



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



**АНАЛИЗА МЕХАНИЗМА ПРОЦЕСА КОЛМИРАЊА
БУНАРА СА ХОРИЗОНТАЛНИМ ДРЕНОВИМА И ПРИМЕНА
НОВОГ АЛГОРИТМА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ПРИ
СИМУЛАЦИЈИ РАДА БУНАРА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:

Др Срђан Ковачевић

Кандидат:

Давид Митриновић

Нови Сад, 2024. година

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Давид Митриновић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	Др Срђан Ковачевић, научни сарадник, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду
Наслов рада:	Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренама и примена новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара
Језик и писмо рада:	Српски језик, ћирилично писмо
Физички опис рада:	Унети број: Страница <u>200</u> Поглавља <u>7</u> Референци <u>70</u> Табела <u>12</u> Слика <u>25</u> Графикона <u>109</u> Прилога _____
Научна област:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Ужа научна област (научна дисциплина):	Инжењерство заштите животне средине
Кључне речи / предметна одредница:	колмирање, гвожђе, бунар са хоризонталним дренама
Апстракт на језику рада:	Израз „старење бунара“ означава скуп процеса који се одвијају на водопријемним деловима бунара и у њиховој непосредној близини, који доводе до повећања отпора струјању при црпљењу воде из бунара и на крају, до коначног пропадања бунара. Природа процеса „старења бунара“ је физичка, хемијска и микробиолошка. Постоје два основна узрока старења бунара: колмирање (зачепљивање) и корозија. Смањење издашности бунара, тј. старење, проузроковано је смањењем површине кроз коју пролази вода, услед запушавања и сужавања порног простора у прифилтарској зони вертикалних бунара или бунара са хоризонталним дренама, као и приликом смањења броја и дужине активних дрена код бунара са хоризонталним дренама када су физички толико оштећени да се материјал из издани пробија у унутрашњост дрена и запушава дрена, што доводи до драстичног смањења протока кроз дрена и пескарења. Наведена појава је последица

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовестности штапане и електронске верзије докторског рада и дозвола за објављивање личних података;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају у институцији у штапаном и електронском облику и не корице се са радом.

	<p>микробиолошких процеса и хемијске корозије материјала дрена. Ако корозија није интензивна, повећање локалних отпора услед смањења пречника и запушавања пора због накупљања продуката микроорганизама и њихове биомасе узрокује смањење протика кроз дрена иако је њихов механички интегритет очуван.</p> <p>Старење бунара има велики економски значај, који се најдиректније може проценити кроз цену инсталација за црпљење подземне воде којима би се могао надокнадити изгубљени капацитет.</p> <p>Први циљ истраживања је да се установе функције које повезују брзину процеса колмирања са вредностима параметара средине и протока по дрена, затим да се квантификују ефекти регенерације бунара и да се установљене функционалне зависности имплементирају у програму који симулира рад бунара за различите режиме рада и учестаности регенерација, карактеристике водоносне средине (хидраулички отпор) и вредности параметара квалитета подземне воде (концентрација двовалентног гвожђа и редокс потенцијал). Сврха новог алгоритма је предвиђање резултата експлоатације новог бунара или постојећег бунара са новим дренама на предвиђеној локацији. Најважнији резултати су квалитетна корелација између брзине раста отпора на дренама бунара и концентрације раствореног двовалентног гвожђа и протока по дрена, затим квантификација ефеката регенерација дрена и практичан софтвер за симулирање рада бунара за различите режиме рада и учестаности регенерација, карактеристике водоносне средине и подземне воде.</p> <p>Други циљ истраживања је коришћење наменски креираног програма са нумеричким моделом сегмента дрена са околним материјалом за симулације утицаја процеса колмирања на микро нивоу и његово испољавање на макронивоу и калибрацијом са резултатима осматрања на терену, као и одређивање параметара у теоријским моделима процеса. Теоријски модели обухватају функцију односа између протока и концентрације двовалентног гвожђа и брзине попуњавања порног простора (промене порозности) и функцију односа између промене у порозности и промене коефицијента хидрауличке проводљивости. Поред доприноса квантификацији ефеката процеса колмирања резултат истраживања је и нови алгоритам са нумеричким моделом струјања кроз хетерогену и временски променљиву средину, који се у будућности може искористити за унапређивање нумеричких модела у комерцијалним софтверским пакетима за хидродинамичко моделирање како би се природна хетерогеност водоносног материјала и темпоралне промене коефицијента филтрације услед колмирања порног простора узеле у обзир.</p> <p>Трећи циљ истраживања је практична примена сазнања о процесима колмирања приликом симулације рада групе бунара на београдском изворишту која укључује симулацију ефеката струјања подземне воде кроз аквифер и кроз колмирани слој око дрена са урачунавањем утицаја околних бунара, промене отпора струјању током времена услед колмирања, регенерације бунара и утискивања нових дрена, као и аутоматску оптимизацију избора бунара у које ће бити утиснути нови дрена. Резултат је софтвер који се може применити на било коју групу бунара у сличним хидрогеолошким условима, уз мање измене и допуне и у другачијим условима.</p>
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	23.8.2021.

Датум одбране: (Попуњава накнадно институција)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: Др Маја Петровић, ванредни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду Члан: Др Ивана Михајловић, ванредни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду Члан: Др Марија Перовић, научни сарадник, Институт за водопривреду Јарослав Черни а.д., Београд Члан: Др Драгољуб Бајић, ванредни професор, Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду Ментор: Др Срђан Ковачевић, научни сарадник, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду
Напомена:	

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES**

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	David Mitrinović
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Dr Srđan Kovačević PhD, Science Associate, Faculty of technical sciences
Thesis title in English:	Analysis of the mechanism of the colmation process on radial wells and the application of a new algorithm for optimization in well operation simulation
Language and script:	Serbian language, Cyrillic script
Physical description:	Number of: Pages <u>200</u> Chapters <u>7</u> References <u>70</u> Tables <u>12</u> Illustrations <u>25</u> Graphs <u>109</u> Appendices _____
Scientific field:	Environmental engineering and Occupational Safety and Health
Scientific subfield (scientific discipline):	Environmental engineering
Subject, Key words:	plugging, iron, collector radial well
Abstract in English:	<p>The term "well aging" means a set of processes that take place on the intake parts of the well and in their immediate vicinity, which lead to an increase in resistance to the flow toward the well, and ultimately, and to the final deterioration of the well. The nature of these processes is physical, chemical and microbiological. There are two main causes of well aging: plugging and corrosion.</p> <p>Reduction of yield of wells, i.e. aging is caused by the reduction of the surface through which the water passes, due to clogging and narrowing of the pore space in the pre-filter zone of vertical or horizontal wells, or by reducing the number and length of active drains in wells with horizontal drains when they are physically so damaged that the aquifer material breaks through into the interior of the drain and clogs the drain, which leads to a drastic reduction in the flow through the drain and washing out of sand. It is a consequence of microbiological processes and chemical corrosion of the drain material. If the corrosion is not intense, the increase of local resistances due to the reduction</p>

² The author of the doctoral dissertation has signed the following Statements:

- 5Ā – Statement on the authorship,
- 5B – Statement that the printed and e-version of the doctoral dissertation are identical and authorization to use personal data,
- 5r – Copyright statement.

The paper and e-versions of Statements are held at the institution and are not included into the printed thesis.

	<p>of the diameter and the clogging of the pores caused by the accumulation of the products of microorganisms and their biomass causes a decrease in the flow through the drains although their mechanical integrity is preserved.</p> <p>The aging of wells has great economic importance, which can be most directly assessed through the cost of groundwater extraction installations that could compensate for the lost capacity.</p> <p>The first goal of the research is to establish the functions that connect the rate of the plugging process with the values of the environmental parameters and flow per drain, to quantify the effects of well regenerations, and to implement the established functional dependencies in a software that simulates the operation of wells for different modes of operation and frequencies of regeneration, characteristics of the aquifer (hydraulic resistance) and values of groundwater quality parameters (concentration of bivalent iron and redox potential). The purpose of this software is to predict the results of exploitation of a new well or an existing well with new drains at the intended location. The most important results are the establishment of good correlation between the rate of growth of resistance at well drains and the concentration of dissolved bivalent iron and flow per drain, quantification of the effects of well regenerations, and practical algorithm for simulating the operation of wells for different modes of operation and frequency of regeneration, and different characteristics of the aquifer environment and groundwater.</p> <p>The second goal of the research is to use a purpose-written program with a numerical model of the drain segment with the surrounding material to examine through simulations the impact of the plugging process on the micro level and its manifestation on the macro level, and to determine the parameters in the theoretical models of the process by calibration with the results of observations in the field. These theoretical models include a function of the relationship between the flow and bivalent iron concentration, and the rate of filling of the pore space (porosity change), and a function of the relationship between the change in porosity and the change in the coefficient of hydraulic conductivity. The result of the research, in addition to the contribution to the quantification of the effects of the plugging process, is also a program with a numerical model of flow through a heterogeneous and time-varying environment, which in the future can be used to improve the numerical models in the commercial software packages for hydrodynamic modeling in order to account for the natural heterogeneity of the aquifer material and the temporal changes of the coefficient of hydraulic conductivity due to the pore space plugging.</p> <p>The third goal is the practical application of knowledge about plugging processes to the simulation of the operation of a group of wells at the Belgrade watersource, which includes the simulation of the effects of groundwater flow through the aquifer and through the plugged layer around the drains, taking into account the influence of surrounding wells, changes in flow resistance over time due to plugging, regeneration of wells and insertion of new drains, as well as automatic optimization of the selection of wells into which new drains will be installed. The result is software that can be applied to any group of wells in similar hydrogeological conditions, and with minor modifications and additions in different conditions also.</p>
Date of endorsement by the scientific board:	23 rd August 2021
Date of defence: (Filled in by the institution)	

Thesis defence board: (title, first name, last name, position, institution)	Chair: Dr Maja Petrović PhD, Associate Professor, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad Member: Dr Ivana Mihajlović PhD, Associate Professor, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad Member: Dr Marija Perović PhD, Science Associate, Jaroslav Černi Water Institute, Belgrade Member: Dr Dragoljub Bajić PhD, Associate Professor, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade Menthor: Dr Srđan Kovačević PhD, Science Associate, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad
Note:	

ЗАХВАЛНОСТ

Захваљујем се родитељима, мајци Катарини и оцу Светиславу, на свој љубави и подршци које су ми дали, и на томе што су веровали у мене и трпели ме док сам мењао факултете. Ранку Божовићу, свом првом директору и тежи сам захвалан што ми је одмах након завршетка студија дао леп, креативан и инспиративан посао захваљујући коме сам почео да се бавим хидрогеологијом. Захвалан сам и свом другом директору професору Милану Димкићу чија је идеја била да упишем докторске студије и захваљујући коме сам почео да се бавим научним радом и проблематиком колмирања бунара, ослањајући се на његова, и истраживања професора Миленка Пушића, коме сам захвалан на обиљу обрађених података које ми је дао. Институту за водопривреду „Јарослав Черни“ и драгим колегама сам захвалан на финансијској и свој другој подршци у научном раду и изради ове дисертације. Велику захвалност дугујем свом ментору др Срђану Ковачевићу на драгоцену помоћ у формирању и писању дисертације и проласку кроз цео формални процес до њене одбране.

Захваљујем се члановима Комисије, и пријатељима, др Маји Петровић, др Ивани Михајловић, др Марији Перовић и др Драгољубу Бајићу на корисним сугестијама и великој подршци и доприносу у изради дисертације. Велику подршку на докторским студијама ми је пружила и драга професорка Мирјана Војиновић – Милорадов.

Посебно сам захвалан својој породици – супрузи Ивани, ћерки Ливији и сину Матеју, на великој љубави коју ми пружају, топлини дома и на томе што су увек уз мене.

САДРЖАЈ:

1	УВОД.....	22
2	СТАЊЕ У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА	26
3	ПРЕДМЕТ, ПРОБЛЕМ, ЦИЉЕВИ И ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	34
4	МЕТОДОЛОГИЈА	37
4.1	Одређивање корелације између брзине колмирања и физичко-хемијских параметара средине и протицаја по дренажу, развој математичког и симулационог модела рада бунара и анализа утицаја режима рада бунара на процес колмирања	37
4.1.1	Увод.....	37
4.1.2	Локације, период и методи осматрања бунара.....	38
4.1.2.1	Локације бунара.....	38
4.1.2.2	Метод хидрауличких мерења	43
4.1.2.3	Метод <i>in-situ</i> мерења и узорковања подземне воде	45
4.1.2.4	Метод лабораторијских физичко - хемијских анализа	47
4.1.2.5	Локални губици на дренажима – дефиниција и одређивање.....	48
4.1.3	Ефекти регенерације	50
4.1.4	Губици услед струјања кроз аквафер.....	51
4.1.5	Испитивање корелација <i>KLHR</i> са протоком, редокс потенцијалом и концентрацијом раствореног двовалентног гвожђа, анализа рада и перформанси бунара	54
4.1.6	Испитивање корелација ефеката регенерације са потенцијално релевантним факторима	55
4.1.7	Израда математичког и модела симулације рада бунара	55
4.2	Одређивање механизма биохемијског колмирања бунара	57
4.2.1	Увод.....	57
4.2.2	Микроорганизми и биохемијско колмирање	57

4.2.3	Моделовање промене запремине порног простора и утицаја на хидрауличку проводљивост и прерасподелу протока у зони изложеној колмирању	60
4.2.3.1	Просторни распоред параметара водоносне средине према статистичкој анализи гранулометријског састава узорака материјала	61
4.2.3.2	Нумерички модел са прорачуном колмирања порног простора.....	67
4.2.3.2.1	Просторна и временска дискретизација и прорачун струјања	67
4.2.3.3	Прорачун утицаја колмирања порног простора на порозност и коефицијент хидрауличке порозности	71
4.3	Развој аналитичког модела за симулацију утицаја процеса колмирања на рад групе бунара са хоризонталним дренажима.....	73
4.3.1	Хидрогеолошка шематизација и аналитичка једначина струјања	74
4.3.2	Утицај локалних губитака	78
4.3.3	Утицај регенерације дренажа и квантификација ефеката.....	79
4.3.4	Утискивање дренажа и квантификација ефеката	79
4.3.4.1	Расподела протока између старих и нових дренажа	80
4.3.5	Модел и његова примена на одабрану групу бунара.....	83
4.3.6	Начин рада оптимизационог алгоритма	88
4.3.6.1	Аутоматско одређивање оптималне комбинација бунара у које се утискују дренажи	88
4.3.6.2	Израчунавање протока за све комбинације бунара у које се утискују дренажи	89
4.3.7	Калибрација и провера модела, добијање улазних података за симулацију	90
4.3.7.1	Груба калибрација коефицијената филтрације	90
4.3.7.2	Фина калибрација коефицијената филтрације	90
4.3.7.3	Симулација периода покривеног осматрањима и добијање улазних података за симулацију	91
5	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	103
5.1	Корелације између брзине колмирања и физичко-хемијских параметара средине и протицаја по дренажу и анализа утицаја режима рада бунара на процес колмирања.....	103
5.1.1	KLHR и просечне вредности протока по дренажу	103

5.1.2	Резултати регресионе анализе <i>KLHR</i> – корелације са концентрацијом двовалентног гвожђа и редокс потенцијалом.....	119
5.1.3	Ефекти регенерације	123
5.1.4	Критичне брзине и протоци по дренажу у односу на концентрацију двовалентног гвожђа.....	126
5.1.5	Критичне брзине и протоци по дренажу у односу на редокс потенцијал.....	129
5.1.6	Математички модел за прорачун обарања нивоа.....	130
5.1.7	Анализа рада бунара софтверским моделом	132
5.1.7.1	Константан проток између регенерација	132
5.1.7.1.1	Критичне брзине и протоци по дренажу	134
5.1.7.2	Константан ниво између регенерација.....	135
5.1.8	Софтверски алат за симулацију рада бунара.....	139
5.1.8.1	Улаз модела.....	140
5.1.8.2	Излаз из модела	142
5.1.9	Дискусија	144
5.2	Одређивање механизма биохемијског колмирања бунара	146
5.2.1	Моделирање промене запремине порног простора и њеног утицаја на хидрауличку проводљивост и прерасподеле протока у зони изложеној колмирању	146
5.2.1.1	Просторни распоред параметара водоносне средине према статистичкој анализи гранулометријског састава узорка материјала	146
5.2.1.1.1	Rb-15.....	149
5.2.1.1.2	Rb-16.....	153
5.2.1.1.3	Rb-20.....	157
5.2.1.1.4	Rb-8.....	159
5.2.1.1.5	Rb-5m.....	162
5.2.1.2	Просторни распоред параметара водоносне средине у моделу.....	166
5.2.1.2.1	Rb-15.....	167
5.2.1.2.2	Rb-16.....	170
5.2.1.2.3	Rb-20.....	173
5.2.1.2.4	Rb-8.....	176

5.2.1.2.5 Rb-5m.....	179
5.2.2 Дискусија	183
5.2.2.1 Анализа средњих вредности коефицијента брзине колмирања добијених калибрацијом модела за Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 ...	183
5.3 Развој аналитичког модела за симулацију утицаја процеса колмирања на рад групе бунара са хоризонталним дренажима.....	186
5.3.1 Резултати симулација перформанси групе бунара са хоризонталним дренажима	186
5.3.2 Дискусија	188
6 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	190
6.1 Корелације између брзине колмирања и физичко-хемијских параметара средине и протицаја по дренажу и анализа утицаја режима рада бунара на процес колмирања.....	190
6.2 Одређивање механизма биохемијског колмирања бунара	191
6.3 Развој аналитичког модела за симулацију утицаја процеса колмирања на рад групе бунара са хоризонталним дренажима.....	193
7 ЛИТЕРАТУРА	195

СПИСАК ИЛУСТРАЦИЈА:

Слика 1 Локације 81 бунара (на Основној геолошкој карти (ОГК) 1:100 000, лист Београд) са хоризонталним дренама на Београдском изворишту	39
Слика 2 Локације 29 бунара (на ОГК 1:100 000, лист Београд) за које је процењено да је доминантни узрок повећања локалних хидрауличких отпора на дренама колмирање (црвене тачке). Плаве тачке представљају остала 52 бунара.....	40
Слика 3 Локације 5 бунара са новим дренама – Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 (на ОГК 1:100 000, лист Београд) – жуте тачке	41
Слика 4 Бунар Rb-5m, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)	41
Слика 5 Бунар Rb-8, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)	42
Слика 6 Бунар Rb-15, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)	42
Слика 7 Бунар Rb-16, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)	42
Слика 8 Бунар Rb-20, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)	43
Слика 9 Метода праћења нивоа подземних вода у осматрачком или водозахватном објекту помоћу дајвера (енг. „diver“).....	44
Слика 10 Мануелно мерење дубине до нивоа подземних вода у објекту (пијезометар и шахт бунара са хоризонталним дренама)	45
Слика 11 In-situ мерење физичко-хемијских параметара воде (пијезометар и шахт бунара са хоризонталним дренама).....	46
Слика 12 Узорковање подземне воде (из пијезометра коришћењем пумпе и у шахту бунара са хоризонталним дренама са славине за узимање узорака)	47
Слика 13 Типична струјна слика око дрена једног бунара са хоризонталним дренама у вертикалном пресеку	48
Слика 14 Губитак пијезометарског нивоа на путу подземне воде од места близу дрена, кроз колмирану зону, до унутрашњости дрена, при условима константног протока	49
Слика 15 Шема струјања према потпуном усамљеном бунару у аквиферу са претакањем уз константан пијезометарски ниво у аквитарду (преузето уз измене из Reed J. E. 1980)	51
Слика 16 Поређење односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија и односа порозности колмираног и чистог порозног медија, преузето уз модификације из Thullner et al. (2003)	66

Слика 17 Снимак флуоресценције бактерија у вештачком порозном медију, интензитет флуоресценције је пропорционалан концентрацији микроорганизама, преузето из Gaol et al. (2021).....	66
Слика 18 Шема основне јединице дискретизације домена око дрена.....	68
Слика 19 Шема дискретизације домена око дрена, бројеви у ћелијама су вредности пијезометарског потенцијала, плаве ћелије су ћелије са константним пијезометарским потенцијалом. Ћелија у средини представља сегмент дрена	70
Слика 20 Распрострањење и дебљина међуслоја на простору београдског изворишта, црвени оквир представља границе наредне слике (Слика 21) – преузето из ИЈЧ 2010.....	76
Слика 21 Група од 12 одабраних бунара на десној обали Саве на Ади Циганлији (црвени кружићи) и пијезометри са филтарским колонама у горњем водоносном слоју (плави кружићи) – преузето из ИЈЧ 2010	77
Слика 22 Средњи пијезометарски нивои (2006-2013.) у батеријама пијезометара поред Raney бунара Rb-15 и Rb-16 (преузето уз модификације из Mitrović et al. 2018)	77
Слика 23 Удео протока кроз нове дренае (испрекидана линија) и линеарни губици (пуна линија) за случај када се примењује основни прорачун (црвене линије) и прорачун годину по годину (плаве линије), за случај када се из бунара црпи 40 l/s (а) и 100 l/s (б), за бунар Rb-19 (преузето уз измене из Mitrović et al. 2018).....	83
Слика 24 Промена депресије током времена услед струјања кроз колмирани слој у случају вршења регенерације (црвена линија) и без ње (плава линија) – преузето из Mitrović et al. (2018).....	85
Слика 25 а) Коте нивоа у бунару израчунате у процесу основне калибрације (црвене тачке и крива) и нивои забележени 20.11.2013. (плаве тачке и крива); б) Коте нивоа у бунару израчунате у процесу fine калибрације (црвене тачке и крива), нивои забележени 20.11.2013. (плаве ознаке и испрекидана крива) и вредности корекционог фактора (зелене ознаке и крива) – преузето из Mitrović et al. 2018	91
Слика 26 Промена LHR (регресија квадратном једначином) и KLHR током времена у Rb-11 (пијезометар Ps-18-4). У једначини за KLHR за Ps-18-4 t је време у годинама протекло од првог мерења на дијаграму (преузето из Mitrović et al. 2018).....	94
Слика 27 Промена локалних губитака услед струјања кроз колмирани слој у Rb-11 током времена (преузето из Mitrović et al. 2018)	95
Слика 28 Промена LHR (регресија линеарном и квадратном једначином) и KLHR током времена у Rb-13 (пијезометар Ps-30-6), жуто поље представља извршену регенерацију.....	95
Слика 29 Промена локалних губитака услед струјања кроз колмирани слој у Rb-13 током времена (преузето из Mitrović et al. 2018)	96

Слика 30 Промена LHR и KLHR током времена у Rb-15 праћена помоћу пијезометра Rb-15/p-1, жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrović et al. 2018)..	96
Слика 31 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој у Rb-15 током времена (преузето из Mitrović et al. 2018)	97
Слика 32 Промена LHR током времена и KLHR у Rb-16 праћена помоћу пијезометра Rb-16/p-1 (преузето из Mitrović et al. 2018).....	97
Слика 33 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој у Rb-16 током времена (преузето из Mitrović et al. 2018)	98
Слика 34 Промена LHR током времена и KLHR за Rb-19-1, за пијезометре Ps-125-7, Ps-125-8, Ps-125-15. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrović et al. 2018)	98
Слика 35 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој за Rb-19-1, за пијезометре Ps-125-7, Ps-125-8, Ps-125-15. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrović et al. 2018)	99
Слика 36 Промена LHR током времена и KLHR за Rb-20, за пијезометар за P-Ut-20-4. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrović et al. 2018)	99
Слика 37 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој за Rb-20, за пијезометар P-Ut-20-4. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrović et al. 2018)	100
Слика 38 Промена LHR током времена и KLHR за Rb-20-1, за пијезометар Ps-20-7. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrović et al. 2018).....	100
Слика 39 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој за Rb-20-1, за пијезометар Ps-20-7. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrović et al. 2018)	101
Слика 40 Резултати симулације периода од 1.10.2008. до 20.11.2013. - израчунате коте нивоа у бунару за 20.11.2013. (црвене тачке и крива) и нивои забележени 20.11.2013. (плаве тачке и крива) – преузето из Mitrović et al. 2018	101
Слика 41 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-2 (пијезометар Ps-338-p) и Rb-3m (пијезометар Rb-3m/p-1).....	105
Слика 42 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-4 (пијезометар Rb-4/p-1) и Rb-5m (пијезометар P-Ut-5m-5/p-1)	106
Слика 43 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-6 (пијезометар Ps-159) и Rb-8 (пијезометар Rb-8/p-2)	107

Слика 44 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-8a (пијезометар Ps-207-6) и Rb-10 (пијезометар Ps-X)	108
Слика 45 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-10m (пијезометар Rb-10m/p-1) и Rb-15 (пијезометар Rb-15/p-1).....	109
Слика 46 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-16 (пијезометар Rb-16/p-1) и Rb-20 (пијезометар P-Ut-20-4)	110
Слика 47 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-21 (пијезометар Rb-21/p-1) и Rb-23 (пијезометар Rb-23/p-3).....	111
Слика 48 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-26 (пијезометар Ps-66-1) и Rb-27 (пијезометар Ps-72-10).....	112
Слика 49 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-41 (пијезометар Ps-41-3) и Rb-42 (пијезометар PRB-42-1)	113
Слика 50 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-47 (пијезометар PS-47-16) и Rb-48 (пијезометар Rb-48/p-1)	114
Слика 51 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-49 (пијезометар PRB-49-1) и Rb-52 (пијезометар Ps-52-15)	115
Слика 52 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-59 (пијезометар Ps-939-2) и Rb-64 (пијезометар Rb-64/p-1).....	116
Слика 53 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-65 (пијезометар Ps-65-3) и Rb-79 (пијезометар Ps-79-25).....	117
Слика 54 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу Rb-83 (пијезометар Rb-83/p-1) и Rb-84 (пијезометар Rb-84/p-1).....	118
Слика 55 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-85 (пијезометар Ps-85-15).....	119
Слика 56 Зависност KLHR од концентрације раствореног двовалентног гвожђа и протицаја по дренажу за бунаре са новим дренажима, са одговарајућим коефицијентом детерминације.....	120
Слика 57 Зависност KLHR од концентрације раствореног двовалентног гвожђа и протицаја по дренажу за бунаре са колмирањем као доминантним узроком старења дренажа, са одговарајућим коефицијентом детерминације	121
Слика 58 Зависност KLHR од редокс потенцијала у односу на стандардну водоничну электроду и протицаја по дренажу са регресионим функцијама и одговарајућим коефицијентима детерминације	123

- Слика 59** а) Корелација линеарном функцијом између протицаја по дренажу пре регенерације и u_{reg} ; б) Корелација степеном функцијом између локалних хидрауличких губитака пре регенерације и u_{reg} 125
- Слика 60** Зависност брзина и протицаја по дренажу, као и критичних брзина и критичних протицаја по дренажу (за годишње обарање нивоа од 0,35 и 1,0 m) од концентрације раствореног двовалентног гвожђа, за нове дренаже (једначине (81) и (82))..... 127
- Слика 61** Зависност брзина и протицаја по дренажу, као и критичних брзина и критичних протицаја по дренажу (за годишње обарање нивоа од 0,35 и 1,0 m) од концентрације раствореног двовалентног гвожђа, за нове и дренаже са доминацијом колмирања..... 128
- Слика 62** Зависност брзина и протицаја по дренажу, као и критичних брзина и критичних протицаја по дренажу (за годишње обарање нивоа од 0.35 и 1.0 m) од редокс потенцијала (једначине (84) и (85)), за нове и дренаже са доминацијом колмирања 130
- Слика 63** Депресија у шахту бунара током периода од 30 година, за случај 7 регенерација, $x=0,1$ m/(l/s), $KLHR_0=0,08$ m/(l/s)/a..... 134
- Слика 64** Промена протока по дренажу током периода рада бунара од 30 година, без регенерација (црвена линија), резултати симулирања црпљења током ког се одржава максимално обарање нивоа дељењем на 10, 25, 50 и 100 периода (љубичаста, плава, зелена и жута крива, респективно)..... 137
- Слика 65** Промена протока по дренажу, за $x = 0,1$ m/(l/s), $KLHR_0 = 0,08$ m/(l/s)/a (горе) и 1,25 m/(l/s)/a (доле), за 4 регенерације (десно) и 7 регенерација (лево) 138
- Слика 66** Промена протока по дренажу, за $x = 1,3$ m/(l/s), $KLHR_0 = 0,08$ m/(l/s)/a (горе) и 1,25 m/(l/s)/a (доле), за 4 регенерације (десно) и 7 регенерација (лево) 139
- Слика 67** Интерфејс софтвера – вредност улазних параметара се уноси у жута поља са црвеним оквиром 142
- Слика 68** Интерфејс софтвера – пример излаза из модела – проток по дренажу (горе), односи између укупних испумпаних запремина за више сценарија и укупне испумпане запремине за основни сценарио (средина) и депресија у шахту бунара (доле)..... 143
- Слика 69** Резултати гранулометријских анализа узорака материјала узетог из бушотине за пијезометар Rb-44/p-1, некоригованих ($d_{10,Rb-44/p-1}$, $d_{50,Rb-44/p-1}$, $d_{85,Rb-44/p-1}$) и коригованих ($d_{10,c}$, $d_{50,c}$, $d_{85,c}$) и узорака из пијезометарске бушотине Rb-44/p-1s (d_{10} , d_{50} , d_{85}) 147
- Слика 70** Резултати гранулометријских анализа узорака материјала узетог из бушотине за пијезометар Rb-6/p-1, некоригованих ($d_{10,Rb-6/p-1}$, $d_{50,Rb-6/p-1}$, $d_{85,Rb-6/p-1}$) и коригованих ($d_{10,c}$, $d_{50,c}$, $d_{85,c}$) и узорака из пијезометарске бушотине Rb-6/p-5d (d_{10} , d_{50} , d_{85}) 148

- Слика 71** Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће њихове појаве према нормалној расподели ($\mu(\mu(\ln d)) = -0,15$, $\sigma(\mu(\ln d)) = 0,65$) - црвена крива – Rb-15 152
- Слика 72** Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,2) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће њихове појаве према нормалној расподели ($\mu(\sigma(\ln d)) = 1,95$, $\sigma(\sigma(\ln d)) = 0,45$) - црвена крива – Rb-15 153
- Слика 73** Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће њихове појаве према нормалној расподели ($\mu(\mu(\ln d)) = -0,3$, $\sigma(\mu(\ln d)) = 0,9$) - црвена крива – Rb-16. 156
- Слика 74** Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,1) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће њихове појаве према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\sigma(\ln d)) = 1,6$, $\sigma(\sigma(\ln d)) = 0,6$) – црвена крива – Rb-16. 157
- Слика 75** Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\mu(\ln d)) = 0,0$, $\sigma(\mu(\ln d)) = 0,8$) - црвена крива – Rb-20. 158
- Слика 76** Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\sigma(\ln d)) = 0,58$, $\sigma(\sigma(\ln d)) = 0,66$) - црвена крива – Rb-20 159
- Слика 77** Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\mu(\ln d)) = -0,94$, $\sigma(\mu(\ln d)) = 1,06$) - црвена крива – Rb-8 161
- Слика 78** Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\sigma(\ln d)) = 1,53$, $\sigma(\sigma(\ln d)) = 0,79$) - црвена крива – Rb-8 162
- Слика 79** Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\mu(\ln d)) = -0,49$, $\sigma(\mu(\ln d)) = 0,46$) - црвена крива – Rb-5m. 164

Слика 80 Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,6) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\sigma(\ln d))= 1,39$, $\sigma(\sigma(\ln d))=0,79$) - црвена крива – Rb-5m.	165
Слика 81 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-15.....	168
Слика 82 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-15.....	169
Слика 83 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-15.....	170
Слика 84 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-16.....	171
Слика 85 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-16.....	172
Слика 86 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-16.....	173
Слика 87 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-20.....	174
Слика 88 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-20.....	175
Слика 89 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-20.....	176
Слика 90 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-8.....	177
Слика 91 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-8.....	178

Слика 92 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-8.....	179
Слика 93 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-5m.....	180
Слика 94 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-5m.....	181
Слика 95 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-5m.....	182
Слика 96 Средње вредности коефицијента брзине колмирања добијене калибрацијом нумеричких модела дрена за бунаре Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 - плава крива, и резултати регресије коефицијента брзине колмирања линеарном функцијом концентрације раствореног двовалентног гвожђа – једначина (88), наранџаста крива (горе), и промена LHR са временом по јединици протока по дрена – једначина (87), наранџаста крива (доле).....	185
Слика 97 Расподела вероватноћа укупног протока анализираних група бунара за 1. сценарио, за две вредности фактора зависности KLHR од гранулометријског састава.....	187
Слика 98 Однос између концентрације раствореног двовалентног гвожђа у бунару и просечног укупног протока за све комбинације утискивања дрена које укључују тај бунар	189

СПИСАК ТАБЕЛА:

Табела 1 Начин одређивања KLHR, LHR и u_{reg} за бунаре обухваћене моделом.....	92
Табела 2 Протицаји бунара, висине линеарних губитака, измерени и симулирани нивои у бунарима, забележени одређеног дана у првих годину дана након утискивања нових дренажа	102
Табела 3 Просечне вредности за издвојене периоде рада бунара протока по дренажу: концентрације двовалентног гвожђа (4), редокс потенцијала (6) и KLHR (2), улазних брзина (5), критичних протока према KLHR (8 и 11), критичних протока и брзина израчунатих коришћењем једначина (81) и (82) за бунаре са новим дренажима и на еквивалентан начин изведених једначинама из једначине (76) за остале бунаре (9 и 10) и вредности KLHR добијене регресијом најбољом корелацијом – једначина (74) за бунаре са новим дренажима и једначина (76) за остале бунаре (14).....	103
Табела 4 Параметри значајни за ефекте 27 регенерација изведених током периода од 2006. до 2013., за које постоје потребни подаци.....	124
Табела 5 Вредности коефицијената у корелацији датог једначином (29)	146
Табела 6 Бушотине око Rb-15, интервали испод 15m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{15,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу	149
Табела 7 Бушотине око Rb-16, интервали испод 15m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{15,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу	153
Табела 8 Бушотине око Rb-20, интервали испод 15m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{15,c}$, $d_{20,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу	158
Табела 9 Бушотине око Rb-8, интервали испод 15 m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу	159
Табела 10 Бушотине око Rb-5m, интервали испод 15m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу	162
Табела 11 Средње вредности коефицијента брзине колмирања добијене калибрацијом нумеричких модела дренажа за бунаре Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 (10), вредности коефицијента брзине колмирања израчунате регресионом функцијом (9), математичка очекивања величине зрна (према коригованим резултатима гранулометријских анализа (7) и	

према резултатима калибрације нумеричког модела (8), KLHR по јединици протока по
дрену према корелацији са концентрацијом раствореног двовалентног гвожђа (5)..... 184

Табела 12 Преглед резултата симулација три сценарија за две вредности фактора
зависности KLHR од гранулометријског састава..... 187

САЖЕТАК

Израз „старење бунара“ означава скуп процеса који се одвијају на водопријемним деловима бунара и у њиховој непосредној близини, који доводе до повећања отпора струјању при црпљењу воде из бунара и на крају, до коначног пропадања бунара. Природа процеса „старења бунара“ је физичка, хемијска и микробиолошка. Постоје два основна узрока старења бунара: колмирање (зачепљивање) и корозија.

Смањење издашности бунара, тј. старење, проузроковано је смањењем површине кроз коју пролази вода, услед запушавања и сужавања порног простора у прифилтарској зони вертикалних бунара или бунара са хоризонталним дренажима, као и приликом смањења броја и дужине активних дренажа код бунара са хоризонталним дренажима када су физички толико оштећени да се материјал из издани пробација у унутрашњост дрена и запушава дрена, што доводи до драстичног смањења протока кроз дрена и пескарења. Наведена појава је последица микробиолошких процеса и хемијске корозије материјала дренажа. Ако корозија није интензивна, повећање локалних отпора услед смањења пречника и запушавања пора због накупљања продуката микроорганизама и њихове биомасе узрокује смањење протикања кроз дренаже иако је њихов механички интегритет очуван.

Старење бунара има велики економски значај, који се најдиректније може проценити кроз цену инсталација за црпљење подземне воде којима би се могао надокнадити изгубљени капацитет.

Први циљ истраживања је да се установе функције које повезују брзину процеса колмирања са вредностима параметара средине и протока по дренажу, затим да се квантификују ефекти регенерације бунара и да се установљене функционалне зависности имплементирају у програму који симулира рад бунара за различите режиме рада и учестаности регенерација, карактеристике водоносне средине (хидраулички отпор) и вредности параметара квалитета подземне воде (концентрација двовалентног гвожђа и редокс потенцијал). Сврха новог алгоритма је предвиђање резултата експлоатације новог бунара или постојећег бунара са новим дренажима на предвиђеној локацији. Најважнији резултати су квалитетна корелација између брзине раста отпора на дренажима бунара и концентрације раствореног двовалентног гвожђа и протока по дренажу, затим квантификација ефеката регенерација дренажа и практичан софтвер за симулирање рада бунара за различите режиме рада и учестаности регенерација, карактеристике водоносне средине и подземне воде.

Други циљ истраживања је коришћење наменски креираног програма са нумеричким моделом сегмента дренажа са околним материјалом за симулације утицаја процеса колмирања на микро нивоу и његово испољавање на макронивоу и калибрацијом са резултатима осматрања на терену, као и одређивање параметара у теоријским моделима процеса.

Теоријски модели обухватају функцију односа између протока и концентрације двовалентног гвожђа и брзине попуњавања порног простора (промене порозности) и функцију односа између промене у порозности и промене коефицијента хидрауличке проводљивости. Поред доприноса квантификацији ефеката процеса колмирања резултат истраживања је и нови алгоритам са нумеричким моделом струјања кроз хетерогену и временски променљиву средину, који се у будућности може искористити за унапређивање нумеричких модела у комерцијалним софтверским пакетима за хидродинамичко моделирање како би се природна хетерогеност водоносног материјала и темпоралне промене коефицијента филтрације услед колмирања порног простора узеле у обзир.

Трећи циљ истраживања је практична примена сазнања о процесима колмирања приликом симулације рада групе бунара на београдском изворишту која укључује симулацију ефеката струјања подземне воде кроз аквифер и кроз колмирани слој око дренажа са урачунавањем утицаја околних бунара, промене отпора струјању током времена услед колмирања, регенерације бунара и утискивања нових дренажа, као и аутоматску оптимизацију избора бунара у које ће бити утиснути нови дренажи. Резултат је софтвер који се може применити на било коју групу бунара у сличним хидрогеолошким условима, уз мање измене и допуне и у другачијим условима.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: колмирање, гвожђе, бунар са хоризонталним дренажима

SUMMARY

The term "well aging" means a set of processes that take place on the intake parts of the well and in their immediate vicinity, which lead to an increase in resistance to the flow toward the well, and ultimately, and to the final deterioration of the well. The nature of these processes is physical, chemical and microbiological. There are two main causes of well aging: plugging and corrosion.

Reduction of yield of wells, i.e. aging is caused by the reduction of the surface through which the water passes, due to clogging and narrowing of the pore space in the pre-filter zone of vertical or horizontal wells, or by reducing the number and length of active drains in wells with horizontal drains when they are physically so damaged that the aquifer material breaks through into the interior of the drain and clogs the drain, which leads to a drastic reduction in the flow through the drain and washing out of sand. It is a consequence of microbiological processes and chemical corrosion of the drain material. If the corrosion is not intense, the increase of local resistances due to the reduction of the diameter and the clogging of the pores caused by the accumulation of the products of microorganisms and their biomass causes a decrease in the flow through the drains although their mechanical integrity is preserved.

The aging of wells has great economic importance, which can be most directly assessed through the cost of groundwater extraction installations that could compensate for the lost capacity.

The first goal of the research is to establish the functions that connect the rate of the plugging process with the values of the environmental parameters and flow per drain, to quantify the effects of well regenerations, and to implement the established functional dependencies in a software that simulates the operation of wells for different modes of operation and frequencies of regeneration, characteristics of the aquifer (hydraulic resistance) and values of groundwater quality parameters (concentration of bivalent iron and redox potential). The purpose of this software is to predict the results of exploitation of a new well or an existing well with new drains at the intended location. The most important results are the establishment of good correlation between the rate of growth of resistance at well drains and the concentration of dissolved bivalent iron and flow per drain, quantification of the effects of well regenerations, and practical algorithm for simulating the operation of wells for different modes of operation and frequency of regeneration, and different characteristics of the aquifer environment and groundwater.

The second goal of the research is to use a purpose-written program with a numerical model of the drain segment with the surrounding material to examine through simulations the impact of the plugging process on the micro level and its manifestation on the macro level, and to determine the parameters in the theoretical models of the process by calibration with the results of observations in the field. These theoretical models include a function of the relationship between the flow and bivalent iron concentration, and the rate of filling of the pore space (porosity change),

and a function of the relationship between the change in porosity and the change in the coefficient of hydraulic conductivity. The result of the research, in addition to the contribution to the quantification of the effects of the plugging process, is also a program with a numerical model of flow through a heterogeneous and time-varying environment, which in the future can be used to improve the numerical models in the commercial software packages for hydrodynamic modeling in order to account for the natural heterogeneity of the aquifer material and the temporal changes of the coefficient of hydraulic conductivity due to the pore space plugging.

The third goal is the practical application of knowledge about plugging processes to the simulation of the operation of a group of wells at the Belgrade watersource, which includes the simulation of the effects of groundwater flow through the aquifer and through the plugged layer around the drains, taking into account the influence of surrounding wells, changes in flow resistance over time due to plugging, regeneration of wells and insertion of new drains, as well as automatic optimization of the selection of wells into which new drains will be installed. The result is software that can be applied to any group of wells in similar hydrogeological conditions, and with minor modifications and additions in different conditions also.

KEY WORDS: plugging, iron, collector radial well

ЛИСТА СКРАЋЕНИЦА

CLN – (енгл. „Connected Linear Network“ – повезана линеарна мрежа)

DK – дужина кабла

ИЈЧ – Институт за водопривреду "Јарослав Черни" а.д.

IRB – (енгл. „Iron related bacteria“ – бактерије повезане са гвожђем)

LSI – (енгл. „Langelier Saturation Index“ – Langelier-ов индекс засићености)

LHR – локални хидраулички отпор (енгл. „local hydraulic resistance“)

KLHR – кинетика локалног хидрауличког отпора (енгл. „kinetics of the local hydraulic resistance“)

KV – Кота врха мерног објекта

m н.м. – метара над морем

ОГК – Основна геолошка карта

pBARO – Баро–дајвер који мери атмосферски притисак

pDIVER – Дајвер који мери притисак воде

RSI – (енгл. „Ryznar Stability Index“ – Ryznar-ов индекс стабилности)

SMEWW 21 – Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater 21st Edition

VBA – Visual Basic for Applications

VVS – Висина воденог стуба

1 УВОД

Израз „старење бунара“ означава скуп процеса који се одвијају на водопријемним деловима бунара и у њиховој непосредној близини, који доводе до повећања отпора струјању при црпљењу воде из бунара и на крају, до коначног пропадања бунара. Природа процеса „старења бунара“ је физичка, хемијска и микробиолошка. Постоје две врсте старења бунара: колмирање (зачепљивање) и корозија.

Смањење издашности бунара последица је запушавања и смањења порног простора у прифилтарској зони водозахватних објеката, или смањења укупне дужине активних дренажа код бунара са хоризонталним дренажима, које се дешава као последица регенерација када када су дренажи физички толико оштећени да се материјал из издани пробија у њихову унутрашњост, што доводи до драстичног смањења протока кроз дрен и пескарења.

Када је материјал филтарске колоне или дренажа склон корозији и услови средине погодни, корозија прво узрокује повећање храпавости чиме настају велике површине погодне за развој микроорганизама и накупљање њихових екскремената и минералних талоба, што узрокује настанак бројних микрозона са још повољнијим условима за корозију, као и запушавање пора прифилтарске зоне. Пропадање материјала хоризонталних дренажа, нарочито при снажним механичким ударима приликом регенерације, доводи до уништења дренажа. Ако корозија није интензивна, повећање локалних отпора услед смањења пречника и запушавања пора због накупљања продуката микроорганизама и њихове биомасе узрокује смањење протицаја кроз дренаже чији је механички интегритет очуван.

Положај дренажа који се налазе дубоко испод нивоа подземних вода, при чему се на највећем делу изворишта између потенциометријске површине (ниво је под притиском) и дренажа налази и један или више слабопропусних слојева, искључује оваздушење алувијалног аквифера услед обарања нивоа и хемијску колматацију услед интензивне абиотичке оксидације раствореног двовалентног гвожђа приликом мешања оваздушене са аноксичном подземном водом. Уз то, удаљеност перфорација на дренажима од шахта бунара од најмање 5 метара (почетак перфорираног дела дрена), минимална дубина отвора дренажа испод површине воде у шахту од 3 метра, уз стално струјање подземне воде ка шахту, обезбеђују да ваздух из шахта бунара скоро сигурно не продире у аквифер кроз дренаже. Због наведених особина бунари са хоризонталним дренажима су погодни за изучавање микробиолошких процеса колмирања у субоксичним или аноксичним условима у аквиферу.

У оквиру истраживања су спроведене следеће нове анализе и развијени методи примене сазнања о процесима микробиолошког колмирања бунара:

- 1) основна анализа података о измереним протоцима у бунарима са хоризонталним дренажима и одговарајућим измереним нивоима у шахтовима бунара и пијезометрима, као и концентрацијама раствореног двовалентног гвожђа и вредностима редокс потенцијала подземне воде,
- 2) издвајање бунара са новим дренажима и бунара са старим дренажима код којих су механизми микробиолошког колмирања доминантни у односу на корозију,
- 3) издвајање периода развојених регенерацијама (за одабране бунаре са старим дренажима и бунаре са новим дренажима) да би се добио што дужи низ вредности параметара средине и протока по дренажу,
- 4) израчунавање, за сваки период издвојен на описани начин, одговарајуће вредности параметра којим се квантификују ефекти раста колматација, вредности његове промене са временом тј. брзине колмирања и средњих вредности кључних физичко-хемијских параметара средине (концентрација раствореног двовалентног гвожђа и редокс потенцијал),
- 5) одређивање корелација између брзине колмирања и физичко-хемијских параметара средине и протицаја по дренажу из низа података припремљеног у претходним корацима,
- 6) анализа ефеката регенерација за све бунаре на којима су вршене регенерације и који су осматрани пре и после њих (свеједно да ли спадају у одабрану групу бунара), одређивање ефеката регенерација са испитивањем могуће везе са физичко-хемијским параметрима средине, бројем досадашњих регенерација и др.,
- 7) одређивање механизма биохемијског колмирања порног простора око дренажа бунара коришћењем нумеричког модела,
- 8) развој аналитичког модела за симулацију ефеката процеса колмирања на бунар у смислу раста локалних хидрауличких губитака, узимајући у обзир утицаје физичко-хемијских параметара средине (првенствено концентрације раствореног двовалентног гвожђа и редокс потенцијала), протицаје по дренажу, регенерације бунара (ефеката регенерације и њихове учесталости) и режим рада бунара (константан проток или константан ниво),
- 9) развој аналитичког модела за симулацију рада групе бунара са хоризонталним дренажима приликом: избора бунара за утискивање (број бунара за утискивање је ограничен у складу са претпостављеном динамиком утискивања нових дренажа на изворишту и уделу посматране групе бунара у укупном броју бунара на изворишту), избора различитог броја утиснутих дренажа, избора опције затварања или остављања старих дренажа у функцији након утискивања нових, са ефектима регенерације и колмирања нових и старих дренажа укљученим у калкулацију,

10) извођење закључака о реперкусијама испитаних процеса на пројектовање и одржавање изворишта и водозахватних објеката.

У оквиру докорске дисертације су након уводног дела и прегледа стања у области истраживања представљене теоријске основе и резултати остварени у оквиру дисертације. У поглављу „МЕТОДОЛОГИЈА“ су представљене теоријске основе рада, као и спроведене активности и анализе. У оквиру поглавља „РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА“ су анализирани сви резултати истраживања, док је у поглављу „ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА“ приказана рекапитулација и свеукупно сагледавање резултата истраживања и закључака.

Сва три поглавља су подељена на три целине под насловима „Корелације између брзине колмирања и физичко-хемијских параметара средине и протицаја по дренажу и анализа утицаја режима рада бунара на процес колмирања“, „Одређивање механизма биохемијског колмирања бунара“ и „Развој аналитичког модела за симулацију утицаја процеса колмирања на рад групе бунара са хоризонталним дренажним“.

У оквиру четвртог поглавља („МЕТОДОЛОГИЈА“) у првом делу су дати подаци, као и методологија анализе резултата праћења рада бунара са хоризонталним дренажним на београдском изворишту. Издвојена је група бунара за детаљну анализу и испитана је веза између физичко-хемијских параметара квалитета подземне воде и процеса колмирања („запушавања“) дренажа и утицај режима рада бунара на процес колмирања. Веома је тешко извести праћење наведених процеса на микро нивоу јер се дешавају изван дренажа у водоносној средини на 20 – 25 m дубине, тако да је једини доступни начин био праћење последица поменутих процеса на макро нивоу праћењем протока и нивоа воде у бунару и блиским пијезометрима.

У другом делу је представљен начин на који су симулирани процеси колмирања на микро нивоу док је преко нумеричког модела испитан утицај ефеката и симулирано испољавање наведених процеса на макронивоу, уз калибрацију са резултатима осматрања на терену, чиме су одређени параметри у теоријским моделима процеса. Теоријски модели обухватају:

- модел раста биомасе и продуката метаболизма и попуњавања порног простора,
- однос између промене вредности коефицијента хидрауличке проводљивости и промене у порозности,
- модел прерасподеле протока ка дренажу и промена у хидрауличким потенцијалима у складу са променама у порозности.

У трећем делу је обрађена методологија практичне примене сазнања о процесима колмирања на симулацију рада групе бунара београдског изворишта која укључује:

- симулацију ефеката струјања подземне воде кроз аквифер и кроз колмирани слој око дренажа,
- промене отпора струјању током времена услед колмирања,
- регенерације бунара и утискивања нових дренажа,
- аутоматску оптимизацију избора бунара у које ће бити утиснути нови дренажи.

У петом и шестом поглављу („РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА“ и „ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА“) су приказани резултати примене претходно описаних метода и дат је коментар и оцена резултата и закључци.

2 СТАЊЕ У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА

Првобитне студије процеса колмирања су повезане са пројектовањем водопријемних делова бунара. Максимална дозвољена улазна брзина подземне воде (Darcy-јева брзина) у бунар је идентификована као главни критеријум и фактор очувања филтрацијске стабилности аквифера – у Sichert (1928), Абрамов (1952), Истомина (1957), Cistin (1965), Pietraru (1982) и Kovacs & Ujfaludi (1983), при чему су дате различите препоруке за максималне улазне брзине. У Вуковић & Соро (1990) and Вуковић & Пушић (1992) су дати прегледи досадашњих резултата. Johnson (1975) и Гаврилко & Алексеев (1982) проучавали су критеријуме повезане са појавом корозије и инкрустације.

Хемијски критеријуми везани за таложење калцијум-карбоната и подложност корозији, као LSI (Langelier Saturation Index – Langelier-ов индекс засићености) који обухвата рН, алкалитет, концентрацију калцијумових јона, концентрацију суспендоване материје и температуру воде узорка воде, или RSI (Ryznar Stability Index – Ryznar-ов индекс стабилности) који обухвата рН воде и рН при коме би узорак био засићен калцијум-карбонатом, су као основа за категоризацију вода у смислу потенцијала за корозију и колмирање обрађени у Алексеев et al. (1989).

Део ранијих истраживања се односи на анализу просторне расподеле инкрустација (на макро нивоу) у непосредној околини водопријемних делова бунара, установљене на основу раскопавања на отвореним коповима зона у којима се налазе раније коришћени дренажни бунари, резултата регенерације бунара или језгровања бушотина изведених кроз тампон и засип старих бунара (Houben, 2003; Houben, 2006; Houben & Weihe, 2010). У Weidner et al. (2011) приказане су поставке и резултати лабораторијског огледа са физичким моделом дела филтарске колоне, засипа и материјала издани кроз који је циркулисала вода контролисаног састава при чему је мерен хидростатички притисак у три тачке у филтарском засипу и визуелно праћено стање материјала кроз зид од акрилног стакла, након чега је измерена количина наслага гвожђевитих материјала по слојевима. Микробиолошко колмирање и његова веза са хемијским саставом подземне воде је углавном квалитативно обрађивано, нпр. у Cullimore (1999) и Mansuy (2017).

На микро нивоу анализиран је начин на који се биомаса и њени производи шире у порном простору, при чему се модели могу генерално поделити на моделе биофилма, моделе микроколоније и строго макроскопске моделе. Биофилм чине слојеви бактеријских ћелија и придруженог екстрацелуларног материјала који се равномерно формира на површини свих чврстих зрна – Taylor & Jaffe (1990a, 1990b, 1990c), Taylor et al. (1990). Модел микроколонија се заснива на претпоставци да се бактерије везују за чврсту материју у дискретним колонијама – Widdowson (1991), Widdowson et al. (1988).

Чисто макроскопски модели се заснивају на емпиријским корелацијама и не заснивају се на претпоставкама о механизму раста наслага и не служе да се предвиди њихов распоред унутар порног простора.

Постоји велики број математичких модела којима се квантификују експериментално посматране интеракције између раста биомасе и њених продуката као и накупљања честица профилираних из подземне воде и промена хидрауличких особина порозних медија (Rockhold et al., 2002; Thullner et al., 2003 и др.). Обично се модели заснивају на претпоставци хомогеног биофилма и придружених наслага који покрива површину зрна, а смањење хидрауличке проводљивости узроковане растом биофилма и придружених наслага теоретски произилази из претпоставке снопова паралелних пора. Код појединих огледа промене у коефицијенту филтрације се понекад најбоље могу објаснити мрежом пора и растом биомасе и њених продуката у агрегатима, док претпоставка равномерног биофилма није могла да објасни опажања. У Rockhold et al. (2002) је дат израз за зависност односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија од порозности колмираног и чистог порозног медија, који садржи део који се односи на акумулацију биофилма и део који се односи на раст агрегата. У Rockhold et al. (2002) је такође дат и један општи, једноставан израз за зависност односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија од порозности колмираног и чистог порозног медија, који спада у стриктно макроскопске моделе, који је коришћен и у овој дисертацији. У Thullner et al. (2003) дати су одвојени изрази за зависност односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија од порозности колмираног и чистог порозног медија, за случај када биомаса и њени продукти расту у виду колонија у порном простору и за случај равномерног раста биомасе и њених продуката на чврстој матрици порозног медија. Gaol et al. (2021) су на вештачком микромоделу материјала аквифера уз реплициране природне услове мерили промену отпора струјању и концентрације микроорганизама у интерстицијалном простору и на површини зрна (снимањем интензитета флуоресценције) и промене у отпору моделовали математички коришћењем Kozeny–Carman-овог модела.

У Димкић & Пушић (2008а) и Димкић et al. (2008b), дефинисани су „физичко-хемијски параметри вода“ који су повезани са процесима колмирања бунара, при чему су као одлични „параметри – индикатори квалитета бунара“ издвојени садржај укупног гвожђа и, редокс потенцијал. Аутори су дефинисали параметар који називају специфичном депресијом („депресија пијезометарског нивоа за јединични протицај бунара“ – количник разлике између нивоа подземних вода у пијезометру чија је филтарска колона у непосредној близини дрена и нивоа у унутрашњости дрена и протока бунара) као основни хидраулички параметар којим се квантификује степен колмираности дрена.

Термин „локални хидраулички отпор“ (Local Hydraulic Resistance – *LHR*) у Димкић et al. (2011a) замењује специфичну депресију бунара, при чему се разлика нивоа дели са улазном брзином у дрен уместо са протоком бунара, јер се на тај начин много боље дефинише отпор на дренажу. Да би се квантификовала брзина раста локалних хидрауличких отпора у Димкић et al. (2011a) је уведен параметар кинетике промене локалног отпора на дренажима (*Kinetics of LHR Change – KLHR*) који представља промену вредности локалног хидрауличног отпора током времена. Аутори демонстрирају значење и понашање наведених параметара током експлоатације на примеру пет бунара на Београдском изворишту у које су утиснути нови дренажи и закључују да је колмирање дренажа током анализираних периода рада бунара првенствено функција концентрације укупног гвожђа и редокс потенцијала подземних вода. Зависност *KLHR* од поменутих параметара је приказана на два дијаграма, док се утицај гранулометријског састава засипа дренажа, садржаја бактерија и улазне брзине само помиње. Аутори уводе и појам критичне улазне брзине – брзине при којој је производ пораста током једне године помножен и улазне брзине једнак неком дозвољеном годишњем порасту депресије (при одржавању константног протока). Критична улазна брзина се квалитативно повезује са редокс потенцијалом. Због тога што је претпоставка за тачно одређивање улазне брзине да активна дужина дренажа буде позната, што обично није случај, овај параметар је у Димкић et al. (2011c) замењен са протоком по дренажу који се добија на основу броја активних дренажа. У овом раду су дати и дијаграми зависности *KLHR* од броја потенцијално активних колонија слуз-продукујућих бактерија и броја бактерија повезаних са гвожђем по ml, за пет бунара на Београдском изворишту у које су утиснути нови дренажи. У Димкић et al. (2011b) поређен је проток, концентрација укупног гвожђа у води, редокс потенцијал и карактеристични пречник честица материјала аквифера око дренажа (средња вредност за све узорке пречника за који мањих честица има 50 масених процената у узорку) за 95 бунара на Београдском изворишту. У раду није уочена корелација између протока и биохемијских параметара – броја потенцијално активних колонија више група бактерија.

У Димкић et al. (2012) паралелно са односом физичко-хемијских параметара воде и *KLHR* за пет бунара на Београдском изворишту у које су утиснути нови дренажи, иста анализа се спроводи за два бунара са Београдског изворишта са веома високим стабилним протоцима, два бунара са изворишта Кључ у близини Пожаревца и један на изворишту Медијана код Ниша. У раду Димкић & Пушић (2014) су даље анализирани квантитативне везе између брзине старења бунара (тј. пораста отпора на дренажима или филтарским колонама вертикалних бунара) на Београдском изворишту, дренажном систему Ковин-Дубовац и изворишту Кључ код Пожаревца и садржаја двовалентног гвожђа и редокс потенцијала подземних вода.

Издвојени су бунари код којих пораст депресије услед локалног отпора одговара вредности од 0,35 m годишње (ако је ниво одржан константним овај пораст је израчунаван као промена производа *LHR* и улазне брзине током годину дана), они подељени у пет група према томе ком опсегу вредности редокс потенцијала припадају према средњој вредности редокс потенцијала и на тај начин добијена корелација између улазних брзина у водопријемне делове бунара и редокс потенцијала.

Квантитативно повезивање брзине колмирања, које је посредно квантификовано хидрауличким отпором колматација, са параметрима као што су концентрација раствореног двовалентног гвожђа у подземној води, њен редокс потенцијал, број потенцијално активних бактерија одређених група по милилитру, гранулометријски састав и др. је најдетаљније представљено у ИЈЧ (2010). Примена ових корелација у планирању утискивања нових дренажа у бунар је представљена у Димкић & Пушић (2018), а у симулирању рада групе бунара са хоризонталним дренажима за различите изборе бунара за утискивање, број утиснутих дренажа и затворене или отворене старе дренаже након утискивања у Митриновић et al. (2018).

На основу дефиниција и уочених корелација у Димкић & Пушић (2008а, 2014), Димкић et al. (2008, 2011а, 2011б, 2011с, 2012) и ИЈЧ (2010), у Митриновић et al. (2021) је настављена анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на Београдском изворишту издвајањем периода раздвојених регенерацијама (за одабране бунаре са старим дренажима и бунаре са новим дренажима) чиме је добијен дугачак низ средњих вредности параметара средине и протока по дренажу и одговарајућих вредности *KLHR* за издвојене периоде унутар којих није било регенерација. На основу овог низа одређене су корелације између брзине колмирања (вредности *KLHR*) и физичко-хемијских параметара средине (концентрација двовалентног гвожђа и редокс потенцијал) и протицаја по дренажу, чиме су добијене једноставне корелације са високим вредностима коефицијента детерминације. Квантитативно су анализирани ефекти регенерација бунара и коришћењем математичког модела (имплементираног у софтверском симулационом моделу) који се заснива на примењеним теоријским основама и утврђеним корелацијама испитани утицаји режима рада бунара, ефикасности и учестаности регенерација, хидродинамичких параметара водоносне средине и физичко-хемијских карактеристика подземне воде на издашност бунара.

Нумерички приступ прорачуну струјања ка бунару са хоризонталним дренажима скоро увек значи израду детаљних хидродинамичких модела (у виду 3D мреже) који су засновани на примени неке од нумеричких метода решавања система парцијалних диференцијалних једначина – метода аналитичких елемената, метода коначних разлика, метода коначних елемената и метода коначних запремина (Bear & Cheng, 2010; Yeh & Chang, 2013).

На почетку примене нумеричких модела бунар са хоризонталним дренама симулиран је обично као хидраулички еквивалентан вертикални бунар великог пречника (Ophori & Farvolden, 1985). У следећој етапи развоја модела дренави су представљани у слоју моделске мреже који садржи лепезу дрена у плану, на тај начин што су у ћелијама на траси дрена задаване веома високе вредности коефицијента филтрације. Овакав приступ је подразумевао интензивну дискретизацију простора модела у плану и профилу. Најчешће је примењивано практично решење приликом кога лепеза дрена буде у слоју чија дебљина одговара пречнику дрена – 0,2 до 0,3 m (Божовић, 2023).

Поред представљања геометрије бунара и дискретизације нумеричке мреже, значајан утицај имају и гранични услови којим се представљају дренави. Коришћени су гранични услов друге врсте (задат проток) или треће врсте (проток који зависи од разлике нивоа и отпора струјању). Други случај много више одговара ситуацији у реалности, што је потврђено кроз више студија – Haitjema et al. (2010), Moore et al. (2011), Patel et al. (2010), Mohamed & Rushton (2006) и др.

Уз струјање кроз прифилтарску зону разматрани су и отпори струјању кроз дрена. Генерални закључак више студија је да је отпор струјању кроз цеви дрена занемарљив у односу на отпоре у прифилтарској зони и да је пијезометарски ниво унутар дрена дуж њега приближно константан и једнак нивоу у шахту бунара – Bakker et al. (2005), Sawyer & Lieuallen–Dulam (1998).

Што се тиче бунара на Београдском изворишту, коришћен је наменски софтвер за нумеричко моделирање струјања ка дренама (графички интерфејс и пре и постпроцесор Lizza), са нумеричким солвером базираним на методи коначних елемената PAK-P (Dimkić et al, 2007; 2010b; Pušić et al., 2012; ИЈЧ, 2010) и нешто касније са солвером WODA базираним на методи коначних запремина (Vidović et al., 2011; Dotlić et al., 2011; 2016). Обе методе обезбеђују знатно већу флексибилност у формирању неструктуриране мреже која се прилагођава трасама дрена него метода коначних разлика. Циљеви свих модификација и допуна у софтверским нумеричким моделима су били или геометријски тачнија репрезентација водопријемних делова бунара нумеричком мрежом и смањење броја ћелија, или већа прецизност прорачуна (нпр. Dotlić et al., 2016), или укључивање танког појаса око бунарске филтарске колоне са прорачуном отпора који он пружа струјању одвојеним од нумеричке мреже да би се смањио број ћелија у моделу (нпр. Дотлић, 2015). У оквиру различитих модела на Београдском изворишту су симулирани бунари Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16, Rb-20 (на којима су 2006., 2007. и 2008. године утиснути нови дренави и који су анализирани у овој дисертацији), Rb-2m, Rb-5, Rb-7m, Rb-8m, Rb-36, Rb-40 и Rb-46 у оквиру више пројеката на којима је радио Институт за водопривреду „Јарослав Черни“. Модели су поменути и њихове границе дате у ИЈЧ (2010), при чему су за неколико од ових модела дати детаљи у овој студији и у неколико научних радова објављених у часописима, као и саопштења на конференцијама.

Приказ симулације рада Rb-8m коришћењем солвера WODA преко LIZZA интерфејса, са задавањем хидрауличког отпора дренажа и прифилтарске зоне непосредно око њих, је дат у Пушић et al. (2012) и ИЈЧ (2010). Симулација бунара Rb-16 коришћењем истог софтвера је оквирно приказана у Dotlić et al. (2015). У Пушић & Димкић (2017) дат је приказ симулације рада бунара Rb-16 и Rb-46 коришћењем солвера WODA преко LIZZA интерфејса, без детаљног приказа самих хидродинамичких модела. Модел бунара Rb-16 који је геометријски детаљно дефинисан коришћењем LIZZA интерфејса на основу великог броја података о геометрији дренажа и речног дна је калибрисан симулирањем три теста црпљења коришћењем солвера WODA, при чему је калибрисана и вредност средње кондуктивности прифилтарске зоне дуж дренажа (Dimkić & Pušić 2018). Три симулирана теста су изведена у три различите године па је калибрацијом добијена темпорална промена средње кондуктивности прифилтарске зоне. Сличан поступак је примењен раније на бунар Rb-8 при чему је калибрација модела на основу резултата три теста црпљења спроведена током једне године указала на брзо опадање средње кондуктивности прифилтарске зоне дуж дренажа (Dimkić et al., 2010).

У Божовић et al. (2015) су приказани поступак и резултати симулације рада бунара Rb-46 методом коначних запремина у софтверу за хидродинамичке симулације MODFLOW USG, у којој су дренажи симулирани помоћу софтверског пакета (модула) за симулацију међусобно повезаних линијских елемената (connected linear network) – CLN, који се користи за симулацију цевних дренажа, бунара са хоризонталним дренажима или других линијских објеката или карстних канала. У Божовић et al. (2016) нумерички прорачуни су реализовани такође коришћењем MODFLOW USG кода за бунар Rb-7m, као и Rb-46, при чему су простори модела дискретизовани мрежом квадрата променљивих димензија, у складу са методом коначних запремина, са погушћавањем у зони лепезе дренажа бунара преко уметнуте неправилне мреже, док је струјање детерминисано коришћењем граничних услова реке, генералног пијезометарског нивоа, константног нивоа и дрена (бунара са хоризонталним дренажима) помоћу CLN пакета. Калибрацијом модела добијене су и репрезентативне вредности коефицијената пропусности дренажа (однос коефицијента филтрације и дебљине прифилтерске зоне). У Божовић (2023) дренажи бунара Rb-5m су симулирани реално у погледу геометријских карактеристика. Задати су са пречником конструкције Ø250 mm, дужине 45,0 m и са филтерским засипом дебљине 8,5 cm, са утврђеним вертикалним девијацијама. Укупни хидраулички отпори у прифилтерској зони дренажа су задати преко коефицијента пропусности дренажа. Усвојено је да је дебљина филтерског засипа, тј. прифилтерске зоне дренажа константна током анализираног периода, а да је коефицијент филтрације прифилтерске зоне временски променљива величина. Гранични услов константног нивоа у дренажу не омогућава задавање временски променљивих вредности коефицијента пропусности, па су оне константне током симулације.

Због тога је сваки временски период за који је вршена калибрација симулиран моделом краћег трајања са другом вредношћу коефицијента пропусности, што је исти приступ који су применили Dimkić et al. (2010) и Dimkić & Pušić (2018).

Старење бунара има велики економски утицај, који се најдиректније може проценити кроз цену инсталација за црпљење подземне воде којима би се могао надокнадити изгубљени капацитет. За београдско извориште се та штета процењује на око 1 500 000 евра годишње (ИЈЧ, 2016).

У периоду пре II Светског рата и касније, до 1953. године, Београд се снабдевао водом за пиће експлоатацијом подземних вода на Макишком пољу цевастим бунарима. Од 1953. године је започела изградња бунара са хоризонталним дренажима. Бунари су постављани непосредно дуж обала са обе стране реке Саве, као и на Ади Циганлији. Стални пораст потреба за водом интензивирао је развој београдског изворишта, пратеће инфраструктуре и постројења за пречишћавање воде, као и коришћење речне (Савске) воде преко одговарајућих постројења за третман воде за пиће. Данас београдско извориште обухвата систем од 99 бунара са хоризонталним дренажима и 48 цевастих бунара, дуж око 50 km тока реке Саве. Овај систем обезбеђује око 2,5 m³/s подземних вода (Божовић, 2023). Постојећи капацитети транспортних цевовода и постројења за прераду подземних вода су око 6 m³/s и значајно су изнад данас експлоатисаних количина. Транспорт воде од бунара до погона за прераду углавном се заснива на раду пумпи у бунарима. У београдском водоводном систему постоји неколико пунктова где се сирова вода пречишћава: два за подземну воду – „Бежанија“, „Баново Брдо“ и делом „Беле Воде“ и три за површинску (речну) воду то су „Макиш“, „Макиш-Језеро“, делом „Беле Воде“ и „Винча“ (Институт „Јарослав Черни“, 2013). Максималне количине експлоатисаних подземних вода (просек на годишњем нивоу) од преко 5,6 m³/s регистроване су током 1986. и 1987. године. Период од 1983. до 1987. године карактерише завшетак интензивне изградње бунара. Максимум експлоатације подземних вода бунарима низводног сектора коинцидира са периодом завршетка њихове изградње, тј. 1982/83. годином, када је захватано укупно око 5,3 m³/s подземних вода. Када се ради о експлоатацији београдског изворишта и врши поређење историјских и савремених података треба имати у виду да су радни нивои у бунарима до увођења потапајућих пумпи и измене хидромашинске и регулационе опреме (крај '90-тих година) били знатно нижи и да су у том периоду одржавани и испод коте излива дренажа у бунарски шахт. Опремање бунара и изворишта у целини мерном и регулационом опремом омогућило је и знатно поузданије мерење и аквизицију података о режиму коришћења изворишта.

Због економског и друштвеног значаја у веома важном систему као што је систем снабдевања питком водом Београда, феномен старења бунара је изучаван и у оквиру вишегодишњег праћења рада бунара београдског изворишта од 2006. до 2013. године, током којег су систематски праћени протоци бунара и нивои у блиским и удаљеним пијезометрима, у залеђу и између бунара (уз одређивање локалних хидрауличких губитака)

као и промене услед регенерација, извођене су физичко-хемијске лабораторијске анализе и *in situ* мерења параметара подземне воде из бунара и пијезометара. Помоћу ових података се могу добити значајне информације о стању бунара и његовој промени током времена, као и о утицају физичко-хемијских параметара средине на ове промене. Уз вишегодишњи мониторинг рађено је и више студија, од којих је најважнија „Студија београдског изворишта – стање и правци развоја“, која је произашла као резултат рада који је трајао од 2005. до 2010. године и који је обухватао више кампања мерења већ поменутих параметара везаних за рад бунара, сакупљање и обраду историјских података, израду нових пијезометара са бројним гранулометријским, геохемијским и минералошким анализама (и материјала аквифера и инкрустација на дренажима) и која је једним значајним делом обухватила детаљну анализу и квантификацију процеса колмирања на одабраним бунарима са хоризонталним дренажима, посебно оним са утиснутим новим, прохромским дренажима. Током последњих десет година спроведено је још неколико студија и један научни пројекат, који су у потпуности (ИЈЧ, 2016; ИЈЧ, 2010 – 2013) или делимично (ИЈЧ, 2010 – 2019) били посвећени изучавању феномена старења бунара, а у оквиру свих део истраживања усмерених на старење бунара је обухватао и неке од бунара београдског изворишта.

Уз постојање велике количине података и анализа у поменутих студијама и пројектима и велики економски и друштвени значај београдског изворишта, као и природа струјања ка хоризонталним дренажима бунара су значајан фактор у мотивацији за истраживање везано за систем бунара београдског изворишта.

3 ПРЕДМЕТ, ПРОБЛЕМ, ЦИЉЕВИ И ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА

Предмет истраживања су процеси колмирања (зачепљивања отвора и интергрануларног простора) који се одвијају на водопријемним деловима бунара и у материјалу аквифера у њиховој непосредној околини који узрокују раст отпора струјању и често на крају и неповратно пропадање бунара.

Повећање отпора услед колмирања је последица запушавања и редуковања порног простора у прифилтарској зони водозахватних објеката.

Дренови радијалних бунара на београдском изворишту се налазе дубоко испод статичког нивоа подземних вода, при чему се између потенциометријске површине (ниво је под притиском) и нивоа на коме се налазе дренажи на највећем делу изворишта налази барем један слабопропусан слој на дубини од 15 до 20 m, што искључује оваздушење алувијалног аквифера услед обарања нивоа и хемијску колматацију услед интензивне абиотичке оксидације раствореног двовалентног гвожђа приликом мешања оваздушене са аноксичном подземном водом. Перфорирана зона на дренажима почиње на најмање 5 m од шахта бунара и минимална дубина отвора дренажа испод површине воде у шахту од 3 m, уз стално струјање подземне воде ка шахту, што обезбеђује да вода из шахта бунара која је изложена ваздуху скоро сигурно не продире у аквифер кроз дренаже. Овакви услови повезани са бунарима са хоризонталним дренажима су погодни за одвијање процеса биохемијског колмирања и одговарајући за изучавање микробиолошких процеса колмирања у субоксичним или аноксичним условима у аквиферу.

Проблеми који се решавају су:

- 1) проналажење корелације између брзине колмирања (брзине раста локалних хидрауличких отпора на дренажима бунара) и физичко-хемијских параметара средине и протикања по дренажу, користећи низ података припремљених на основу резултата вишегодишњег осматрања хидрауличких карактеристика бунара на београдском изворишту и физичко-хемијских карактеристика воде из тих бунара,
- 2) квантификација ефеката регенерација и испитивање корелације са физичко-хемијским параметрима средине, бројем досадашњих регенерација и другим факторима,
- 3) дефинисање начина ширења биохемијских колматација кроз порни простор око дренажа бунара (и квантификација брзине ширења у зависности од брзине струјања и састава подземне воде) којим би се објаснило слично понашање бунара на целом изворишту, посебно у смислу линеарности раста локалних хидрауличких отпора,

које указује на кључну улогу механизма на микро нивоу, невезаних за локацију бунара,

- 4) Примена установљених корелација у оквиру математичких модела за израчунавање протока бунара током времена у зависности од локације, режима рада, броја и дужине нових дренажа, броја и ефекта регенерација дренажа и протока других, околних бунара, који би били примењени кроз симулациони софтвер.

У детаљним нумеричким симулационим моделима (Dimkić et al., 2010; Пушић & Димкић, 2018; Божовић, 2015; Божовић, 2023) коефицијенти филтрације у прифилтарској зони се не мењају током симулације, што значи да процес колмирања није могуће симулирати на овај начин. Колмирање има пресудан утицај на издашност бунара, што се може уочити и на дијаграмима промене локалних хидрауличких отпора с временом (Слика 41 – Слика 55):

- *LHR* се током периода без регенерација услед колмирања повећава за 100 до 300% у току само две до три године,
- код већине бунара апсолутна вредност *LHR* је велика и депресија услед отпора на дренажима чини највећи део депресије у бунару.

Због значаја утицаја на издашност бунара који се колмирају, процес који се одвија у непосредној околини дренажа, може се закључити да симулирање овог процеса у прифилтарској зони и резултујуће промене у коефицијенту филтрације има већи значај од симулације свих осталих фаза у струјању – од филтрације кроз речно корито и инфилтрације падавина, преко струјања од реке или повлатног слоја кроз горњи водоносни слој, струјања кроз слабопропусни танки међуслој, до струјања све до неколико метара од дренажа.

Циљеви истраживања су стога, у складу са истакнутим значајем процеса у непосредној околини дренажа, следећи:

- 1) боље разумевање процеса колмирања и тачније квантитативно предвиђање брзине њиховог одвијања,
- 2) развој софтвера за симулацију ефекта процеса колмирања на бунар у смислу раста локалних хидрауличких губитака, којим се узимају у обзир утицаји физичко-хемијских параметара средине (првенствено концентрације раствореног двовалентног гвожђа и редокс потенцијала), протицаја по дренажу, регенерација бунара (ефекта регенерације и њихове учесталости) и режима рада бунара (константан проток или константан ниво),
- 3) развој софтвера за симулацију динамике процеса испуњавања порног простора продуктима микроорганизама, базираног на нумеричком моделу струјања ка дренажу. Брзина попуњавања порног простора у ћелијама модела требало би да зависи од

физичко-хемијских параметара средине (првенствено концентрације раствореног двовалентног гвожђа) и протицаја по дренажу, регенерација бунара треба да буде симулирана као повећање порног простора у зависности од стварних ефеката регенерације (приликом калибрације модела) или претпостављене ефикасности регенерације,

- 4) развој софтвера за симулацију рада групе бунара са хоризонталним дренажима за различите изборе бунара за утискивање (број ових бунара је ограничен у складу са претпостављеном динамиком утискивања нових дренажа на изворишту и уделу посматране групе бунара у укупном броју бунара на изворишту), различит број утиснутих дренажа, опцију затварања или остављања стари дренажа у функцији након утискивања нових, са ефектима регенерације и колмирања нових и старих дренажа укљученим у калкулацију,
- 5) извођење закључака о реперкусијама испитаних процеса на пројектовање и одржавање изворишта и водозахватних објеката београдског изворишта.

Основне хипотезе истраживања су:

- 1) постоје чврсте корелације између брзине колмирања (брзине раста локалних хидрауличких отпора на дренажима бунара) и концентрације двовалентног гвожђа и протицаја по дренажу, као и између брзине колмирања и редокс потенцијала и протицаја по дренажу. У случају да се протицај по дренажу не мења, брзина колмирања је константна и локални хидраулички отпори расту линеарно, што је и установљено осматрањем бунара,
- 2) биохемијске колматације се кроз порни простор шире тако да се запремина порног простора смањује директно пропорционално брзини струјања и концентрацији двовалентног гвожђа,
- 3) промена у порозности се преко одговарајуће корелационе функције може повезати са променом коефицијента хидрауличке проводљивости (коефицијент филтрације),
- 4) проценат смањења локалних хидрауличких отпора може се прерачунати у повећање порозности материјала око дрена преко поменуте корелационе функције,
- 5) механизам колмирања на микро нивоу заједно са истом врстом случајне просторне расподеле величине зрна код свих бунара, објасниће слично понашање бунара на целом изворишту, посебно у смислу линеарности раста локалних хидрауличких отпора (не зависи од локације бунара).

4 МЕТОДОЛОГИЈА

4.1 Одређивање корелације између брзине колмирања и физичко-хемијских параметара средине и протицаја по дрена, развој математичког и симулационог модела рада бунара и анализа утицаја режима рада бунара на процес колмирања

4.1.1 Увод

Смањење издашности бунара са хоризонталним дренама проузроковано је смањењем површине кроз коју пролази вода, услед запушавања и сужавања порног простора у прифилтарској зони и смањења броја и дужине активних хоризонталних дрена бунара. То је последица три доминантна узрока: микробиолошко колмирање, корозија и материјал дрена, подложен корозији. Када је материјал дрена склон корозији и услови средине погодни, корозија прво узрокује повећање храпавости дренаских цеви чиме настају велике површине погодне за развој микроорганизама и накупљање њихових екскремената и минералних талоба, што са своје стране узрокује настанак бројних микрозона са још повољнијим условима за корозију, као и запушавање пора прифилтарске зоне. Смањење броја дрена је последица регенерација. Дрена се искључују када услед снажних механичких удара приликом регенерације буду оштећени толико да се материјал из издани пробија у унутрашњост дрена и запушава дрена у близини шахта бунара, што доводи до драстичног смањења протока кроз дрена и пескарења.

Ако корозија није интензивна, смањење протицаја кроз дренае чији је механички интегритет очуван је узроковано повећањем локалних отпора услед смањења пречника и запушавања пора због накупљања продуката микроорганизама и њихове биомасе.

Да би се проучили процеси који узрокују смањење издашности бунара, од 2006. до 2013. године систематски су праћени протоци бунара са хоризонталним дренама и нивои у блиским и удаљеним пијезометрима (у залеђу и између бунара), као и промене услед регенерација и физичко-хемијски састав воде (у лабораторији и *in situ*) на београдском изворишту, са различитом учестаношћу у зависности од бунара, од једанпут у две године до неколико пута годишње (у појединим годинама). За анализу динамике процеса који узрокују раст локалних хидрауличких отпора и чинилаца који су повезани са тим процесима од 94 бунара за које постоје подаци о физичко-хемијском квалитету воде издвојен је 81 бунар за које постоји више од три податка о локалним хидрауличким отпорима током периода између 2006. и 2013. године (Слика 1).

Помоћу наведених података су добијене значајне информације о стању бунара и промени локланих хидрауличких отпора током времена, као и о утицају физичко-хемијских параметара средине на промене.

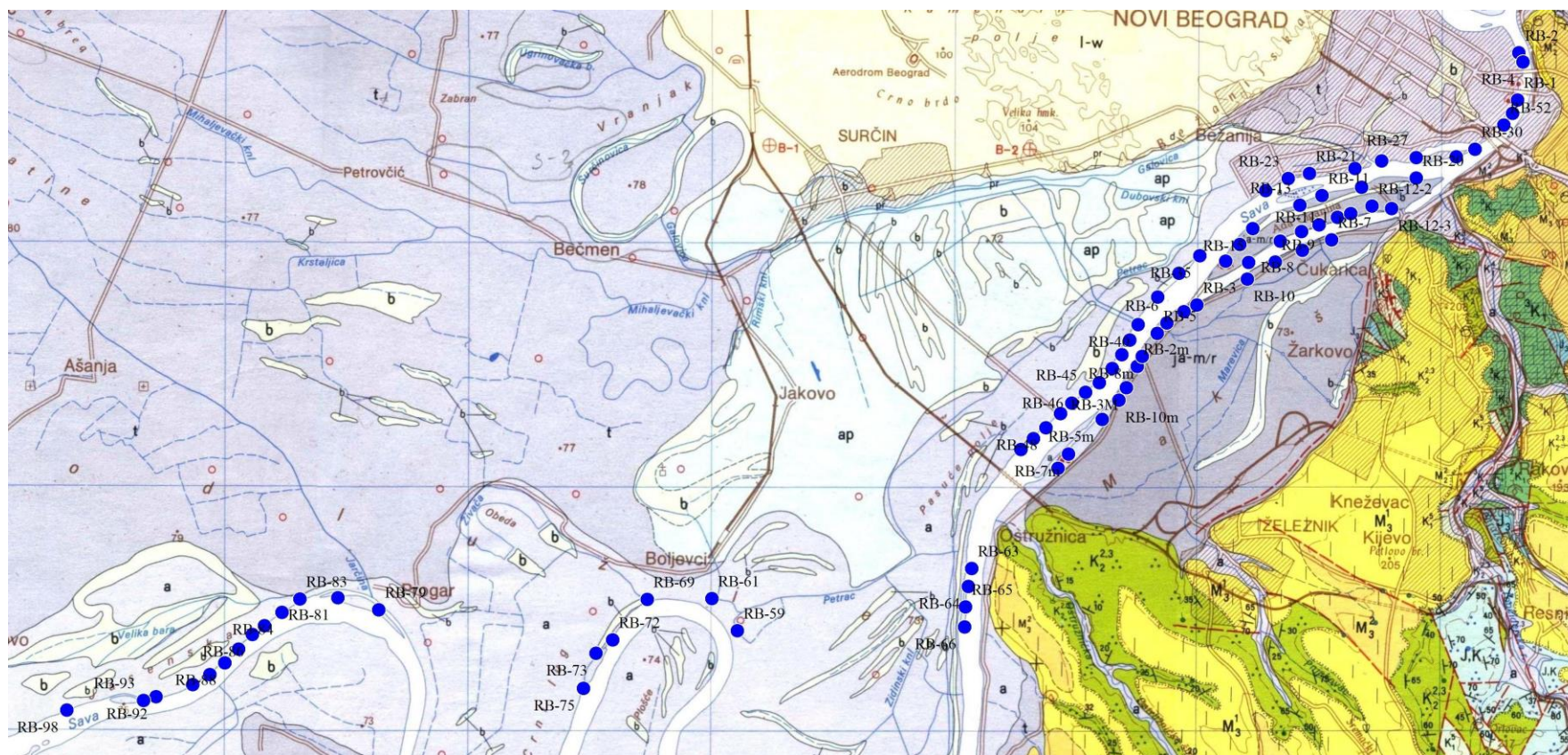
Динамика процеса колмирања бунара, који су предмет дисертације, се може најбоље проучавати посматрањем бунара са дренажима од прохромског челика, отпорног на корозију. Сви дренажи утиснути пре 2005. на београдском изворишту су израђени од обичног челика, неотпорног на корозију. Надаље су утискивани дренажи од прохрома (Preussag, а касније и другим методама). Прохромских дренажа има релативно мало, у овом тренутку на петнаест бунара (Rb-1, Rb-5m, Rb-6a, Rb-7m, Rb-8m, Rb-8, Rb-10, Rb-14, Rb-15, Rb-16, Rb-17, Rb-19/1, Rb-20, Rb-36, Rb-38), од чега за 5 бунара постоје сви неопходни подаци за анализу процеса колмирања бунара (Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20). Уз поменуте бунаре, међу бунарима са дренажима од обичног челика, одабрани су бунари за испитивање ефеката и узрока колмирања где се претпоставља да су доминантни биохемијски процеси. Као критеријум на основу ког су издвојени бунари са доминантно биохемијским колмирањем је коришћен број активних дренажа – 6 или више активних дренажа у 2013. години. На описани начин је издвојено укупно 29 бунара.

4.1.2 Локације, период и методе осматрања бунара

4.1.2.1 Локације бунара

Локације бунара, као и резултати осматрања који чине основни скуп података на којима се базира анализа процеса колмирања дренажа, су дате на следећој слици (Слика 1). На наредној слици дате су локације бунара са доминантним процесом колмирања (Слика 2).

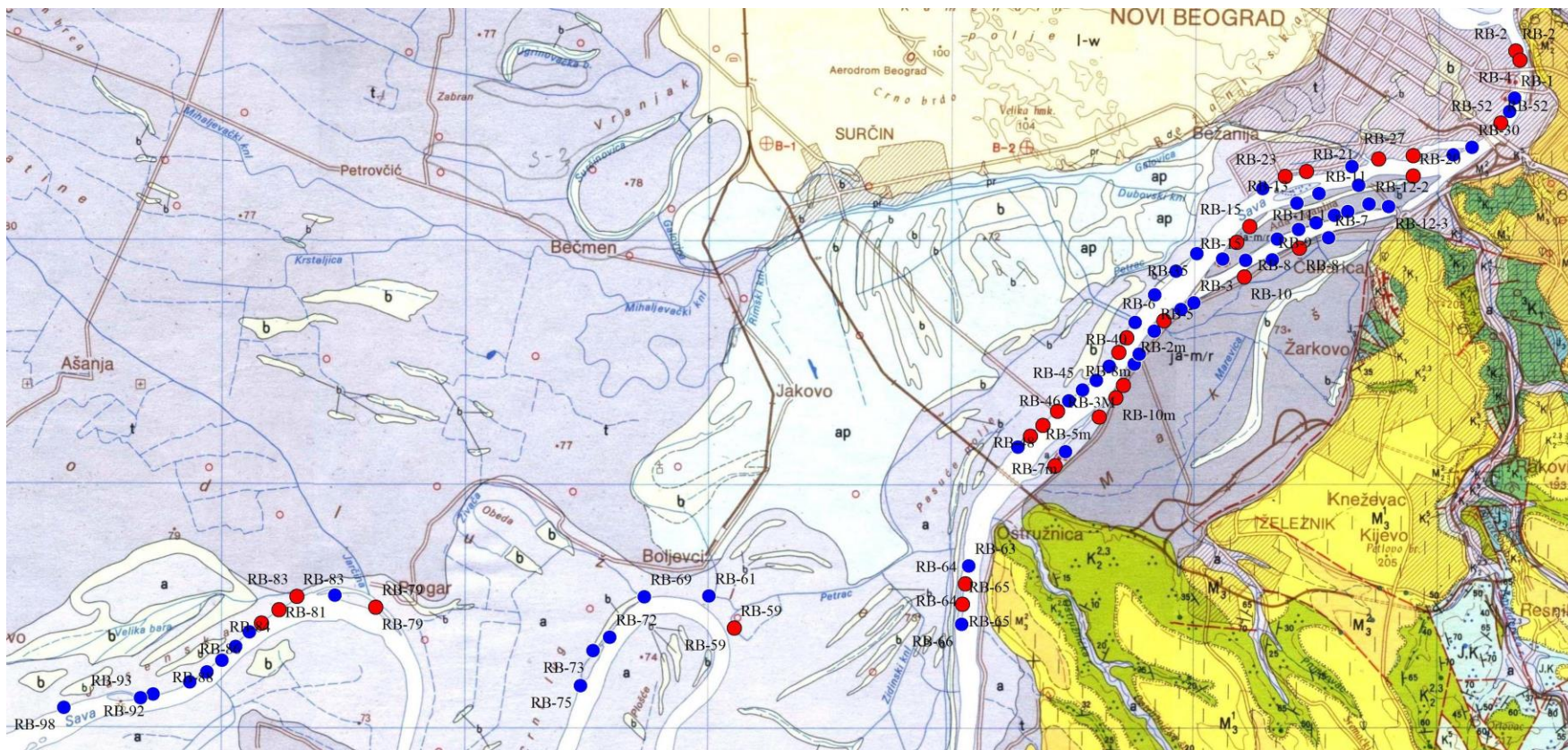
Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара



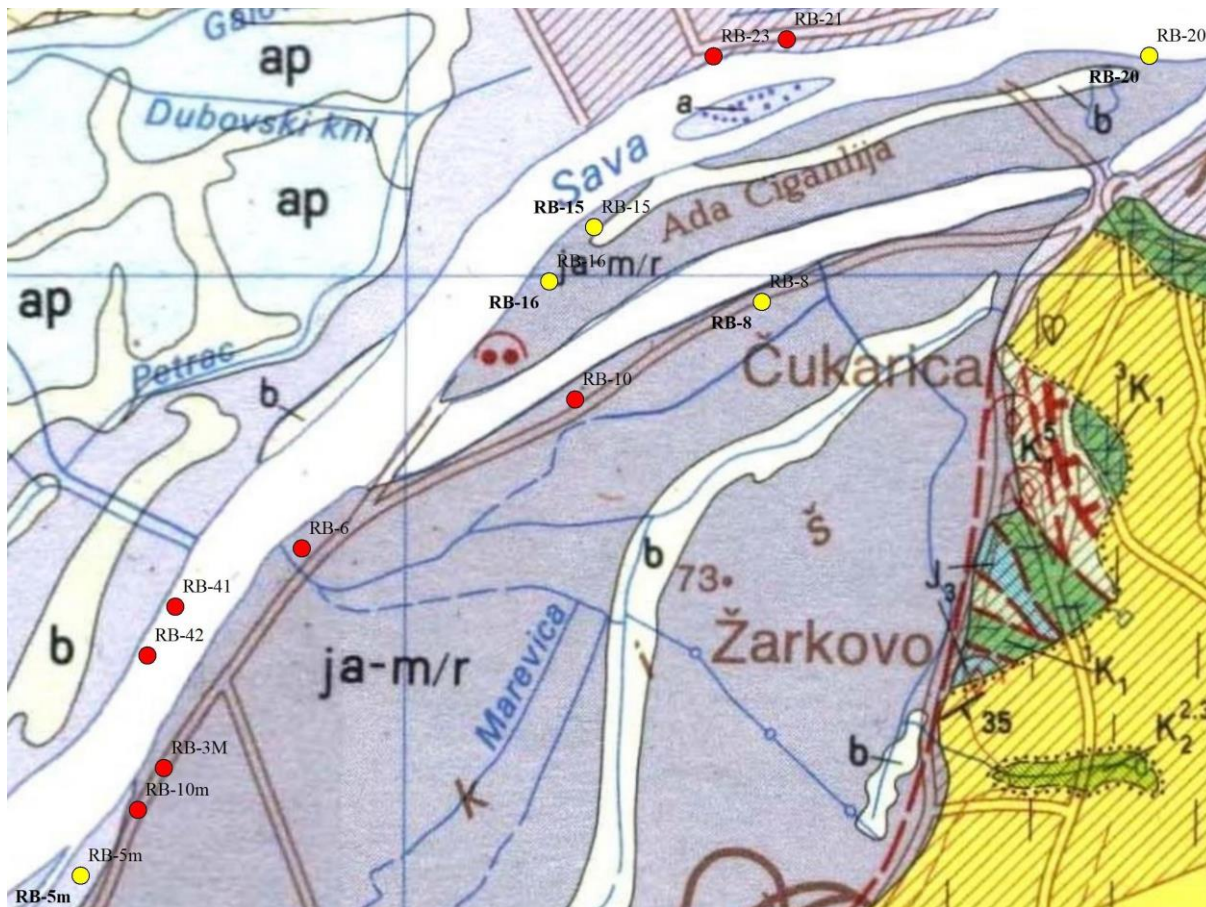
Слика 1 Локације 81 бунара (на Основној геолошкој карти (ОГК) 1:100 000, лист Београд) са хоризонталним дренажима на Београдском изворишту

На слици је приказана локација 81 бунара за које је спроведена основна анализа података о измереним протоцима у бунарима са хоризонталним дренажима и о одговарајућим измереним нивоима у шахтовима бунара и пијезометрима, као и о концентрацијама раствореног двовалентног гвожђа и вредностима редокс потенцијала подземне воде.

Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара



Слика 2 Локације 29 бунара (на ОГК 1:100 000, лист Београд) за које је процењено да је доминантни узрок повећања локалних хидрауличких отпора на дренажима колмирање (црвене тачке). Плаве тачке представљају остала 52 бунара

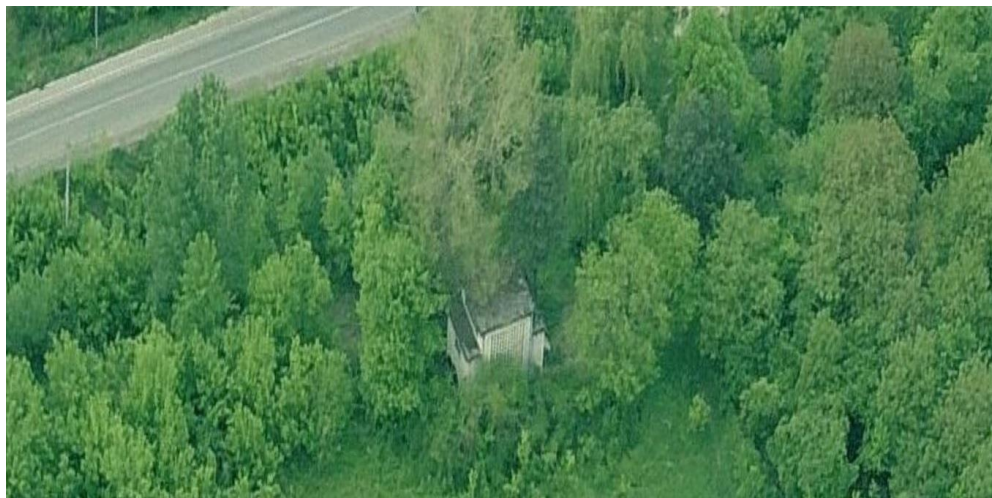


Слика 3 Локације 5 бунара са новим дренажима – Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 (на ОГК 1:100 000, лист Београд) – жуте тачке

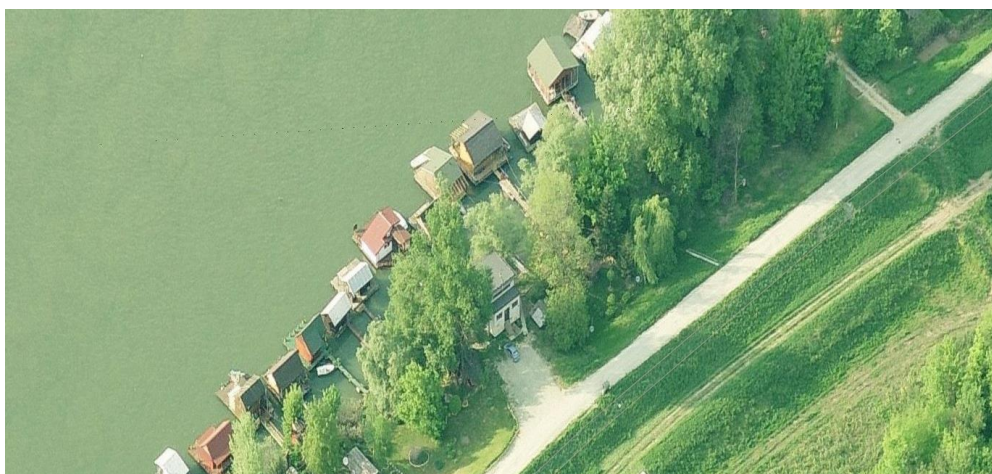
На следећих пет слика приказани су фотографски снимци надземних делова бунара, унутар којих се налази део машинске опреме.



Слика 4 Бунар Rb-5m, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)



Слика 5 Бунар Rb-8, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)



Слика 6 Бунар Rb-15, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)



Слика 7 Бунар Rb-16, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)



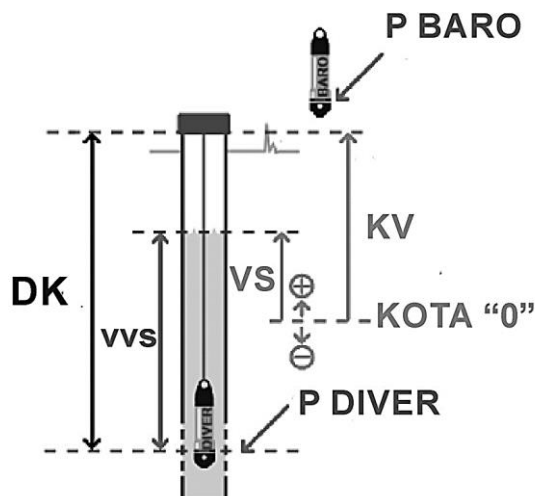
Слика 8 Бунар Rb-20, фотографија из ваздуха (извор: Bing Maps)

4.1.2.2 Методе хидрауличких мерења

Протицаји бунара су мерени методом која се заснива на кратком прекиду рада пумпи (око 15 минута) и праћењу повратка воде у бунар. Наведена метода је изабрана због неуједначене опремљености мерачима протока бунара на изворишту јер се може спровести на исти начин на сваком бунару уз висок ниво тачности мерења.

Приликом мерења капацитета бунара, делови изворишта на којима су спроведена мерења се претходно доводе у квазистационарно стање експлоатације тако што остали бунари на том делу изворишта непрекидно раде најмање 48 сати.

Помоћу претходно постављених „diver“-а (дајвера – сонди за аутоматско праћење нивоа подземних вода) мери се и бележи ниво у бунару сваке секунде, а у исто време се помоћу ручног мерача нивоа подземних вода прати ниво воде у бунару. На основу познатог пречника бунара и промене нивоа воде у бунару, добија се запремина воде која је ушла у бунар у познатом временском интервалу, што представља вредност протицаја датог бунара. Паралелно, праћене су промене нивоа на блиским пијезометрима, чије вредности, тачније разлике кота нивоа између бунара и пијезометра дају вредност локалне депресије – ΔS (ИЈЧ, 2013).



Слика 9 Метода праћења нивоа подземних вода у осматрачком или водозахватном објекту помоћу дајвера (енг. „diver“).

Помоћу дајвера се мери ниво подземне воде (висина стуба - VS) у односу на коту референтног нивоа – кота “0”. Промене нивоа подземне воде (висина воденог стуба – VVS) се бележе у односу на референтну постављену вредност – кота “0”. Кота врха мерног објекта (KV) се мери у односу на референтну постављену вредност – кота “0”. Дајвер је окачен на оптички кабл (дужина кабла – DK). Баро – дајвер мери атмосферски притисак (pBARO), док дајвер мери притисак течности изражен преко висине колоне (KV) и атмосферског притиска (pDIVER) – Ковачевић (2017).

Висина воденог стуба (VVS) може се изразити као:

$$VVS = \frac{pDIVER \cdot pBARO}{\rho g} [m] \quad (1)$$

где су p – притисак [Pa], ρ – густина воде [kg/m^3], g – гравитационо убрзање [m/s^2].

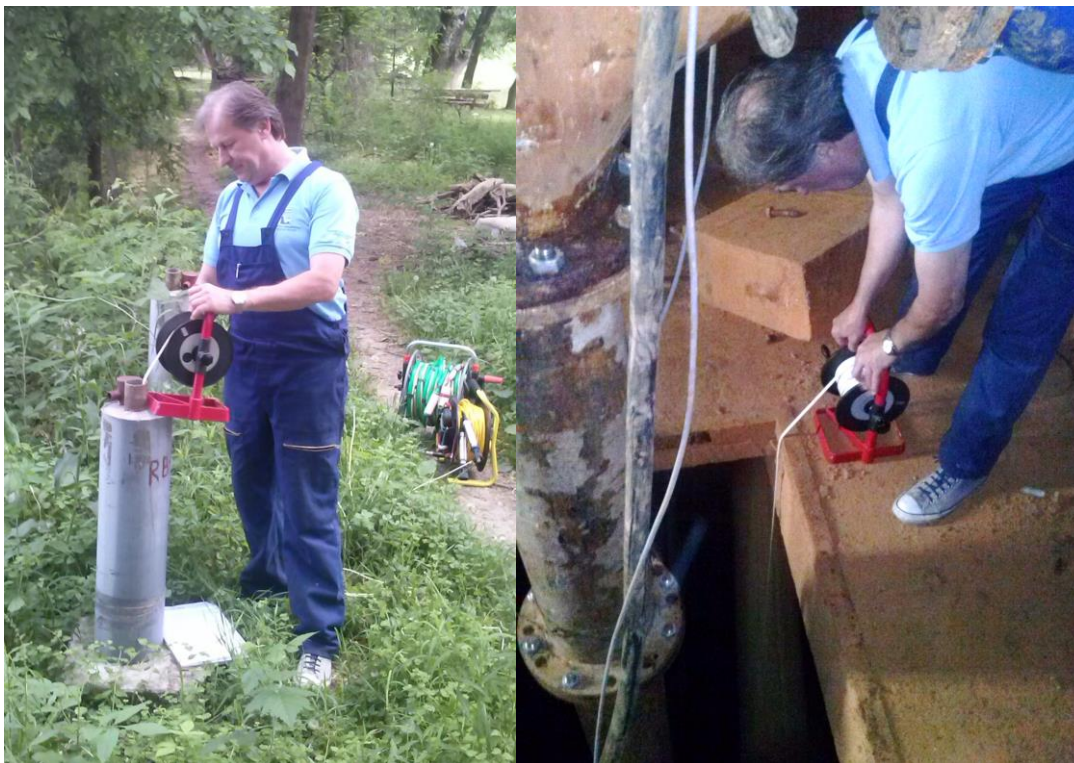
Висина стуба (VS) у односу на коту „0“ се израчунава према следећем изразу:

$$VS = KV - DK + VVS \quad (2)$$

Заменом једначине (1) у једначини (2) добија се следећи израз:

$$VS = KV - DK + \frac{pDIVER \cdot pBARO}{\rho g} [m] \quad (3)$$

Мануелна мерења нивоа подземне воде (висина стуба - VS) су спровођена тако што је одређивана кота врха мерног/експлоатационог објекта (KV) и мерена дубина нивоа воде у објекту у односу на врха мерног/експлоатационог објекта (DN) и VS израчунавано као KV-DN.



Слика 10 Мануелно мерење дубине до нивоа подземних вода у објекту (пијезометар и шахт бунара са хоризонталним дренажима)

4.1.2.3 Методе *in-situ* мерења и узорковања подземне воде

На терену је поред хидрауличког мерења, вршено и *in-situ* мерење физичко-хемијских параметара воде (температура, редокс потенцијал – Eh, специфична ел. проводљивост, садржај раствореног кисеоника, pH) помоћу мултипараметарске SEBA MPS-D сонде, или НАСН сонди CDC40130 (редокс потенцијал), РНС10130 (pH), LDO10130 (садржај раствореног кисеоника) и МТС10130 (специфична ел. проводљивост). Мерења је спроводила акредитована Лабораторија за воде Института за водопривреду „Јарослав Черни“ према следећим стандардним методама (SMEWW 21 – Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater 21st Edition 2005 APHA, AWWA, WEF):

- садржај раствореног кисеоника – SMEWW 21 метода 4500-О G,
- редокс потенцијал – SMEWW 21 метода 2580 В,
- концентрација водоникових јона (pH) – SMEWW 21 метода 4500-Н В,
- специфична електрична проводљивост – SMEWW 21 метода 2510 В,
- температура – SMEWW 21 метода 2550 В.



Слика 11 In-situ мерење физичко-хемијских параметара воде (пијезометар и шахт бунара са хоризонталним дренажима)

Након „in-situ“ мерења физичко-хемијских карактеристика, узоркована је вода из бунара и блиског пијезометра, или батерије пијезометара у којој се налази и блиски пијезометар, ради лабораторијских анализа подземних вода. Узорци воде из пијезометара су захватани коришћењем пумпе, којом је црпљена вода из пијезометара и након тога је захватана вода у посуде и узимани су узорци за физичко – хемијска испитивања у лабораторији.

Током спровођења узорковања подземних вода од стране техничара из акредитоване Лабораторије за воде Института за водопривреду „Јарослав Черни“ коришћени су следећи стандарди и методе за узорковање:

- SRPS EN ISO 5667-1, Квалитет воде-Узимање узорака - Део 1: Смернице за израду програма узимања узорака и поступке узимања узорака,
- JUS ISO 5667-6 1997, Квалитет воде-Узимање узорака- Део 6: Смернице за узимање узорака.



Слика 12 Узорковање подземне воде (из тијезометра коришћењем пумпе и у шахту бунара са хоризонталним дренажима са славине за узимање узорка)

4.1.2.4 Методе лабораторијских физичко - хемијских анализа

Одређивање концентрације двовалентног гвожђа је спровођено према стандардној методи – SMEWW 21 метода 3500-Fe. За одређивање концентрације двовалентног гвожђа, коришћен је један узорак са 2 ml хлоро-водоничне киселине (сопс.) на 100 ml узорка одмах након узорковања. Боца је напуњена директно из извора узорка и затворена је чепом. У део узорка од 50 ml додавано је 20 ml раствора фенантролина (100 mg 1,10-фенантролин монохидрата раствореног у 100 ml воде) и 10 ml раствора амонијум-ацетата (250 g амонијум-ацетата раствореног у 150 ml воде и 700 ml сирћетне киселине (сопс.)) уз снажно мешање.

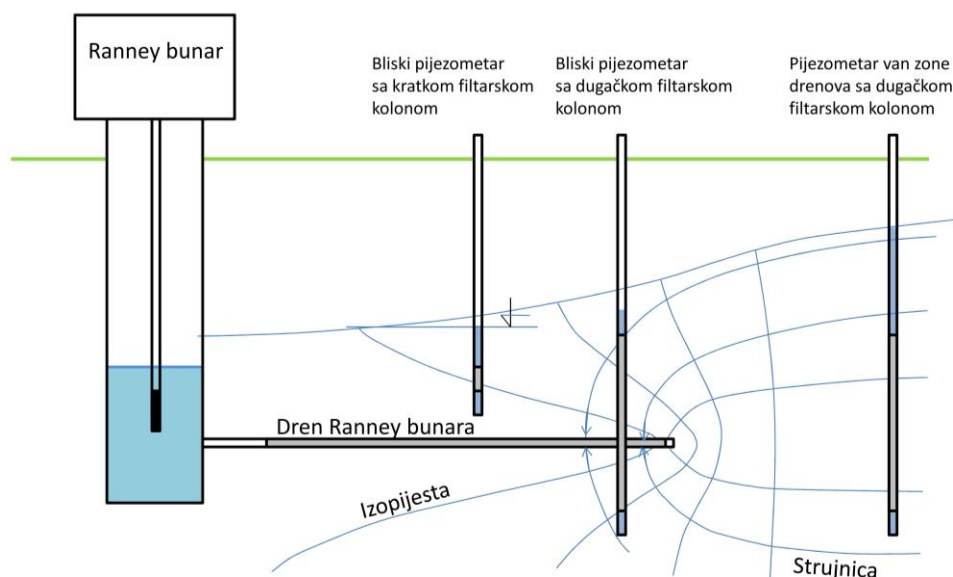
Након тога се приступа разблаживању до 100 ml и спроводи се мерење интензитета боје у року од 5 до 10 минута. Поступак је спроведен без излагања сунчевој светлости. Боја је мерена спектрофотометром или филтерским фотометром калибрисаном према сету стандардних раствора двовалентног гвожђа који се припремају од основног раствора који се добија постепеним додавањем 20 ml сумпорне киселине (сопс.) у 50 ml воде, растварањем 1404 mg фери-амонијум-сулфат хексахидрата, додавањем 0,1M раствора калијум-

перманганата укапавањем до појаве ружичасте боје и на крају разблаживањем водом до 1000 ml запремине.

За припремање сета стандардних раствора коришћена је процедура за припрему узорка за одређивање укупног гвожђа.

4.1.2.5 Локални губици на дренажима – дефиниција и одређивање

Типична струјна слика око дрена једног бунара са хоризонталним дренажима у вертикалном пресеку је дата на слици (Слика 13).



Слика 13 Типична струјна слика око дрена једног бунара са хоризонталним дренажима у вертикалном пресеку (преузето уз измене из Mitrinović et al. (2018))

Да би се проценила величина отпора на дренажима, као и ефекти изведених регенерација потребно је квантификовати величину локалног хидрауличног отпора (енгл. „local hydraulic resistance“, LHR) филтера и прифилтарске зоне бунара Dimkić et al. (2008a, 2012). LHR се дефинише као количник разлике пијезометарских нивоа између бунара и блиског пијезометра који се налази у зони дренажа (ΔS) и протицаја кроз дрен (q), који је изражен у литрима у секунди, – једначина (4).

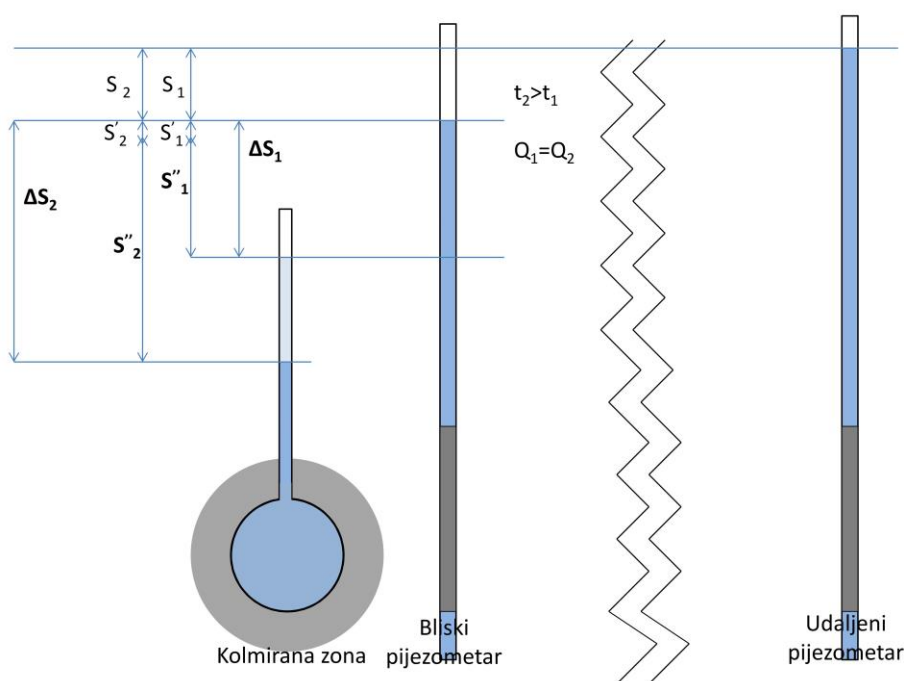
$$LHR = \frac{\Delta S}{q} \left[\frac{m}{l/s} \right] \quad (4)$$

ΔS је разлика између нивоа у блиском пијезометру и бунару и састоји се од депресије услед филтрације у аквиферу - S' и депресије која је резултат (променљивог и при константном протоку) хидрауличног губитка на контури дрена – S'' , Слика 14 (Dimkić et al.

2011b). Отпор средине x између удаљене линије са константним нивоом и дрена је дат једначином (5) (депресија по јединици протикаја по дренау):

$$x = \frac{S + S'}{q} \quad (5)$$

Губитак потенцијала услед отпора средине између удаљене линије са константним нивоом у залеђу и блиског пијезометра је означен са S . Губици пијезометарског потенцијала услед отпора водоносне средине ($S + S'$) се могу израчунати преко више различитих аналитичких решења диференцијалних једначина које описују струјање подземне воде ка бунару, или помоћу нумеричких прорачуна. Примењено решење је приказано у потпоглављу 4.1.4 „Губици услед струјања кроз аквифер“. Максимална расположива депресија ΔS_{max} је одређена статичким пијезометарским нивоом и минималном дужином усиса пумпе испод нивоа у шахту бунара.



Слика 14 Губитак пијезометарског нивоа на путу подземне воде од места близу дрена, кроз колмирану зону, до унутрашњости дрена, при условима константног протока (преузето уз измене из Mitrinović et al. (2018))

Ако се ван непосредне зоне дрена филтрационе карактеристике материјала издани не мењају важи:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S'}{q} \right) \approx 0 \quad (6)$$

Могуће је користити и пијезометре ван зоне дренажа, али у овом случају значајан део разлике између нивоа у пијезометру и бунару настаје услед струјања кроз материјал аквифера. Вредности LHR су тада прецењене. Када се посматра неки период без регенерација LHR скоро увек линеарно расте с протицањем времена када се протицај у бунару не мења значајно.

Брзина промене локалних хидрауличких отпора, тј. њихова кинетика, се назива $KLHR$ (енгл. „kinetics of local hydraulic resistance“) и обично се не мења много током времена, тј. једнака је нагибу линеарне регресионе функције за LHR и изражава се као:

$$KLHR = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\Delta S}{q} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S''}{q} \right) \quad (7)$$

Преко $KLHR$ се на основу максималне расположиве депресије и отпора средине x може одредити проток по дренажу (једначина (8)) и улазна брзина изражена у m/s (једначина (9)) за које ће, без промене у протоку и брзини, на крају посматраног периода дужине t бити искоришћена сва расположива депресија:

$$\frac{\Delta S_{\max} - x \cdot q_0}{KLHR_0 \cdot t} = \frac{S''_{(t)}}{KLHR_0 \cdot t} = q_0 \quad (8)$$

$$\frac{\Delta S_{\max} - x \cdot q_0}{KLHR_0 \cdot t} \cdot \frac{1}{1000 \cdot d \cdot \pi \cdot l} = \frac{S''_{(t)}}{KLHR_0 \cdot t} \cdot \frac{1}{1000 \cdot d \cdot \pi \cdot l} = v_0 \quad (9)$$

У једначини (9) l и d су дужина и пречник перфорираног дела дренажа изражени у метрима, респективно. Алтернативно, може се задати максимално повећање хидрауличких губитака на дренажима током једне године – ΔS_{\max}^a (a за годишње), па су одговарајући проток по дренажу и улазна брзина дати једначинама (10) и (11).

$$\frac{\Delta S_{\max}^a}{KLHR_0} = q_{\max} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta S_{\max}^a}{KLHR_0} \cdot \frac{1}{1000 \cdot d \cdot \pi \cdot l} = v_{\max} \quad (11)$$

4.1.3 Ефекти регенерације

У случају кад се изврши регенерација, промена LHR је практично тренутна и најчешће негативна. За реалну процену ефеката изведених регенерација потребно је квантификовати

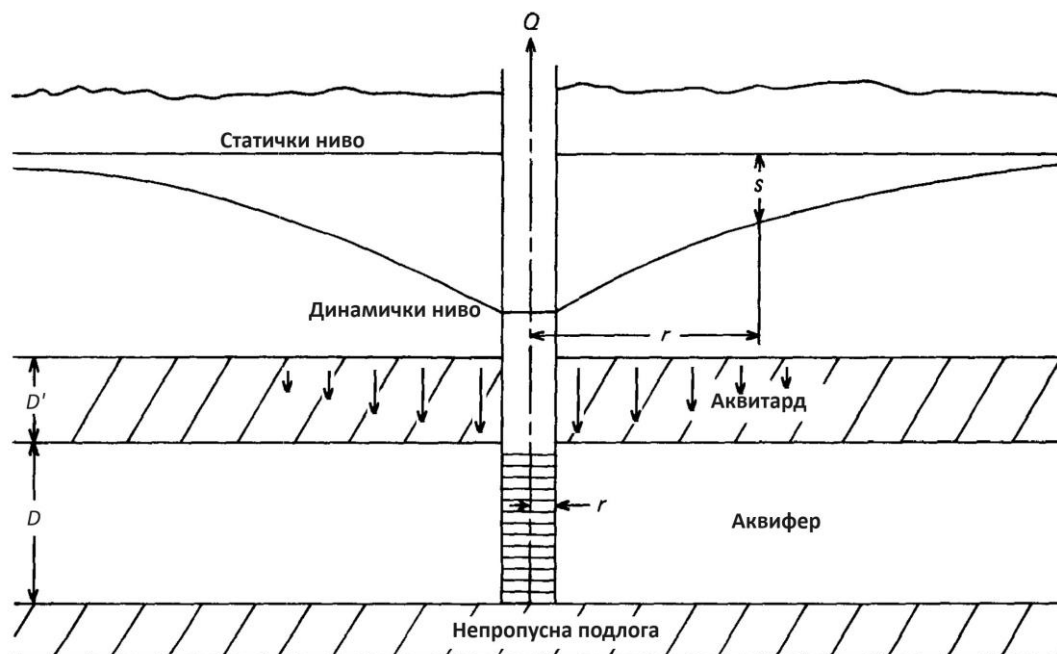
вредност LHR пре и после регенерације. Коэффициент смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} је дат као:

$$y_{reg} = \frac{LHR_2}{LHR_1} \quad (12)$$

где су LHR_1 и LHR_2 - вредности LHR непосредно пре и после регенерације, респективно, које су могу одредити екстраполацијом регресионих функција пре и после регенерације (Слика 41 – Слика 55), у напред и у назад, од тренутка регенерације.

4.1.4 Губици услед струјања кроз аквифер

Аквифер који каптирају бунари Београдског изворишта подземних вода је слабопропусним слојем одвојен од аквифера са слободним нивоом у алувиону реке Саве. Корито реке Саве се не усеца у слабопропусни међуслој и из ње се директно прихрањује само горњи водоносни слој, који се уз то прихрањује и инфилтрираном водом од падавина. Струјање са оваквом шематизацијом се, уз наравно значајну апроксимацију, може свести на модел аквифера који се прихрањује кроз слабопропусну повлату одређене дебљине и вредности коефицијента филтрације, у којој је пијезометарски ниво константан – Слика 15. Због директног хидрауличког контакта реке и горњег водоносног слоја, ниво у њему се много мање мења у плану него што је случај у доњем водоносном слоју и због тога је претпоставка константног пијезометарског нивоа у аквитарду који их раздваја довољно блиска реалном стању.



Слика 15 Шема струјања према потпуном усамљеном бунару у аквиферу са претакањем уз константан пијезометарски ниво у аквитарду (преузето уз измене из Reed J. E. (1980))

За прорачун струјања у оваквој шеми користи се Hantush-ово и Jacob-ово аналитичко решење (Delleur 1999).

Претпоставке на основу којих су одређени гранични услови који су омогућили извођење Hantush-овог и Jacob-овог решења за овакве услове струјања подземних вода су:

- аквифер и аквитард имају бесконачно распрострањење у плану, изотропни су и хомогени и константних су дебљина и филтрационих карактеристика,
- почетни нивои у оба аквифера су исти, у горњем аквиферу се ниво не мења,
- коефицијент филтрације водоносног слоја је најмање 100 пута већи од коефицијента филтрације аквитарда,
- струјање кроз аквитард је искључиво вертикално а кроз аквифер искључиво хоризонтално,
- у аквитарду нема ускладиштења воде већ само струјања,
- капацитет ускладиштења воде у бунару није урачунат.

Решење је представљено једначином:

$$s(r_e, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{1}{y} e^{\left(-y - \frac{r^2}{4L^2 y}\right) dy} = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r_e}{L}\right) \quad (13)$$

, где је $s(r, t)$ депресија у зависности од протеклог времена t и удаљености од бунара r , Q је протицај у бунару, T је трансмисивност аквифера а W је бездимензиона Hantush-ова функција (Delleur 1999). Фактор претакања L је дефинисан једначином:

$$L = \sqrt{Tc} \quad (14)$$

, где је хидраулички отпор аквитарда c одређен једначином:

$$c = \frac{D'}{K'} \quad (15)$$

, где је D' дебљина аквитарда а K' његов коефицијент филтрације у вертикалном правцу. Вредност параметра u се одређује као:

$$u = \frac{r_e^2 S}{4Tt} \quad (16)$$

, где је S коефицијент еластичног ускладиштења. Да би једначина могла да се примени на проблем струјања ка Ramey бунару потребно је да се он сведе на еквивалентни вертикални бунар. За израчунавање еквивалентног полупречника изабран је израз Citrini-ја:

$$r_e = l \cdot \sqrt[3]{0.25} \quad (17)$$

, где је l дужина дрена а n број дренава (Бабац & Бабац 2009).

Да би се Hantush-ово и Jacob-ово решење могло применити у Excel-у на било ком рачунару, искоришћено је апроксимативно решење дато у Singh (2009). Полази се од бездимензионог облика Hantush-овог и Jacob-овог решења:

$$\frac{s}{s^*} = e^{\frac{1}{2.3}} W \left(\frac{t^*}{2.3t}, \frac{r_e}{D' \sqrt{\frac{K}{K'}}} \right) \quad (18)$$

, где су s^* и t^* дефинисани као карактеристична дужина и карактеристично време, респективно:

$$s^* = \frac{Q}{4\pi \frac{1}{2.3} T} \quad (19)$$

$$t^* = 0.5749 \frac{r_e^2}{\frac{T}{S}} \quad (20)$$

$$\frac{s}{s^*} = \eta_s = e^{\frac{1}{2.3}} W \left(\frac{1}{2.3\eta_t}, \eta_l \right) = \eta_t w(\eta_t, \eta_l) \quad (21)$$

$$\eta_l = \frac{r_e}{d' \sqrt{\frac{K}{K'}}} \quad (22)$$

$$\eta_t = \frac{t}{t^*} \quad (23)$$

, при чему је η_s фактор обарања нивоа (бездимензиони), η_t је фактор времена (бездимензиони), η_l је фактор претакања (бездимензиони) и w је скалирана бунарска функција за аквифер са претакањем.

$$w = w_c \left(1 + \frac{10\pi}{23} \eta_t^{\frac{20}{19}} \eta_l^{\frac{111\sqrt{\pi}}{90}} \right)^\alpha; \quad \eta_t \leq \frac{5(1+\sqrt{3})}{\eta_l^2} \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{18}{35 \ln \frac{45}{4\pi\eta_l}} \quad (25)$$

$$w = w_c - \frac{e^{\frac{1}{2.3}}}{\eta_t} \ln \left(2\eta_t \left(1 + \left(\frac{4\pi}{9\eta_t} \right)^{\frac{\pi}{2}} \right)^{-\frac{4}{\pi}} \right); \quad \eta_t > \frac{5(1+\sqrt{3})}{\eta_t^2} \quad (26)$$

У једначинама (24) и (26) w_c је скалирана бунарска функција за аквифере са нивоом под притиском. Апроксимативна вредност w_c је дата као:

$$w_c = \frac{9e^{\frac{3\eta_t-1}{2.3\eta_t}}}{9+7\sqrt{\pi}\eta_t^{\frac{3}{4}}}; \quad \eta_t \leq 15 \quad (27)$$

$$w_c = \frac{e^{\frac{1}{2.3}} \ln(1,2913\eta_t)}{\eta_t}; \quad \eta_t > 15 \quad (28)$$

С обзиром да се израчунава депресија у бунару, тј. у питању је мали полупречник, однос између депресије и протока по дренажу (x из једначине (5)) не зависи од протицаја по дренажу или времену осим за врло кратке временске периоде, далеко краће од оних који се разматрају при решавању описаног проблема. Због тога је израчунато x (израчунава се дељењем s добијеним из једначине (21) са протицајем по дренажу) константно и као такво се користи у прорачуну, тј. не израчунава се поново за сваку итерацију прорачуна.

4.1.5 Испитивање корелација *KLHR* са протоком, редокс потенцијалом и концентрацијом раствореног двовалентног гвожђа, анализа рада и перформанси бунара

За свих 29 одабраних бунара су издвојени периоди између регенерација, ако их је било и за сваки од периода регенерације је извршена линеарна регресија вредности *LHR* да би се добило *KLHR*. Израчунате су просечне вредности протока по дренажу, концентрације раствореног двовалентног гвожђа и редокс потенцијала. Периоди за које није било довољно података, нису узети у разматрање. На овај начин је издвојен 41 период са одговарајућим просечним вредностима протока по дренажу, концентрације двовалентног гвожђа, редокс потенцијала и *KLHR*.

Досадашња истраживања су показала да постоји зависност између *KLHR*-а и концентрације раствореног двовалентног гвожђа, *KLHR*-а и протока по дренажу или улазне брзине воде у дренаж, као и *KLHR*-а и редокс потенцијала подземне воде. Због тога су испитане корелације између *KLHR* и просечних вредности протока по дренажу, концентрације раствореног двовалентног гвожђа и редокс потенцијала за све бунаре, за свих 41 периода њиховог рада.

Испитане су функције различитих облика, од којих су најбољи резултати регресије добијени за комбинације степене и експоненцијалне функције, при чему је изведена корелација *KLHR*-а са протоком по дренажу и концентрацијом раствореног двовалентног гвожђа, или *KLHR*-а са протоком по дренажу и редокс потенцијалом. Корелација је изведена коришћењем Excel Solver-а на тај начин што су вредности параметара у корелационој функцији аутоматски вариране тако да се у циљној ћелији, која је садржала средње квадратно одступање, добије минимална вредност.

4.1.6 Испитивање корелација ефеката регенерације са потенцијално релевантним факторима

Оцена ефеката регенерација је обухватила испитивање корелације y_{reg} коришћењем основних облика функција расположивих у оквиру *trend line* опције у Excel-у са:

- концентрацијом раствореног двовалентног гвожђа,
- редокс потенцијалом,
- бројем досадашњих регенерација,
- вредношћу LHR пре регенерације,
- бројем активних дренажа пре регенерације и
- протицајем по дренажу.

Веза са хидрохемијским параметрима је анализирана због њихове установљене везе са брзином настајања колматација која може бити повезана са механичким својствима и дебљином колмираног слоја што може утицати на ефекте регенерације. Веза са вредношћу LHR пре регенерације је разматрана јер распрострањење и дебљина колматација имају директну везу са ефектима регенерације. Већи број активних дренажа пре регенерације указује на доминацију процеса колмирања над корозијом и на већу механичку чврстоћу дренажа, што значи и већу ефикасност регенерација. Мали протицај по дренажу је због великог утицаја локалних отпора на издашност бунара директно повезан са великим вредностима LHR.

4.1.7 Израда математичког и модела симулације рада бунара

Модел симулације рада бунара је имплементиран у Microsoft Excel spreadsheet-у помоћу три маско-а. Протоци и нивои и за случај црпљења константним протоком и за случај црпљења са одржавањем задатог нивоа, се израчунавају на основу унетих вредности улазних параметара подељених на следеће групе:

I. Хидрогеолошки параметри:

- коефицијент хидрауличке проводљивости аквифера,
- коефицијент ускладиштења аквифера,

- дебљина аквифера,
 - хидрауличка проводљивост аквитарда,
 - дебљина аквитарда.
- II. Хидрохемијски параметри:
- концентрација двовалентног гвожђа у води.
- III. Грађевински параметри:
- број дренажа,
 - дужина дрена.
- IV. Параметри режима рада:
- дужина симулираног периода,
 - расположиви водени стуб у бунару (или максимални, или планирани мањи).
- V. Параметри везани за регенерације:
- број регенерација,
 - тренуци спровођења регенерација,
 - коефицијент смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације.
- VI. Симулациони параметри:
- број прорачунских међупериода између регенерација.

Вредности анализираних параметара се уносе преко Microsoft Excel spreadsheet-а пре започињања симулације.

Отпор водоносне средине се израчунава директно преко формула у spreadsheet-у коришћењем решења датог у потпоглављу 4.1.4 „Губици услед струјања кроз аквифер“.

Време рада бунара је подељено на периоде између регенерација (ако се спроводе). За сваки период се израчунавају протоци и нивои за случај црпљења константним протоком и за случај црпљења са одржавањем задатог нивоа коришћењем одговарајућих macro-а. Распожива депресија је одређена статичким пијезометарским нивоом и задатим нивоом у бунару (максимална депресија/минимални ниво су одређени минималном прихватљивом дубином усиса пумпе испод нивоа у шахту бунара).

За режим црпљења константним протоком током једног периода сабирају се отпори средине, локални хидраулички губици који потичу од инкрустација из претходних периода и локални хидраулички губици који настају током посматраног периода, збир се множи са протицајем по дрена током посматраног периода и тиме добија депресија на крају тог периода, која треба да одговара расположивом воденом стубу предвиђеним за тај период. Локални хидраулички губици који потичу од инкрустација из претходних периода се добијају израчунавањем постепеног раста LHR у зависности од одговарајућег $KLHR$, које зависи од концентрације двовалентног гвожђа у води и протока по дрена, у сваком претходном периоду и применом коефицијената смањења локалних хидрауличких губитака

услед регенерације y_{reg} за све претходне регенерације. Један од тасго-а се користи за прорачуне потребне за симулацију црпљења константним протоком са предвиђеним спровођењем регенерација.

За режим црпљења током ког се одржава задати ниво, периоди између регенерација (тј. непрекинути регенерацијом) се деле на међупериоде. Током сваког међупериода се протицај по дренажу не мења, а предвиђени ниво који важи за актуелни период између регенерација се постиже на његовом крају. На крају међупериода се проток мења тако да се на крају новог међупериода поново постиже исти ниво. Када је међупериод довољно кратак, додатна депресија настала због колмирања током његовог трајања је и код високих протока довољно мала да се прорачунати ниво не смањи значајно током међупериода, па је и на његовом почетку близак предвиђеном. Ово значи да је у том случају ниво скоро константан и да је проток близак максималном који се постиже за дату депресију у бунару. Два тасго-а се користе за прорачуне потребне за симулацију црпљења током ког се одржава задати ниво, један за случај спровођења регенерација и други када регенерација нема.

4.2 Одређивање механизма биохемијског колмирања бунара

4.2.1 Увод

Тренд промене LHR током времена и утврђених корелација са кључним параметрима средине је анализиран преко математичко-хемијског модела параметара средине, од којих су кључни параметри:

- концентрација раствореног гвожђа,
- брзина струјања и
- редокс потенцијал.

Утврђено је нагомилавање екстрацелуларних продуката микроорганизама, који узрокују промене у хидрауличким својствима микроскопске мреже пора, које је описано одговарајућим математичким моделом.

4.2.2 Микроорганизми и биохемијско колмирање

Микроорганизми су свеприсутни у подземној средини, укључујући и аквифере (Cullimore, 1999), већина је сесилна, тј. везана за зрна матрице аквифера. Део је сесилни партикуларни тј. везан за суспендоване честице (рецимо у карстним системима), а део је планктонски тј. слободно плива у подземној води (Cullimore, 1999). Када услови у којима живи нека популација бактерија постану неповољни, бактерије испуштају воду и губе површински електрични набој и попримају форму ултрамикробактерија и након одвајања

од површине за коју су биле фиксиране подземна вода их носи и ако доспеју у повољну средину враћају се у нормално стање и причвршћују за неку површину (Cullimore, 1999). Повољна средина може бити околина бунара који ради због:

- повећаног флукса хранљивих материја (посебно суспендоване партикуларне органске материје, укључујући микроорганизме, растворене органске материје и оксидационих средстава – кисеоника, нитратних јона, сулфатних јона),
- бржег одношења штетних продуката метаболизма и посебно у случају аквифера са слободним нивоом,
- мешања оксичних и аноксичних подземних вода услед обарања и повремених дизања нивоа око бунара.

Величине популација, које су у динамичкој равнотежи, зависе од брзине протицања подземне воде, тако да се оне јављају најизразитије у почетку уз сам водопријемни део бунару на крају привилегованих путања подземне воде, где су брзине највеће. Даље уз ове привилеговане путање и уз сам бунар у мање проводљивим зонама се развијају мање популације, генерално у пропорцији са брзинама струјања. Услед тога колматације често имају тзв. „прстаст облик“ и простиру се радијално, често изразитије у неком смеру и на некој дубини (Cullimore, 1999; Houben, 2006; Houben & Weihe, 2010).

Како се накупљају наслаге које настају као последица метаболичких процеса метаболизма микроорганизама који чине ове популације, тако се хидрауличка проводљивост микроканала смањује, удео воде који пролази кроз њих се смањује а удео воде која пролази другим, раније мање повољним путањама се повећава. Укупан отпор струјању расте и динамички ниво воде у бунару опада. Како се струјање премешта ка раније мање повољним микроканалима, тако се појављују, или расту некад мале популације микроорганизама. Од биофилмова се откидају делови димензија од 16 до 64 μm што убрзава процес колонизације повољних ниша у околини бунара.

Појава значајних колматација око бунара који служе за водоснабдевање је најчешће повезана са повишеним концентрацијама раствореног двовалентног гвожђа у води и наслаге се формирају деловањем бактерија повезаних са гвожђем (Iron related bacteria – IRB). Гвожђевите бактерије се деле на:

- 1) Бактерије са „петелком“ у које спада род Gallionellaceae, хемолитотрофне бактерије које енергију добијају оксидацијом јона двовалентног гвожђа кисеоником (у условима ниских концентрација кисеоника), док им је органска материја потребна за формирање биомасе,
- 2) Филаментозне бактерије које формирају цевчице од екстрацелуларног материјала и налазе се у њиховој унутрашњости. У ову групу спадају родови Leptotrix (цевчице нису причвршћене за површину, са обилним инкрустацијама оксихидроксида

гвожђа), *Srenotrix* (цевчице једним делом прекривене инкрустацијама оксихидроксида гвожђа, ћелије унутар њих јасно видљиве) и *Sphaerotilus* (цевчице петељком причвршћене за површину, без или са мало инкрустација оксихидроксида гвожђа),

- 3) Хетеротрофне (аеробне и анаеробне) конзорцијалне бактерије чине стратификоване популације у чијем биофилму се накопљају минерали гвожђа који углавном имају заштитну улогу. Аеробне углавном чине врсте које спадају у род *Pseudomonas*, коме често припада две трећине врста бактерија присутних у бунару и околном материјалу (Mansuy, 2017), док су анаеробне углавном сулфат-редукујуће бактерије.

Постоји неколико модела експериментално посматране интеракције између раста биомасе и њених продуката као и накопљања честица профилираних из подземне воде и промена хидрауличких особина порозних медија (Rockhold et al., 2002; Thullner et al., 2003).

Обично се модели заснивају на претпоставци хомогеног биофилма и придружених наслага који покрива површину зрна, а смањење хидрауличке проводљивости узроковане растом биофилма и придружених наслага теоретски произилази из претпоставке снопова паралелних пора.

Код појединих огледа промене у коефицијенту филтрације најбоље се могу објаснити мрежом пора и растом биомасе и продуката биомасе у агрегатима, док претпоставка равномерног биофилма не може да објасни опажања. Анализе појединих узорака порозних медија показале су да је само 5% укупног органског угљеника присутно у виду бактеријске биомасе, док се преосталих 95% приписује екстрацелуларним полимерним супстанцама (Thullner et al., 2003).

Према Houben (2003), две опсежне студије инкрустација на бунарима за водоснабдевање које су обухватиле неколико хиљада бунара су показале да у саставу инкрустација доминирају оксиди гвожђа, док је биофилм само минорна компонента (око 1%).

Према појединим огледима укупна запремина бактеријских ћелија остала је испод 0,01% порног простора (Thullner et al., 2003). Биофилм често садржи популације различитих врста микроорганизама (у млађим и до тридесет, у старијим и мање од пет) које су стратификоване, тако да оне аеробне које користе кисеоник или нитрате да разлажу органску материју насељавају површину биофилма, док се сулфат-редукујуће, или бактерије које врше хидролизу партикуларне органске материје налазе у унутрашњем делу микрофилма (Cullimore, 1999).

4.2.3 Моделовање промене запремине порног простора и утицаја на хидрауличку проводљивост и прерасподелу протока у зони изложеној колмирању

Процеси колмирања на микро нивоу се испољавају на макро нивоу као повећање локалног хидрауличног отпора (*LHR*) на дренажима. Одређивање механизма биохемијског колмирања порног простора око дренажа бунара је спроведено коришћењем нумеричког модела којим се реплицира промена разлике између нивоа у блиском пијезометру и шахту бунара током времена при променама протока бунара, чиме је објашњен приближно линеаран тренд раста губитка пијезометарског потенцијала током времена у колмираној зони око дренажа по јединици протицаја по дренажу (*LHR*). Модел је просторно дискретизован на ћелије и свакој су додељени расподела величине зрна (из које се добијају коефицијент хидрауличке проводљивости и порозност) и коефицијент брзине колмирања (исти је за све ћелије). Време је дискретизовано на периоде између мерења протока и нивоа у Ranney бунару који је моделован. За сваки период је у центру модела задат проток измерен на почетку периода.

На граници модела је задат константан хидраулички потенцијал, а промена у протоку у сваком периоду као и промене порозности и коефицијента хидрауличке проводљивости услед процеса колмирања узрокују промену хидрауличног потенцијала у ћелијама. Разлика између константног потенцијала и потенцијала у средишњој ћелији је пад нивоа услед локалног отпора, који је поређен са измереном разликом нивоа између блиског пијезометра и шахта бунара). Брзина запуњавања порног простора (претпостављено функција Darcy-јеве брзине или протицаја кроз ћелију и концентрације раствореног гвожђа), дата је преко коефицијента брзине колмирања и упоређена је са резултатима анализа датим у поглављу 5.1.

Након испитивања наведених хипотеза, показано је и како се прерасподела протока, као и нагомилавање наслага у порама дуж свих путања струјања испољава као генерално линеарно повећање локалних хидрауличких отпора.

Нумерички модел са променљивом порном запремином и прорачуном ефеката промене на повећање отпора струјању, уз прорачун прерасподеле протока услед промена у порној запремини по ћелијама (проток се преусмерава ка иницијално мање проводљивом материјалу) креирани су и тестирани у Excel-у коришћењем наменски написаног масго-а.

За симулације су коришћени резултати осматрања бунара са утиснутим новим дренажима од прохромског челика (у загради година почетка експлоатације с новим дренажима) – Rb-5m (2008.), Rb-8 (2006.), Rb-15 (2007.), Rb-16 (2007.) и Rb-20 (2008.). Наведени бунари су одабрани због следећих разлога:

- 1) на дренажима бунара не постоји корозија,

- 2) процеси колмирања се могу пратити од почетка, од стања чистог материјала водоносног слоја,
- 3) праћени су знатно чешће од осталих бунара.

4.2.3.1 Просторни распоред параметара водоносне средине према статистичкој анализи гранулометријског састава узорака материјала

Просторни распоред порозности и коефицијента хидрауличке проводљивости и њихова варијабилност се могу повезати са гранулометријским саставом материјала. У оквиру истраживања анализирани су резултати гранулометријских узорака из свих бушотина око Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 како би се утврдила статистичка расподела масеног садржаја зрна различитих величина у узорцима материјала из бушотина, тј. у деловима аквифера и тиме преко корелационих функција просторна расподела порозности и коефицијента хидрауличке проводљивости.

Сазнања о геолошкој грађи и хидрогеолошким карактеристикама кварталних седимената на београдском изворишту су стицана кроз извођење истражних радова за потребе пројектовања утискивања нових дренажа, дефинисања стратешких праваца развоја изворишта, израде елабората о резервама и др.

На пример, током 2005. године од стране Института "Јарослав Черни" спроведена су детаљна хидрогеолошка истраживања која су представљала подлогу за израду главних пројеката ревитализације бунара Rb-7, Rb-8, Rb-15, Rb-17, Rb-29 и Rb-30, утискивањем додатних дренажа – ИЈЧ (2005).

У периоду од 2005. до 2010. године урађена је и „Студија Београдско извориште подземних вода – стање и правци развоја“ и за потребе израде ове студије извршен је значајан обим истражних радова који су обухватили и истражно бушење, анализе механичког састава седимента, палеонтолошке, седиментолошке, хемијске и микробиолошке анализе и опите црпења – ИЈЧ (2010).

У периоду од 2011. до 2013. извођени су радови потребни за израду Елабората о резервама београдског изворишта подземних вода и Пројекта увођења система мониторинга Београдског изворишта са констатованим процесима старења бунара и карактеристикама изворишта, који су између осталог обухватили и бушење десет структурно-пијезометарских бушотина. Подаци о резултатима гранулометријских анализа узорака материјала из бушотина изведених у оквиру наведених, као и других истражних радова, су анализирани да би се статистички дефинисали масени удели зрна различите величине (гранулометријски састав) у материјалу каптираног водоносног слоја (материјал испод дубине од 15 m) и њихова просторна варијабилност. На основу њих се помоћу корелација могу израчунати порозност и коефицијент хидрауличке проводљивости око сегмената дрена чиме би природна хетерогеност материјала била реплицирана.

Бушење структурних и пијезометарских бушотина је скоро увек извођено машинском гарнитуром, континуалним језгровањем уз форсирање обложне колоне дуж целе дубине бушења, при чему су комбиноване следеће методе бушења:

- 1) ротациона метода уз употребу сржне цеви или сврдла (кроз консолидоване материјале у повлати, у евентуалним међуслојевима између водоносних слојева и у подини полицикличних водоносних седимената),
- 2) ударна метода вентил кашиком (кроз растресите, водоносне материјале).

Вентил кашику (тзв. бућку), практично чини цев са клапном на дну, која задржава унутра материјал и воду који уђу у цев током њеног пуњења. Пуњење се постиже дизањем и спуштањем апаратуре цимањем челичног ужета на коме виси, док се истовремено лавирањем спушта обложна колона да се зидови бушотине не би обрушавали.

Када се напуњена вентил кашика извуче из бушотине и истресе на глатку, непропусну површину, велики део ситних гранулометријских фракција се испере са водом која отече и оцеди се из материјала ако је узорак узет испод нивоа подземних вода, што је увек случај на београдском изворишту.

Током израде тридесет пијезометара 2017. године испробано је на одређеном броју бушење сржном цеви дуж целе бушотине аутоматизованом гарнитуром велике снаге. Том приликом су успешно извучени комплетни узорци растреситог материјала из водоносног слоја помоћу сржне цеви. Да би се установило колике су разлике између гранулометријских састава узорака узетих вентил кашиком и сржном цеви, поред пијезометра Rb-44/p-1 израђеног 2016. стандардном комбинацијом метода, на 1 m од њега избушена је још једна пијезометарска бушотина (Rb-44/p-1s) континуалним бушењем сржном цеви, при чему су узорковани исти дубински интервали као при бушењу Rb-44/p-1, а гранулометријске анализе извршене истом стандардном методом у истој лабораторији за геомеханику (Зарић et al. 2018).

Показало се, као што је и очекивано, да је гранулометријски састав узорака растреситог (неконсолидованог) материјала узетих сржном цеви знатно ситнозрнији од узорака из истих дубинских интервала узетих вентил кашиком.

С обзиром на то да такве разлике могу значајно да утичу на прорачунате вредности коефицијента хидрауличке проводљивости и порозности дефинисана је једноставна корекциона једначина којом се из резултата гранулометријских анализа узорака материјала узетих вентил кашиком добија претпостављени прави гранулометријски састав – једначина (29). У овој једначини d_{10} , d_{15} , d_{20} , d_{50} , d_{60} и d_{85} су пречници зрна за које сва зрна истог или мањег пречника чине 10, 15, 20, 50, 60 или 85% масе узорка узетог вентил кашиком, респективно. C_1 , C_2 и C_3 су константе које се користе за израчунавање коригованих пречника $d_{10,c}$ и $d_{15,c}$, $d_{20,c}$ и $d_{50,c}$ и $d_{60,c}$ и $d_{85,c}$, респективно. Константе C_1 , C_2 и C_3 су добијене

регресијом на основу резултата гранулометријских анализа узорака из бушотина Rb-44/p-1s и Rb-44/p-1.

$$d_{i,calc} = d_i \cdot C_j \frac{d_{60}}{d_{10}}, i \in \{10, 15, 20, 50, 60, 85\}, j = \begin{cases} 1; i = 10, i = 15 \\ 2; i = 20, i = 50 \\ 3; i = 60, i = 85 \end{cases} \quad (29)$$

Осим бушотине поред пијезометра Rb-6/p-1 који је 2016. израђен близу шахта бунара Rb-6, на раздаљини од 3 m је 2017. израђен пијезометар Rb-6/p-5d такође помоћу сржне цеви. Једначина (29) је успешно тестирана и на резултатима гранулометријских анализа узорака из бушотине Rb-6/p-1 тако што су резултати корекције упоређени са резултатима гранулометријских анализа узорака из Rb-6/p-5d. Корекција је примењена и на све резултате гранулометријских анализа узорака из бушотина око Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20.

Анализом резултата (коригованих и некоригованих) гранулометријских анализа узорака из бушотина око Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 Rb-20 потврђена је претпоставка (Sulaiman et al., 2007) да је расподела величина зрна у узорцима материјала, тј. деловима аквифера лог-нормална и одређена су математичка очекивања и стандардне девијације за сваки узорак.

Анализом расподеле математичких очекивања лог-нормалних расподела узорака који су узети из водоносног слоја испод дубине од 15 m утврђено је да расподела за наведени узорак највише одговара нормалној расподели, што важи и за стандардне девијације лог-нормалних расподела узорака. За сваки бунар је одређено математичко очекивање и стандардна девијација и наведена расподела. На основу установљених параметара расподеле величине зрна, у моделу су задати гранулометријски састави сваке ћелије и на основу тога је израчуната порозност и коефицијент хидрауличке проводљивости у почетном стању, пре промена. На овај начин се у моделу реплицирају хетерогеност и хидрауличка и микро-геометријска својства водоносног слоја ког каптирају дренажи око анализираних Ranney бунара.

Кроз процес калибрације са резултатима осматрања промене локалних хидрауличких отпора на бунарима, одређене су вредности коефицијента брзине колмирања порног простора и параметри статистичке расподеле математичких очекивања расподеле пречника зрна у под-доменима/ћелијама, у којима се најбоље реплицира уочено повећање отпора струјању на макроскопском нивоу.

Darcy-Weisbach-ов закон струјања под притиском кроз цеви гласи:

$$\frac{\Delta S}{l} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} \quad (30)$$

и у оквиру концептуалног модела порозног медија као снопа цеви малог пречника се може користити и за симулирање струјања кроз њега. Reynolds-ов број је једнак:

$$Re = \frac{\rho w d}{\mu} \quad (31)$$

док је средња брзина струјања w једнака:

$$w = \frac{\frac{q}{n}}{\frac{d^2 \pi}{4}} \quad (32)$$

, при чему је d пречник цевчице, q запремински проток, а n порозност.

Када се изрази (30) и (31) примене на једначину (32) добија се зависност градијента хидрауличког потенцијала од запреминског протока:

$$\frac{\Delta S}{l} = \frac{128 \mu}{\rho g \pi n} \cdot \frac{q}{d^4} \quad (33)$$

Једначина (33) указује на то да мало смањење пречника при константном градијенту хидрауличког потенцијала значи много веће смањење запреминског протока.

Један од израза којим се може одредити коефицијент хидрауличке проводљивости (Houben & Treskatis, 2003) је и Kozeny-Carman – ова једначина:

$$K = \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{\rho_w g}{\tau^2 \rho_s^2 S^2 C_s \mu} \quad (34)$$

у којој n означава порозност, ρ_w и ρ_s су густина воде и чврсте материје матрице респективно [ML^{-3}], μ је динамичка вискозност [$ML^{-1}T^{-1}$], S је специфична површина чврсте материје матрице [L^2M^{-1}], C_s је геометријски фактор (2 за тубуларни облик пора, а 3 за порни простор између плочастих зрна), τ је тортуозитет (вијугавост) и може имати вредност до 7, K [LT^{-1}] је коефицијент хидрауличке проводљивости, док је g гравитационо убрзање [LT^{-2}].

У Rockhold et al. (2002) је приказан следећи израз за зависност односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија од порозности колмираног и чистог порозног медија:

$$\frac{K^*}{K} = e^{-0,5 \left(\frac{1 - \frac{n_b}{n}}{B_c} \right)^2} \left(\frac{n_b}{n} \right)^2 + \left(1 - e^{-0,5 \left(\frac{1 - \frac{n_b}{n}}{B_c} \right)^2} \right) \left(\frac{a}{a + 1 - \frac{n_b}{n} - a \left(1 - \frac{n_b}{n} \right)} \right) \quad (35)$$

, при чему су K^* и K коефицијенти хидрауличке проводљивости колмираног и изворног седимента респективно, n_b је порозност колмираног медија, n његова изворна порозност, a је коефицијент чија је вредност практично једнака односу K_S^* и K_S када је порни простор потпуно колмиран продуктима биомасе, тј. када је вредност члана $1 - \frac{n_b}{n}$, тј. удела порне запремине заузеле бактеријама и њиховим екстрацелуларним продуктима у укупној порној запремини једнака 1 (уобичајена вредност параметра a је 0,00025), B_c је емпиријски одређен параметар (према Rockhold et al. (2002) B_c је једнако 0,05 за униформни пречник честица од 0,09 mm и 0,11 за униформни пречник честица 0,7 mm). У Rockhold et al. (2002) је дат још један израз за зависност односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија од порозности колмираног и чистог медија:

$$\frac{K^*}{K} = \left(\frac{n_b}{n} \right)^{\frac{19}{6}} \quad (36)$$

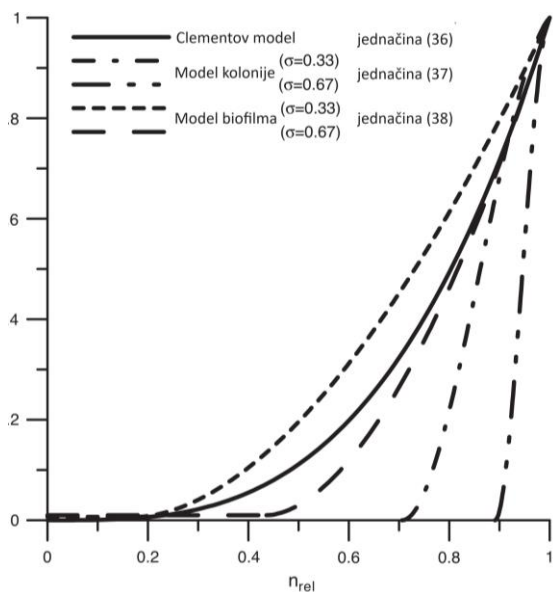
Коефицијент хидрауличке проводљивости колмираног порозног медија (Thullner et al., 2003) се, када биомаса и њени продукти расту у виду колонија у порном простору, изражава као:

$$\frac{K^*}{K} = a \left(\frac{\frac{n_b}{n} - n_0}{1 - n_0} \right)^3 + (1 - a) \left(\frac{\frac{n_b}{n} - n_0}{1 - n_0} \right)^2 \quad (37)$$

, при чему су $k_{f \min}$, n_0 и a параметри једначине, док се у случају равномерног раста биомасе и њених продуката на чврстој матрици порозног медија изражава као:

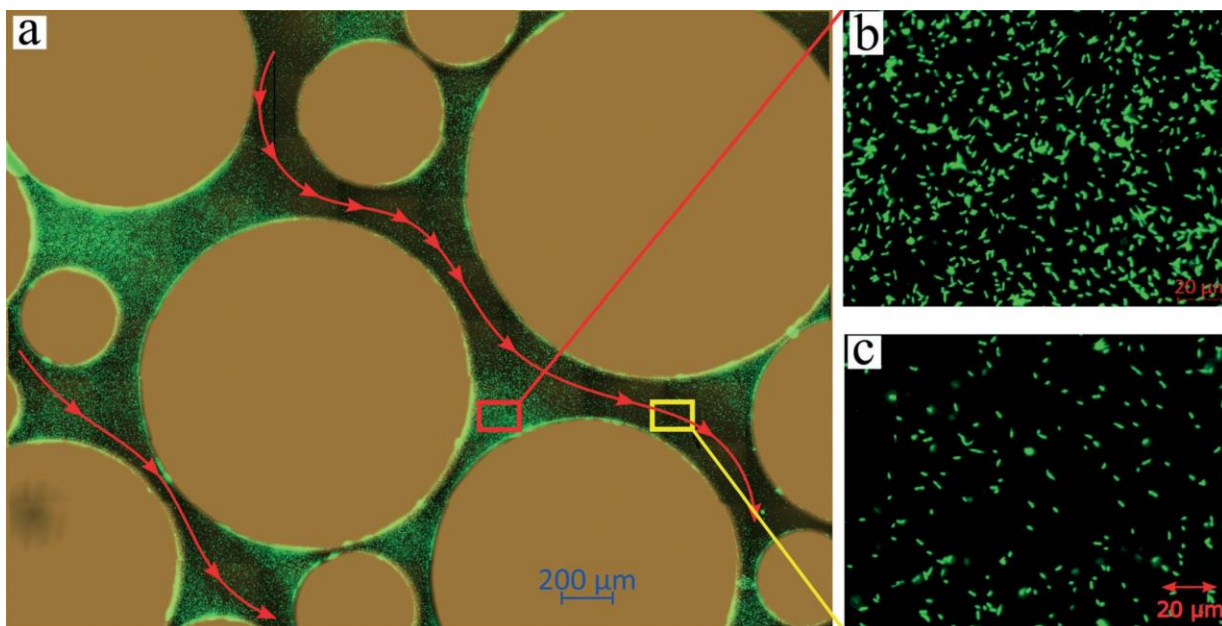
$$\frac{K^*}{K} = \left(\left(\frac{\frac{n_b}{n} - n_0}{1 - n_0} \right)^b + k_{f \min} \right) \frac{1}{1 + k_{f \min}} \quad (38)$$

при чему су $k_{f \min}$, n_0 и b параметри једначине.



Слика 16 Поређење односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија и односа порозности колмираног и чистог порозног медија, преузето уз модификације из Thullner et al. (2003)

Поређење односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија и односа порозности колмираног и чистог порозног медија приказано је за модел колонија (једначина (37)), за модел биофилма (једначина (38)) и за однос дат једначином (36), за $a = -1,7$, $b = 1,8$ и $k_{fmin} = 0,01$ и две дистрибуције величине пора са различитим стандардним девијацијама ($\sigma = 0,33$, $\sigma = 0,67$),



Слика 17 Снимак флуоресценције бактерија у вештачком порозном медију, интензитет флуоресценције је пропорционалан концентрацији микроорганизама, преузето из Gaol et al. (2021)

На основу приказане слике јасно је уочљив почетак формирања површинског биофилма. За раст у виду колонија вредност n_0 износи између 0,7 и 0,9, док у случају биофилма износи између 0,2 и 0,4. Вредност параметра a из једначине (37) је -1,7, параметра b из једначине (38) 1,8, а вредност $k_{f\ min}$ је 0,01 за вредност стандардне девијације расподеле величине пора од 0,33 mm (Thullner et al., 2003).

Брзина којом расте запремина екстрацелуларних екскрета микроорганизама и њихових минералних продуката ће одредити којом брзином ће се смањивати порозност (једначина (39)), а преко израза као што су једначине од (35) до (38) се из тог податка може добити брзина којом ће се смањивати коефицијент хидрауличке проводљивости.

$$n_i = n_{i-1} - \Delta t_i \cdot q_{i-1} \cdot \frac{dn_b}{dqdt} \quad (39)$$

Прорачун прерасподеле протока која је последица промене отпора струјању дуж појединих путања се може спровести преко нумеричког модела.

4.2.3.2 Нумерички модел са прорачуном колмирања порног простора

Нумерички модел је креиран применом методе експлицитних коначних разлика у оквиру excel табеле, што је омогућило нумеричко решавање проблема струјања у зони у којој долази до колмирања. Омогућена је флексибилна примена било ког модела промене порозности и коефицијента хидрауличке проводљивости услед нагомилавања продуката микроорганизама, модела за симулацију регенерације, обраде и приказа резултата итд. Модел може бити дводимензионалан (симулација једног сегмента дрена који репрезентује читав дрен, при чему треба генерисати на описани начин расподеле величине зрна за све ћелије модела), квази тродимензионалан (низ претходно описаних дводимензионалних модела који представљају све сегменте дрена) и тродимензионалан модел дрена и околне зоне.

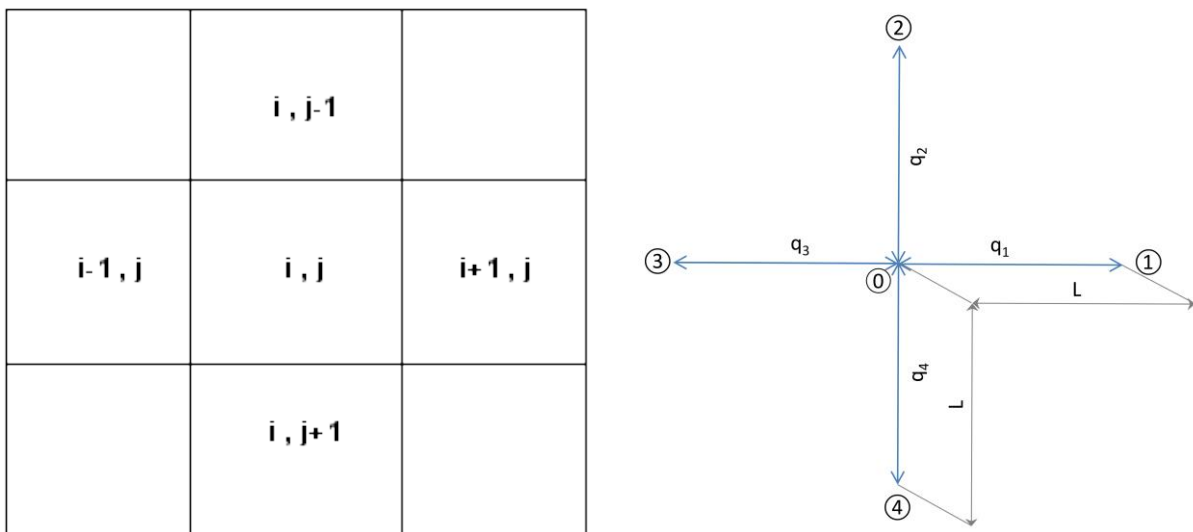
4.2.3.2.1 Просторна и временска дискретизација и прорачун струјања

Квази 3D модел сегмента дрена

Нумерички модел се састоји од једног до четири одвојена слоја, тј. зоне дрена са различитим гранулометријским карактеристикама материјала. У тасго-у се може изабрати да ли ће дрен бити једна зона, или ће бити подељен на две, три или четири зоне са једнаким дужинама. Свака зона је представљена 2D моделом сегмента те зоне. Проток се расподељује између зона на основу удела у укупном протоку који се тој зони додељује у сваком кораку преко тасго-а тако да све комбинације могућих удела (са кораком 0,05 или 0,025) буду испитане. Број ћелија у 2D моделу сегмента дрена је 110, ширина и дужина свих ћелија је 0,3 m, дебљина је 2 m, приближно двадесети део активне дужине дрена.

Моделом је представљена зона око дрена полупречника 1,5 m. Геометрија модела је дата на слици (Слика 19).

На следећој слици је приказана шема прорачуна за ћелију дводимензионалног модела сегмента. Број реда коме припада ћелија је означен са j , број колоне са i , q_i је отицај/дотицај у ћелију из суседних ћелија, Q је волуметријски дотицај или отицај кроз извор или понор, респективно, док је L дужина и ширина ћелије, која такође има и дебљину Δl . Запремински биланс у стационарном стању је дат једначином (40).



Слика 18 Шема основне јединице дискретизације домена око дрена

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = Q \tag{40}$$

Сваки временски корак временске дискретизације се може посматрати као стационарно стање, тако што ће бити претпостављено да се током њега не мењају порозност и коефицијент хидрауличке проводљивости по ћелијама, већ се то дешава на почетку периода. Нове вредности се израчунавају на основу брзине нагомилавања продуката микроорганизама (која зависи од протицаја кроз ћелију и параметара као што су концентрација двовалентног гвожђа и редокс потенцијал), трајања временског корака и Дарси-јеве брзине у претходном кораку. Уз то што нема промена коефицијента хидрауличке проводљивости током временског корака, довољно је дугачак да промена пијезометарског нивоа у ћелији услед промене у протоку кроз ћелију изазване променом вредности коефицијента филтрације на његовом почетку буде иста током практично целог корака јер би се утицај ускладиштења осећао само кратко. Дотицај или отицај кроз неку од четири стране ћелије је једнак:

$$q_i = K_{oi} \Delta l L \frac{\Pi_0 - \Pi_i}{L} \tag{41}$$

, при чему је Π_i пијезометарски ниво у једној од суседних ћелија, Π_0 пијезометарски ниво у самој ћелији, док је K_{0i} прорачунски коефицијент хидрауличке проводљивости између две ћелије.

Када се једначина (41) замени у (40) добија се једначина (42), уз услов да све ћелије имају исте димензије:

$$Q = K_{01} \Delta L \frac{\Pi_0 - \Pi_1}{L} + K_{02} \Delta L \frac{\Pi_0 - \Pi_2}{L} + K_{03} \Delta L \frac{\Pi_0 - \Pi_3}{L} + K_{04} \Delta L \frac{\Pi_0 - \Pi_4}{L} \quad (42)$$

Даљим скраћивањем и преуређењем се добијају једначине (43) и (44):

$$Q = K_{01} \Delta l (\Pi_0 - \Pi_1) + K_{02} \Delta l (\Pi_0 - \Pi_2) + K_{03} \Delta l (\Pi_0 - \Pi_3) + K_{04} \Delta l (\Pi_0 - \Pi_4) \quad (43)$$

$$\Pi_0 = \frac{K_{01} \Pi_1 + K_{02} \Pi_2 + K_{03} \Pi_3 + K_{04} \Pi_4 + \frac{Q}{\Delta l}}{K_{01} + K_{02} + K_{03} + K_{04}} \quad (44)$$

Прорачунски коефицијент хидрауличке проводљивости између две ћелије се израчунава као хармонијска средина одговарајућих коефицијената у посматране две ћелије:

$$K_{0i} = \frac{2}{\frac{1}{K_0} + \frac{1}{K_i}} \quad (45)$$

Симултаном решавањем система низа једначина (44) постављених за сваку ћелију добијају се пијезометарски нивои у свим ћелијама. Дарсу-јева брзина кроз ћелију се тада може одредити помоћу једначине (46), при чему је v_0 порна брзина, а n_{b0} порозност медија у централној ћелији.

$$v_0 n_{b0} = \sqrt{\left(\frac{K_{01} \frac{\Pi_0 - \Pi_1}{L} + K_{03} \frac{\Pi_3 - \Pi_0}{L}}{2} \right)^2 + \left(\frac{K_{02} \frac{\Pi_0 - \Pi_2}{L} + K_{04} \frac{\Pi_4 - \Pi_0}{L}}{2} \right)^2} \quad (46)$$

Једначина (46) се може трансформисати у једначину (47) при чему се добија протикај кроз ћелију $i - q_{c,i}$.

$$q_{c,i} = L \Delta l v_0 n_{b0} = \sqrt{\left(\frac{T_{01} (\Pi_0 - \Pi_1) + T_{03} (\Pi_3 - \Pi_0)}{2} \right)^2 + \left(\frac{T_{02} (\Pi_0 - \Pi_2) + T_{04} (\Pi_4 - \Pi_0)}{2} \right)^2} \quad (47)$$

Шема нумеричког 2D модела једног сегмента дрена који је примењен у симулацији струјања у зони око дрена у којој долази до колмирања је дата на слици (Слика 19). Под претпоставком константног протока, пијезометарски потенцијал око зоне у којој се дешава колмирање се може сматрати константним због тога што се изван ове зоне хидрауличке

карактеристике аквифера не мењају. Негативан протицај у уоквиреној ћелији представља понор, тј. истицање воде из модела које представља црпљење кроз сегмент дрена.

63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0
63.0	63.0	63.0	62.9	62.8	62.8	62.9	62.9	63.0	63.0	63.0
63.0	63.0	62.9	62.8	62.7	62.6	62.6	62.8	62.9	63.0	63.0
63.0	62.9	62.8	62.6	62.4	62.1	62.4	62.6	62.8	62.9	63.0
63.0	62.9	62.8	62.5	62.0	60.9	62.1	62.5	62.8	62.9	63.0
63.0	62.9	62.8	62.6	62.4	62.0	62.4	62.6	62.8	62.9	63.0
63.0	62.9	62.8	62.7	62.6	62.5	62.6	62.7	62.8	62.9	63.0
63.0	63.0	62.9	62.8	62.7	62.7	62.8	62.9	62.9	63.0	63.0
63.0	63.0	63.0	62.9	62.9	62.9	62.9	62.9	63.0	63.0	63.0
63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0

Слика 19 Шема дискретизације домена око дрена, бројеви у ћелијама су вредности пијезометарског потенцијала, плаве ћелије су ћелије са константним пијезометарским потенцијалом. Ћелија у средини представља сегмент дрена

Нове вредности пијезометарских потенцијала у свим унутрашњим ћелијама модела се израчунавају на основу нових вредности коефицијената хидрауличке проводљивости, задатог протока у том временском кораку и вредности константног пијезометарског потенцијала на граници модела. Проток се задаје на основу забележених протока у кампањама мерења. Проток се дели са укупном дужином дрена (перфорирани део), а специфични проток се множи са дужином једног дрена и уделом протока кроз зону дрена представљену сегментом дрена и дели се са укупном дужином сегмената који чине ту зону и множи са дужином једног сегмента. Преко једначине (46) се израчунавају протоци у свим ћелијама и на тај начин добијају све вредности потребне за прорачун у следећем кораку. Током извршавања тасго-а, прорачун се спроводи у сваком 2D моделу сегмента зоне (од једне до четири зоне), за све комбинације могућих удела по зонама са кораком од 0,05. Разлика у нивоу између границе модела и централне ћелије се пореди са забележеном разликом нивоа између блиског пијезометра и шахта бунара израчунавањем средњег квадратног одступања. Одабрана, тј. одговарајућа комбинација удела је она која даје најмањи збир средњих квадратних одступања свих зона. Приступ се заснива на томе да је губитак потенцијала приближно исти дуж дрена, тј. у свим зонама, али да су протоци кроз зоне различити у зависности од коефицијената хидрауличке проводљивости материјала

који сачињава зоне. На наведени начин се симулира утицај колмирања порног простора и прерасподеле протока на пијезометарски ниво у дренажу.

Временска дискретизација

Као што је приказано у потпоглављу 4.1, од 2006. до 2013. године систематски су праћени протоци бунара са хоризонталним дренажима и нивои у блиским и удаљеним пијезометрима (у залеђу и између бунара), промене услед регенерација, као и физичко-хемијски састав воде (у лабораторији и *in situ*) на београдском изворишту. Посебна пажња је била посвећена бунарима у које су утиснути нови дренажи од прохромског челика и истовремено затворени стари дренажи.

За дефинисање временских периода, протока и регенерација коришћени су подаци за следеће бунаре (у загради су временски периоди осматрања): Rb-5m (2008 – 2013.), Rb-8 (2006 – 2013.), Rb-15 (2007 – 2013.), Rb-16 (2007 – 2013.) и Rb-20 (2008 – 2013.). Временска дискретизација је задата за периоде између мерења протока и нивоа у Ranney бунару који је моделован. За сваки период је у центру модела задат проток измерен на крају периода. Промене у струјању током времена се рачунају у временским корацима. У сваком наредном кораку се за сваку ћелију рачуна раст колматација пропорционално протоку кроз сваку ћелију и резултујућа нова вредност коефицијента хидрауличке проводљивости. Поново се израчунава расподела протока између ћелија и израчунава нови пад хидрауличног потенцијала у свакој од ћелија. На наведени начин се симулира утицај колмирања порног простора и прерасподеле протока у зони око дрена у којој се одвијају процеси колмирања.

4.2.3.3 Прорачун утицаја колмирања порног простора на порозност и коефицијент хидрауличке порозности

Просторни распоред порозности и коефицијента хидрауличке проводљивости у моделу

Криве расподеле пречника зрна из узорак из зоне дрена су биле основа за расподелу пречника честица у свакој ћелији. Задато је 34 различитих вредности пречника, које су случајном функцијом задаване као математичка очекивања лог-нормалних расподела вредности пречника у свим ћелијама. Алгоритам контролише задавање ових вредности по ћелијама тако да број ћелија којима је задат неки пречник одговара броју по функцији вероватноће. Вероватноће појаве сваког од 34 пречника у 110 ћелија (тј. функција вероватноће) су одређиване као вероватноћа припадања опсегу између датог пречника и најближег мањег, према нормалној расподели математичких очекивања лог-нормалних расподела. Стандардне девијације по ћелијама су биле исте због тога што је стандардна девијација њихове нормалне расподеле четири пута мања од математичког очекивања те расподеле па је ово упрошћавање значајно убрзало прорачун уз мали губитак у реалистичности расподеле величине зрна.

Ово је постигнуто коришћењем Excel™ тасго-а на тај начин што алгоритам почиње са додељивањем пречника (математичких очекивања логнормалних расподела пречника зрна) ћелијама случајним избором ћелија којима га додељује, маркира ћелије којима је доделио пречник (ако наиђе на маркирану ћелију прескаче је) и када се овим пречником попуни онолико од укупно 110 ћелија у моделу колико одговара функцији вероватноће, прелази на следећи пречник. На тај начин се дефинише гранулометријски састав свих ћелија, у складу са нормалном расподелом математичких очекивања пречника зрна по ћелијама и логнормалном расподелом пречника зрна унутар ћелија.

За сваку од ћелија се рачунски одређује коефицијент хидрауличке проводљивости помоћу једначина које повезују карактеристичне пречнике узорка и одговарајући коефицијент хидрауличке проводљивости, при чему су испробане Slichter-ова (48) и Breuer-ова једначина (49) – Odong (2008).

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 10^{-2} \cdot n^{3,287} \cdot d_{10}^2 \quad (48)$$

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot \log \frac{500}{\frac{d_{60}}{d_{10}}} \cdot d_{10}^2 \quad (49)$$

, при чему је ν кинематска вискозност, а g убрзање Земљине теже. Slichter-ова једначина се обично користи ако је $5 \text{ mm} > d_{10} > 0,01 \text{ mm}$, док Breuer-ова једначина обично користи за $0,6 \text{ mm} > d_{10} > 0,06 \text{ mm}$ и када за коефицијент униформности важи $20 > d_{60}/d_{10} > 1$. Услови су испуњени за гранулометријски састав под-домена/ћелија изведен на описани начин из гранулометријског састава узорака из бушотина са београдског изворишта за Slichter-ову једначину.

Почетна вредност порозности, тј. порозност неколмираног материјала се рачуна према једначини (50) – Vukovic & Soro (1992):

$$n = 0,255 \cdot \left(1 + 0,83 \frac{d_{60}}{d_{10}} \right) \quad (50)$$

Претпостављено је да функција која описује промену порозности с временом (једначина (51)) садржи линеарну зависност од протока кроз ћелију. Последњи члан је коефицијент брзине колмирања – смањење порозности по јединици протока кроз ћелију, у јединици времена. Промене у струјању током времена се рачунају у временским корацима. У сваком кораку i се за сваку ћелију према једначини (51) рачуна нова вредност порозности услед раста колматација током претходног корака.

$$n_i = n_{i-1} - \Delta t_i \cdot q_{i-1} \cdot \frac{dn_b}{qdt} = n_{i-1} - \Delta t_i \cdot q_{i-1} \cdot c_{kolm} \quad (51)$$

Одговарајућа нова вредност коефицијента хидрауличке проводљивости се добија помоћу израза (52) (Rockhold et al., 2002) којим је дата зависност односа коефицијента хидрауличке проводљивости водозасићеног колмираног и чистог порозног медија од односа порозности колмираног и чистог порозног медија:

$$\frac{K_i}{K} = \left(\frac{n_i}{n} \right)^{\frac{19}{6}} \quad (52)$$

Поред колмирања порног простора, на порозност и коефицијент хидрауличке проводљивости утиче и разбијање и изношење колматација из порног простора приликом регенерација. Регенерације су симулиране користећи коефицијент смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} , који су при непромењеној геометрији обрнуто пропорционални K , што је дато као:

$$y_{reg} = \frac{LHR_{iR}}{LHR_i} = \frac{K_i}{K_{iR}} = \left(\frac{n_i}{n_{iR}} \right)^{\frac{19}{6}} \quad (53)$$

где су LHR_i и LHR_{iR} , K_i и K_{iR} и n_i и n_{iR} – вредности LHR , K и n у временском кораку i непосредно пре и после регенерације, респективно. На основу вредности y_{reg} из потпоглавља 4.1.3 „Ефекти регенерације“ и једначине (54) која се изводи из једначине (53), се добијају вредности порозности након регенерације n_{iR} .

$$n_{iR} = n_i \left(\frac{1}{y_{reg}} \right)^{\frac{6}{19}} \quad (54)$$

4.3 Развој аналитичког модела за симулацију утицаја процеса колмирања на рад групе бунара са хоризонталним дренажима

Примена установљених корелација између физичко-хемијских параметара и промене LHR током времена, тј. $KLHR$, као и добијених вредности коефицијената смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације (квантификација одговора бунара на регенерацију) укључује прављење модела који обухвата групу Ranney бунара (тј. бунара са хоризонталним дренажима). На основу поменутих корелација може да се симулира рад ових бунара током одређеног временског периода, са прорачуном депресија у бунарима услед струјања подземних вода коришћењем аналитичког решења парцијалне диференцијалне једначине струјања, при чему ће у прорачун бити укључене промене LHR и $KLHR$ услед

колмирања старих дренажа, регенерација и утискивања и колмирања нових дренажа. Главни излазни резултат су протоци на крају симулираног периода и укупна количина нацрпљене воде. Рачунски модел је развијен у Microsoft Excel-у коришћењем макроа писаних у Visual Basic for Applications (VBA) програмском језику и Excel Solver-а, са опцијом аутоматске оптимизације, који омогућава да се одреди економски оптималан динамички план утискивања нових дренажа у Ranney бунаре, регенерације бунара и дугорочног протицаја бунара. Модел обухвата:

- 1) одређивање депресије у издани услед струјања ка бунару у зависности од филтрационих карактеристика издани коришћењем Hantush-Jacob-овог аналитичког решења, са прорачуном суперпозиције депресија групе бунара,
- 2) аутоматску калибрацију помоћу које се на основу расположивих података о протицајима и нивоима у свим бунарима и блиским пијезометрима добијају просечне филтрационе карактеристике издани у зони издани у којој су бунари,
- 3) аутоматску калибрацију фактора за локалну корекцију коефицијента филтрације за сваки бунар посебно, да би се узела у обзир хетерогеност издани. Ово треба да омогући да се у симулацији прецизно одреди допринос депресије услед струјања кроз издан укупној депресији у бунару,
- 4) функционалну зависности између брзине повећавања локалних хидрауличких губитака на дренажима и протицаја по дренажу, концентрације двовалентног гвожђа и редокс потенцијала, која омогућава да се израчунају локални губици на крају неког периода у зависности од протицаја бунара,
- 5) прорачун смањења хидрауличких губитака услед регенерације дренажа,
- 6) унос броја бунара у које ће бити утискивани нови дренажи и броја нових дренажа по бунару, са опцијом аутоматске оптимизације избора бунара у које се утискују нови дренажи, или аутоматског извршавања прорачуна за све могуће комбинације бунара у које ће бити утискивани дренажи,
- 7) избор између опције да стари дренажи приликом утискивања буду затварани или да остану отворени, са прорачуном расподеле протока између старих и нових дренажа.

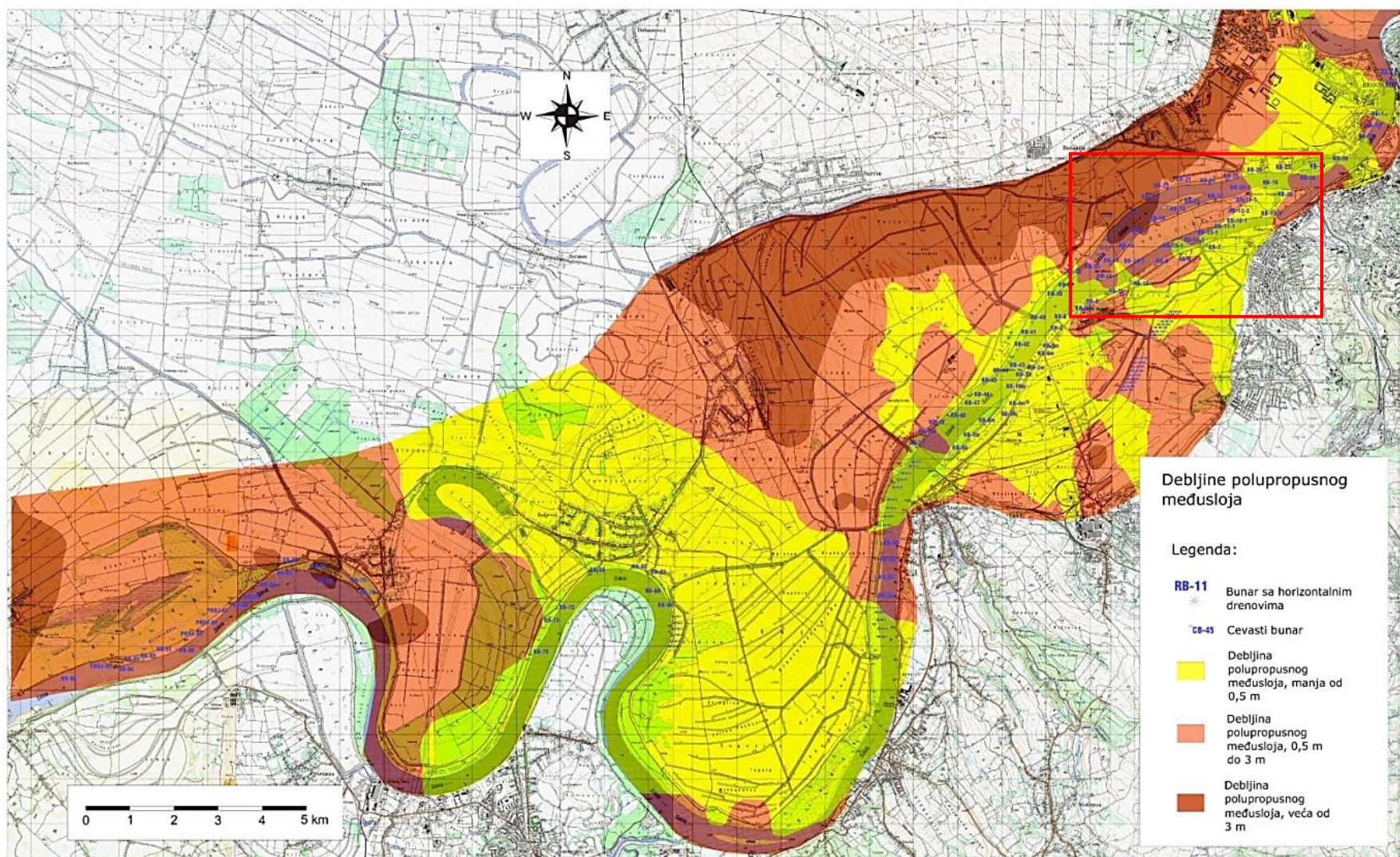
4.3.1 Хидрогеолошка шематизација и аналитичка једначина струјања

На основу података из литолошких стубова бројних структурних бушотина, осматрања нивоа у више батерија пијезометара чије се филтарске колоне налазе у нижем и вишем делу издани и резултата нумеричких симулација тестова црпљења приликом којих су праћени нивои у овим пијезометрима, усвојена је шематизација по којој се слабопропусни прослојци посматрају као један међуслој. На слици је приказано распрострањење у плану и дебљина овако шематизованог међуслоја (Слика 20).

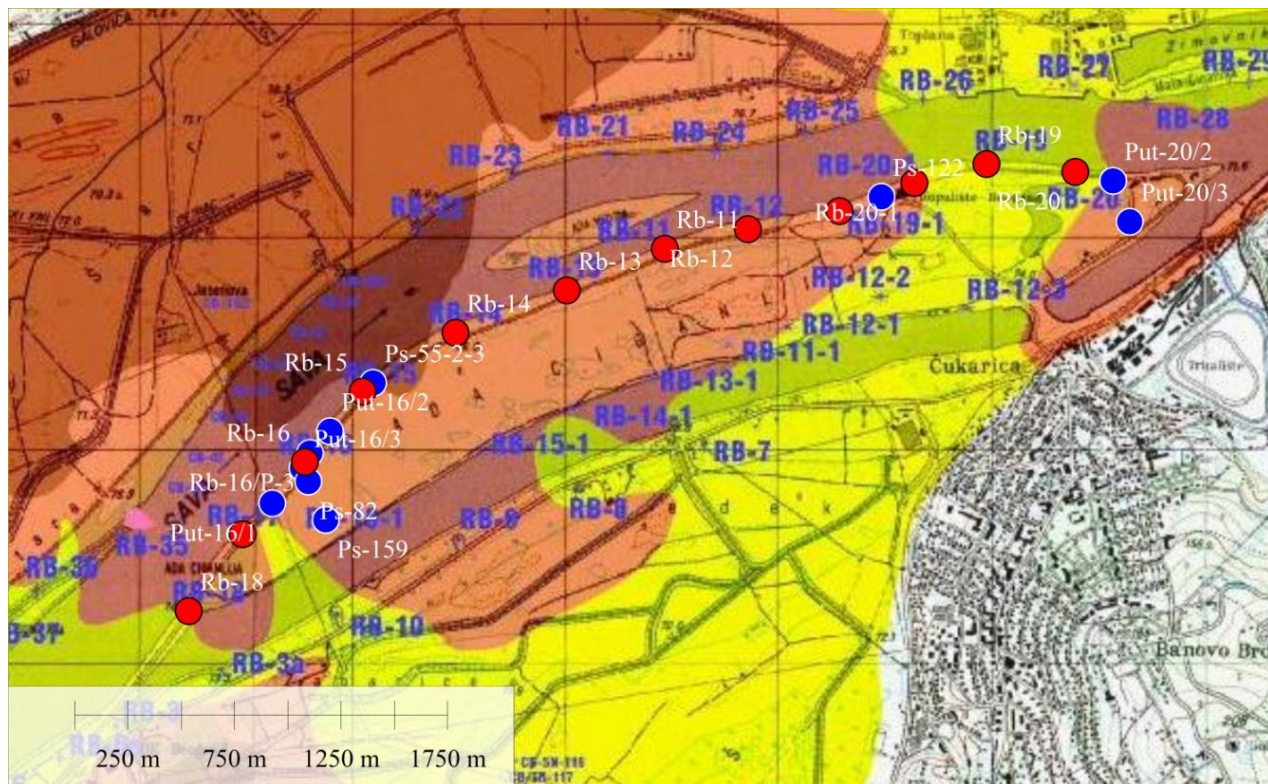
Део изворишта одабран за дефинисање модела је уоквирен црвеном линијом на Слика 20 и приказан на Слика 21, са објектима укљученим у модел и анализу. Средња вредност

кота нивоа измерених у пијезометрима чија се филтарска колона налази у горњем водоносном слоју (Слика 21), у периоду од почетка 2006. до краја 2013. године, је 68,5 m н.м., што је око три метра ниже од средњег нивоа Саве, који је у истом периоду био 71,3 m н.м. На Слика 22 су приказани резултати осматрања нивоа у батеријама пијезометара Rb-16/p-3 – Rb-16/p-2 и Ps-55-3-1 – Rb-15/p-2 одмах поред Рапче бунара, из којих се може закључити да се ниво у горњем водоносном слоју не мења много чак и у непосредној близини бунара, док је пијезометарски ниво у доњем нижи за неколико метара.

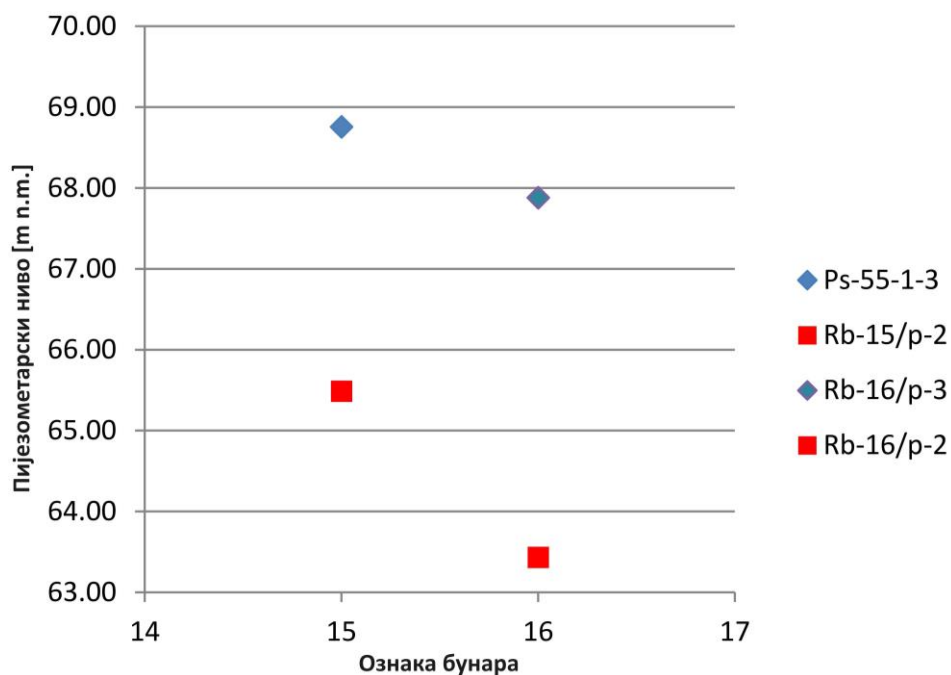
Корито реке се не усеца у слабопропусни међуслој и из ње се директно прихрањује само горњи водоносни слој. Због свега наведеног струјање се са оваквом шематизацијом, уз наравно значајну апроксимацију, може свести на модел аквифера који се прихрањује кроз слабопропусну повлату одређене дебљине и вредности коефицијента филтрације, у којој је пијезометарски ниво константан – Слика 15. Због директног хидрауличког контакта реке и горњег водоносног слоја, ниво у горњем слоју се много мање мења у плану него што је случај у доњем водоносном слоју и због тога је претпоставка константног пијезометарског нивоа у аквитарду који их раздваја довољно блиска реалном стању.



Слика 20 Распрострањење и дебљина међуслоја на простору београдског изворишта, црвени оквир представља границе наредне слике (Слика 21) – преузето из ИЈЧ (2010)



Слика 21 Група од 12 одабраних бунара на десној обали Саве на Ади Циганлији (црвени кружићи) и пијезометри са филтарским колонама у горњем водоносном слоју (плави кружићи) – преузето из ИЈЧ (2010)



Слика 22 Средњи пијезометарски нивои (2006-2013.) у батеријама пијезометара поред Ranney бунара Rb-15 и Rb-16 (преузето уз модификације из Mitrinović et al. (2018))

За прорачун струјања у оваквој шеми користи се Hantush-ово и Jacob-ово аналитичко решење (Delleur 1999) – једначина (13).

Део депресије у посматраном бунару који је последица струјања кроз аквифер добија се суперпозицијом депресија услед струјања ка околним бунарима и депресије услед струјања ка посматраном бунару, на удаљености од центра шахта бунара која је једнака еквивалентном пречнику посматраног бунара, прорачунатих коришћењем једначине (13).

4.3.2 Утицај локалних губитака

Да би се израчунао ниво у самом бунару, на прорачунату вредност депресије услед струјања кроз аквифер додаје се губитак у хидрауличком потенцијалу због отпора струјању услед колмираности филтерског дела дрена и прифилтарске зоне. Локални губици на дренажима одређеног бунара се прате мерењем и бележењем нивоа и протока у бунару као и нивоа у једном или више блиских пијезометара. Из резултата осматрања се добија $KLHR$ које је обично приближно константно или расте са временом ако се значајно не мења проток бунара и не спроводе регенерације. На основу наведених података, ниво воде у шахту Ranney бунара се може израчунати као збир:

- депресије у посматраном бунару услед струјања кроз аквифер,
- производа протока по дрена,
- збира локалних губитака у почетном тренутку,
- нових губитака који се израчунавају множењем $KLHR$ и времена које је протекло од почетног тренутка.

Депресија услед струјања кроз аквифер врло брзо достиже неку квазистационарну вредност, док локални губици расту са временом.

Са $KLHR_2$ и LHR_{20} , су обележени $KLHR$ за нове дренаже које се може израчунати преко једначина (74) и (78) у потпоглављу 5.1.2 и почетно LHR за нове дренаже респективно. Приликом прорачуна је коришћена старија функционална зависност између редокс потенцијала, концентрације двовалентног гвожђа у води, бројности популације микроба, протицаја кроз дрена, гранулометријског састава прифилтарске зоне или засипа и брзине колмирања нових дренажа (ИЈЧ 2010):

$$KLHR_2 = \varphi(\Gamma) \cdot 0.009 \cdot q \cdot c(Fe^{2+})^{\frac{3}{4}} \cdot (6.1 \cdot e^{-0.023 \cdot Eh})^{\frac{2}{3}} \cdot (0.6 + 0.01 \cdot B)^{\frac{1}{3}} \quad [m/(l/s)/a] \quad (55)$$

, при чему се концентрација двовалентног гвожђа $c(Fe^{2+})$ у води изражава у mg/l, редокс потенцијал Eh у mV, протицај по дрена q у l/s, док је B , геометријска средина броја потенцијално активних слуз-продукујућих и броја потенцијално активних гвожђевитих бактерија у узоркованој води из бунара анализираној помоћу BART тестова, бездимензиона величина.

Фактор зависности $KLHR$ од гранулометријског састава прифилтарске зоне аквифера или филтарског засипа (ако се ради о Preussag методи утискивања нових дренажа) је $\varphi(\Gamma)$ и зависи од избора гранулата, квалитета његове инсталације, квалитета разраде дренажа и др.

Са $KLHR_1$ и LHR_{10} су обележени $KLHR$ за старе дренаже и LHR за старе дренаже респективно, при чему се LHR_{10} и $KLHR_1$ добијају обрадом података добијених осматрањем бунара и блиског пијезометра.

4.3.3 Утицај регенерације дренажа и квантификација ефеката

Регенерација дренажа бунара се после 2000. године изводи само механичким поступком. По заустављању рада бунара и уградњи неопходне опреме, снимају се дренажи специјалном камером. У складу са резултатима анализе снимака, дренажи се испирају водом под високим притиском (и преко 100 bar). Испирање дренажа се обавља по сегментима, у трајању од више сати, што зависи од процене на терену. Многи стари дренажи типа Ranney су оштећени корозијом, тако да је често неопходно скраћивање или потпуно затварање појединих дренажа.

За реалну процену ефеката изведених регенерација потребно је квантификовати вредност LHR пре и после регенерације. Коефицијент смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} је дат као

$$y_{reg} = \frac{LHR_2}{LHR_1} \quad (56)$$

, где су LHR_1 и LHR_2 - вредности LHR пре и после регенерације, респективно.

Множењем y_{reg} са LHR пре регенерације и протицајем по дренажу q после ње, добија се пад пијезометријског потенцијала на дренажу након регенерације:

$$S'' = LHR_1 \cdot y_{reg} \cdot q \quad (57)$$

4.3.4 Утискивање дренажа и квантификација ефеката

Од 2005. године се приступило комплетној замени постојећих дренажа појединих бунара Preussag методом, убацивањем нових дренажа (мостичави отвори, висине мостића од 2,5 до 3.5 mm) од прохрома у претходно утиснуту цев и накнадно постављање филтарског засипа. Раније су челичне дренажне цеви (шлицоване, димензија 6 mm x 80 mm) директно утискиване у порозну средину Ranney методом.

Након анализе резултата вишегодишњег осматрања рада пет бунара са новим дренажима на београдском изворишту и њихових блиских пијезометара (Rb-15, Rb-16, Rb-20, Rb-8 и Rb-5m), дефинисана је функционална зависност између редокс потенцијала, као и

концентрације двовалентног гвожђа у води и $KLHR$ (једначина (55), или једначине (74) и (78) у потпоглављу 5.1.2).

Прогнозирано повећање LHR се добија множењем овако израчунатог $KLHR$ и протеклог времена. Пад нивоа услед локалних хидрауличких отпора се израчунава дељењем протицаја бунара бројем дренажа и множењем са прорачунатим LHR .

4.3.4.1 Расподела протока између старих и нових дренажа

Након утискивања нових дренажа, ако стари нису затворени, долази до прерасподеле протока између дренажа. Равнотежа се успоставља када се губици хидрауличног потенцијала на старим и новим дренажима изједначе – једначина (58):

$$\Delta S = S'' = LHR_1 \frac{Q(1-x)}{n_1} = LHR_2 \frac{Qx}{n_2} \quad (58)$$

, при чему су LHR_1 и LHR_2 локални хидраулички губици на старим и новим дренажима, респективно, n_1 и n_2 су број старих и нових дренажа, x је удео протока кроз нове дренаже у укупном протоку, док је Q проток у бунару. Локални пад нивоа у тренутку t се рачуна на основу одговарајућих вредности $KLHR$, времена протеклог од утискивања и почетних вредности LHR – једначина (59):

$$\Delta S = S'' = \left(KLHR_1(t-t_{ut}) + LHR_{1t_{ut}} \right) \frac{Q(1-x)}{n_1} = \left(KLHR_2(t-t_{ut}) + LHR_{2t_{ut}} \right) \frac{Qx}{n_2} \quad (59)$$

, при чему је t време трајања разматраног периода а t_{ut} време протекло до утискивања.

Из једначине (59) се добија једначина (60) којом се израчунава удео протока кроз нове дренаже у укупном протоку бунара:

$$x = \frac{1}{\frac{n_1}{n_2} \frac{KLHR_2(t-t_{ut}) + LHR_{2t_{ut}}}{KLHR_1(t-t_{ut}) + LHR_{1t_{ut}}} + 1} \quad (60)$$

Део локалних губитака настао пре утискивања – $LHR_{1t_{ut}}$, израчунава се као збир локалних губитака на почетку симулираног периода (LHR_{10}) и производа времена протеклог од почетка симулираног периода до тренутка утискивања и $KLHR$ старих дренажа (за коју се узима да је иста пре и после регенерације), при чему се LHR_{10} и $KLHR_1$ добијају обрадом података добијених осматрањем бунара и блиског пијезометра. Овако израчунати губици се множе са y_{reg} у случају да се пре утискивања дренажа стари регенеришу.

Локални хидраулички губици на новим дренажима одмах након утискивања (LHR_{20}), тј. губици по јединици протока кроз нови дренаж, су, на основу података о нивоима у бунару

и блиском пијезометру после раније извршених утискивања нових дренажа, фиксирани на 0,02 m/(l/s). На тај начин се из једначине (60) добија једначина (61):

$$x = \frac{1}{\frac{n_1}{n_2} \frac{KLHR_2(t-t_{ut}) + LHR_{2_0}}{KLHR_1(t-t_{ut}) + (KLHR_1 t_{ut} + LHR_{1_0}) y_{reg}} + 1} \quad (61)$$

Губитак нивоа на дренажу се, на основу једначина (58) и (61), може израчунати као:

$$\Delta S = S'' = \left(KLHR_2(t-t_{ut}) + LHR_{2_0} \right) \frac{Q}{n_2} \frac{1}{\frac{n_1}{n_2} \frac{KLHR_2(t-t_{ut}) + LHR_{2_0}}{KLHR_1(t-t_{ut}) + (KLHR_1 t_{ut} + LHR_{1_0}) y_{reg}} + 1} \quad (62)$$

$KLHR_2$ зависи од протока по новом дренажу (једначина (55)), а проток по новом дренажу зависи и од x , тј. од удела протока кроз нове дренаже у укупном протоку, који између осталог зависи од $KLHR_2$. Због тога је за сваки бунар израчуната функција $x=f(Q)$, тако што је за три одабрана протока у бунару (20, 50 и 80 l/s) према једначини (55) рачунато $KLHR_2$ које фигурише у једначини (60), при чему је вредност удела x претпостављана све док се удео прорачунат по једначини (60) није поклопио са претпостављеним. Након што су за сва три протока добијене вредности x , установљено је да се однос Q и x може успешно описати линеарном функцијом за сваки бунар. За добијање коефицијената линеарних функција за све бунаре коришћен је Excel solver, тако што је циљна ћелија чија вредност треба да буде минимална, садржала средње квадратно одступање између претпостављених удела x и на основу њих израчунатих удела.

На овај начин добијена функција зависности удела протока кроз нове дренаже од протока у бунару је коришћена да се израчуна $KLHR_2$ при израчунавању вредности ΔS по једначини (62).

У овој једначини, као и у једначини (61), се ради поједностављивања прорачуна подразумева да је $KLHR_1$ исто и ако су другачији протоци него током периода за који је оно одређено, као и да се не мења при промени протока кроз старе дренаже. Као што је објашњено у потпоглављу 4.1.2.5, вредности $KLHR_1$ се добијају обрадом података добијених осматрањем бунара и блиског пијезометра за просечни измерени проток (Q_0). Да би се добиле тачније вредности $KLHR_1$ оно треба или да се множи са односом протока кроз старе дренаже пре утискивања нових (Q_1) и пре регенерације (Q_0), или са односом протока кроз старе дренаже после утискивања нових ($Q(I-x)$) и после регенерације (Q_0). Q_1 се може добити из једначине (63) у којој је збир S и S' губитак хидрауличког потенцијала у аквиферу, $\Delta H_{w d min}$ је минимална разлика између коте нивоа у бунару и коте отвора дренажа H_d , уз претпоставку да је ниво воде у бунару био минималан пре утискивања дренажа (десна страна једначине (63)):

$$\Pi_0 - (H_d + \Delta H_{wd_{\min}}) = S + S' + \frac{Q_1}{n_1} \left(LHR_{1_0} + KLHR_1 \frac{Q_1}{Q_0} t_{ut} \right) \quad (63)$$

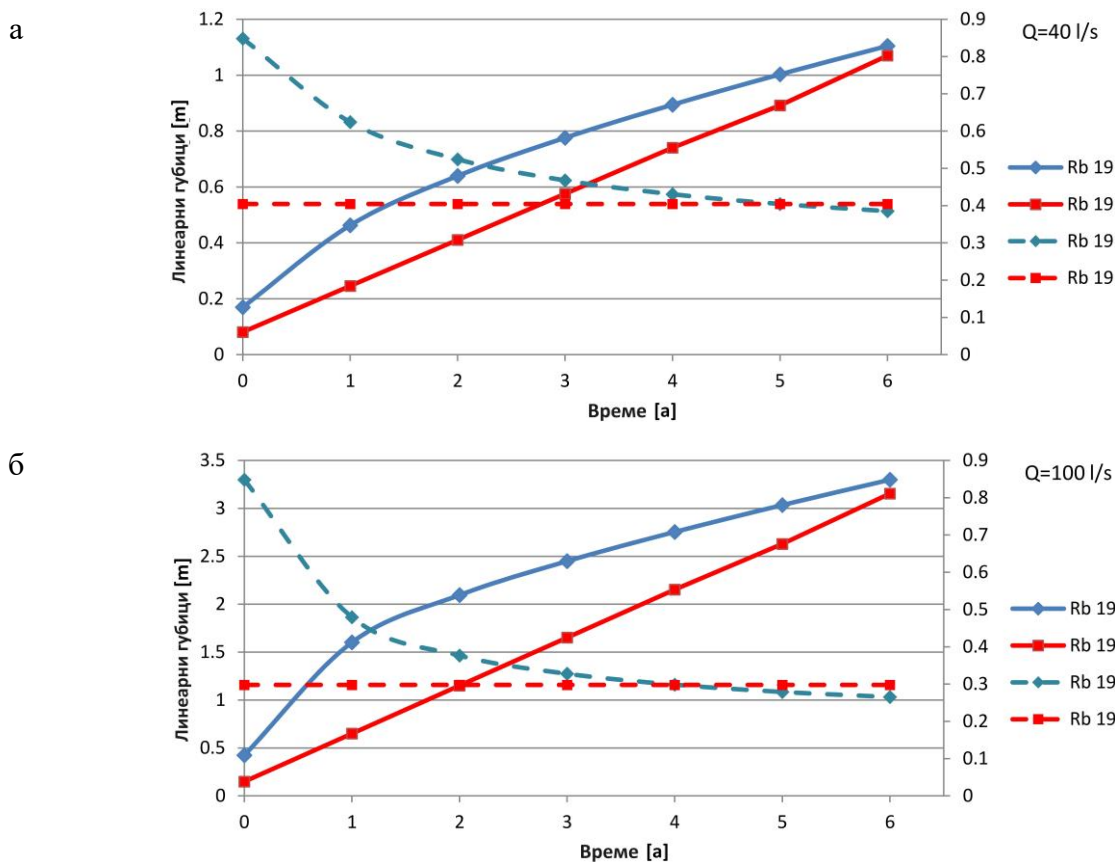
Када се корекције за $KLHR_1$ и пре и после утискивања нових дренажа примене на једначину (61) добија се једначина (64):

$$x = \frac{1}{\frac{n_1}{n_2} \frac{KLHR_2(t-t_{ut}) + LHR_{2_0}}{KLHR_1 \frac{Q(1-x)}{Q_0}(t-t_{ut}) + (KLHR_1 \frac{Q_1}{Q_0} t_{ut} + LHR_{1_0}) y_{reg}} + 1} \quad (64)$$

Уз $KLHR_2$ чија је вредност одређена са x и Q преко једначине (55) и S и S' који у највећој мери зависе од Q , преко x и Q се рачуна и кориговано $KLHR_1$. Функција $x=f(Q)$ за три одабрана протока у бунару (20, 50 и 80 l/s) се опет може добити претпостављањем вредности удела x све док се удео прорачунат по једначини (64) не поклопи са претпостављеним и затим примењивати у прорачунима приликом симулација.

Описани прорачун се заснива на претпоставци да се удео протока кроз нове дренаже у укупном протоку није мењао од тренутка утискивања до краја симулираног периода. Наведена претпоставка није тачна због тога што су линеарни губици на новим дренажима мали одмах након утискивања, чак и када је кинетика раста отпора на њима бржа него за старе дренаже, па ће већи део протока ићи кроз нове дренаже у периоду одмах након утискивања него што овакав прорачун показује. Због тога је урађен прорачун за тренутак одмах након утискивања и после на сваких годину дана.

Коришћена је једначина (61), при чему су губици из претходних година улазили у почетне линеарне губитке по јединици протока (LHR_{1_0} и LHR_{2_0}) док је $KLHR$ и за старе и нове дренаже множено са јединицом јер је протекло време од краја претходног корака годину дана. На следећој слици (Слика 23) приказани су резултати за бунар Rb-19, за који је у основном прорачуну удео протока кроз нове дренаже био најмањи и због тога поменути проблем у прорачуну потенцијално најизраженији.



Слика 23 Удео протока кроз нове дренаже (испрекидана линија) и линеарни губици (пуна линија) за случај када се примењује основни прорачун (црвене линије) и прорачун годину по годину (плаве линије), за случај када се из бунара црпи 40 l/s (а) и 100 l/s (б), за бунар Rb-19 (преузето уз измене из Mitrinović et al. (2018))

На слици (Слика 23) се може уочити да се на основу прорачуна година по години, добијају значајно већи удели протока кроз нове дренаже и већи линеарни губици у периоду непосредно након утискивања него у основном прорачуну, али да је разлика у обе величине мала на истеку десетогодишњег симулираног периода.

4.3.5 Модел и његова примена на одабрану групу бунара

За развој и тестирање оптимизационог алгоритма искоришћена је група од 12 бунара на десној обали Саве на Ади Циганлији: Rb-11, Rb-12, Rb-13, Rb-14, Rb-15, Rb-16, Rb-17, Rb-18, Rb-19, Rb-19-1, Rb-20, Rb-20-1 (Слика 21). У ексел табелу са улазним подацима су унете њихове координате што омогућава суперпозицију депресија и калибрацију хидрогеолошког модела.

Постоји више разлога за овакав одабир бунара:

- међуслој има континуално и у смислу дебљине приближно уједначено распрострањење на одабраном подручју. Ово омогућава да се примени исто аналитичко решење за радијално струјање за све бунаре и да се решења суперпонирају без великог нарушавања услова бесконачног распрострањења слабопропусног слоја између горњег и доњег аквифера, при чему су слабопропусни слој и доњи аквифер константних дебљина и филтрационих карактеристика,
- протоци бунара су довољно велики да депресија услед деловања суседних бунара буде значајна,
- на 3 бунара (Rb-15, Rb-16 и Rb-20) су 2007. и 2008. године уграђени нови прохромски дренажи отпорни на корозију што је омогућило одређивање кинетике процеса колмирања бунара као функције протока, концентрације двовалентног гвожђа у подземној води и редокс потенцијала због тога што је фактор корозије искључен,
- постоје потребни подаци за прорачуне за већину бунара,
- бунари на Ади Циганлији близу обале Савског језера су у почетном тренутку давали само око 130 l/s заједно и због тога је њихов утицај на одабране бунаре могао бити занемарен.

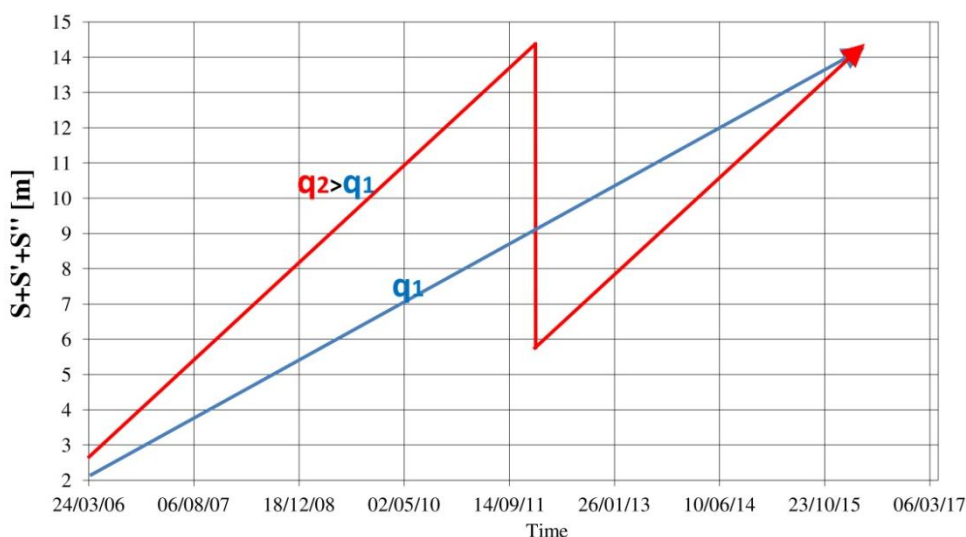
Дужина временског периода који је симулиран у оптимизационом алгоритму је 10 година, између осталог и због тога што је ово период током кога би требало да сваки бунар од одабраних 12 буде регенерисан. До 2013. године просечни интервал између регенерација једног бунара је био око 7 година. Интервал између регенерација варира од бунара до бунара и за један бунар се креће између 2 и 20 година. Због наведених чињеница, временски период од десет година је довољно дугачак да се уочи разлика између различитих режима црпљења и избора бунара за утискивање нових дренажа.

Протоци на основу којих алгоритам прорачунава нивое ван и унутар бунара одговарају просечним протоцима бунара и не мењају се током симулираног временског периода од 10 година.

У моделу постоје две основне опције за бунар: само регенерација, или утискивање нових дренажа у 4. години (након ког може бити и регенерације):

- 1) Када се не утискују нови дренажи у бунар, линеарни губици по јединици протока који потичу од инкрустација насталих током досадашњег рада бунара се множе са садашњим протоком и сабирају са новим губицима (који потичу од новостворених инкрустација током посматраног периода), одређеним множењем $KLHR$ са дужином временског периода који се посматра и протоком. У пар случајева када је регресија извршена квадратном функцијом – Слика 26 и Слика 28, LHR на крају временског периода се добија из квадратне функције. Од израчунате вредности депресије услед локалних губитака на дренажу се одузима претпостављено смањење

локалних губитака услед регенерације која се обавља када се ниво у бунару спусти на коту која је за дефинисани број метара изнад коте дренажа (узето у примеру да је тада пад нивоа 14,3 m) – Слика 24. Кота нивоа у бунару се добија одузимањем депресије услед струјања кроз аквифер и локалних отпора (са урачунатим смањењем услед регенерације) од коте нивоа у горњем аквиферу. Excel solver проналази вредност протицаја у бунару за коју је на крају симулираног периода кота нивоа у бунару за неку унапред дефинисану вредност виша од коте дренажа, што значи да се претпоставља да је за дате прогнозиране ефекте регенерације изабран највећи могући проток током симулираног периода. У овом примеру је $u_{reg} = 0,26$, проток q_2 је 30% већи од протока q_1 (проток на истом објекту када нема регенерације), и, у овом случају према једначини (74) у потпоглављу 5.1.2, $KLHR_2$ је 30% веће од $KLHR_1$. Ако се током симулираних 10 година врши регенерација бунара то у овом случају омогућава до 30% већи проток.



Слика 24 Промена депресије током времена услед струјања кроз колмирани слој у случају вршења регенерације (црвена линија) и без ње (плава линија) – преузето из *Mitrinović et al.* (2018)

Приликом регенерације нагло се смањује LHR ($\Delta S/q \approx \Delta S''/q$) – Слика 28, Слика 30, Слика 34, Слика 36 и Слика 40, као и пад пијезометарског нивоа услед струјања кроз колмирани слој – S'' , ако проток остане приближно исти. На пример, приликом регенерације Rb-13 смањење ΔS , односно S'' , је било мало јер је проток након регенерације значајно повећан – Слика 29. На Слика 32 и Слика 33 се на примеру Rb-16 види да ΔS линеарно расте као и LHR кад проток остаје приближно исти. $KLHR$ ($\Delta S/q/\Delta t \approx \Delta S''/q/\Delta t$) обично остаје исто или се његова вредност повећава са временом – Слика 26, Слика 28, Слика 30, Слика 32, Слика 34, Слика 36 и Слика 38. За поједине бунаре – Rb-13, Rb-15, Rb-19-1, Rb-20, промена у LHR

услед регенерације могла је да се одреди на основу досадашњих посматрања – Слика 28, Слика 30, Слика 34 и Слика 36. Узето је да је пад LHR приликом регенерације нових дренажа 57% због тога што је то средња вредност добијена за четири бунара са дренажима утиснутим 2007. године, на којима су вршене регенерације, од којих су одабране оне за које постоји довољно података да ефекти могу да се квантификују

2) Када се утискују нови дренажи у бунар, арбитарно се узима да се утискивање изводи у четвртој години јер би уношење могућности избора тренутка утискивања барем неколико десетина пута повећало број комбинација које треба испитати. Претпостављено је да ће током 10 година бити изведено утискивање на 5 бунара са хоризонталним дренажима због тога што је према динамици предвиђено утискивање нових дренажа у 4 бунара годишње на целом београдском изворишту, док истовремено бунари који припадају анализираној групи чине нешто мање од деветине укупног броја бунара. У оквиру опције утискивања дренажа постоје три сценарија који се разликују према начину како се третирају стари дренажи и према броју дренажа који се утискују:

а) У једном сценарију се стари дренажи регенеришу приликом утискивања 4 нова дренажа. За протоке кроз старе и нове дренаже се узима да су у таквом међусобном односу да су падови нивоа на старим и новим дренажима на крају симулираног периода исти. Није предвиђено да се у периоду након утискивања изводи регенерација и на бунарима са новоутиснутим дренажима. Еквивалентни пречник се израчунава тако што се дужине старих и нових дренажа саберу и збир подели са укупним бројем дренажа и ова вредност примени у једначини (17). Вредност пада пијезометарског нивоа на крају симулираног периода се израчунава коришћењем једначине (65), при чему је Π_0 ниво у горњем водоносном слоју, ΔH_{wdmin} разлика између коте нивоа у бунару и коте отвора дренажа (која је означена са H_d) приликом које се врши регенерација, депресија услед струјања кроз аквифер је $S+S'$, а варијабла U има вредност 1 ако се утискивање нових дренажа врши, а 0 ако се не врши. $KLHR_2$, LHR_{2_0} , $KLHR_1$ и LHR_{1_0} , тј. $KLHR$ и LHR почетно за нове и старе дренаже респективно, се израчунавају како је описано у потпоглављу 3.1.

$$\Delta S = (1-U) \left(\left(LHR_{1_0} + KLHR_1 t \right) \frac{Q_1}{n_1} - \left(\Pi_0 - (\Delta H_{wdmin} + S + S' + H_d) \right) (1 - y_{reg_1}) \right) + \\ + U \left(KLHR_2 (t - t_{ut}) + LHR_{2_0} \right) \frac{Q_2}{n_2} \frac{1}{\frac{KLHR_2 (t - t_{ut}) + LHR_{2_0}}{n_2} \frac{KLHR_1 (t - t_{ut}) + (KLHR_1 t_{ut} + LHR_{1_0}) y_{reg_1}}{n_2} + 1} \quad (65)$$

Део једначине (65) који се односи на утискивање нових дренава и удео протока кроз нове дренаве уместо једначине (61) може бити једначина (64).

- b) У другом сценарију се утискују 4 дрена, при чему се стари дренави затварају (једначина (66)), осим ако су у питању Rb-15, Rb-16 и Rb-20 са прохромским дренама (једначина (65)). Тада се еквивалентни пречник или мало мења или опада у односу на онај пре утискивања у случају да се утискују 4 дрена (осим за поменута три бунара када се значајно повећава), што смањује ефекте у смислу дуготрајнијег повећања протока бунара јер се не смањују губици у материјалу аквифера. Још значајније, $KLHR$ (према једначини (74) у потпоглављу 5.1.1 или према једначини (55)) и LHR су виши него што би био случај да се протицај дели на више дренава. Предвиђено је да се због тога врши једна регенерација у периоду након утискивања и на бунарима са новим дренама због њиховог значајног оптерећења, осим на Rb-15, Rb-16 и Rb-20 који, у случају кад су одабрани за утискивање, имају 7 или 8 дренава.

$$\Delta S = (1-U) \left(\left(LHR_{1_0} + KLHR_1 t \right) \frac{Q_1}{n_1} - \left(\Pi_0 - (\Delta H_{wd_{min}} + S + S' + H_d) \right) (1 - y_{reg_1}) \right) + \\ + U \left(\left(KLHR_2 (t - t_{ut}) + LHR_{2_0} \right) \frac{Q_2}{n_2} - \left(\Pi_0 - (\Delta H_{wd_{min}} + S + S' + H_d) \right) (1 - y_{reg_2}) \right) \quad (66)$$

Ако се примени корекција $KLHR_1$ као у једначини (63) добија се једначина (67):

$$\Delta S = (1-U) \left(\left(LHR_{1_0} + KLHR_1 \frac{Q_1}{Q_0} t \right) \frac{Q_1}{n_1} - \left(\Pi_0 - (\Delta H_{wd_{min}} + S + S' + H_d) \right) (1 - y_{reg_1}) \right) + \\ + U \left(\left(KLHR_2 (t - t_{ut}) + LHR_{2_0} \right) \frac{Q_2}{n_2} - \left(\Pi_0 - (\Delta H_{wd_{min}} + S + S' + H_d) \right) (1 - y_{reg_2}) \right) \quad (67)$$

- c) У трећем сценарију се, због горе наведеног утицаја броја нових дренава на $KLHR$ и LHR , утискује 8 дренава (једначина (68)), осим у случају Rb-15, Rb-16 и Rb-20 у које се и у овој верзији утискују 4 дрена, при чему се стари не затварају – једначина (19). У овој верзији није предвиђено да се у периоду након утискивања врши једна регенерација и на бунарима са новим дренама – једначина (68). Вредност n_2 је 8.

$$\Delta S = (1-U) \left(\left(LHR_{1_0} + KLHR_1 t \right) \frac{Q_1}{n_1} - \left(\Pi_0 - (\Delta H_{wd_{min}} + S + S' + H_d) \right) (1 - y_{reg}) \right) + \\ + U \left(\left(KLHR_2 (t - t_{ut}) + LHR_{2_0} \right) \frac{Q_2}{n_2} \right) \quad (68)$$

Ако се примени корекција $KLHR_t$ као у једначинама (63) и (67) добија се једначина (69):

$$\Delta S = (1-U) \left(\left(LHR_{1_0} + KLHR_1 \frac{Q_1}{Q_0} \right) \frac{Q_1}{n_1} - \left(\Pi_0 - (\Delta H_{wd_{min}} + S + S' + H_d) \right) (1 - y_{reg}) \right) + U \left(KLHR_2 (t - t_{ut}) + LHR_{2_0} \right) \frac{Q_2}{n_2} \quad (69)$$

4.3.6 Начин рада оптимизационог алгоритма

Оптимизациони алгоритам који генерише описани модел и омогућава да се тестирају различити сценарији и најбоље комбинација бунара у које се утискују нови дренажи која ће омогућити највећи укупни проток, аутоматским тражењем максимума или решавањем модела за сваку комбинацију. Оптимизациони алгоритам има две верзије: прва се извршава само коришћењем Excel solver-a, да би се аутоматски одредила оптимална комбинација бунара у којима се утискују нови дренажи, а друга коришћењем Excel solver-a и макроа написаног у Visual Basic for Applications програмском језику да би се одредили протоци за све могуће комбинације бунара у којима се утискују нови дренажи. Excel solver вредност унапред одређених ћелија у табели аутоматски варира (са могућношћу да опсег вредности буде ограничен и да број буде реални број, цео број или 0 или 1) да би циљна вредност у једној ћелији била или што ближе унапред одређеној вредности, или максимална или минимална могућа. Уз то, ограничење у опсегу вредности се може задати и за било коју другу ћелију у табели, тако да коначне вредности ћелија које се варирају морају бити такве да услови за вредност циљне ћелију буду испуњени, при чему морају бити поштована ограничења и из поменутих других ћелија.

4.3.6.1 Аутоматско одређивање оптималне комбинација бунара у које се утискују дренажи

У верзији алгоритма која врши аутоматско одређивање оптималне комбинација бунара функција која је задата у циљној ћелији у овом случају садржи као основу збир протока свих бунара на крају десетогодишњег симулираног периода. Аутоматским варирањем вредности ћелија у којима се задаје проток, као и аутоматским задавањем вредности ћелијама чија вредност одређује да ли ће током симулације бити извршено утискивање дренажа (јединица) или не (нула) у одговарајућем бунару, алгоритам тражи комбинацију која ће дати максималну вредност у циљној ћелији, при чему мора бити испоштован задати услов минималне разлике између нивоа у бунару и коте дренажа на крају симулираног периода. Ниво у бунару се одређује преко једначине (70):

$$\Pi_w = \Pi_0 - S - S' - \Delta S \quad (70)$$

Пре почетка прорачуна се задаје у колико ће бунара бити утискивани нови дренажи током симулираног периода, при којој разлици између нивоа у бунару и коте дренажа ће бити вршене регенерације и која је минимална разлика између нивоа у бунару и коте дренажа на крају симулираног периода. Функција у циљној ћелији има облик дат једначином (71),

$$\frac{\sum_{i=1}^{12} Q_i}{\left(1 + |n_{ndo} - n_{nd}|\right)} \quad (71)$$

, при чему је Q_i проток Ранеу бунара i , n_{nd} је број јединица у колони у којој су ћелије са јединицама и нулама а n_{ndo} је задати број бунара у које ће бити утискивани нови дренажи током симулираног периода. На овај начин се постиже да вредност функције у циљној ћелији нагло опада ако је број јединица у колони у којој су ћелије са јединицама и нулама већи или мањи од задатог броја бунара у које ће бити утискивани нови дренажи и Excel Solver врло брзо, након пар итерација, почиње да тражи само комбинације у којима је n_{nd} једнако n_{ndo} .

4.3.6.2 Израчунавање протока за све комбинације бунара у које се утискују дренажи

У верзији алгоритма која одређује протоке бунара за све могуће комбинације бунара у којима се утискују нови дренажи, циљна ћелија садржи само збир протока свих бунара на крају десетогодишњег симулираног периода.

Помоћу макроа написаног у Visual Basic for Applications програмском језику се задају вредности ћелија чија вредност одређује да ли ће током симулације бити извршено утискивање дренажа, тако да буде онолико јединица колико ће бити утискивања, при чему су вредности у другим ћелијама у колони једнаке нули. Затим се преко макроа активира Excel Solver који аутоматски варира вредности ћелија у којима се задаје проток и тражи протоке за које ће се добити максимална вредност у циљној ћелији, што се у ствари своди на то да укупна депресија у сваком бунару одговара задатој минималној разлици између нивоа у бунару и коте дренажа. У оквиру дела макроа у коме се позива Excel Solver су задате разлика између нивоа у бунару и коте дренажа при којој ће бити извођене регенерације и минимална разлика између нивоа у бунару и коте дренажа на крају симулираног периода. Макро се извршава онолико пута колико има могућих комбинација бунара у које се утискују дренажи током десетогодишњег периода.

Резултати добијени на овај начин су омогућили да се добију протоци за све могуће комбинације, из чега се затим могла добити комбинација са највећим протоком, расподела вероватноћа укупног протока анализираних група бунара, просечан укупни проток за све комбинације утискивања дренажа у које је укључен неки бунар и друго.

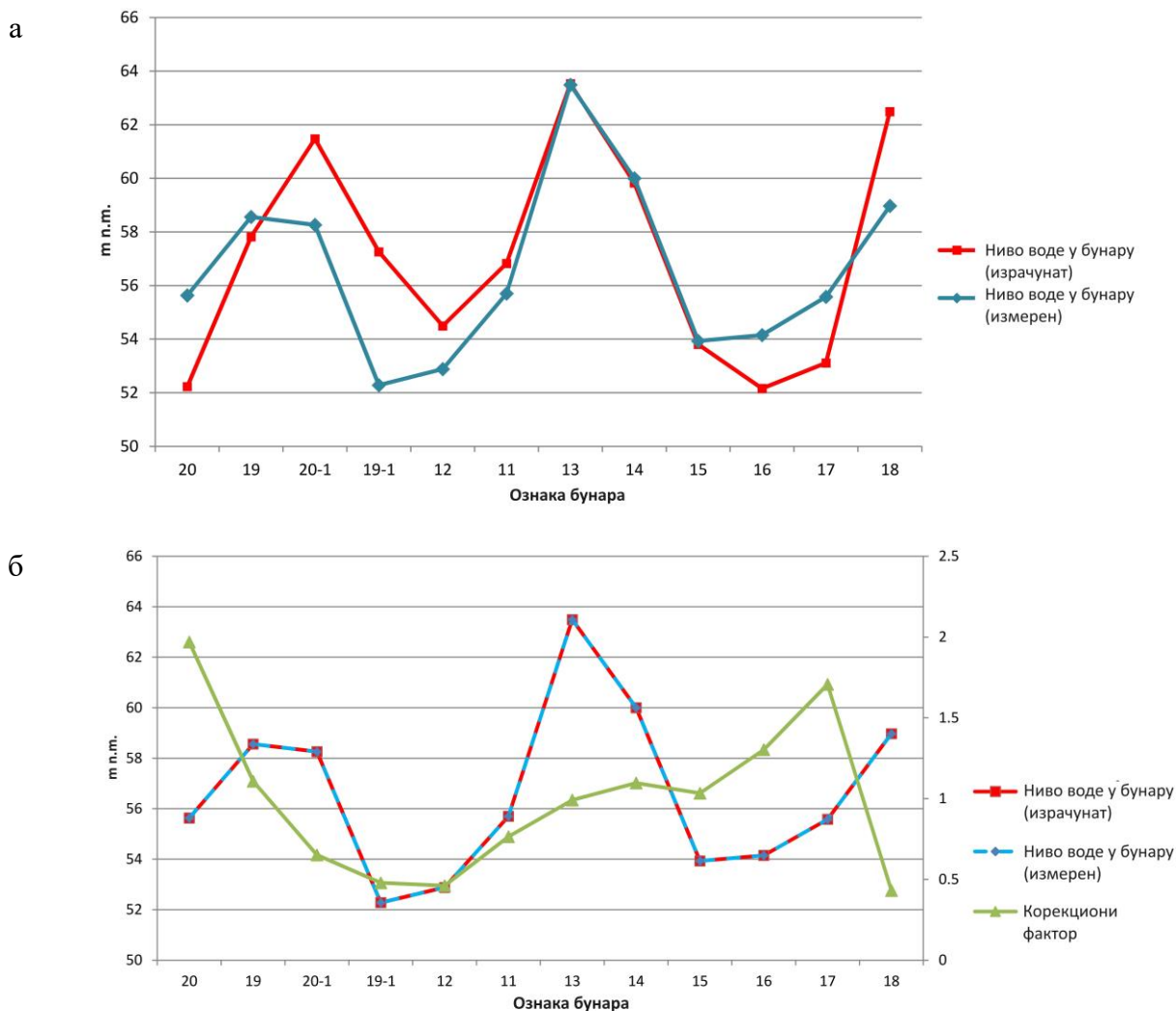
4.3.7 Калибрација и провера модела, добијање улазних података за симулацију

4.3.7.1 Груба калибрација коефицијената филтрације

Пре почетка симулације и процеса оптимизације извршена је прво груба калибрација модела коришћењем података о протоцима и нивоима у одабраним бунарима и њиховим блиским пијезометрима за 20.11.2013. – Слика 25 (а). Параметри који су аутоматски мењани да би се добило минимално средње квадратно одступање израчунатих од забележених нивоа у бунарима су коефицијенти филтрације слабопропусног међуслоја и доњег водоносног слоја, док су дебљине ових слојева фиксирани на 1 m и 5 m, респективно. Вредности које су добијене као резултат калибрације су $1,75 \cdot 10^{-7}$ m/s и $1,17 \cdot 10^{-3}$ m/s за слабопропусни међуслој и доњи водоносни слој, респективно. Потребни подаци за калибрацију су постојали и за 31.10.2012., калибрација је извршена и на основу њих и резултат су биле вредности коефицијената филтрације од $2,00 \cdot 10^{-7}$ m/s и $1,35 \cdot 10^{-3}$ m/s, за слабопропусни међуслој и доњи водоносни слој, респективно. Ниво поклапања резултата прорачуна и измерених вредности нивоа у одабраним бунарима се може сматрати задовољавајућим с обзиром на величину апроксимације и на то да се варирају само два параметра – Слика 25 (а).

4.3.7.2 Фина калибрација коефицијената филтрације

Следећи корак је била фина калибрација да би се добила тачна поклапања протока и нивоа за сваки бунар. Коефицијент филтрације (хоризонтални) водоносног слоја одређен у првом кораку добро описује карактеристике водоносног слоја на нивоу подручја и коришћен је да се израчуна међусобни утицај бунара. Депресија у бунару коју узрокује рад самог тог бунара је рачуната коришћењем коефицијента филтрације одређеног у првој калибрацији помноженог са корекционим фактором за дати бунар. Корекциони фактори су одређени аутоматски помоћу Excel solver-а тако да средње квадратно одступање израчунатих од забележених нивоа у бунарима буде једнако нули (Слика 25 (б)).



Слика 25 а) Коте нивоа у бунару израчунате у процесу основне калибрације (црвене тачке и крива) и нивои забележени 20.11.2013. (плаве тачке и крива); б) Коте нивоа у бунару израчунате у процесу фине калибрације (црвене тачке и крива), нивои забележени 20.11.2013. (плаве ознаке и испрекидана крива) и вредности корекционог фактора (зелене ознаке и крива) – преузето уз измене из Mitrović et al. (2018)

4.3.7.3 Симулација периода покривеног осматрањима и добијање улазних података за симулацију

У трећем кораку извршена је провера модела за све бунаре симулирањем периода од 1.10.2008. до 20.11.2013., полазећи од пада нивоа услед колматација S'' ($\approx \Delta S$) и протока на почетку тог периода, при чему је извршена и провера вредности $KLHR$ и y_{reg} (и вредности добијених на основу мерења и претпостављених вредности за бунаре за које није било потребних мерења). Вредност LHR на крају се множи са протоком по дренажу да би се добили прорачунски S'' и ниво у бунару.

У четвртм кораку одређени су улазни подаци за симулацију 10-огодишњег периода: вредности LHR и $KLHR$ за одређени бунар на крају периода од 1.10.2008. до 20.11.2013., средња вредност y_{reg} за тај бунар за наведени период ако је било регенерација, а ако их није било – средња вредност за све регенерације дате у табели (Табела 4). Вредност LHR на крају се множи са протоком по дренажу да би се добили прорачунски S'' и ниво у бунару.

Депресија услед струјања кроз аквафер је израчунавана на основу протока на крају симулираних периода, према Hantush-овом и Jacob-овом аналитичком решењу – једначина (13). Прорачун локалних губитака у симулацији периода од 1.10.2008. до 20.11.2013. је вршен по моделу датом једначином (72),

$$\Delta S = (LHR_0 + KLHR_1 t_{reg_1} - (LHR_0 + KLHR_1 t_{ut})(1 - y_{reg_1}) + KLHR_2(t_{reg_2} - t_{reg_1}) - (LHR_0 + KLHR_1 t_{reg_1} - (LHR_0 + KLHR_1 t_{ut})(1 - y_{reg_1}) + KLHR_2(t_{reg_2} - t_{reg_1}))(1 - y_{reg_2}) + KLHR_3(t - t_{reg_2})) \frac{Q}{n} \quad (72)$$

, при чему је t_{reg_i} време протекло од 1.10.2008. до тренутка када је вршена регенерација i , t је време протекло од 1.10.2008. до 20.11.2013., док је y_{reg_i} коефицијент смањења LHR услед регенерације i . Период од 1.10.2008. до 20.11.2013. је за сваки бунар подељен на мање периоде раздвојене регенерацијама, ако их је било. Највећи број регенерација изведених на неком бунару током овог периода је био две.

Табела 1 Начин одређивања $KLHR$, LHR и y_{reg} за бунаре обухваћене моделом

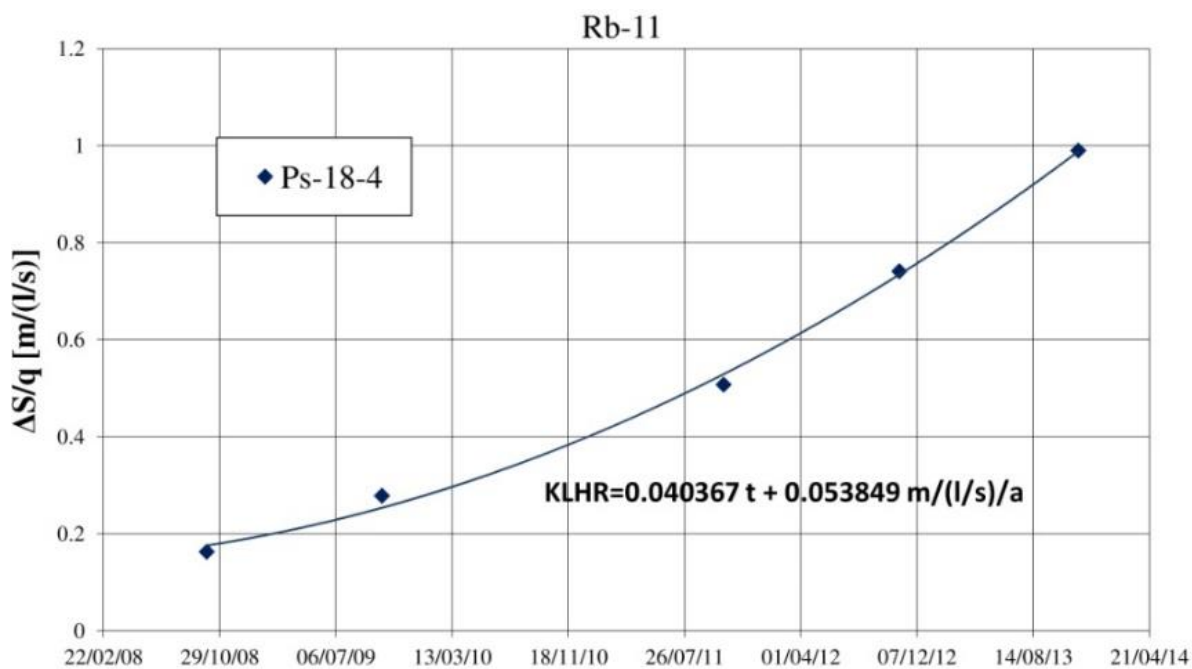
Бунар	$KLHR$ [m/(l/s)/a] и LHR [m/(l/s)]	y_{reg} [-]
Rb-11	Регресија LHR квадратном функцијом од времена (Слика 26), LHR на крају симулираних периода израчунава се из квадратне функције	Није било регенерације у периоду 2008 – 2013. (Слика 26). Просечна вредност y_{reg} за анализиране регенерације од 0,41 (Табела 4) узета као улазни податак за симулацију 10-огодишњег периода
Rb-12	$KLHR$ узето да је једнако просечном јер постоји само једно мерење LHR . Уз претпоставку да је депресија услед струјања кроз аквафер иста 1.10.2008. и 19.11.2013. јер су протоци слични, вредност S'' 1.10.2008. је узета тако да израчунати локални губици 19.11.2013. буду једнаки забележеним тог дана	Због малог протока и ниског нивоа у шахту бунара 20.11.2013., упркос регенерацији 20.02.2013., одређено је да је y_{reg} једнако 0,95
Rb-13	Регресија LHR линеарном функцијом пре регенерације, квадратном после (Слика 28)	y_{reg} за једну регенерацију у периоду 2008 – 2013. добијено екстраполацијом LHR пре и после регенерације (Слика 28)
Rb-14	За Rb-14 није било података о нивоима већ само о протоцима у последњих 20 година.	Због малог протока 01.07.2012., процењено да су ефекти регенерације од

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

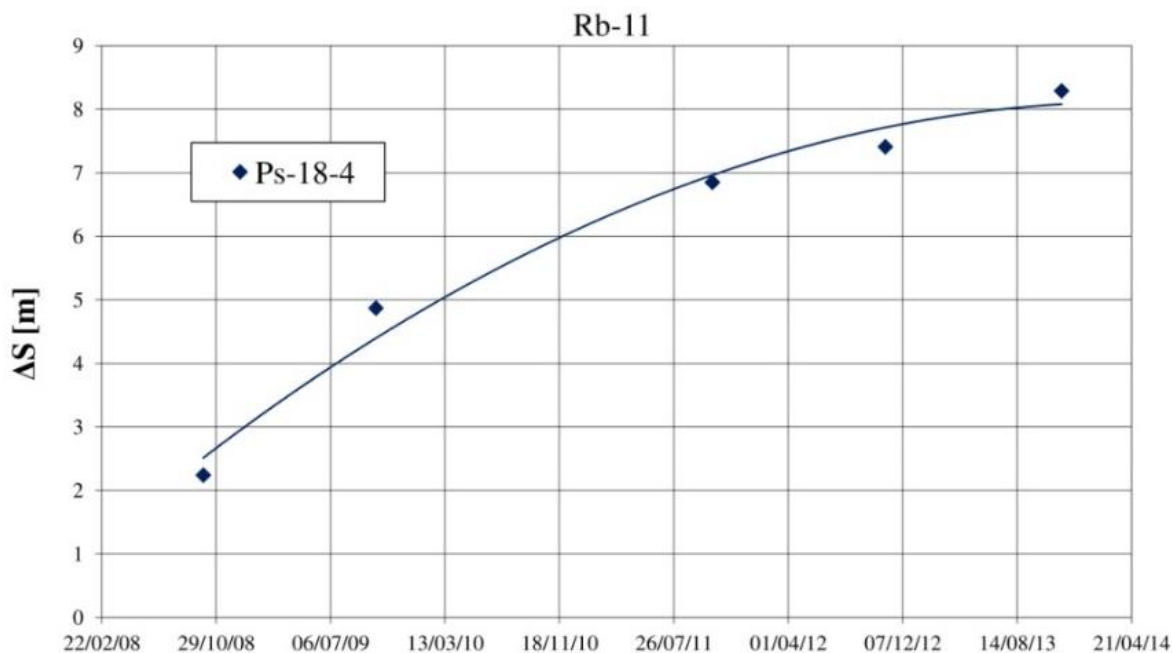
	На основу малог протока претпостављено је велико LHR. Протицај у бунару се врло мало мењао у последњих 25 година, па је, узимајући у обзир да овај бунар има 4 активна дрена, узето да је KLHR једнако трећини просечног да би се LHR и S'' мало мењали током времена	02.02.2012. били мали, узето је да је u_{reg} једнако 0,9
Rb-15	Регресија LHR линеарном функцијом пре, између и после 2 регенерације (Слика 30)	Вредности u_{reg} за 2 регенерације у периоду 2008 – 2013. добијене екстраполацијом LHR пре и после регенерација (Слика 30)
Rb-16	Регресија LHR линеарном функцијом (Слика 32)	Није било регенерације у периоду 2008 – 2013. (Слика 32). Просечна вредност u_{reg} за анализиране регенерације од 0,41 (Табела 4) узета као улазни податак за симулацију 10-огодишњег периода
Rb-17	Регресија линеарном функцијом LHR за 30.10.2012. и 08.07.2013., почетна вредност за S'' из 30.10.2012. пошто бунар није радио неколико претходних година	Није било потребних података за процену ефеката регенерације, просечна вредност u_{reg} за анализиране регенерације од 0,41 (Табела 4) узета као улазни податак за симулацију 10-огодишњег периода
Rb-18	За Rb-18 познато LHR 30.10.2012. и 20.11.2013. За вредност депресије услед струјања узето да је два пута већа 2008. него 2013. (проток био два пута већи). Вредност S'' 01.10.2008. је узета тако да израчунати локални губици 20.11.2013. буду једнаки забележеним тог дана. За KLHR процењено да је 50% веће од просечног, што даје малу промену нивоа током времена због великог броја активних дренажа.	Исто као за Rb-17
Rb-19	За Rb-19 познато LHR 31.10.2012. и 19.11.2013. Стабилан, висок проток током 15 година, па је узето да је KLHR 10 пута мање од просечне вредности. Вредност S'' 01.10.2008. је узета тако да израчунати локални губици 19.11.2013. буду једнаки забележеним тог дана.	Исто као за Rb-17
Rb-19-1	Регресија LHR линеарном функцијом пре и после регенерације (Слика 34)	u_{reg} за једну регенерацију у периоду 2008 – 2013. добијено екстраполацијом LHR пре и после регенерације (Слика 34)

Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара

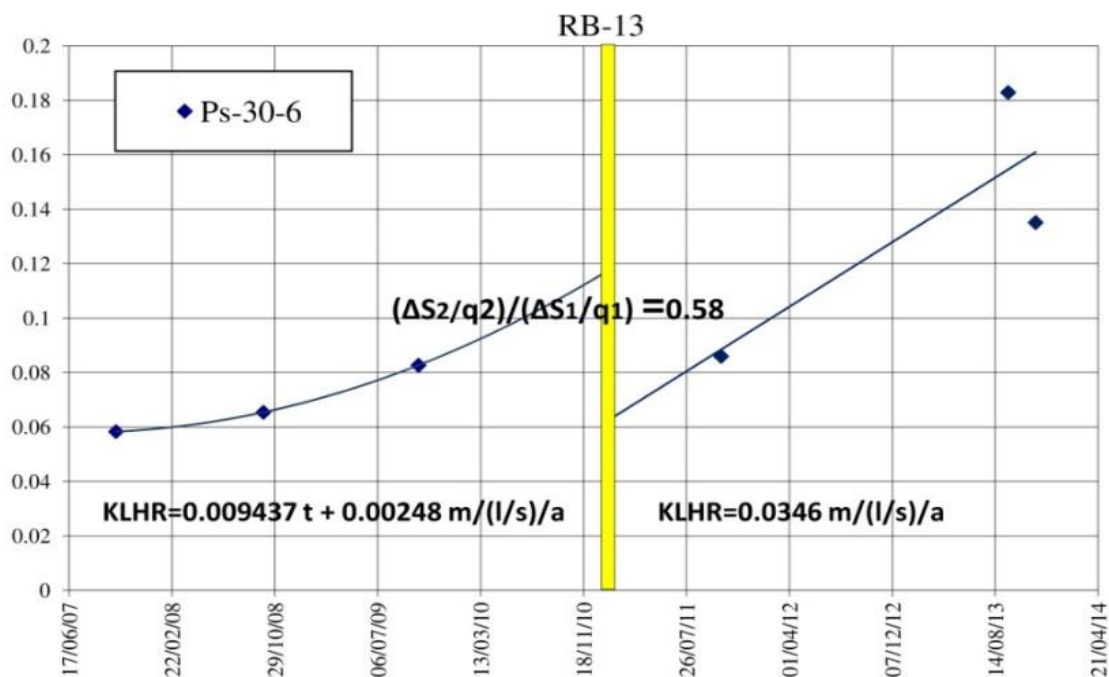
Rb-20	Регресија LHR линеарном функцијом пре, између и после 2 регенерације (Слика 36)	Вредности y_{reg} за 2 регенерације у периоду 2008 – 2013. добијене екстраполацијом LHR пре и после регенерација (Слика 36)
Rb-20-1	Регресија LHR линеарном функцијом пре и после регенерације (Слика 38)	За y_{reg} узета просечна вредност за анализиране регенерације од 0,41 (Табела 4), регенерација вршена кад су локални губици на дренажима били врло ниски па ефекти нису могли да се одреде (Слика 38)



Слика 26 Промена LHR (регресија квадратном једначином) и KLHR током времена у Rb-11 (пијезометар Ps-18-4). У једначини за KLHR за Ps-18-4 t је време у годинама протекло од првог мерења на дијаграму (преузето из Mitrinović et al. (2018))

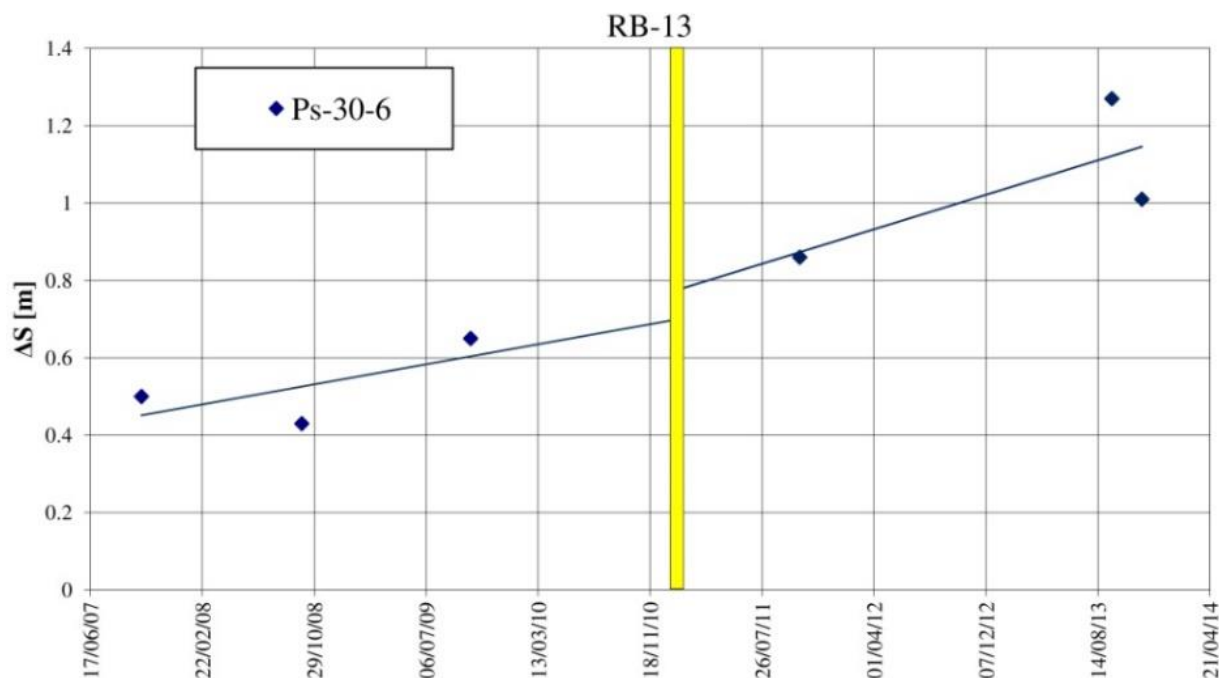


Слика 27 Промена локалних губитака услед струјања кроз колмирани слој у Rb-11 током времена (преузето из Mitrinović et al. (2018))

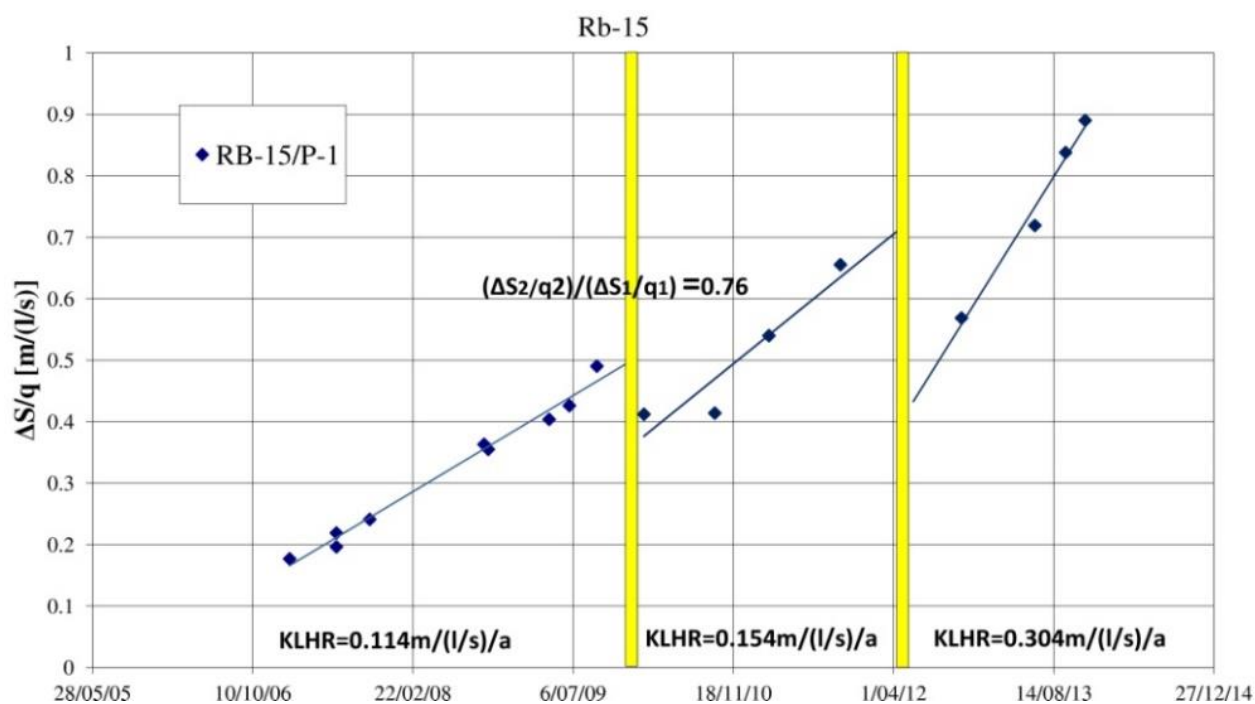


Слика 28 Промена LHR (регресија линеарном и квадратном једначином) и KLHR током времена у Rb-13 (пијезометар Ps-30-6), жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrinović et al. (2018))

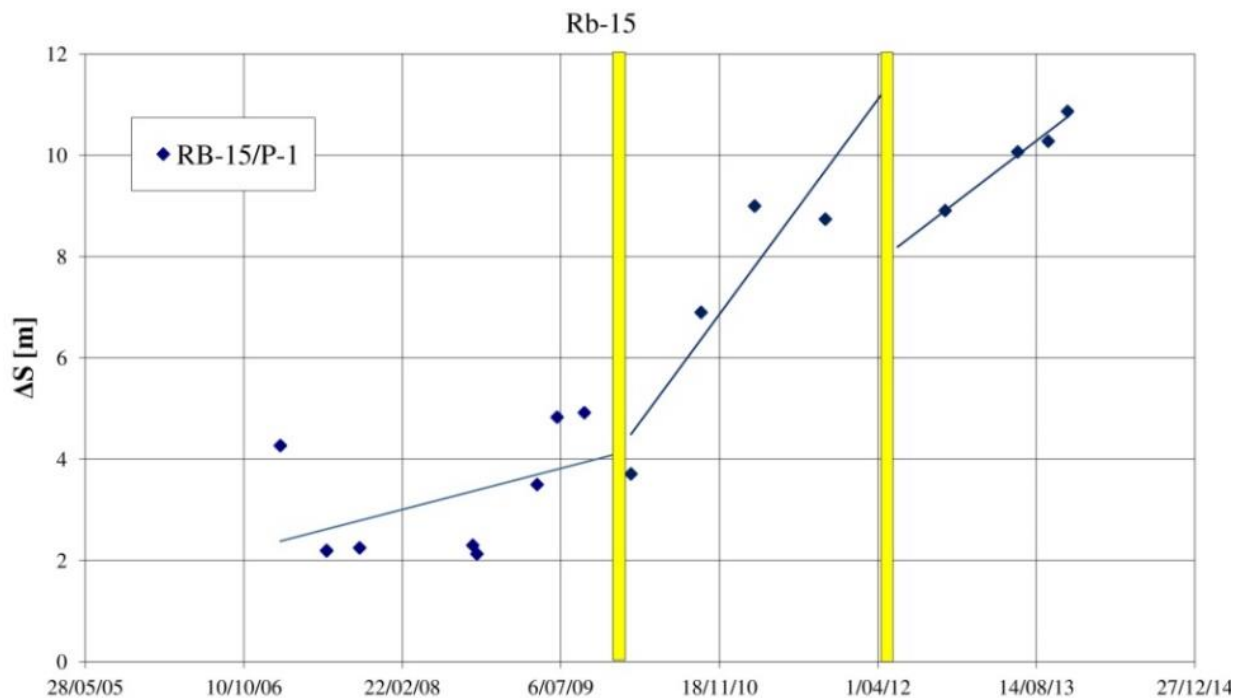
У једначини за KLHR t је време у годинама протекло од првог мерења на дијаграму (преузето из Mitrinović et al. 2018).



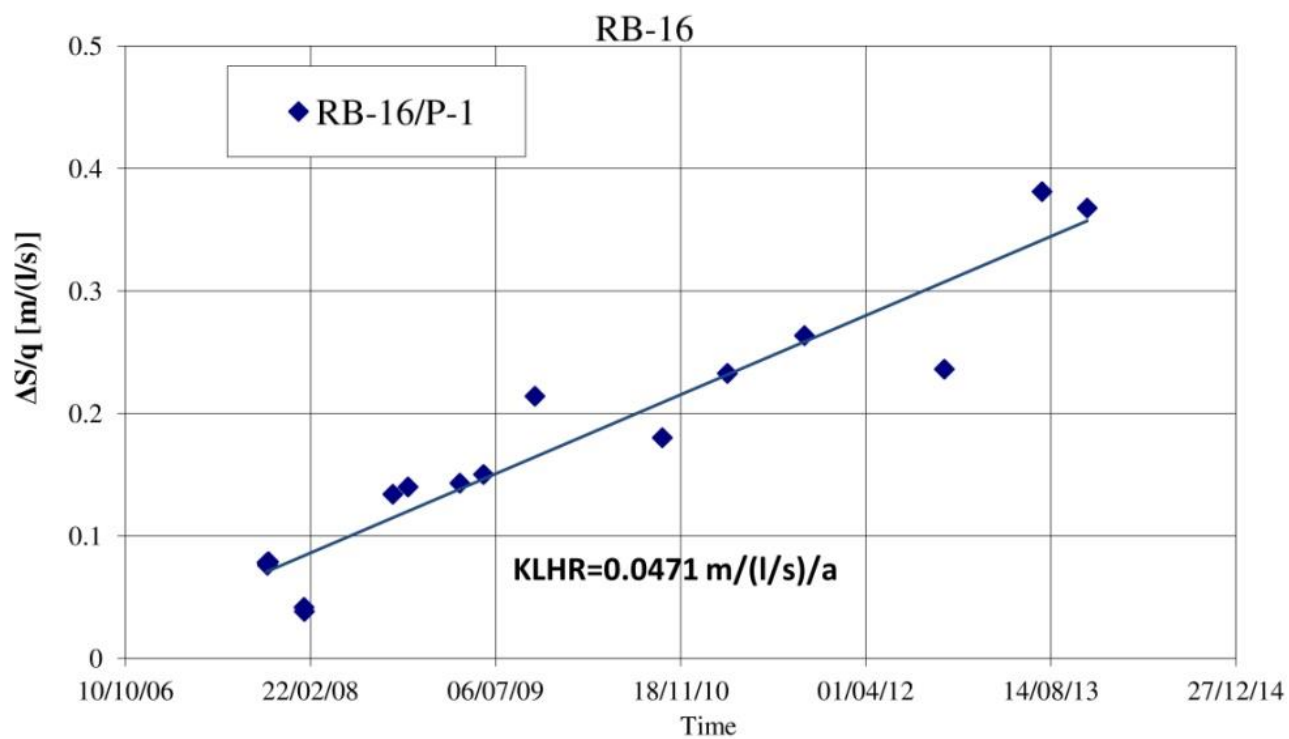
Слика 29 Промена локалних губитака услед струјања кроз колмирани слој у Rb-13 током времена (преузето из Mitrinović et al. (2018))



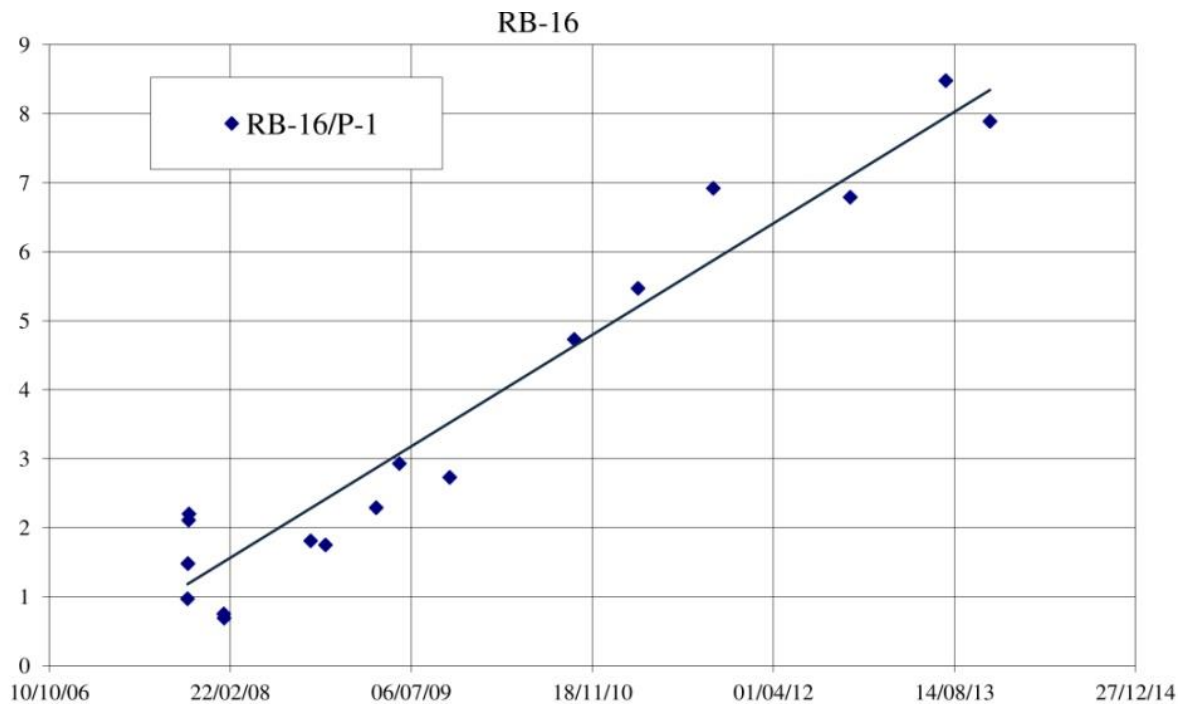
Слика 30 Промена LHR и KLHR током времена у Rb-15 праћена помоћу тијезометра Rb-15/p-1, жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrinović et al. (2018))



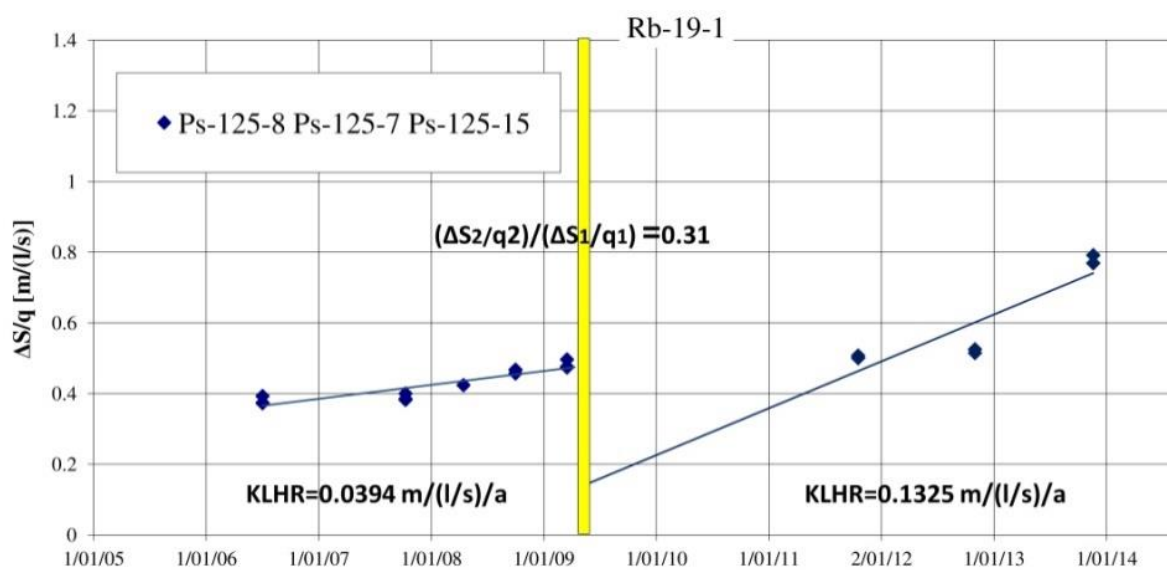
Слика 31 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој у Rb-15 током времена (преузето из Mitrinović et al. (2018))



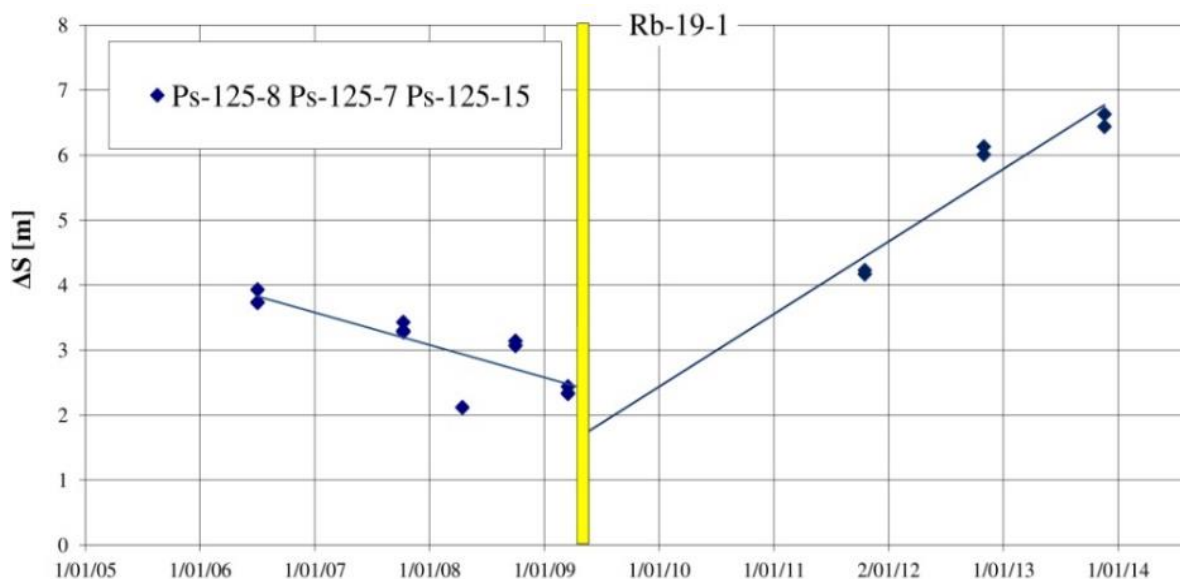
Слика 32 Промена LHR током времена и KLHR у Rb-16 праћена помоћу пијезометра Rb-16/p-1 (преузето из Mitrinović et al. (2018))



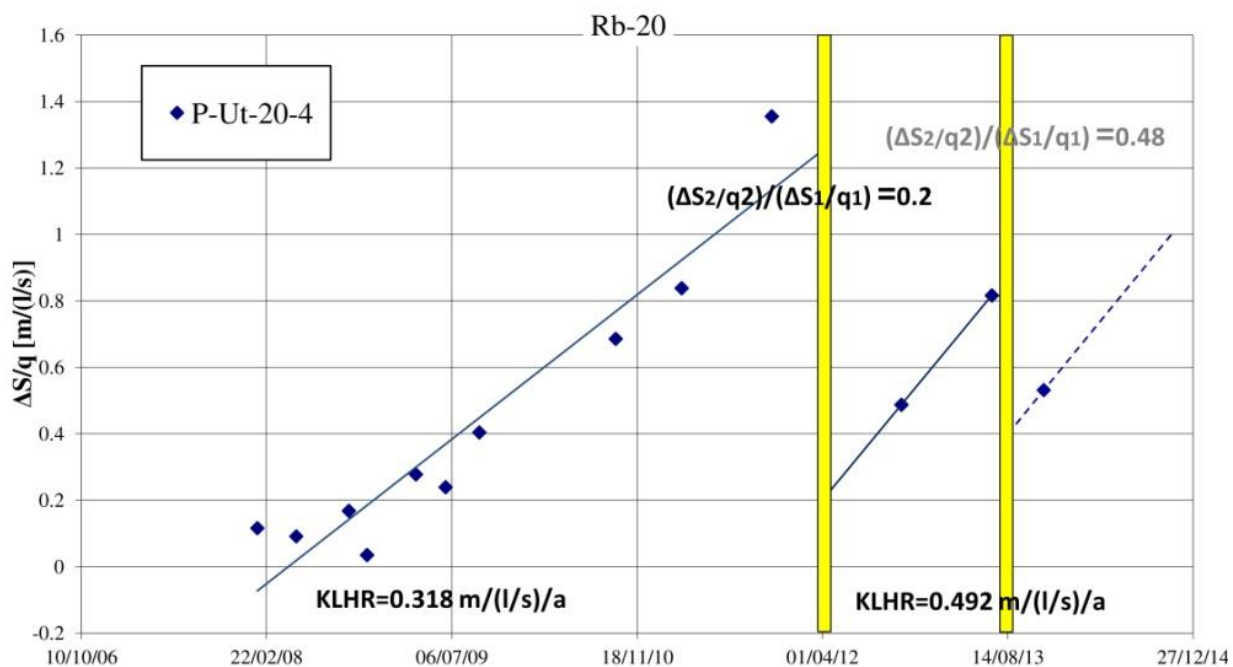
Слика 33 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој у Rb-16 током времена (преузето из Mitrinović et al. (2018))



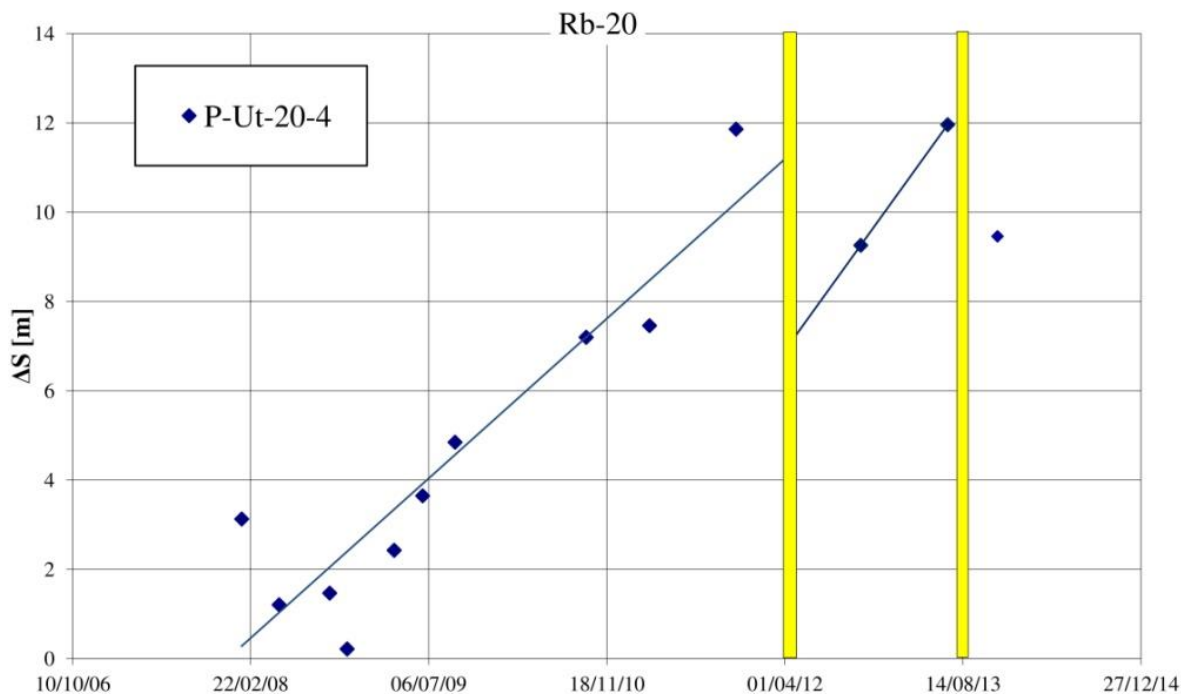
Слика 34 Промена LHR током времена и KLHR за Rb-19-1, за пијезометре Ps-125-7, Ps-125-8, Ps-125-15. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrinović et al. (2018))



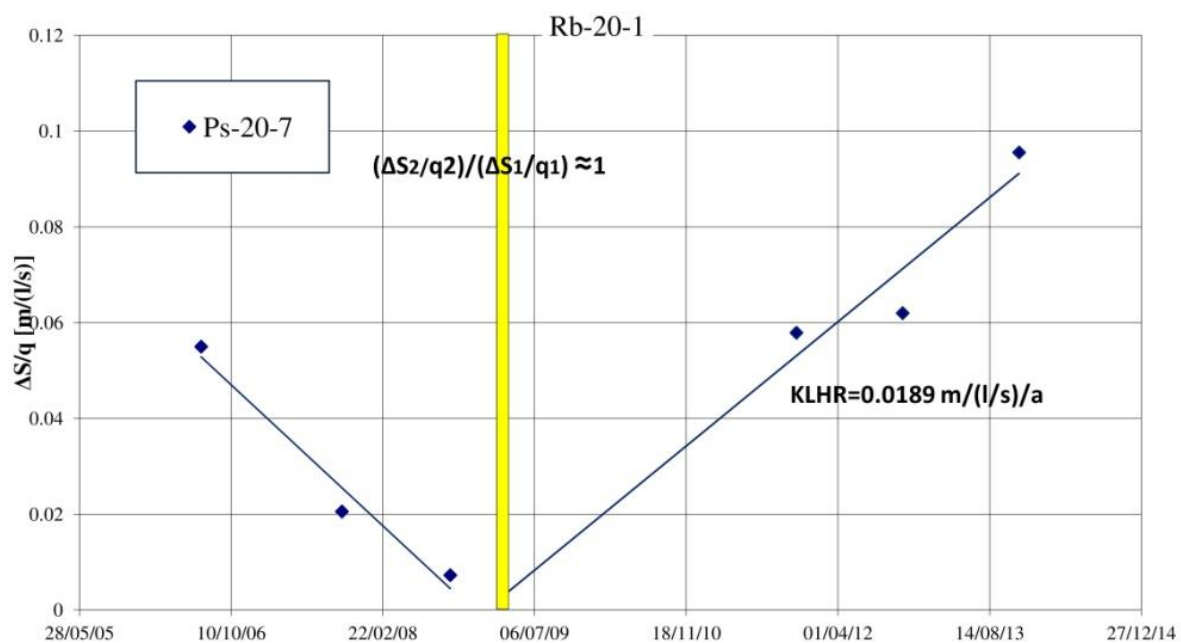
Слика 35 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој за Rb-19-1, за пијезометре Ps-125-7, Ps-125-8, Ps-125-15. Жута поља представља извршену регенерацију (преузето из Mitrinović et al. (2018))



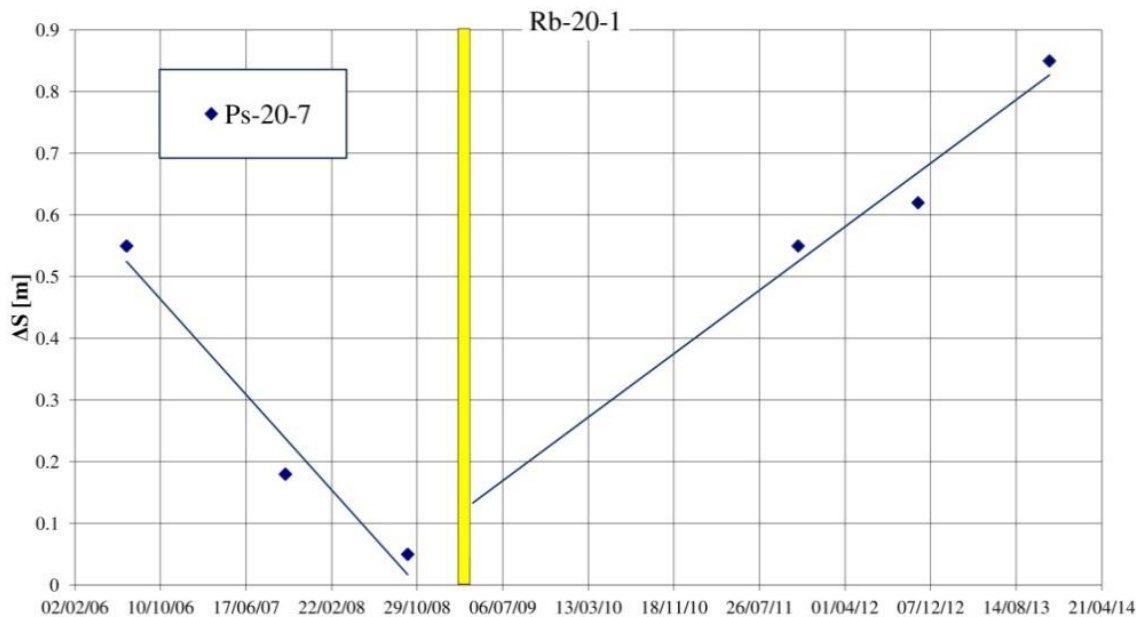
Слика 36 Промена LHR током времена и KLHR за Rb-20, за пијезометар за P-Ut-20-4. Жута поља представља извршену регенерацију (преузето из Mitrinović et al. (2018))



Слика 37 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој за Rb-20, за пијезометар P-Ut-20-4. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrinović et al. (2018))

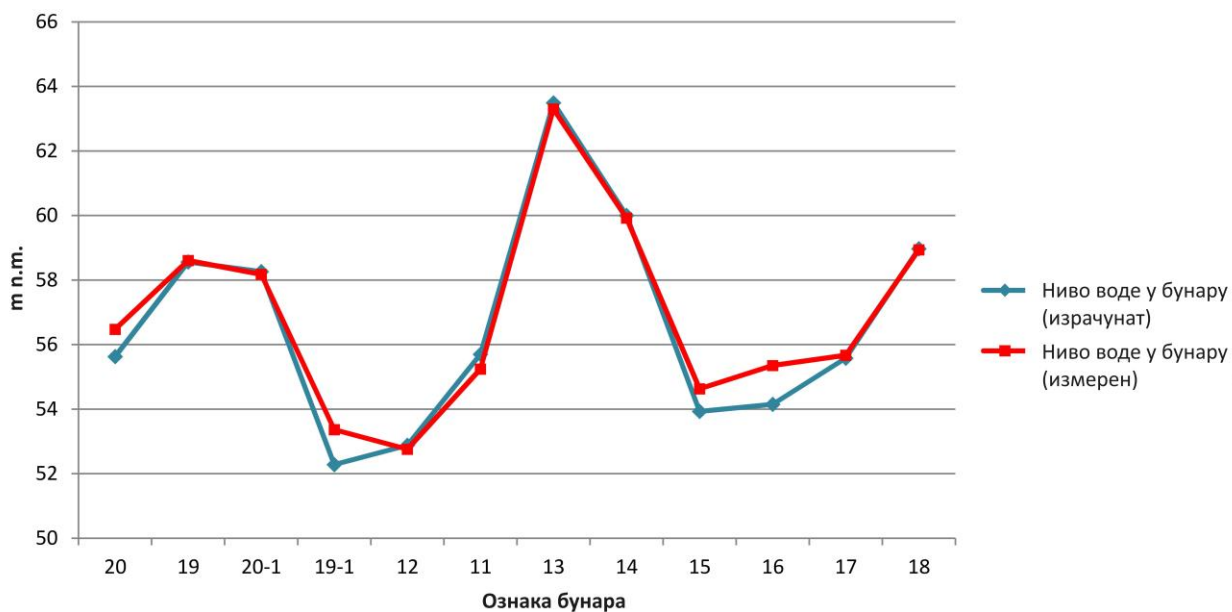


Слика 38 Промена LHR током времена и KLHR за Rb-20-1, за пијезометар Ps-20-7. Жуто поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrinović et al. (2018))



Слика 39 Промена депресије услед струјања кроз колмирани слој за Rb-20-1, за пијезометар Ps-20-7. Жута поље представља извршену регенерацију (преузето из Mitrinović et al. (2018))

Резултати симулације периода од 1.10.2008. до 20.11.2013. наравно показују савршено поклапање за бунаре за које се радило на основу претпоставки (Rb-12, Rb-14, Rb-17, Rb-18 и Rb-19), док је за остале бунаре нешто слабије јер су коришћене вредности линеарних губитака, KLHR и коефицијента смањења LHR услед регенерације израчунате на основу мерења извршених у том периоду – Слика 40.



Слика 40 Резултати симулације периода од 1.10.2008. до 20.11.2013. - израчунате коте нивоа у бунару за 20.11.2013. (црвене тачке и крива) и нивои забележени 20.11.2013. (плаве тачке и крива) – преузето из Mitrinović et al. (2018)

Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара

Додатна провера модела, као и вредности коефицијента филтрације доњег водоносног слоја, међуслоја и корекционих фактора за бунаре, одређених у процесу калибрације, извршена је и прорачунавањем нивоа у бунарима са новоутиснутим дренажима у одређеним данима кад су извршена мерења у току првих годину дана након утискивања, коришћењем забележених вредности протицаја нивоа у бунарима и висина линеарних губитака. Резултати симулација и забележени протицаји, нивои у бунарима и линеарни губици су приказани у табели (Табела 2).

Табела 2 Протицаји бунара, висине линеарних губитака, измерени и симулирани нивои у бунарима, забележени одређеног дана у првих годину дана након утискивања нових дренажа

Бунар	Ниво у бунару [m н.м.]	Линеарни губици [m]	Протицај [l/s] измерени	Ниво у бунару [m н.м.] симулација	Разлика између симулираног и нивоа измереног у бунару [m]	Датум
Rb-15	57,56	4,27	72,4	57,59	0,03	2.2.2007.
Rb-15	63,50	2,25	28,0	63,87	0,37	10.10.2007.
Rb-16	61,88	0,75	72,0	62,63	0,75	4.2.2008.
Rb-16	61,85	1,85	54,0	63,00	1,15	1.10.2008.
Rb-20	61,10	3,13	108,0	60,10	-1,00	28.01.2008.
Rb-20	64,84	1,47	35,0	65,43	0,59	1.10.2008.

5 РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

5.1 Корелације између брзине колмирања и физичко-хемијских параметара средине и протицаја по дренажу и анализа утицаја режима рада бунара на процес колмирања

5.1.1 KLHR и просечне вредности протока по дренажу

У Табела 3 и на сликама (Слика 41 – Слика 55) су дати резултати анализе свих издвојених периода између регенерација за бунаре са доминантним процесом колмирања. Протоци приказани на дијаграмима на сликама су забележени приликом мерења нивоа, обично је било још мерења између и она су такође узета у обзир приликом израчунавања просечних протока по дренажу по периодима. Поред протока, за сваки издвојени период такође су израчунати средња концентрација раствореног двовалентног гвожђа у узорцима воде из шахта бунара и средња вредност редокс потенцијала воде из шахта бунара.

На основу описаног скупа података спроведена је математичка регресија да би се установиле корелације између брзине колмирања (брзине раста локалних хидрауличких отпора на дренажима бунара) и концентрације двовалентног гвожђа и протицаја по дренажу и између брзине колмирања и редокс потенцијала и протицаја по дренажу.

Табела 3 Просечне вредности за издвојене периоде рада бунара протока по дренажу: концентрације двовалентног гвожђа (4), редокс потенцијала (6) и KLHR (2), улазних брзина (5), критичних протока према KLHR (8 и 11), критичних протока и брзина израчунатих коришћењем једначина (81) и (82) за бунаре са новим дренажима и на еквивалентан начин изведених једначинама из једначине (76) за остале бунаре (9 и 10) и вредности KLHR добијене регресијом најбољом корелацијом – једначина (74) за бунаре са новим дренажима и једначина (76) за остале бунаре (14)

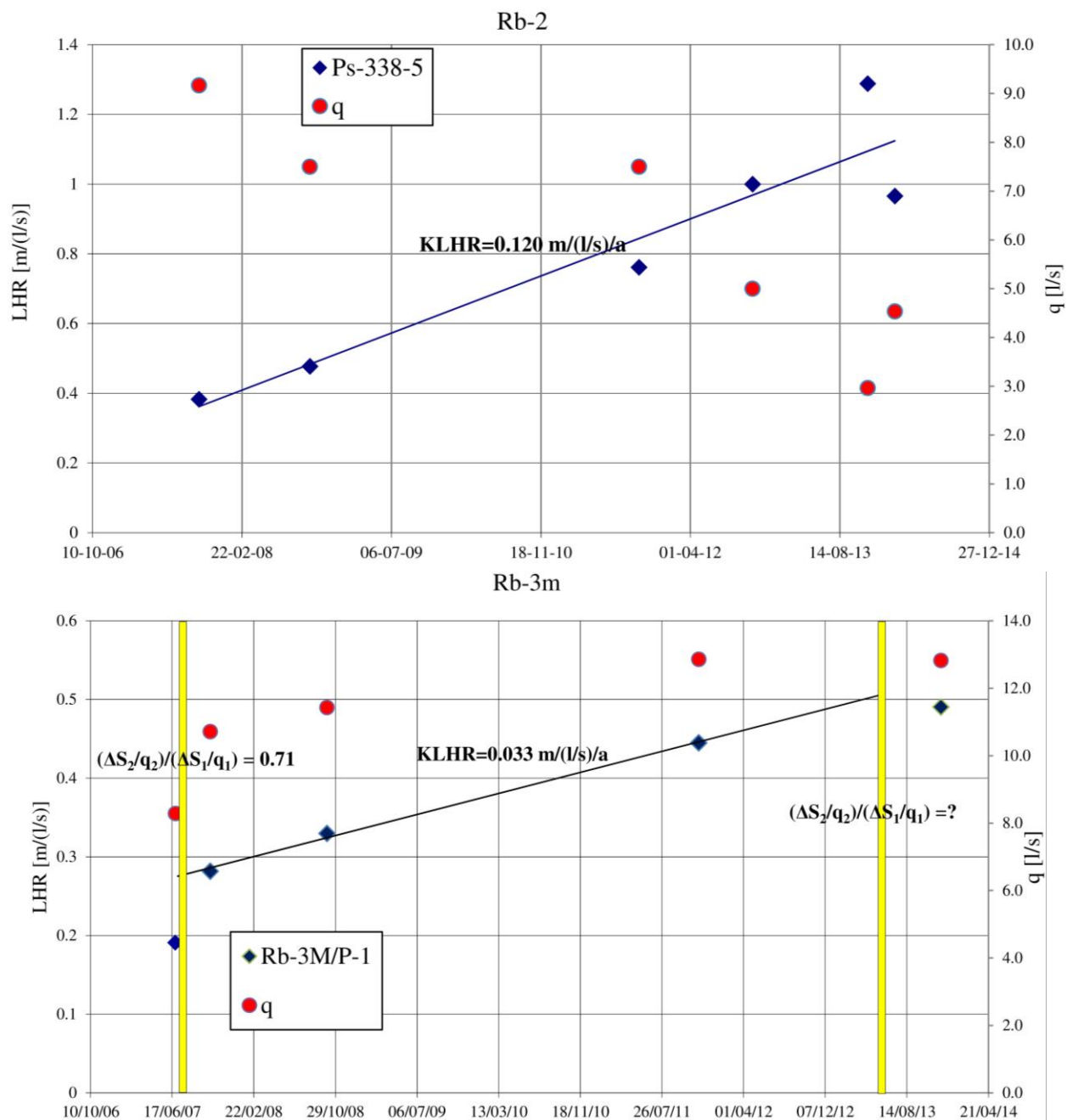
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	KLHR ₀ [m/(l/s)/a]	$\Delta S/\Delta t$ [m/a]	$c(\text{Fe}^{2+})$ [mg/l]	v_{dren} [m/s]	Eh [mv]	q_{dren} [l/s]	$q_{\text{krit.}}$ ($\Delta S=$ 0.35m) [l/s]	$q_{\text{krit,calc.}}$ ($\Delta S=$ 0.35m) [l/s]	$v_{\text{krit,calc.}}$ ($\Delta S=0,35\text{m}$) [m/s]	$q_{\text{krit.}}$ ($\Delta S=$ 1.0m) [l/s]	$q_{\text{krit,calc.}}$ ($\Delta S=$ 1.0m) [l/s]	$v_{\text{krit,calc.}}$ ($\Delta S=1,0\text{m}$) [m/s]	KLHR _{reg} [m/(l/s)/a]
Rb-5m	0.44	3.43	2.8	$2.521 \cdot 10^{-4}$	69.7	7.8	0.80	2.22	$7.174 \cdot 10^{-5}$	2.27	3.73	$1.205 \cdot 10^{-4}$	0.572
Rb-5m	1.21	12.9	3.12	$3.458 \cdot 10^{-4}$	109.2	10.7	0.29	1.98	$6.403 \cdot 10^{-5}$	0.83	3.33	$1.075 \cdot 10^{-4}$	0.996
Rb-5m	1.02	10.5	3.04	$3.329 \cdot 10^{-4}$	60.1	10.3	0.34	2.04	$6.588 \cdot 10^{-5}$	0.98	3.42	$1.106 \cdot 10^{-4}$	0.904
Rb-8	1.37	17.5	3.53	$4.136 \cdot 10^{-4}$	98.00	12.8	0.26	1.71	$5.536 \cdot 10^{-5}$	0.73	2.88	$9.296 \cdot 10^{-5}$	1.607
Rb-8	0.78	3.20	4.36	$1.325 \cdot 10^{-4}$	92.06	4.1	0.45	1.28	$4.123 \cdot 10^{-5}$	1.28	2.14	$6.923 \cdot 10^{-5}$	0.908
Rb-8	1.39	13.9	3.32	$3.232 \cdot 10^{-4}$	86.71	10	0.25	1.85	$5.964 \cdot 10^{-5}$	0.72	3.10	$1.002 \cdot 10^{-4}$	1.073
Rb-15	0.114	1.20	0.83	$3.393 \cdot 10^{-4}$	139.0	10.5	3.07	4.47	$1.444 \cdot 10^{-4}$	8.77	7.50	$2.425 \cdot 10^{-4}$	0.188

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

Rb-15	0.154	2.13	1.00	4.460·10 ⁻⁴	84.70	13.8	2.27	4.21	1.359·10 ⁻⁴	6.49	7.06	2.283·10 ⁻⁴	0.281
Rb-15	0.304	4.29	0.55	4.557·10 ⁻⁴	95.80	14.1	1.15	4.94	1.595·10 ⁻⁴	3.29	8.29	2.678·10 ⁻⁴	0.208
Rb-16	0.0471	0.98	0.47	6.703·10 ⁻⁴	128.3	20.7	7.43	5.08	1.641·10 ⁻⁴	21.2	8.53	2.755·10 ⁻⁴	0.292
Rb-20	0.318	3.28	1.64	3.329·10 ⁻⁴	77.30	10.3	1.10	3.35	1.083·10 ⁻⁴	3.14	5.63	1.819·10 ⁻⁴	0.330
Rb-20	0.492	9.00	1.25	5.914·10 ⁻⁴	71.90	18.3	0.71	3.85	1.244·10 ⁻⁴	2.03	6.46	2.089·10 ⁻⁴	0.450
Rb-2	0.12	0.91	1.41	2.456·10 ⁻⁴	164.0	7.6	2.92	3.66	1.183·10 ⁻⁴	8.33	6.49	2.098·10 ⁻⁴	0.176
Rb-3m	0.033	0.35	1.51	3.425·10 ⁻⁴	116.0	10.6	10.6	3.51	1.133·10 ⁻⁴	30.3	6.22	2.010·10 ⁻⁴	0.251
Rb-4	0.05	0.97	0.13	6.269·10 ⁻⁴	275.0	19.4	7.00	6.36	2.056·10 ⁻⁴	20.0	11.28	3.646·10 ⁻⁴	0.139
Rb-4	0.021	0.37	0.34	5.623·10 ⁻⁴	162.0	17.4	16.7	5.81	1.878·10 ⁻⁴	47.6	10.30	3.330·10 ⁻⁴	0.150
Rb-6	0.334	1.60	0.53	1.551·10 ⁻⁴	134.9	4.8	1.05	5.35	1.730·10 ⁻⁴	2.99	9.49	3.068·10 ⁻⁴	0.060
Rb-6	0.422	3.46	0.56	2.650·10 ⁻⁴	115.7	8.2	0.83	5.28	1.708·10 ⁻⁴	2.37	9.37	3.028·10 ⁻⁴	0.095
Rb-8a	0.01	0.14	1.55	4.524·10 ⁻⁴	140.9	14.0	35.0	3.45	1.114·10 ⁻⁴	100	6.11	1.975·10 ⁻⁴	0.326
Rb-10	0.11	1.58	1.59	4.653·10 ⁻⁴	95.70	14.4	3.18	3.39	1.095·10 ⁻⁴	9.09	6.01	1.941·10 ⁻⁴	0.344
Rb-10	0.33	3.56	1.55	3.490·10 ⁻⁴	100.5	10.8	1.06	3.45	1.114·10 ⁻⁴	3.03	6.11	1.975·10 ⁻⁴	0.263
Rb-10m	0.0825	0.93	0.76	3.652·10 ⁻⁴	120.9	11.3	4.24	4.85	1.566·10 ⁻⁴	12.1	8.60	2.778·10 ⁻⁴	0.146
Rb-21	0.093	0.97	0.09	3.361·10 ⁻⁴	245.3	10.4	3.76	6.47	2.092·10 ⁻⁴	10.8	11.48	3.709·10 ⁻⁴	0.080
Rb-23	0.0566	0.89	0.45	5.106·10 ⁻⁴	246.7	15.8	6.18	5.54	1.791·10 ⁻⁴	17.7	9.83	3.175·10 ⁻⁴	0.151
Rb-23	0.0173	0.19	0.31	3.555·10 ⁻⁴	176.1	11.0	20.2	5.89	1.902·10 ⁻⁴	57.8	10.44	3.373·10 ⁻⁴	0.100
Rb-26	0.058	0.75	1.45	4.169·10 ⁻⁴	159.2	12.9	6.03	3.60	1.163·10 ⁻⁴	17.2	6.38	2.062·10 ⁻⁴	0.282
Rb-27	0.325	2.37	2.29	2.359·10 ⁻⁴	141.7	7.3	1.08	2.50	8.092·10 ⁻⁵	3.08	4.44	1.435·10 ⁻⁴	0.340
Rb-27	0.255	2.68	1.74	3.393·10 ⁻⁴	72.70	10.5	1.37	3.18	1.026·10 ⁻⁴	3.92	5.63	1.820·10 ⁻⁴	0.298
Rb-41	0.138	1.08	2.84	2.521·10 ⁻⁴	90.10	7.8	2.54	1.97	6.382·10 ⁻⁵	7.25	3.50	1.132·10 ⁻⁴	0.556
Rb-42	0.702	3.30	2.39	1.519·10 ⁻⁴	121.9	4.7	0.50	2.40	7.750·10 ⁻⁵	1.42	4.25	1.374·10 ⁻⁴	0.255
Rb-47	0.256	1.05	1.64	1.325·10 ⁻⁴	92.80	4.1	1.37	3.32	1.071·10 ⁻⁴	3.91	5.88	1.900·10 ⁻⁴	0.126
Rb-48	0.127	0.50	1.27	1.260·10 ⁻⁴	91.70	3.9	2.76	3.89	1.257·10 ⁻⁴	7.87	6.90	2.229·10 ⁻⁴	0.090
Rb-49	0.045	0.39	1.85	2.779·10 ⁻⁴	119.4	8.6	7.78	3.03	9.785·10 ⁻⁵	22.2	5.37	1.735·10 ⁻⁴	0.276
Rb-52	0.182	1.33	2.39	2.359·10 ⁻⁴	101.1	7.3	1.92	2.40	7.750·10 ⁻⁵	5.49	4.25	1.374·10 ⁻⁴	0.369
Rb-52	0.361	2.56	1.53	2.294·10 ⁻⁴	53.90	7.1	0.97	3.48	1.123·10 ⁻⁴	2.77	6.17	1.992·10 ⁻⁴	0.182
Rb-59	0.039	0.25	0.68	2.036·10 ⁻⁴	143.1	6.3	8.97	5.02	1.621·10 ⁻⁴	25.6	8.90	2.875·10 ⁻⁴	0.084
Rb-64	0.069	0.19	1.05	8.725·10 ⁻⁵	89.80	2.7	5.07	4.28	1.382·10 ⁻⁴	14.5	7.58	2.451·10 ⁻⁴	0.056
Rb-65	0.31	1.32	2.15	1.380·10 ⁻⁴	91.70	4.3	1.13	2.66	8.596·10 ⁻⁵	3.23	4.72	1.525·10 ⁻⁴	0.195
Rb-79	0.158	0.55	1.74	1.131·10 ⁻⁴	109.5	3.5	2.22	3.18	1.026·10 ⁻⁴	6.33	5.63	1.820·10 ⁻⁴	0.120
Rb-83	0.0954	0.63	1.11	2.133·10 ⁻⁴	104.0	6.6	3.67	4.17	1.347·10 ⁻⁴	10.5	7.39	2.388·10 ⁻⁴	0.123
Rb-84	0.084	1.44	0.3	5.526·10 ⁻⁴	105.2	17.1	4.17	5.91	1.910·10 ⁻⁴	11.9	10.48	3.388·10 ⁻⁴	0.143
Rb-85	1.01	3.43	2.09	1.099·10 ⁻⁴	89.50	3.4	0.35	2.73	8.822·10 ⁻⁴	0.99	4.84	1.565·10 ⁻⁴	0.154

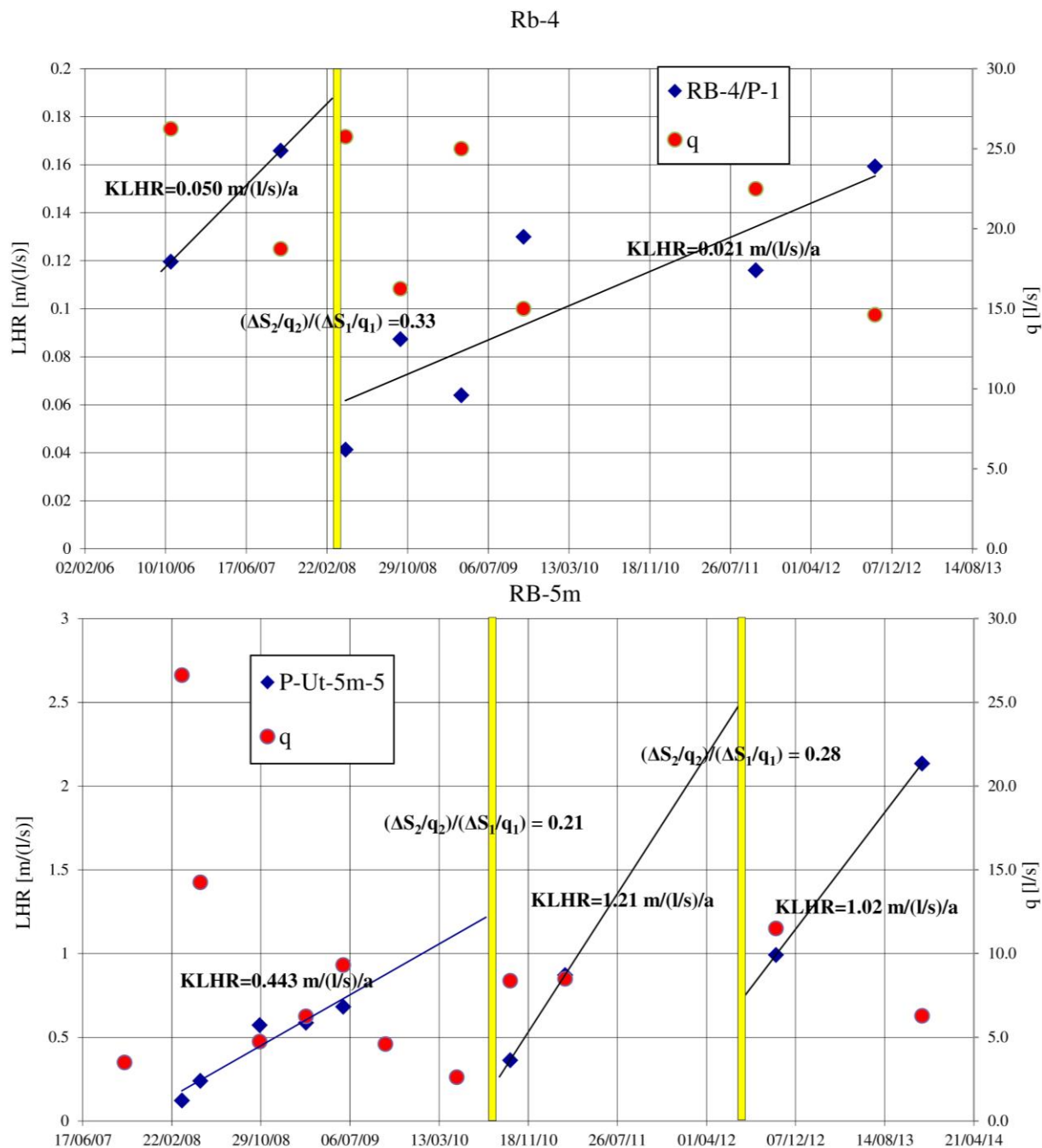
На следећим сликама (Слика 41 – Слика 55) жута поља представљају извршене регенерације, црвени кружићи протоке по дренажу, плави симболи локалне хидрауличке

губитке (LHR). Вредност KLHR је једнака нагибу праве линеарне регресионе функције, ефикасност регенерације се израчунава из вредности LHR непосредно пре и после регенерације (вредности приказане на дијаграмима и у табели (Табела 3).



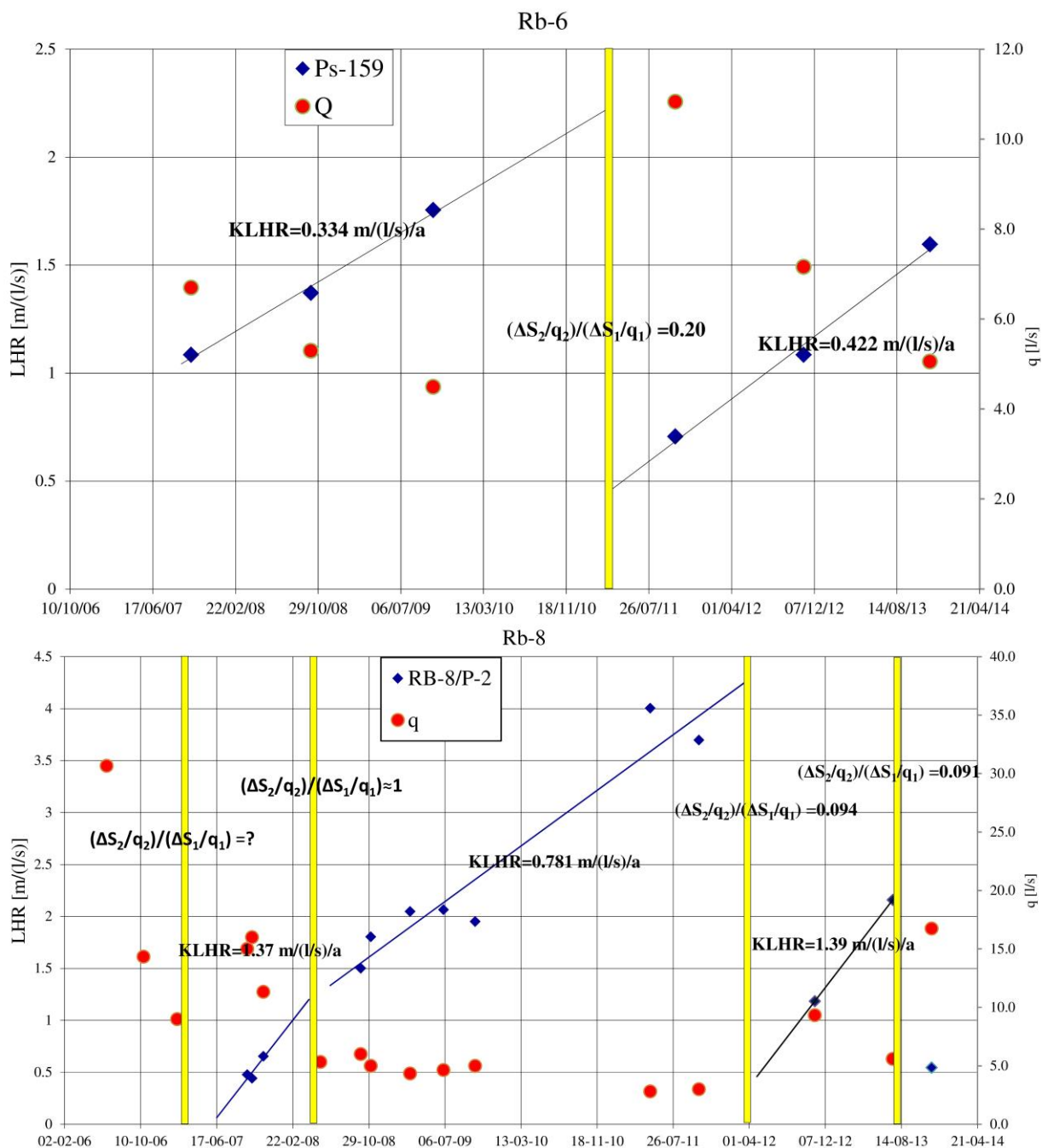
Слика 41 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-2 (нијезометар Ps-338-p) и Rb-3m (нијезометар Rb-3m/p-1)

Код бунара Rb-2 и Rb-3m се може уочити да је проток по дренажу био приближно константан од 2007. до 2012. и да су током тог периода локални хидраулички отпори расли линеарно. Ефекти регенерација се не могу квантификовати за другу регенерацију.



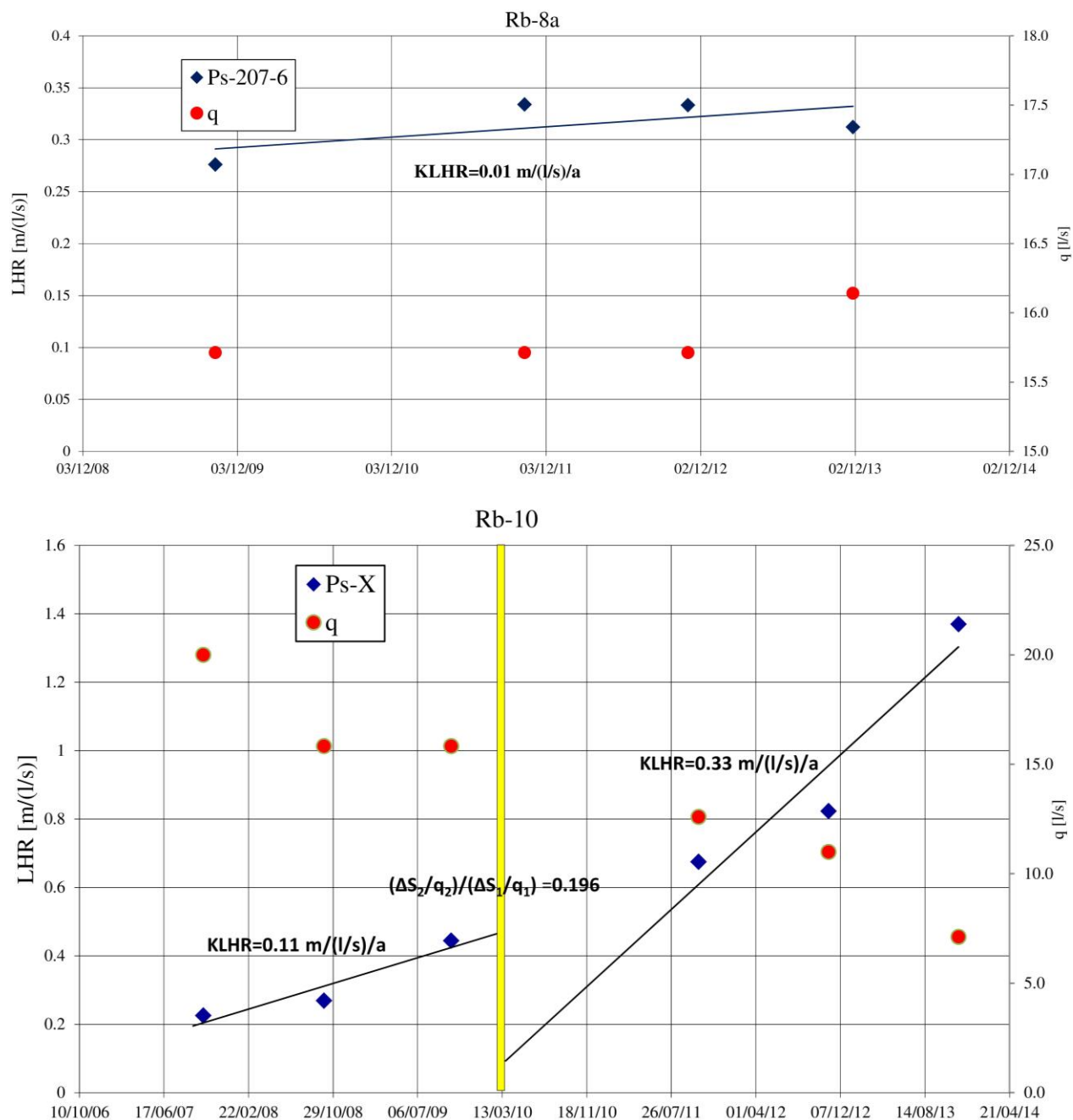
Слика 42 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-4 (нијезометар Rb-4/p-1) и Rb-5m (нијезометар P-Ut-5m-5/p-1)

Код бунара Rb-4 и Rb-5m је линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора јасно уочљив, посебно код бунара Rb-5m у периоду 2008 – 2010. Вредности локалних хидрауличких отпора су изразито мале за бунар Rb-4.



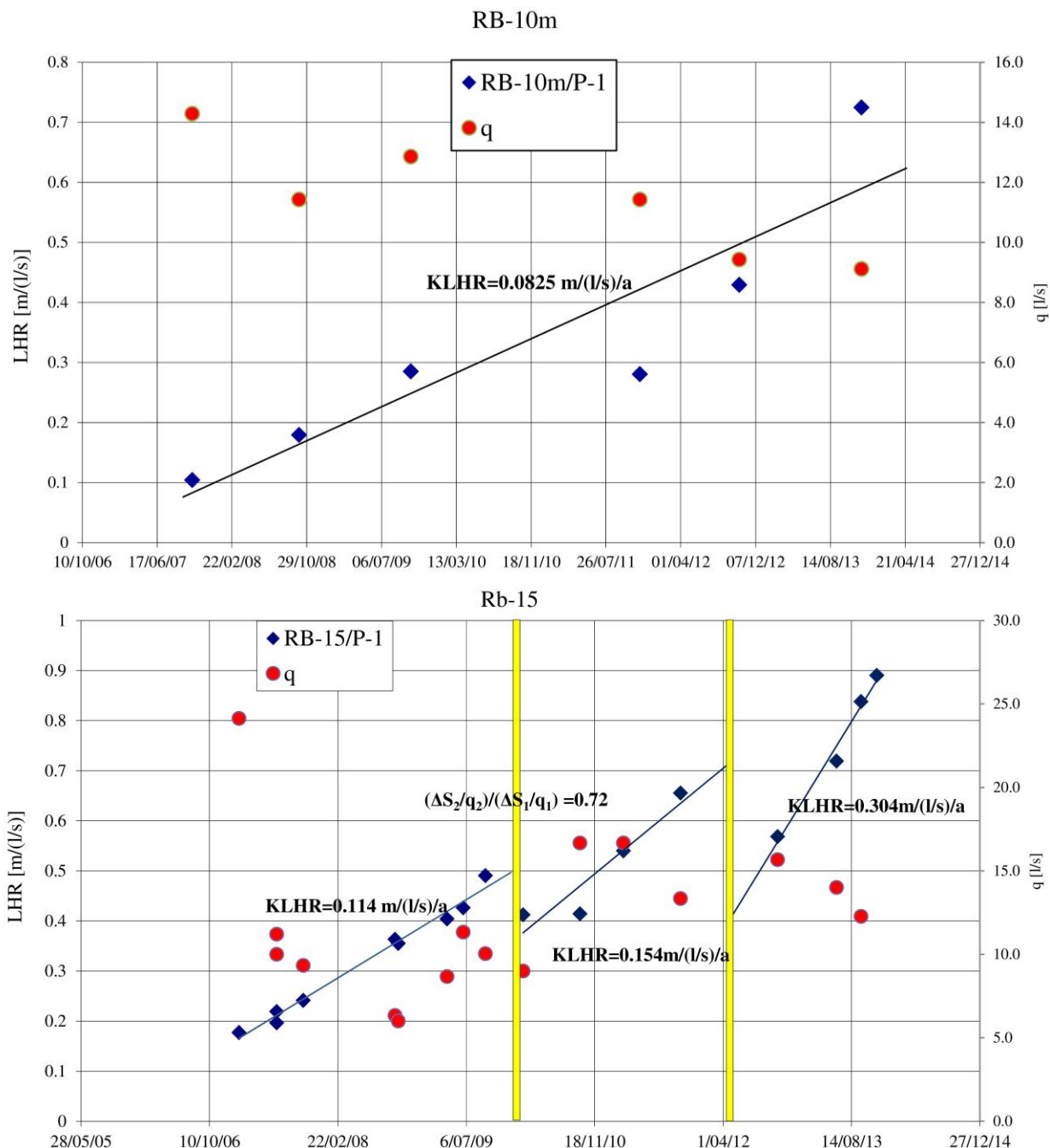
Слика 43 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-6 (пијезометар Ps-159) и Rb-8 (пијезометар Rb-8/p-2)

Код Rb-6 и Rb-8 је линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора јасно уочљив, што је са највећим степеном сигурности установљено код Rb-6 између друге и треће регенерације. Ефекти регенерација се не могу квантификовати за прву регенерацију.



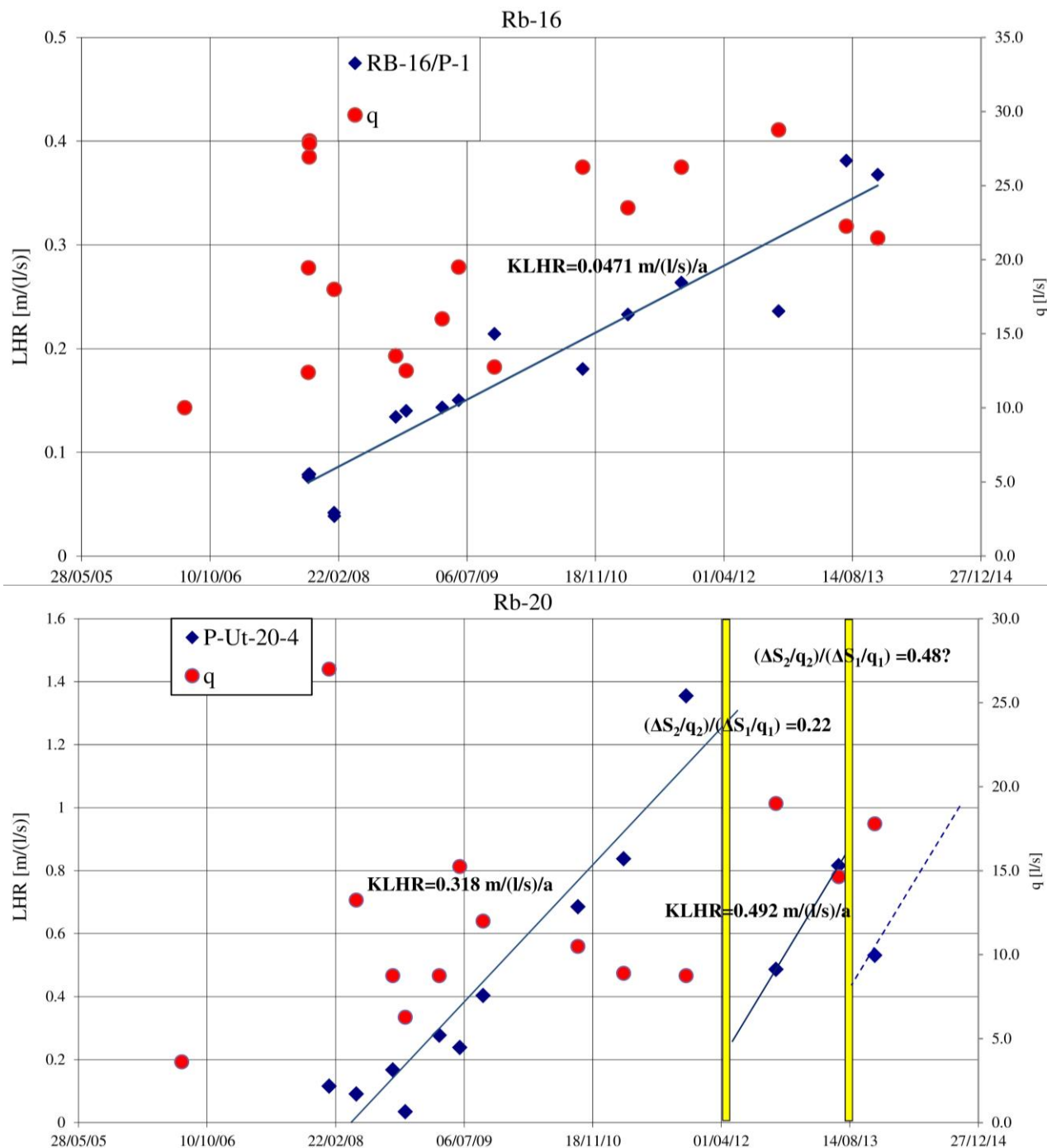
Слика 44 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-8a (нијезометар Ps-207-6) и Rb-10 (нијезометар Ps-X)

Код бунара Rb-8a и Rb-10 је линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора јасно уочљив. Дренови бунара Rb-8a имају ниске вредности локалних хидрауличких отпора.



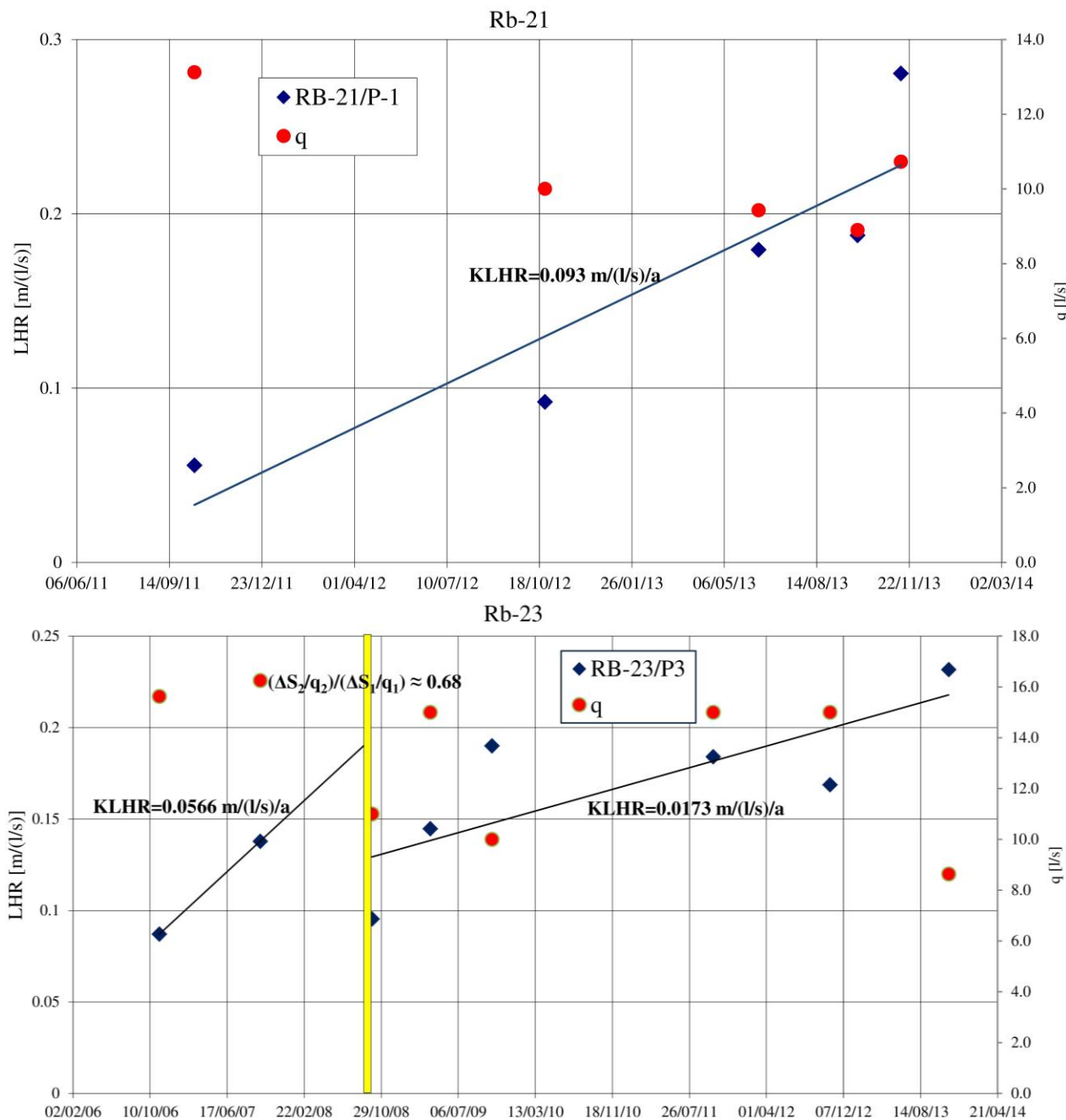
Слика 45 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-10m (нијезометар Rb-10m/p-1) и Rb-15 (нијезометар Rb-15/p-1) – преузето из Mitrinović et al. (2021)

Код бунара Rb-10m и Rb-15 је линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора јасно уочљив, што је са највећим степеном сигурности установљено код бунара Rb-15 захваљујући великом броју мерења у периоду 2006 – 2013.



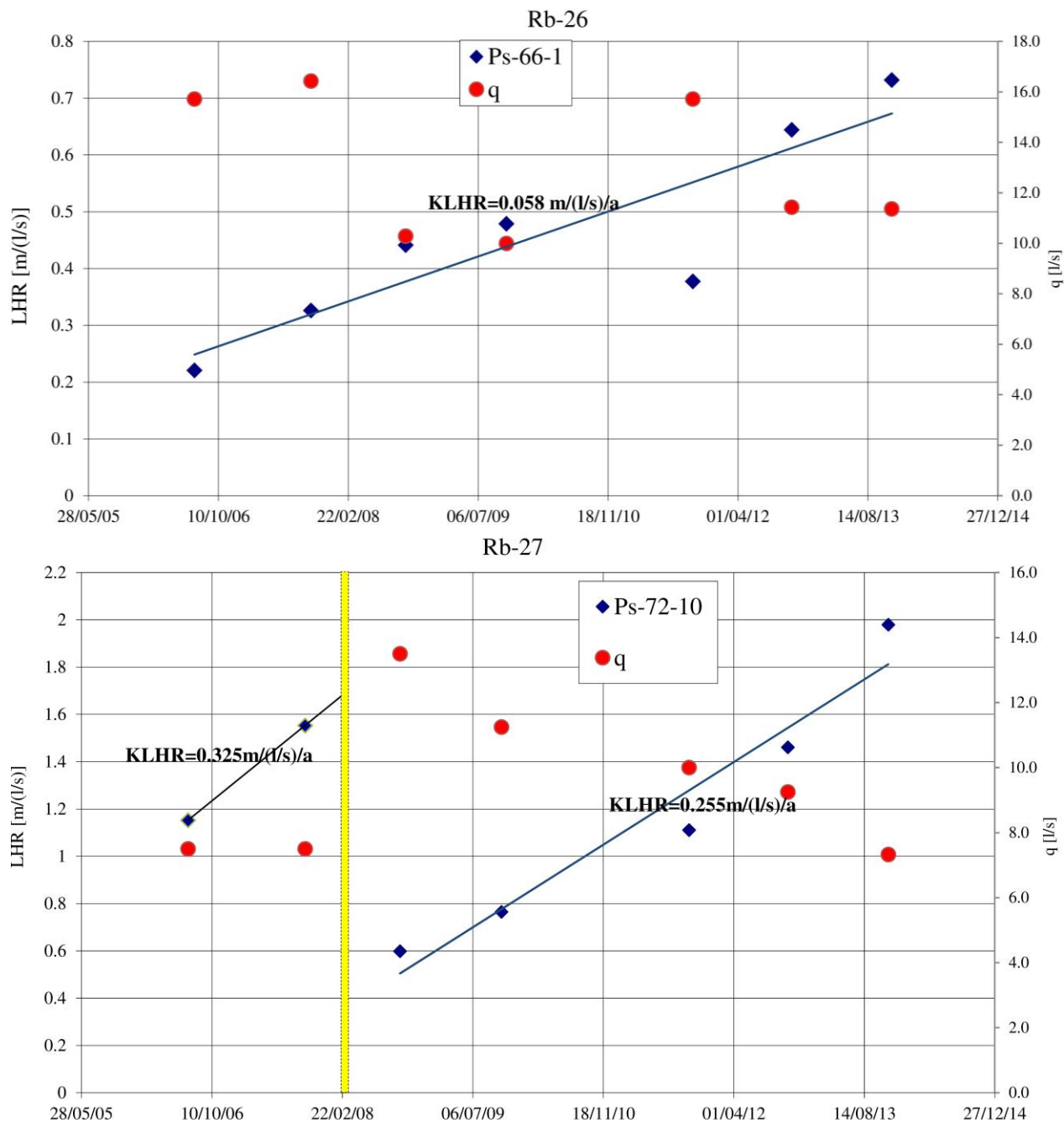
Слика 46 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренау за Rb-16 (пијезометар Rb-16/p-1) и Rb-20 (пијезометар P-Ut-20-4) – преузето из Mitrinović et al. (2021)

За бунаре Rb-16 и Rb-20 је линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора такође јасно уочљив, са високим степеном сигурности, захваљујући великом броју мерења у периоду 2006 – 2013.



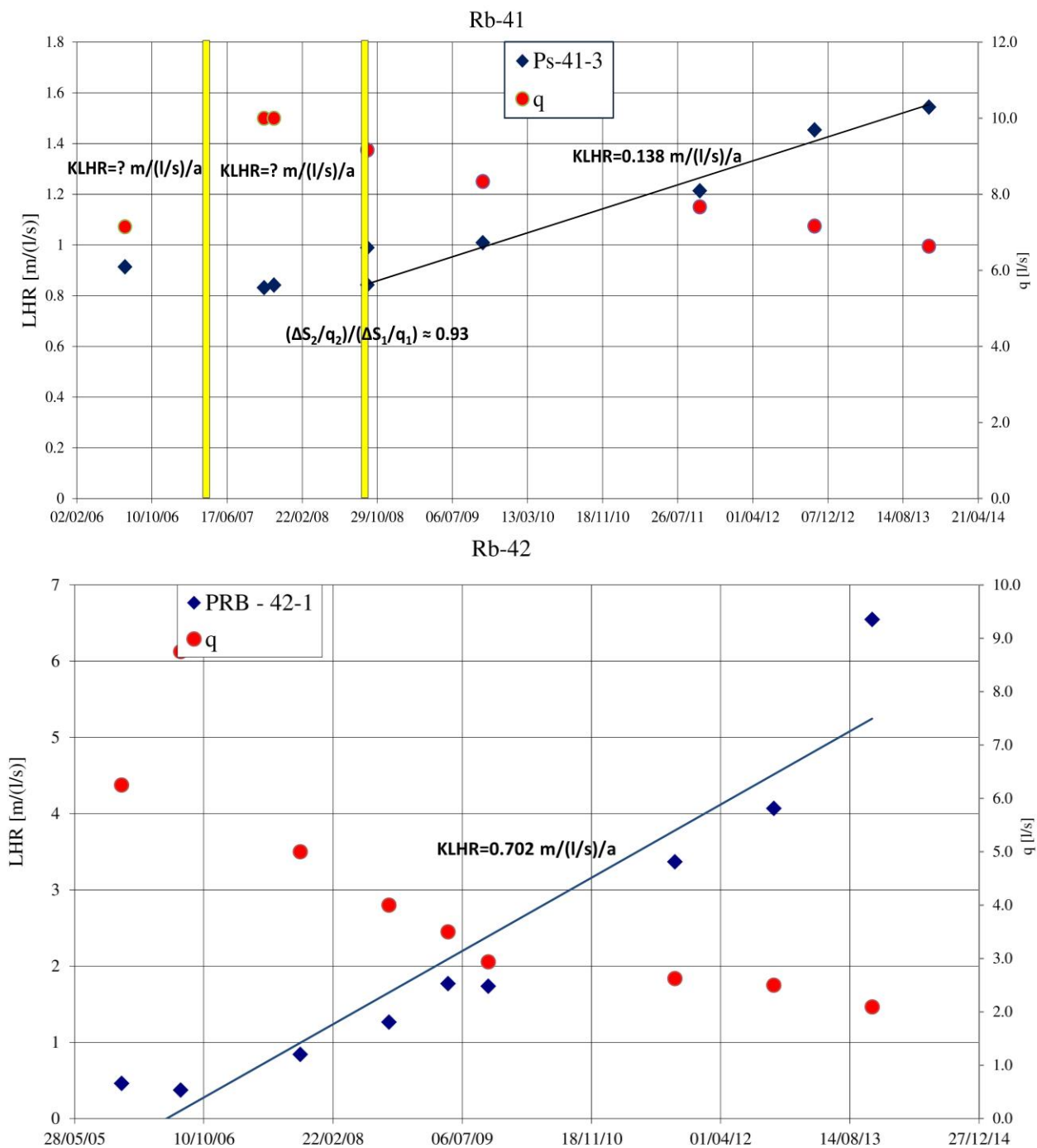
Слика 47 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-21 (нијезометар Rb-21/p-1) и Rb-23 (нијезометар Rb-23/p-3)

За бунаре Rb-21 и Rb-23 линеарна регресија даје прихватљиве резултате, вредности локалних хидрауличких отпора су ниске.



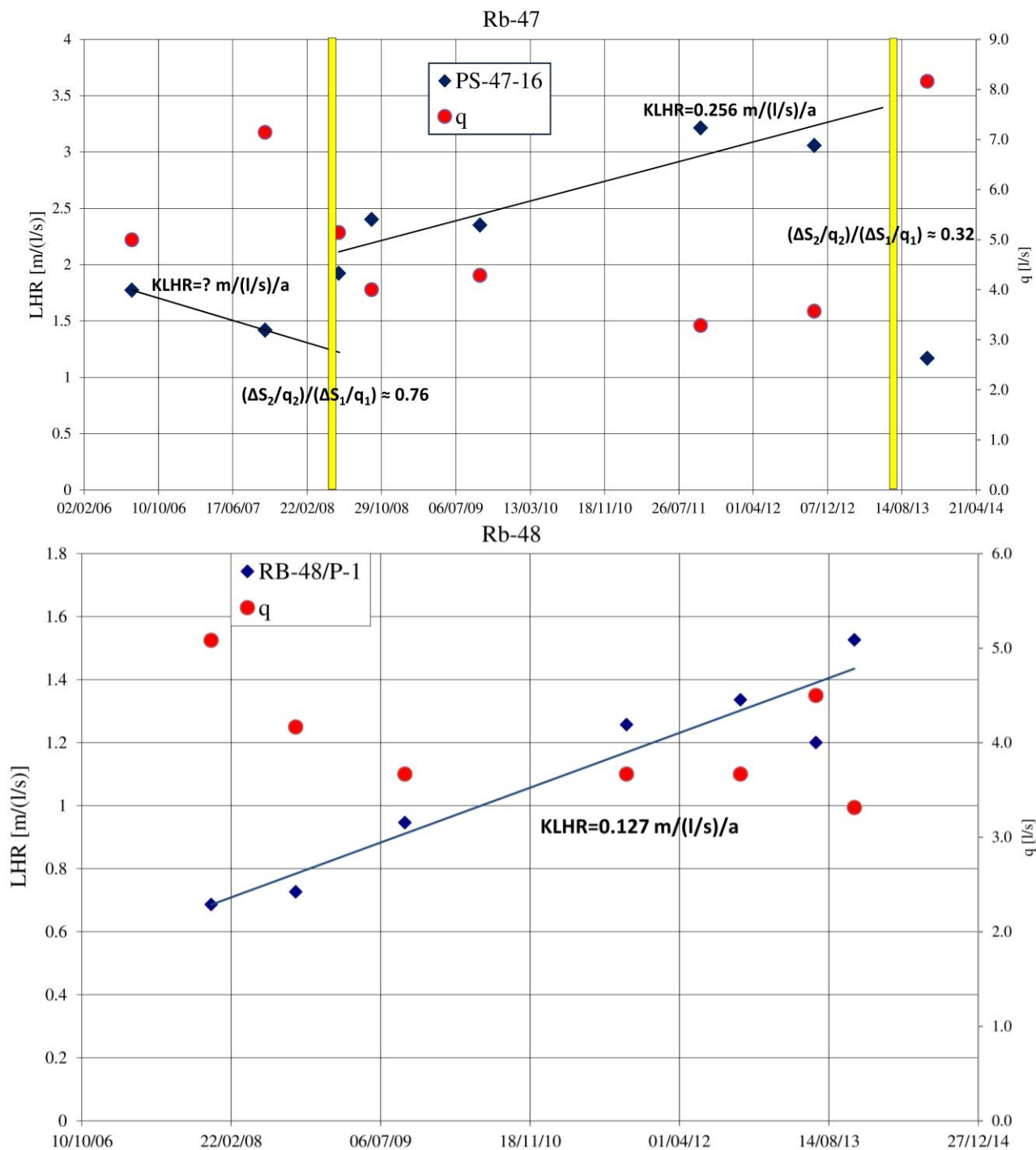
Слика 48 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-26 (нијезометар Ps-66-1) и Rb-27 (нијезометар Ps-72-10)

Код бунара Rb-26 и Rb-27 линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора је такође јасно уочљив.



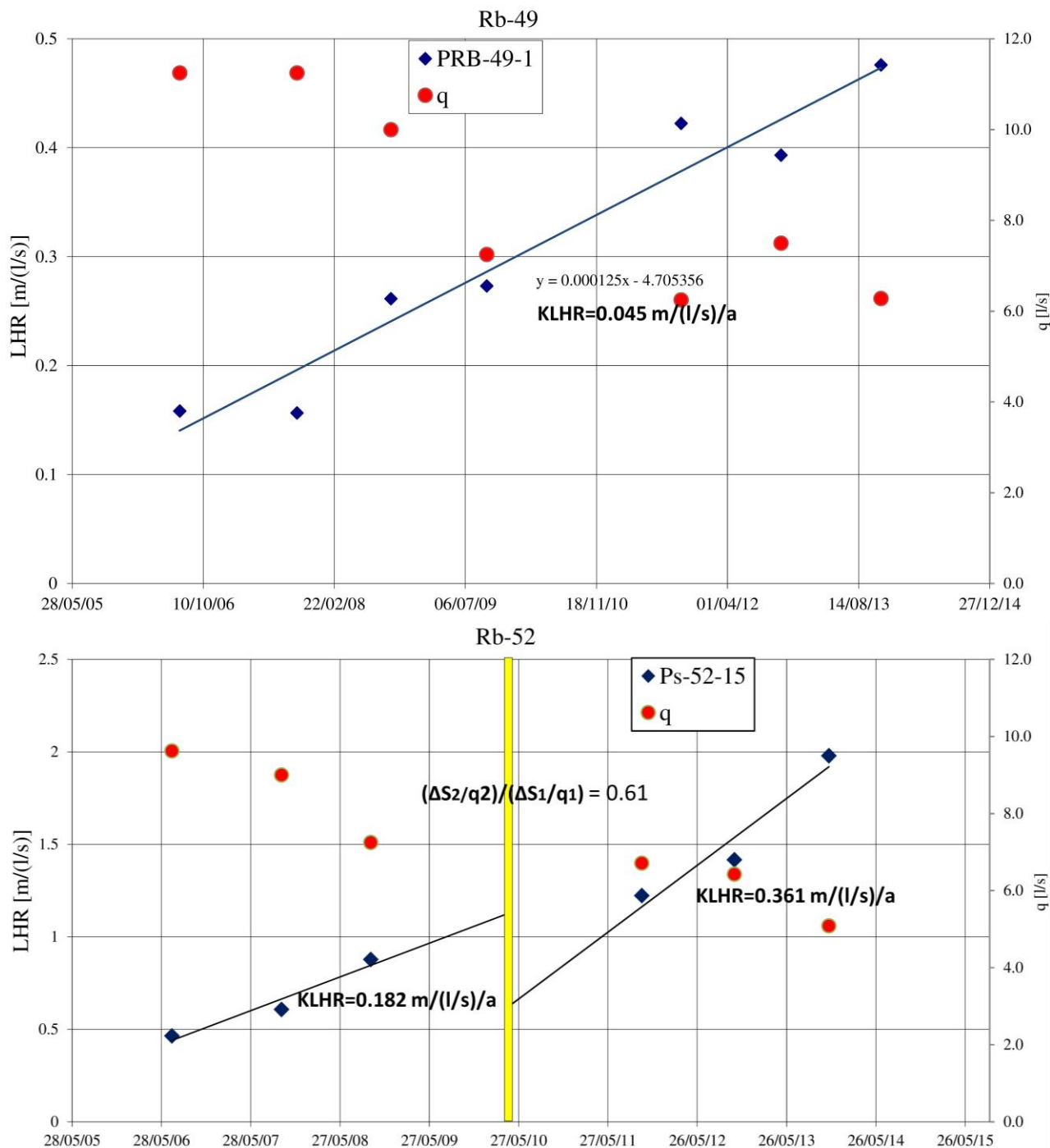
Слика 49 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-41 (нијезометар Ps-41-3) и Rb-42 (нијезометар PRB-42-1)

За бунар Rb-41 је линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора установљен са високим степеном сигурности у периоду 2008 – 2013. Ефекти регенерације се не могу квантификовати за прву регенерацију.



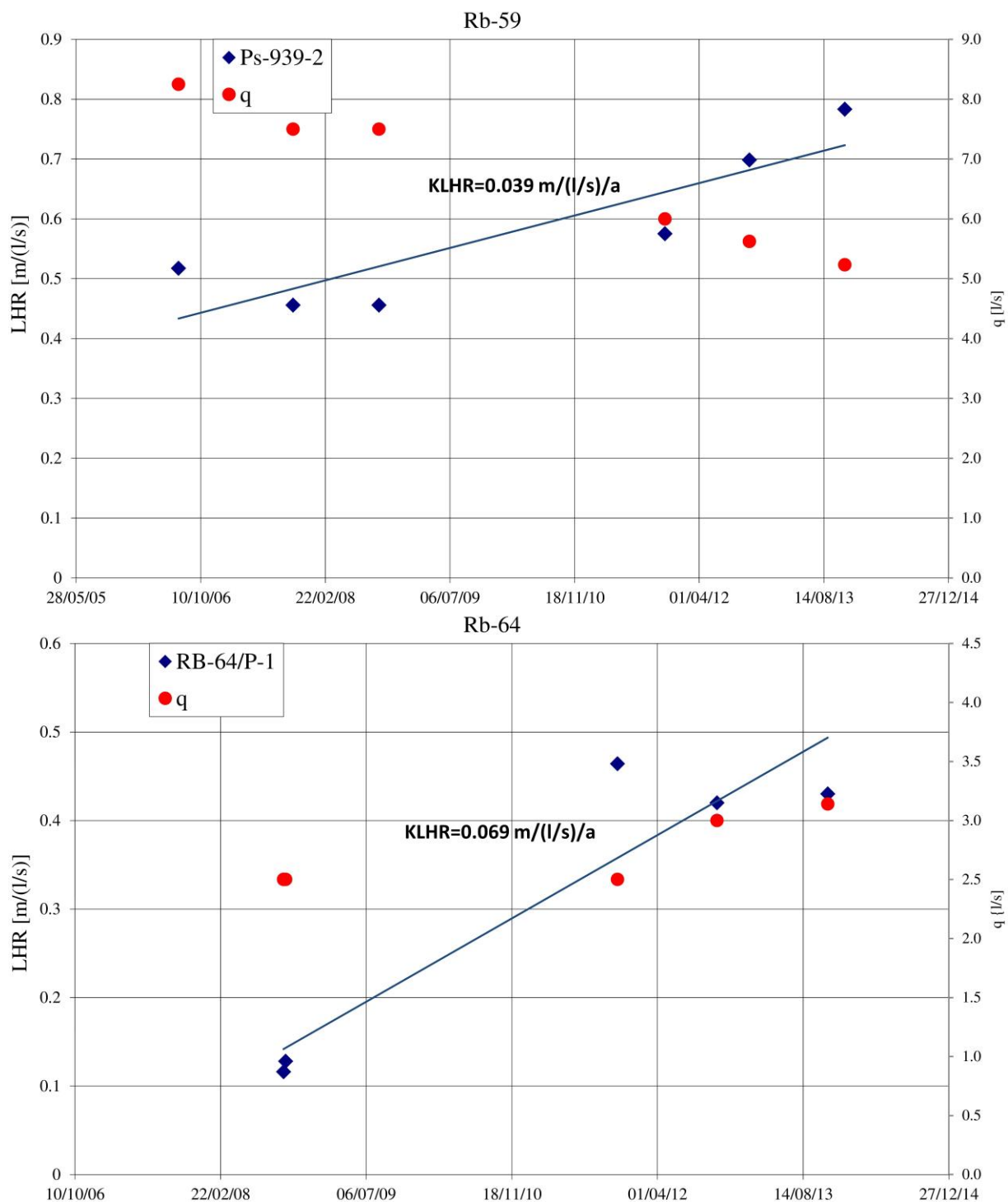
Слика 50 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренау за Rb-47 (нијезометар PS-47-16) и Rb-48 (нијезометар Rb-48/p-1)

Код бунара Rb-47 и Rb-48 линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора је такође јасно уочљив, уз високе вредности локалних хидрауличких отпора.



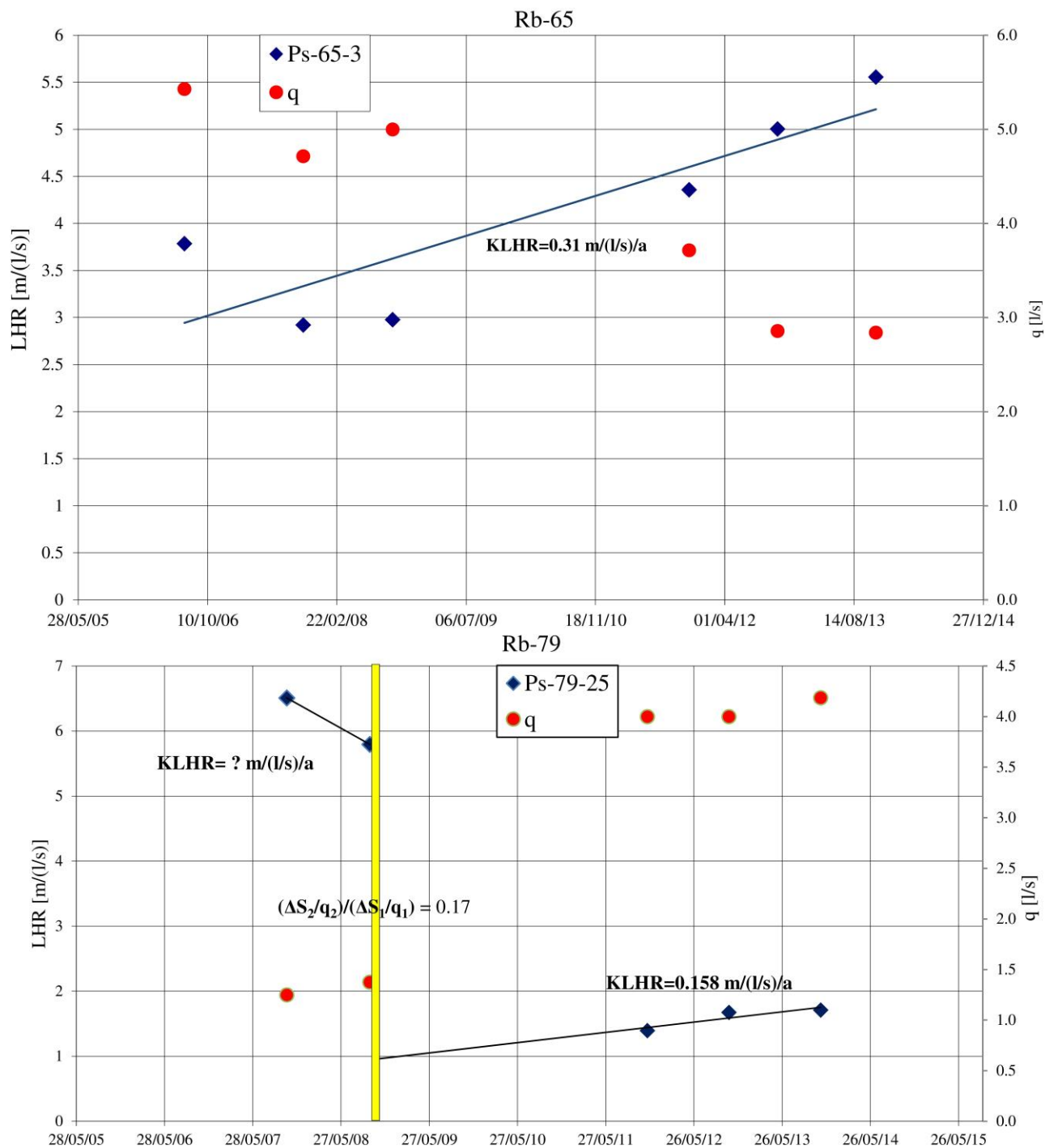
Слика 51 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-49 (пијезометар PRB-49-1) и Rb-52 (пијезометар Ps-52-15)

Код бунара Rb-49 и Rb-52 линеарни тренд раста локалних хидрауличких отпора је такође јасно уочљив, уз високе вредности локалних хидрауличких отпора.



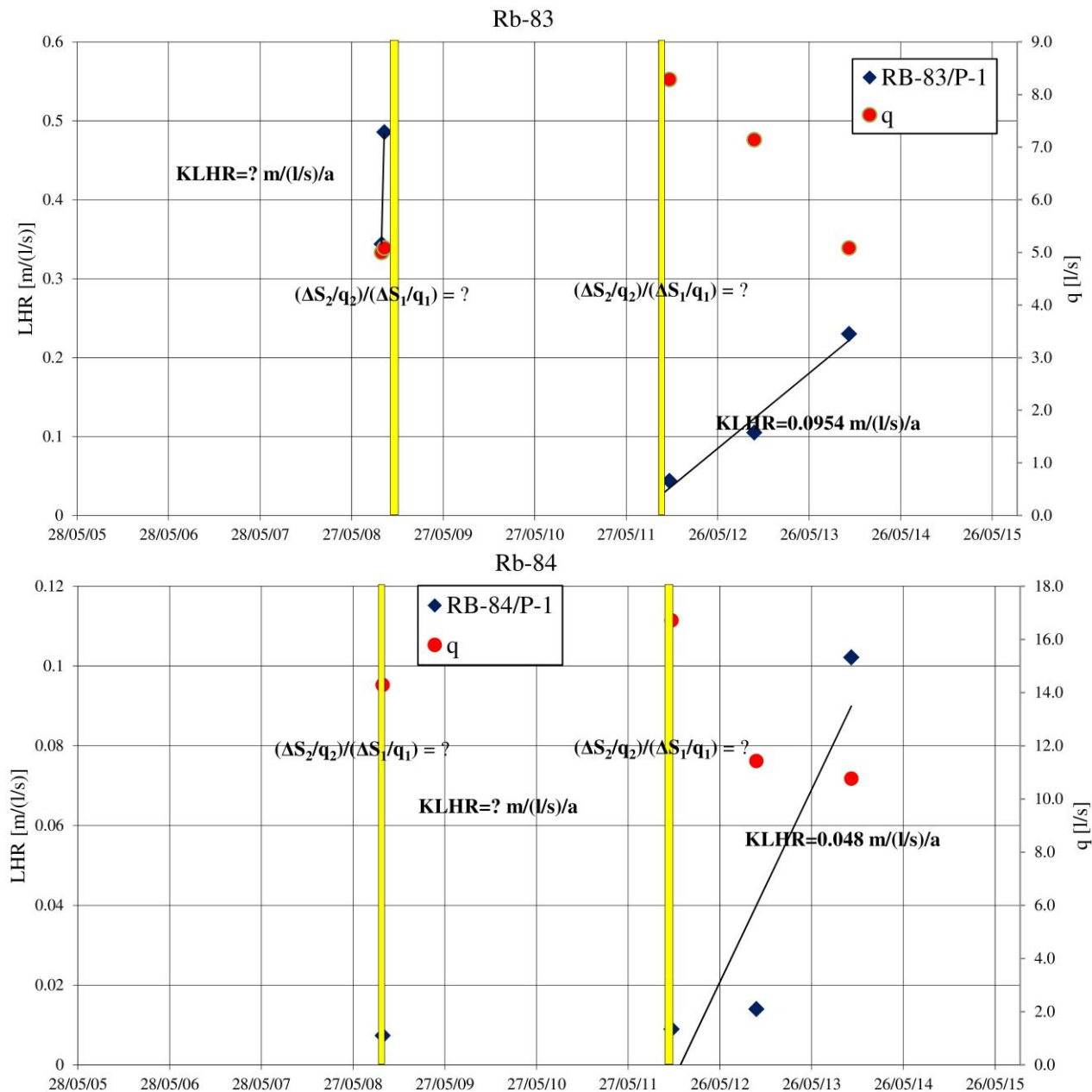
Слика 52 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-59 (тијезометар Ps-939-2) и Rb-64 (тијезометар Rb-64/p-1)

За бунаре Rb-59 и Rb-64 линеарна регресија даје прихватљиве резултате.



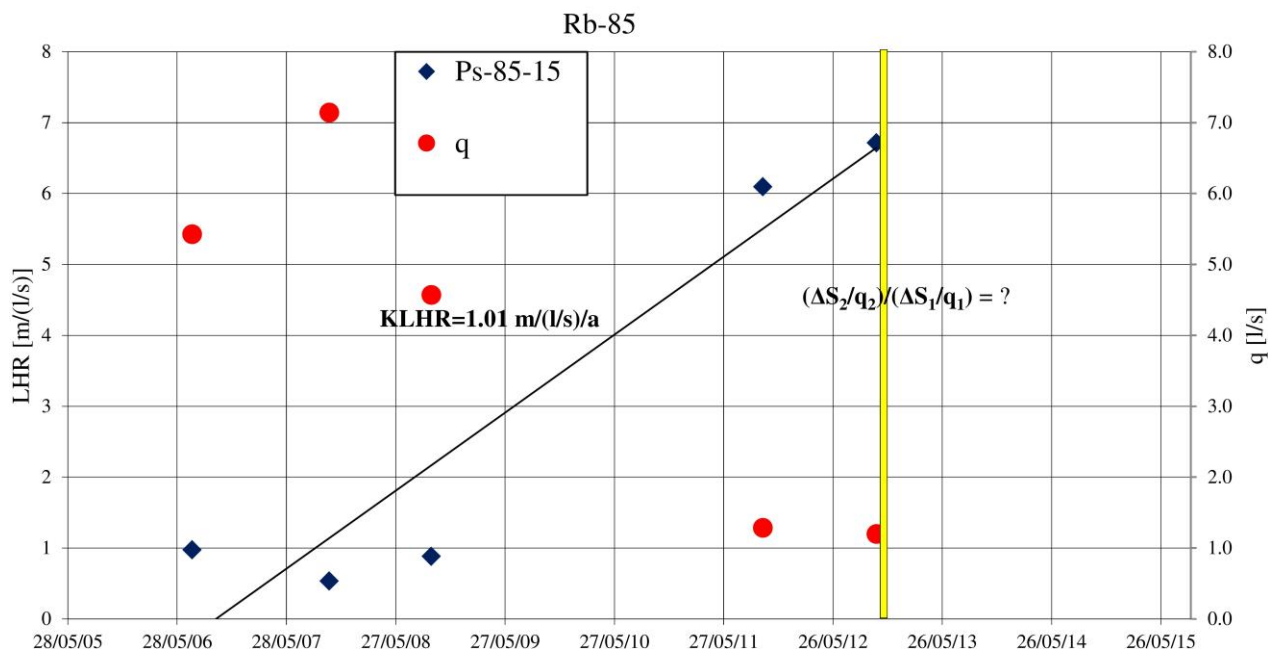
Слика 53 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренажу за Rb-65 (нијезометар Ps-65-3) и Rb-79 (нијезометар Ps-79-25)

За бунаре Rb-65 и Rb-79 линеарна регресија даје прихватљиве резултате, при чему је број расположивих података за Rb-79 минималан.



Слика 54 Промена LHR током времена, KLHR и протоци по дренау Rb-83 (пијезометар Rb-83/p-1) и Rb-84 (пијезометар Rb-84/p-1)

За бунаре Rb-83 и Rb-84 линеарна регресија даје прихватљиве резултате, при чему је број расположивих података минималан, а ефекти регенерација се не могу квантификовати.



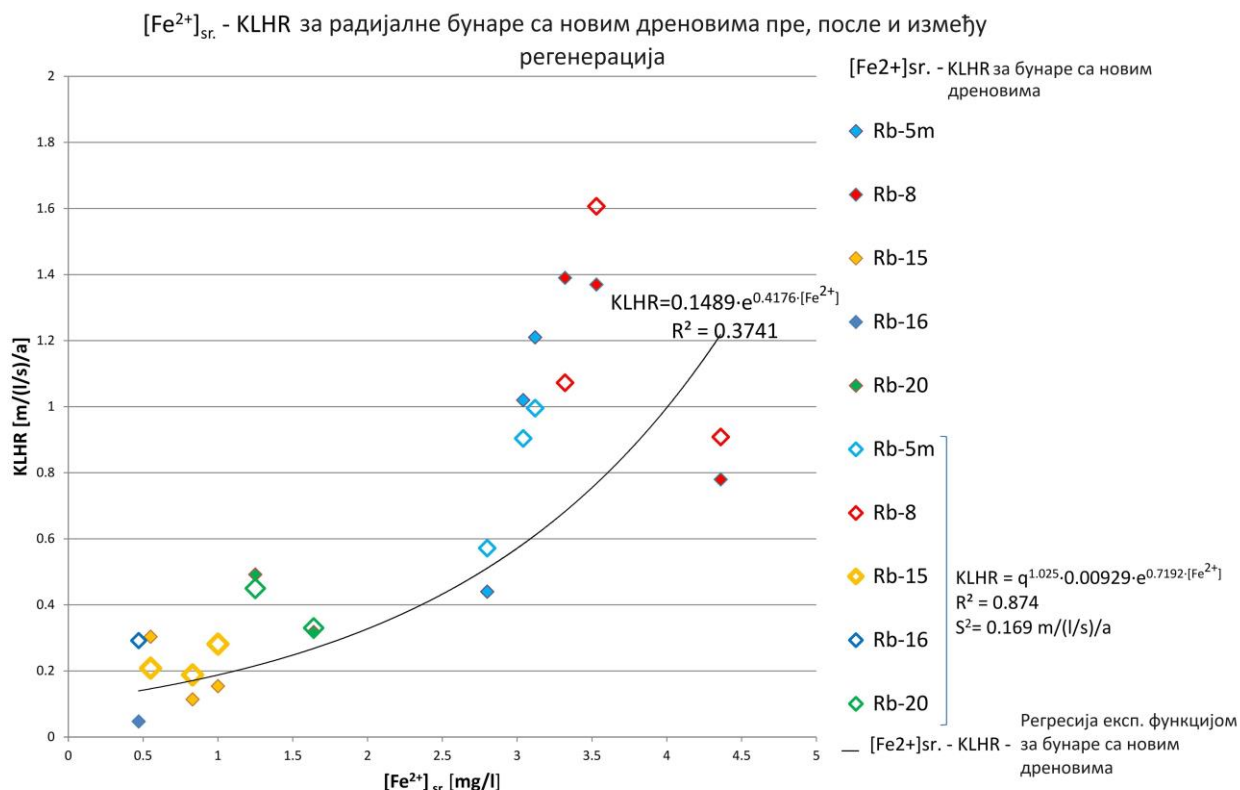
Слика 55 Промена LHR током времена, $KLHR$ и протоци по дренажу за Rb-85 (пијезометар Ps-85-15)

За бунар Rb-85 линеарна регресија даје прихватљиве резултате, а ефекти регенерација се не могу квантификовати. Вредности локалних хидрауличких губитака су врло високе.

Презентирани резултати указују на то да је у случају да се протицај по дренажу не мења значајно брзина колмирања константна и локални хидраулички отпори расту линеарно, што је посебно уочљиво за следеће бунаре на одговарајућим сликама: Rb-3m (Слика 41), Rb-5m (Слика 42), Rb-6 и Rb-8 (Слика 43), Rb-10m и Rb-15 (Слика 45), Rb-16 и Rb-20 (Слика 46), Rb-41 (Слика 49), Rb-47 и Rb-48 (Слика 50), Rb-49 и Rb-52 (Слика 51). Свих пет бунара са новим дренажима се јасно истичу са линеарном трендом LHR .

5.1.2 Резултати регресионе анализе $KLHR$ – корелације са концентрацијом двовалентног гвожђа и редокс потенцијалом

Зависност $KLHR$ од концентрације раствореног двовалентног гвожђа и протока по дренажу за 12 периода рада 5 бунара са новим, прохромским дренажима (Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20) и доминантним биохемијским механизмом колмирања, је приказана на следећој слици (Слика 56).



Слика 56 Зависност KLHR од концентрације раствореног двовалентног гвожђа и протока по дренажу за бунаре са новим дренажима, са одговарајућим коефицијентом детерминације – преузето из Mitrinović et al. (2021)

Најбоље поклапање са теренским мерењима, када је у питању регресија функцијом само концентрације двовалентног гвожђа (у mg/dm³), добијено је за експоненцијалну функцију – једначина (73) и Слика 56.

$$KLHR = 0,1489 \cdot e^{0,4176 \cdot [Fe^{2+}]_{sr}} \quad (73)$$

, при чему вредност коефицијента детерминације износи 0,374. Због тога што већи протоци доводе до већег дотока хранљивих материја и јона од којих настају минералне инкрустације, већи проток при истим осталим условима би требао да одговара већем KLHR-у. Додавањем зависности и од протока по дренажу q (у l/s) добијено је добро поклапање, изразито боље од свих других корелација, у форми експоненцијалне функције концентрације двовалентног гвожђа помножене са степеном функцијом протока по дренажу, при чему је степен ове функције приближно један – једначина (74) и Слика 56:

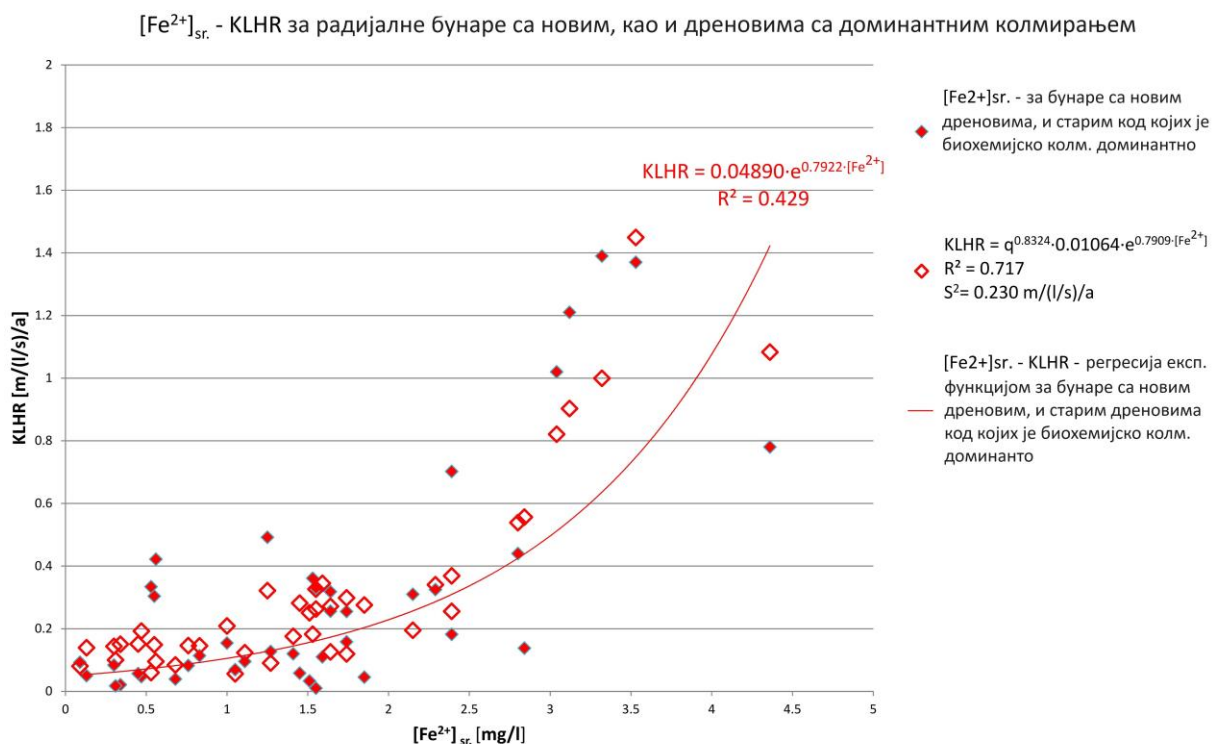
$$KLHR = q^{1,025} \cdot 0,00929 \cdot e^{0,7192 \cdot [Fe^{2+}]} \quad (74)$$

Вредност коефицијента детерминације износи 0,874, што је висока и задовољавајућа вредност с обзиром на ниво несигурности при одређивању вредности параметара. Резултати

добијени применом регресионе једначине су приказани празним симболима, а измерене вредности пуним на слици (Слика 56). Једначина (75) представља зависност од улазне брзине и концентрације раствореног двовалентног гвожђа.

$$KLHR = v^{1.025} \cdot (1000 \cdot l \cdot d \cdot \pi)^{1.025} \cdot 0.00929 \cdot e^{0.7192 \cdot [Fe^{2+}]} \quad (75)$$

Испитивање зависности $KLHR$ од редокс потенцијала (у односу на стандардну водоникову електроду) за 12 периода рада 5 бунара са новим, прохромским дренажима је дало знатно лошије резултате и ни једна довољно задовољавајућа корелација није остварена.



Слика 57 Зависност $KLHR$ од концентрације раствореног двовалентног гвожђа и протицаја по дренажу за бунаре са колмирањем као доминантним узроком старења дренажа, са одговарајућим коефицијентом детерминације – преузето из Mitrinović et al. (2021)

Зависност $KLHR$ од протока по дренажу и концентрације раствореног двовалентног гвожђа добијена регресијом за све бунаре са колмирањем као доминантним узроком старења дренажа са је дата једначином (76). Вредност коефицијента детерминације износи 0,717, што је такође висока и задовољавајућа вредност. Зависност $KLHR$ од концентрације раствореног двовалентног гвожђа и протока по дренажу за 41 период рада свих 29 издвојених бунара са, према претпоставци, доминантним биохемијским механизмом колмирања је приказана на слици (Слика 57).

$$KLHR = q^{0.8324} \cdot 0.01064 \cdot e^{0.7909 \cdot [Fe^{2+}]} \quad (76)$$

Због тога што су код бунара са старим дренама веома велике разлике у пропустљивости између дрена и дуж једног дрена, тешко је направити везу између улазних брзина и протока по дрена, па није дата једначина која би одговарала једначини (75).

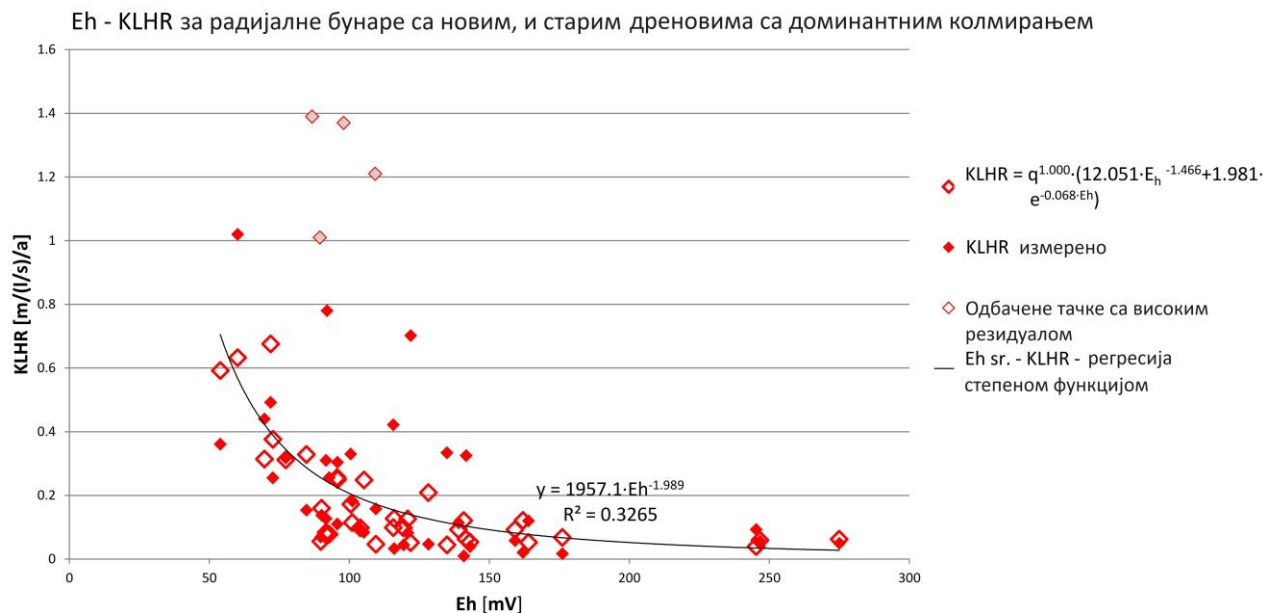
Када је у питању регресија функцијом само концентрације двовалентног гвожђа, најбоље поклапање је такође добијено за експоненцијалну функцију, при чему вредност коефицијента детерминације износи 0,429 – једначина (77):

$$KLHR = 0.0489 \cdot e^{0.7922 \cdot [Fe^{2+}]} \quad (77)$$

Зависност $KLHR$ од редокс потенцијала (у односу на стандардну водоникову электроду) за 37 издвојених периода рада 29 бунара са, према претпоставци, доминантним биохемијским механизмом колмирања је приказана на слици (Слика 58). Четири периода су одбачена због тога што су резидуали били превелики, што се при том није могло исправити ни једном комбинацијом експоненцијалне и степене функције. Процењено је да је најбоље поклапање са подацима добијеним на основу мерења на терену, барем у смислу тренда наглог пораста $KLHR$ са падом редокс потенцијала испод 150 mV, добијено за функцију дату једначином (78).

$$KLHR = q^{1.000} \cdot (12.051 \cdot Eh^{-1.466} + 1.981 \cdot e^{-0.0680 \cdot Eh}) \quad (78)$$

Поклапање са измереним вредностима је знатно лошије за регресионе функције са редокс потенцијалом него са раствореним двовалентним гвожђем. Могући разлог је директна повезаност кинетике процеса колмирања бунара са концентрацијом раствореног двовалентног гвожђа, док редокс потенцијал поред односа између концентрације двовалентног и тровалентног гвожђа зависи и од других парова јона у нижем и вишем оксидационом стању, па је његова веза са брзином колмирања мање изражена.



Слика 58 Зависност KLHR од редокс потенцијала у односу на стандардну водоничну электроду и протицаја по дренажу са регресионим функцијама и одговарајућим коефицијентима детерминације – преузето из Mitrinović et al. (2021)

Регресиона функција у којој фигурише само редокс потенцијал са највишим коефицијентом детерминације од 0,3265 је дата једначином (79):

$$KLHR = 1957,1 \cdot Eh^{-1,989} \quad (79)$$

Регресиона анализа не даје сасвим задовољавајуће резултате, мада се из расподеле вредности KLHR у односу на редокс потенцијал може закључити да се изнад 150 mV јављају ниске вредности KLHR, да се између 85 и 150 mV вредности KLHR могу кретати између 0,03 и 1,4 m/(l/s)/a, док су испод 85 mV све вредности изнад 0,25 m/(l/s)/a.

5.1.3 Ефекти регенерације

Током периода од 2006. до 2013., за који постоје потребни подаци (параметри значајни за ефекте регенерација су дати у табели (Табела 4), извршено је 27 регенерација за које је могла да се утврди вредност y_{reg} , од чега је 13 извршено на бунарима из групе са доминантним колмирањем (од тога 7 на бунарима са новим дренажима – подебљан текст у табели).

Ефекти 27 регенерација (кроз параметре значајне за ефекте регенерација) изведених током периода од 2006. до 2013., за које постоје потребни подаци, су дати у табели. Q_1 и Q_2 су протоци бунара пре и после регенерације, респективно, q_1 и q_2 су протоци по дренажу пре и после регенерације, q_{1sr} и q_{2sr} су средњи протоци по дренажу током периода пре и после регенерације, респективно.

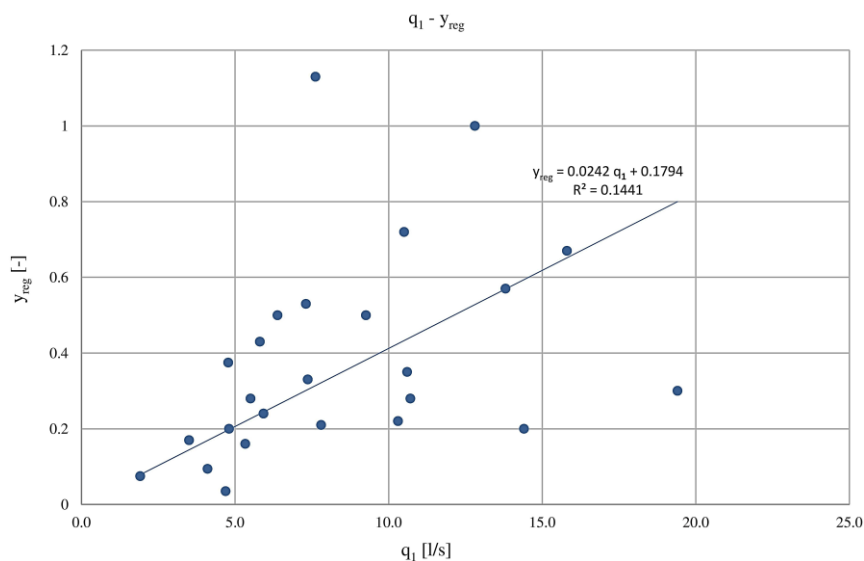
*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

Табела 4 Параметри значајни за ефекте 27 регенерација изведених током периода од 2006. до 2013., за које постоје потребни подаци

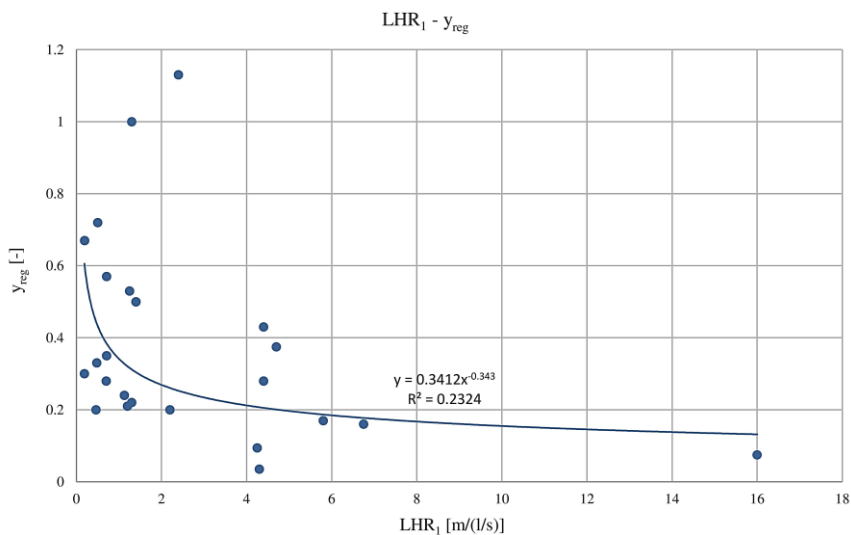
Бунар	Датум	ПРЕ РЕГЕНЕРАЦИЈЕ									ПОСЛЕ РЕГЕНЕРАЦИЈЕ						Y _{reg} = LHR ₂ / LHR ₁				
		Q ₁ [l/s]	q ₁ [l/s]	LHR ₁	KLHR ₁	q _{1sr} [l/s]	[Fe ²⁺] [mg/l]	Eh [mV]	Број прет. рег.	Бр. др.	Q ₂ [l/s]	q ₂ [l/s]	LHR ₂	KLHR ₂	q _{2sr} [l/s]	Бр. др.		Q ₂ /Q ₁	q ₂ /q ₁	q _{2sr} / q _{1sr}	KLHR ₂ / KLHR ₁
Rb-15	28-12-09	41	13.7	0.5	0.114	10.5	0.83	139	0	3	76	25.3	0.36	0.154	13.9	3	1.85	1.85	1.32	1.35	0.72
Rb-15	20-04-12	25	8.3	0.71	0.154	13.8	1.0	84.7	1	3	49	16.3	0.39	0.304	13.5	3	1.96	1.96	0.98	1.97	0.57
Rb-19-1	30-04-09	61	8.7	0.48	0.0394	7.36	2.0	123.2	2	7	124	20.7	0.16	0.1325	8	6	2.03	2.37	1.09	3.36	0.33
Rb-23	29-09-08	125	15.6	0.195	0.0566	15.8	0.45	246.7	4	8	88	11.0	0.13	0.0173	11.7	8	0.71	0.70	0.74	0.31	0.67
Rb-29	16-06-10	15	1.9	16	2.87	1.91	1.61	95.5	2	8	57	14.3	0.3	0.856	4.8	4	3.8	7.60	2.51	0.30	0.019
Rb-2m	29-12-11	19	4.8	0.71	0.014	10.6	0.97	170.3	5	4	72	24.0	0.32	0.078	21.6	3	3.79	5.05	2.04	5.57	0.35
Rb-3	01-07-10	13	4.3	6.75	1.87	5.33	1.41	125	5	3	10.5	5.3	1.1	1.43	4.2	2	0.81	1.21	0.79	0.76	0.16
Rb-4	19-04-08	164	20.5	0.188	0.05	19.4	0.13	275	2	8	206	25.8	0.062	0.021	18.9	8	1.26	1.26	0.97	0.42	0.33
Rb-5m	20-08-10	24	6.0	1.2	0.443	7.8	2.8	69.7	0	4	95	23.8	0.2	1.21	8.5	4	3.96	3.96	1.09	2.73	0.21
Rb-5m	27-06-12	17	4.3	0.7	1.21	10.7	3.12	109.2	1	4	52	13.0	2.5	1.02	8	4	3.06	3.06	0.75	0.84	0.28
Rb-6	01-03-11	24	2.4	2.2	0.334	4.8	0.53	134.9	4	10	33	5.5	0.45	0.422	7.7	6	1.38	2.29	1.60	1.26	0.2
Rb-52	16-04-10	17	2.1	1.25	0.182	7.3	2.39	101.1	2	8	56	8.0	0.66	0.361	6.1	7	3.29	3.76	0.84	1.98	0.54
Rb-53	30-04-10	10.5	2.1	1.4	0.292	9.26	3.1	113.2	3	5	16.8	3.4	0.7	0.665	4.6	5	1.6	1.60	0.50	2.28	0.5
Rb-79	23-09-08	28	3.5	5.8	0.01	3.5	1.74	109.5	2	8	11	1.4	1	0.158	3.4	8	0.39	0.39	0.97	15.80	0.17
Rb-8	22-05-08	16	5.3	1.3	1.37	12.8	3.53	98	1	3	18	6.0	1.3	0.781	4.5	3	1.125	1.13	0.35	0.57	1
Rb-8	23-03-12	5	1.7	4.25	0.781	4.1	4.36	92.06	2	3	69	23.0	0.4	1.39	7.5	3	13.8	13.80	1.83	1.78	0.094
Rb-9	01-07-10	9	4.5	4.4	0.738	5.5	2.8	83	2	2	6.3	6.3	1.25	0.508	5.9	1	0.7	1.40	1.07	0.69	0.28
Rb-10	26-02-10	31	5.2	0.46	0.11	14.4	1.59	95.7	7	6	59	11.8	0.09	0.33	10.2	5	1.9	2.28	0.71	3.00	0.2
Rb-11-1	01-07-08	50	6.3	1.4	0.022	6.38	2.82	85	2	8	45	11.3	0.7	0.258	7.2	4	0.9	1.80	1.13	11.73	0.5
Rb-12-3	16-04-08	40	8.0	1.13	0.01	5.92	2.1	110	3	5	44	22.0	0.27	0.181	12	2	1.1	2.75	2.03	18.10	0.24
Rb-81	20-11-09	42	7.0	4.3	0.01	4.69	1.01	105.3	1	6	60	15.0	0.15	0.556	6.1	4	1.43	2.14	1.30	55.60	0.035
Rb-90	12-11-10	28	4.0	4.4	0.652	5.8	2.27	113	1	7	49	9.8	1.9	0.679	5.4	5	1.75	2.45	0.93	1.04	0.43
Rb-13	06-01-11	55	7.9	0.085	0.0122	7	-	-	5	7	112	16.0	0.06	0.0346	8.1	7	2.04	2.04	1.16	2.84	0.71
Rb-13-1	01-07-11	13.5	3.4	4.7	0.694	4.77	1.09	92	3	4	12.5	6.3	1.8	0.638	4.7	2	0.93	1.85	0.99	0.92	0.375
Rb-20	05-06-12	12	3.0	1.3	0.318	10.3	1.64	77.3	0	4	85	21.3	0.29	0.492	16.8	4	7.08	7.08	1.63	1.55	0.22
Rb-40	05-06-08	20.5	5.1	2.4	0.648	7.61	0.94	168.6	3	4	21	5.3	2.7	0.128	4.2	4	1.02	1.02	0.55	0.20	1.13
Просек																	2.45	2.95	1.15	5.27	0.40

Од свих испитаних корелација, слаба линеарна корелација је установљена између протицаја по дренажу и y_{reg} (Слика 59 (а)) и нешто боља корелација степеном функцијом између локалних хидрауличких губитака пре регенерације и y_{reg} (Слика 59 (б)). Известан степен корелације постоји у овом случају вероватно због тога што већа површина дренажа захваћена колматацијама значи и да ће при истом степену успешности уклањања наслага доћи и до већег релативног повећања условно „чисте“ површине и сходно томе до већег релативног смањења локалних хидрауличких отпора. При томе већа површина дренажа захваћена колматацијама одговара већим вредностима локалних хидрауличких губитака пре регенерације, а оне нижим вредностима протока по дренажу.

а



б



Слика 59 а) Корелација линеарном функцијом између протицаја по дренажу пре регенерације и y_{reg} ; б) Корелација степеном функцијом између локалних хидрауличких губитака пре регенерације и y_{reg}

5.1.4 Критичне брзине и протоци по дренау у односу на концентрацију двовалентног гвожђа

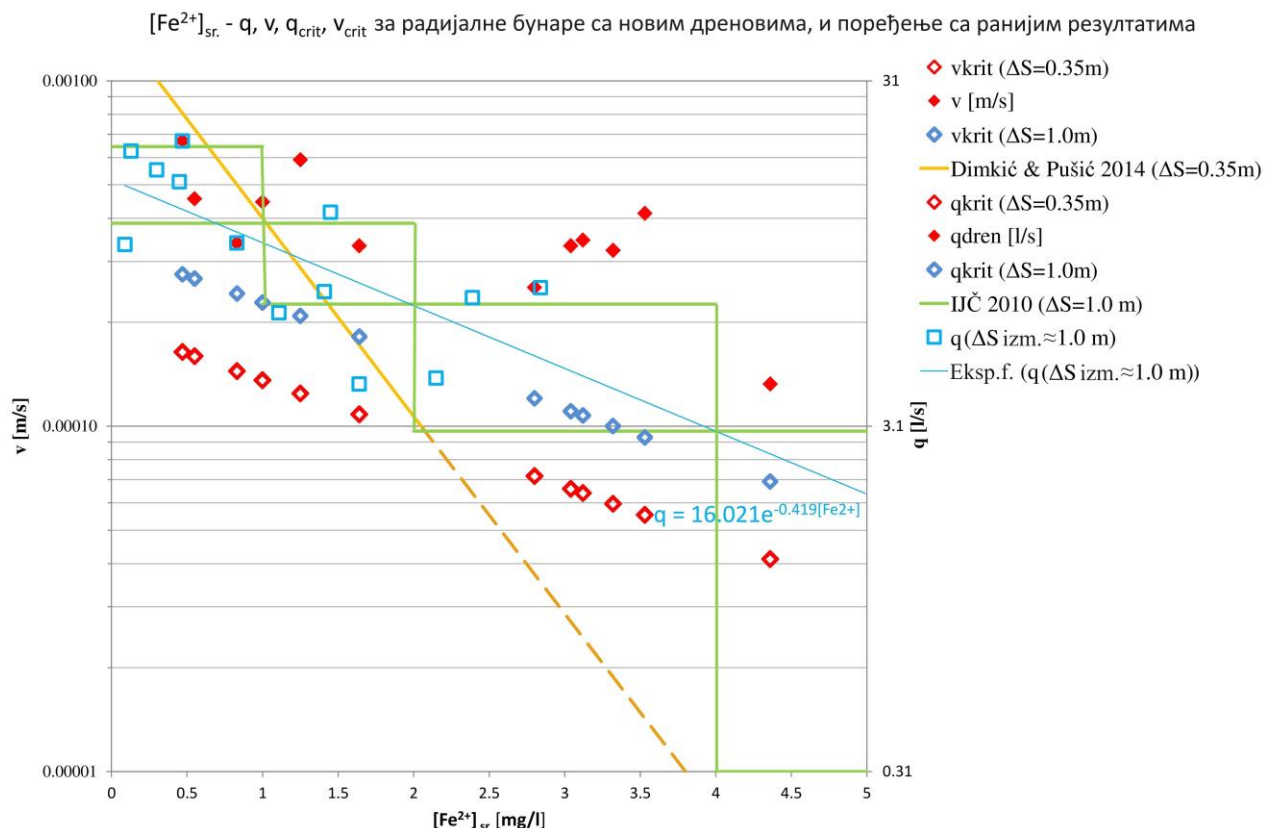
Приликом пројектовања утискивања нових дренава једна од кључних одлука је број дренава. Већи број дренава значи и већу пријемну површину и тиме мање улазне брзине, што узрокује и смањење $KLHR$ према једначини (74). Што је концентрација двовалентног гвожђа виша, то је за исти протицај по дренау $KLHR$ више и експоненцијално расте са порастом те концентрације. Практичан начин да се наведено узме у обзир приликом пројектовања је да се дефинише максимално повећање хидрауличких губитака на дренама током једне године ($\Delta S_{max a}$), на пример 0,35 или 1,0 m/a. На пример, ако је предвиђено време експлоатације 30 година, а расположиви губитак хидрауличног потенцијала око 10 m, онда је $\Delta S_{max a}$ 0,33 m. Из једначине (74) као најбоље корелације, се извођењем датим у једначини (80) добијају изрази за одговарајући максимални проток по дренау (q_{max}) – једначина (81) и максималну улазну брзину (v_{max}) – једначина (82). Димензије дрена – дужина l и пречник d су изражене у метрима.

$$\Delta S_{max a} = KLHR \cdot l \cdot q_{max} = q_{max} \cdot q_{max}^{1.025} \cdot 0.00929 \cdot e^{0.7192[Fe^{2+}]} = q_{max}^{2.025} \cdot 0.00929 \cdot e^{0.7192[Fe^{2+}]} \quad (80)$$

$$q_{max} = \left(\frac{\Delta S_{max a}}{0.00929 \cdot e^{0.7192[Fe^{2+}]}} \right)^{\frac{1}{2.025}} \quad (81)$$

$$v_{max} = \frac{\left(\frac{\Delta S_{max a}}{0.00929 \cdot e^{0.7192[Fe^{2+}]}} \right)^{\frac{1}{2.025}}}{1000 \cdot l \cdot d \cdot \pi} \quad (82)$$

Брзине и протицаји по дренау са одговарајућим концентрацијама раствореног двовалентног гвожђа за бунаре са новим дренама и за све бунаре са дренама са доминантним колмирањем су дате на сликама (Слика 60 и Слика 61, респективно), као и зависност критичних брзина и критичних протицаја по дренау од концентрације раствореног двовалентног гвожђа према једначинама (81) и (82), са приказом критичних вредности из других радова. Поред тога, издвојене су брзине код оних бунара код којих је множењем средњег протицаја по дренау и $KLHR$ добијено годишње повећање обарања нивоа од приближно 1,0 и 0,35 m. Ово углавном није реално повећање него се задати ниво обично одржава, а проток полако смањује са повећањем отпора.

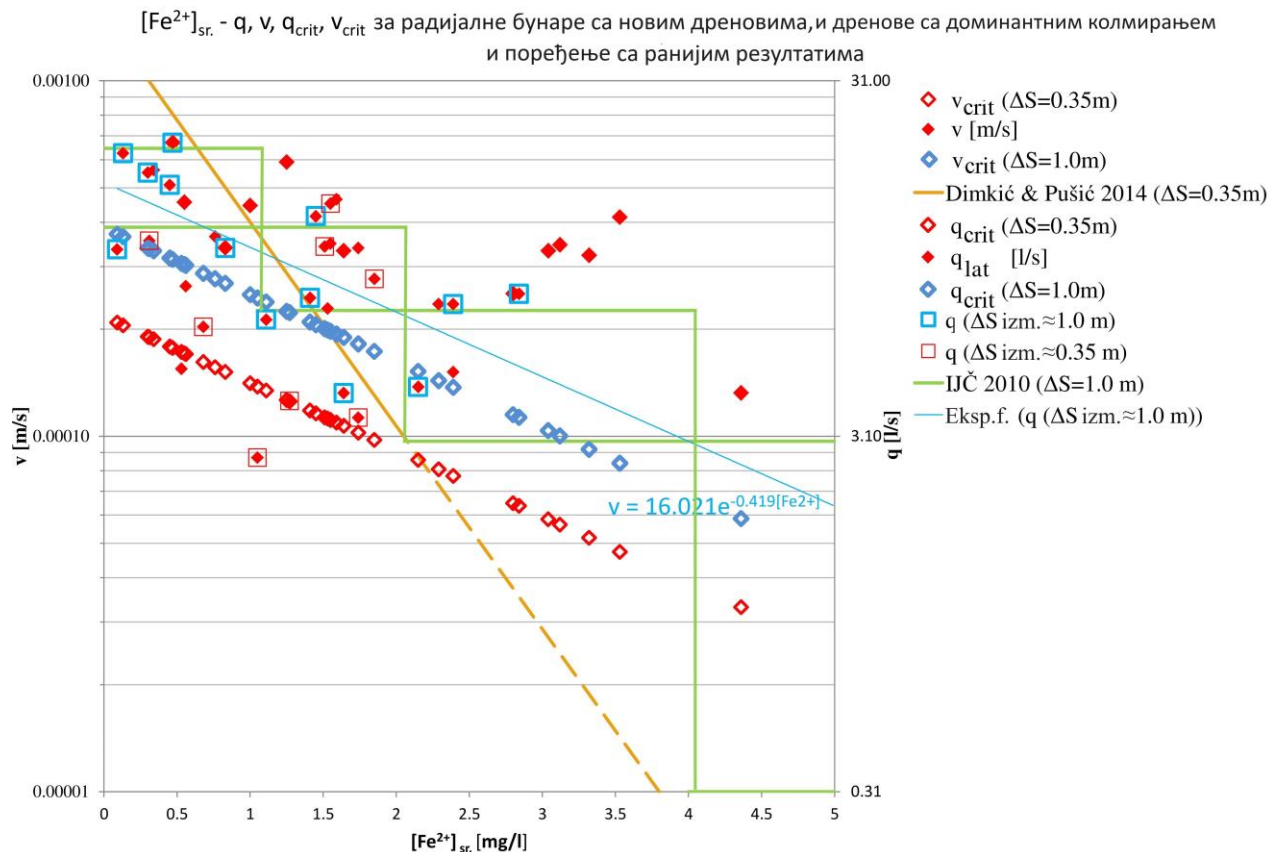


Слика 60 Зависност брзина и протицаја по дренажу, као и критичних брзина и критичних протицаја по дренажу (за годишње обарање нивоа од 0,35 и 1,0 m) од концентрације раствореног двовалентног гвожђа, за нове дренаже (једначине (81) и (82))

На слици су приказане и критичне вредности из других радова. Зелени правоугаоници су области препоручених брзина/протицаја за $\Delta S_{maxa} = 1,0$ m/a према ИЈЧ (2010).

Што се тиче бунара са новим дренажима, може се уочити да се области препоручених брзина/протицаја по дренажу према ИЈЧ (2010) доста добро поклапају са брзинама/протицајима по дренажу 12 бунара са годишњим повећањем обарања нивоа од око 1,0 m (Табела 4) и са експоненцијалном функцијом добијеном регресијом. Вредности брзина и протока по дренажу израчунате експоненцијалном функцијом добијеном регресијом за ових 12 бунара су приближно 35% више од вредности добијених на основу једначина (81) и (82). Препоручене брзине/протицаји према Димкић & Пушић (2014) за $\Delta S_{maxa} = 0,35$ m/a су у растућем проценту веће од од вредности добијених на основу једначина (81) и (82) испод концентрације раствореног гвожђа од 2,2 mg/l и у растућем проценту мање изнад 2,2 mg/l. Разлике нису зачуђујуће с обзиром да је корелација у том раду била изведена на основу података са још три изворишта и једног дренажног система у алувионима Дунава, Тисе и Велике Мораве, за *KLHR* и редокс потенцијал, као и да је корелација са

концентрацијом двовалентног гвожђа изведена преко корелације између концентрације двовалентног гвожђа и редокс потенцијала (Димкић & Пушић, 2014).



Слика 61 Зависност брзина и протицаја по дренау, као и критичних брзина и критичних протицаја по дренау (за годишње обарање нивоа од 0,35 и 1,0 m) од концентрације раствореног двовалентног гвожђа, за нове и дренаве са доминацијом колмирања – преузето из Mitrinović et al. (2021)

На слици су приказане и критичне вредности из других радова. Зелени правоугаоници су области препоручених брзина/протицаја за $\Delta S_{maxa} = 1,0$ m/a према ИЧ (2010).

Код бунара са новим, као и са дренавима са доминацијом колмирања, критични протоци по дренау добијени из једначине (76) извођењем аналогним прорачуну за нове дренаве, су у скоро истом односу према брзинама и протоцима по дренау израчунатим експоненцијалном функцијом добијеном регресијом за 12 бунара са годишњим повећањем обарања нивоа од око 1,0 m – Слика 61.

5.1.5 Критичне брзине и протоци по дренажу у односу на редокс потенцијал

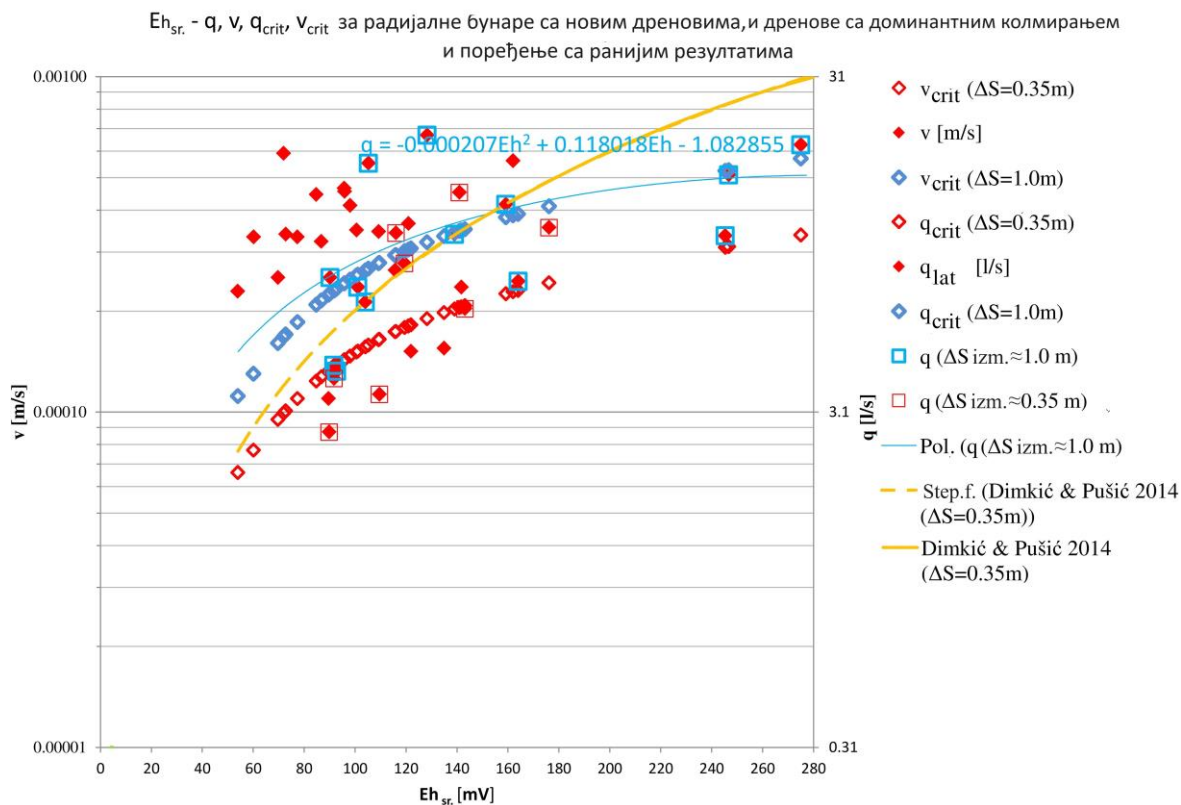
Из једначине (78) се извођењем датим у једначини (83) добијају изрази за одговарајући максимални проток по дренажу (q_{max}) – једначина (84) и максималну улазну брзину (v_{max}) – једначина (85).

$$\Delta S_{max}^a = KLHR \cdot 1 \cdot q_{max} = q_{max}^{2.000} \cdot (12.05 \cdot 1 Eh^{-1.466} + 1.981 \cdot e^{-0.0680 \cdot Eh}) \quad (83)$$

$$q_{max} = \left(\frac{\Delta S_{max}^a}{12.051 \cdot Eh^{-1.466} + 1.981 \cdot e^{-0.0680 \cdot Eh}} \right)^{\frac{1}{2.000}} \quad (84)$$

$$v_{max} = \frac{\left(\frac{\Delta S_{max}^a}{12.051 \cdot Eh^{-1.466} + 1.981 \cdot e^{-0.0680 \cdot Eh}} \right)^{\frac{1}{2.000}}}{1000 \cdot l \cdot d \cdot \pi} \quad (85)$$

На слици (Слика 62) се може уочити доста добро поклапање вредности критичних брзина и протока по дренажу за максимално обарање нивоа од 1 m са брзинама и протоцима по дренажу за 12 бунара са годишњим повећањем обарања нивоа од око 1,0 m (Табела 1). Поклапање са полиномом добијеним регресијом за ових 12 бунара (плава крива) је веома добро. Препоручене брзине/протоци по дренажу према Димкић & Пушић (2014) за $\Delta S_{max}^a = 0,35$ m/a (наранџаста крива) се значајно разликују од вредности добијених на основу једначина (84) и (85), што није необично с обзиром да је корелација у наведеном раду била изведена на основу усредњавања вредности за пет опсега редокс потенцијала, за другачији сет бунара на београдском изворишту и додатне бунаре са изворишта уз Велику Мораву. Поређењем са критичним брзинама и протицајима по дренажу израчунатим на основу концентрације двовалентног гвожђа може се уочити да су оне више када се израчунавају преко редокс потенцијала. С обзиром да је квалитет регресије значајно бољи за корелације са концентрацијом двовалентног гвожђа, боље је користити њих, осим за бунаре са високим редокс потенцијалом, изнад 150 mV, јер је поклапање израчунатог $KLHR$ преко једначине (78) са постојећим подацима боље у овом опсегу редокс потенцијала, него за ниске концентрације двовалентног гвожђа према једначинама (74) и (76) – Слика 56, Слика 57 и Слика 58.



Слика 62 Зависност брзина и протицаја по дренау, као и критичних брзина и критичних протицаја по дренау (за годишње обарање нивоа од 0.35 и 1.0 m) од редокс потенцијала (једначине (84) и (85)), за нове и дренаве са доминацијом колмирања – преузето из Mitrinović et al. (2021)

На слици су приказане и критичне вредности из других радова. Одлука колико је дозвољено годишње повећање депресије у бунару услед пораста локалних губитака на дренавима (при константном протоку) повећање зависи и од процене да ли ће се и колико често вршити регенерације, као и од прогнозе њихових ефеката.

5.1.6 Математички модел за прорачун обарања нивоа

Како је установљено током досадашњих истраживања (Димкић & Пушић, 2014; ИЈЧ, 2010), као и анализом приказаном у овој дисертацији (једначина (74)), $KLHR$ је пропорционално протицају по дренау, па се $KLHR$ у свим наредним периодима може приказати као производ вредности $KLHR$ у првом периоду и односа протицаја по дренау у датом периоду и у првом периоду (уз услов да је концентрација раствореног двовалентног гвожђа приближно константна), при чему је y_n однос између протицаја по дренау (q_n) у заустопним периодима између регенерација – једначине (86) и (87).

$$y_n = \frac{q_{n+1}}{q_n} \tag{86}$$

$$KLHR_n = KLHR_0 \frac{q_n}{q_0} = KLHR_0 \prod_{i=0}^{n-1} y_i \quad (87)$$

$KLHR_0$ је вредност кинетике локалних хидрауличких губитака за случај да нема регенерације и за проток q_0 . Она онда одговара некој вредности концентрације двовалентног гвожђа према једначини (74).

$$KLHR_1 = KLHR_0 y_0 \quad (88)$$

Када се дефинишу дужина животног века дренажа t или једноставно разматрани временски период и број регенерација n , депресија пре регенерације на крају периода се може израчунати преко једначина као што су једначине (89) до (94), датих за први, други, трећи, четврти и пети период (за случај четири регенерације), као и општи случај, респективно:

$$\Delta S_{\max} = (x + LHR_1) \cdot q_1 = (x + KLHR_1 \frac{t}{5}) \cdot q_1 = (x + KLHR_0 y_0 \frac{t}{5}) \cdot q_0 y_0 \quad (89)$$

$$\Delta S_{\max} = (LHR_1 y_{reg} + x + KLHR_2 \frac{t}{5}) \cdot q_1 y_1 = (KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_{reg} + x + KLHR_0 y_0 y_1 \frac{t}{5}) \cdot q_0 y_0 y_1 \quad (90)$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{\max} &= (LHR_2 y_{reg} + x + KLHR_3 \frac{t}{5}) \cdot q_1 y_1 y_2 = \\ &= \left((KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_{reg} + KLHR_0 y_0 y_1 \frac{t}{5}) \cdot y_{reg} + x + KLHR_0 y_0 y_1 y_2 \frac{t}{5} \right) \cdot q_0 y_0 y_1 y_2 \end{aligned} \quad (91)$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{\max} &= \left(LHR_3 y_{reg} + x + KLHR_4 \frac{t}{5} \right) \cdot q_1 y_1 y_2 y_3 = \\ &= \left(KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_{reg}^3 + KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_{reg}^2 y_1 + \right. \\ &\quad \left. + KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_{reg} y_1 y_2 + x + KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_1 y_2 y_3 \right) \cdot q_0 y_0 y_1 y_2 y_3 \end{aligned} \quad (92)$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{\max} &= \left(LHR_4 y_{reg} + x + KLHR_5 \frac{t}{5} \right) \cdot q_1 y_1 y_2 y_3 y_4 = \\ &= \left(KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_{reg}^4 + KLHR_0 \frac{t}{5} y_{reg}^3 y_0 + KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_{reg}^2 y_1 y_2 + \right. \\ &\quad \left. + KLHR_0 y_0 \frac{t}{5} y_{reg} y_1 y_2 y_3 + x + KLHR_0 y_0 y_1 y_2 y_3 y_4 \frac{t}{5} \right) \cdot q_0 y_0 y_1 y_2 y_3 y_4 \end{aligned} \quad (93)$$

$$\Delta S_{\max} = KLHR_0 \left(\sum_{i=0}^n \left(\frac{t}{n+1} y_{reg}^i \prod_{j=0}^{n-i} y_j \right) + \frac{x}{KLHR_0} \right) \cdot q_0 \prod_{k=0}^n y_k \quad (94)$$

5.1.7 Анализа рада бунара софтверским моделом

5.1.7.1 Константан проток између регенерација

Сабирањем отпора средине x (израчунава се дељењем депресије у бунару s добијене из једначине (21), са протицајем по дренажу), локалних хидрауличких губитака који потичу од инкрустација из претходних периода (добијених израчунавањем постепеног раста LHR у зависности од одговарајућег $KLHR$ у сваком претходном периоду и примену коефицијента смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} за све претходне регенерације) и локалних хидрауличких губитака насталих током посматраног периода и множењем збира са протицајем по дренажу током посматраног периода, добија се депресија на крају тог периода (једначине (89) до (94)). Полазна вредност кинетике раста локалних хидрауличких отпора ($KLHR_0$) се одређује према зависности од концентрације раствореног двовалентног гвожђа (једначина (74)), ако је средња концентрација раствореног двовалентног гвожђа за дати бунар већа од 1mg/l, или према зависности од редокс потенцијала (једначина (78) ако је мања од 1mg/l. У Mitrinović et al. (2021) је показано да се израчунато $KLHR$ за ниске концентрације двовалентног гвожђа боље поклапа са измереним вредностима када се користи корелација са редокс потенцијалом и протоком по дренажу (једначина (78)).

Расположива депресија је одређена статичким пијезометарским нивоом и задатим нивоом у бунару (максимална депресија/минимални ниво су одређени минималном прихватљивом дубином усиса пумпе испод нивоа у шахту бунара). Максималан протицај по дренажу и максимална укупна количина испумпане воде током сваког од периода се постижу искоришћавањем целокупне расположиве депресије која зависи од задатог минималног нивоа који се достиже пре следеће регенерације. Протицај по дренажу у периоду између регенерација је константан.

Модел је примењен приликом анализе перформанси бунара при режиму рада са константним протоком тако што су једначине (89) до (94) решаване за 11 вредности коефицијента смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} (од 0 до 1 са корацима од 0.1), да би се добиле вредности од y_0 до y_{n-1} за свако y_{reg} , што је спроведено коришћењем Excel™ Solver-a, на тај начин што је од вредности израчунате депресије за крај сваког периода одузимана вредност ΔS_{\max} , а апсолутне вредности добијених резултата за сва y_{reg} су сабирани у циљној ћелији. Вредности ћелија у којима су уписани y_0 до y_{n-1} су аутоматски мењане помоћу Excel™ Solver-a, док вредност циљне ћелије не достигне минимум, тј. вредност блиску нули. Из $KLHR_0$ се према једначини (95) добија вредност q_0 :

$$q_0 = \frac{\Delta S_{\max}}{KLHR_0 \cdot t + x} \quad (95)$$

, где је t дужина посматраног временског периода, а из q_0 помоћу вредности y_0 до y_{n-1} се добијају протоци по дренажу за сваки под-период издвојен регенерацијама (q_1 до q_n) и из њих обарање нивоа у бунару према једначинама (89) до (94).

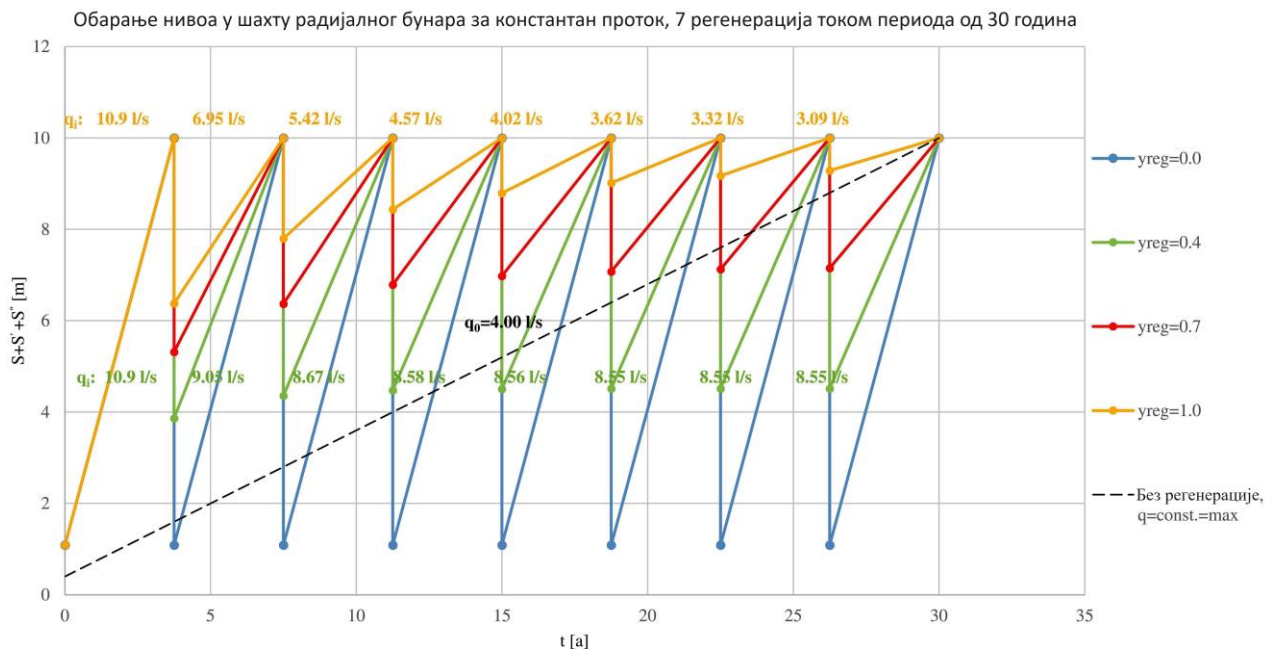
Описани поступак је за случајеве 1, 4 и 7 регенерација спровођен за све комбинације вредности $KLHR_0$ тј. концентрације раствореног двовалентног гвожђа, отпора водоносне средине x (депресија по јединици протицаја по дренажу) и максималне расположиве депресије ΔS_{\max} , за сваку вредност y_{reg} . Помоћу macro-а написаног у Visual Basic for Applications програмском језику, прорачун у Excel™ Solver-у се аутоматски покреће активирањем macro-а за 4851 комбинацију броја регенерација (3 вредности), y_{reg} (11 вредности), $KLHR_0$ (7 вредности), x (7 вредности) и ΔS_{\max} (3 вредности) а резултати бележе у посебним spreadsheet-овима (за случајеве 1, 4 и 7 регенерација) и у једном spreadsheet-у са комплетним резултатима. Бележени су протоци по дренажу за сваку комбинацију. Из добијених резултата је израчунаван још и однос укупних запремина испумпане воде током посматраног периода са (Q_1) и без регенерација (Q_0).

У следећем кораку је спроведена регресиона анализа добијених резултата да би се добила функција која повезује Q_1/Q_0 са отпором водоносне средине x (депресија по јединици протицаја по дренажу), коефицијентом смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације (y_{reg}) и бројем регенерација (n). Најбоља корелација је постигнута за функцију дату једначином (96):

$$\frac{Q_1}{Q_0} = (0.19603 \cdot n - 0.5382) \cdot (0.20378 \cdot x - 1.406575 - 0.94751 \cdot (5-n) \log(y_{reg} + 1) - 1.23763) \quad (96)$$

За регенерацију 1 пут током посматраног периода укупна количина испумпане воде је већа од 11% ($y_{reg} = 1.0$) до 41% ($y_{reg} = 0.0$) а према једначини (96) од 0% ($y_{reg} = 1.0$) до 59% ($y_{reg} = 0.0$), за 4 пута је већа од 21% ($y_{reg} = 1.0$) до 123% ($y_{reg} = 0.0$) а према једначини (96) од 21% ($y_{reg} = 1.0$) до 120% ($y_{reg} = 0.0$), за 7 пута је већа од 24% ($y_{reg} = 1.0$) до 182% ($y_{reg} = 0.0$) а према једначини (96) од 44% ($y_{reg} = 1.0$) до 164% ($y_{reg} = 0.0$).

Пример резултата једног прорачуна је дат на дијаграму (Слика 63).



Слика 63 Депресија у шахту бунара током периода од 30 година, за случај 7 регенерација, $x=0,1 \text{ m/(l/s)}$, $KLHR_0=0,08 \text{ m/(l/s)/a}$ – преузето из Mitrinović et al. (2021)

5.1.7.1.1 Критичне брзине и протоци по дренажу

У случају када се спроводе регенерације, смањења LHR услед регенерација омогућавају да се уз веће улазне брзине од максималне брзине према једначинама (81), (82), (84) и (85) постигне ефективно годишње повећање локалних губитака једнако максималном дозвољеном повећању ΔS_{max} . Дужина периода пре прве регенерације (и између осталих регенерација) је узета као једнака дужини целокупног анализираниог периода t подељеној са бројем регенерација увећаним за један.

У једначини (97) су дати изрази за максималну депресију за целокупан период дужине t , као и за период пре прве регенерације, при чему је узето у обзир да се $KLHR$ мења пропорционално промени протицаја по дренажу:

$$\Delta S_{max} = (x + KLHR_0 t) \cdot q_0 = \left(x + KLHR_0 \frac{q_1}{q_0} \frac{t}{n+1}\right) \cdot \frac{q_1}{q_0} q_0 \quad (97)$$

Ако је отпор средине x мали у односу на локалне отпоре може се занемарити чиме се долази до израза (98):

$$q_0 \sqrt{n+1} = q_1 \quad (98)$$

На основу једначине (98), максимални дозвољени протицаји по дренажу и улазне брзине према једначинама (81), (82), (84) и (85) се у случају када се врши n регенерација, могу

помножити са приближно квадратним кореном броја регенерација увећаног за 1 да би се добиле максималне дозвољене вредности у првом периоду рада бунара. На основу резултата прорачуна спроведеног помоћу macro-а написаног у Visual Basic for Applications (VBA) програмском језику и Excel™ Solver-а, на већ објашњен начин, установљено је да када је средња вредност коефицијента смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} око 0.5 ± 0.1 , протицај по дренажу након свих наредних регенерација би требао да буде око 75% оног пре прве регенерације.

5.1.7.2 Константан ниво између регенерација

На слици (Слика 63) је приказано како се мења ниво у бунару при константном протоку. У пракси се најчешће радом пумпе у бунару управља тако да ниво буде константан, па се проток током времена мења. Приказаним методом се овај случај може симулирати тако што се периоди између регенерација (или, ако њих нема, цео посматрани период), поделе на велики број међупериода у оквиру којих се ниво не мења много чак ни кад су протоци по дренажу велики. Током сваког међупериода се протицај по дренажу не мења, а предвиђени ниво који важи за актуелни период између регенерација се постиже на његовом крају. На крају међупериода се проток мења тако да се на крају новог међупериода поново постиже исти ниво. Када је међупериод довољно кратак, додатна депресија настала због колмирања током његовог трајања је и код високих протока довољно мала да се прорачунати ниво не смањи значајно током међупериода, па се може сматрати константним.

Два macro-а се користе за прорачуне потребне за симулацију црпљења током ког се одржава задати ниво, један за случај спровођења регенерација и други када регенерација нема.

У Excel™ Solver-у се не може задати промена вредности довољно великог броја варијабли (код оваквог приступа проблему), у овом случају вредности y_n , тј. односа између протицаја по дренажу у узастопним периодима, а уз то масо у оквиру ког би био коришћен Solver би могао да се користи само за неки одређени број периода. Такође, варирање y_n утиче на израчунату вредност обарања нивоа кроз једначину (94), а тешко је изводљиво да она за велики број периода буде развијена у једној ћелији spreadsheet-а, па и комбиновањем више њих. Покушано је прво да се у оквиру масо-а, помоћу више угњеждених петљи прорачунава вредност једначине (94) за произвољан број периода, при чему би се помоћу Solver-а варијала вредност y_n за сваки тренутни период n док се не добије обарање нивоа једнако задатом. Показало се да Solver не ради ако једначина није уписана као формула у ћелији spreadsheet-а него се у њу само уписује резултат прорачуна у масо-у.

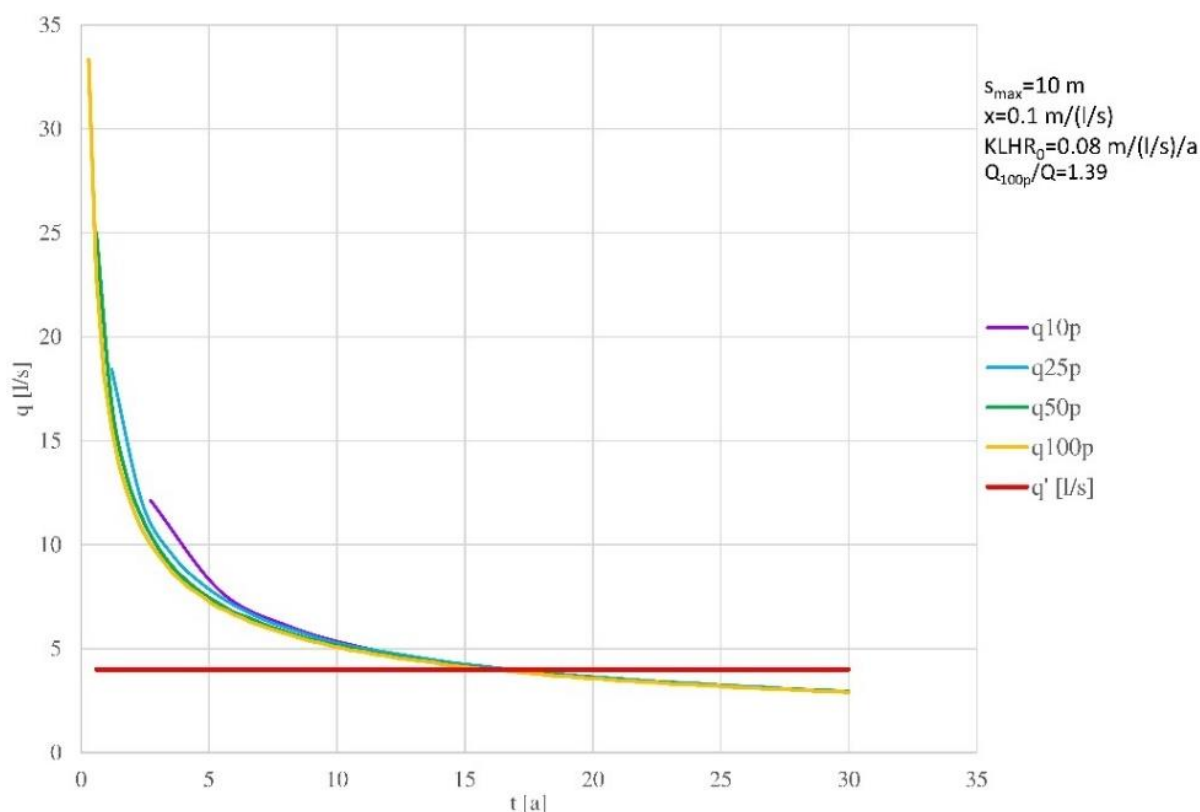
Због наведених ограничења је уместо Solver-а примењен други, мање прецизан метод – y_n је мењано у корацима од 0,01 почевши од вредности 0,01 и прорачунавано обарање нивоа на крају периода n све док апсолутна вредност разлике између прорачунатог и задатог обарања нивоа не почне да се повећава, што је знак да је у претходној итерацији разлика била најмања. На тај начин се прорачун могао извршити за произвољан број периода и знатно брже.

У случају кад је предвиђено обављање регенерација, у оквиру прорачуна се задаје број регенерација и вредност коефицијента смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} , а унутар периода између регенерација се једначина (94) решава за сваки од задатог броја међупериода, при чему је за њих y_{reg} једнако 1 (једначина (100)), тј. то су квази-регенерације које немају никакав ефекат, већ се само мења проток. На крају сваког периода између регенерација, задато (и постигнуто) обарање нивоа се умањује за производ отпора водоносне средине x (израчунава се дељењем депресије у бунару s добијене из једначине (21), са протицајем по дренажу) и протока по дренажу (тј. одузима се допринос отпора водоносне средине) и дели са вредношћу протока из последњег међупериода q_{n+1} и као LHR стечено у претходним периодима (LHR_0), једначина (99), преноси у период након следеће регенерације, што се своди на додавање члана у једначини (94), чиме се добија једначина (100).

$$LHR_0 = \frac{\Delta S_{\max} - x \cdot q_{n+1}}{q_{n+1}} \quad (99)$$

$$\Delta S_{\max} = KLHR_0 \left(\frac{LHR_0 y_{reg} \prod_{j=1}^n 1^j}{KLHR_0} + \sum_{i=0}^n \left(\frac{t}{n+1} 1^i \prod_{j=0}^{n-i} y_j \right) + \frac{x}{KLHR_0} \right) \cdot q_0 \prod_{k=0}^n y_k \quad (100)$$

На слици (Слика 64) је дата промена протока по дренажу током периода рада бунара од 30 година, када нема регенерација и максимално обарање нивоа се постиже након 30 година (црвена линија) и за случајеве када се симулира црпљење током ког се одржава максимално обарање нивоа дељењем периода од 30 година на 10, 25, 50 и 100 међупериода (љубичаста, плава, зелена и жута крива, респективно). Може се уочити да се почетни, високи протоци могу добити прорачуном само ако су међупериоди довољно кратки. Приближно се за дупло краће периоде могу добити око 30% већи максимални протоци. Однос између средњих протока или укупно испумпане воде између црпљења са обарањем нивоа константно једнаким максималном (симулираног кроз 100 периода) и црпљења када се максимално обарање нивоа постиже након 30 година, Q_{100p}/Q , је једнак 1,39.



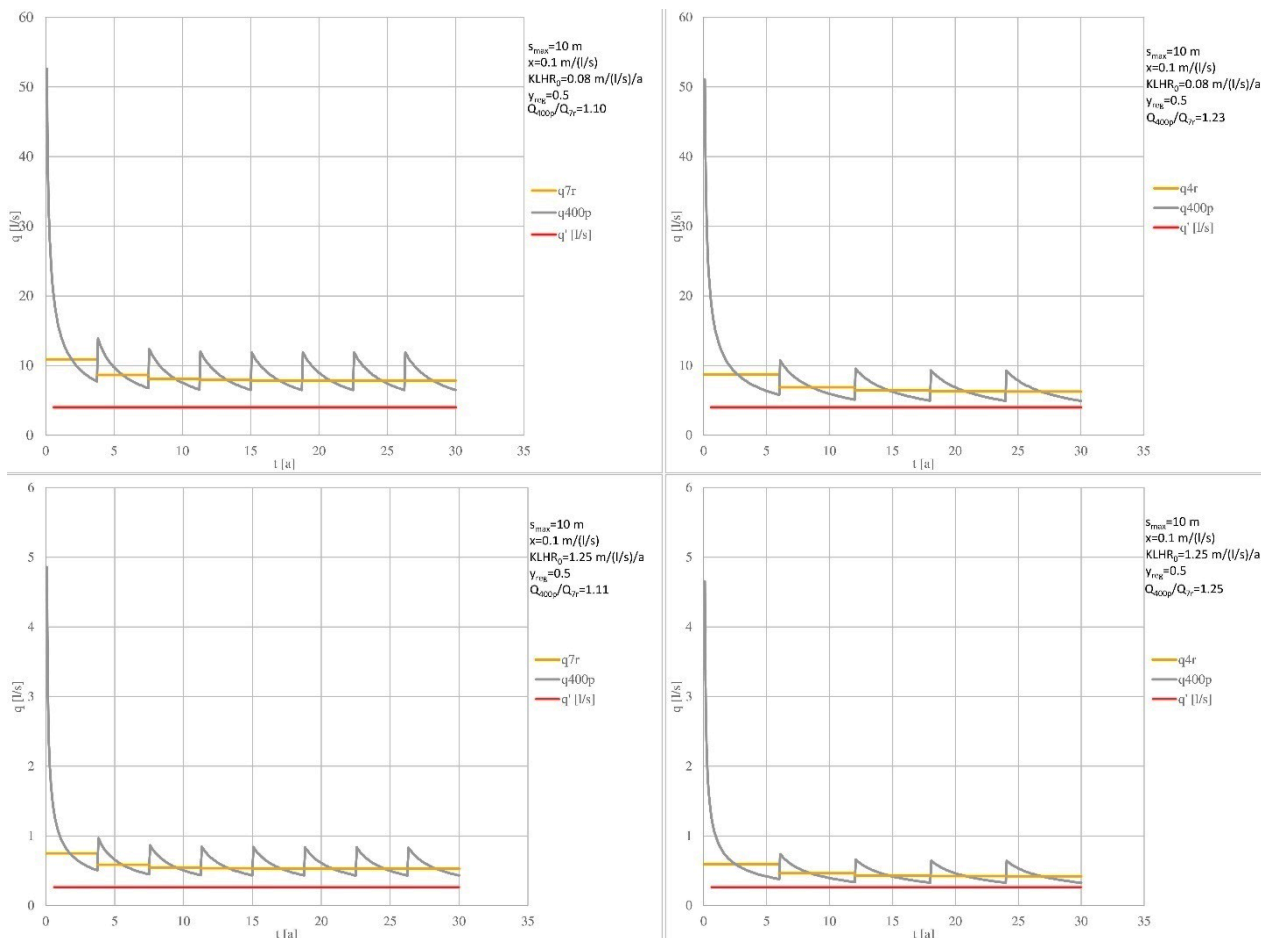
Слика 64 Промена протока по дренажу током периода рада бунара од 30 година, без регенерација (црвена линија), резултати симулирања црпљења током ког се одржава максимално обарање нивоа дељењем на 10, 25, 50 и 100 периода (љубичаста, плава, зелена и жута крива, респективно) – преузето из Mitrinović et al. (2021)

На сликама (Слика 65 и Слика 66) је дата промена протока по дренажу током периода рада бунара од 30 година за случај:

- 1) да нема регенерација и да се максимално обарање нивоа постиже након 30 година (црвена линија),

- 2) да се изводе регенерације (4 или 7 током разматраног периода) и уз то се максимално обарање нивоа постиже на крају периода између регенерација (жуте линије)
- 3) да се изводе регенерације и да је обарање нивоа стално једнако максималном (сива крива).

Сва три случаја су обрађена за различите вредности $KLHR_0$ и отпора водоносне средине x . Однос између средњих протока или укупно испумпане воде између црпљења са обарањем нивоа константно једнаким максималном (симулираног кроз 400 међупериода) и црпљења када се максимално обарање нивоа постиже пред регенерацију, Q_{400p}/Q , се за случај 4 регенерације креће између 1,16 и 1,25, док се за случај 7 регенерација креће између 1,06 и 1,10.

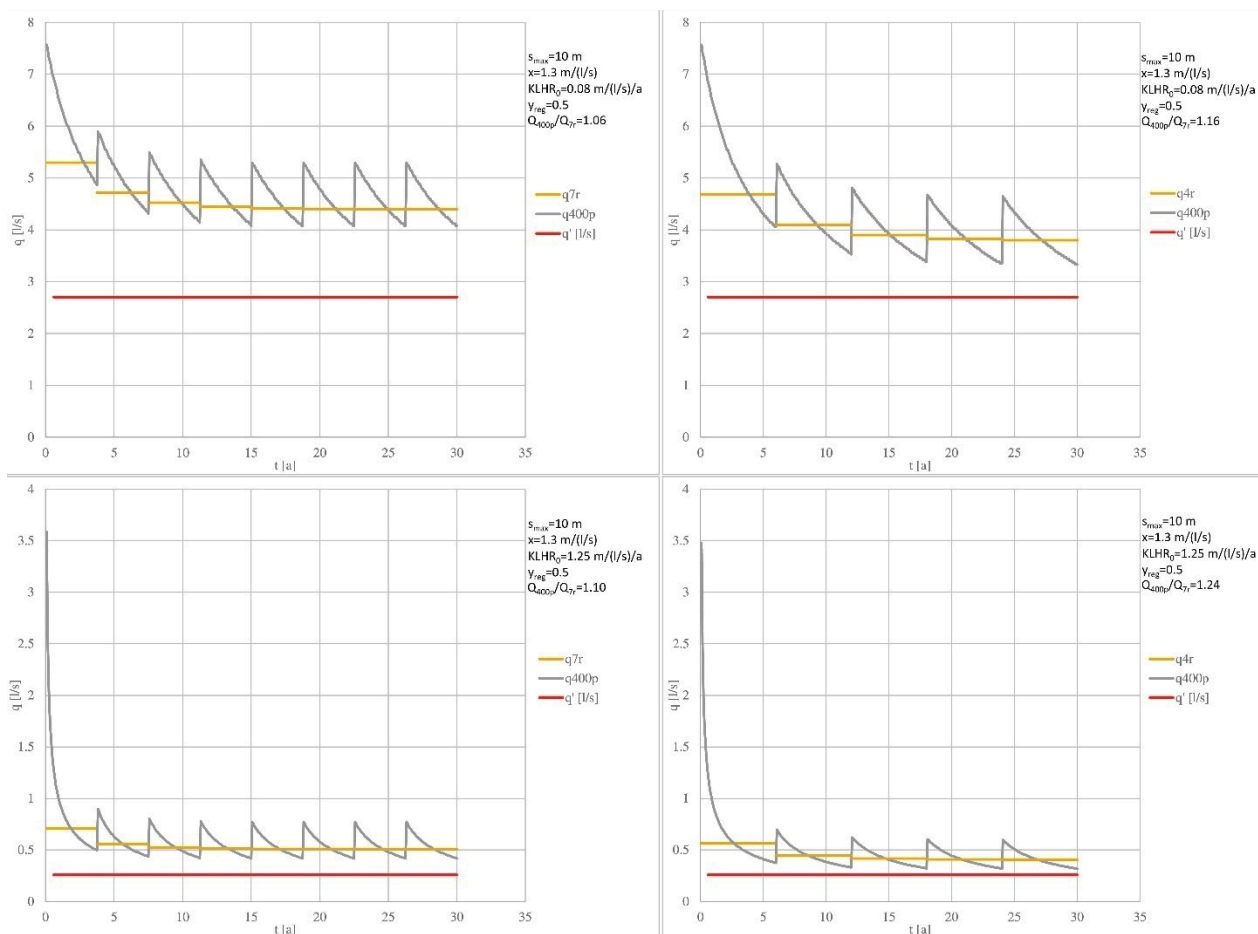


Слика 65 Промена протока по дренажу, за $x = 0,1 \text{ m/(l/s)}$, $KLHR_0 = 0,08 \text{ m/(l/s)/a}$ (горе) и $1,25 \text{ m/(l/s)/a}$ (доле), за 4 регенерације (десно) и 7 регенерација (лево)

Промена протока по дренажу, за случај да нема регенерација и да се максимално обарање нивоа постиже након 30 година је дата црвеном линијом, случај када се изводе

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

регенерације и максимално обарање нивоа постиже на крају периода између регенерација – жутом линијом, и случај када се изводе регенерације и обарање нивоа је стално једнако максималном – сивом кривом.



Слика 66 Промена протока по дренажу, за $x = 1,3$ m/(l/s), $KLHR_0 = 0,08$ m/(l/s)/a (горе) и $1,25$ m/(l/s)/a (доле), за 4 регенерације (десно) и 7 регенерација (лево)

Промена протока по дренажу, за случај да нема регенерација и да се максимално обарање нивоа постиже након 30 година је дата црвеном линијом, случај када се изводе регенерације и максимално обарање нивоа постиже на крају периода између регенерација – жутом линијом, и случај када се изводе регенерације и обарање нивоа је стално једнако максималном – сивом кривом.

5.1.8 Софтверски алат за симулацију рада бунара

Једначина (94), за црпљење са константним протоком и једначина (100), за црпљење са константним нивоом, се могу решити за различите вредности:

- хидрауличке проводљивости и дебљине аквифера и аквитарда,
- коефицијента ускладиштења аквифера,
- броја и дужине дренажа,
- концентрације двовалентног гвожђа у води,
- редокс потенцијала,
- максималног расположивог воденог стуба (расположиве депресије) у бунару за сваки период,
- броја регенерација и тренутака њиховог спровођења,
- коефицијента смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} за сваку регенерацију,
- режима рада (константан ниво или константан проток).

На крају се добијају вредности од y_0 до y_{n-1} и на основу њих вредности протицаја по дренажу током периода између регенерација, а из њих на основу израчунатих локалних отпора и отпора водоносне средине – депресије у шахту бунара.

5.1.8.1 Улаз модела

Протоци и нивои се израчунавају на основу унетих вредности следећих улазних параметара:

- I. Хидрогеолошки параметри:
 - коефицијент хидрауличке проводљивости аквифера,
 - коефицијент ускладиштења аквифера,
 - дебљина аквифера,
 - хидрауличка проводљивост аквитарда,
 - дебљина аквитарда.
- II. Хидрохемијски параметри:
 - концентрација двовалентног гвожђа у води.
- III. Грађевински параметри:
 - број дренажа,
 - дужина дрена.
- IV. Параметри режима рада:
 - дужина симулираног периода,
 - расположиви водени стуб у бунару (или максимални, или планирани мањи), за сваки период.
- V. Параметри везани за регенерације:
 - број регенерација,
 - тренуци спровођења регенерација,

- коефицијент смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације за сваку регенерацију.

VI. Симулациони параметри:

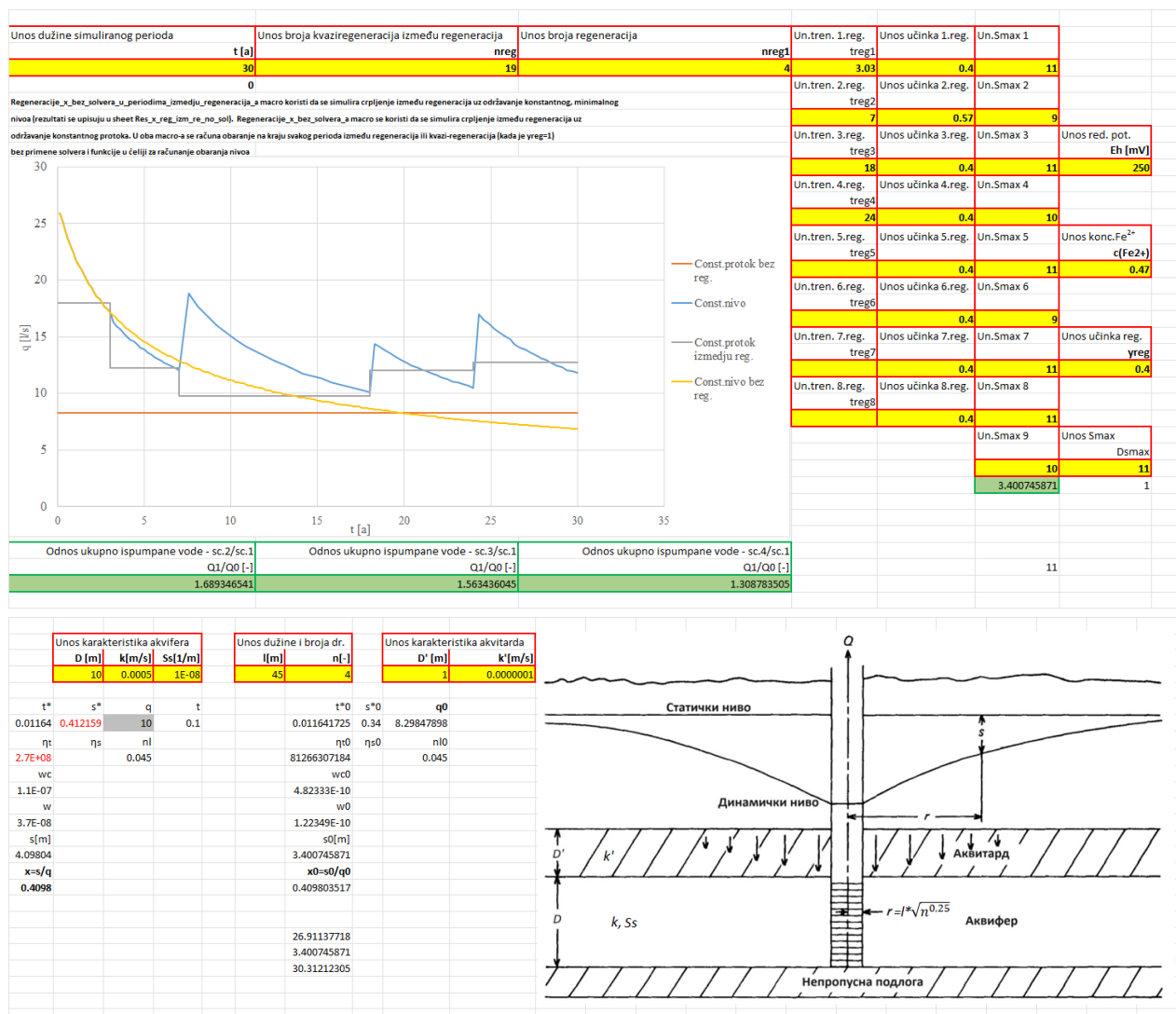
- број прорачунских међупериода између регенерација.

Вредности набројаних параметара се уносе преко Microsoft Excel spreadsheet-а пре започињања симулације у жута поља са црвеним оквиром (Слика 67).

Отпор водоносне средине се израчунава директно преко формула у spreadsheet-у коришћењем једначина од (13) до (28).

Унос различитих вредности коефицијента смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерација за сваку регенерацију посебно предвиђен је за случајеве спровођења калибрација на основу резултата осматрања рада бунара. Унос различитих вредности расположивог воденог стуба за сваки период понаособ је такође предвиђен због потреба калибрације, али и због могућности да се у будућности планира рад бунара са ограниченим капацитетом. На основу прегледања података о раду бунара Београдског изворишта се може закључити да се задати нивои у бунарима довољно често мењају да би постојање опције уноса различитих вредности расположивог воденог стуба за сваки симулирани период било сврсисходно и потребно.

Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара



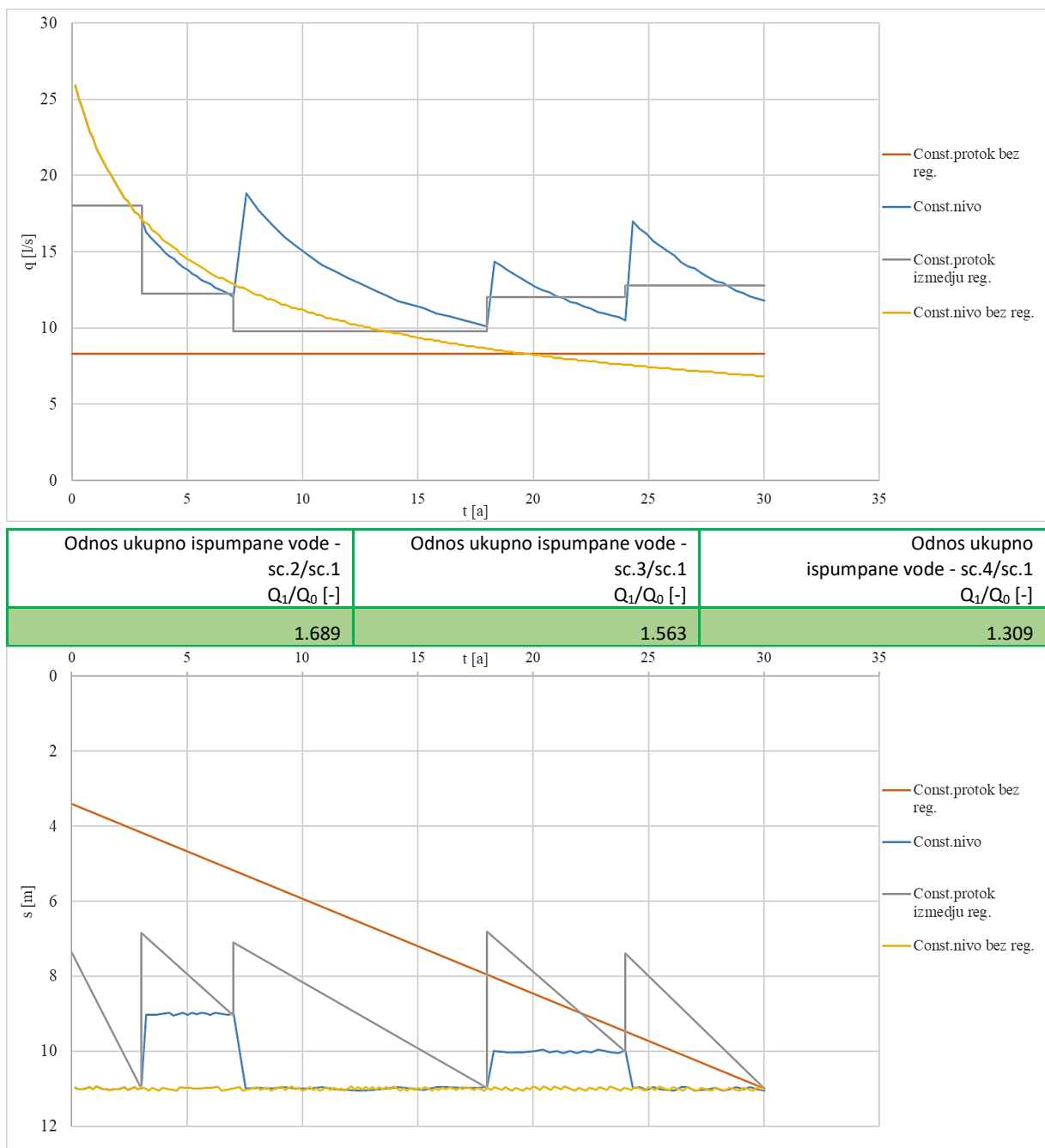
Слика 67 Интерфејс софтвера – вредност улазних прараметара се уноси у жута поља са црвеним оквиром

5.1.8.2 Излаз из модела

Излази из модела су протоци по дренажу и депресије у бунару за сваки рачунски међупериод, тј. дијаграми протока по дренажу и депресије у шахту бунара. Прорачуни се извршавају за два режима рада (константан ниво и константан проток) и опције са и без регенерације, тј. за укупно четири случаја:

- ниво је константан и изводе се регенерације,
- проток је константан и изводе се регенерације,
- ниво је константан и нису предвиђене регенерације,
- проток је константан и нису предвиђене регенерације.

Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
 новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара



Слика 68 Интерфејс софтвера – пример излаза из модела – проток по дренажу (горе), односи између укупних испумпаних запремина за више сценарија и укупне испумпане запремине за основни сценарио (средина) и депресија у шахту бунара (доле)

Резултати приказани на слици се односе на период од 30 година, са 4 изведене регенерације, $c(\text{Fe}^{2+})=0,47 \text{ mg/l}$, двадесет прорачунских међупериода између регенерација, за режиме рада са константним нивоом и константним протоком, случајеве са и без регенерација.

Ради поређења укупне продукције бунара током експлоатације рачунају се и односи између:

- укупне запремине воде испумпане током симулираног периода када се врше регенерације и ниво је константан,
- укупне испумпане запремине воде када се врше регенерације и проток је константан,
- укупне испумпане запремине воде када се не врше регенерације и проток је константан,
- и минималне запремине коју представља укупна испумпана запремина воде када се не врше регенерације и проток је константан.

5.1.9 Дискусија

Издвајањем бунара код којих је колмирање дренажа процес који доминантно узрокује повећане локалног хидрауличног отпора, као и третирањем периода раздвојених регенерацијама одвојено, добијена је задовољавајућа корелација између $KLHR$ -а и концентрације раствореног двовалентног гвожђа. Корелација између $KLHR$ -а и редокс потенцијала је мање поуздана али употребљива за више вредности редокс потенцијала и ниже концентрације раствореног двовалентног гвожђа.

Критични протицаји по дренажу и брзине у зависности од концентрације двовалентног гвожђа, дати у једначинама (81) и (82) се углавном слажу са вредностима из ранијих радова и студија, највише са ИЈЧ (2010), док се критичне брзине/протицаји према Димкић & Пушић (2014) за $\Delta S_{maxa} = 0,35$ m/a за концентрацију раствореног гвожђа од 2,2 mg/l исте као добијене једначинама (81) и (82), али се све више разликују при вишим концентрацијама или мањим од ове вредности. С обзиром да је средња концентрација за анализиране периоде 1,55 mg/l то није превелико одступање.

Вредности критичних брзина и протока по дренажу у зависности од редокс потенцијала у односу на стандардну водоникову електроду за максимално обарање нивоа од 0,35 m показују делимично поклапање са препорученим брзинама/протоцима по дренажу према Димкић & Пушић (2014) за $\Delta S_{maxa} = 0,35$ m/a, при чему су вредности брзина из Димкић & Пушић (2014) у растућем проценту са повећањем вредности редокс потенцијала веће од вредности добијених на основу једначина (84) и (85), што није необично с обзиром да је корелација у поменутом раду била изведена на основу усредњавања вредности за поједине бунаре унутар 5 опсега редокс потенцијала и за другачији сет бунара на београдском изворишту и додатне бунаре са изворишта уз Велику Мораву.

Утицај регенерација на укупну количину испумпане воде је према резултатима симулација велики и у случају максималног анализираног броја од 7 регенерација (приближно једанпут у 4 године за период од 30 година) при $y_{reg} = 0,4$, што је просечна

вредност за анализиране регенерације (Табела 2) на београдском изворишту, она је 2 пута већа него у случају да нема регенерација. Корелација која повезује однос количине испумпане воде са (Q_1) и без регенерација (Q_0), са отпором водоносне средине x , коефицијентом смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} и бројем регенерација n је дата једначином (93). Повећање количине испуњене воде услед регенерација је последица већих улазних брзина и протицаја по дренажу тј. повећања критичних брзина (Слика 65 и Слика 66). Према једначини (98) максималне дозвољене вредности брзина и протицаја по дренажу (добијене из једначина (81), (82), (84) и (85)) на почетку рада бунара се могу помножити са приближно квадратним кореном броја регенерација увећаног за 1, а након регенерација протицај по дренажу би требао да буде око 75% оног пре прве регенерације ако је y_{reg} око $0,5 \pm 0,1$. Ефекти регенерације се не могу предвидети, није установљена корелација између броја претходних регенерација или концентрације раствореног двовалентног гвожђа или редокс потенцијала и y_{reg} , док су установљене само слабе корелације између протицаја по дренажу пре регенерације и y_{reg} као и између локалних хидрауличких губитака пре регенерације и y_{reg} , што се може свести на оквирно правило да се ефекти регенерације повећавају са величином локалних отпора и да се најбољи ефекти постижу када је LHR веће од 4 m/l/s . Приступ који се може предложити на основу изложеног је да се за прогнозне прорачуна користи вредност y_{reg} за $0,1$ до $0,2$ већа од просечне за извориште.

Чест случај у пракси да се радом пумпе у бунару управља тако да ниво буде константан при чему проток током времена опада, је симулиран поделом периода између регенерација на велики број мањих периода у којима је проток константан, а мења се на прелазу у следећи период тако да ниво на крају следећег периода буде једнак задатом за тај период. На овај начин је успешно реплициран феномен високих почетних протицаја који врло брзо опадају (Слика 64, Слика 65 и Слика 66). Однос између укупно испумпане запремине воде за случај када је обарање нивоа константно једнако максималном (симулираног кроз 400 периода) и када је проток између регенерација константан за 4 регенерације се креће између $1,16$ и $1,25$, док се за случај 7 регенерација креће између $1,06$ и $1,10$.

Такође, уочава се да под условом да су ефекти регенерације исти, после неколико регенерација средњи проток између регенерација даље не опада због тога што је LHR постало довољно велико да проценат елиминисан регенерацијом постане једнак отпору насталом током времена протеклог од претходне регенерације.

Софтверски модел развијен у оквиру израде докторске дисертације омогућава да се на једноставан начин симулира рад бунара, узимајући у обзир све релевантне непроменљиве факторе (хидрогеолошки, хидрохемијски и грађевински) и варијабилне факторе (режим рада, број и ефекти регенерација, параметри симулације).

5.2 Одређивање механизма биохемијског колмирања бунара

5.2.1 Моделирање промене запремине порног простора и њеног утицаја на хидрауличку проводљивост и прерасподеле протока у зони изложеној колмирању

5.2.1.1 Просторни распоред параметара водоносне средине према статистичкој анализи гранулометријског састава узорака материјала

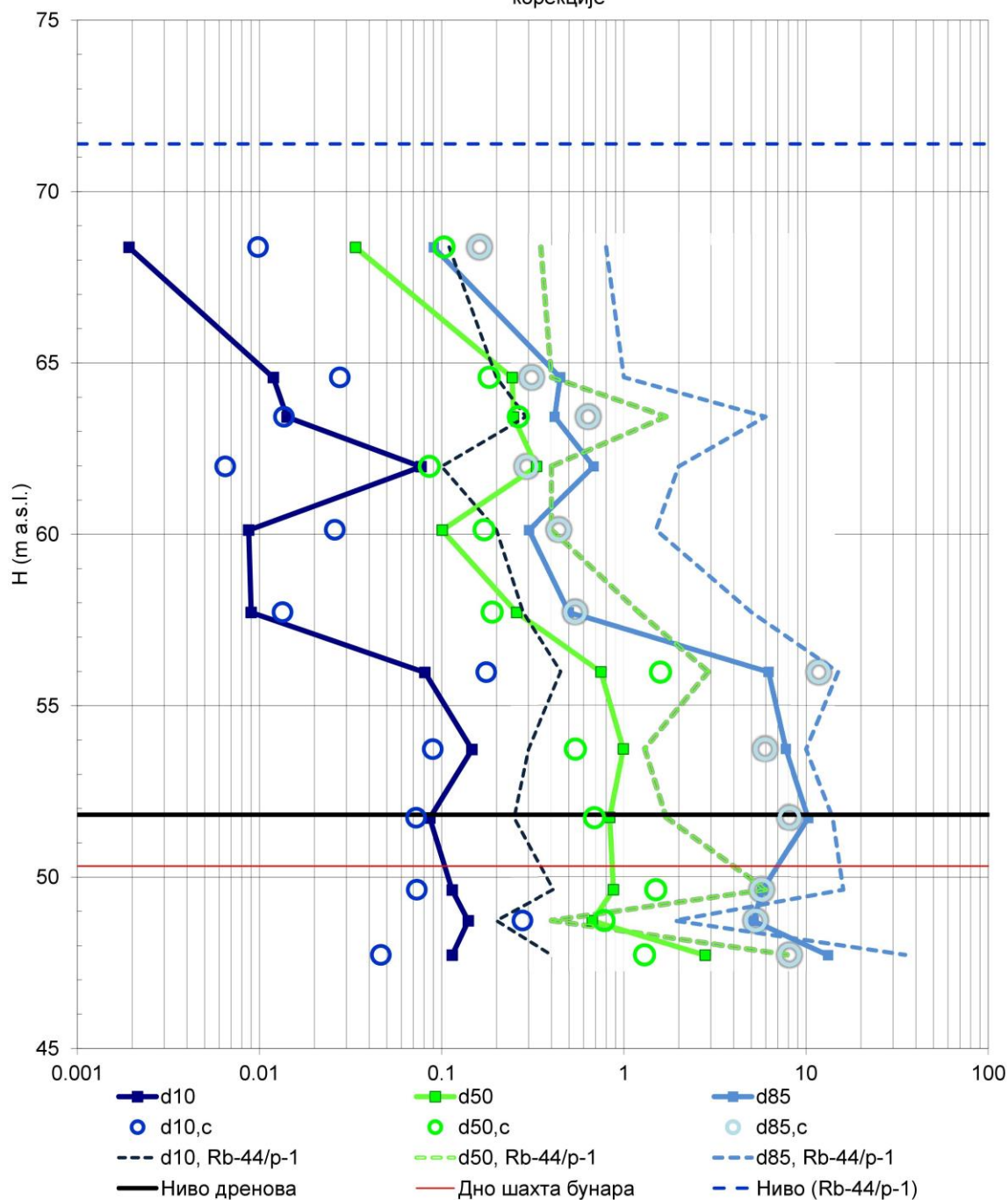
Резултати гранулометријских анализа узорака материјала узетог вентил кашиком и сржном цеви из бушотине за пијезометар Rb-44/p-1 и узорака из пијезометарске бушотине Rb-44/p-1s узетих континуалним бушењем сржном цеви, при чему су узорковани исти дубински интервали као при бушењу Rb-44/p-1 су дати на слици (Слика 69). Гранулометријски састав узорака растреситог (неконсолидованог) материјала узетих сржном цеви знатно је ситнозрнији од састава узорака из истих дубинских интервала узетих вентил кашиком. Гранулометријске анализе су спроведене стандардном методом у истој лабораторији за геомеханику (Зарић et al., 2018). Приликом одређивања коефицијената у корелацији датај једначином (29), утврђено је да се исте вредности коефицијената не могу применити за цео опсег пречника зрна. Добро поклапање за један сет вредности коефицијената C_1 , C_2 и C_3 је добијено када је d_{85} веће од 5mm, а d_{60}/d_{10} веће од 6, други сет вредности је коришћен када је d_{85} мање од 5mm, а ако је d_{85} веће од 5mm, а d_{60}/d_{10} мање од 6, није вршена корекција. Вредности константи C_1 , C_2 и C_3 у једначини (29) су дате у табели (Табела 5).

Табела 5 Вредности коефицијената у корелацији датај једначином (29)

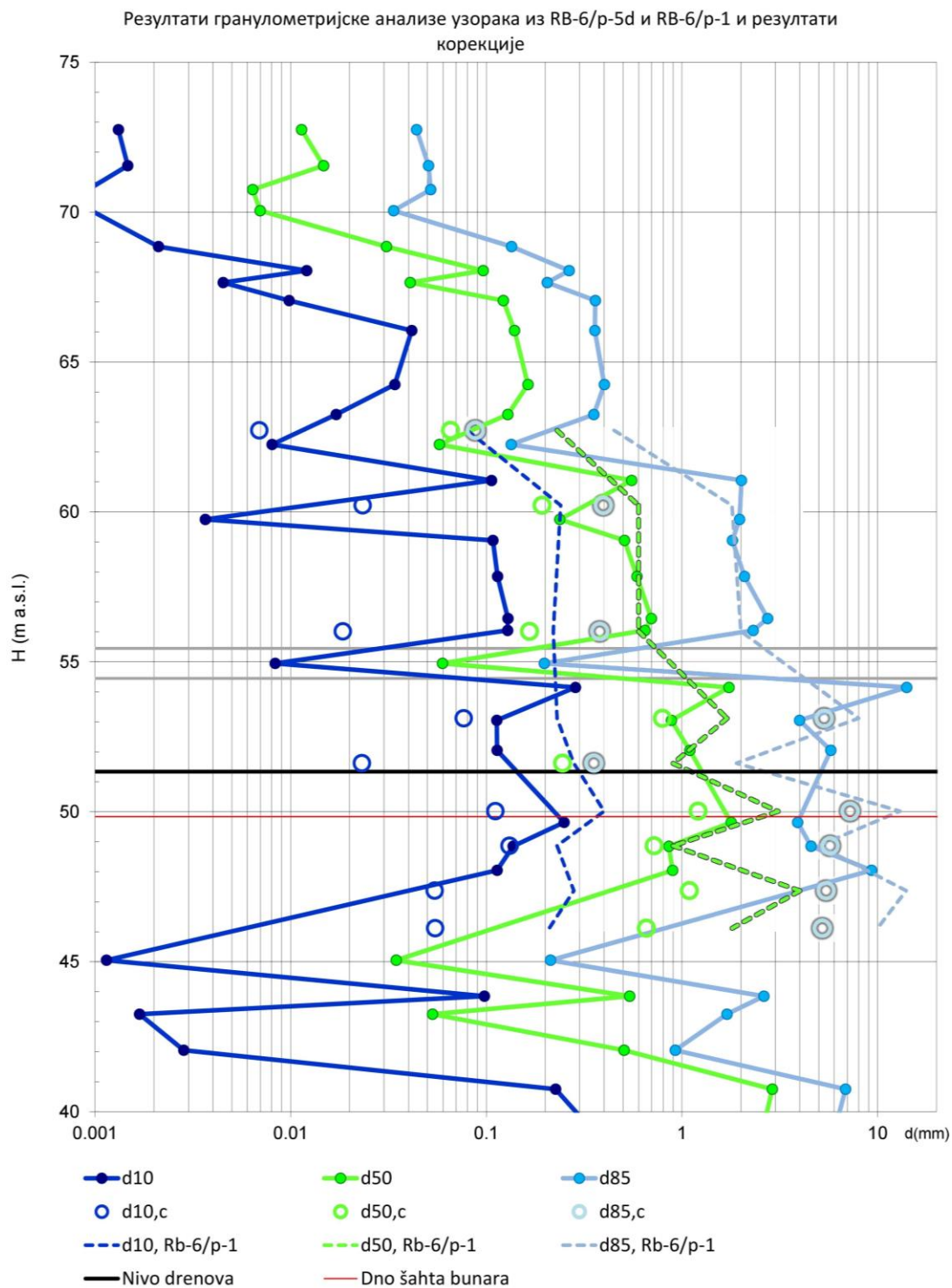
	C_1	C_2	C_3
$d_{85} > 5\text{mm}, d_{60}/d_{10} > 6$	3,4739	4,8697	6,9494
$d_{85} < 5\text{mm}$	0,3243	1,0701	0,7326

Једначина (29) је тестирана и на резултатима гранулометријских анализа узорака из бушотине Rb-6/p-1 тако што су резултати корекције упоређени са резултатима гранулометријских анализа узорака из Rb-6/p-5d. Пијезометар Rb-6/p-5d је израђен коришћењем само сржне цеви као и Rb-44/p-1s, на раздаљини од 3m од бушотине Rb-6/p-1, али дубински интервали из којих су узимани узорци нису били исти као у Rb-6/p-1. Резултати гранулометријских анализа и корекције су дати на следећој слици (Слика 70). Поклапање коригованих вредности карактеристичних пречника добијених из резултата гранулометријских анализа узорака из бушотине Rb-6/p-1 са резултатима гранулометријских анализа узорака из бушотине Rb-6/p-5d је задовољавајуће.

Резултати гранулометријске анализе узорка из RB-44/p-1 и RB-44/p-1s и резултати
 корекције



Слика 69 Резултати гранулометријских анализа узорка материјала узетог из бушотине за
 пијезометар Rb-44/p-1, некоригованих ($d_{10,Rb-44/p-1}$, $d_{50,Rb-44/p-1}$, $d_{85,Rb-44/p-1}$) и коригованих
 ($d_{10,c}$, $d_{50,c}$, $d_{85,c}$) и узорка из пијезометарске бушотине Rb-44/p-1s (d_{10} , d_{50} , d_{85})



Слика 70 Резултати гранулометријских анализа узорка материјала узетог из бушотине за
 пијезометар Rb-6/p-1, некоригованих ($d_{10,Rb-6/p-1}$, $d_{50,Rb-6/p-1}$, $d_{85,Rb-6/p-1}$) и коригованих ($d_{10,c}$,
 $d_{50,c}$, $d_{85,c}$) и узорка из пијезометарске бушотине Rb-6/p-5d (d_{10} , d_{50} , d_{85})

Корекција дата једначином (29) је примењена на све резултате гранулометријских анализа узорака из бушотина око Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 Rb-20. За генерисање просторног распореда параметара водоносне средине према статистичкој анализи гранулометријског састава узорака материјала коришћени су узорци са дубине веће од 15m, због тога што дренажи бунара каптирају водоносни слој испод те дубине. Кумулативне вероватноће према лог-нормалној расподели су рачунате за $d_{10,c}$, $d_{20,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$ и $d_{85,c}$ и поређене са вероватноћама од 10, 15, 20, 50, 60 и 85%, а параметри лог-нормалне расподеле су одређени тако да средње квадратно одступање израчунатих вероватноћа од 10, 15, 20, 50, 60 и 85% буде минимално. Резултати корекције гранулометријског састава узорака из бушотина око бунара Rb-15, Rb-16, Rb-20, Rb-8 и Rb-5m коришћењем једначине (29) и резултати статистичке анализе коригованих резултата дати су у табелама (Табела 6 – Табела 10).

Функција вероватноће за расподелу математичких очекивања и стандардних девијација из последње две колоне је израчуната заокруживањем вредности и одређивањем учестаности појављивања заокружених вредности. Нормална дистрибуција је дала најбоље подударање са дискретном расподелом вероватноће математичких очекивања и стандардних девијација у свим разматраним узорцима, а вероватноће за појединачне дискретне вредности су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне дискретне вредности. Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања и стандардних девијација лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за појаву заокружених вредности добијене су израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функција густине вероватноће нормалне расподеле, дати су на сликама (Слика 71 – Слика 76).

5.2.1.1.1 Rb-15

У табели 6 су дате кориговане вредности карактеристичних пречника и математичка очекивања и стандардне девијације за лог-нормалну расподелу за анализиране узорке (Табела 6). На графичким приказима (Слика 71 и Слика 72) дати су резултати статистичке обраде математичких очекивања и стандардних девијација из табеле 6.

Табела 6 Бушотине око Rb-15, интервали испод 15m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{15,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	$d_{85,c}$	$d_{60,c}$	$d_{50,c}$	$d_{15,c}$	$d_{10,c}$	$d_{60,c}/d_{10,c}$	$\mu (\ln x)$	$\sigma (\ln x)$
GS-54	14.9	16.7	15.8	1.8	58.37	2	0.6	0.55	0.4	0.33	1.82	-0.5952	0.3444
GS-54	16.7	17.2	16.95	0.5	57.22	7.51	2.78	0.49	0.07	0.06	50.01	-0.1958	2.5015

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

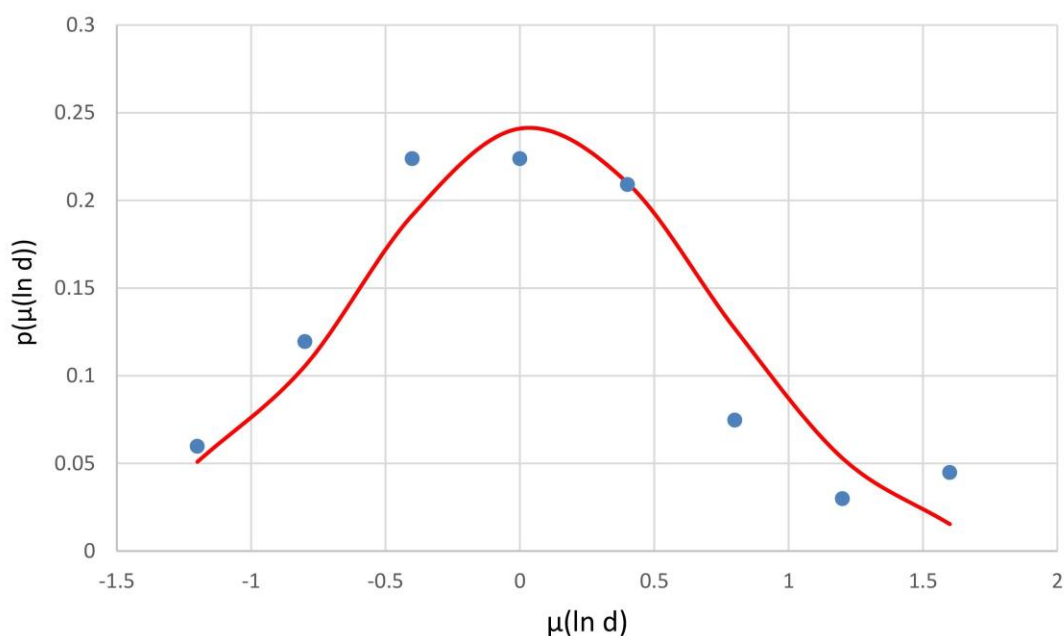
	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{15, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ (ln x)
GS-54	17.2	18.1	17.65	0.9	56.52	11.12	2.78	1.22	0.17	0.14	20.00	0.3645	2.0007
GS-54	22.1	23.7	22.9	1.6	51.27	7.72	2.78	1.08	0.09	0.06	45.01	0.1233	2.2697
GS-54	23.8	24.3	24.05	0.5	50.12	8.91	4.10	2.08	0.30	0.18	23.40	0.7169	1.7886
GS-54	24.3	25.7	25	1.4	49.17	7.22	3.13	1.69	0.14	0.11	28.90	0.4030	1.9936
Gs-57-1	17.1	17.6	17.35	0.5	52.95	3.94	2.08	0.97	0.04	0.03	60.01	-0.2597	2.3749
Gs-57-1	17.6	22.3	19.95	4.7	50.35	24.32	9.73	5.97	0.61	0.43	22.86	1.6543	1.8668
Gs-57-1	22.3	23.5	22.9	1.2	47.4	2.67	1.39	0.60	0.04	0.01	130.03	-0.6731	2.3588
Gs-57-1	23.6	24	23.8	0.4	46.5	3.47	2.08	1.22	0.02	0.02	120.03	-0.3904	2.8158
Gs-57-1	24.5	28.3	26.4	3.8	43.9	5.21	2.08	1.46	0.04	0.03	66.68	-0.0839	2.5102
PS-52	17.1	20.1	18.6	3	55.07	5.88	2.08	0.53		0.06	36.67	-0.2892	2.2883
PS-52	20.1	22.1	21.1	2	52.57	14.35	1.35	0.34		0.08	15.98	-0.4142	2.4488
PS-54	16.7	17.2	16.95	0.5	53.65	7.51	2.78	0.49		0.06	50.01	-0.2172	2.5476
PS-54	17.2	18.1	17.65	0.9	52.95	11.12	2.78	1.22		0.14	20.00	0.3717	1.9819
PS-54	22.1	22.4	22.25	0.3	48.35	7.72	2.78	1.08		0.06	45.01	0.1595	2.1838
PS-54	23.8	24.3	24.05	0.5	46.55	8.91	4.10	2.08		0.18	23.40	0.7409	1.7321
PS-54	24.3	25.7	25	1.4	45.6	7.22	3.13	1.69		0.11	28.90	0.4832	1.7974
PS-54-1	16.3	17.9	17.1	1.6	54.96	7.06	2.29	0.80		0.03	78.81	-0.1492	2.4710
PS-54-1	20.8	22.5	21.65	1.7	50.41	10.54	1.81	0.41		0.06	32.31	-0.3556	2.5500
PS-54-1	24.3	28.3	26.3	4	45.76	17.60	2.64	0.97		0.04	71.07	0.1144	2.7348
PS-55	15.2	16.8	16	1.6	56.83	4.54	2.38	1.24		0.04	64.34	0.1174	1.8745
PS-55	17.5	19.1	18.3	1.6	54.53	8.31	2.08	0.58		0.03	83.35	-0.3264	2.6862
PS-55	20.3	22.5	21.4	2.2	51.43	18.33	1.81	1.09		0.34	5.39	0.2837	1.4677
PS-55	24.1	24.9	24.5	0.8	48.33	9.78	3.06	1.74		0.08	38.64	0.4811	2.0327
PS-56	14.8	15.9	15.35	1.1	57.32	3.22	2.08	1.13		0.01	146.70	0.2026	1.1769
PS-56	18.5	21.5	20	3	52.67	1.01	0.16	0.22		0.04	4.41	-1.7727	1.5129
PS-56	23.8	24.8	24.3	1	48.37	16.18	4.52	1.89		0.22	20.62	0.8212	1.9662
PS-56	24.9	27.6	26.25	2.7	46.42	26.53	8.34	2.44		0.45	18.34	1.2929	2.0124
PS-56	27.6	28.7	28.15	1.1	44.52	10.42	2.08	0.65		0.17	12.00	0.0652	1.9877
PS-57	15.7	16.3	16	0.6	57.6	6.30	2.43	0.80		0.05	48.58	-0.0759	2.2524

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{15, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ (ln x)
PS-57	17.4	17.9	17.65	0.5	55.95	4.19	1.88	0.80		0.03	62.98	-0.2547	2.1645
PS-57	22.5	23.1	22.8	0.6	50.8	4.01	2.08	1.24		0.02	86.69	0.2826	1.2128
PS-57	23.1	24.7	23.9	1.6	49.7	5.16	2.36	1.20		0.04	64.72	0.0861	2.0192
PS-57	25.6	26.1	25.85	0.5	47.75	9.39	4.86	2.09		0.30	16.29	0.8648	1.6289
PS-57	26.1	28.1	27.1	2	46.5	4.42	2.78	1.59		0.03	110.02	0.5457	1.1061
PS-57	28.1	28.4	28.25	0.3	45.35	2.06	0.90	0.46		0.01	107.72	-0.8835	2.0858
PS-57-1	17.1	17.6	17.35	0.5	56.35	3.94	2.08	0.97		0.03	60.01	-0.1114	2.0133
PS-57-1	17.6	22.3	19.95	4.7	53.75	24.32	9.73	5.97		0.43	22.86	1.7218	1.7001
PS-57-1	22.3	23.5	22.9	1.2	50.8	2.67	1.39	0.60		0.01	130.03	-0.6402	2.2794
PS-57-1	23.5	23.6	23.55	0.1	50.15	3.47	2.08	1.22		0.02	120.03	0.2720	1.1181
PS-57-1	24.5	28.3	26.4	3.8	47.3	6.95	2.78	1.95		0.06	50.01	0.6548	1.3233
PS-57-2	15.5	16.7	16.1	1.2	57.42	25.71	1.74	0.81		0.29	6.00	0.1388	1.5878
PS-57-2	16.7	19	17.85	2.3	55.67	10.77	6.95	3.86		0.14	48.01	1.4056	1.2056
PS-57-2	19	21.1	20.05	2.1	53.47	0.35	0.32	0.31		0.20	1.60	-1.1690	0.1037
PS-57-2	24.1	25.8	24.95	1.7	48.57	8.30	5.56	3.09		0.18	31.51	1.0297	1.5716
PS-57-2	25.8	28.3	27.05	2.5	46.47	6.80	2.54	1.37		0.04	60.29	0.2114	2.0844
PS-59	14.4	16.8	15.6	2.4	56.56	2.00	0.50	0.48	0.32	0.28	1.79	-0.7611	0.3763
PS-59	16.8	19	17.9	2.2	54.26	5.87	2.22	1.02	0.06	0.05	45.01	-0.0715	2.2957
PS-59	20	20.8	20.4	0.8	51.76	1.56	1.11	0.66	0.31	0.28	4.00	-0.2941	0.8535
PS-59	20.8	23	21.9	2.2	50.26	5.56	1.39	0.49	0.09	0.07	20.00	-0.4031	2.0318
PS-59	23	29	26	6	46.16	4.25	1.95	0.92	0.06	0.05	39.29	-0.2112	2.1941
PS-60	14.9	16.7	15.8	1.8	57.7	10.62	2.57	1.18		0.21	12.44	0.3863	1.7906
PS-60	23.5	24.6	24.05	1.1	49.45	5.10	1.53	0.83		0.09	16.37	-0.1197	1.7619
PS-60	25	29.1	27.05	4.1	46.45	5.61	2.57	1.15		0.04	59.47	0.0882	2.1073
RB-15-P-1	16	18.5	17.25	2.5	58.36	0.40	0.30	0.28		0.13	2.31	-1.3183	0.4559
RB-15-P-1	18.5	19.2	18.85	0.7	56.76	6.25	1.88	0.75		0.05	37.79	-0.1756	2.1844
RB-15-P-1	19.2	20.8	20	1.6	55.61	4.41	1.53	0.42		0.03	53.65	-0.6272	2.4112
RB-15-P-1	20.8	21.5	21.15	0.7	54.46	4.40	1.32	0.62		0.04	31.59	-0.4270	2.0586
RB-15-P-1	21.5	23.7	22.6	2.2	53.01	0.40	0.29	0.27		0.13	2.23	-1.3492	0.4674

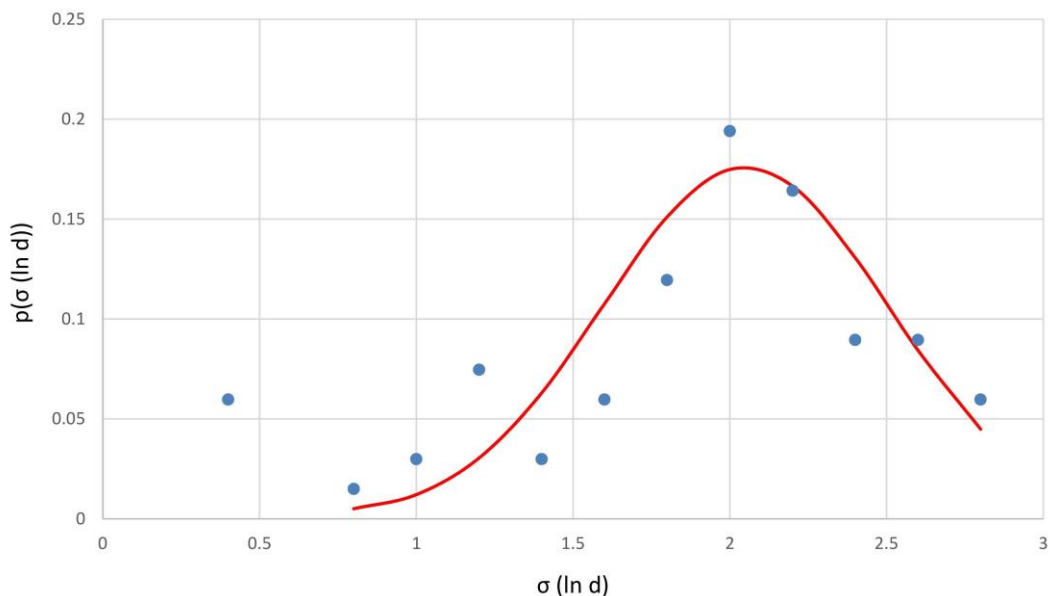
*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{15, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ (ln x)
RB-15-P-1	23.7	26	24.85	2.3	50.76	10.92	1.39	0.18		0.05	28.01	-0.7220	2.8764
RB-15-P-1	26	29	27.5	3	48.11	8.93	2.78	1.25		0.04	70.02	0.1936	2.3331
RB-15-P-1	29	30.2	29.6	1.2	46.01	7.58	1.67	0.74		0.02	91.69	-0.3253	2.5955
RB-15-P-2	13.9	17.6	15.75	3.7	57.53	2.50	0.55	0.40		0.19	2.89	-0.7968	0.9054
RB-15-P-2	20	20.7	20.35	0.7	52.93	5.37	1.18	0.21		0.02	51.78	-0.9940	2.7423
RB-15-P-2	22	24	23	2	50.28	47.95	1.60	0.83		0.37	4.35	0.0531	1.0752
RB-15-P-2	24	26	25	2	48.28	7.78	2.08	0.97		0.04	50.01	-0.0198	2.2738



Слика 71 Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће њихове појаве према нормалној расподели ($\mu(\mu(\ln d)) = -0,15$, $\sigma(\mu(\ln d)) = 0,65$) - црвена крива – Rb-15

Вероватноће за појаву заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.



Слика 72 Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,2) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће њихове појаве према нормалној расподели ($\mu(\sigma(\ln d)) = 1,95$, $\sigma(\sigma(\ln d)) = 0,45$) - црвена крива – Rb-15

Вероватноће за појаву заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,2) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.

5.2.1.1.2 Rb-16

У табели 7 су дате кориговане вредности карактеристичних пречника и математичка очекивања и стандардне девијације за лог-нормалну расподелу за анализирани узорке (Табела 7). На графичким приказима (Слика 73 и Слика 74) дати су резултати статистичке обраде математичких очекивања и стандардних девијација из табеле.

Табела 7 Бушотине око Rb-16, интервали испод 15m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{15,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	$d_{85,c}$	$d_{60,c}$	$d_{50,c}$	$d_{15,c}$	$d_{10,c}$	$d_{60,c}/d_{10,c}$	$\mu(\ln x)$	$\sigma(\ln x)$
P-UT-16-3	15.2	16	15.6	0.8	58.42	0.27	0.10	0.09		0.004	10.71	-0.7529	1.8644
P-UT-16-3	16	18.3	17.15	2.3	56.87	0.44	0.05	0.05		0.005	5.00	-1.1669	1.9195
P-UT-16-3	18.3	19.3	18.8	1	55.22	0.12	0.07	0.09		0.014	2.21	-0.7716	0.9526
P-UT-16-3	20	21.5	20.75	1.5	53.27	0.02	0.01	0.01		0.001	5.67	-2.7804	1.3875

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

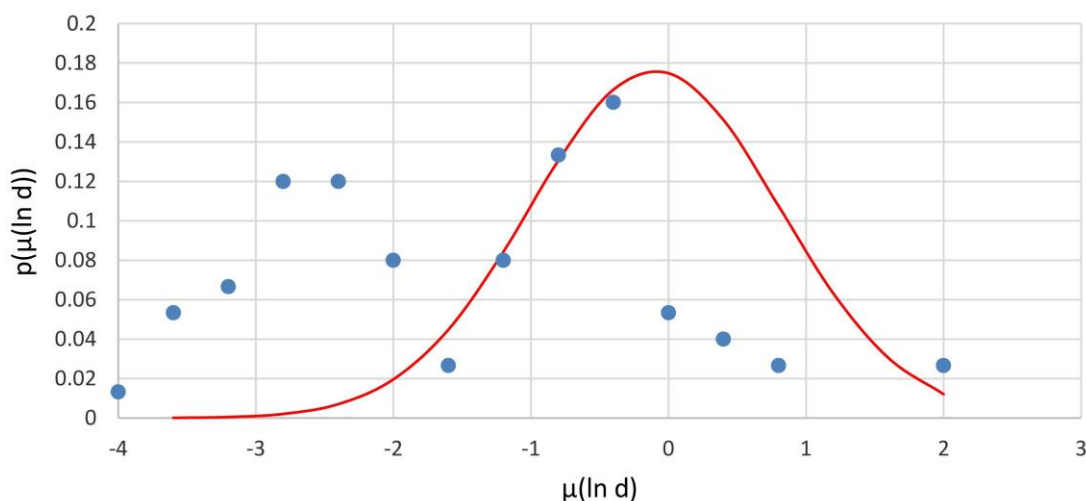
	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{15, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ (ln x)
P-UT-16-3	21.5	23.4	22.45	1.9	51.57	2.76	0.59	0.12		0.017	17.65	-1.5446	2.5323
P-UT-16-3	23.4	24.5	23.95	1.1	50.07	0.24	0.02	0.02		0.001	7.60	-2.1474	2.2214
P-UT-16-3	24.5	25.5	25	1	49.02	0.02	0.01	0.02		0.001	7.50	-2.5732	1.4052
P-UT-16-3	27	28	27.5	1	46.52	1.28	0.56	0.28		0.009	32.50	-1.3562	2.0521
P-UT-16-3	30	31	30.5	1	43.52	2.89	1.25	0.64		0.043	14.44	-0.4614	1.8246
PS-79-1	15.5	20	17.75	4.5	55.97	8.00	0.90	0.65	0.25	0.200	4.5	-0.3578	1.0736
PS-79-1	20	23	21.5	3	52.22	0.38	0.12	0.15	0.02	0.013	4.24	-2.2836	1.5766
PS-79-1	23	25	24	2	49.72	0.55	0.11	0.15	0.02	0.012	4.00	-2.2969	1.7379
PS-79-1	25	25.4	25.2	0.4	48.52	0.12	0.07	0.09	0.01	0.007	4.22	-3.0065	1.5072
PS-79-1	25.4	26.5	25.95	1.1	47.77	9.73	0.69	0.29	0.06	0.035	10.00	-0.8722	2.2416
PS-79-1	27	33.5	30.25	6.5	43.47	4.34	1.74	0.73	0.08	0.054	16.00	-0.2772	2.0723
PS-79-2	15.6	19.7	17.65	4.1	55.69	0.36	0.17	0.23	0.03	0.020	3.70	-1.9922	1.4441
PS-79-2	19.7	24	21.85	4.3	51.49	0.12	0.07	0.07	0.01	0.005	6.22	-3.1193	1.5360
PS-79-2	24.8	32.8	28.8	8	44.54	2.58	0.63	0.22	0.03	0.017	18.89	-1.3022	2.3020
PS-79-3	15	16.4	15.7	1.4	58.23	0.68	0.12	0.15	0.03	0.022	2.47	-2.1042	1.4769
PS-79-3	16.4	16.8	16.6	0.4	57.33	12.09	2.02	0.85	0.19	0.146	6.90	0.1531	1.9221
PS-79-3	16.8	21	18.9	4.2	55.03	6.49	1.39	0.65	0.14	0.093	7.50	-0.2110	1.8385
PS-79-3	21	24.3	22.65	3.3	51.28	0.07	0.05	0.06	0.01	0.004	6.00	-3.4247	1.6388
PS-79-3	25	32.8	28.9	7.8	45.03	3.11	0.90	0.40	0.03	0.018	24.62	-0.9379	2.3641
PS-79-4	15	15.8	15.75	15.4	0.8	0.16	0.10	0.14	0.02	0.019	2.36	-2.4811	1.1529
PS-79-4	15.8	16.8	16.65	16.3	1	0.22	0.14	0.20	0.03	0.020	3.16	-2.2150	1.3167
PS-79-4	16.8	17.5	17.35	17.15	0.7	0.37	0.12	0.11	0.02	0.018	3.00	-2.3290	1.2910
PS-79-4	17.5	18.3	18.15	17.9	0.8	6.00	1.40	0.90	0.37	0.300	4.67	0.0748	1.1871
PS-79-4	18.3	18.5	18.45	18.4	0.2	0.18	0.09	0.11	0.02	0.013	2.92	-2.6342	1.2856
PS-79-4	18.5	20.4	19.95	19.45	1.9	0.12	0.06	0.08	0.01	0.008	3.53	-3.0361	1.4054
PS-79-4	20.4	22.2	21.35	21.3	1.8	0.05	0.04	0.05	0.01	0.004	4.17	-3.6814	1.4391
PS-79-4	22.2	25.7	23.95	23.95	3.5	0.33	0.07	0.09	0.01	0.008	4.00	-2.7625	1.6695
PS-79-4	26.7	32.5	29.65	29.6	5.8	8.86	4.17	2.19	0.36	0.313	6.67	0.8120	1.5967
PS-79-5	14.6	15.7	15.15	1.1	57.39	15.64	2.08	1.31	0.21	0.156	6.67	0.3560	1.9292

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{15, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ (ln x)
PS-79-5	15.7	17.4	16.55	1.7	55.99	0.32	0.15	0.20	0.03	0.022	3.00	-2.0986	1.3506
PS-79-5	17.4	17.8	17.6	0.4	54.94	0.55	0.15	0.17	0.02	0.016	4.00	-2.0854	1.6032
PS-79-5	17.8	17.95	17.875	0.15	54.665	5.21	1.03	0.79	0.23	0.174	20.00	-0.1815	1.3536
PS-79-5	18.4	18.7	18.55	0.3	53.99	0.04	0.04	0.05	0.01	0.003	6.00	-3.5791	1.2007
PS-79-5	18.7	20.1	19.4	1.4	53.14	0.29	0.10	0.12	0.02	0.008	5.38	-2.5218	1.5276
PS-79-5	20.1	21.8	20.95	1.7	51.59	9.27	1.39	0.65	0.16	0.093	7.50	-0.1536	1.8906
PS-79-5	22.5	23	22.75	0.5	49.79	6.00	0.50	0.40	0.16	0.100	5.00	-0.9113	0.9984
PS-79-5	23	25	24	2	48.54	9.57	0.90	0.43	0.07	0.069	6.54	-0.5634	2.0606
PS-79-6	15.1	19.4	17.25	4.3	56.74	5.21	1.04	0.51	0.10	0.078	6.67	-0.4655	1.8246
PS-79-6	19.4	20.9	20.15	1.5	53.84	2.88	1.39	0.67	0.10	0.048	14.50	-0.4124	1.8347
PS-79-6	20.9	21.2	21.05	0.3	52.94	4.63	0.69	0.32	0.04	0.029	12.00	-0.9508	2.1928
PS-79-6	21.2	22	21.6	0.8	52.39	0.04	0.04	0.04	0.00	0.003	5.80	-3.8477	1.6417
PS-79-6	23.5	24	23.75	0.5	50.24	0.11	0.07	0.09	0.01	0.006	5.50	-3.0356	1.5534
PS-79-6	24.5	25.2	24.85	0.7	49.14	0.13	0.11	0.15	0.02	0.012	4.00	-2.6327	1.4924
PS-79-6	26	32.5	29.25	6.5	44.74	5.96	2.08	0.83	0.12	0.089	11.67	-0.0285	1.9696
PS-79-7	16.5	17.6	17.05	1.1	56.23	7.00	0.90	0.60	0.30	0.220	4.09	-0.3851	0.9203
PS-79-7	17.8	18.2	18	0.4	55.28	0.55	0.11	0.13	0.02	0.012	4.00	-2.3271	1.7086
PS-79-7	18.5	20.1	19.3	1.6	53.98	0.06	0.04	0.04	0.01	0.005	3.60	-3.5924	1.3277
PS-79-7	20.3	21.5	20.9	1.2	52.38	0.08	0.06	0.07	0.01	0.007	3.63	-3.1996	1.3851
PS-79-7	21.5	22.2	21.85	0.7	51.43	0.35	0.10	0.10	0.05	0.010	4.23	-2.3239	0.8651
PS-79-7	22.2	23.2	22.7	1	50.58	0.23	0.10	0.11	0.02	0.011	3.85	-2.5659	1.3914
PS-79-7	23.2	24.5	23.85	1.3	49.43	0.15	0.07	0.09	0.01	0.008	3.89	-2.9318	1.4492
PS-79-7	24.5	31.2	27.85	6.7	45.43	1.91	0.69	0.24	0.03	0.017	20.00	-1.2782	2.2182
PS-82	14.6	15.2	14.9	0.6	58.57	5.33	1.60	0.27	0.02	0.015	52.17	-0.8922	2.9422
PS-82	15.6	18.6	17.1	3	56.37	8.11	1.39	0.24	0.03	0.023	30.00	-0.8085	2.8516
PS-82	19.2	21.5	20.35	2.3	53.12	0.10	0.09	0.12	0.02	0.017	2.33	-2.7234	1.1829
PS-82	21.5	22.7	22.1	1.2	51.37	0.15	0.11	0.15	0.03	0.024	2.00	-2.4294	1.0868
PS-82	22.7	23.5	23.1	0.8	50.37	3.57	1.53	0.45	0.04	0.028	27.27	-0.6692	2.4007
PS-82	25.8	28.3	27.05	2.5	46.42	2.87	1.53	0.94	0.27	0.021	36.36	-0.0262	1.2133

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{15, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ (ln x)
PS-82	29.2	31.5	30.35	2.3	43.12	15.00	0.40	0.30	0.20	0.160	2.50	-1.1151	0.5594
PS-83	15.8	17.2	16.5	1.4	57.06	6.02	4.17	2.60	0.23	0.139	15.00	0.6586	1.8439
PS-83	17.2	19.4	18.3	2.2	55.26	5.56	2.08	0.49	0.05	0.052	20.00	-0.3686	2.3826
PS-83	20.3	21.6	20.95	1.3	52.61	0.10	0.07	0.10	0.02	0.015	2.20	-2.8113	1.0261
PS-83	21.6	23.7	22.65	2.1	50.91	2.55	1.39	0.02		0.012	60.00	-1.9685	4.1276
PS-83	24.5	25	24.75	0.5	48.81	4.74	1.74	0.77	0.02	0.020	44.00	-0.4665	2.6823
PS-83	25.1	26.7	25.9	1.6	47.66	16.68	11.12	6.62	1.11	0.889	6.25	1.7924	1.4394
PS-83	27.5	28.2	27.85	0.7	45.71	17.00	11.00	7.00	4.50	2.500	4.40	2.0973	0.7687
PS-83	28.4	32.6	30.5	4.2	43.06	7.82	3.47	2.13	0.17	0.109	16.00	0.5496	1.9853
RB-16-P-3	13.1	16.5	14.8	3.4	59.09	4.14	1.53	0.56		0.035	21.82	-0.4691	2.1906
RB-16-P-3	16.5	17.5	17	1	56.89	5.00	0.48	0.41		0.230	2.09	-0.8780	0.4833
RB-16-P-3	17.5	20.4	18.95	2.9	54.94	13	1.5	0.65		0.260	5.77	0.0126	1.6965
RB-16-P-3	21.4	22.9	22.15	1.5	51.74	7	0.39	0.35		0.170	2.29	-1.0651	0.5432

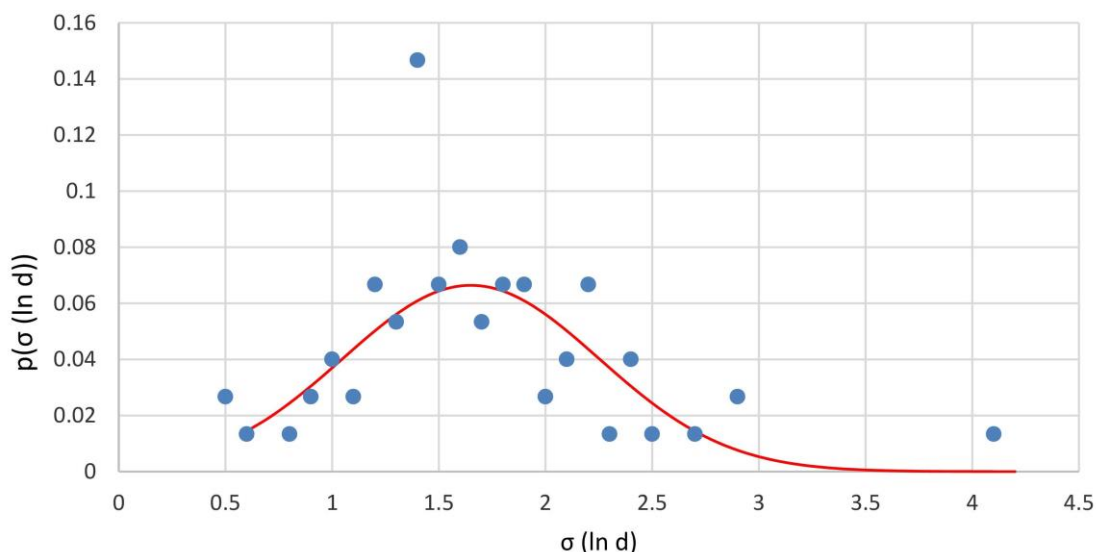


Слика 73 Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће њихове појаве према нормалној расподели ($\mu(\ln d) = -0,3$, $\sigma(\ln d) = 0,9$) - црвена крива – Rb-16.

Вероватноће за појаву заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су

добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.

На слици (Слика 73) се може уочити да постоје две групе узорака тј. математичких очекивања са различитим расподелама. Као релевантна за моделирање просторног распореда параметара водоносне средине узета је расподела са већим пречницима, чији су параметри дати у објашњењу испод слике (Слика 73).



Слика 74 Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,1) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће њихове појаве према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\sigma(\ln d))=1,6$, $\sigma(\sigma(\ln d))=0,6$) – црвена крива – Rb-16.

Вероватноће за појаву заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,1) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.

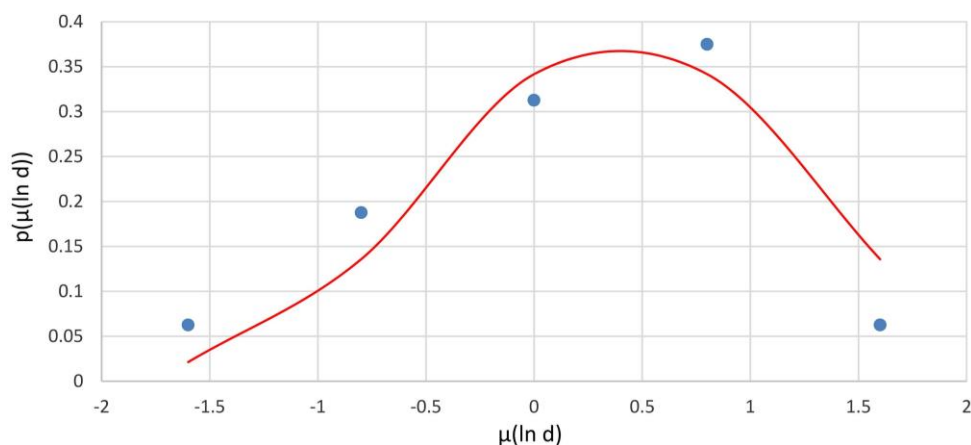
5.2.1.1.3 Rb-20

У табели (Табела 8) дате су кориговане вредности карактеристичних пречника и математичка очекивања и стандардне девијације за лог-нормалну расподелу за анализиране узорке. На графичким приказима (Слика 75 и Слика 76) дати су резултати статистичке обраде математичких очекивања и стандардних девијација из табеле.

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

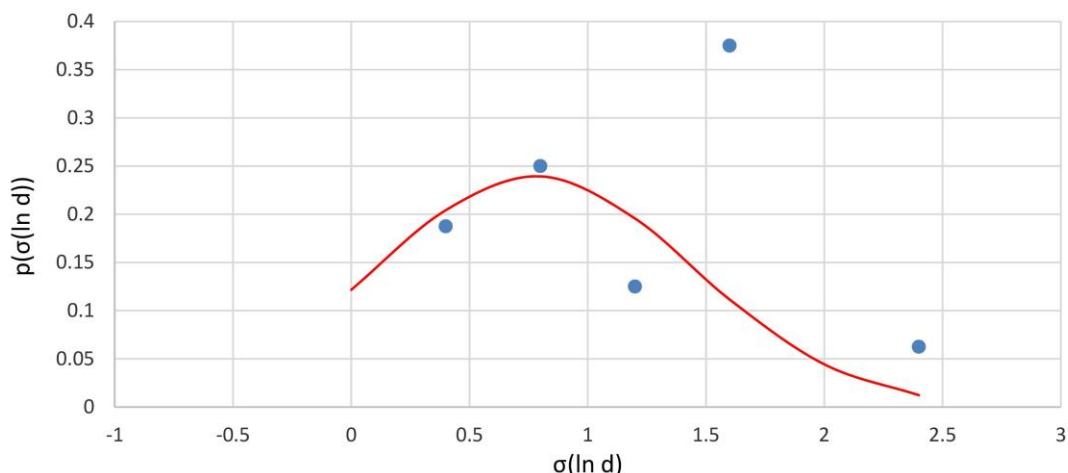
Табела 8 Бушотине око Rb-20, интервали испод 15m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{15,c}$, $d_{20,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	$d_{85,c}$	$d_{60,c}$	$d_{50,c}$	$d_{20,c}$	$d_{15,c}$	$d_{10,c}$	$d_{60,c}/d_{10,c}$	$\mu (\ln x)$	$\sigma (\ln x)$
PS-183	14	15.5	14.75	1.5	-14.75	8.2	1	0.7	0.4			2.50	-0.2406	0.6465
PS-183	15.5	16	15.75	0.5	-15.75	0.77	0.59	0.56	0.21			2.81	-0.5952	0.3239
PS-183	16	16.8	16.4	0.8	-16.4	9.5	0.9	0.64	0.35			2.57	-0.3433	0.6545
PS-183	16.8	19	17.9	2.2	-17.9	0.5	0.32	0.31	0.15			2.13	-1.2220	0.5142
PS-183	19	21	20	2	-20	13	3.6	1.4	0.38			9.47	0.6925	1.6918
PS-183	21	28	24.5	7	-24.5	20	5.7	3.2	0.41			13.90	1.2367	1.7117
PS-190-3	14.7	23	18.85	8.3	-18.85	8	4	3	0.41	0.4	0.35	11.43	0.8540	1.6395
PS-190-3	23.4	25.1	24.25	1.7	-24.25	0.8	1	0.7	0.52	0.5	0.42	2.38	-0.3565	0.4098
PS-190-3	25.1	26.8	25.95	1.7	-25.95	6	3	2.1	0.55	0.5	0.42	7.14	0.6744	1.2928
PS-190-12	11.6	17.5	14.55	5.9	-14.55	5.5	0.71	0.64			0.26	2.73	-0.4788	0.6751
PS-190-12	17.5	20.5	19	3	-19	13	4	1.9			0.5	8.00	0.8884	1.5133
P-UT-20-2	11.3	15.2	13.25	3.9	-13.25	5.5	1.1	0.69			0.28	3.93	-0.1651	1.2201
P-UT-20-2	15.2	16	15.6	0.8	-15.6	11	2.5	1.4			0.21	11.90	0.4530	1.7398
P-UT-20-2	16	17.3	16.65	1.3	-16.65	1.5	0.65	0.54			0.18	3.61	-0.6180	0.9094
P-UT-20-2	17.3	19	18.15	1.7	-18.15	21	3.5	1.3			0.15	23.33	0.5525	2.2484
PS-191	14.5	22	18.25	7.5	-18.25	11	2.2	1			0.3	7.33	0.3311	1.6385



Слика 75 Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\mu (\ln d)) = 0,0$, $\sigma(\mu (\ln d)) = 0,8$) - црвена крива – Rb-20.

Вероватноће за појаву заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.



Слика 76 Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\sigma(\ln d))=0,58$, $\sigma(\sigma(\ln d))=0,66$) - црвена крива – Rb-20

Вероватноће за појаву заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.

5.2.1.1.4 Rb-8

У табели (Табела 9) су дате кориговане вредности карактеристичних пречника и математичка очекивања и стандардне девијације за лог-нормалну расподелу за анализиране узорке. На графичким приказима (Слика 77 и Слика 78) дати су резултати статистичке обраде математичких очекивања и стандардних девијација из табеле.

Табела 9 Бушотине око Rb-8, интервали испод 15 т дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу

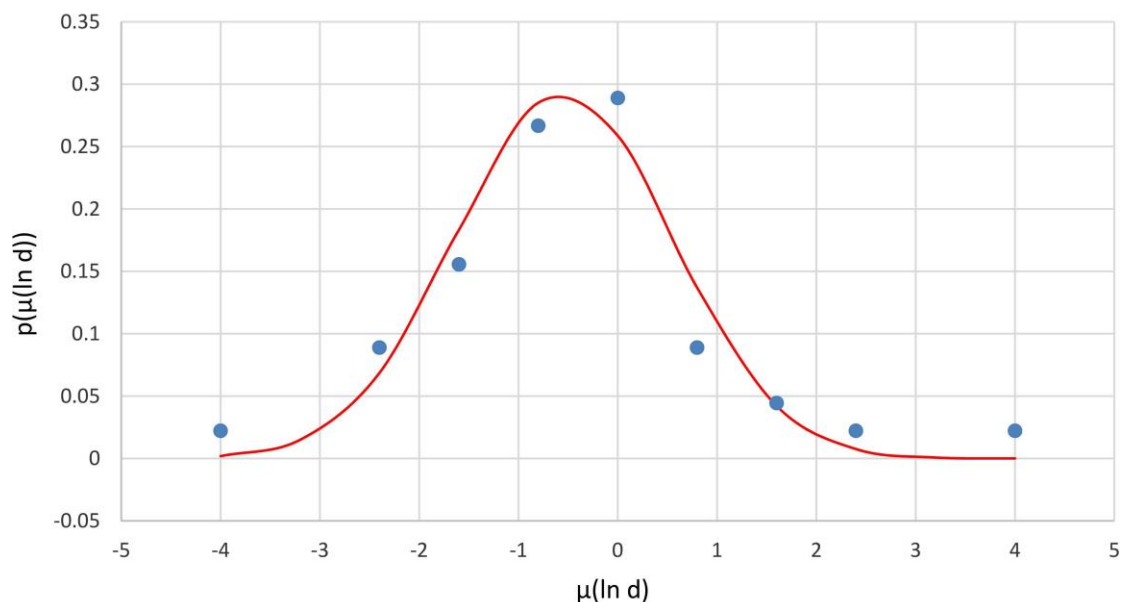
	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	$d_{85,c}$	$d_{60,c}$	$d_{50,c}$	$d_{10,c}$	$d_{60,c}/d_{10,c}$	$\mu(\ln x)$	$\sigma(\ln x)$
PS-127	15.1	16.3	15.7	1.2	56.28	0.61	0.29	0.36	0.04	8.11	-1.4329	1.2887
PS-127	16.3	17.4	16.85	1.1	55.13	6.8	3.3	1.9	0.16	20.00	0.5877	1.6057

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ (ln x)
PS-127	17.4	18.7	18.05	1.3	53.93	14.9	4.5	2.3	0.16	28.01	0.8507	1.9849
PS-127	18.7	19.4	19.05	0.7	52.93	5.4	2.6	1.4	0.08	33.69	0.2964	1.7654
PS-127	21.5	25.8	23.65	4.3	48.33	6.3	2.8	1.6	0.05	60.01	0.3980	1.7789
PS-16	14.4	19.0	16.7	4.6	55.28	6.9	2.5	1.3	0.11	22.23	0.2797	1.8163
PS-16	20.6	25.0	22.8	4.4	49.18	15.6	2.8	1.0	0.07	37.51	0.2462	2.4109
PS-27	14.5	15.5	15.0	1	56.98	0.43	0.24	0.26	0.01	17.80	-1.4753	0.6391
PS-27	16.0	17.1	16.55	1.1	55.43	8.6	2.7	1.1	0.04	61.55	0.1324	2.3275
PS-27	17.1	17.65	17.38	0.55	54.61	32.0	11.0	6.9	2.1	5.24	2.0630	1.2116
PS-27	20.5	21.0	20.75	0.5	51.23	3.4	2.1	0.99	0.01	186.7	0.0801	1.4117
PS-27	21.0	23.1	22.05	2.1	49.93	10.3	6.3	3.1	0.20	31.12	1.0818	1.7186
PS-27	23.1	25.45	24.28	2.35	47.71	90.1	69.5	45.1	12.9	5.40	3.8219	0.9035
PS-29	13.0	15.3	14.15	2.3	57.83	0.80	0.23	0.24	0.02	9.88	-1.6578	1.5150
PS-29	15.3	16.8	16.05	1.5	55.93	6.1	3.4	2.3	0.39	8.72	0.8089	1.1762
PS-29	16.8	18.7	17.75	1.9	54.23	0.55	0.19	0.21	0.03	6.95	-1.8150	1.3024
PS-29	18.7	19.2	18.95	0.5	53.03	15.3	7.6	4.3	0.42	18.19	1.4392	1.5615
PS-29	20.4	22.6	21.5	2.2	50.48	4.3	2.2	1.1	0.01	168.79	0.1766	1.4985
PS-29	22.6	23.8	23.2	1.2	48.78	16.1	11.8	7.1	0.91	12.94	1.9074	1.2507
PS-29	23.8	25.25	24.53	1.45	47.46	8.6	2.6	1.2	0.04	63.17	0.1750	2.2876
RB-8/P-1	14.4	16.3	15.35	1.9	56.15	0.48	0.16	0.20	0.03	5.13	-1.9012	1.2382
RB-8/P-1	16.3	17.6	16.95	1.3	54.55	0.72	0.15	0.17	0.02	9.14	-2.0215	1.6490
RB-8/P-1	17.6	18.2	17.9	0.6	53.6	5.4	1.7	0.57	0.07	25.61	-0.2889	2.0873
RB-8/P-1	18.2	19.3	18.75	1.1	52.75	15.0	1.1	0.58	0.20	5.50	-0.2971	1.3861
RB-8/P-1	19.3	21.8	20.55	2.5	50.95	0.12	0.09	0.11	0.02	4.33	-2.6281	0.9689
RB-8/P-1	21.8	23.0	22.4	1.2	49.1	10.0	0.70	0.35	0.12	5.83	-0.7593	1.4949
RB-8/P-1	23.0	24.3	23.65	1.3	47.85	6.5	1.5	0.57	0.03	42.87	-0.4237	2.3572
RB-8/P-1	24.3	25.5	24.9	1.2	46.6	4.6	1.5	0.56	0.07	20.96	-0.3642	1.9597
RB-8/P-1	25.5	26.2	25.85	0.7	45.65	7.3	1.5	0.44	0.02	66.68	-0.5907	2.6639
RB-8/P-2	14.7	17.0	15.85	2.3	55.39	0.29	0.13	0.14	0.02	6.90	-2.2083	1.1421
RB-8/P-2	17.0	18.2	17.6	1.2	53.64	5.8	1.4	0.58	0.12	12.00	-0.2545	1.8068

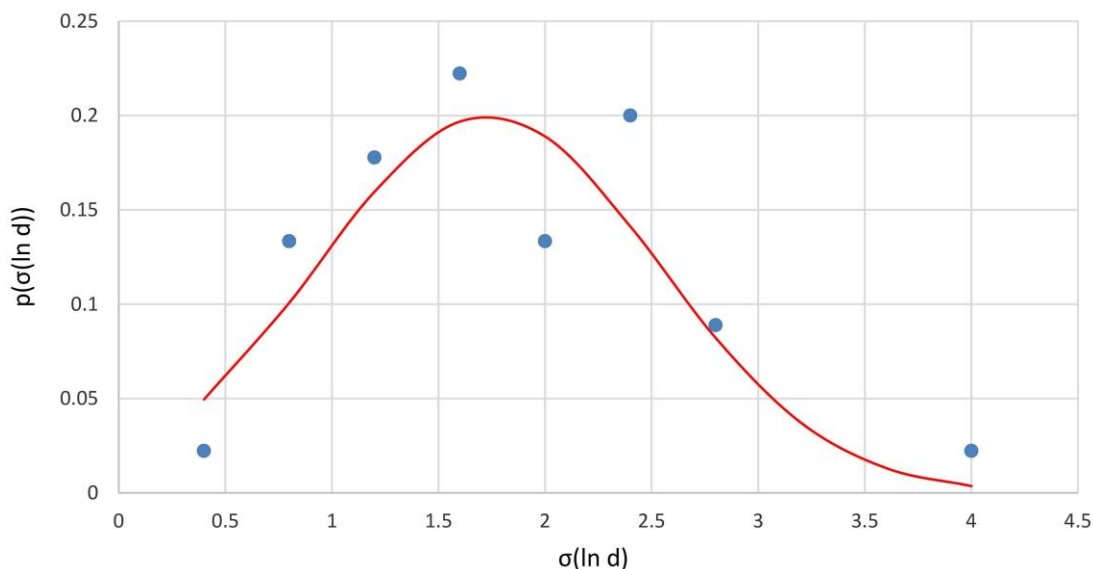
*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ (ln x)
RB-8/P-2	18.2	19.2	18.7	1	52.54	10.6	1.4	0.35	0.06	25.01	-0.4991	2.4982
RB-8/P-2	19.2	21.0	20.1	1.8	51.14	11.2	1.3	0.28	0.04	31.12	-0.6653	2.6853
RB-8/P-2	21.0	23.0	22.0	2	49.24	0.41	0.30	0.28	0.12	2.50	-1.3262	0.4957
RB-8/P-2	23.0	24.5	23.75	1.5	47.49	6.1	1.3	0.46	0.05	25.27	-0.4875	2.2001
RB-8/P-2	24.5	25.4	24.95	0.9	46.29	3.0	1.4	0.49	0.02	60.01	-0.6633	2.2398
RB-8/P-2	25.4	26.8	26.1	1.4	45.14	3.9	0.90	0.40	0.05	18.47	-0.7322	1.9812
RB-8/P-2	26.8	27.2	27.0	0.4	44.24	4.1	1.3	0.37	0.01	91.60	-0.8285	2.6214
RB-8/P-3	13.8	15.8	14.8	2	57.18	5.0	0.55	0.40	0.18	3.06	-0.8422	0.7566
RB-8/P-3	15.8	16.2	16.0	0.4	55.98	23.2	1.4	0.58	0.12	12.00	-0.1569	2.2045
RB-8/P-3	16.2	20.7	18.45	4.5	53.53	0.02	0.15	0.08	0.01	28.24	-3.6359	3.9583
RB-8/P-3	20.7	22.0	21.35	1.3	50.63	11.2	1.3	0.28	0.04	31.12	-0.6662	2.6846
RB-8/P-3	22.0	22.8	22.4	0.8	49.58	11.0	0.30	0.28	0.12	2.50	-1.3170	0.6120
RB-8/P-3	22.8	23.3	23.05	0.5	48.93	0.26	0.14	0.10	0.00	28.53	-2.2589	0.9325
RB-8/P-3	23.3	24.3	23.8	1	48.18	3.9	1.4	0.49	0.02	60.01	-0.6239	2.3415



Слика 77 Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\ln d) = -0,94, \sigma(\ln d) = 1,06$) - црвена крива – Rb-8

Вероватноће за појаву заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.



Слика 78 Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\sigma(\ln d))=1,53$, $\sigma(\sigma(\ln d))=0,79$) - црвена крива – Rb-8

Вероватноће за појаву заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.

5.2.1.1.5 Rb-5m

У табели (Табела 10) дате су кориговане вредности карактеристичних пречника и математичка очекивања и стандардне девијације за лог-нормалну расподелу за анализиране узорке. На графичким приказима (Слика 79 и Слика 80) дати су резултати статистичке обраде математичких очекивања и стандардних девијација из табеле.

Табела 10 Бушотине око Rb-5m, интервали испод 15m дубине: кориговане вредности карактеристичних пречника ($d_{10,c}$, $d_{50,c}$, $d_{60,c}$, $d_{85,c}$), математичко очекивање и стандардна девијација за лог-нормалну расподелу

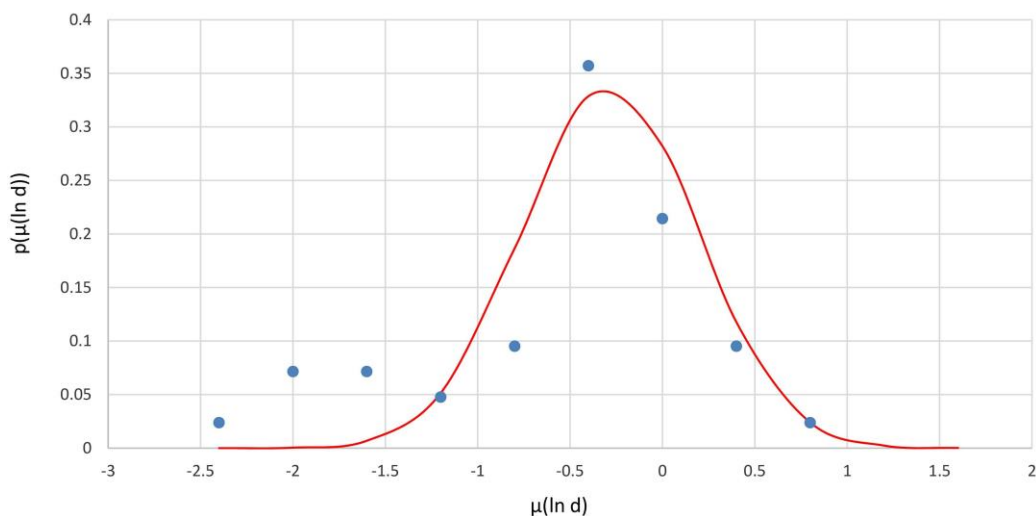
	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	$d_{85,c}$	$d_{60,c}$	$d_{50,c}$	$d_{10,c}$	$d_{60,c}/d_{10,c}$	$\mu(\ln x)$	$\sigma(\ln x)$
--	-------	--------	------	-------	--------	------------	------------	------------	------------	---------------------	--------------	-----------------

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d _{85, c}	d _{60, c}	d _{50, c}	d _{10, c}	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ(ln x)
Ps-238	14.10	17.00	15.55	2.90	57.29	1.6	0.26	0.27	0.05	5.49	-1.4345	1.5241
Ps-238	17.00	18.50	17.75	1.50	55.09	0.60	0.21	0.25	0.05	4.11	-1.6347	1.1293
Ps-238	18.60	26.50	22.55	7.90	50.29	13.3	2.92	0.58	0.18	16.67	-0.2402	3.1579
Ps-239	13.00	17.00	15.00	4.00	57.93	11.1	2.4	0.70	0.19	12.57	0.1726	2.0087
Ps-239	17.00	19.00	18.00	2.00	54.93	6.0	0.77	0.58	0.36	2.14	-0.4565	0.5297
Ps-239	19.00	21.00	20.00	2.00	52.93	9.0	0.9	0.70	0.36	2.50	-0.3027	0.6105
Ps-239	21.10	27.00	24.05	5.90	48.88	7.0	2.9	1.4	0.08	35.72	0.3145	1.9586
Ps-240	12.50	17.60	15.05	5.10	58.18	11.9	3.4	0.9	0.30	11.43	0.4528	1.9481
Ps-240	17.60	19.00	18.30	1.40	54.93	0.81	0.26	0.31	0.07	3.87	-1.3914	1.1389
Ps-240	19.00	20.00	19.50	1.00	53.73	7.0	1.0	0.70	0.40	2.50	-0.2400	0.6494
Ps-240	20.10	24.30	22.20	4.20	51.03	13.3	3.1	1.6	0.29	10.46	0.6403	1.7007
Ps-252	14.20	17.50	15.85	3.30	56.90	0.27	0.15	0.19	0.02	6.21	-2.0888	1.1825
Ps-252	17.50	18.30	17.90	0.80	54.85	8.0	2.0	1.3	0.50	4.00	0.4337	1.1769
Ps-252	18.30	19.00	18.65	0.70	54.10	0.16	0.15	0.19	0.03	5.65	-2.2678	1.2096
Ps-252	19.00	23.50	21.25	4.50	51.50	6.0	0.7	0.57	0.25	2.80	-0.5428	0.6780
Ps-254	11.50	18.55	15.03	7.05	58.27	5.0	0.85	0.68	0.40	2.13	-0.3320	0.5070
Ps-254	18.55	25.55	22.05	7.00	51.24	10.0	1.6	0.80	0.45	3.56	0.1796	1.3322
Ps-262	11.30	20.16	15.73	8.86	57.59	9.0	0.9	0.64	0.36	2.50	-0.3402	0.6387
Ps-262	20.16	24.00	22.08	3.84	51.24	8.3	2.8	1.1	0.11	25.01	0.2412	2.0084
Ps-263	11.30	19.00	15.15	7.70	58.47	12.5	2.1	0.58	0.16	13.34	0.0325	2.1363
Ps-263	19.00	25.00	22.00	6.00	51.62	9.8	2.1	0.77	0.17	12.00	0.1165	1.8974
P-UT-5M-1	11.70	15.40	13.55	3.70	59.30	8.3	2.1	0.80	0.06	36.67	-0.0643	2.2619
P-UT-5M-1	15.40	17.00	16.20	1.60	56.65	0.66	0.16	0.14	0.01	11.29	-2.1084	1.6342
P-UT-5M-1	17.00	17.80	17.40	0.80	55.45	6.9	1.6	0.47	0.03	56.53	-0.5067	2.5552
P-UT-5M-1	17.80	19.70	18.75	1.90	54.10	4.3	1.3	0.43	0.01	94.47	-0.7729	2.5826
P-UT-5M-1	19.70	21.50	20.60	1.80	52.25	3.7	1.1	0.30	0.01	106.3	-1.0309	2.7161
P-UT-5M-1	21.50	24.00	22.75	2.50	50.10	6.4	1.7	0.72	0.03	56.81	-0.2791	2.3568
P-UT-5M-2	12.20	15.70	13.95	3.50	58.94	12.0	1.7	0.55	0.07	23.21	-0.1970	2.3519
P-UT-5M-2	15.70	16.60	16.15	0.90	56.74	8.3	1.3	0.48	0.15	8.34	-0.2842	1.8501

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

	Дуб.1	Дуб. 2	Дуб.	Дебљ.	m н.м.	d ₈₅ , c	d ₆₀ , c	d ₅₀ , c	d ₁₀ , c	d _{60, c} /d _{10, c}	μ (ln x)	σ(ln x)
P-UT-5M-2	16.60	17.80	17.20	1.20	55.69	1.2	0.76	0.42	0.11	6.91	-0.7704	1.1342
P-UT-5M-2	17.80	18.60	18.20	0.80	54.69	28.9	1.1	0.56	0.18	6.25	-0.3537	1.3300
P-UT-5M-2	18.60	20.40	19.50	1.80	53.39	6.0	1.8	0.78	0.06	32.31	-0.1515	2.0952
P-UT-5M-2	20.40	22.00	21.20	1.60	51.69	9.3	1.4	0.41	0.06	24.01	-0.4562	2.3806
P-UT-5M-2	22.00	24.60	23.30	2.60	49.59	3.7	1.8	0.81	0.03	60.01	-0.2690	2.0782
P-UT-5M-4	14.30	17.60	15.95	3.30	57.35	13.0	0.5	0.36	0.16	3.13	-0.9457	0.7627
P-UT-5M-4	17.60	19.20	18.40	1.60	54.90	6.0	1.8	0.78	0.06	32.31	-0.1518	2.0941
P-UT-5M-4	19.20	21.30	20.25	2.10	53.05	9.3	1.4	0.41	0.06	24.01	-0.4558	2.3805
P-UT-5M-4	21.30	24.50	22.90	3.20	50.40	3.7	1.8	0.81	0.03	60.01	-0.2695	2.0792
P-UT-5M-5	14.80	17.80	16.30	3.00	57.00	0.38	0.13	0.18	0.03	4.14	-2.0418	1.1809
P-UT-5M-5	17.80	19.50	18.65	1.70	54.65	5.4	1.3	0.39	0.02	64.46	-0.7319	2.5498
P-UT-5M-5	19.50	21.40	20.45	1.90	52.85	6.0	1.4	0.04	0.02	70.02	-1.4179	3.7498
P-UT-5M-5	21.40	24.90	23.15	3.50	50.15	5.9	2.1	0.89	0.03	63.35	-0.1263	2.2695

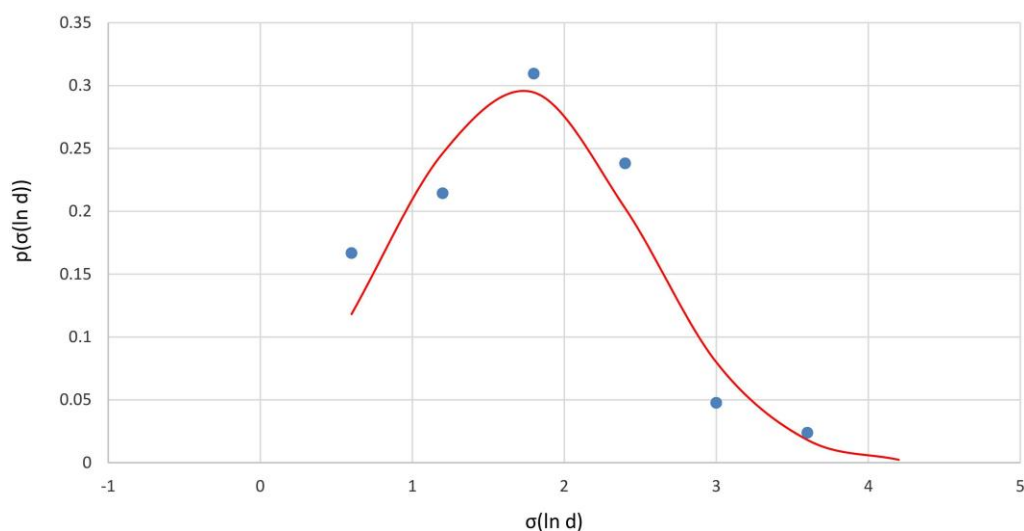


Слика 79 Релативне учестаности заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\mu(\ln d)) = -0,49$, $\sigma(\mu(\ln d)) = 0,46$) - црвена крива – Rb-5m.

Вероватноће за појаву заокружених вредности математичких очекивања (инкремент 0,4) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су

добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.

На слици (Слика 79) се може уочити да постоје две групе узорака тј. математичких очекивања са различитим расподелама. Као релевантна за моделирање просторног распореда параметара водоносне средине узета је расподела са већим пречницима, чији су параметри дати у објашњењу испод слике.



Слика 80 Релативне учестаности заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,6) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима, као и вероватноће за њихову појаву према функцији густине вероватноће нормалне расподеле ($\mu(\sigma(\ln d))=1,39$, $\sigma(\sigma(\ln d))=0,79$) - црвена крива – Rb-5m.

Вероватноће за појаву заокружених вредности стандардних девијација (инкремент 0,6) лог-нормалних расподела маса зрна у зависности од њихове величине у узорцима су добијене израчунавањем вероватноће појављивања свих вредности између две суседне заокружене вредности према функцији густине вероватноће нормалне расподеле.

Статистичком анализом резултата (коригованих и некоригованих) гранулометријских анализа узорака из бушотина око Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 потврђена је претпоставка (Sulaiman, M. 2007) да је расподела величина зрна у узорцима материјала, тј. деловима аквифера лог-нормална и одређени су математичка очекивања и стандардне девијације за сваки узорак.

Анализом расподеле математичких очекивања лог-нормалних расподела узорака који су узети из водоносног слоја испод дубине од 15m утврђено је да она највише одговара нормалној расподели, што важи и за стандардне девијације лог-нормалних расподела узорака. Математичко очекивање и стандардна девијација су одређени за сваки бунар на основу лог-нормалне расподеле. На основу установљених параметара расподеле величине

зрна, у моделу су задати гранулометријски састави сваке ћелије и на основу чега су прорачунати порозност и коефицијент хидрауличке проводљивости, чиме је у моделу реплицирана хетерогеност и хидрауличка и микро-геометријска својства водоносног слоја.

5.2.1.2 Просторни распоред параметара водоносне средине у моделу

Криве расподеле пречника зрна из узорача из зоне дрена анализираних Ranney бунара, тј. параметри нормалне расподеле математичких очекивања и стандардних девијација лог-нормалних расподела по ћелијама су биле полазна основа за расподелу пречника честица у свакој ћелији модела дрена. Расподела математичких очекивања лог-нормалних расподела вредности пречника зрна у ћелијама је задата преко променљивог математичког очекивања нормалне расподеле и непроменљиве стандардне девијације нормалне расподеле која је усвојена на нивоу средње вредности за све анализираних бунаре (0,77). У моделу су предвиђене 34 различите вредности пречника зрна који представљају математичка очекивања лог-нормалних расподела вредности пречника зрна. Пречници зрна су случајном функцијом задати у свим ћелијама, тако да број ћелија којима је задат неки пречник одговара броју по функцији вероватноће. Стандардне девијације нормалних расподела стандардних девијација лог-нормалних расподела вредности пречника зрна су за анализираних бунаре до четири пута мање од математичких очекивања, па је задата иста вредност стандардних девијација лог-нормалних расподела вредности пречника зрна у свим ћелијама (узето је да је стандардна девијације нормалне расподеле једнака нули). На тај начин је дефинисан гранулометријски састав свих ћелија, у складу са нормалном расподелом математичких очекивања пречника зрна по ћелијама и лог-нормалном расподелом пречника зрна унутар ћелија и израчунати су d_{10} и d_{60} . На основу вредности наведених пречника израчунате су одговарајуће вредности порозности (према једначини (50)) и коефицијента хидрауличке проводљивости према Slichter-овој једначини (једначина (48)). Математичко очекивање нормалне расподеле математичких очекивања лог-нормалних расподела пречника зрна по ћелијама и стандардна девијација лог-нормалних расподела вредности пречника зрна су мењани да би се добило што боље поклапање са измереним вредностима разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима.

Коришћена је најједноставнија подела водоносног материјала на две зоне (представљене са два сегмента дрена дужине 2m). У првом сегменту математичка очекивања лог-нормалних расподела пречника по ћелијама припадају делу нормалне расподеле који је мањи од математичког очекивања, у другом оном који је већи.

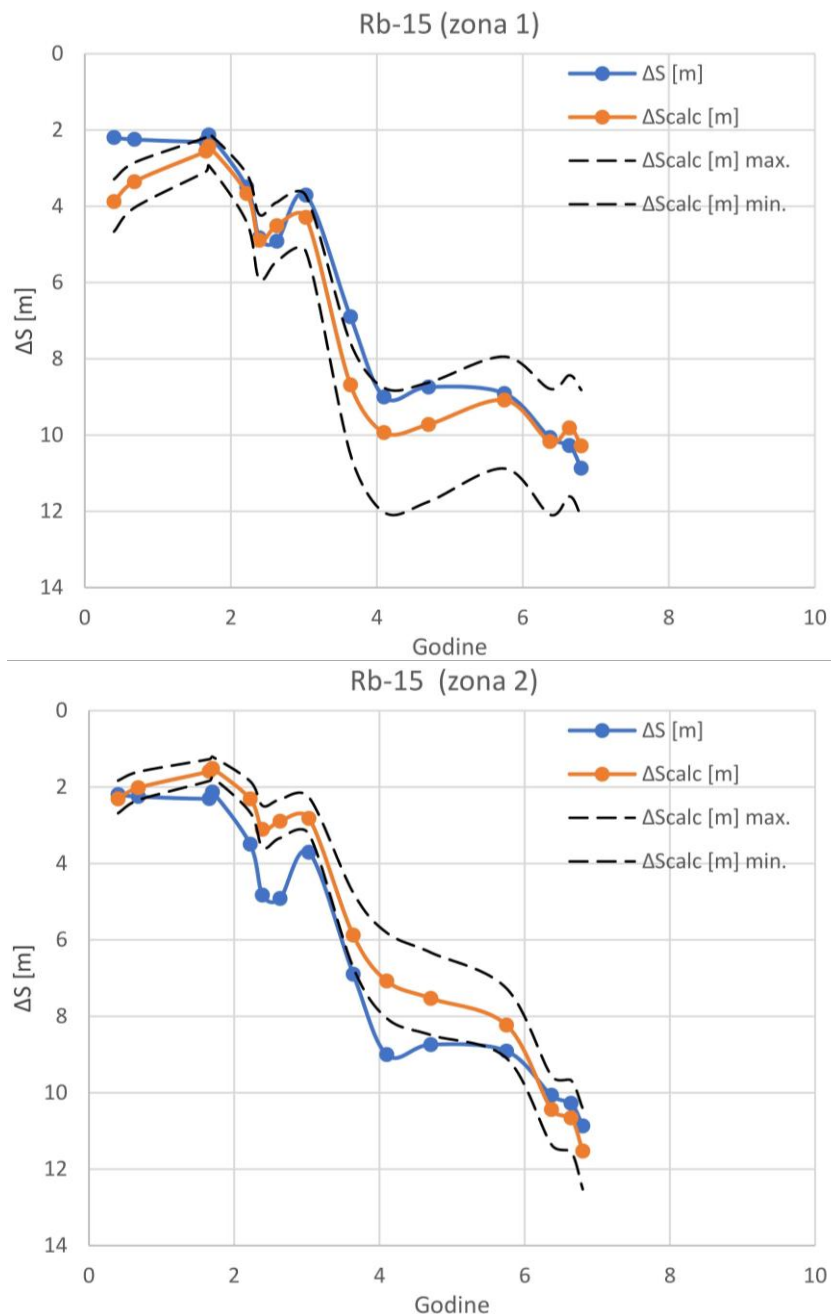
У сваком временском кораку је за сваку ћелију рачуната нова вредност порозности услед раста колматација током претходног корака (према једначини (51)) и одговарајуће нове вредности коефицијента хидрауличке проводљивости помоћу израза (52). Вредност коефицијента брзине колмирања из једначине (51), тј. смањење порозности по јединици

Дарсу-јеве брзине или протока у јединици времена је мењана да би се добило што боље поклапање са измереним вредностима разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима. Критеријум је била најмања вредност средњег квадратног одступања.

Поред колмирања порног простора, на порозност и коефицијент хидрауличке проводљивости утиче и разбијање и изношење колматација из порног простора приликом регенерација, које су симулиране користећи вредности коефицијента смањења локалних хидрауличких губитака услед регенерације y_{reg} . На основу вредности y_{reg} из потпоглавља 4.1.3 „Ефекти регенерације“ и једначине (54) се добијају вредности порозности након регенерације и одговарајуће вредности коефицијента хидрауличке проводљивости – једначина (52).

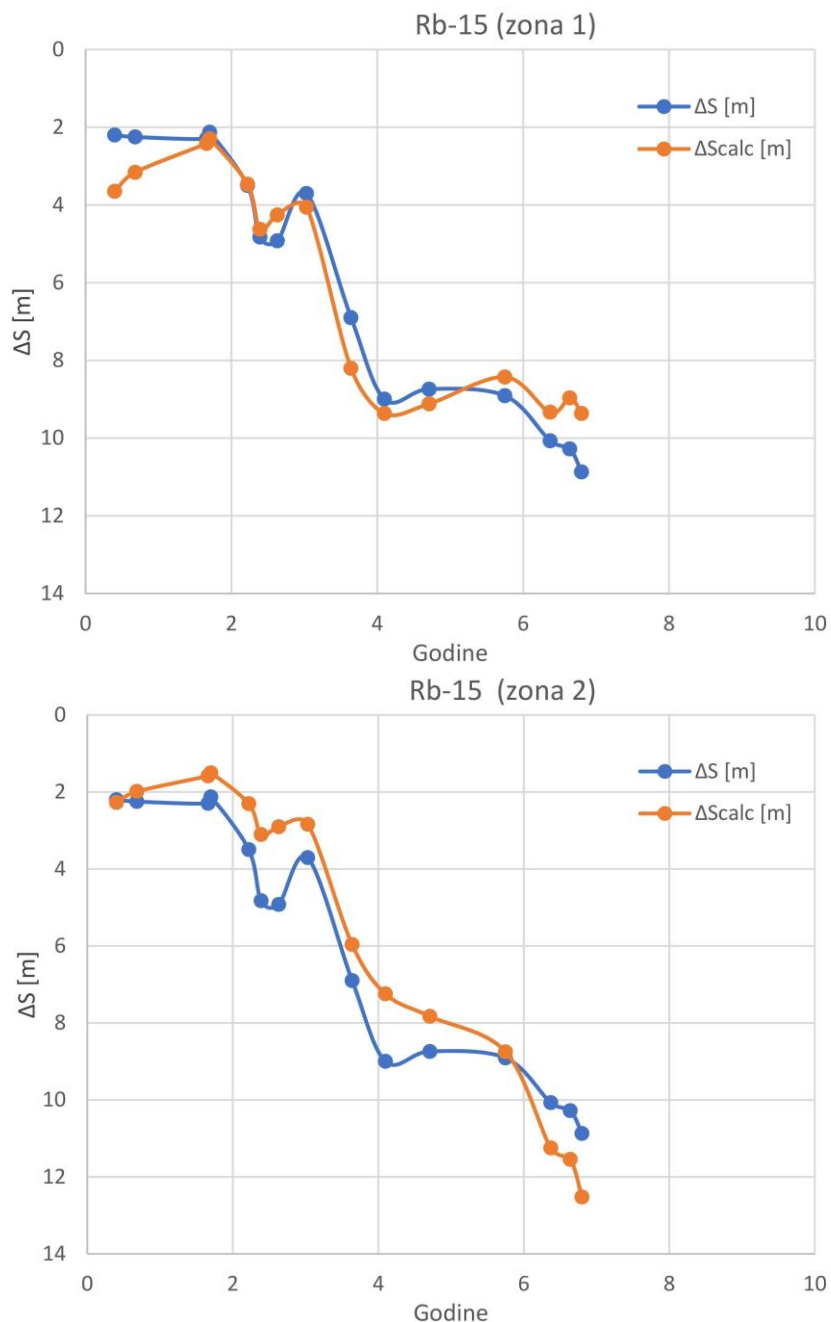
5.2.1.2.1 Rb-15

Средње, минималне и максималне вредности математичког очекивања нормалне расподеле математичких очекивања пречника зрна по ћелијама, стандардне девијације лог-нормалне расподеле величина зрна у ћелијама и коефицијента брзине колмирања, у 18 симулација за које је постигнуто најбоље поклапање са измереним вредностима разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара, су дате на слици (Слика 81).



Слика 81 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-15

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d)) \in \{-0,60, -0,51\}$, $\mu(\mu(\ln d))_{avg} = -0,57$, $\mu(\sigma(\ln d)) \in \{1,95, 1,95\}$, $\mu(\sigma(\ln d))_{avg} = 1,95$, $c_{kolm} \in \{190, 200\}$, $c_{kolm, avg} = 192 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.

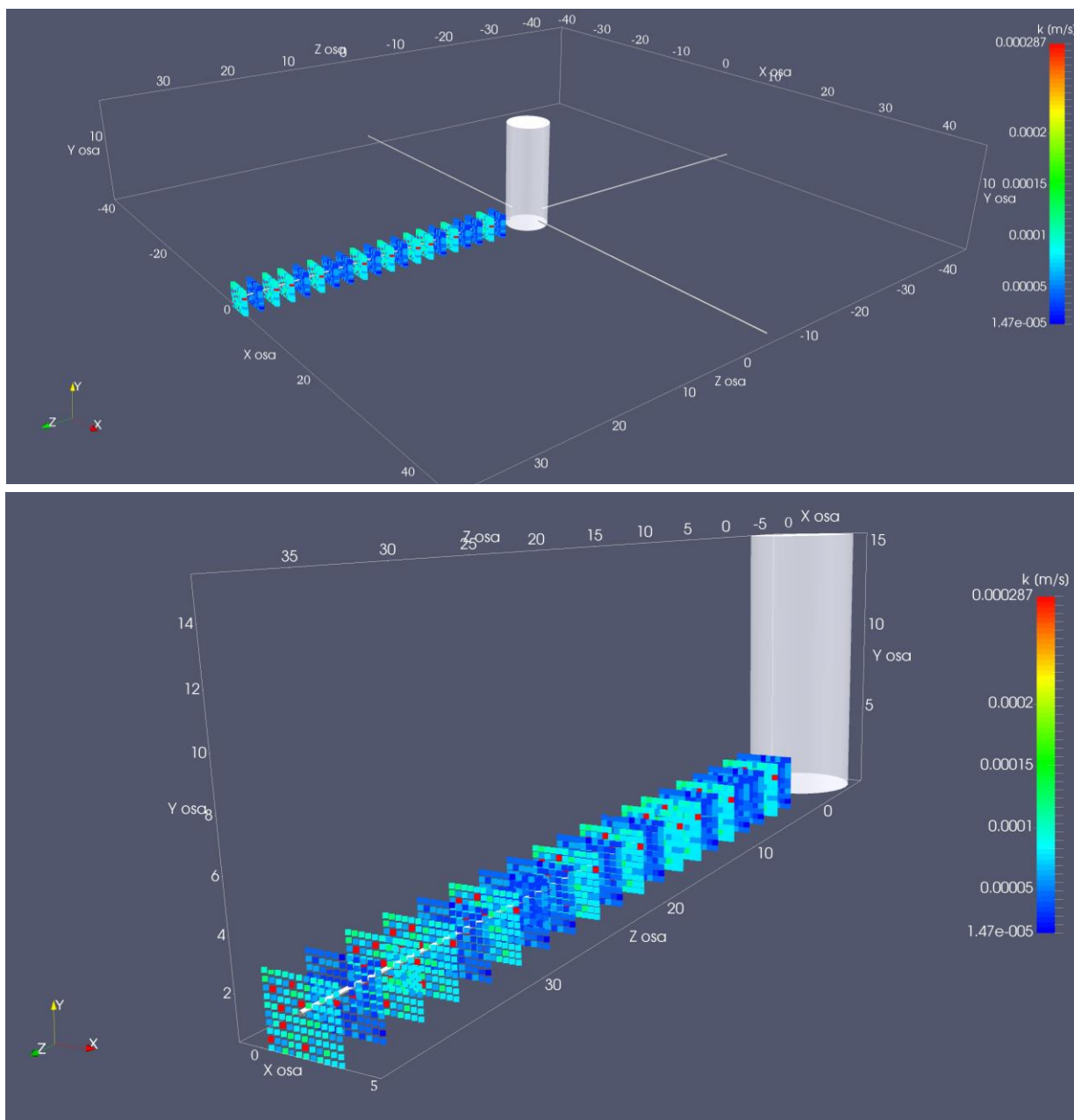


Слика 82 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-15

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d))=-0,60$, $\mu(\sigma(\ln d))=1,95$, $c_{kolm}=190 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.

На слици (Слика 83) дат је 3D приказ вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама, добијене процесом калибрације модела сегмента 1 и сегмента 2, за случај најбољег поклапања измерених и израчунатих вредности разлике у нивоу

између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима. Модел једног сегмента има дебљину 2 m и материјал дуж целе активне дужине дрена од 40 m је представљен случајно распоређеним сегментима 1 и сегментима 2, по десет њих.

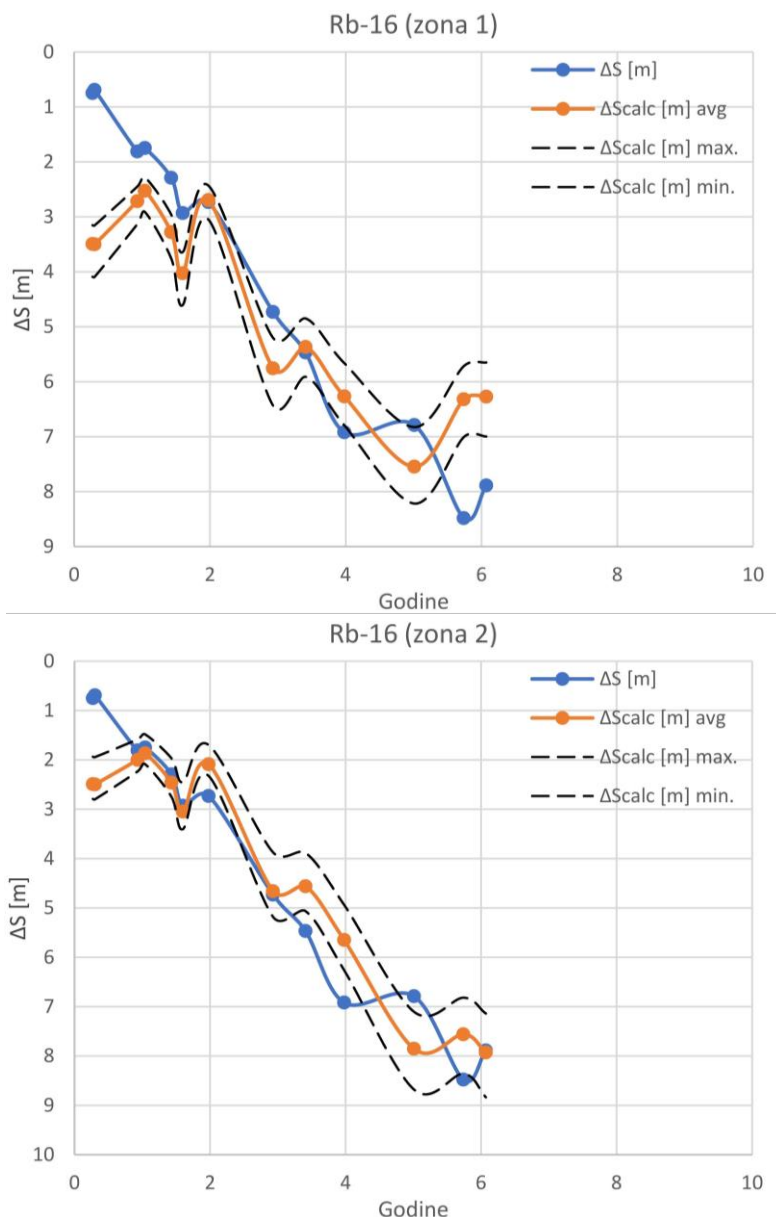


Слика 83 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-15

5.2.1.2.2 Rb-16

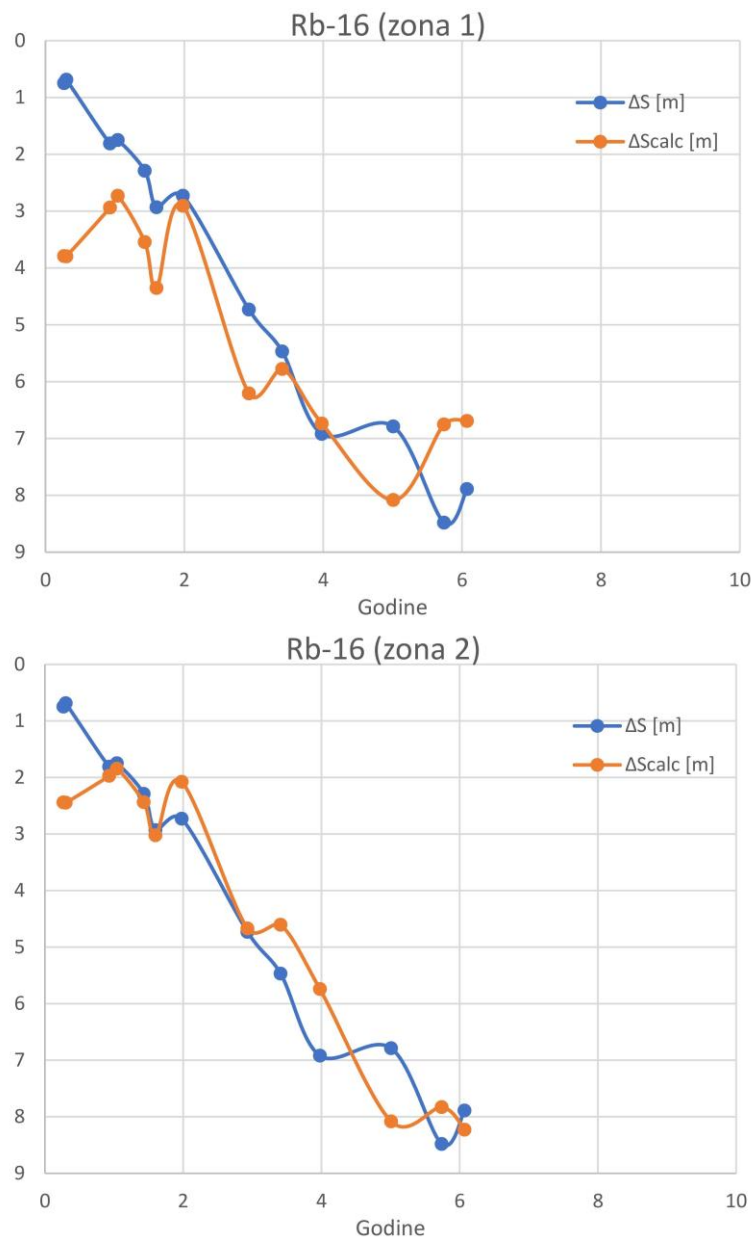
Средње, минималне и максималне вредности математичког очекивања и стандардних девијација нормалне расподеле математичких очекивања пречника зрна по ћелијама и

коэффициента брзине колмирања, у 23 симулација за које је постигнуто најбоље поклапање са измереним вредностима разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара, су дате на слици (Слика 84).



Слика 84 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацама (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-16

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d)) \in \{-0,60, -0,51\}$, $\mu(\mu(\ln d))_{avg} = -0,56$, $\mu(\sigma(\ln d)) \in \{1,9, 1,9\}$, $\mu(\sigma(\ln d))_{avg} = 1,9$, $c_{kolm} \in \{70, 80\}$, $c_{kolm, avg} = 79 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.

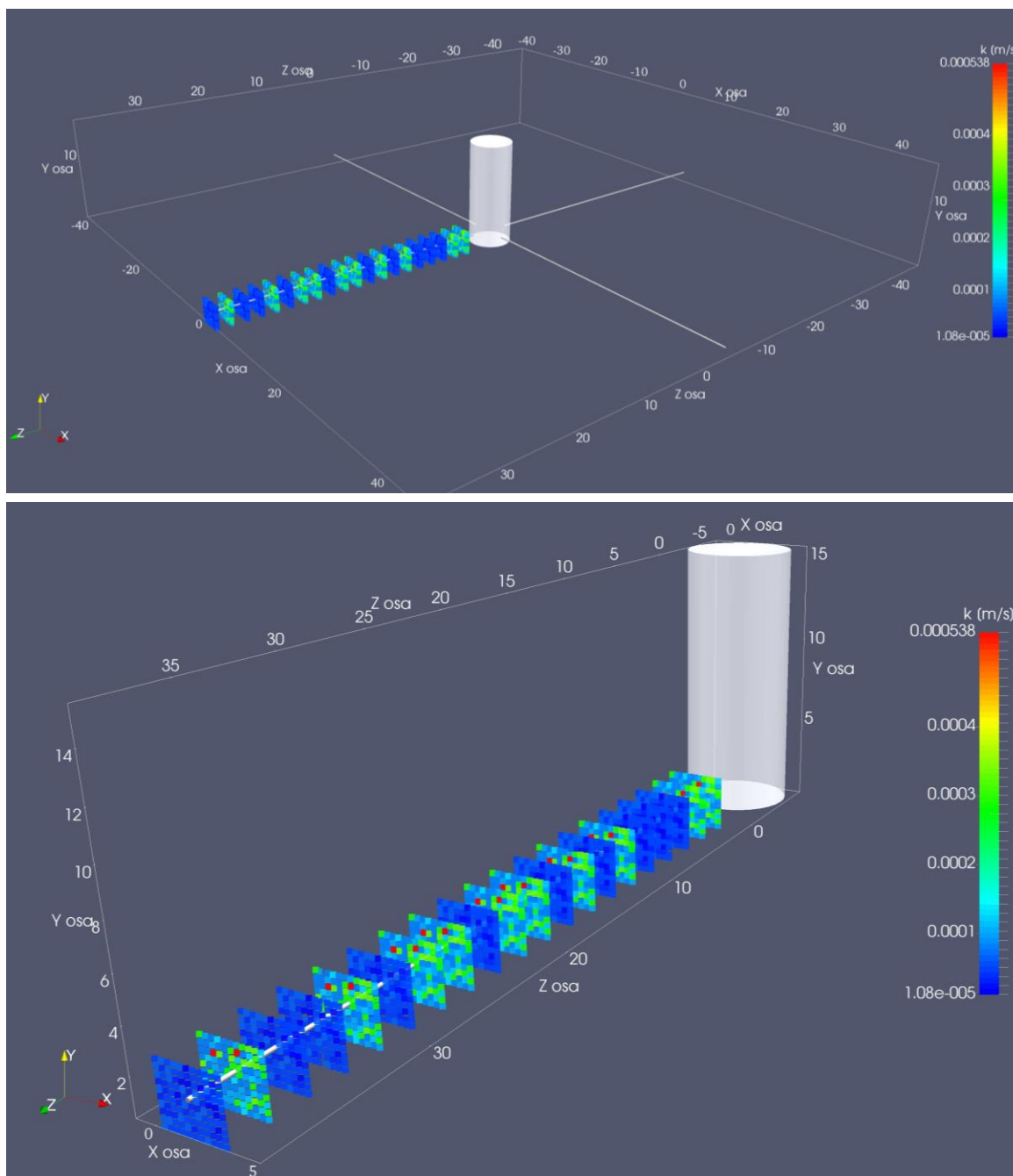


Слика 85 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-16

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d))=-0,60$, $\mu(\sigma(\ln d))=1,9$, $c_{kolm}=80 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.

На слици (Слика 86) дат је 3D приказ вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама, добијене процесом калибрације модела сегмента 1 и сегмента 2, за случај најбољег поклапања измерених и израчунатих вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима. Модел једног

сегмента има дебљину 2 m и материјал дуж целе активне дужине дрена од 40 m је представљен случајно распоређеним сегментима 1 и сегментима 2, по десет њих.

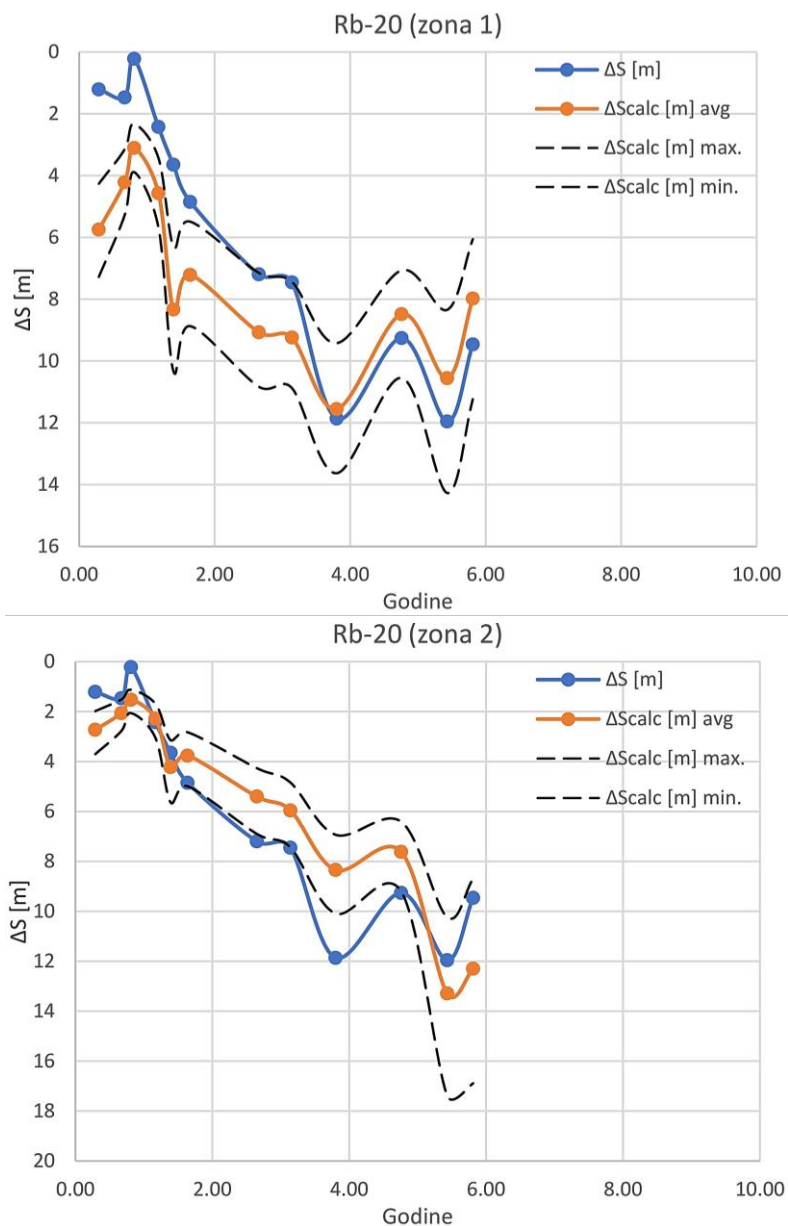


Слика 86 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-16

5.2.1.2.3 Rb-20

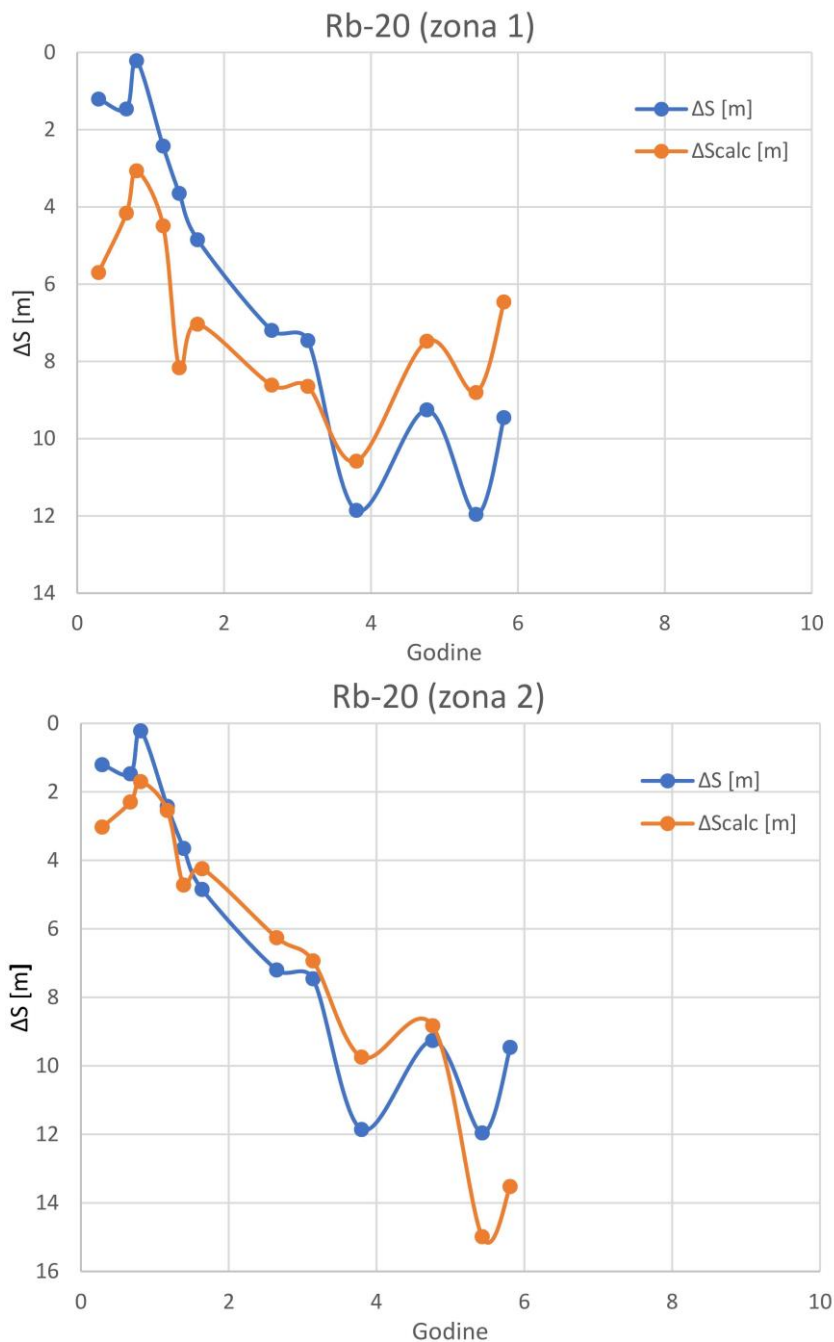
Средње, минималне и максималне вредности математичког очекивања и стандардних девијација нормалне расподеле математичких очекивања пречника зрна по под-

доменима/ћелијама и коефицијента брзине колмирања, у 27 симулација за које је постигнуто најбоље поклапање са измереним вредностима разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара, су дате на слици (Слика 87).



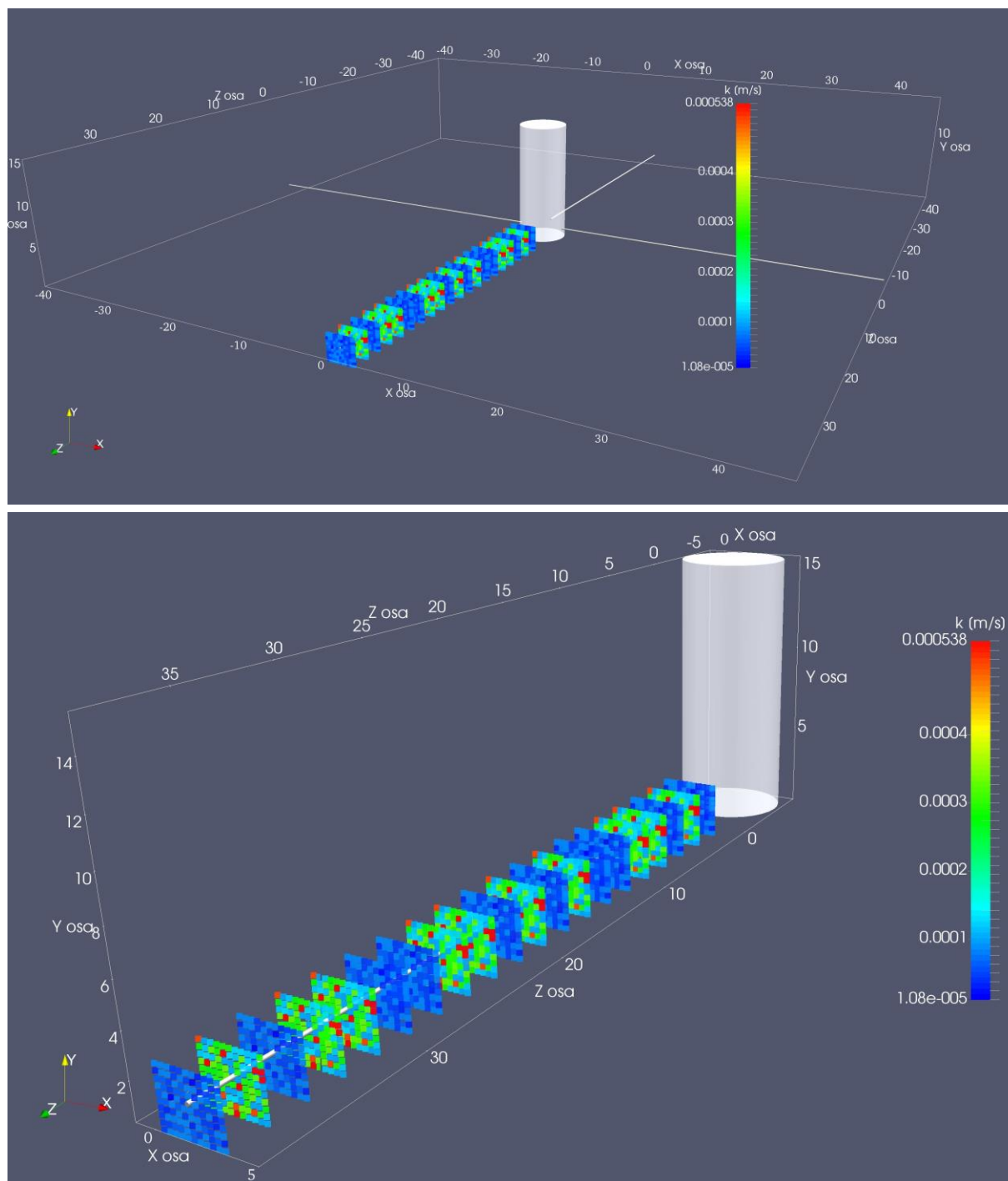
Слика 87 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-20

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d)) \in \{-0,60, -0,51\}$, $\mu(\mu(\ln d))_{avg} = -0,23$, $\mu(\sigma(\ln d)) \in \{1,9, 2,1\}$, $\mu(\sigma(\ln d))_{avg} = 2,03$, $c_{kolm} \in \{250, 280\}$, $c_{kolm, avg} = 260 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.



Слика 88 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-20

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d)) = -0,15$, $\mu(\sigma(\ln d))=2,1$, $c_{kolm}=250 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.

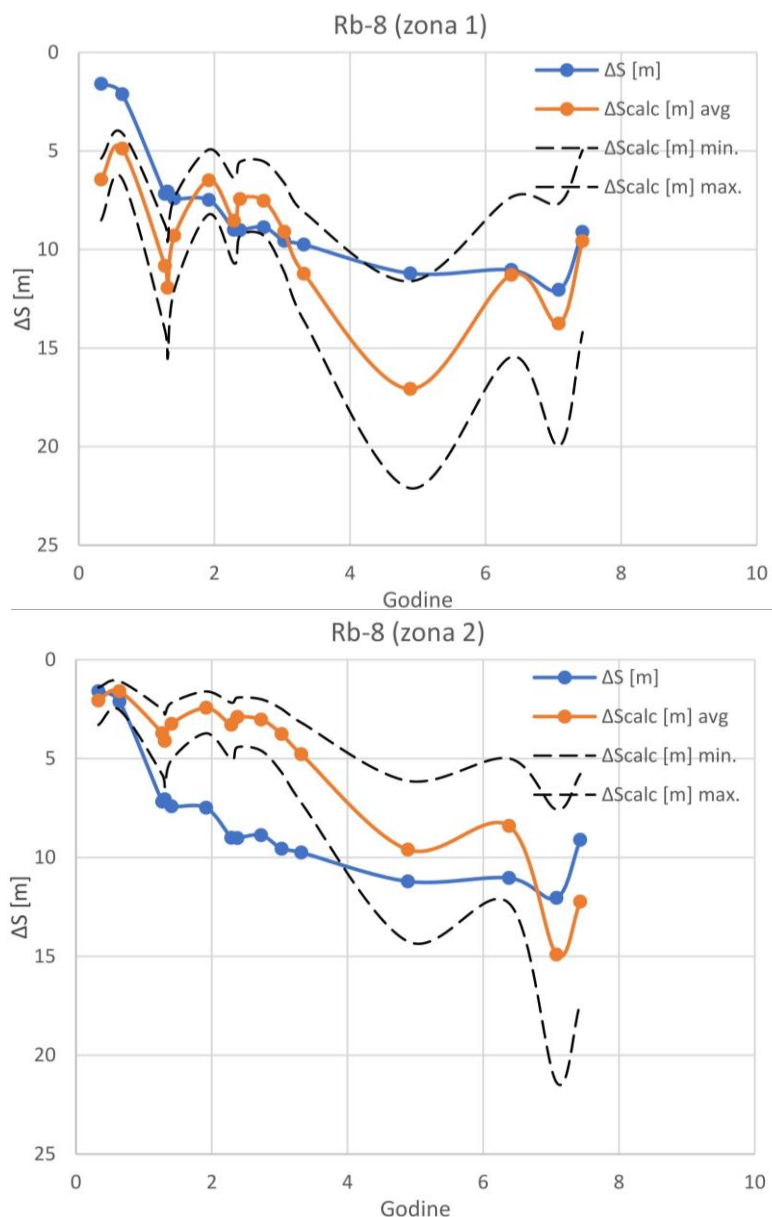


Слика 89 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-20

5.2.1.2.4 Rb-8

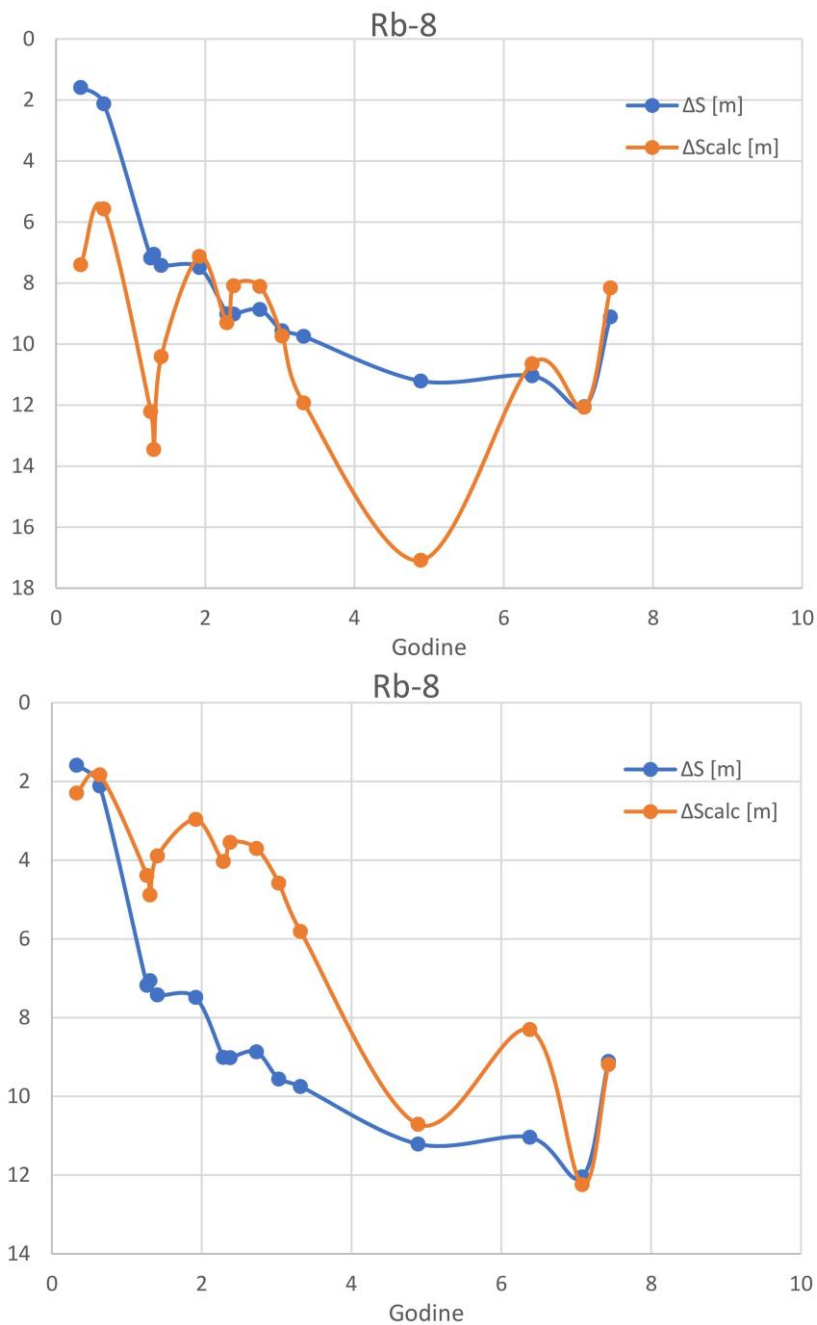
Средње, минималне и максималне вредности математичког очекивања и стандардних девијација нормалне расподеле математичких очекивања пречника зрна по под-

доменима/ћелијама и коефицијента брзине колмирања, у 45 симулација за које је постигнуто најбоље поклапање са измереним вредностима разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара, су дате на слици (Слика 90).



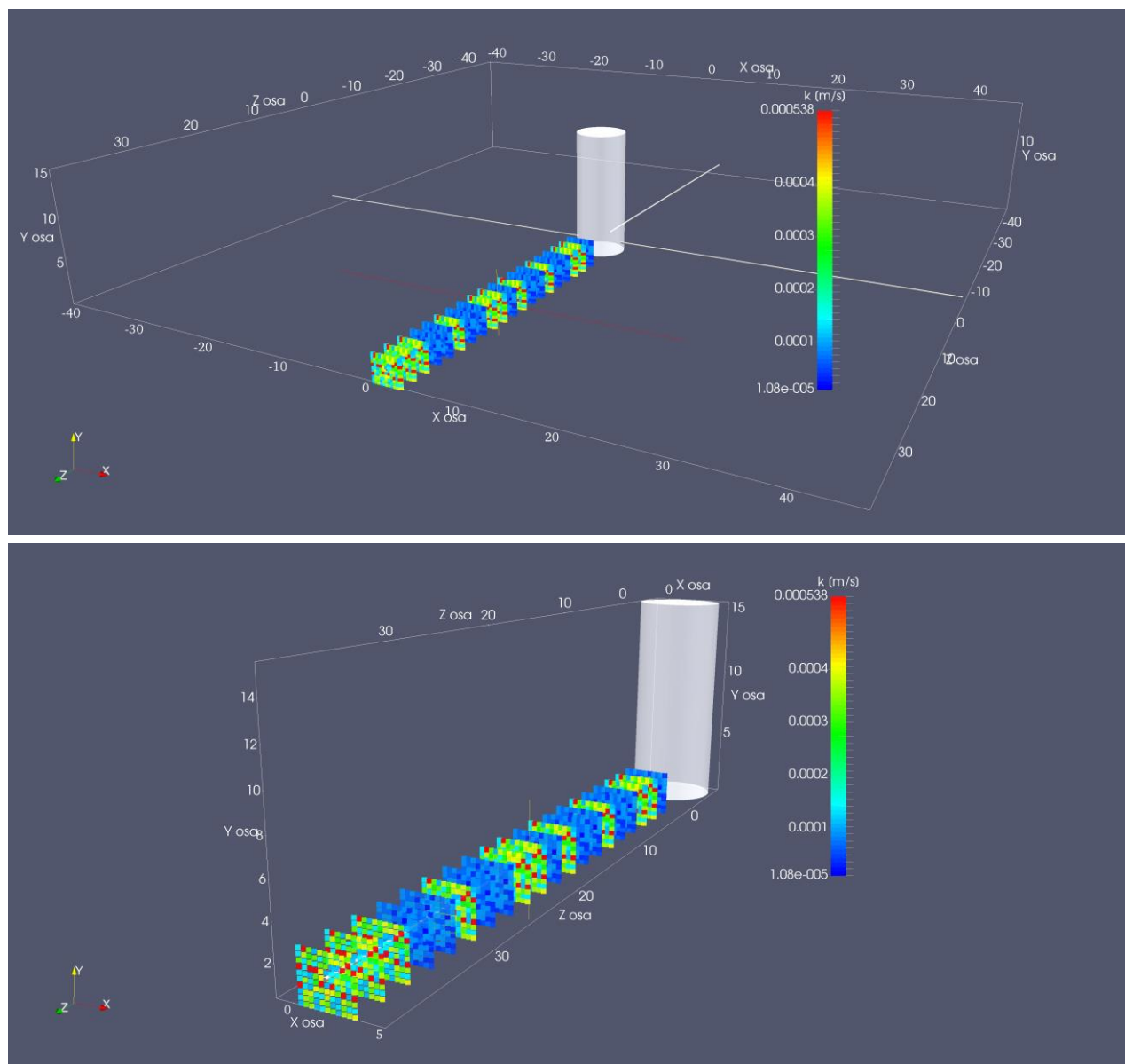
Слика 90 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-8

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d)) \in \{-0,69, -0,42\}$, $\mu(\mu(\ln d))_{avg} = -0,51$, $\mu(\sigma(\ln d)) \in \{1,75, 1,80\}$, $\mu(\sigma(\ln d))_{avg} = 1,79$, $c_{kolm} \in \{380, 400\}$, $c_{kolm, avg} = 399,6 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.



Слика 91 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-8

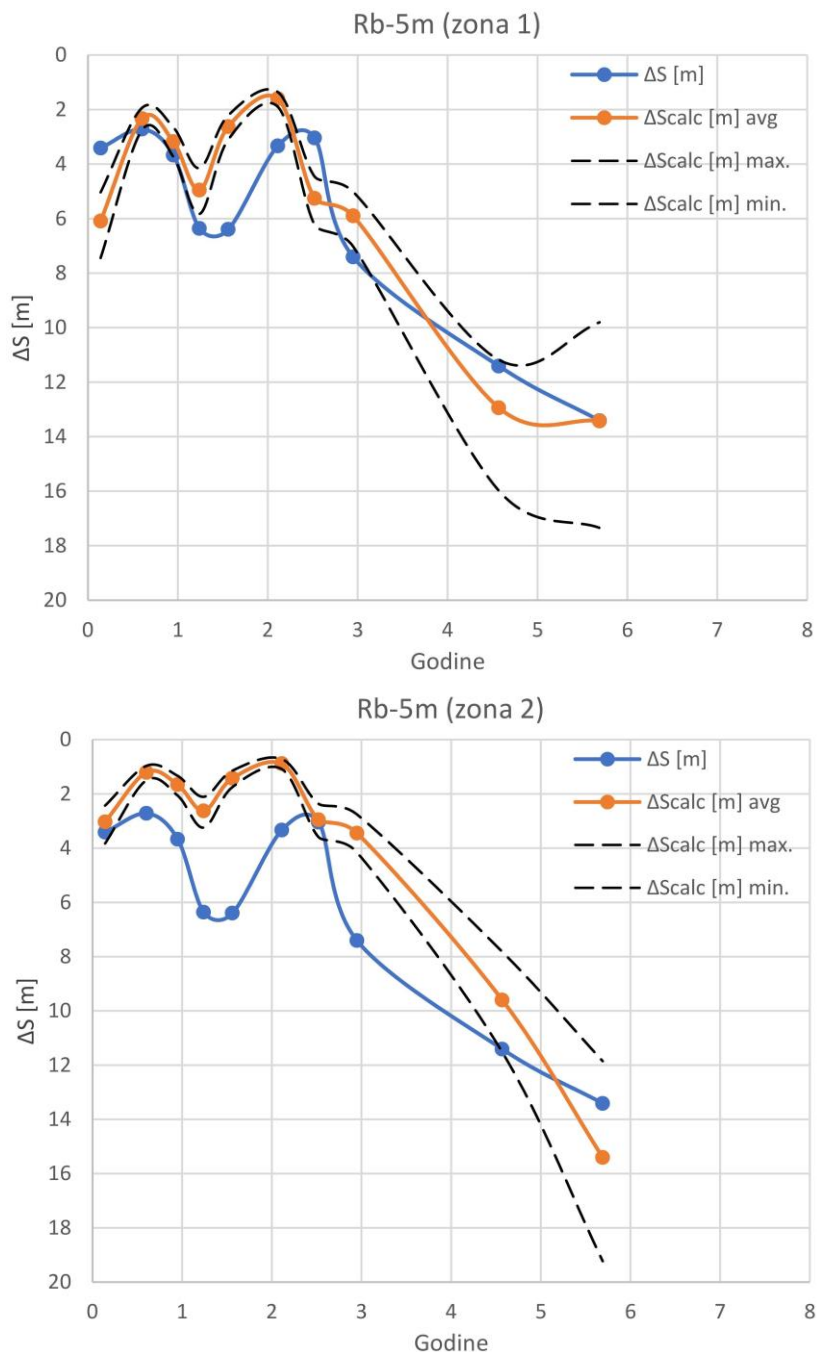
Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом: $\mu(\ln d) = -0,60$, $\mu(\sigma(\ln d))=1,75$, $c_{kolm}=400 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.



Слика 92 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама дуж целе активне дужине дрена – Rb-8

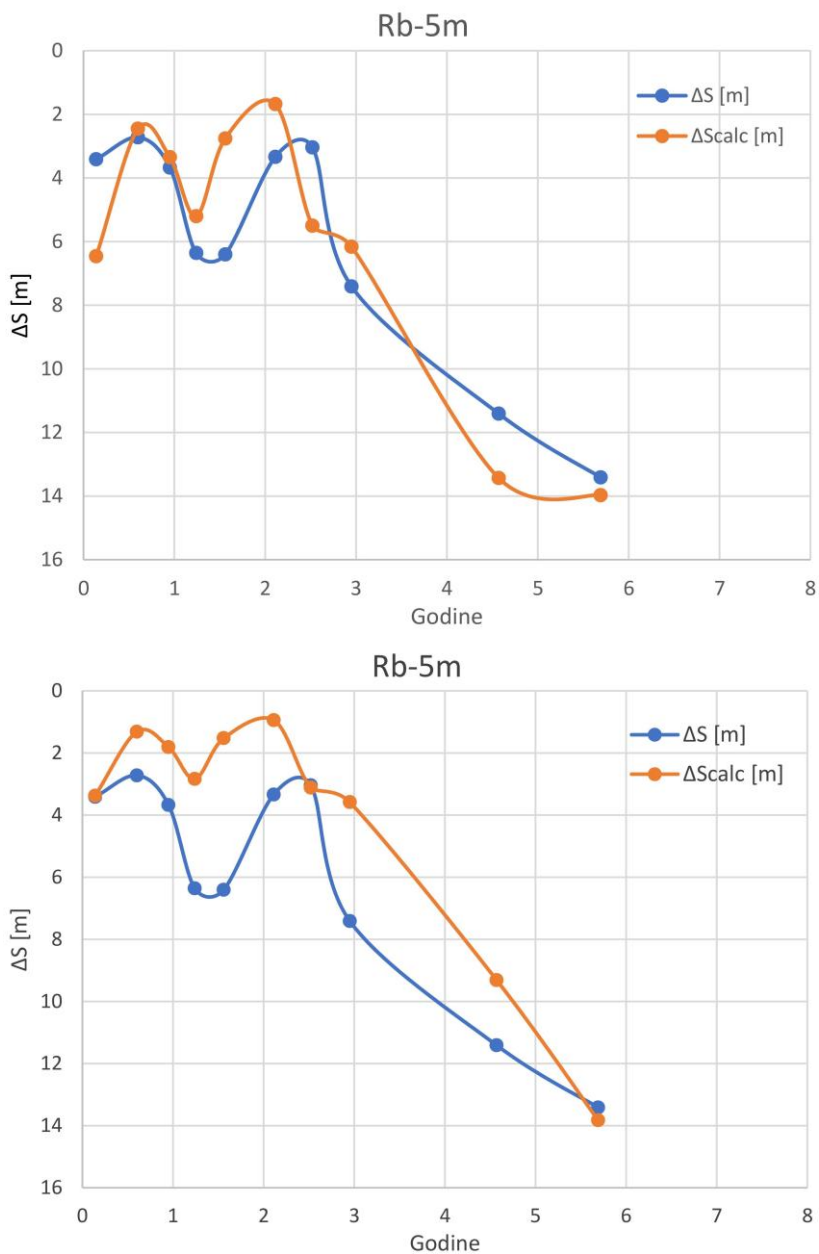
5.2.1.2.5 Rb-5m

Средње, минималне и максималне вредности математичког очекивања и стандардних девијација нормалне расподеле математичких очекивања пречника зрна по поддоменима/ћелијама и коефицијента брзине колмирања, у сваком временском кораку у 43 симулације за које је постигнуто најбоље поклапање са измереним вредностима разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара, су дате на слици (Слика 93).



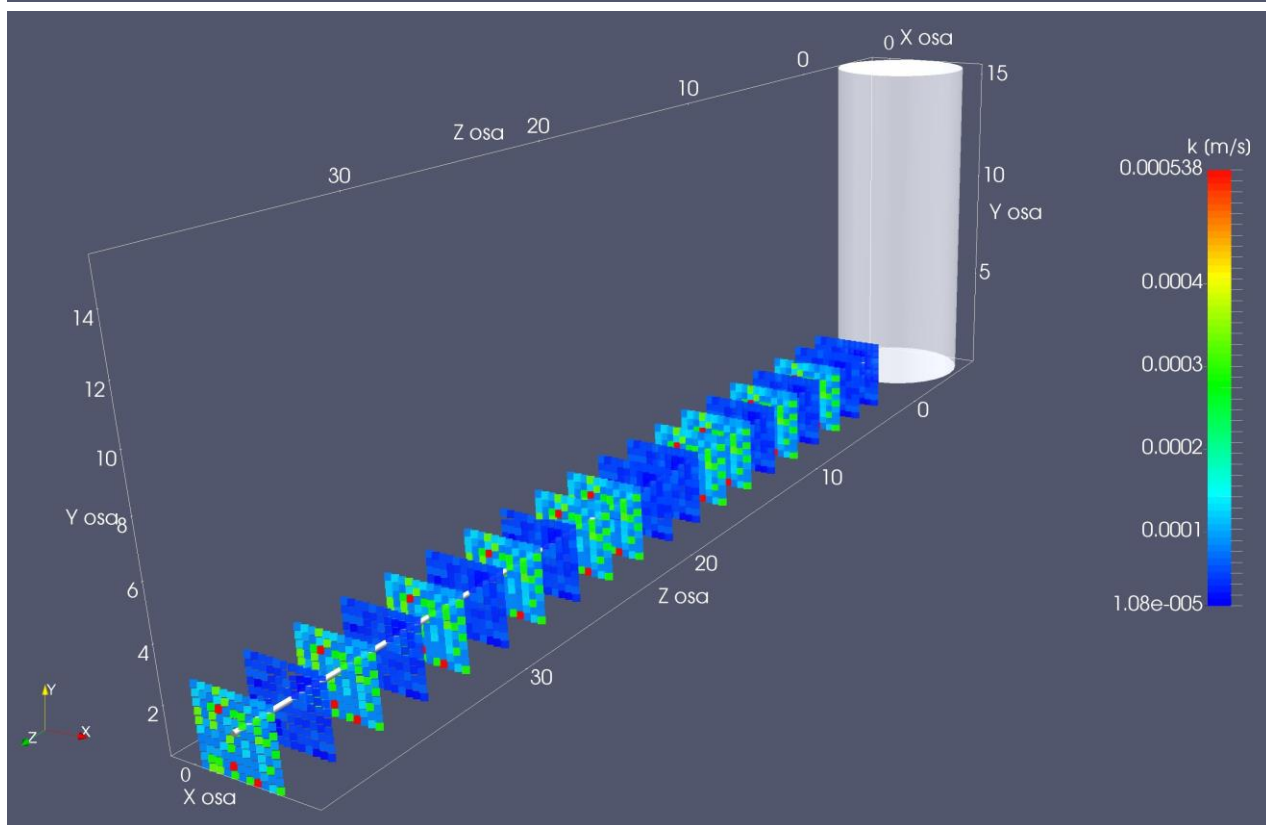
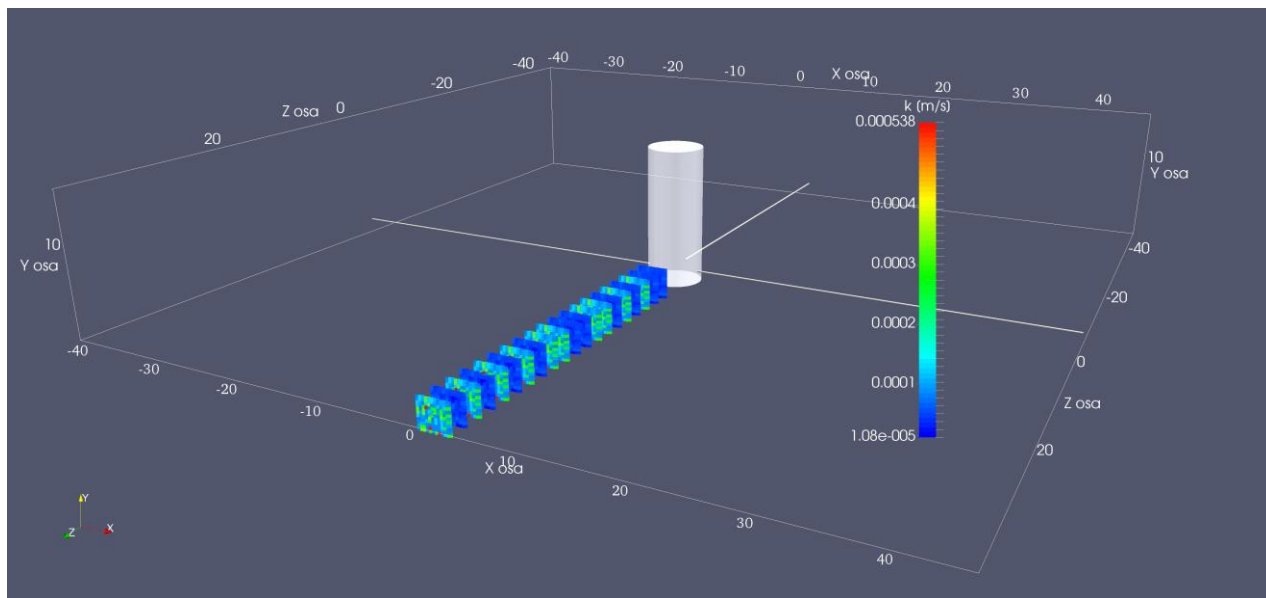
Слика 93 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (средње, максималне и минималне вредности) – Rb-5m

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d)) \in \{-0,78, -0,51\}$, $\mu(\mu(\ln d))_{avg} = -0,61$, $\mu(\sigma(\ln d)) \in \{1,9, 2,0\}$, $\mu(\sigma(\ln d))_{avg} = 1,99$, $c_{kolm} \in \{300, 310\}$, $c_{kolm, avg} = 301,6 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.



Слика 94 Измерене (плава крива и маркери) и израчунате вредности разлике у нивоу између блиског пијезометра и шахта бунара у свим временским корацима (најбоље поклапање) – Rb-5m

Вредности кључних параметара у моделу добијене калибрацијом су: $\mu(\mu(\ln d)) = -0,69$, $\mu(\sigma(\ln d))=2,0$, $c_{kolm}=300 \text{ (m}^3/\text{s}\cdot\text{a)}^{-1}$.



Слика 95 3D приказ почетних вредности коефицијената хидрауличке проводљивости по ћелијама
дуж целе активне дужине дрена – Rb-5m

5.2.2 Дискусија

На дијаграмима (Слика 81, Слика 82, Слика 84, Слика 85, Слика 87, Слика 88, Слика 90, Слика 91, Слика 93 и Слика 94) се може уочити добро поклапање измерених локалних губитака на дренажима и вредности добијених симулацијама, посебно што се тиче бунара Rb-15, Rb-16 и Rb-20. С обзиром да се ради о нумерички врло једноставном квази-3D моделу са укупно 220 ћелија, у коме су при калибрацији вариране вредности само три параметра (математичко очекивање нормалне расподеле математичких очекивања лог-нормалне расподеле пречника зрна по ћелијама, стандардна девијација лог-нормалне расподеле пречника зрна по ћелијама, коефицијент брзине колмирања), поклапање са измереним вредностима је веома добро. Резултат симулације указује да на понашање бунара највише утичу процеси колмирања у непосредној околини дренажа (прифилтерска зона) који услед природне хетерогености материјала узрокују и сталну прераспodelу тока подземних вода око дренажа. Брзина постепеног запуњавања порног простора колматацијама и премештање путања којима доминантно струји подземна вода ка раније хидраулички мање повољним трасама доминантно утиче на динамику раста локалних хидрауличких отпора који врло брзо након почетка рада већине бунара постају највећи део укупних отпора струјању подземних вода ка бунару. Резултати указују на то да приступ симулирању рада бунара у околностима када је биохемијско колмирање присутно треба да буде заснован на симулацији процеса колмирања порног простора, а не на геометријски детаљним и сложеним нумеричким моделима.

5.2.2.1 Анализа средњих вредности коефицијента брзине колмирања добијених калибрацијом модела за Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20

Средње вредности коефицијента брзине колмирања које су добијене калибрацијом нумеричких модела дренажа за бунаре Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 су дате у табели (Табела 11). Ради поређења у табели су дате промене LHR са временом по јединици протока по дренажу добијене на основу једначине (74) – једначина (101) (при чему је узето са незнатном апроксимацијом да је функција првог степена у односу на проток по дренажу). Наведена промена је повезана са променом порозности са временом по јединици протока, али се не може успоставити директна веза јер се локални отпори односе на цео дренаж (макро ниво), а порозност је израчуната за сваку ћелију модела (микро ниво). Дате су такође вредности коефицијента брзине колмирања добијене из регресионе функције – једначина (102). Једноставна функција је изабрана за регресију због тога што упркос једноставности даје добро поклапање, које указује на кинетику првог реда хемијске реакције која укључује растворено двовалентно гвожђе као реактант и која је директно повезана са нагомилавањем екстрацелуларних полимерних супстанци, исталожених минерала и минералних и органских партикула из подземне воде.

Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара

Табела 11 Средње вредности коефицијента брзине колмирања добијене калибрацијом нумеричких модела дренажа за бунаре Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 (10), вредности коефицијента брзине колмирања израчунате регресионом функцијом (9), математичка очекивања величине зрна (према коригованим резултатима гранулометријских анализа (7) и према резултатима калибрације нумеричког модела (8), KLHR по јединици протока по дренажу према корелацији са концентрацијом раствореног двовалентног гвожђа (5)

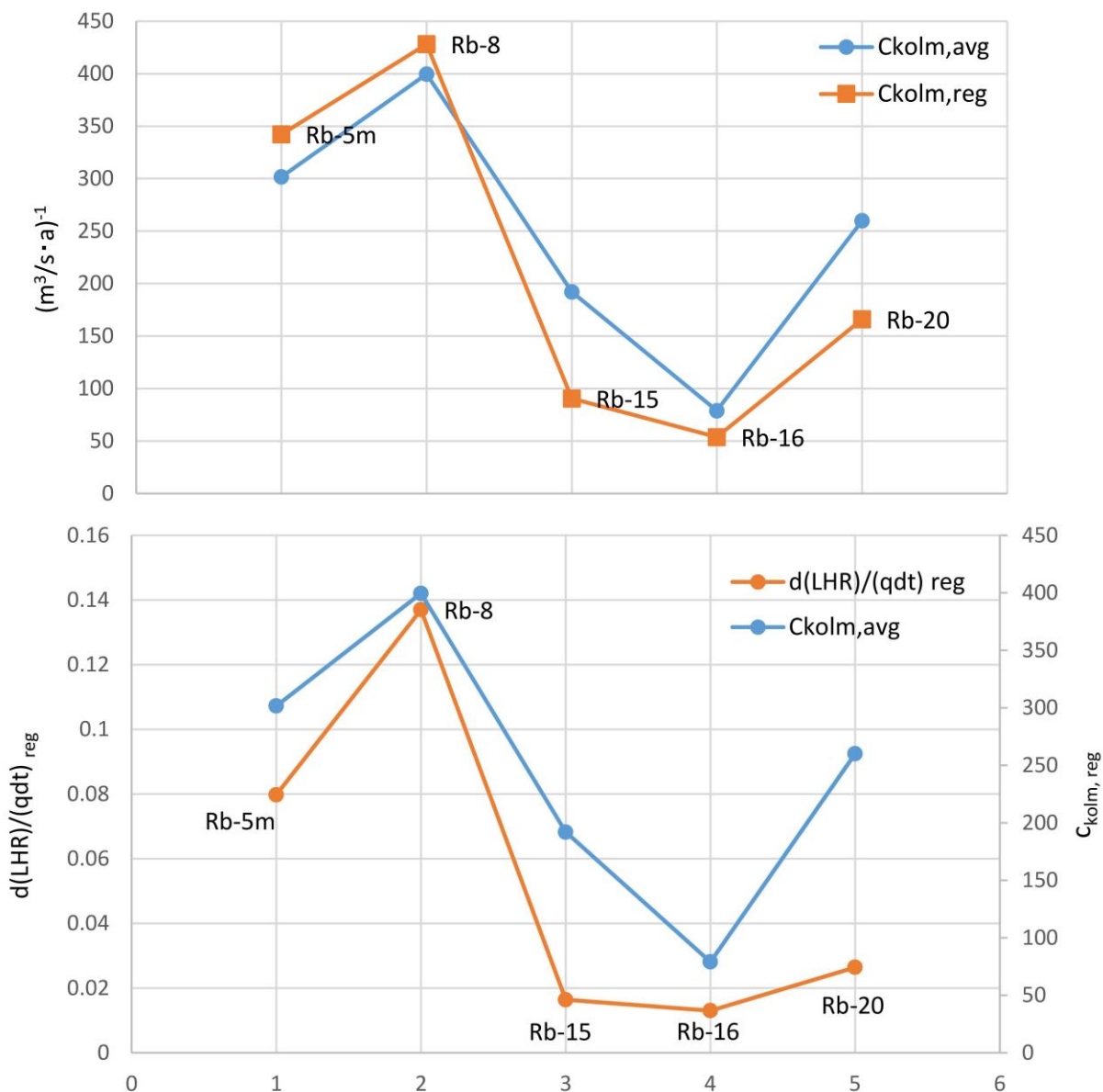
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	KLHR ₀ [m ³ /[l/s]/a]	c(Fe ²⁺) [mg/l]	c(Fe ²⁺) _{avg} [mg/l]	$\frac{KLHR}{q} = \frac{d(LHR)}{q dt} = 0,00929 \cdot e^{0,7192 \cdot [Fe^{2+}]}$ [m ³ ·((l/s) ² ·a) ⁻¹]	q _{dren} [l/s]	μ(d) [mm]	μ(d) _{kal.} [mm]	$c_{kolm,reg} = 114,5 \cdot c(Fe^{2+})$ [(m ³ /s·a) ⁻¹]	$c_{kolm,avg} = -\frac{dn_b}{q dt}$ [(m ³ /s·a) ⁻¹]
Rb-5m	0,44	2,8	2,99	0,0798	7,8	0,61	0,54	342,3	301,6
	1,21	3,12			10,7				
	1,02	3,04			10,3				
Rb-8	1,37	3,53	3,74	0,137	12,8	0,39	0,55	428,1	399,6
	0,78	4,36			4,1				
	1,39	3,32			10				
Rb-15	0,114	0,83	0,79	0,0164	10,5	0,86	0,57	90,4	192
	0,154	1,00			13,8				
	0,304	0,55			14,1				
Rb-16	0,0471	0,47	0,47	0,0130	20,7	0,74	0,57	53,8	79
Rb-20	0,318	1,64	1,45	0,0264	10,3	1	0,79	166,0	260
	0,492	1,25			18,3				

Промена *LHR* са временом по јединици протока по дренажу је дата једначином (101):

$$\frac{KLHR}{q} = \frac{d(LHR)}{q dt} = 0,00929 \cdot e^{0,7192 \cdot [Fe^{2+}]} \quad (101)$$

Математичком регресијом вредности коефицијента брзине колмирања (промена порозности са временом по јединици протока) добијена је његова зависност од концентрације раствореног двовалентног гвожђа – једначина (102):

$$c_{kolm,reg} = -\frac{dn_b}{q dt} = C \cdot c(Fe^{2+}), \quad C = 114,5 \left(m^3 / s \cdot a \cdot mg / l \right)^{-1} \quad (102)$$



Слика 96 Средње вредности коефицијента брзине колмирања добијене калибрацијом нумеричких модела дренажа за бунаре Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 - плава крива, и резултати регресије коефицијента брзине колмирања линеарном функцијом концентрације раствореног двовалентног гвожђа – једначина (102), наранџаста крива (горе), и промена LHR са временом по јединици протока по дренажу – једначина (101), наранџаста крива (доле)

На слици (Слика 96) се јасно уочава да је кинетика раста локалних хидрауличких отпора по јединици протока по дренажу повезана са кинетиком запуњавања порног простора по јединици протока (коефицијент брзине колмирања) – процес на микро нивоу се јасно испољава на макро нивоу.

5.3 Развој аналитичког модела за симулацију утицаја процеса колмирања на рад групе бунара са хоризонталним дренажима

5.3.1 Резултати симулација перформанси групе бунара са хоризонталним дренажима

Симулације су урађене за три сценарија утискивања дренажа:

- 1) утискивање 4 нова дренажа уз регенерацију старих,
- 2) утискивање 4 нова дренажа уз затварање старих (осим у Rb-15, Rb-16 и Rb-20 у које се утискују 4 дренажа уз регенерацију старих),
- 3) утискивање 8 нових дренажа уз затварање старих (осим у Rb-15, Rb-16 и Rb-20 у које се утискују 4 дренажа уз регенерацију старих).

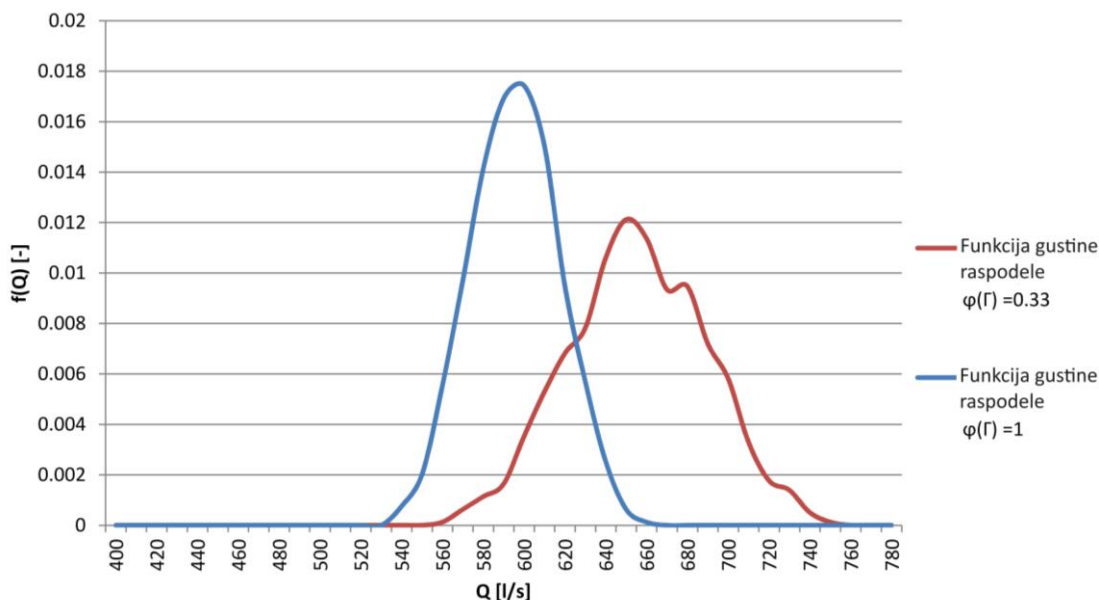
За сва три сценарија урађена су по два сета симулација (једна симулација за сваку од укупно 792 могуће комбинације утискивања дренажа у 5 од 12 Ranney бунара), за случајеве да је вредност $\varphi(t)$, фактора зависности KLHR од гранулометријског састава прифилтарске зоне аквифера или филтарског засипа (који зависи од избора гранулата, квалитета његове инсталације, квалитета разраде дренажа и др.) у једначини (6), 1 и 1/3. Ово је учињено да би се илустровао значај квалитетног извођења нових дренажа.

За први сценарио, када је $\varphi(t) = 1$, најбоља комбинација даје 657 l/s током 10 година (Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-20), средњи проток је 595 l/s, док се најмањи проток од 535 l/s добија за утискивање нових дренажа у Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1. С обзиром да је средњи проток за период од 2006. до 2013. према расположивим подацима износио 633 l/s, само 3.29% комбинација даје већи средњи проток у наредних 10 година. Када је $\varphi(t) = 0.33$, најбоља комбинација даје 754 l/s током 10 година (Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-20), средњи проток је 656 l/s, док се најмањи проток од 557 l/s добија за утискивање нових дренажа у Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1. Чак 73.0% комбинација даје укупни проток који је већи од средњег протока за период од 2006. до 2013. (633 l/s). Расподела вероватноћа укупног протока је дата на слици (Слика 97).

За други сценарио, када је $\varphi(t) = 1$, најбоља комбинација даје 650 l/s током 10 година (Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-20), средњи проток је 506 l/s, док се најмањи проток од 337 l/s добија за утискивање нових дренажа у Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1. Само 4.29% комбинација даје већи средњи проток у наредних 10 година него што је био случај за период од 2006. до 2013. У односу на сценарио у коме се 4 дренажа утискује без затварања старих дренажа, максимални укупни проток је нешто мањи – 3 бунара са прохромским дренажима који припадају најбољој комбинацији дају исти проток као и у првом сценарију, а с обзиром да је у првом сценарију удео протока кроз старе дренаже у Rb-11 и Rb-17 мањи од 10%, њихови протоци су мало мањи у другом сценарију. Када је $\varphi(t) = 0.33$, најбоља

комбинација даје 757 l/s током 10 година (Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-20), средњи проток је 593 l/s, док се најмањи проток од 409 l/s добија за утискивање нових дренажа у Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1. Од укупног броја, 26,4 % комбинација даје укупни проток који је већи од средњег протока за период од 2006. до 2013. (633 l/s).

За трећи сценарио, када је $\varphi(\Gamma) = 1$, најбоља комбинација даје 700 l/s током 10 година (Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-12), средњи проток је 568 l/s, док се најмањи проток од 413 l/s добија за утискивање нових дренажа у Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1. У овом случају, 11,9% комбинација даје већи средњи проток у наредних 10 година него што је био случај за период од 2006. до 2013. Када је $\varphi(\Gamma) = 0.33$, најбоља комбинација даје 817 l/s током 10 година (Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-14), средњи проток је 668 l/s, док се најмањи проток од 496 l/s добија за утискивање нових дренажа у Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1. Од укупног броја, 69.6 % комбинација даје укупни проток који је већи од средњег протока за период од 2006. до 2013. (633 l/s).



Слика 97 Распореда вероватноћа укупног протока анализане групе бунара за 1. сценарио, за две вредности фактора зависности KLHR од гранулометријског састава

Табела 12 Преглед резултата симулација три сценарија за две вредности фактора зависности KLHR од гранулометријског састава

Сценарио	Фактор зависности KLHR од гранулометријског састава	Комбинација бунара са највећим протоком	Највећи проток	Средњи проток	Комбинација бунара са најмањим протоком	Најмањи проток
Утискивање 4	$\varphi(\Gamma) = 1$	Rb-17, Rb-16,	657 l/s	595 l/s	Rb-18, Rb-13,	535 l/s

*Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена
новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара*

нова дрена уз регенерацију старих		Rb-15, Rb-11, Rb-20			Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1	
	$\varphi(\Gamma) = 0.33$	Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-20	754 l/s	656 l/s	Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1	557 l/s
Утискивање 4 нова дрена уз затварање старих (осим у Rb-15, Rb-16 и Rb-20, у које се утискују 4 дрена уз регенерацију старих)	$\varphi(\Gamma) = 1$	Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-20	650 l/s	506 l/s	Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1	337 l/s
	$\varphi(\Gamma) = 0.33$	Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-20	757 l/s	593 l/s	Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1	409 l/s
Утискивање 8 нових дрена уз затварање старих (осим у Rb-15, Rb-16 и Rb-20, у које се утискују 4 дрена уз регенерацију старих)	$\varphi(\Gamma) = 1$	Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-12	700 l/s	568 l/s	Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1	413 l/s
	$\varphi(\Gamma) = 0.33$	Rb-17, Rb-16, Rb-15, Rb-11, Rb-14	817 l/s	668 l/s	Rb-18, Rb-13, Rb-19, Rb-19-1 и Rb-20-1	496 l/s

5.3.2 Дискусија

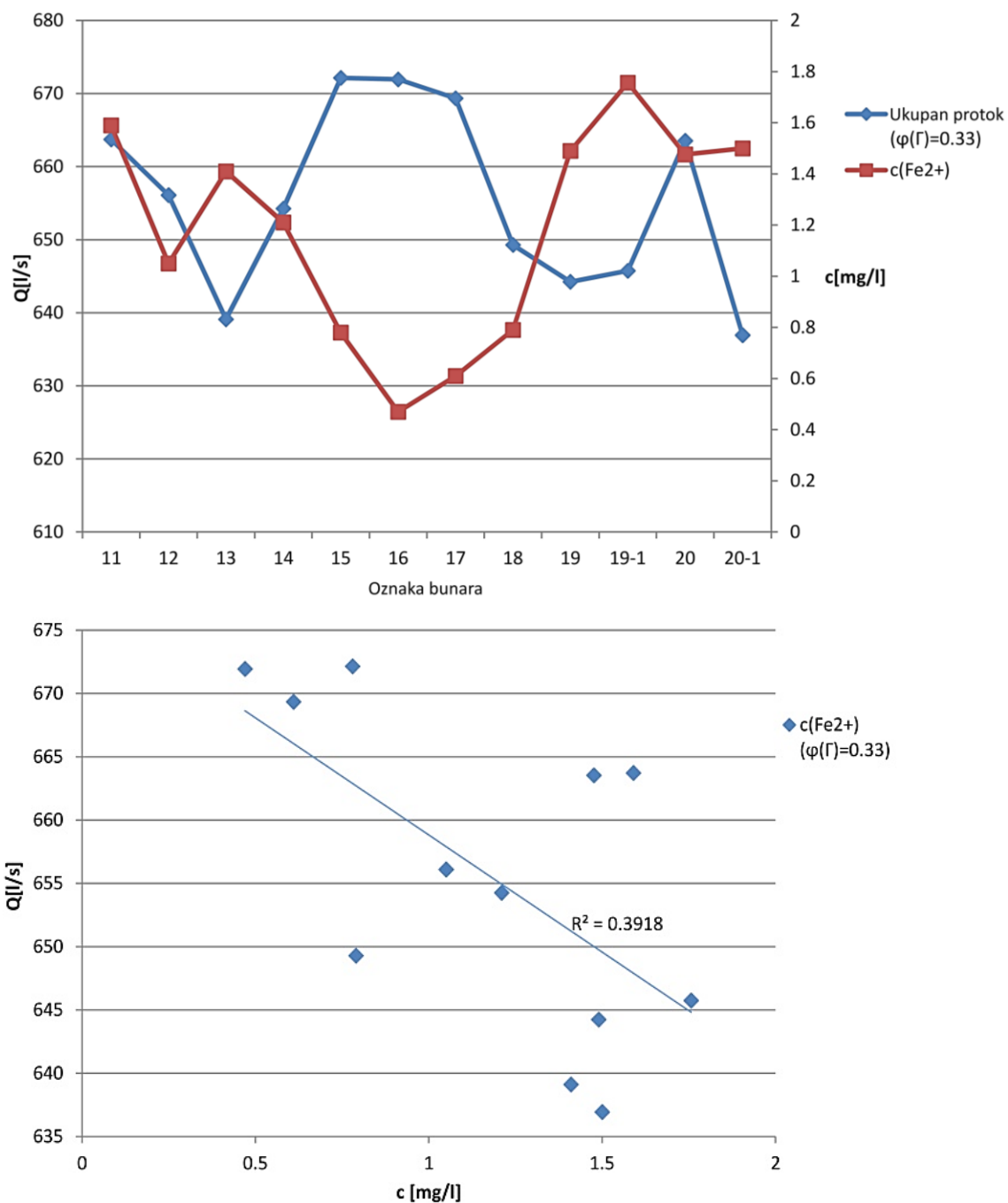
Спроведене анализе чији су резултати приказани указују на велике разлике у продуктивности групе бунара узроковане различитим избором бунара у које ће бити утискивани нови дренажи.

Да би се испитала веза између одређених параметара и утицаја утискивања дренажа у одабрани бунар на укупни проток групе бунара у симулираном периоду, за сваки бунар је одређен просечан укупни проток за све комбинације утискивања дренажа у које је укључен тај бунар.

Добијене вредности су поређене са концентрацијом двовалентног гвожђа, редокс потенцијалом, корекционим фактором за коефицијент филтрације (указује на пропусност

Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажима и примена новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара

средине), LHR на почетку симулације (указује на почетну колмираност), почетним протоком бунара, дубином дренажа. Најбоља корелација, значајно боља од осталих, уочава се код односа концентрације двовалентног гвожђа и просечног укупног протока за бунар.



Слика 98 Однос између концентрације раствореног двовалентног гвожђа у бунару и просечног укупног протока за све комбинације утискивања дренажа које укључују тај бунар

6 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

6.1 Корелације између брзине колмирања и физичко-хемијских параметара средине и протицаја по дренажу и анализа утицаја режима рада бунара на процес колмирања

Издавањем бунара код којих је колмирање дренажа процес који доминантно узрокује повећане локалног хидрауличног отпора, као и третирањем периода раздвојених регенерацијама одвојено, добијена је једноставна и задовољавајућа корелација између $KLHR$ -а и концентрације раствореног двовалентног гвожђа. Такође, добијена је и слабија корелација између $KLHR$ -а и редокс потенцијала, мање квалитетна али посебно употребљива за више вредности редокс потенцијала и ниже концентрације раствореног двовалентног гвожђа.

Утицај регенерација на укупну количину испумпане воде је према резултатима симулација веома изражен. У случају максималног анализираних броја од 7 регенерација (приближно једанпут у 4 године за период од 30 година) при $y_{reg} = 0,4$, што је просечна вредност за анализираних регенерација на београдском изворишту, количина испумпане воде је 2 пута већа него у случају да нема регенерације. Максималне дозвољене вредности брзина и протицаја по дренажу за црпљење константним протоком, за случај када нису предвиђене регенерације, у периоду на почетку рада бунара пре прве предвиђене регенерације се могу помножити са приближно квадратним кореном броја регенерација увећаног за 1. Након регенерација протицај по дренажу би требао да буде око 75% оног пре прве регенерације, ако је y_{reg} око $0,5 \pm 0,1$.

Ефекти регенерације се не могу предвидети, није установљена корелација између броја претходних регенерација или концентрације раствореног двовалентног гвожђа или редокс потенцијала и y_{reg} , док су установљене само слабе корелације између протицаја по дренажу пре регенерације и y_{reg} као и између локалних хидрауличких губитака пре регенерације и y_{reg} , што се може свести на оквирно правило да се ефекти регенерације умерено повећавају са величином локалних отпора. Приступ који се може предложити на основу резултата је да се за будуће прорачуне и прогнозе ефеката регенерације користи вредност y_{reg} за 0,1 до 0,2 већа од просечне за извориште (0,4).

Најчешћи случај у пракси да се радом пумпе у бунару управља тако да ниво буде константан при чему проток током времена опада је симулиран поделом периода између регенерација на велики број мањих периода у којима је проток константан, а мења се на прелазу у следећи период тако да ниво на крају следећег периода буде исти као на крају претходног. На овај начин је успешно реплициран феномен високих почетних протицаја који врло брзо опадају.

Однос између укупно испумпане запремине воде за случај када је обарање нивоа константно једнако максималном (симулираног кроз 400 периода) и када је проток између регенерација константан се за 4 регенерације креће између 1,16 и 1,25, док се за случај 7 регенерација креће између 1,06 и 1,10.

Такође је уочено да се, под условом да су ефекти регенерације исти, после неколико регенерација прорачуном добија да средњи проток између регенерација даље не опада због тога што је *LHR* постало довољно велико да проценат елиминисан регенерацијом постане једнак отпору насталом током времена протеклог од претходне регенерације.

6.2 Одређивање механизма биохемијског колмирања бунара

У оквиру докторске дисертације развијен је и једноставан нумерички модел у смислу броја ћелија и нумеричког прорачуна струјања. Насупрот геометријске и нумеричке једноставности, одређивање и задавање просторног распореда порозности и коефицијента хидрауличке проводљивости је много комплексније, при чему структура модела обухвата и кључну карактеристику – променљивост вредности наведених параметара током времена.

Просторни распоред порозности и коефицијента хидрауличке проводљивости у моделу су повезати са гранулометријским саставом материјала аквифера. Анализирани су резултати гранулометријских анализа узорака из свих бушотина око анализираних бунара да би се утврдила статистичка расподела масеног садржаја зрна различитих величина у узорцима материјала из бушотина, тј. у деловима аквифера. Развијен је алгоритам програмиран у Excel™ VBA таско-у који додељује математичка очекивања логнормалних расподела пречника зрна ћелијама тако што насумично бира ћелије којима додељује неку вредност пречника зрна, маркира ћелије којима је доделио пречник (ако наиђе на маркирану ћелију прескаче је) и када се овим пречником попуни онолико од укупног броја ћелија у моделу колико одговара функцији вероватноће, прелази на следећи пречник. На тај начин се дефинише гранулометријски састав свих ћелија, у складу са нормалном расподелом математичких очекивања пречника зрна по ћелијама и логнормалном расподелом пречника зрна унутар ћелија. Преко корелационих функција се даље од гранулометријског састава по ћелијама добија просторна расподела порозности и коефицијента хидрауличке проводљивости, чиме се реплицира природна хетерогеност материјала. У моделу је предвиђено да се порозност смањује према функцији са линеарном зависношћу од протока кроз ћелију и концентрације раствореног двовалентног гвожђа, услед чега се смањују и вредности коефицијента филтрације. Ово значи генерално повећање отпора струјању и његову прераспodelу по моделу и тиме и прераспodelу протока услед промена у порној запремини по ћелијама (проток се преусмерава ка иницијално мање проводљивом материјалу).

Након поређења резултата симулација и измерених протока и нивоа у бунарима и блиским пијезометрима, показало се да је примена модела за симулацију рада бунара одабраних за анализу дала добре резултате. Утицај вредности коефицијента брзине колмирања се показао кључним за добијање вредности разлике нивоа између блиског пијезометра и шахта бунара блиских измереним и далеко значајнијим од почетних вредности коефицијента филтрације. Вредности математичког очекивања пречника честица за различите бунаре, које су директно повезане са средњом вредношћу коефицијента филтрације, се много мање разликују између бунара него што се разликују отпори струјању. Вредности коефицијента брзине колмирања се много више разликују између бунара и односи између њих су слични односима између отпора струјању.

Да би се вредност коефицијента брзине колмирања могла дефинисати за нове бунаре спроведена је регресија средњих вредности коефицијента брзине колмирања добијених калибрацијом нумеричких модела дренажа за бунаре Rb-5m, Rb-8, Rb-15, Rb-16 и Rb-20 функције са линеарном зависношћу од концентрације раствореног двовалентног гвожђа – једначина (102). Једноставна функција је изабрана за регресију због тога што упркос једноставности даје добро поклапање, што указује на кинетику првог реда хемијске реакције која укључује растворено двовалентно гвожђе и која је директно повезана са нагомилавањем екстрацелуларних полимерних супстанци, исталожених минерала и минералних и органских партикула из подземне воде. Брзина запуњавања порног простора је дата следећом једначином:

$$-\frac{dn_b}{dt} = c_{kolm,reg} \cdot q = 114,5 \cdot \frac{1}{\frac{m^3}{s} \cdot \frac{mg}{l} \cdot a} \cdot q \cdot c(Fe^{2+}) = 68,7 \frac{1}{\frac{m}{s} \cdot \frac{mg}{l} \cdot a} \cdot v \cdot c(Fe^{2+}) \quad (103)$$

Резултати јасно указују да је кинетика раста локалних хидрауличких отпора по јединици протока по дренажу повезана са кинетиком запуњавања порног простора по јединици протока тј. коефицијентом брзине колмирања (Слика 96) – процес на микро нивоу се јасно испољава на макро нивоу.

6.3 Развој аналитичког модела за симулацију утицаја процеса колмирања на рад групе бунара са хоризонталним дренажима

Модел симулације рада групе бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту је успешно тестиран на групи бунара на савској обали Аде Циганлије.

Након анализе перформанси појединачног бунара која је спроведена у оквиру прве целине и анализе процеса колмирања на микро-нивоу помоћу нумеричког модела струјања ка једном дренажу у оквиру друге целине, коришћењем добијених резултата су у трећој целини развијени математички и модел симулације рада групе бунара. Основне карактеристике модела који је имплементиран у Excel spreadsheet-у уз помоћ macro-а за аутоматизацију прорачуна обухватају:

- одређивање депресије у издани услед струјања ка бунару у зависности од филтрационих карактеристика издани коришћењем аналитичког решења, са прорачуном суперпозиције депресија групе бунара,
- аутоматска калибрација којом се добијају просечне филтрационе карактеристике издани у зони издани у којој су бунари, као и фактора за локалну корекцију коефицијента филтрације за сваки бунар посебно
- функционална зависност између брзине повећавања локалних хидрауличких губитака на дренажима и протицаја по дренажу, концентрације двовалентног гвожђа и редокс потенцијала,
- прорачун смањења хидрауличких губитака услед регенерације дренажа,
- унос броја бунара у које ће бити утискивани нови дренажи и броја нових дренажа по бунару, са опцијом аутоматске оптимизације избора бунара у које се утискују нови дренажи, или аутоматског извршавања прорачуна за све могуће комбинације бунара у које ће бити утискивани дренажи,
- избор између опције да стари дренажи приликом утискивања буду затварани или да остану отворени, са прорачуном расподеле протока између старих и нових дренажа.

Анализе које су спроведене коришћењем софтверског модела указују на велики значај избора бунара у које ће бити утискивани нови дренажи и то на основу следећих података:

- садашњи проток,
- садашња разлика нивоа у бунару и коте дренажа,
- *KLHR* и *LHR*,
- концентрација двовалентног гвожђа у води,
- редокс потенцијал,
- број активних дренажа,
- ефекти досадашњих регенерација,

- постојање слабопропусног слоја,
- гранулометријске одлике материјала у слоју у којем се налазе дренажи.

Веома је важно правилно одредити проток који треба одржавати у сваком бунару, као и тренутак када треба реализовати регенерацију. Када су хидраулички губици на дренажима мали и/или споро расту ($KLHR$ је мало), регенерацију не треба спроводити јер непотребна и може бити и контрапродуктивна – Слика 39.

Да би се са сигурношћу могле донети одлуке о режиму рада бунара и примени мера за повећање протока (утискивања дренажа и регенерација), неопходно је да се редовно и довољно често прате:

- нивои воде у шахтовима бунара,
- протицаји бунара,
- ниво воде у барем једном “блиском” пијезометру,
- нивои воде у неком “плитком” пијезометру између два бунара и близу “блиског” пијезометра,
- физичко-хемијски састав воде у бунару.

Наведена мерења треба спроводити барем једном годишње на свим бунарима и увек непосредно пре и након (чим се успоставе експлоатациони услови рада) сваке регенерације и утискивања дренажа. Неопходни предуслов је да сваки „Ranney“ бунар има барем један “блиски” пијезометар, по могућству и два или три уз различите активне дренаже. Врло је важно испитати како одређени бунар “реагује” на регенерацију у смислу иницијалног смањења линеарних губитака по јединици протицаја (LHR), брзине њиховог раста (праћење $KLHR$) и промена у понашању у односу на претходне регенерације.

Како би се побољшале могућности модела да симулира реалне режиме црпљења и временске распореде радова на бунарима (регенерације и утискивање дренажа) у оквиру даљег развоја модела би требало додати следеће опције:

- варирање тренутка кад се утискују дренажи за сваки бунар посебно,
- задавање сталног нивоа у бунару током трајања симулације (варијабилни проток) уместо минималног на крају симулације (константни проток),
- могућност једноставног уноса корелације $KLHR$ и изабраног параметра физичко-хемијског квалитета воде.

7 ЛИТЕРАТУРА

Babac D, Babac P. (2009). Wells with Horizontal Drains – Theory, Practice and Calculation Examples. Balby International, Beograd, ISBN 86-907805-0-5

Bakker M., Kelson V., Luther K. (2005). Multilayer analytic element modeling of radial collector wells. *Groundwater*, 43 (6), pp. 926–934. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2005.00116.x

Bear J., Cheng A.H.–D. (2010). Modeling groundwater flow and contaminant transport. Springer Science & Business Media, Berlin, Vol. 23. DOI: 10.1007/978-1-4020-6682-5

Божовић Ђ., Поломчић М., Бајић Д. (2015). Хидродинамичка симулација и анализа режима подземних вода под утицајем бунара са хоризонталним дренажима (пример београдског изворишта). *Техника*, vol. 70, no. 5, pp. 777-786

Божовић Ђ., Поломчић М., Бајић Д. (2016). Хидродинамичка анализа оправданости утискивања нових дренажа - Београдско извориште. *Водопривреда* 0350-0519, Vol. 48, No. 282-284 pp. 221-233

Божовић Ђ. (2023). Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на Београдском изворишту подземних вода. Докторска дисертација, Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду

Cullimore D. R. (1999). *Microbiology of Well Biofouling*. CRC Press LLC, Boca Raton USA

Delleur J.W. (1999). *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press LLC, Boca Raton USA, ISBN 3-540-64745-7

Dimkić, M., Krstić, M., Filipović, N., Stojanović, B., Ranković, V., Otašević, L., Ivanović, M., Nedeljković, M., Tričković, M., Pušić, M., Boreli–Zdravković, Ђ., Ђurić, D., Kojić, M. (2007). Comparison of different configurations of Ranney wells using finite element modeling, *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 1 (1)

Dimkić M., Taušanović V., Pušić M., Boreli-Zdravković Ђ., Ђurić D., Slimak T., Petković A., Obradović V., Babić R. (2007). Belgrade Groundwater Source, Condition and Possible Development Directions. IWA Publishing, *Journal “Water Practice and Technology”*, ISSN 1751-231X, Volume 2, Issue 3

Dimkić M. & Pušić M. (2008a). Recommendations for Water Well Design Taking into Account Iron Clogging, Based on Experience Gained at the Belgrade Groundwater Source (in Serbian). *Civil Engineering Calendar*, Vol. 40, pp. 430-496

Dimkić M., Brauch H.J., Kavanaugh M. (2008b). *Groundwater Management in Large River Basins*. IWA Publishing, London, UK

Dimkić, M., Pušić, M., Vidović, D., Isailović, V., Majkić, B., Filipović, N. (2010). Numerical model assessment of radial-well ageing. *ASCE's Journal of Computing in Civil Engineering*. 25 (1), pp. 43–49

Dimkić M., Pušić M., Majkić-Dursun B., Obradović V. (2011a). Certain Implications of Oxidic Conditions in Alluvial Groundwater. *Journal of Serbian Water Pollution Control Society "Water Research and Management"*, ISSN 2217-5237, Vol. 1, No. 2, p. 27-43

Dimkić M., Pušić M., Vidović D., Petković A., Boreli-Zdravković Đ. (2011b). Several natural indicators of radial well ageing at the Belgrade Groundwater Source, Part 1, *Water Science & Technology*, IWA Publishing, London, ISSN 0273-1223, vol. 63, no. 11, p. 2560-2566

Dimkić M., Pušić M., Obradović V., Djurić D. (2011c). Several natural indicators of radial well ageing at the Belgrade Groundwater Source, Part 2. *Water Science & Technology*, IWA Publishing, London, ISSN 0273-1223, vol. 63, no. 11, pp. 2567-2574

Димкић М. (2012). Процеси у алувијалним подземним водама и њихов значај. 14. српски хидрогеолошки симпозијум, 17-20 маја 2012, Златибор, ISBN 978-86-7352-236-4, pp. 5-10

Dimkić M., Pušić M., Obradović V., Kovačević S. (2012). The effect of certain biochemical factors on well clogging under suboxic and mildly anoxic conditions. *Water Science & Technology*, IWA Publishing, London. ISSN 0273-1223, vol. 65, no. 12, pp. 2206-2212 (doi: 10.2166/wst.2012.129)

Dimkić M. & Pušić M. (2014). Correlation Between Entrance Velocities, Increase in Local Hydraulic Resistances and Redox Potential of Alluvial Groundwater Sources. *Water Research and Management*, Vol. 4, No. 4, pp. 3-23

Dimkić M. & Pušić M. (2017). Comparative assessment of radial collector well elements with a new approach. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, No. 78, pp. 37-45

Dimkić M. & Pušić M. (2018). A new approach to the definition of design criteria for radial collector wells in anoxic settings. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, No. 79, pp. 31-45

Dotlić, M., Vidović, D., Dimkić, M., Pušić, M., Radanović, J. (2011). Finite volume method for well-driven groundwater flow. *Finite volumes for complex applications, VI Problems & Perspectives*, Conference paper, pp. 361–368. DOI: 10.1007/978-3-642-20671-9_38

Dotlić, M. (2014). Finite volume methods for well-driven flows in anisotropic porous media. *Computational Methods in Applied Mathematics*, 14 (4), pp. 473-483. DOI: 10.1515/cmam-2014-0017

Dotlić M., Vidović D., Pokorni B., Pušić M., Dimkić M. (2015). Simulating Groundwater Flows with WODA, IWA 7th Eastern European Young Water Professionals Conference, 17-19 September 2015, Belgrade, Serbia. IWA - International Water Association, pp. 39-46

Дотлић М. (2015). Прорачун подземног тока методом коначних запремина. Докторска дисертација, Математички факултет Универзитета у Београду

Dotlić M., Vidović D., Pokorni B., Pušić M., Dimkić M. (2016). Second-order accurate finite volume method for well-driven flows. *Journal of Computational Physics*, 307, pp. 460–475. DOI: 10.1016/j.jcp.2015.12.021

Gaol C.L., Ganzer L., Mukherjee S., Alkan H. (2021). Investigation of clogging in porous media induced by microorganisms using a microfluidic application. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 2021, 7, pp. 441–454. DOI: 10.1039/d0ew00766h

Haitjema H., Kuzin S., Kelson V., Abrams D. (2010). Modeling flow into horizontal wells in a Dupuit–Forchheimer model. *Groundwater*, 48 (6), pp. 878–883. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2010.00694.x

Houben G.J. (2003). Iron oxide incrustations in wells. Part 1: genesis, mineralogy and geochemistry, *Applied Geochemistry* 18, pp. 927–939

Houben, G.J. (2006). The Influence of well hydraulics on the spatial distribution of well incrustations. *Groundwater*, 44 (5), pp. 668–675

Houben G.J., Treskatis C. (2003). *Water well rehabilitation and reconstruction*. McGraw&Hill, New York, USA

Houben G.J. & Weihe U. (2010). Spatial Distribution of Incrustations around a Water Well after 38 Years of Use. *Ground water*, Vol. 48, No. 1, pp 53–58

Институт за водопривреду “Јарослав Черни” – ИЈЧ (2005). Главни пројекти ревитализације бунара Rb-7, Rb-8, Rb-15, Rb-17, Rb-29 и Rb-30, утискивањем додатних дренажа. Београд

Институт за водопривреду “Јарослав Черни” – ИЈЧ (2005 – 2010). Студија “Београдско извориште - стање и правци развоја”. Београд

Институт за водопривреду “Јарослав Черни” – ИЈЧ (четири фазе, 2010 – 2013). Студија старење бунара и одржавање објеката. Београд

Институт за водопривреду “Јарослав Черни” – ИЈЧ (2016). Студија економских ефеката истраживања и побољшања стања водозахватних објеката подземних вода. Београд

Институт за водопривреду “Јарослав Черни” – ИЈЧ (2011 – 2019). Пројекат „Методологија оцене, пројектовања и одржавања изворишта подземних вода у зависности од степена аеробности”. Београд

Мајкић-Dursun B., Vulić P., Dimkić M. (2015). Clogging of water supply wells in alluvial aquifers by mineral incrustations, central Serbia. *Геолошки анали Балканскога полуострва*, Београд 76, pp 73-83. DOI: 10.2298/GABP1576073M

Мајкић-Дурсун Б. (2013). Старење бунара у алувијалним седиментима са различитим условима оксичности, докторска дисертација. Рударско-геолошки факултет универзитета у Београду

Mansuy N. (2017). *Water Well Rehabilitation: A Practical Guide to Understanding Well Problems and Solutions*. CRC Press, ISBN 1351404776, 9781351404778

Medihala P.G. (2012). *Microbiological and molecular evaluation of an alluvial water well field and fouling-related phenomena*, PhD Thesis

Martin R. (ed.) (2013). *Monograph „Clogging Issues Associated with Managed Aquifer Recharge Methods“*. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia

Mitrinović D., Pušić M., Anđelković O., Zarić J., Dimkić M. (2018). *Novel Method for Selection of Ranney Wells for Regeneration Based on Hydraulic Modeling*. *Water Research and Management*, ISSN 2217-5237, Vol. 8, No. 1, Serbian Water Pollution Control Society

Mitrinović, D., Pušić, M., Popović, M., Kovačević, S., Dimkić, M. (2021). *Analysis of kinetics of local hydraulic losses on the laterals of radial wells at Belgrade groundwater source*. *Water Supply*, 22 (1), pp. 812-832. DOI: 10.2166/ws.2021.234

Mohamed A., Rushton K. (2006). *Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model*. *Journal of hydrology*, 329 (1–2). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.02.006

Moore R., Kelson V., Wittman J., Rash V. (2011). *A modeling framework for the design of collector wells*. *Groundwater*, 50 (3). DOI: 10.1111/j.1745-6584.2011.00850.x

Odong J. (2008). *Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis*. *The Journal of American Science*, 4(1), ISSN 1545-1003

Обрадовић В., Мајкић-Дурсун Б., Петковић А., Димкић М. (2012). Прилог познавању природе окера. 41. конференција о актуелним проблемима коришћења и заштите вода – Вода 2012, Дивчибаре 5 – 7. јуна 2012.

Ophori D.U., Farvolden R.N. (1985). *A hydraulic trap for preventing collector well contamination: A case study*. *Groundwater*, 23 (5), pp. 600–610. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1985.tb01508.x

Patel H.M., Eldho T.I., Rastogi A.K. (2010). *Simulation of radial collector well in shallow alluvial riverbed aquifer using Analytic Element Method*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136 (2). DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000141

Пушић М., Димкић М., Видовић Д., Дотлић М., Опарушић И. (2012). *Анализа утицаја неких хидрогеолошких параметара на почетни капацитет бунара са хоризонталним дренажима*. *Водопривреда*, 44 (258–260), pp. 175-180

Pušić M. & Dimkić M. (2017) Comparative assessment of radial collector well elements with a new approach. Геолошки анали Балканског полуострва (Annales géologiques de la péninsule balkanique), 78, pp. 37-45

Reed J. E. (1980). Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 3 Applications of hydraulics, Chapter B3: Type curves for selected problems of flow to wells in confined aquifers. USGS, United states government printing office, Street, Arlington, VA, USA

Rockhold M.L., Yarwood R.R., Niemet M.R., Bottomley P.J., Selker J.S. (2002). Considerations for modeling bacterial-induced changes in hydraulic conductivity. Advances in Water Resources 25, pp. 477–495

Sawyer C.S., Lieuallen–Dulam K.K. (1998). Productivity comparison of horizontal and vertical ground water remediation well scenarios. Groundwater, 36 (1), pp. 98–103. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1998.tb01069.x

Singh S.K. (2009). Approximation of well functions for leaky aquifers and large-diameter wells. Technical report number NIH/07-09/2. National Institute of Hydrology, Roorkee, Uttarakhand, India

Sulaiman M., Tsutsumi D., Fujita M., Hayashi K. (2007). Classification of Grain Size Distribution Curves of Bed Material and the Porosity. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 50 B

Taylor S.W., Jaffe P.R. (1990a). Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium. 1. Experimental investigation. Water Resour Res 26, pp. 2153–2159

Taylor S.W., Jaffe P.R. (1990b). Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium. 3. Dispersivity and model verification. Water Resour Res 1990b;26:2171–80.

Taylor S.W., Jaffe P.R. (1990c). Substrate and biomass transport in a porous medium. Water Resour Res 26, pp. 2181–2194

Taylor S.W., Milly P.C.D., Jaffe P.R. (1990). Biofilm growth and related changes in the physical properties of a porous medium, 2. Permeability. Water Resour Res 26, pp. 2161–2169

Thullner M., Schroth M.H., Zeyer J., Kinzelbach W. (2003). Modeling of a microbial growth experiment with bioclogging in a two-dimensional saturated porous media flow field. Journal of Contaminant Hydrology 70, 37– 62

Vidović D., Dotlić M., Pušić M. (2011). Computing well-driven groundwater flow with a finite volume method. IWA specialist groundwater conference, Belgrade

Вуковић М., Соро А. (1990). Хидраулика бунара – теорија и пракса. Грађевинска књига, Београд, ISBN 86-395-0265-х

Vuković M, Soro A. (1992). Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition. Littleton, Colorado, Water Resources Publications

Weidner C., Henkel S., Lorke S., Rüdiger T.R., Schüttrumpf H., Klauer W. (2011). Investigation of Clogging Processes on Vertical Filter Wells Using an Experimental Model. 11th International Mine Water Association Congress – Mine Water – Managing the Challenges, Aachen, Germany

Widdowson M.A. (1991). Comment on: An evaluation of mathematical models of the transport of biologically reacting solutes in saturated soils and aquifers. *Water Resour Res* 27, pp.1375–1378

Widdowson M.A., Molz F.J., Benefield L.D. (1988). A numerical transport model for oxygen- and nitrate-based respiration linked to substrate and nutrient availability in porous media. *Water Resour Res* 24, pp.1553–1565

Yeh H-D., Chang Y.-C. (2013). Recent advances in modeling of well hydraulics. *Advances in water resources*, 51, 27–51. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.03.006

Зарић Ј., Митриновић Д., Анђелковић О., Божовић Ђ., Димкић М. (2018). Упоредна анализа резултата гранулометријских анализа добијених на основу две методе бушења на локацији бунара РБ-44 на београдском изворишту. 17. конгрес геолога. Врњачка Бања, 17-20.5.2017, pp 468-472

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Анализа механизма процеса колмирања бунара са хоризонталним дренажним и примена новог алгоритма за оптимизацију при симулацији рада бунара
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Институт за водопривреду „Јарослав Черни“ а.д. б) в)
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Пројекат „Методологија оцене, пројектовања и одржавања изворишта подземних вода у алувијалним срединама у зависности од степена аеробности“, евиденциони број ТР 37014, програм технолошког развоја Министарства просвете, науке
1. Опис података
<p>1.1 Врста студије</p> <p><i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i></p> <p><u>Докторска дисертација, која обухвата испитивање процеса колмирања бунара кроз теренске радове који укључују мерења и узорковање воде, лабораторијске анализе воде, обраду добијених података, математичку регресију и корелације, израду софтверских симулационих модела</u></p>
<p>1.2 Врсте података</p> <p>а) <input checked="" type="radio"/> квантитативни б) <input type="radio"/> квалитативни</p>
<p>1.3. Начин прикупљања података</p> <p>а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) <input checked="" type="radio"/> снимци, фотографије: навести врсту <u>фотографије теренских радова, орто-фото</u> е) <input checked="" type="radio"/> текст, навести врсту <u>научна и стручна литература, студије</u> ж) <input checked="" type="radio"/> мапа, навести врсту <u>географске, геолошке</u></p>

з) остало: описати Узорци воде узорковане за потребе лабораторијских анализа, резултати мерења нивоа подземних вода и протока бунара

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- а) Ехсел фајл, датотека .xlsx
- б) SPSS фајл, датотека _____
- в) PDF фајл, датотека .pdf
- г) Текст фајл, датотека .docx
- д) JPG фајл, датотека .jpg
- е) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- а) број варијабли 40
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) 350

1.3.3. Поновљена мерења

- а) да
- б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) временски размак између поновљених мера је неколико месеци
- б) варијабле које се више пута мере односе се на ниво подземних вода, проток, концентрацију двовалентног гвожђа у води, редокс потенцијал
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- а) Да
- б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

- а) експеримент, навести тип Узорковање и лабораторијска анализа узорака воде, мерења нивоа подземних вода и протока применом стандардних и нестандардних метода
- б) корелационо истраживање, навести тип математичка регресија варијабли изведених из резултата мерења
- ц) анализа текста, навести тип Прикупљање података анализом доступне литературе
- д) остало, навести шта софтверске симулације

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

мултипараметарска SEBA MPS-D сонда, нивомер, SMEWW 21 метода 2580 B, SRPS EN ISO 5667-1, JUS ISO 5667-6 1997, SMEWW 21 метода 3500-Fe

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

- а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? _____
- б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не
- в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан поређењем резултата са доступним подацима претходних истраживања, поређењем трендова истих варијабли на различитим објектима, статистичким методама

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Вишеструком провером унетих података

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијум докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду

3.1.2. URL адреса <https://www.cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- а) Да
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____
- в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да Не

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

- јавно доступни
- б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области
- ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Давид Митриновић, davidmitrinovic@yahoo.com

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Давид Митриновић, davidmitrinovic@yahoo.com

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Давид Митриновић, davidmitrinovic@yahoo.com
