цев (Слика 2.2.1.), са кутијом дужине свега 40 см, са закошеним странама, која обезбеђује довољно умирење тока при великим протоцима (тачност мерења) и не утиче превише на динамику малих протока (нема превелику ретензиону запремину). Кутија ће се спојити са олуком, који носи кишницу са крова, на такав начин да ће бити омогућено прављење бајпаса којим ће бити могуће воду усмерити ка сондама за квалитет и/или хватача узорака.



Слика 2.2.1. а) Диспозиција мерне кутије са Томсоновим преливом и истицањем кроз потопљену цев на коју је привезан електро-магнетни мерач (слика лево); б) Крива протока за избрани Томсонов прелив и различите операционе услове кутије (слика десно)

На слици 2.2.2. приказан је направљени уређај за изабрано решење.



Слика 2.2.2: Направљена мерна кутија са Томсоновим преливом и истицањем кроз потопљену цев на коју је привезан електро-магнетни мерач фирме SI

2.3 Преглед метода мерења протока

Проток представља протеклу запремину у јединици времена. То је изведена величина и не може се мерити непосредно. Најчешћи начини мерења протока су волуметријски, где се мери запремина воде која истекне за одређено време или се пак мери брзина воде у неколико тачака па се интегралањем брзина по површини протицајног профила добија проток. Методе мерења протока пре свега зависе од врсте течења воде, да ли је течење под притиском или течење са слободном површином.

Код течења под притиском за мерења се најчешће користе мерни претварачи који посредно мере проток преко неке друге физичке величине. На основу мерног принципа они се деле на:

- Волуметријске-мере се елементарне запремине
- Разлике притисака-мери се пад енергије тока услед савлађивања неке препреке
- Фреквенције вртлога-мери се фреквенција вртлога низводно од препреке
- Брзине у тачки или дуж одабране линије-ЕМ, УЗВ, ласер, топли филм
- ЕМ (електромагнетни) претварачи раде на принципу Фарадејевог закона индукције-флуид се креће брзином и кроз цев око које се прави магнетно поље константне јачине B услед чега се индукује EMS у електродама мерача
- УЗВ (ултразвучни) Доплер анемометар користи одбијање звука од делића који се крећу заједно са флуидом и праве доплеров помак фреквенције звука (захтева присуство одређених честица, да би се мерење вршило у чистој води мора се вршити засејавање-додавање честица одређене величине)

Код течења са слободном површином постоји низ мерних метода које се могу поделити на:

- Методе које се базирају на мерењу непоремећене дубине и уз предпостављене хидрауличке параметре, применом динамичке једначине, рачуна се проток
- Методе базиране на мерењу једне брзине и дубине, при чему постоји веза између мерене брзине и средње профилске брзине (крива протока)
- Методе којима се природни ток ремети, па се успоставља веза између поремећене дубине и протока-мерна сужења, мерни прагови, преливи практичног профила, оштроивични преливи
- Разне трасерске методе (у флуид се у једном тренутку убаца трасер, или се додаје континуално, па се низводно прати промена концентрације)

2.4 Сонде за мерење параметара квалитета воде

Сонде за испитивање параметара квалитета воде су најновије генерације и технологије, произвођача мерне опреме Endres + Hauser. Свака од сонди захтева одређене услове у којима је треба инсталирати у сам систем. Свака сонда има свој трансмитер на који је повезана, односно уређај на коме се репродукују вредности параметара квалитета (pH вредност, проводљивост, мутноћа). У овом поглављу мастер рада биће описан укратко сваки параметар квалитета воде који се мери, принцип рада сваке од сонди за мерење параметара квалитета и услове које свака од мерних сонди захтева за што тачније мерење.

2.4.1 Сонда за мерење pH вредности

pH вредност је мера активности водоникових јона (H^+) у раствору и на тај начин одређује да ли је дати раствор киселог или базног карактера. pH вредност је бездимензиона величина, и за поређење се користи pH скала која обухвата вредности од 0 до 14. За киселе растворе pH вредност је мања од 7 ($pH < 7,0$), а за базне је већа од 7 ($pH > 7,0$).

Иако је pH вредност бездимензиона величина, њена скала није произвољна. pH вредност се мери на основу активностиводоникових јона у раствору.

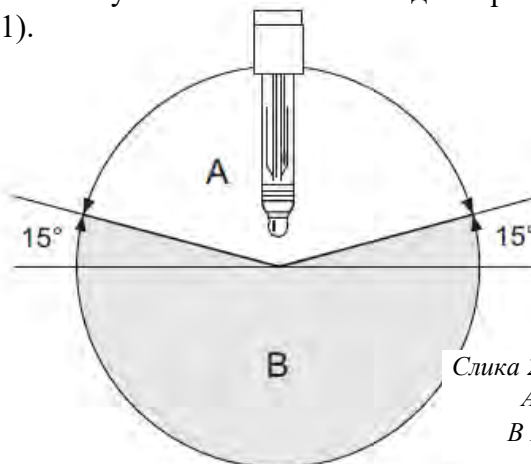
Формула за рачунање вредности је:

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

Принцип рада саме сонде, захтевани услови

pH вредност се користи као јединица за мерење киселости или базности течног медијума. Стаклена мембрана електроде обезбеђује електрохемијски потенцијал који је зависан од pH вредности медијума. Овај потенцијал је генерисан селективном пенетрацијом H^+ јона кроз спољни слој мембране. У овој тачки формира се електрохемијски гранични слој са електричним потенцијалом. Интегрисани Ag/AgCl референтни систем служи као референтна електрода. Одашиљач конвертује измерени напон у одговарајућу pH вредност коришћењем Nernst-ове једначине.

Услове које захтева сама мерна које треба напоменути су ти да сонда (критеријум температуре средине) има мерни опсег од -15 до 135 °C и да приликом монтаже сонде у мерни систем угао нагиба саме сонде мора да буде најмање 15° од хоризонтале (слика 2.4.1.1).



Слика 2.4.1.1: Инсталација pH сонде
А Дозвољени угао нагиба
В Недозвољени угао нагиба

Поступак за одређивање рН вредности

рН вредност узорка се одређује помоћу сонде за директно мерење рН вредности која је повезана на исти трансмитер као сонда за мерење проводљивости (фирма: Endress + Hauser). Мерни систем са свим својим деловима коришћен у експериментима за мерење проводљивости приказан је на слици 2.4.1.2. Повезивање саме сонде са трансмитером је исто као у случају сонде за проводљивост (слика 2.4.2.2).



Слика 2.4.1.2: Пример коришћеног мерног система за мерење рН вредности
Сонда за мерење рН вредности Orbisint CPS11 – слика лево
Трансмитер Liquiline CM442 – слика десно

2.4.2 Сонда за мерење проводљивости

Проводљивост (κ) представља електрично својство воде и меру укупне количине растворених соли или јона у води. Вода и водени раствори у зависности од концентрације јона могу да проводе струју.

Проводљивост воде зависи од:

- врсте јона присутних у води,
- концентрације јона,
- покретљивости и наелектрисања јона,
- температуре на којој се одређује проводљивост.

Фактори који одређују концентрацију јона у води су геологија, врсте падавина, испаравање, људска активност (отпадне воде, емисија издувних гасова, употреба вештачких ђубрива, киселе кише.

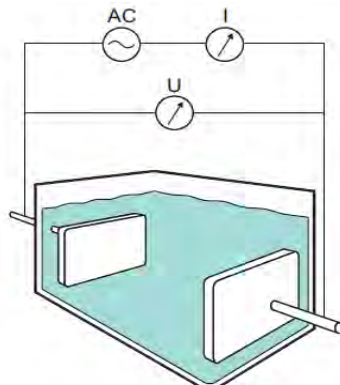
У SI систему јединица за проводљивост је сименсим (S). Проводљивост која се обично мери и која ће бити мерена у каснијим експериментима назива се специфична проводљивост, κ_s , која се изражава у $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Специфична проводљивост, κ_s , раствора се одређује инструментално, мерењем отпорности раствора који се налази између две непокретне, хемијски инертне електроде или аутоматски, помоћу кондуктометра, који се састоји из сонде за директно мерење проводљивости. У даљем тексту биће укратко описан принцип рада саме сонде.

Принцип рада саме сонде

Проводљивост течности се мери помоћу следеће поставке: Две електроде су уроњене у медијум и на њих се примењује напон наизменичне струје што производи струју у медијуму. Електрична отпорност или њена реципрочна вредност, проводност G , рачунају се према Омовом закону. Специфична проводљивост, κ , се одређује коришћењем константе k која је зависна од геометрије сензора. На слици 2.4.2.1. приказан је принцип мерења проводљивости.

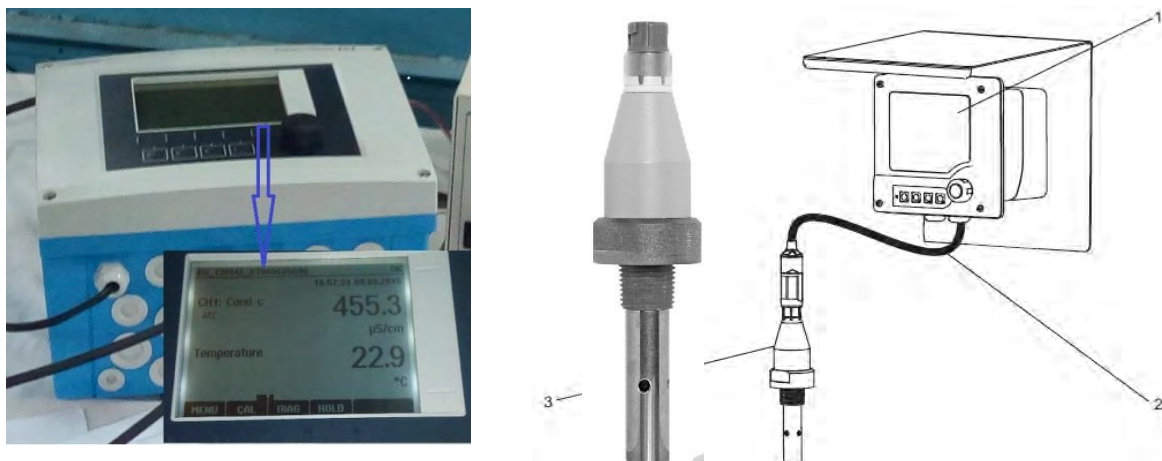
Главни услов који ова сонда захтева при монтажи је да мора да буде уроњена у средину минимум 32 милиметра.



Слика 2.4.2.1: Принцип мерења проводљивости

Поступак за одређивање специфичне проводљивости, κ

Проводљивост узорка се одређује помоћу сонде за директно мерење проводљивости која је повезана са истим трансмитером као сонда за мерење рН вредности (фирма: Endress + Hauser). Мерни систем са свим својим деловима коришћен у експериментима за мерење проводљивости приказан је на слици 2.4.2.2.



Слика 2.4.2.2: Пример коришћеног мерног система проводљивости

- 1) Трансмитер Liquiline CM442 (слика лево)
- 2) СУК10 Metosens кабл за повезивање сонда – трансмитер
- 3) Сонда за мерење проводљивости Conditax CLS15 (слика у средини)

2.4.3 Сонда за мерење мутноће

Мутноћу воде чине суспендоване и колоидне честице у води (пречника већег од 100 μm).

Мутноћа воде потиче од:

- суспендованих честица глине,
- честица муља,
- финих, ситних органских и неорганских материја,
- растворених, обојених органских материја које потичу из отпадне воде,
- микроскопски ситних живих организама, планктона.

Мутноћа се изражава у нефелометријским јединицама мутноће (*eng.* nephelometric turbidity units (NTU)) или у садржају SiO_2 у води израженим у mg/L . Све остале јединице су у неком односу са ове две или су у неким или већини случајева исте. У експериментима мерења мутноће исту ћемо изражавати у FNU-овима (*eng.* formazine nephelometric unit). Ово је уједно јединица мере за мутноћу по ISO стандарду.

Мутноћа даје води непрозирност. Мутноћа се мери и одређује у лабораторијама и на лицу места (*eng.* on-site) у рекама. У периоду ниског водостаја многе реке имају чисту, јасну, зеленкасту, прозирну боју, имају ниску мутноћу, мању од 10 FNU-а. У кишном периоду, честице са обале се спирају и растварају у води, вода постаје блатњава и обојена, што указује на високу мутноћу. Током високог водостаја, брзина воде је већа, количина воде која протиче је већа и она доприноси лакшем и бржем спирању суспендованих материја са дна, што узрокује већу мутноћу воде.

Према Правилнику о хигијенској исправности воде за пиће (Службени лист СРЈ бр. 42/98) прописана је максимална допуштена вредност мутноће до 1 FNU. У ванредним приликама ова вредност иде и до 6 FNU.

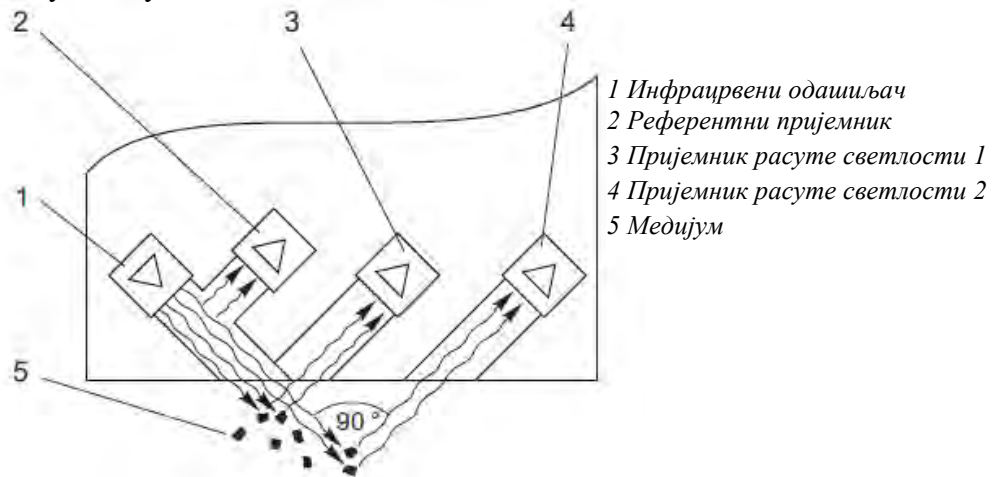
Принцип рада саме сонде

За мерење мутноће, светлосни сноп се шаље кроз медијум где се мења првобитни правац од стране оптички гушћих честица, нпр. честице чврсте материје.

Принцип нефелометријског мерења 90 степени NIR расуте светлости према EN 27027

Метода 90 степени расуте светлости са таласном дужином у блиском инфрацрвеном опсегу (880nm) према ISO 7027 / EN 27027 бележи вредности мутноће под стандардним, упоредивим условима. Температурни сигнал се исто тако бележи и преноси додатно са сигналом мутноће. Екситационо зрачење инфрацрвеног одашиљача (ставка 1) погађа медијум при дефинисаном углу снопа. У обзир се узимају различита преламања светлости између улазног прозора и медијума (вода). Честице у

медијуму (ставка 5) расипају зрачење које погађа пријемнике расуте светлости (ставке 3 и 4) при дефинисаном углу светлости. Мерења у медијуму се константно упоређују са вредностима референтног пријемника (ставка 2). Функције дигиталног филтера са одличним потискивањем сигнала интерференције и самонадгледања обезбеђују додатну поузданост мерења. На слици 2.4.3.1. схематски је приказан мерни принцип сонде за мутноћу описан у тексту изнад.



Слика 2.4.3.1: Принцип мерења мутноће

Главни услови који се морају испоштовати при монтажи сонде за мутноћу су ти да када се мерење врши у пијаћој води, растојање сонде од зида, прве препреке, мора бити најмање 8 сантиметара. Такође, важно је поменути да сонди смета светлост и да најобјективније резултате даје у вештачки затамњеним условима.

Такође јако важни услови којих се мора придржавати су и ти да се постигне *Bubble – free medium* ефекат (елиминација мехурића ваздуха из мерне средине). Не сме се заборавити и чињеница да сонда мора бити уроњена минимум 40 милиметара у мерну средину.

Поступак за одређивање мутноће

Мутноћа узорка се одређује помоћу сонде за директно мерење мутноће која је повезана трансмитером који репрезентује вредности исте и температуру средине у којој меримо мутноћу (фирма: Endress + Hauser). Мерни систем са свим својим деловима коришћен у експериментима за мерење мутноће приказан је на слици 2.4.3.2.



Слика 2.4.3.2: Пример коришћеног мерног система за мутноћу

Лево - Сonda за мерење мутноће Turbimax CUS31

Десно - Трансмисер Liquisys M CUM 223

Закључак: Када се детаљно проуче принципи рада свих сонди и услови које саме сонде захтевају потребно је направити одговарајућу мерну кутију, тако да задовољимо све критеријуме сонди. У поглављу 3 описан је поступак прављења мерне кутије са свим фазама израде исте.

3 ОПИС ДИСПОЗИЦИЈЕ СИСТЕМА

Цео мерни систем коришћен у даљим мерењима састоји се од мерне кутије, мерних сонди за мерење параметара квалитета воде (pH вредност, мутноћа, проводљивост), које су смештене у самој мерној кутији, система за регулисање и пуштање у систем континуалног протока чиме се обезбеди усталени режим протока кроз кутију. Треба напоменути да сам двостепени уређај за мерење количине воде (хидрограма отицаја), иначе направљен раније, описан у поглављу 2.2. у овом мастер раду, а имао је функцију да прикупи воду која је преливала из мерне кутије са сондама и спроведе у резервоар. У даљем тексту биће детаљно описан сваки део пројектованог мерног система, са свим изузецима и одступањима на које се наилазило у фазама пројектовања и повезивање делова у целину.



Слика 3.1: Диспозиција мерног система

3.1 Прављење и одређивање димензија физичког модела (мерне кутије)

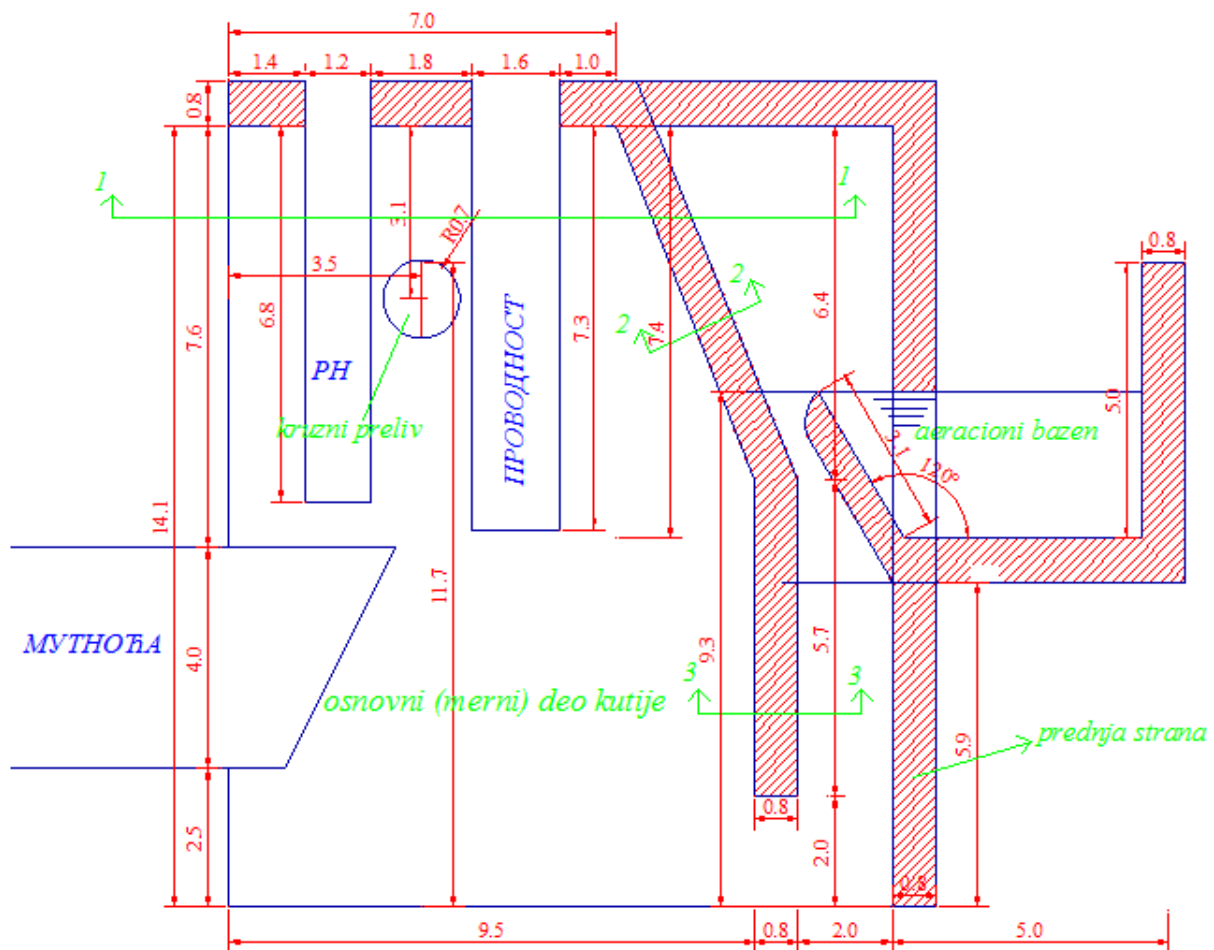
При прављењу мерне кутије потребно је обратити пажњу на више ствари. Једна од њих, свакако и најважнија, је услове које сонде захтевају, тачније критеријуми које саме сонде захтевају не би ли даље што тачније резултате мерења (описано у поглављима 2.4.1. – 2.4.3.). Уз све то, као што је поменуто у уводу, морало се придржавати принципа минималне запремине, не би ли што више побољшали динамику мерења, добили на економичности и тачност мерења подигли на виши ниво. У даљем тексту биће детаљно описане фазе израде мерне кутије, уз образложења која решења су и из ког разлога прихваћена као одговарајућа.

Прва фаза се састојала у томе да се направи тачан цртеж кутије са свим елементима у пресеку детаљно искотираним како би се иста што тачније, лакше и брже

направила. Кренуло се од 2D цртежа кутије AutoCAD-у, где су јасно указани димензије, пресеци и делови кутије. Кутија се састоји из два основна дела:

- (1) аерационог базена у који улази вода и аерацијом долазимо до тзв. „Bubble – free” ефекта, где ћемо испунити један од услова које захтева сонда за мерење мутноће, а он се састоји у томе да се елиминишу мехурићи ваздуха из воде и
- (2) основног (мерног) дела у коме су смештене мерне сонде и кружни прелив.

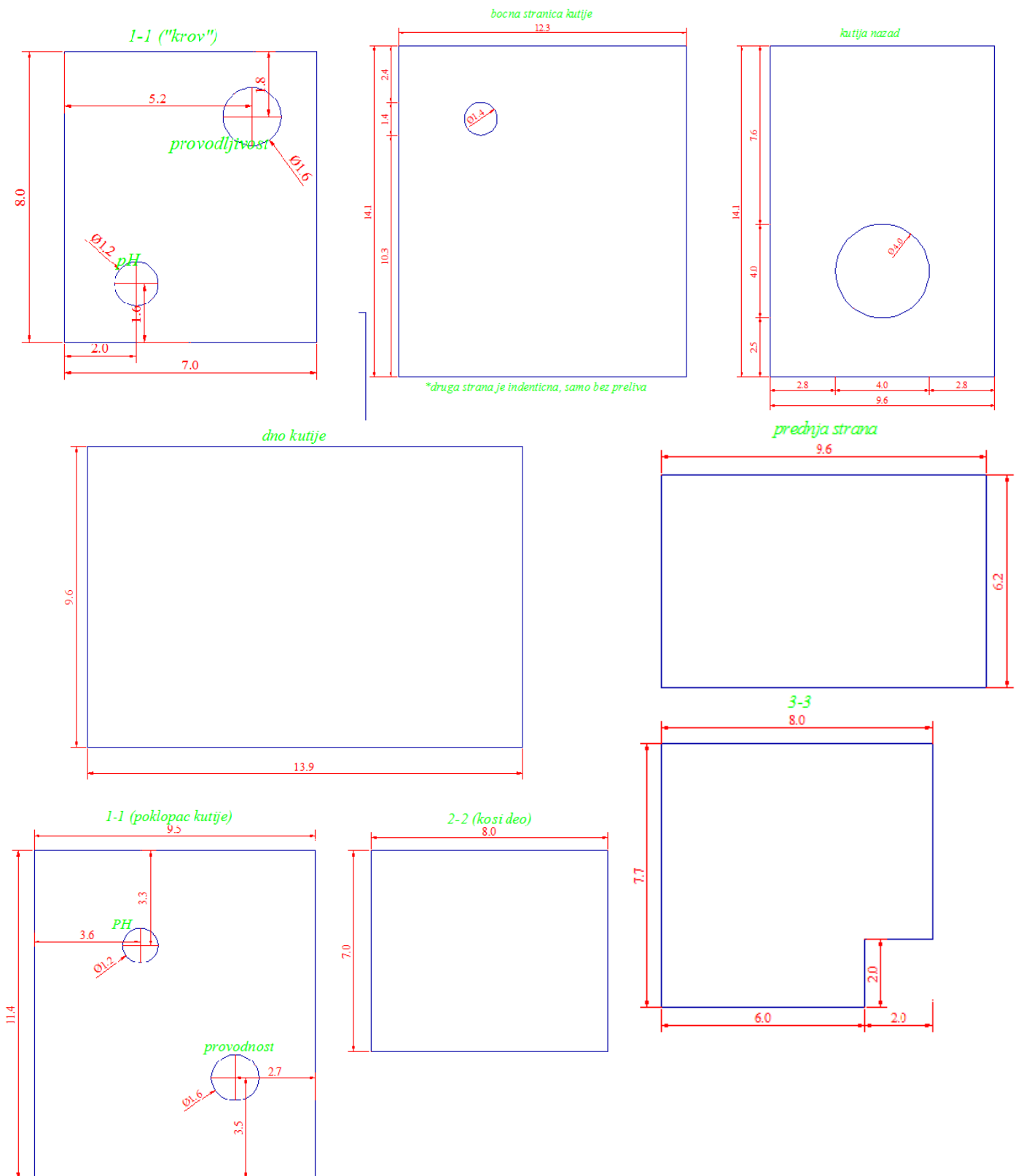
На слици 3.1.1. приказан је цртеж кутије у AutoCAD-у са свим пресецима и деловима исте (аерациони базен и основни (мерни) део).



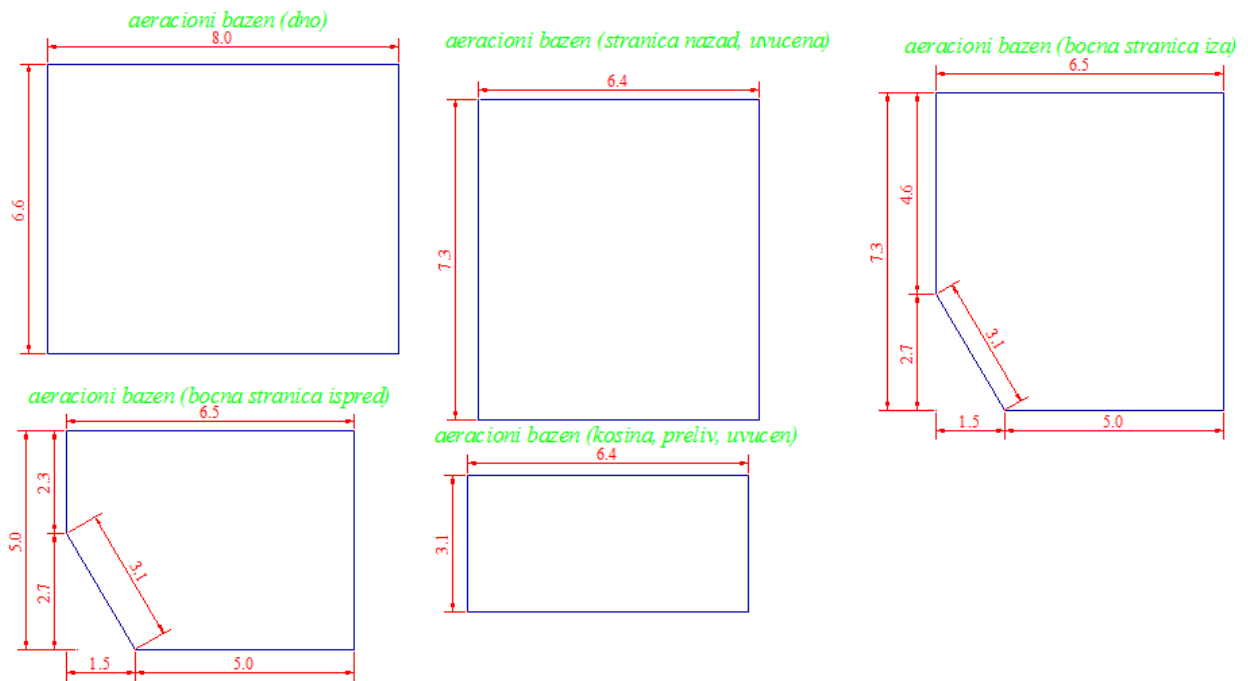
Слика 3.1.1: Цртеж мерне кутије са основним деловима и димензијама

На слици горе јасно су приказани и положаји мерних сонди, кружног прелива и оријентација аерационог базена. Види се да је аерациони базен направљен тако да буде потопљен из разлога што ће се експериментална мерења вршити тако да имамо преливања само кроз кружни прелив, чије је дно лоцирано на један сантиметар изнад прелива аерационог базена. Тачан положај мерне кутије у диспозицији мерног система приказан је на слици 3.1. Слика 3.1.2 приказује димензије свих пресека, делова основног (мерног) дела кутије, док слика 3.1.3 приказује димензије делова аерационог

базена. На основу цртежа доле у радионици Института за хидротехнику је сама кутија и направљена.



Слика 3.1.2: Димензије делова основног (мерног) дела кутије



Слика 3.1.3: Димензије делова аерационог базена

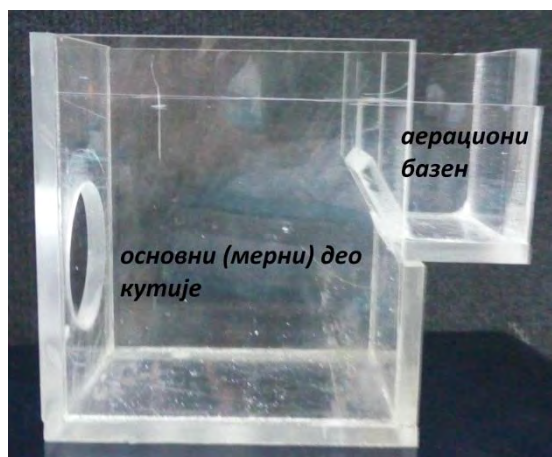
3.1.1 Димензионисање и позиционирање кружног прелива

Као што је већ поменуто, кружни прелив је лоциран тако да се обезбеди потопљеност аерационог базена, тачније дно кружног прелива је на један сантиметар изнад од прелива аерационог базена. На слици 3.1.1. и 3.1.2 (конкретно пресек бочне стране кутије) јасно се види да је пречник отвора кружног прелива 14 милиметара. Следећи корак је одређивање максималног протока који се може пустити у систем а да сав проток иде преко кружног прелива, одакле се закључује да неће бити преливања преко сигурносног прелива аерационог базена. Тај проток се добија тако сто кроз направљену мерну кутију са чесме (са којом је повезан и водомер) пуштамо одређен проток и меримо исти преко штоперице и водомера. Максимални проток који може проћи кроз мерну кутију, а да 100 % протока иде кроз кружни прелив, добијен на овај начин износи 0,030 l/s. Ова вредност је служила као оријентир у даљем поступку мерења. Систем чесма + водомер са свим осталим елементима приказан је на слици 3.1.4.

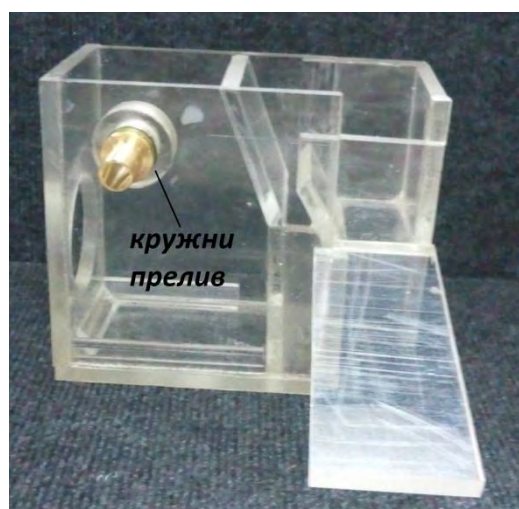


Слика 3.1.4: Почетна апаратура за пуштање протока у систем

Апаратура приказана на слици 3.1.4. није усвојена као решење за пуштање протока у систем јер се показала као непоуздана из разлога јер долази до *појаве кавитације и прљања воде услед неравномерног притиска*. Из тог разлога дошло се до потребе за тражењем новог решења чиме ће се обезбедити чиста вода, елиминисати кавитација и обезбедити устаљено течење. Изабрана је варијанта са буретом које је градуисано до запремине од 100 литара и позиционирано изнад диспозиције система (слика 3.1). На слици 3.1.5 приказане су фазе израде саме мерне кутије.



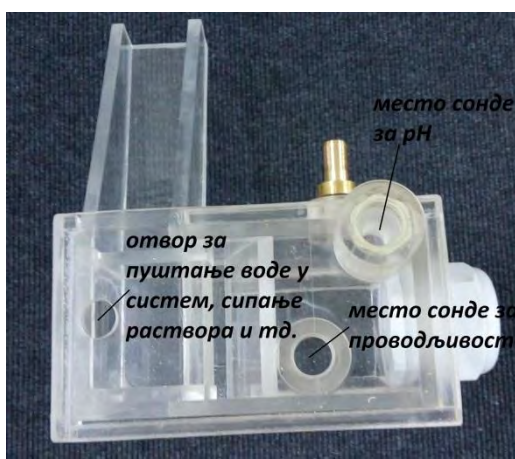
а) фаза 1



б) фаза 2



в) фаза 3



г) фаза 3 (поглед одозго)

Слика 3.1.5: Фазе израде мерне кутије

4 РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА ВОДЕ

У овом поглављу биће описано по три експеримента мерења сваке од варијабли квалитета воде за случајеве испирања кутије чистом водом ($3 \times 3 = 9$ експеримената) и за случај импулсног оптерећења ($3 \times 3 = 9$ експеримената). Након описа сваког од три експеримента за сваку варијаблу и графичког приказа резултата, биће изнети закључци, дискусије резултата.

4.1 Експериментална мерења за случај испирања мерне кутије чистом водом

Суштина ових експеримената се састоји у томе да се мерна кутија (волуметријски добијана запремина мерне кутије до кружног прелива износи $V = 0.851$) напуни раствором познате концентрације припремљеног у лабораторији, па потом испира чистом водом из бурета. Важно је напоменути да су почетне вредности параметара квалитета воде раствора који се налази у кутији *искључиво оне вредности које у тренутку непосредно пред почетак мерења показује мерна сонда*, а не вредности добијене у лабораторији. Временски корак код свих експеримената је 15 секунди.

4.1.1 Експериментална мерења рН вредности

Експеримент број 1

Код овог експеримента мерна кутија је напуњена лабораторијским раствором сирћетне киселине чија је рН вредност у лабораторијским условима 2.75. Како је горе већ поменуто, меродавна, уједно и почетна, вредност је она коју показује сонда и износи 2.93. Волуметријски израчунат средњи проток чисте воде током овог експеримента износио је $Q_{sr} = 0.003$ l/s. Експеримент је трајао 73 минута и 10 секунди.

Експеримент број 2

Показивање сонде: рН = 2.90.

Проток: $Q_{sr} = 0.01$ l/s.

Трајање експеримента: 35 минута.

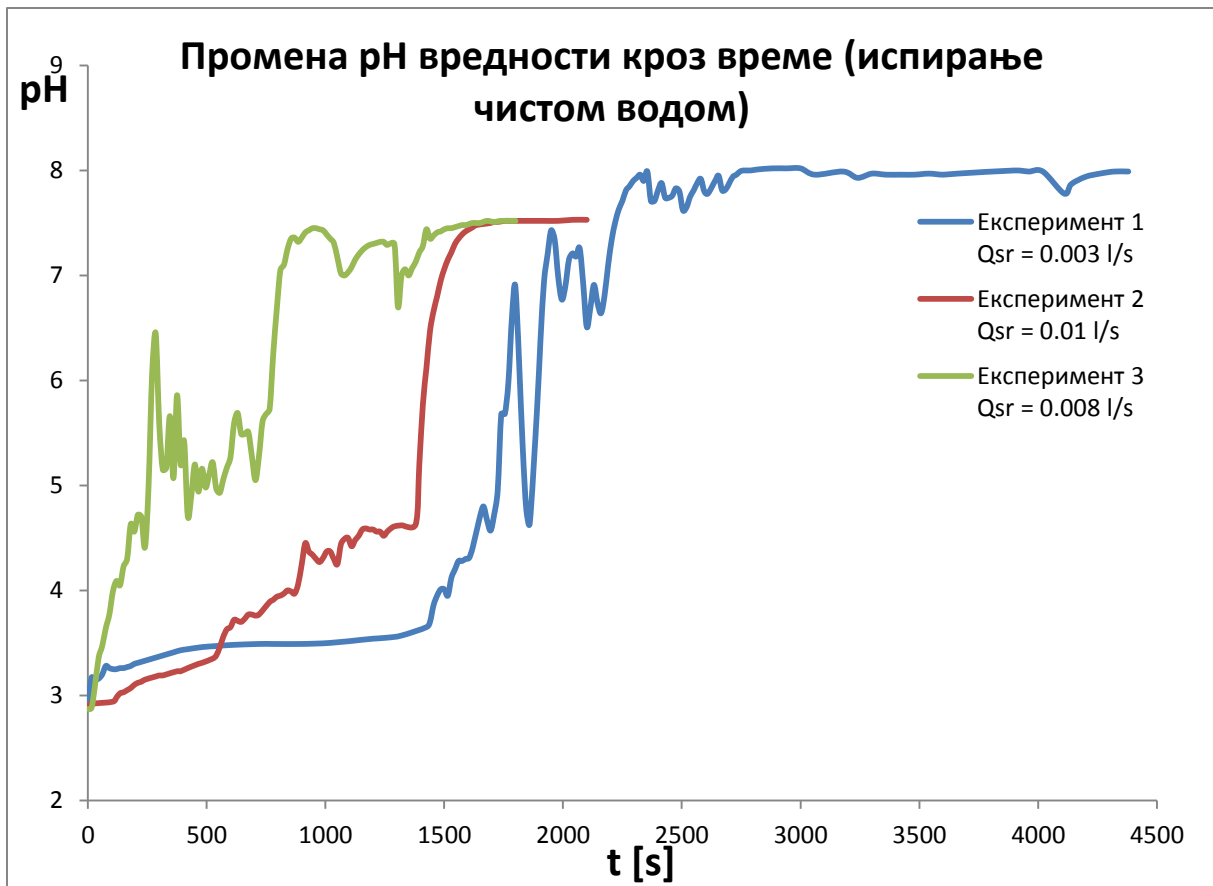
Експеримент број 3

Показивање сонде: рН = 2.87.

Проток: $Q_{sr} = 0.008$ l/s.

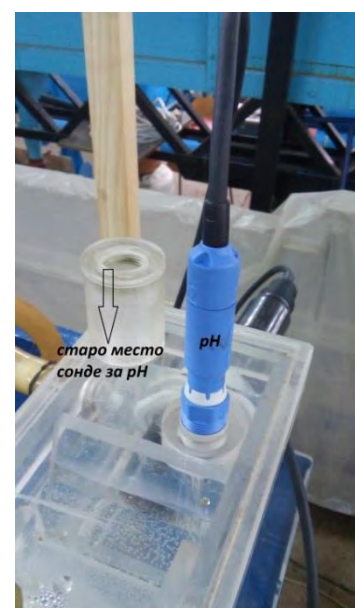
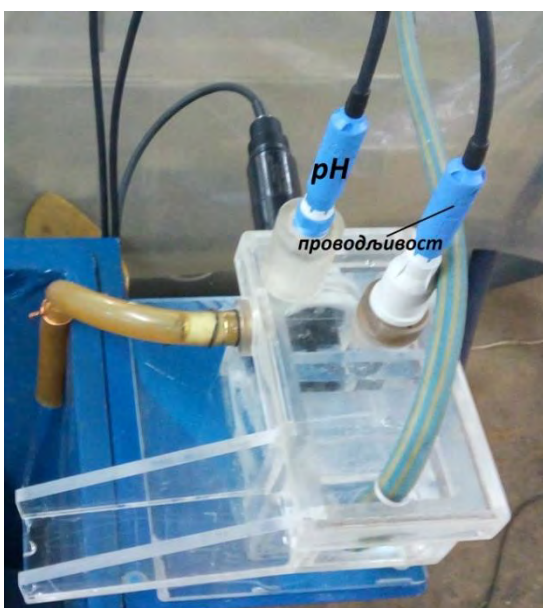
Трајање експеримента: 30 минута и 30 секунди.

Резултати експеримената 1, 2 и 3 дати су на слици 3.1.1.1.



Слика 4.1.1.1: Промена вредности рН кроз време за прва три експеримента

Као што се види, резултати промене варијабле рН у времену су јако нехомогени и тешки за обраду. Да би се постигли што хомогенији резултати мерења биће урађен Експеримент 1* са измењеним положајем сонде за мерење рН вредности и постављање исте на место сонде за проводљивост (слика 4.1.1.2).



Слика 4.1.1.2: Положај сонде за мерење Рн вредности код прва три експеримента (слика лево) и нови положај сонде (слика десно)

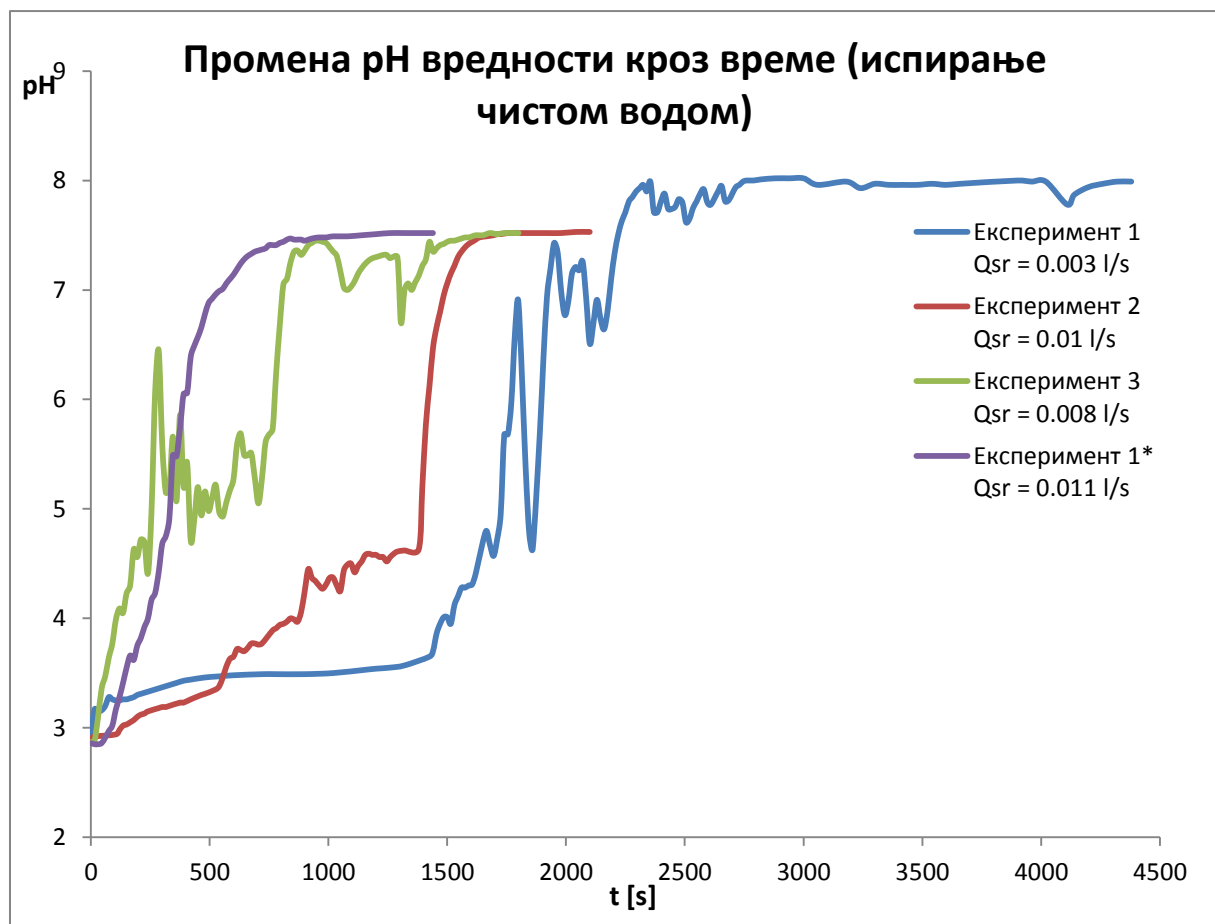
Закључак: Мењање положаја сонде условљено је претпоставком да је почетни положај сонде неправилан из разлога јер се сонда налази тик уз кружни прелив. На том месту проток је изразито неустаљен и одступа од средњег протока кроз систем, а такође је мешање флуида у зони око кружног прелива доста нехомогено. Резултати Експеримента 1* у поређењу са прва три експеримента дати су на слици 3.1.1.3. Са слике 4.1.1.3 се закључује да су резултати са *новим положајем сонде* хомогенији, објективнији и лакши за обраду па се овај положај сонде користи у даљим мерењима.

Експеримент 1*

Показивање сонде: рН = 2.86.

Проток: $Q_{sr} = 0.011$ l/s.

Трајање експеримента: 24 минута и 30 секунди.



Слика 4.1.1.3: Промена вредности рН кроз време за прва три експеримента и за Експеримент 1* са новим положајем сонде

4.1.2 Експериментална мерења специфичне проводљивости, κ_s

Експеримент број 1

Код овог експеримента мерна кутија је напуњена лабораторијским раствором бакар – сулфата, CuSO_4 , чија је специфична проводљивост у лабораторијским условима $\kappa_s = 33.7 \mu\text{S}/\text{cm}$. Меродавна, уједно и почетна, вредност је она коју показује сонда и износи $39.25 \mu\text{S}/\text{cm}$. Волуметријски израчунат средњи проток чисте воде током овог експеримента износио је $Q_{\text{sr}} = 0.014 \text{ l/s}$. Експеримент је трајао 22 минута и 30 секунди. Важно је напоменути да је *показивање сонде за чисту воду из бурета износило приближно $507 \mu\text{S}/\text{cm}$* и та вредност ће бити усвојена за све експерименте као крајња којој се тежи.

Експеримент број 2

Показивање сонде: $\kappa_s = 38.05 \mu\text{S}/\text{cm}$

Проток: $Q_{\text{sr}} = 0.022 \text{ l/s}$.

Трајање експеримента: 12 минута и 30 секунди.

Експеримент број 3

Показивање сонде: $\kappa_s = 33 \mu\text{S}/\text{cm}$

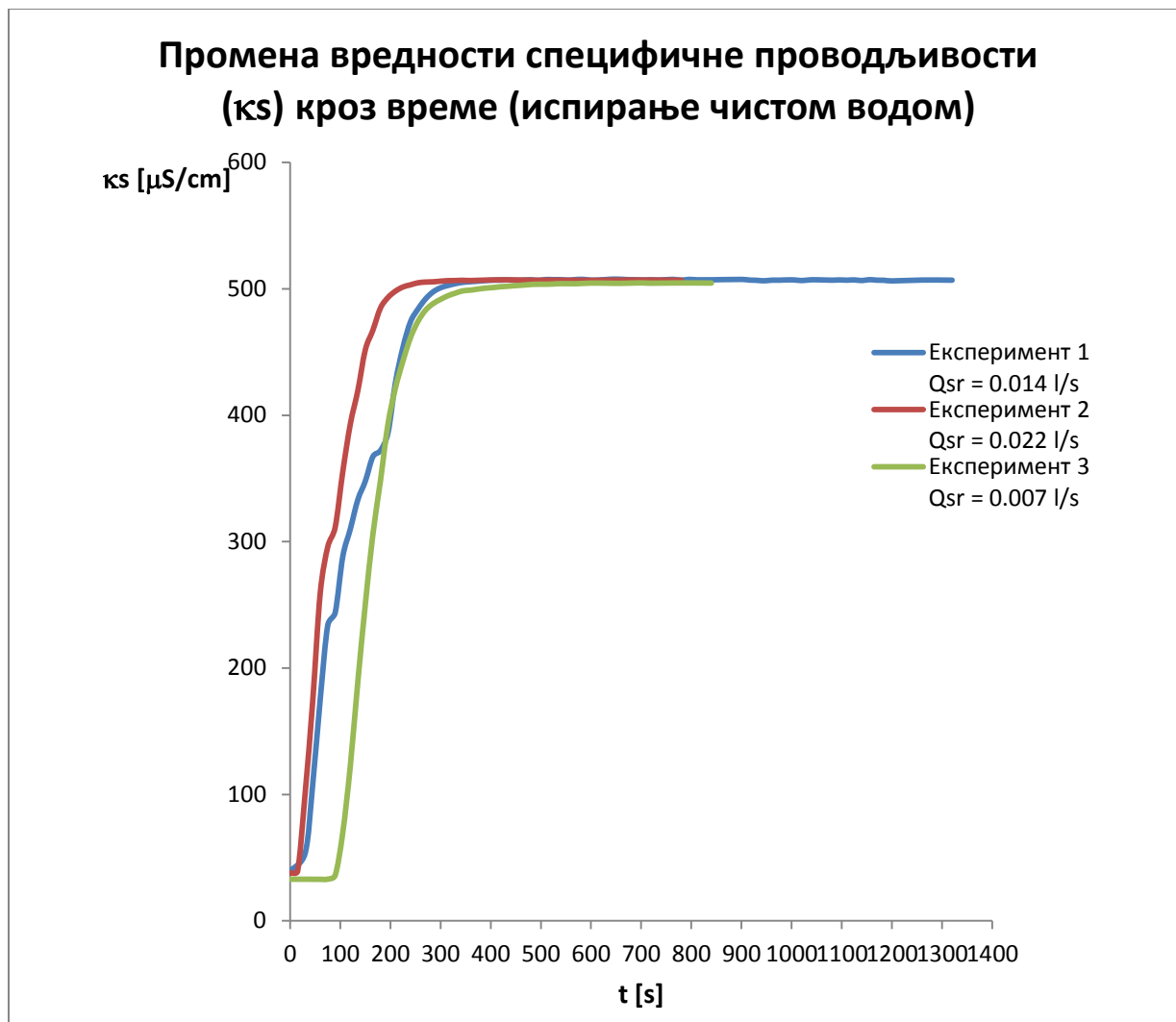
Проток: $Q_{\text{sr}} = 0.007 \text{ l/s}$.

Трајање експеримента: 14 минута и 15 секунди.

Резултати експеримената 1, 2 и 3 дати су на слици 4.1.2.1.

Закључак: Код самог почетка сваког од експеримената дошло се до закључка да је *време одзива сонде за проводљивост доста веће од времена одзива рН сонде*. Као пример је мерење специфичне проводљивости раствора код експеримента 1, где је сонда у почетку показивала вредност од $46.5 \mu\text{S}/\text{cm}$, да би се вредност стабилизовала после 20 – 25 минута и износила $39.25 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Такође, посматрајући резултате мерења (слика 4.1.2.1) долази се и до закључка да је *сонда за мерење проводљивости, за разлику од почетног положаја рН сонде, смештена на одговарајућем месту (слика 3.1.1.2 лево), даље од кружног прелива, чиме је омогућено хомогеније мешање раствора са водом и боља устаљеност протока*. Као последица наведеног, резултати мерења специфичне проводљивости показују доста боље понашање при различитим протоцима, хомогенији су и лакши за обраду.



Слика 4.1.2.1: Промена вредности проводљивости кроз време за прва три експеримента (случај испирања чистом водом)

4.1.3 Експериментална мерења мутноће као параметра квалитета воде

Експеримент број 1

Код овог експеримента мерна кутија је напуњена лабораторијским раствором врте глине под називом бентонит, чија је мутноћа у лабораторијским условима 62.3 FNU-а. Мередавна, уједно и почетна, вредност је она коју показује сонда и износи 46.23 FNU-а. Волуметријски израчунат средњи проток чисте воде током овог експеримента износио је $Q_{sr} = 0.013$ l/s. Експеримент је трајао 40 минута и 19 секунди. Важно је напоменути да

је показивање сонде за чисту воду из бурета износило приближно 2.70 FNU-а и та вредност ће бити усвојена за све експерименте као крајња којој се тежи.

Експеримент број 2

Показивање сонде: 44.20 FNU-а.

Проток: $Q_{sr} = 0.005$ l/s.

Трајање експеримента: 30 минута и 15 секунди.

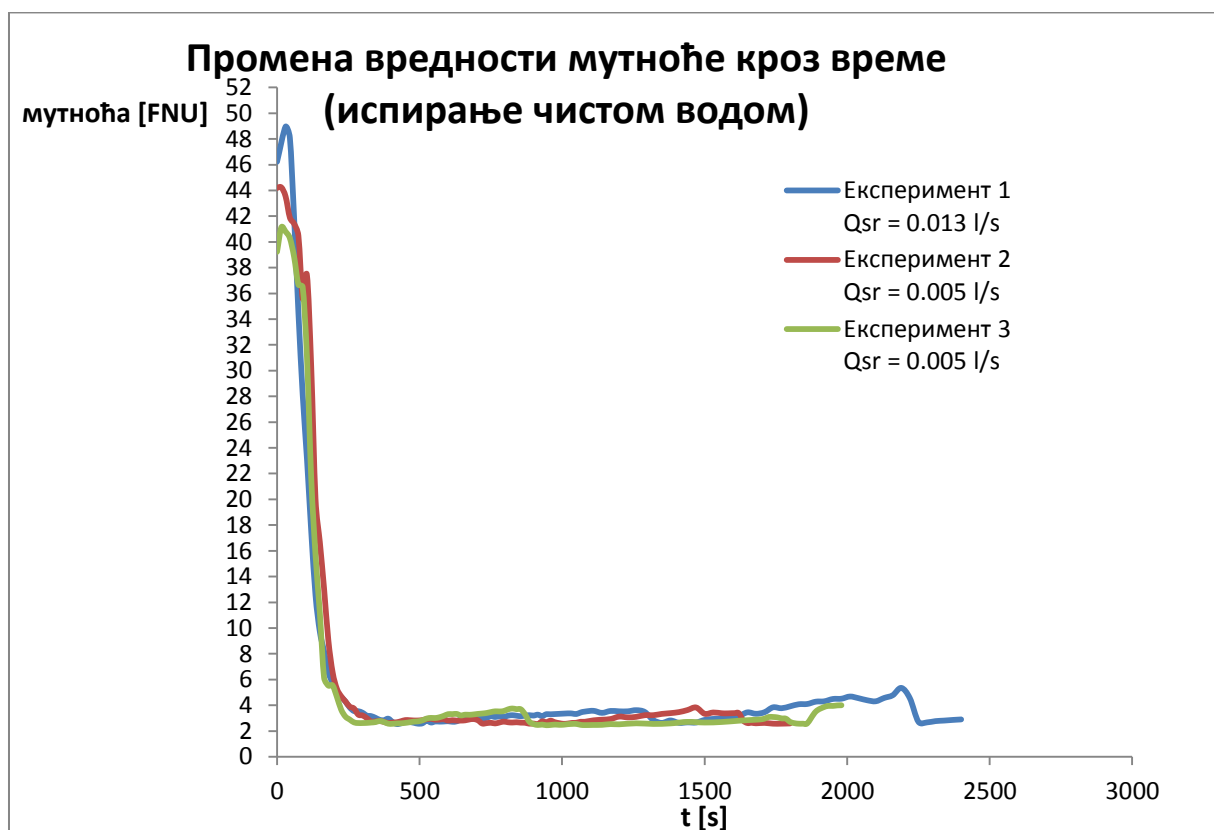
Експеримент број 3

Показивање сонде: 39.23 FNU-а.

Проток: $Q_{sr} = 0.005$ l/s.

Трајање експеримента: 33 минута и 30 секунди.

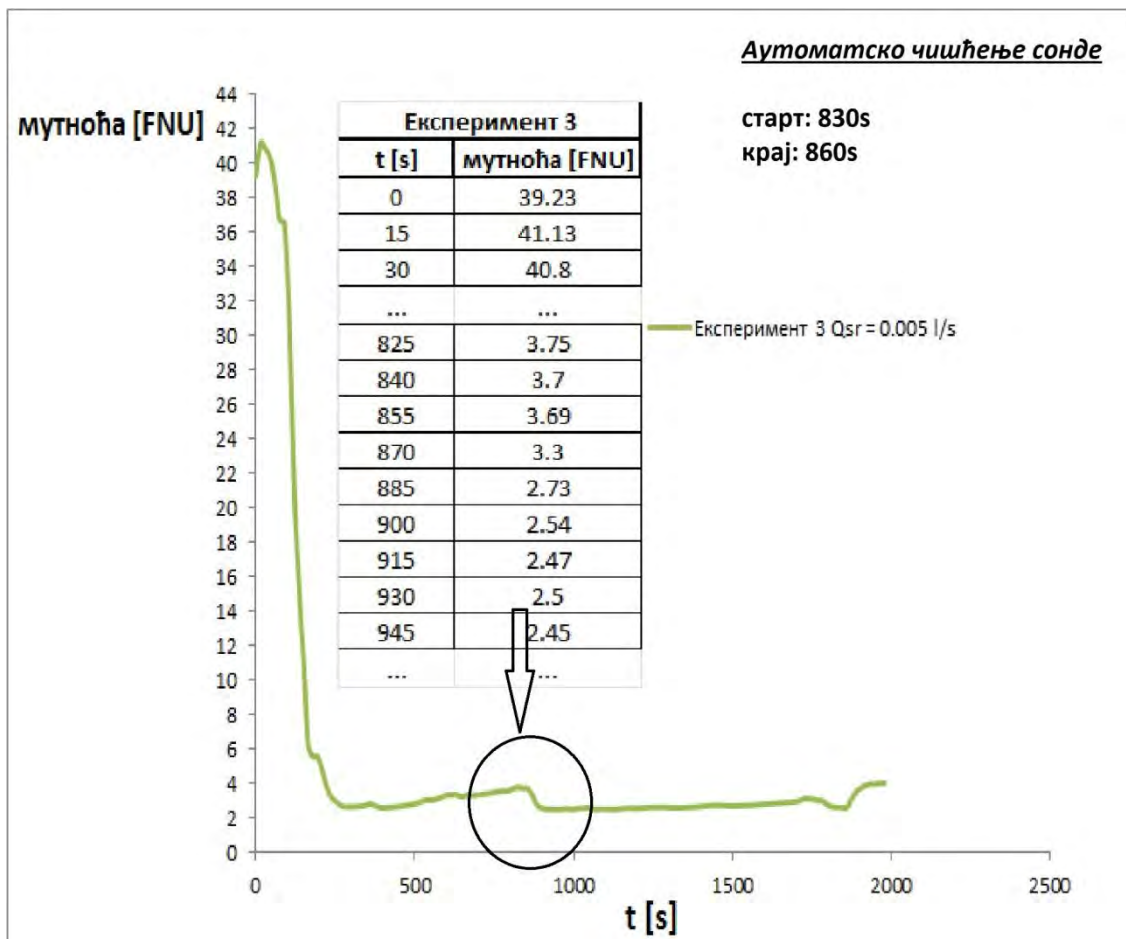
Резултати експеримената 1, 2 и 3 дати су на слици 4.1.3.1.



Слика 4.1.3.1: Промена вредности мутноће кроз време за прва три експеримента (случај испирања чистом водом)

Закључак: Након извршена 3 експеримента мерењења мутноће закључује се да *промена мутноће нема велике везе са протоком* и да до стабилизације исте долази за приближно исти временски период. Потребно је *обратити пажњу на аутоматско чишћење сензора*, јер сонда након чишћења даје најобјективнији резултат, који је приближно једнак минимуму када се чишћење сонде заврши. У експериментима који су рађени у овом мастер раду, периоди чишћења су на сваких 15 минута (експериментално је утврђено да је то тачно на 15 минута и 20 секунди), а трају 30 секунди. Као пример, на слици 4.1.3.2 приказан је део табеларног и графичког приказа резултата Експеримента број 3 са указаним тренутком када је почело чишћење сонде. Очигледно је да након чишћења мутноћа пада на неку вредност приближну објективној, што је горе и описано.

Да би се доказала тврдња изнета у закључку изнад, урађен је експеримент у коме је мерена мутноћа чисте воде уз константан проток кроз систем. Потребно је обратити пажњу на тренутке аутоматског чишћења сонде (три тренутка у конкретном експ.)



Слика 4.1.3.2: Утицај аутоматског чишћења сонде на резултате мерења мутноће

Експеримент мерења мутноће чисте воде

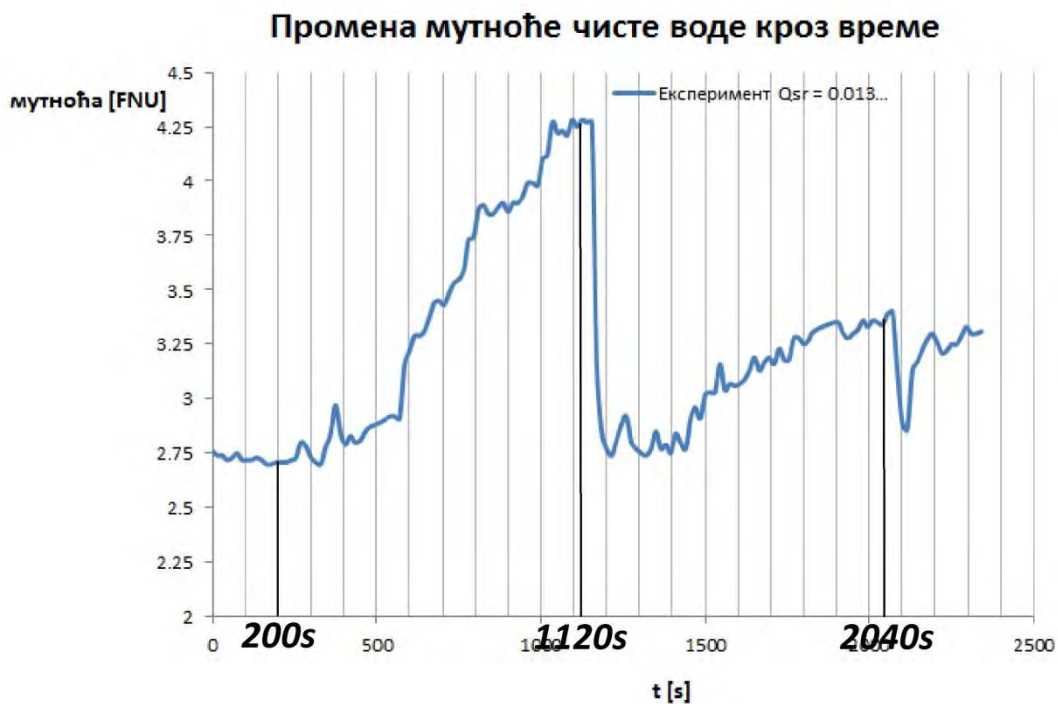
Показивање сонде (мутноћа чисте воде из бурета): 2.76 FNU-a.

Проток пуштан кроз систем: $Q_{sr} = 0.013$ l/s.

Забележени тренуци чишћења: 200s, 1120s, 2040s.

Трајање експеримента: 39 минута и 10 секунди (2350 секунди).

Резултати овог експеримента приказани су на слици 4.1.3.3. На крају описаног експеримента слободно можемо закључити да вредност мутноће као параметра квалитета воде зависи и од тренутка аутоматског чишћења сонде. На слици 4.1.3.3. се види да након сваког чишћења сонде вредност мутноће пада на мутноћу која је приближно једнака почетној забележеној мутноћи чисте воде (2.76 FNU-a).



Слика 4.1.3.3: Утицај аутоматског чишћења сонде (на 200, 1120 и 2040 секунди) на резултате мерења мутноће чисте воде

4.2 Експериментална мерења за случај импулсног оптерећења

Код ове врсте експеримената, мерна кутија се напуни чистом водом, измери се вредност почетне варијабле коју меримо за чисту воду и мерења крећу *импулсним оптерећењем*, односно сипањем концентрованог воденог раствора познате садржине у устаљени режим протока кроз кутију (која је претходно садржала само чисту воду). *Почетне вредности параметара* квалитета воде раствора који представља импулсно оптерећење су *искључиво оне вредности које у тренутку непосредно пред почетак мерења показује мерна сонда*, а не вредности добијене у лабораторији. У *наношењу импулсног оптерећења* важно је обратити пажњу на *запремину унету у систем и временски период уноса*. *Временски корак код свих експеримената је 15 секунди.*

4.2.1 Експериментална мерења рН вредности при импулсном оптерећењу

Експеримент број 1

Код овог експеримента мерна кутија је напуњена чистом водом чија је рН вредност 7.80. Показивање сонде за мерење рН вредности, као вредност варијабле импулсног оптерећења, износи 2.90. Запремина импулсног оптерећења је 25ml и оптерећење је нането у периоду од 15 – 30 секунди. Волуметријски израчунат средњи проток чисте воде током овог експеримента износио је $Q_{sr} = 0.012$ l/s. Експеримент је трајао 18 минута. *Сва три експеримента рађена су са првобитним положајем сонде.*

Експеримент број 2

Показивање сонде (чиста вода): рН = 7.80.

Показивање сонде (импулс): рН = 2.90.

Запремина импулса: 25 ml.

Временски период импулсног оптерећења: од 8 до 14 секунди.

Проток: $Q_{sr} = 0.011$ l/s.

Трајање експеримента: 14 минута.

Експеримент број 3

Показивање сонде (чиста вода): рН = 7.79.

Показивање сонде (импулс): рН = 2.87.

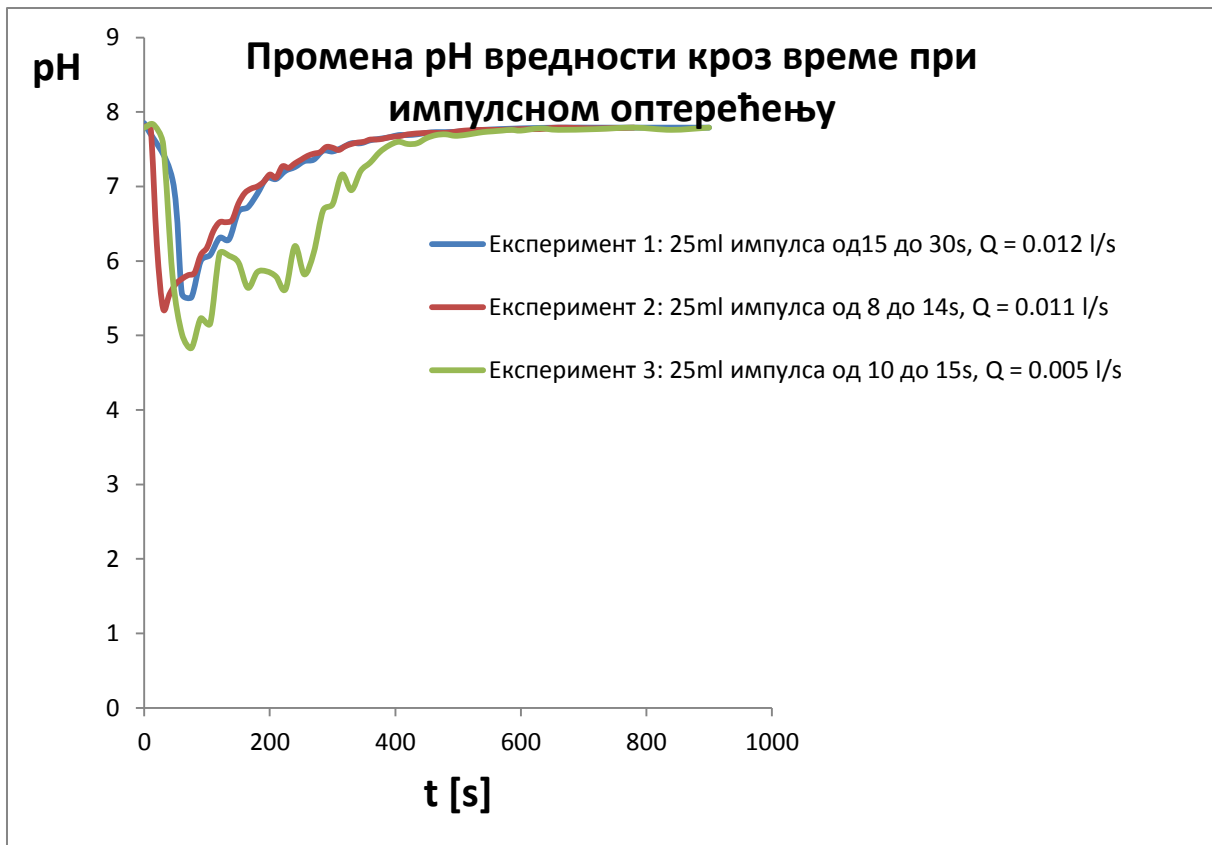
Запремина импулса: 25 ml.

Временски период импулсног оптерећења: од 10 до 15 секунди.

Проток: $Q_{sr} = 0.005$ l/s.

Трајање експеримента: 15 минута.

Резултати експеримената 1, 2 и 3 дати су на слици 4.2.1.1.



Слика 4.2.1.1: Промена рН вредности кроз време за три експеримента (случај импулног оптерећења)

4.2.2 Експериментална мерења специфичне проводљивости, κ_s , при импулсном оптерећењу

Експеримент број 1

Код овог експеримента мерна кутија је напуњена чистом водом чија је специфична проводљивост $\kappa_s = 510 \mu\text{S}/\text{cm}$. Показивање сонде за мерење проводљивости, као вредност варијабле импулног оптерећења, износи $29.45 \mu\text{S}/\text{cm}$. Запремина импулног оптерећења је 25ml и оптерећење је нането у периоду од 50 – 60 секунди. Волуметријски израчунат средњи проток чисте воде током овог експеримента износио је $Q_{sr} = 0.006 \text{ l/s}$. Експеримент је трајао 12 минута.

Експеримент број 2

Показивање сонде (чиста вода): $\kappa_s = 510.5 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Показивање сонде (импулс): $\kappa_s = 29.45 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Запремина импулса: 50 ml.

Временски период импулног оптерећења: од 50 до 60 секунди.

Проток: $Q_{sr} = 0.014 \text{ l/s}$.

Трајање експеримента: 10 минута.

Експеримент број 3

Показивање сонде (чиста вода): $\kappa_s = 496 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Показивање сонде (импулс): $\kappa_s = 29.96 \mu\text{S}/\text{cm}$.

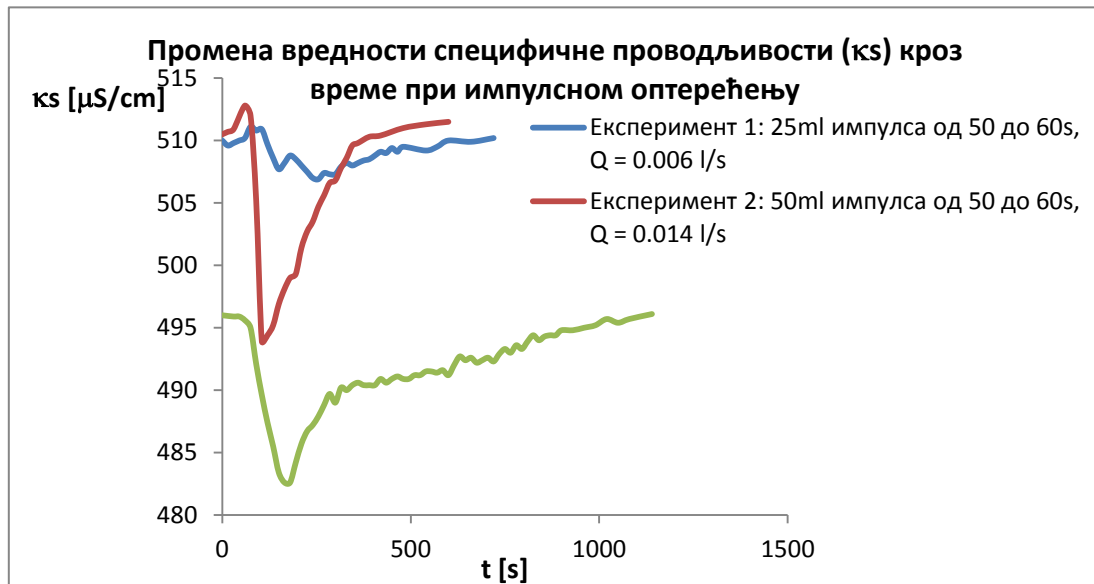
Запремина импулса: 50 ml.

Временски период импулсног оптерећења: од 5 до 15 секунди.

Проток: $Q_{sr} = 0.005 \text{ l/s}$.

Трајање експеримента: 19 минута и 30 секунди.

Резултати експеримената 1, 2 и 3 дати су на слици 4.2.2.1.



Слика 4.2.2.1: Промена специфичне проводљивости (κ_s) кроз време за три експеримента (случај импулсног оптерећења)

4.2.3 Експериментална мерења мутноће при импулсном оптерећењу

Експеримент број 1

Код овог експеримента мерна кутија је напуњена чистом водом чија је мутноћа 3.10 FNU-а. Запремина импулсног оптерећења је 25ml и оптерећење је нането у периоду од 5 – 12 секунди. Волуметријски израчунат средњи проток чисте воде током овог експеримента износио је $Q_{sr} = 0.009 \text{ l/s}$. Експеримент је трајао 18 минута и 15 секунди.

Експеримент број 2

Показивање сонде (чиста вода): мутноћа 2.88 FNU-а.

Запремина импулса: 50 ml.

Временски период импулсног оптерећења: од 5 до 16 секунди.

Проток: $Q_{sr} = 0.004 \text{ l/s}$.

Трајање експеримента: 18 минута и 15 секунди.

Експеримент број 2

Показивање сонде (чиста вода): мутноћа 3.00 FNU-а.

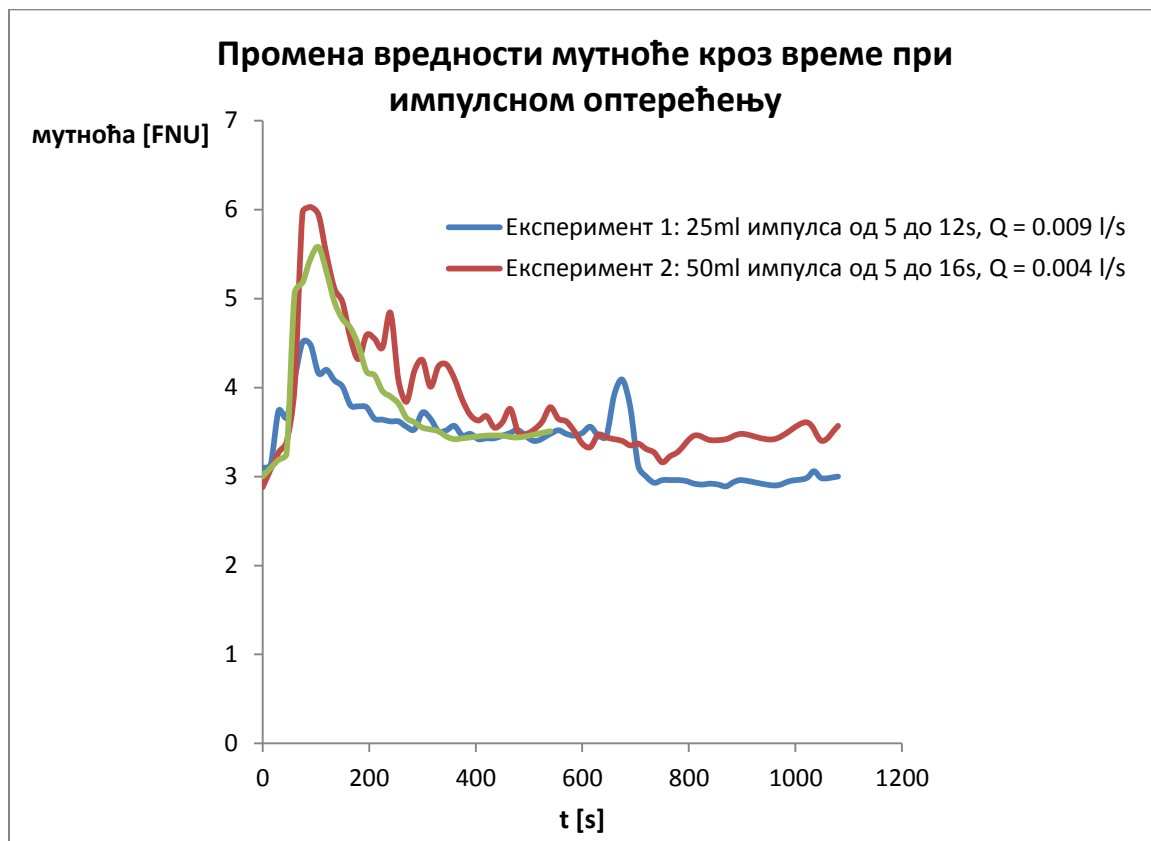
Запремина импулса: 50 ml.

Временски период импулсног оптерећења: од 8 до 28 секунди.

Проток: $Q_{sr} = 0.009 \text{ l/s}$.

Трајање експеримента: 9 минута и 15 секунди.

Резултати експеримената 1, 2 и 3 дати су на слици 4.2.3.1



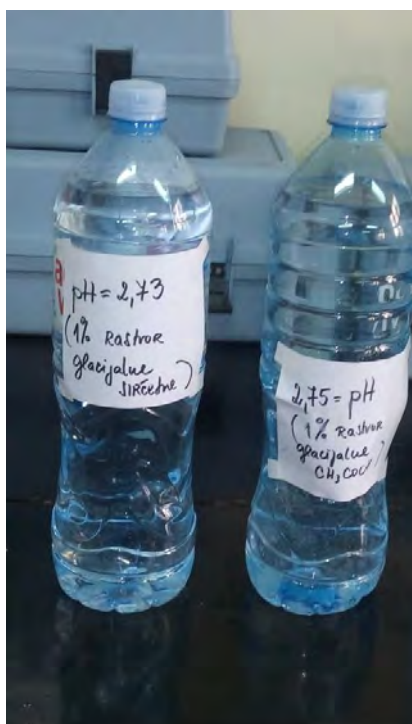
Слика 4.2.3.1: Промена мутноће кроз време за три експеримента (случај импулсног оптерећења)

4.3 Лабораторијски раствори коришћени у експериментима

Из досадашњег садржаја мастер рада лако се долази до закључка да је пре почетка свих експеримената било потребно у лабораторији припремити растворе са константним параметрима квалитета воде које меримо. У исто време битно је да се вредност параметара лабораторијских раствора знатно разликују од воде, због саме успешности експеримената.

4.3.1 Лабораторијски раствор константне рН вредности

Раствор који је коришћен у експериментима за мерење рН вредности је раствор 90% концентроване сирћетне киселине CH_3COOH . Направљен је 1% раствор (15ml конц. CH_3COOH у 1.5 литар воде) и добијена рН вредност раствора у лабораторијским условима је износила 2.75 за раствор 1, односно 2.73 за раствор 2 (слика 4.3.1.1.).

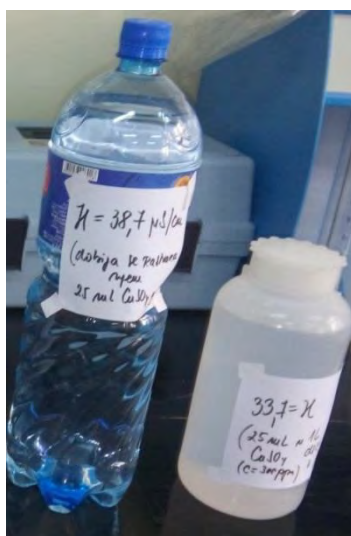


Слика 4.3.1.1: Лабораторијски узорак константне рН вредности коришћен у експериментима

Треба напоменути да је добијени лабораторијски узорак мање рН вредности од чисте воде из градуисаног бурета која ће се даље користити у експериментима (вода из бурета има рН вредност приближно између 7.40 и 7.90).

4.3.2 Лабораторијски раствор константне специфичне проводљивости, κ

Раствор који је коришћен у експериментима за мерење проводљивости је раствор концентрованог бакар – сулфата CuSO_4 (проводљивост у лабораторијским условима $700 \mu\text{S}/\text{cm}$). Направљен је 2.5% раствор (25ml CuSO_4 у 1 литар воде) и добијена проводљивост раствора у лабораторијским условима је износила $38.7 \mu\text{S}/\text{cm}$ за раствор 1, односно $33.7 \mu\text{S}/\text{cm}$ за раствор 2 (слика 4.3.2.1.).



Слика 4.3.2.1: Лабораторијски узорак константне проводљивости коришћен у експериментима

Треба напоменути да је добијени лабораторијски узорак доста мање проводности од чисте воде из градуисаног бурета која ће се даље користити у експериментима (вода из бурета има проводљивост приближно између 460 и 510 $\mu\text{S}/\text{cm}$, у зависности колико стоји). Као и код осталих параметара квалитета воде које меримо, та разлика нам помаже да сагледамо и дефинишемо промене варијабли у контакту са чистом водом.

4.3.3 Лабораторијски раствор са константном вредности параметра мутноће

Раствор који је коришћен у експериментима за мерење мутноће је раствор алумосиликатне врсте глине, бентонита. Због велике мутноће почетно направљеног раствора и принуђености за разблаживањем истог, није одређена тачна концентрација раствора у процентима. То није од неког посебног значаја јер је битно направити раствор са приметно већом мутноћом од чисте воде коју користимо у мерењима (мутноћа чисте воде из бурета износи приближно од 2.2 до 3.1 FNU-а, све зависно од тренутка када се буре напуни, односно од времена колико вода стоји у бурету). Направљен је раствор чија је мутноћа у лабораторијским условима је износила 56 FNU-а за раствор 1, односно 62.3 FNU-а за раствор 2 (слика 4.3.3.1).



Слика 4.3.3.1: Лабораторијски узорак константне мутноће коришћен у експериментима

5 МОДЕЛИРАЊЕ РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНАТА

Као што је у уводу мастер рада (поглавље 1) речено, на основу обављених мерења треба направити и калибрисати математички модел неустаљеног течења у мерној кутији. Сврха модела је успостављање везе између стварне улазне концентрације и измерених вредности, односно могућност инверзне трансформације мерења како би се уклонио утицај саме кутије и обезбедили поузданији подаци (то укључује ублажење концентрације загађења услед мешања са заосталом водом, неуниформно течење и тд.).

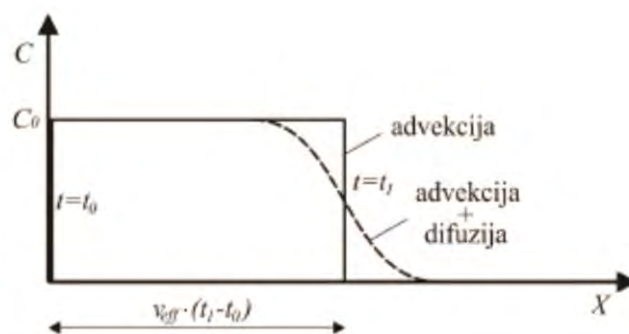
5.1 Предложени модел транспорта загађене воде кроз мерну кутију

Уз претпоставку да је транспорт материје кроз мерну кутију конзервативан и да се дешава скоро идеално мешање, механизам транспорта се може описати помоћу следеће једначине:

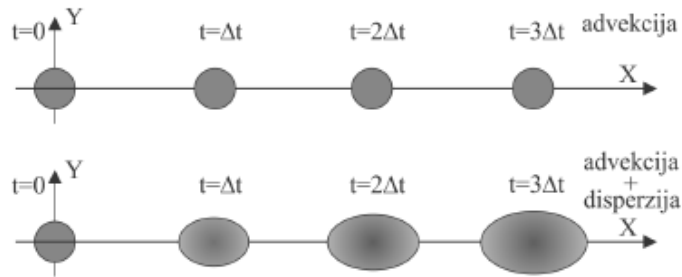
$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v_{eff} \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5.1)$$

Која представља транспортну једначину линијског проблема, где је v_{eff} средња брзина тока дуж главне трајекторије, D коефицијент хидродинамичке дисперзије у правцу главног тока, C концентрација материје у воденом раствору.

Утицај хидродинамичке дисперзије на транспорт дуж x -правца најбоље је илустрован на слици 5.1.1. и 5.1.2. Може се уочити да механизам адвекције има за циљ померање концентрације у x -правцу брзином струјања воде, без успутног смањења њене вредности, док дисперзивност има за циљ ублажавање вредности концентрације. На слици 5.1.2. се види и да се облак загађења под утицајем дисперзије шири и деформише у свим правцима, а не само у правцу кретања воде (у овом случају x -правац).



Слика 5.1.1. Утицај адвекције и дисперзије на распоред концентрације по простору (x -правцу)



Слика 5.1.2. Утицај дисперзије на транспорт загађења при линијском струјању у x -правцу

Коришћење линијске транспортне једначине са коефицијентом хидродинамичке дисперзије само у правцу x осе се оправдава чињеницом да на инсталацији на којој су рађена испитивања, бочне дисперзивности могу да се занемаре (због непропусних граница саме мерне кутије), па остаје једино коефицијент дисперзивност у правцу струјања воде.

Ова једначина се може решавати нумерички, за било који случај, и аналитички за специјалне граничне услове. Овде ће бити приказано аналитичко решење једначине, помоћу које ће бити могуће инверзно рачунање концентрације загађења на улазу у мерну кутију, ако су позната мерења на сонди.

5.2 Аналитичко решење

Ако се уведе покретни координатни систем, који се креће стварном брзином струјања v_{eff} , тада једначина изгледа овако:

$$s = x - v_{eff}t \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial s^2} \quad (5.3)$$

Ова једначина (5.3) има аналитичко решење, до којег су дошли *Ogata* и *Banks* 1961. године.

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - v_{eff}t}{2\sqrt{Dt}} \right) + e^{\left(\frac{v_{eff}t}{D} \right)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x + v_{eff}t}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (5.4)$$

Други члан са десне стране знака једнакости се може занемарити при довољно великој удаљености од координатног почетка:

$$\frac{v_{eff}t}{D} > 500 \quad (5.5)$$

Ово решење је изведено за следеће почетне и граничне услове:

почетни услов:

$$C(x, t = 0) = 0 \quad (5.6)$$

гранични услов:

$$C(x = 0, t) = C_0 \quad (5.7)$$

$$C(x = \infty, t) = 0 \quad (5.8)$$

Када се аналитичко решење (5.4) примени за коришћену инсталацију, уз занемарење другог члана у загради, добија се следеће:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{L - v_{eff}t}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (5.9)$$

Где је једначина (5.9) написана за попречни пресек $x = L$, што представља удаљеност сензора сонде од улазног пресека у мерној кутији.

Може се приметити да је ова функција има исти облик као функција стандардизоване нормалне расподеле $\Phi(z)$, која је повезана са функцијом $\operatorname{erfc}(z)$ на следећи начин:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{z}{\sqrt{2}} \right) \quad (5.10)$$

Где је z ознака за стандардизовану случајну променљиву, која је у бездимензионалном облику.

За вредност стандардизоване случајне променљиве $z = 1$, функција стандардизоване нормалне расподеле износи 0.84, док је за вредност $z = -1$, вредност функције 0.16. Ако се изједначе једначине (5.9) и (5.10), добија се:

$$\frac{L - v_{eff}t}{2\sqrt{Dt}} = -\frac{z}{\sqrt{2}}$$

Односно:

$$\frac{v_{eff}t - L}{\sqrt{2Dt}} = z \quad (5.11)$$

Из једначине (5.11) се види како је добијена стандардизована случајна променљива z . Случајна променљива уствари представља вредност $v_{eff}t$, средња вредност је L , док вредност стандардне девијације износи $\sqrt{2Dt}$.

$$X = v_{eff}t$$

$$\bar{X} = L \quad (5.12)$$

$$\sigma = \sqrt{2Dt}$$

За вредности $z = 1$ и $z = -1$ добија се следеће:

$$\frac{v_{eff}t_{0,84}-L}{\sqrt{2Dt_{0,84}}} = 1 \quad (5.13)$$

$$\frac{v_{eff}t_{0,16}-L}{\sqrt{2Dt_{0,16}}} = -1 \quad (5.14)$$

Одузимањем ове две једначине, може се одредити непознати коефицијент дисперзивности D :

$$\frac{v_{eff}t_{0,84}-L}{\sqrt{2Dt_{0,84}}} - \frac{v_{eff}t_{0,16}-L}{\sqrt{2Dt_{0,16}}} = 2 \quad (5.15)$$

$$D = \frac{1}{8} \left[\frac{v_{eff}t_{0,84}-L}{\sqrt{t_{0,84}}} - \frac{v_{eff}t_{0,16}-L}{\sqrt{t_{0,16}}} \right]^2 \quad (5.16)$$

Треба испитати још пар случајева, када је вредност функције стандардизоване нормалне расподеле, односно функције C/C_0 , једнака 0, 1 и 0.5.

$C/C_0 = 0$

$$erfc\left(\frac{L - v_{eff}t_0}{2\sqrt{Dt_0}}\right) = 0$$

$$\frac{L - v_{eff}t_0}{2\sqrt{Dt_0}} = +\infty \rightarrow t_0 = 0 \quad (5.17)$$

$C/C_0 = 1$

$$erfc\left(\frac{L - v_{eff}t_1}{2\sqrt{Dt_1}}\right) = 2$$

$$\frac{L - v_{eff}t_1}{2\sqrt{Dt_1}} = -\infty \rightarrow t_1 = +\infty \quad (5.18)$$

$C/C_0 = 0.5$

$$erfc\left(\frac{L - v_{eff}t_{0.5}}{2\sqrt{Dt_{0.5}}}\right) = 1$$

$$\frac{L - v_{eff}t_{0.5}}{2\sqrt{Dt_{0.5}}} = 0 \rightarrow L = v_{eff}t_{0.5} \rightarrow v_{eff} = \frac{L}{t_{0.5}} \quad (5.19)$$

Дакле, из карактеристичних вредности времена $t_{0.16}$, $t_{0.5}$, и $t_{0.84}$ се могу одредити величине средње брзине дуж главног правца тока (5.19) и дисперзивности у самој кутији (5.16).

Будући да је циљ да се одреди инверзна вредност, одн. улазна концентрација на основу измерене у кутији, једначина (5.9) се може преуредити на следећи начин:

$$C_{ul} = C_0 = \frac{C}{\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{L-v_{eff}t}{2\sqrt{Dt}}\right)} \quad (5.20)$$

5.3 Резултати

На сликама од 5.3.1. до 5.3.7. су приказани резултати калибрације, одн. одређивања карактеристичних времена за сваки од сензора и сваки од експеримената са мером слагања R^2 . У зависности од средње величине протока и положаја сонде, карактеристична времена $t_{0.16}$, $t_{0.5}$, и $t_{0.84}$ се мењају и то: најмања су за највећи проток и сензор најближи улазном пресеку у мерној кутији.

У табели 5.2. се налазе вредности карактеристичних величина коришћених за прорачун.

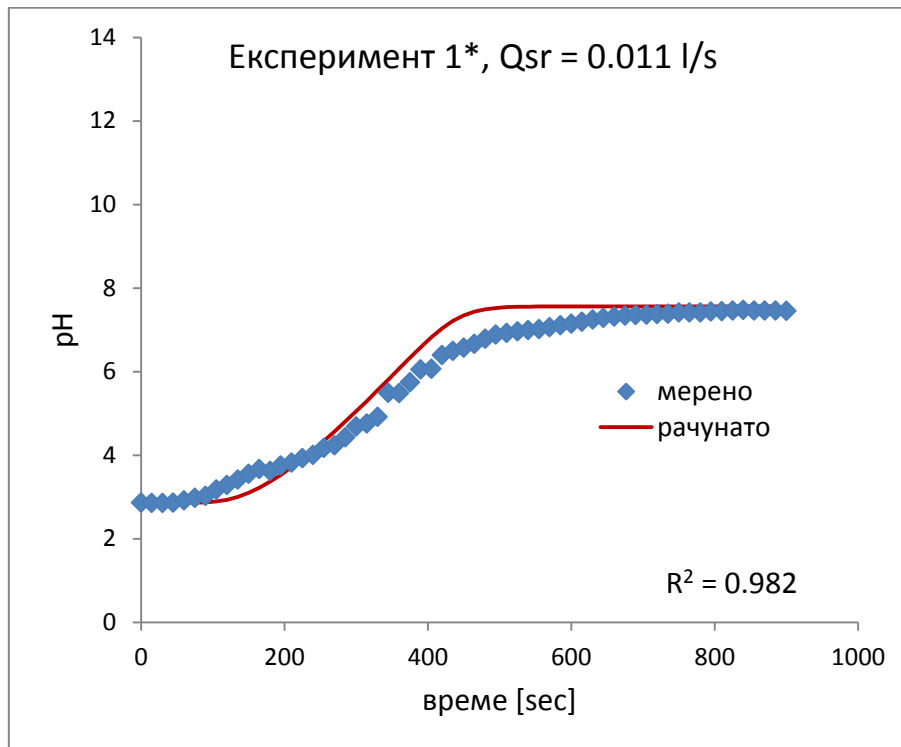
Експеримент		1	2	3
рН	L [m]	0.17		
	$t_{0.5}$ [s]	172		
	v_{eff} [m/s]	1.04E-03		
	D [m ² /s]	5.59E-06		
Проводљивост	L [m]	0.15	0.15	0.15
	$t_{0.5}$ [s]	129.1	99.8	161.3
	v_{eff} [m/s]	1.16E-03	1.50E-03	9.30E-04
	D [m ² /s]	6.25E-06	8.08E-06	0.000005
Мутноћа	L [m]	0.15	0.15	0.15
	$t_{0.5}$ [s]	102	111	115
	v_{eff} [m/s]	1.47E-03	1.35E-03	1.30E-03
	D [m ² /s]	5.64E-06	5.18E-06	0.000005

Табела 5.2: Вредности карактеристичних величина коришћених за прорачун

Важно је напоменути да ће моделска испитивања у овом мастер раду бити рађена само за случај испирања мерне кутије чистом водом, док ће случај импулсног оптерећења бити даљи циљ истраживања. Због другачијих резултата, облика кривих, за случај испирања чистом водом и за случај импулсног оптерећења потребно је применити различите функције, начине моделирања.

5.3.1 Резултати и дискусија моделирања параметра рН вредности

За рН вредност су искоришћена мерења када се сонда налази на повољнијем положају у флуидној струји (слика 4.1.1.2), због хомогенијих резултата, објективнијих и лакших за обраду. Добијено слагање се сматра задовољавајућим ($R^2 = 0.982$). При прорачуну је вођено рачуна да је рН негативна вредност логаритма концентрације H^+ јона, и једначине су примењене баш на концентрацију H^+ јона. На слици 5.3.1.1. приказани су резултати моделирања за Експеримент 1* (поглавље 4.1.1, слика 4.1.1.1.).

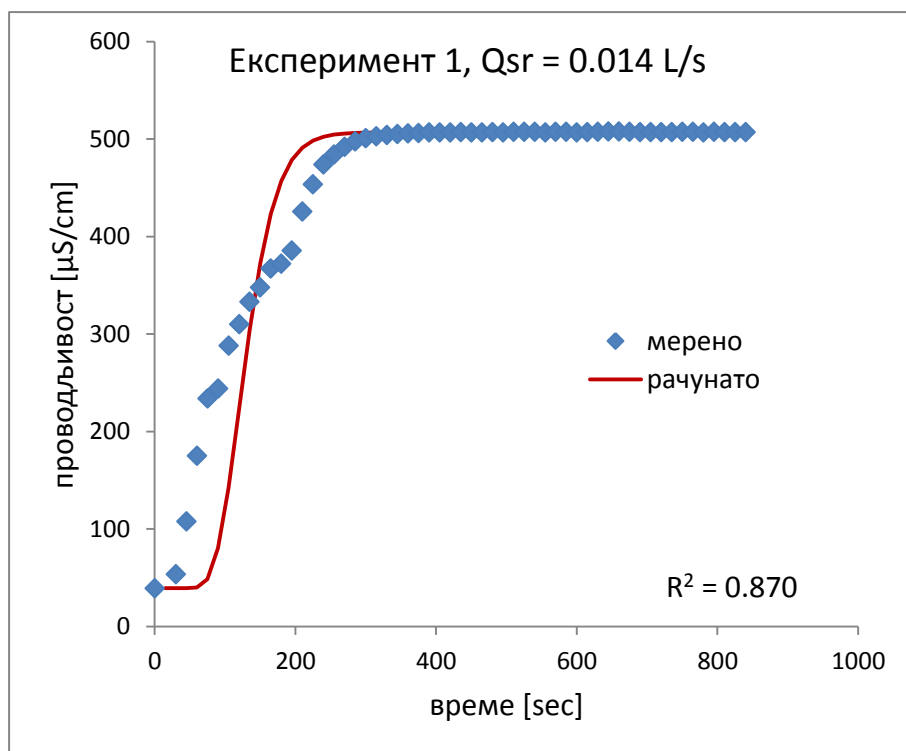


Слика 5.3.1.1: Резултати моделирања промене параметра рН (Експеримент 1*)

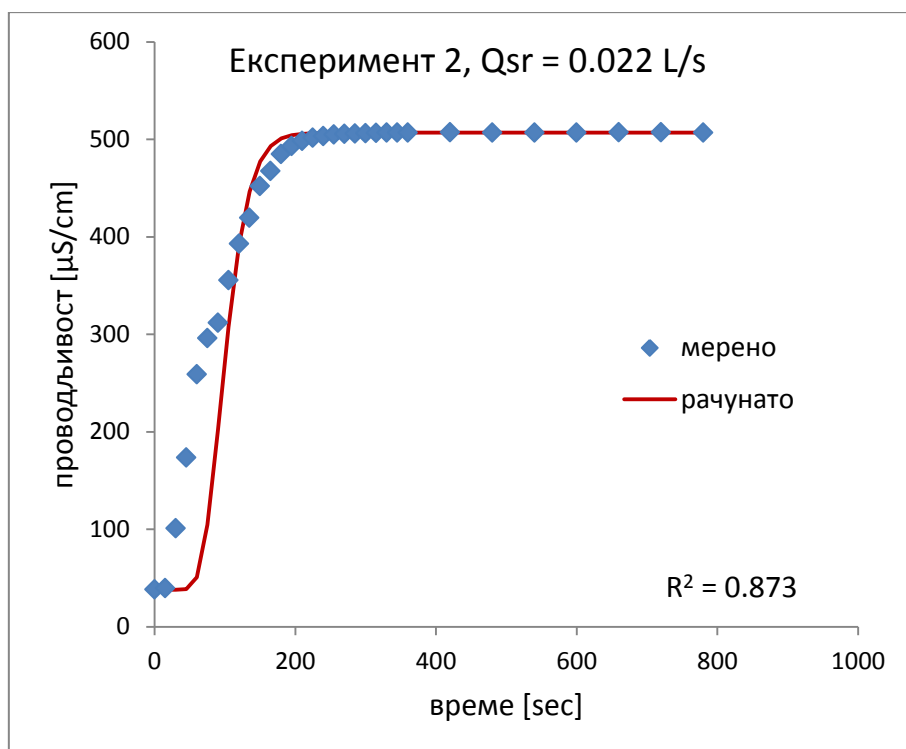
Као што се на слици да приметити, добијена су релативно добра слагања између рачунатих и мерених вредности параметара.

5.3.2 Резултати и дискусија моделирања параметра специфичне проводљивости

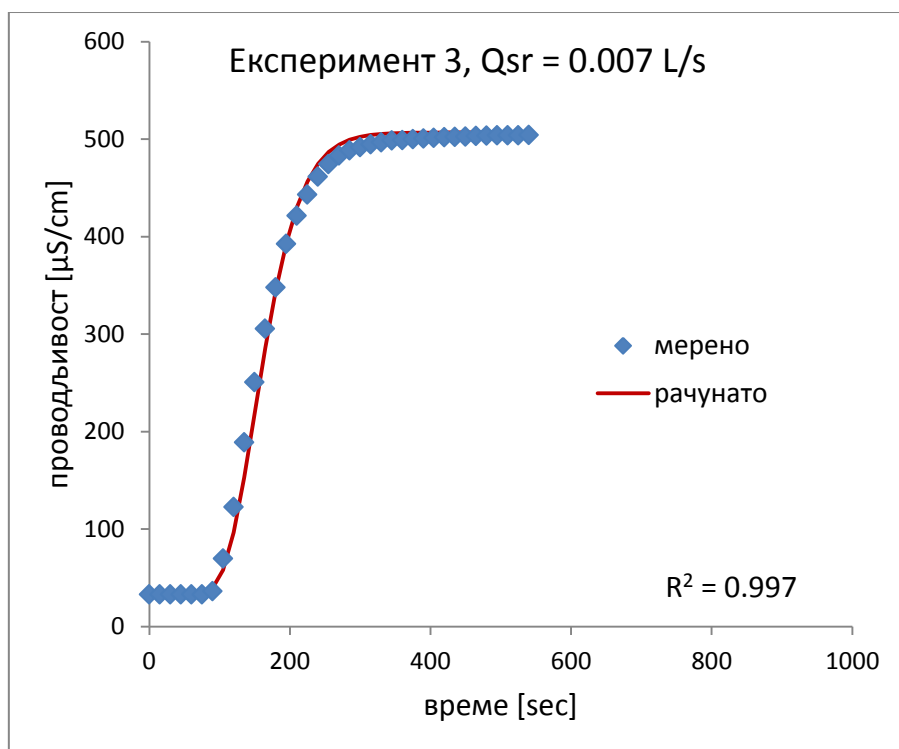
На сликама 5.3.2.1. до 5.3.2.3. приказани су резултати моделирања за сва три експеримента мерења проводљивости у случају испирања мерне кутије чистом водом. Експерименти су описани у поглављу 4.1.2.



Слика 5.3.2.1: Резултати моделирања промене параметра специфичне проводљивости (Експеримент 1)



Слика 5.3.2.2: Резултати моделирања промене параметра специфичне проводљивости (Експеримент 2)

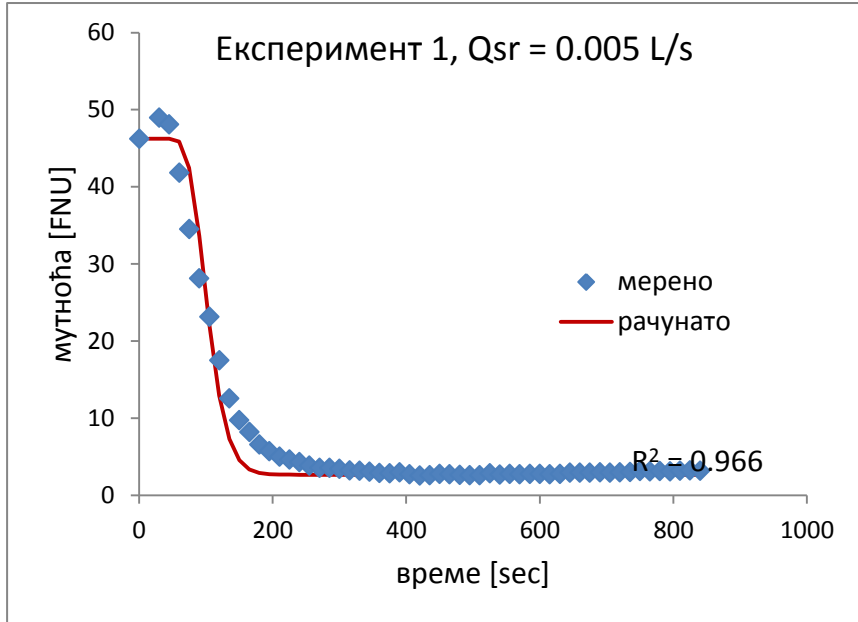


Слика 5.3.2.3: Резултати моделирања промене параметра специфичне проводљивости (Експеримент 3)

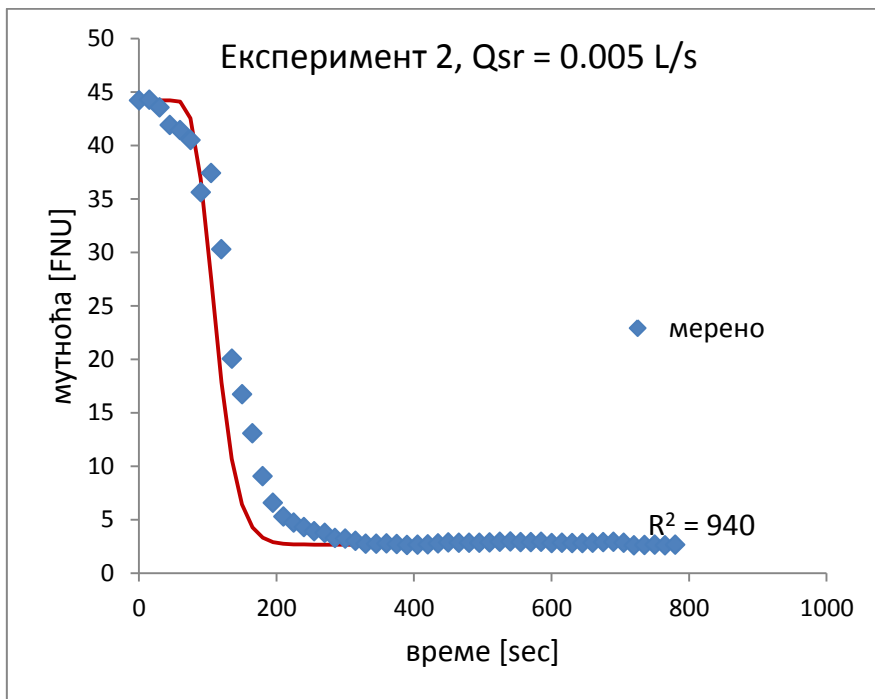
Као што се да приметити са слика изнад, моделирање проводљивости даје најбољи и најједначенији резултат при најмањем протоку (слика 5.3.2.3).

5.3.3 Резултати и дискусија моделирања параметра мутноће

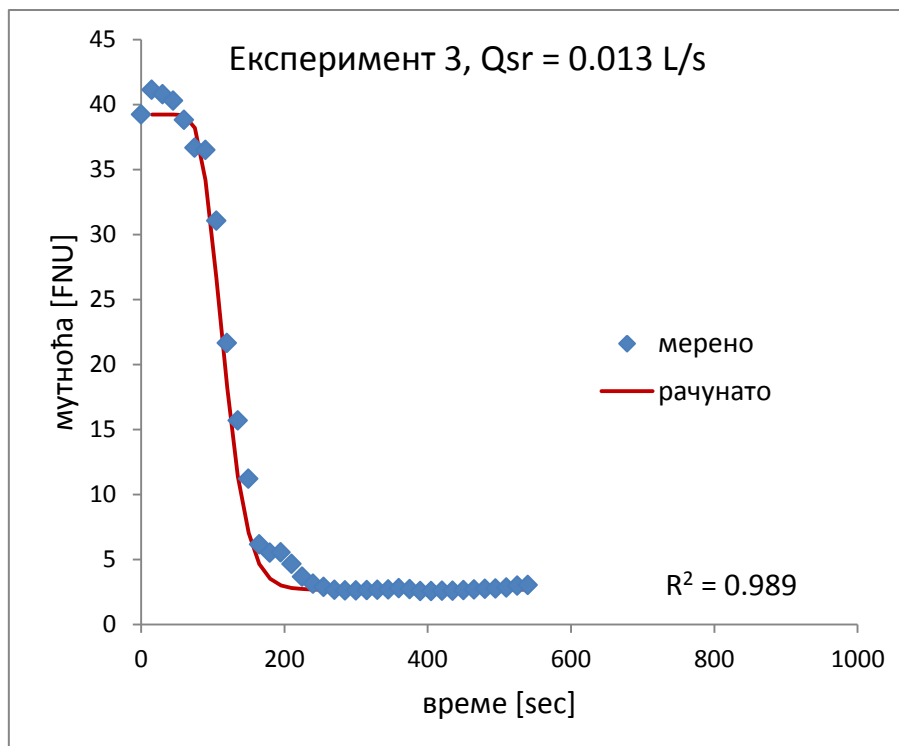
На сликама 5.3.3.1. до 5.3.3.3. приказани су резултати моделирања за сва три експеримента мерења проводљивости у случају испирања мерне кутије чистом водом. Експерименти су описани у поглављу 4.1.3.



Слика 5.3.3.1: Резултати моделирања промене параметра мутноће (Експеримент 1)



Слика 5.3.3.2: Резултати моделирања промене параметра мутноће (Експеримент 2)



Слика 5.3.3.3: Резултати моделирања промене параметра мутноће (Експеримент 3)

Из резултата моделирања параметара мутноће да се закључити да је хомогеност и уједначеност мерених и рачунских вредности параметара приближно иста при мањим и већим протоцима.

Вредности из табеле 5.2 су примењене у једначини (5.20) и добијене су улазне концентрације приказане у табели (5.3). Оно што се може видети јесте да за време краће од карактеристичног $t_{0.5}$, вредност erfc – функције је веома блиско 0, па се тако добијају и изузетно велике улазне концентрације одн. ова врста прорачуна у том случају није сасвим оправдана.

t (s)	Проводљивост [$\mu\text{S/cm}$]			Мутноћа [FNU]		
	1	2	3	1	2	3
0			$-5E+26$			
15	$-6E+29$	$9E+15$	$-4E+10$			
30	$2E+13$	$7E+07$	$-4E+05$			
45	$4E+08$	$1E+05$	$-2E+03$			
60	$2E+06$	$8E+03$	$4E+01$			
75	$1E+05$	$2E+03$	$3E+02$			
90	$2E+04$	$8E+02$	$7E+02$			
105	$5E+03$	589.4	$7E+02$		27.32	
120	$2E+03$	508.2	650.0	1.42	22.26	
135	$1E+03$	475.7	586.3	4.18	14.28	8.30
150	$8E+02$	479.5	543.5	5.75	13.97	7.43
165	$7E+02$	480.0	510.5	6.42	11.81	4.25

180	547.37	490.5	505.5	5.83	8.51	4.74
195	496.44	495.6	496.3	5.39	6.34	5.23
210	501.34	499.2	491.4	4.87	5.20	4.53
225	503.51	501.9	492.5	4.60	4.67	3.62
240	505.87	503.4	493.8	4.27	4.29	3.10
255	503.88	504.9	495.1	3.82	3.89	2.88
270	504.19	505.4	495.5	3.55	3.75	2.67
285	504.96	505.6	496.0	3.54	3.27	2.62
300	505.28	506.1	497.1	3.42	3.21	2.62
315	505.27	506.5	498.2	3.20	3.00	2.63
330	505.69	506.6	499.3	3.16	2.74	2.66
345	506.06	506.8	499.5	3.03	2.75	2.69
360	506.19	506.6	500.2	2.87	2.77	2.78
375	506.38		500.8	2.84		2.70
390	506.76		501.2	2.96		2.57
405	506.99		501.7	2.71		2.56
420	506.95	507.2	502.1	2.54	2.68	2.59
435	507.13		502.6	2.60		2.60
450	506.71		503.0	2.74		2.63
465	506.91		503.5	2.70		2.68
480	507.20	506.9	503.7	2.64	2.82	2.73
495	506.70		503.7	2.57		2.75
510	507.40		503.9	2.60		2.83
525	507.30		504.2	2.82		2.97
540	507.30	506.9		2.66	2.95	3.02
555	506.90		504.1	2.74		
570	507.40			2.73		3.07
585	507.50		504.6	2.74		
600	506.90	506.8		2.76	2.81	3.31
615	507.00		504.5	2.72		
630	507.40			2.75		3.33
645	507.70		504.4	2.91		
660	507.60	507.0		2.93	2.83	3.27
675	507.30		504.7	2.92		
690	507.20		504.7	2.96		3.29
705	507.00		504.5	2.94		3.33
720	507.20	507.0		2.96	2.58	3.36
735	507.00			3.02		
750	507.30			3.15		
765	507.50		504.7	3.09		
780	506.90	506.9		3.14	2.66	3.52
795	507.50			3.09		
810	507.20			3.19		
825	507.20		504.6	3.23		
840	507.20			3.19		3.70

Табела 5.3: Вредности улазних концентрација добијених моделирањем за по 3 експеримента проводљивости и мутноће (случај испирања чистом водом)

6 ПРАВЦИ БУДУЋЕГ ИСТРАЖИВАЊА

У овом поглављу биће описана два додатна експеримента мерења параметара рН вредности и мутноће при модификованом кружном преливу, тачније исти је замењен правоугаоним, чиме је добијен већи проток. Такође, биће укратко дате смернице за даља истраживања.

6.1 Мерење промена параметара рН вредности и мутноће при већим протоцима

Пре него што се почне са експериментима овог типа неопходно је проширити кружни прелив. Да би се то постигло, а да при већем протоку проток преко сигурносног прелива буде једнак нули, неопходно је дефинисати $Q - H$ криву сигурносног прелива. Урађена су 4 мерења протока и висине преливног млаза. Пошто се ради о протоцима већим од 0.03 l/s, за мерење протока укључен је и ЕМ – мерило. Поред мерила, проток је мерен и волуметријски, на основу чега је одређена средња вредност. Проток преко сигурносног прелива, Q^{prel} , добијен је као разлика укупног протока, мереног мерачем и водомером, и протока кроз кружни прелив (мерен волуметријски, флашом). Мерење висине преливног млаза вршено је нонијусом. Сам поступак одређивања $Q - H$ криве и сама крива приказани су на сликама испод.

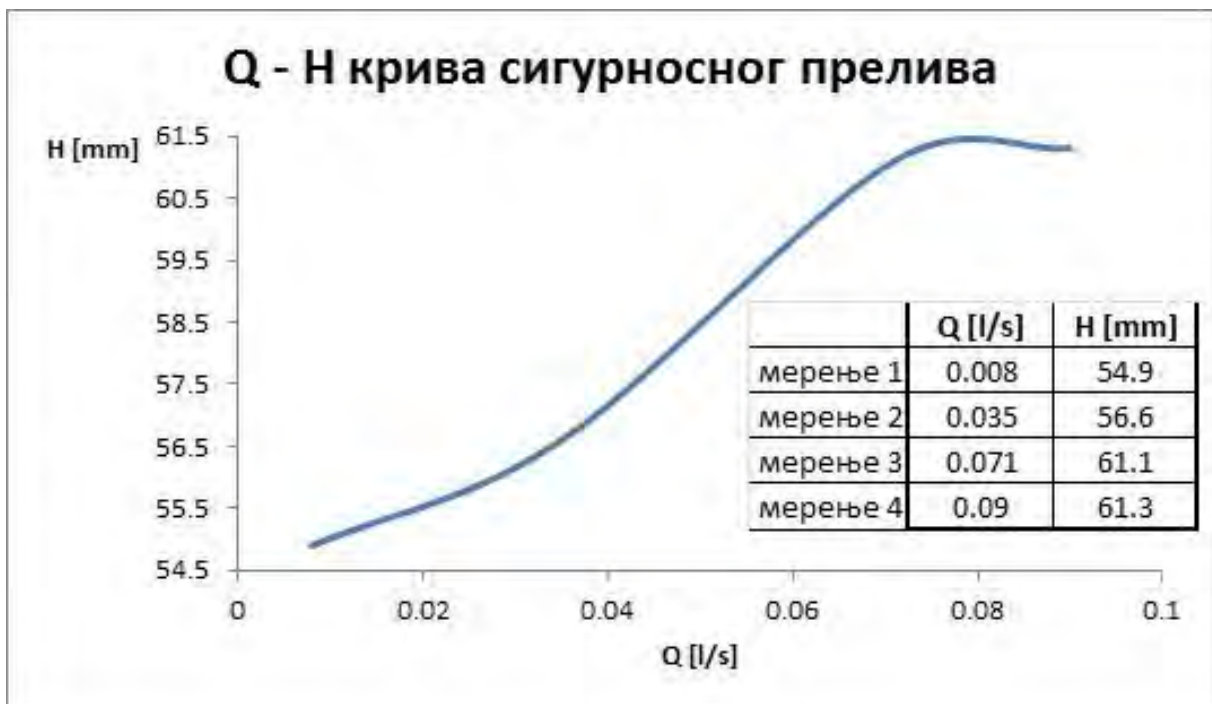


Слика 6.1.1: Пуштање протока у систем и мерење висине преливног млаза нонијусом



Слика 6.1.2: Преливање преко кружног и сигурносног прелива

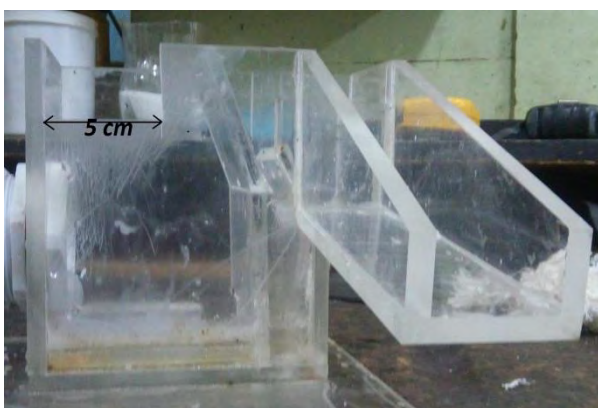
На основу описаних мерења добијена је $Q - H$ крива сигурносног прелива. Крива је приказана на слици 6.1.3.



Слика 6.1.3: Резултати мерења протока и висине преливног млаза сигурносног прелива и добијена $Q - H$ крива

На основи добијене криве димензионисан је нови, правоугаони прелив уместо првобитног кружног (поглавље 3.1.1.).

Одабрано је решење са правоугаоним преливом чије ће дно бити за 2 милиметра ниже од првобитног кружног прелива и чија ће ширина бити 5 сантиметара.



Слика 6.1.4: Димензионисање и израда новог прелива који би задовољио веће протоке



Слика 6.1.5: Преливање преко израђеног новог, правоугаоног прелива

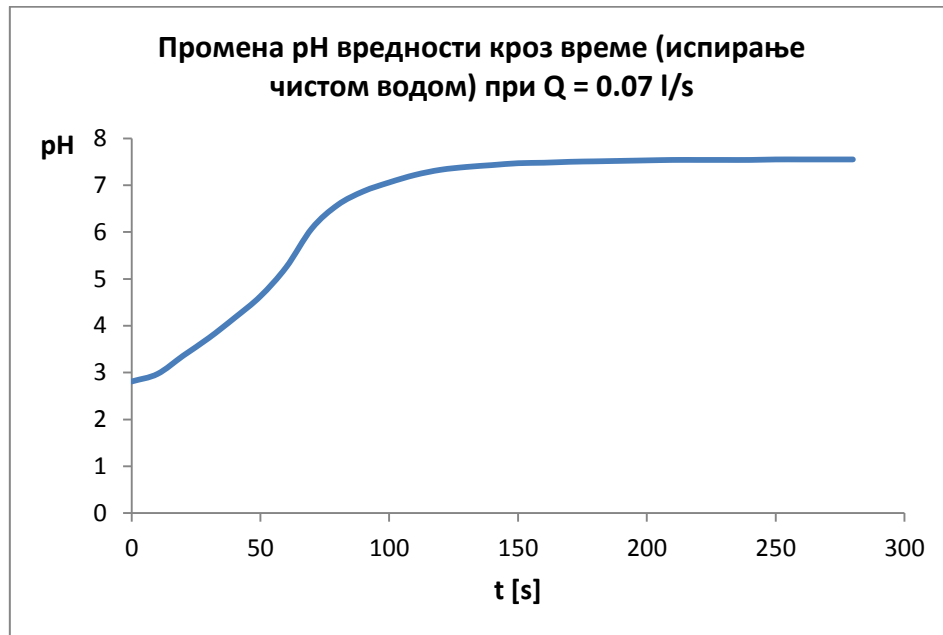
Експеримент мерења рН вредности при већем протоку (случај испирања чистом водом)

Показивање сонде: рН = 2.81 (раствор).

Показивање сонде: рН = 7.60 (чиста вода из бурета).

Проток: $Q_{sr} = 0.07$ l/s.

Трајање експеримента: 5 минута.



Слика 6.1.6: Промена рН вредности кроз време за случај већих протока

Са слике изнад се да закључити да је при новом преливу промена рН вредности хомогенија и лакша за обраду поред чињенице да се сонда налази на неизмењеном положају, тачније на првобитном, што није случај када је био кружни прелив, а сонда на том истом положају (поглавље 4.1.1.). Такође, испирање кутије је доста брже, самим тим и успостављање константне вредности рН.

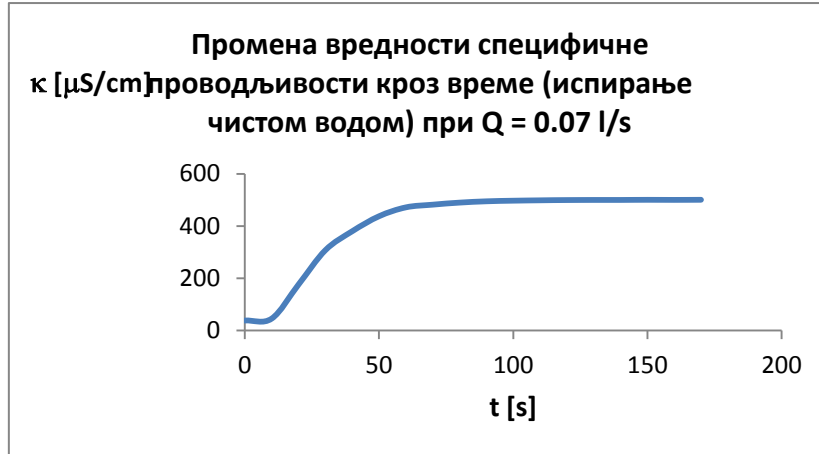
Експеримент мерења специфичне проводљивости при већем протоку (случај испирања чистом водом)

Показивање сонде: $\kappa_s = 38.20$ μ S/cm (раствор).

Показивање сонде: $\kappa_s = 500.5$ μ S/cm (чиста вода из бурета).

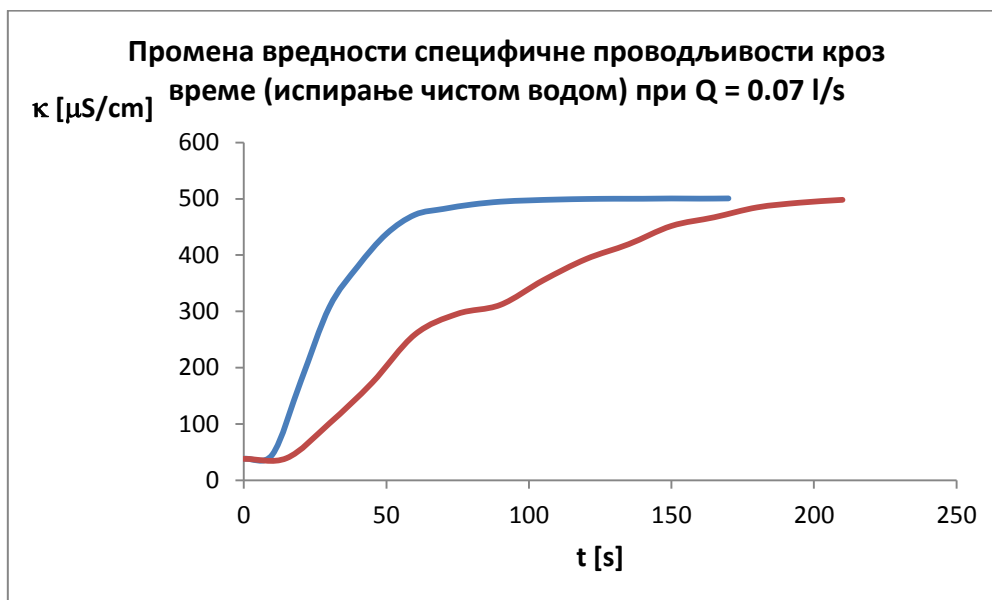
Проток: $Q_{sr} = 0.07$ l/s.

Трајање експеримента: 3 минута.



Слика 6.1.7: Промена специфичне проводљивости кроз време за случај већих протока

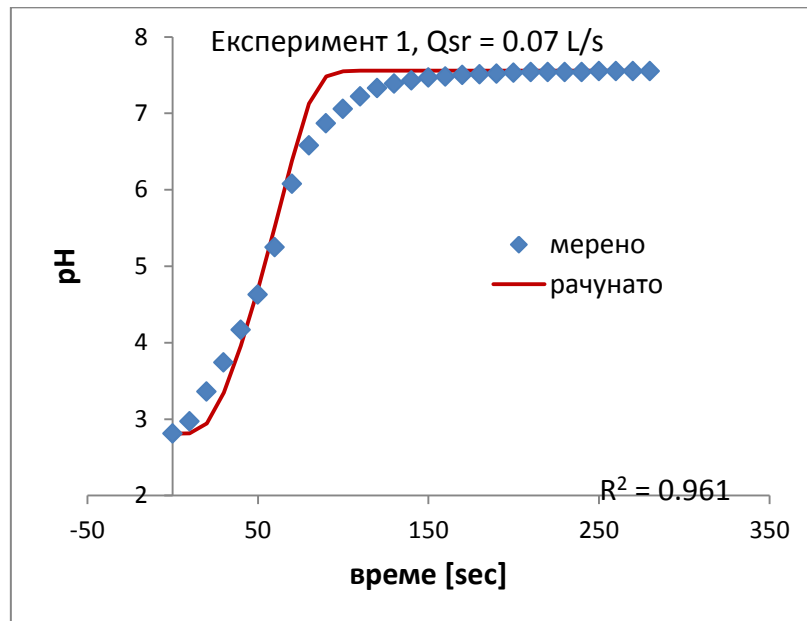
На слици 6.1.7. приказано је поређење резултата мерења електро – проводности (Експеримент 2, слика 3.1.2.1.). Јасно је видљиво да при већим протоцима долази до бржег испирања кутије, самим тим брже достизање константне вредности електро – проводности (која је једнака вредности за воду).



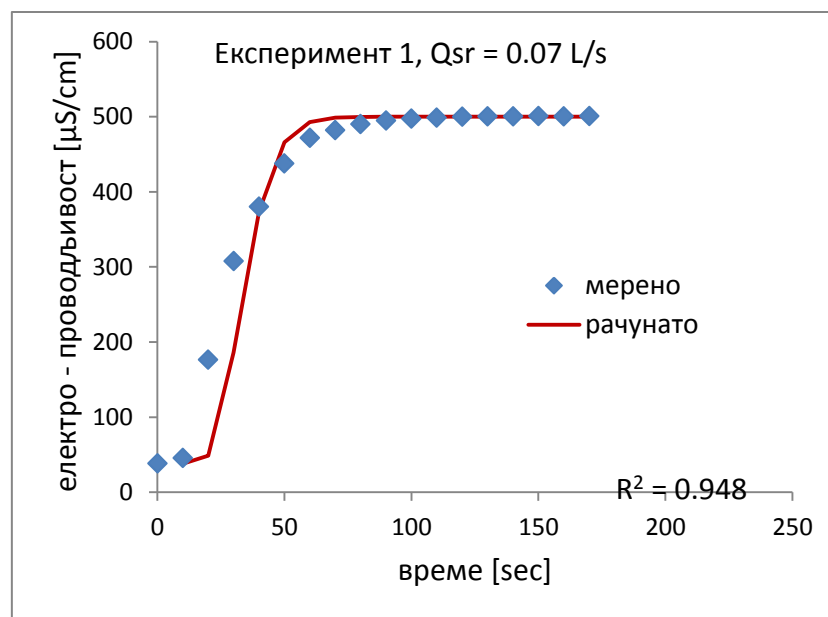
Слика 6.1.8: Промена специфичне проводљивости кроз време

- 1) За случај већих протока ($Q = 0.07$ l/s, нов правоугаони прелив) – **плава линија**
- 2) За случај мањих протока ($Q = 0.022$ l/s, кружни прелив) – **црвена линија**

6.1.1 Резултати и дискусија математичког моделирања за експериментална мерења параметара рН и електро – проводности при већим протоцима



Слика 6.1.1.1: Резултати моделирања промене параметра рН вредности



Слика 6.1.1.2: Резултати моделирања промене параметра електро – проводљивости

На основу слика 6.1.1.1. и 6.1.1.2. закључује се да су резултати моделирања релативно добри, прецизни, тачније постоји блиска зависност између мерених и рачунатих вредности параметара квалитета за случај већих протока.

6.2 Предлози за даља истраживања

На основу урађених експеримената, израде мерне кутије и моделирања у овом мастер раду, као правци будућег истраживања могу се навести:

- Моделирање параметара квалитета при импулсном оптерећењу
 - Мерење промена параметара квалитета при импулсном оптерећењу и већим протоцима
 - Изношење целе диспозиције система у двориште Института за хидротехнику и мерење параметара квалитета кишнице са дела крова
 - Калибрација сонди за мерење параметара квалитета воде
- и тд.

7 ЛИТЕРАТУРА

[1] Н. Јаћимовић - *Скрипта из предмета Експлоатација и заштита подземних вода*
http://hikom.grf.bg.ac.rs/web_stranice/KatZaHidr/Predmeti/EkspZastPodzVoda/EkspZastPodzVoda_files/Materijali/Skripta1deo.pdf

[2] Д. Продановић – *Скрипта са предавања из предмета Мерења у хидротехници*
http://hikom.grf.bg.ac.rs/web_stranice/KatZaHidr/Predmeti/Merenja/Literatura/Skripta/TeKst/Skripta.html

[3] Сајт произвођача мерне опреме Endress + Hauser
<http://www.endress.com/en>

[4] В. Рајаковић – Огњановић (2012) *Квалитет вода – лабораторијски приручник, Практикум за наставу*, Грађевински факултет Београд
<http://www.grf.bg.ac.rs/~vladana/Praktikum.html>