

НАСТАВНО–НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Ђорђија Божовића

Одлуком број 1/91, од 06. 04. 2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ђорђија Божовића, дипл. инж. геологије, под насловом

„Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода“

Након прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала, као и консултација са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1 Хронологија одобравања и израде дисертације

- Кандидат Ђорђије Божовић, дипл. инж. геологије, је академске 2014/2015. године уписао докторске студије на Рударско–геолошком факултету Универзитета у Београду на студијском програму Хидрогеологија. Све испите предвиђене наставним планом и програмом студија кандидат је положио са просечном оценом 10.
- У септембру месецу 2020. године, израдом и јавном одбраном поднетог Пројекта докторске дисертације, дефинисане су предметна научна област и методологија истраживања, чиме је створена основа за дефинисање основне структуре докторске дисертације, након чега је кандидат поднео пријаву теме за израду дисертације.
- Одлуком Научно–наставног већа Рударско–геолошког факултета (број 1/344, од 18. 09. 2020. године) именована је Комисија за оцену подобности теме и кандидата, у саставу: др Душан Поломчић, редовни професор (Рударско–геолошки факултет, Универзитет у Београду), др Драгољуб Бајић, доцент (Рударско–геолошки факултет, Универзитет у Београду), др Весна Ристић Вакањац, редовни професор (Рударско–геолошки факултет, Универзитет у Београду) и др Зоран Никић, редовни професор (Шумарски факултет, Универзитет у Београду).
- Научно–наставно веће Рударско–геолошког факултета, у складу са чланом 40. Закона о високом образовању, као и чланом 181. Статута Универзитета у Београду, на седници одржаној 22. 10. 2020. године је донело одлуку о усвајању извештаја Комисије за оцену подобности теме и кандидата (број 1/451, од 27. 10. 2020. године), чиме је одобрена израда докторске дисертације под насловом „Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода“. За ментора израде предметне докторске дисертације је именован др Душан Поломчић, редовни професор.
- Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, на захтев Рударско–геолошког факултета (број 1/454, од 27. 10. 2020. године), на седници одржаној

1. 12. 2020. године, донело је Одлуку којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Ђорђевића Божовића, дипл. инж. геологије (02 број: 61206-3724/2-20, од 1. 12. 2020. године).

- На молбу кандидата, Научно–наставно веће Рударско–геолошког факултета, на седници одржаној 22. 09. 2022. године донело је Одлуку о продужењу рока за израду докторске дисертације, до завршетка школске 2022/2023. године (бр. 1/228 од 27. 09. 2022. године).
- Након што је окончао рад на изради докторске дисертације, кандидат је поднео захтев за именовањем комисије за оцену и одбрану дисертације у априлу 2023. године.
- На седници Научно–наставног већа Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду, одржаној 06. 04. 2023. године, именована је Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ђорђевића Божовића, дипл. инж. геологије, под насловом „Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажним системима на београдском изворишту подземних вода“ (број 1/91 од 06. 04. 2023. године), у саставу: др Душан Поломчић, редовни професор (Рударско–геолошки факултет, Универзитет у Београду), др Драгољуб Бајић, ванредни професор (Рударско–геолошки факултет, Универзитет у Београду), др Весна Ристић Вакањац, редовни професор (Рударско–геолошки факултет, Универзитет у Београду), др Саша Милановић, доцент (Рударско–геолошки факултет, Универзитет у Београду) и др Зоран Никић, редовни професор у пензији (Шумарски факултет, Универзитет у Београду).

1.2 Место дисертације у одговарајућој научној области

Предметна докторска дисертација под насловом „Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажним системима на београдском изворишту подземних вода“ припада области техничких наука. Према предмету истраживања, дисертација припада научној области „Геолошко инжењерство“, односно ужој научној области „Хидрогеологија“, за коју је матичан Рударско–геолошки факултет Универзитета у Београду. Специјалистички сегмент који дисертација обухвата је нумеричко хидродинамичко моделирање процеса старења бунара са хоризонталним дренажним системима.

За ментора докторске дисертације је одређен др Душан Поломчић, редовни професор Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду, чија је ужа научна област Хидрогеологија и који испуњава законом предвиђене услове за менторство, доказано и кроз досадашњу успешну израду и одбрану 3 докторске дисертације кандидата чији је био ментор.

1.3 Биографски подаци о кандидату

Ђорђевић Божовић је рођен 31. јануара 1981. године у Никшићу. Гимназију „Стојан Церовић“ завршио је у Никшићу, док је високо образовање стекао на смеру за хидрогеологију Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду, на којем је дипломирао 2005. године. Током основних студија је био стипендиста Електропривреде Црне Горе, са којом данас професионално сарађује. Од 2014. године је студент докторских академских студија на Департману за хидрогеологију матичног факултета.

Област ужег професионалног интересовања кандидата представљају: нумеричко хидродинамичко моделирање подземних вода, експлоатација подземних вода за различите потребе и водозахватни објекти. Београдско извориште подземних вода и бунари са хоризонталним дренажним системима се налазе у фокусу кандидатовог стручног и научног рада, започетог у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“ 2005. године, у којем је током једне деценије био ангажован на вишегодишњим мултидисциплинарним пројектима експлоатације и заштите подземних вода, заштите од негативног утицаја подземних вода, питањима

смањења капацитета водозахватних објеката, подлогама за израду крупних привредних објеката.

Значајнији пројекти у којима је учествовао су: Студија: Београдско извориште подземних вода – стање и правци развоја (2005–2010); Студија утицаја ХЕ „Ђердап I“ у режиму рада до 70,30 мнм код ушћа Нере на извориште Београдског водовода изграђеног до успостављања режима (2005–2011); Студија „Старење бунара и одржавање објеката“ (2011); Идејни и главни пројекат надвишења касета „А“ и „Б“ депоније пепела ТЕ „Колубара“ у Великим Црљенима до коте 116,0 мнм и системи заштите (2009–2011); Елаборат о хидродинамичком моделу подземних вода београдског изворишта (2011); Пројекат мониторинга београдског изворишта подземних вода (2011); Елаборат о зонама санитарне заштите изворишта подземних и површинских вода водоснабдевања града Београда (2012); Пројекат примењених геолошких истраживања за израду Идејног и Главног пројекта магистралног гасовода „Јужни ток“ на територији Републике Србије (2012); Главни пројекат утискивања дренажа на бунару РБ–1 у Обреновцу (2012).

Учествовао је у изради техничког решења „Методологија са математичким моделом за оцену капацитета локације бунара са хоризонталним дренажима београдског изворишта“, 2010. (урађеног за Министарство пољопривреде, шумарства и водопривреде Републике Србије и ЈКП „Београдски водовод и канализација“).

Кандидат Ђорђевић Божовић је био ангажован на пројекту „Методологија оцене, пројектовања и одржавања изворишта подземних вода у алувијалним срединама у зависности од степена аеробности“ Министарства науке и технолошког развоја Републике Србије.

Радни однос кандидат је наставио у ЈКП „Београдски водовод и канализација“ (Сектор за развој, пројектовање и инвестиције, Служба за развој изворишта подземних вода), у којем је ангажован на изради пројеката утискивања нових дренажа на бунарима, питањима заштите ресурса подземних вода, имплементацији савремених метода математичког моделирања режима подземних вода и др. Значајнији пројекти и активности у којима је учествовао су: Идејни пројекат и пројекат за извођење санације бунара РБ–1м на изворишту подземних вода Београда (2019); Идејни пројекат и пројекат за извођење санације бунара РБ–7м на београдском изворишту подземних вода (2016); Главни пројекат израде цевастог бунара Б–105 у оквиру „Јужне натеге“ на Макишком пољу (2014) и Главни пројекат израде цевастог бунара Б–114 у оквиру „Северне натеге“ на Макишком пољу (2014); руководио је извођењем хидрогеолошких истраживања у зони бунара са хоризонталним дренажима РБ–17 за потребе обезбеђења подлога за пројектовање утискивања нових дренажа (2017); руководио је извођењем 30 пијезометара на изворишту подземних вода Београда у циљу обезбеђења подлога за пројектовање ревитализације 4 бунара са хоризонталним дренажима, као и мониторинга режима нивоа и квалитета подземних вода (2017); учествовао је у планирању, извођењу, надзору над извођењем и обради резултата бројних теренских хидрогеолошких истражних радова и објеката.

Од 2021. године, кандидат је члан саветодавног радног тела при Одбору директора Електропривреде Црне Горе за реализацију Пројекта интегралне валоризације водног потенцијала Никшићког поља (у својству саветника и пројектанта доминантно ангажован на Пројекту превођења дела вода реке Зете у акумулације Крупац и Слано у циљу побољшања искоришћености хидроенергетских ресурса Никшићког поља). Такође, члан је радног тела за пројекат поделе водних ресурса Билећког језера између Републике Црне Горе и Републике Српске, као и изградње хидроелектране „Суторина“ у Боки Которској као заједничког пројекта Електропривреде Црне Горе са Електропривредом Републике Српске.

Студентима Департмана за хидрогеологију Рударско–геолошког факултета више пута држао предавање на тему хидрогеолошких специфичности београдског изворишта подземних вода, бунара са хоризонталним дренажима и хидродинамичког моделирања овог специфичног типа водозахватних објеката.

Учесницима „RESONATE – Development of Professional Courses in Sustainable Water Management“ пројекта, који представља сарадњу академских и истраживачких организација из Србије, Северне Македоније, Шпаније и Португала, у оквиру „Numerical modelling for Water balance“ курса држао предавање под насловом „Hydrodynamic analysis of radial collector well ageing at Belgrade well field“.

Кандидат је усавршавање обављао и похађајући организоване курсеве у Србији и иностранству. Резултате својих досадашњих истраживања је више пута публикувао на научним скуповима националног и међународног значаја:

XVI српски симпозијум о хидрогеологији са међународним учешћем (28.09. – 02.10.2022., Златибор);

XVII Конгрес геолога Србије (17–20. мај 2018., Врњачка Бања);

Форум вода 2016 (16–18. новембар 2016., Београд), предавање „Примери екстремних загађења издани београдског изворишта подземних вода и шта смо научили на њима“;

XV српски симпозијум о хидрогеологији са међународним учешћем (14–17. септембар 2016., Копаоник);

XIV српски симпозијум о хидрогеологији са међународним учешћем (17–20. мај 2012., Златибор);

IWA Specialist Groundwater Conference (08–10 September 2011, Belgrade, Serbia);

Balkans Regional Young Water Professionals Conference (29–30 April 2010, Belgrade, Serbia);

CC–WaterS, Climate change and impacts on water supply, 1st Student Training Course „Water Supply in a Changing Environment“, Nyíregyháza, Мађарска.

Groundwater management in the Danube river basin and other large river basins (07–09 June 2007, Belgrade, Serbia).

Кандидат је члан Српског геолошког друштва.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Ђорђија Божовића под називом „Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажним бунама на београдском изворишту подземних вода“ је написана у складу са Упутством о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду. Дисертација је написана на 130 страна текста, садржи 46 графичких илустрација (дијаграма, фотографија, карата и др.), 10 табела у тексту и 228 библиографских јединица у списку литературе. Структуру дисертације докторанда Ђорђија Божовића чини осам основних целина текста:

УВОД

Процеси старења бунара са хоризонталним дренажним бунама

Циљеви израде дисертације

1 КОНЦЕПЦИЈА ХИДРОДИНАМИЧКИХ ИСТРАЖИВАЊА ПРОЦЕСА СТАРЕЊА БУНАРА СА ХОРИЗОНТАЛНИМ ДРЕНОВИМА

2 ПРИКАЗ ГЕОЛОШКЕ ГРАЂЕ И ХИДРОГЕОЛОШКИХ ОДЛИКА ТЕРЕНА БЕОГРАДСКОГ ИЗВОРИШТА ПОДЗЕМНИХ ВОДА

3 ТЕОРИЈСКИ ОСНОВ ХИДРОДИНАМИЧКИХ ИСТРАЖИВАЊА ПРОЦЕСА СТАРЕЊА БУНАРА СА ХОРИЗОНТАЛНИМ ДРЕНОВИМА

3.1 Преглед досадашњих хидрауличких и хидродинамичких истраживања процеса старења бунара са хоризонталним дренажима

3.1.1 Примењене методе и резултати досадашњих хидродинамичких истраживања бунара са хоризонталним дренажима

3.1.2 Методологија и резултати досадашњих хидродинамичких истраживања процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на изворишту подземних вода Београда

3.1.3 Закључак примењених метода и остварених резултата досадашњих хидродинамичких истраживања процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на изворишту подземних вода Београда

3.2 Хидраулика и хидродинамичко моделирање бунара са хоризонталним дренажима са аспекта процеса старења

3.2.1 Фактори који утичу на капацитет и режим рада бунара са хоризонталним дренажима

3.2.2 Хидраулички механизам захватања подземних вода бунаром са хоризонталним дренажима

3.2.3 Примена граничног услова „дрен“ у хидродинамичком моделирању бунара са хоризонталним дренажима

3.2.4 Сличност граничног услова „дрен“ са условима треће врсте контурних услова у хидрауличкој теорији филтрације подземних вода

3.2.5 Хронолошки приказ развоја MODFLOW–USG кода за дискретизацију уже зоне бунара са хоризонталним дренажима неструктурираним мрежама дискретних поља на хидродинамичком моделу

3.2.6 Употреба MODFLOW–USG кода и Connected Linear Network (CLN) нумеричког пакета у савременој симулацији бунара са хоризонталним дренажима

4 МЕТОДОЛОГИЈА НАУЧНО–ИСТРАЖИВАЧКОГ РАДА

4.1 Методологија израде нумеричког хидродинамичког модела анализираног дела издани београдског изворишта подземних вода

4.1.1 Подаци о детаљно анализираном бунару са хоризонталним дренажима РБ–5м

4.1.2 Методологија израде 3Д хидрогеолошког модела анализираног дела терена

4.1.3 Методологија израде 3Д хидрогеолошког модела бунара са хоризонталним дренажима

4.1.4 Анализа експлоатационог режима нивоа издани у зони бунара РБ–5м

4.1.5 Методологија испитивања утицаја шематизације простора и времена на резултате нумеричких хидродинамичких модела бунара са хоризонталним дренажима

4.1.6 Анализа дискретизације времена на формираном хидродинамичком моделу

4.1.7 Анализа дискретизације простора на формираном хидродинамичком моделу

4.2 Методологија испитивања старења бунара са хоризонталним дренажима на нумеричком хидродинамичком моделу

4.3 Методологија хидродинамичких испитивања утицаја пропусности прифилтерске зоне дренажа на капацитет и хидраулички режим рада бунара

4.3.1 Хидраулички реална симулација бунара са хоризонталним дренажима

4.3.2 Хидраулички еквивалентна и хидраулички реална симулација прифилтерске зоне дренажа

4.3.3 Методологија испитивања утицаја дебљине и пропусности прифилтерске зоне дренажа

4.4 Методологија дефинисања оптималног капацитета бунара са хоризонталним дренажима на изворишту подземних вода Београда

4.5 Методологија хидродинамичких испитивања рада групе хидраулички реално симулираних бунара са хоризонталним дренажима у условима оптималног капацитета дренажа

5 РЕЗУЛТАТИ ХИДРОДИНАМИЧКИХ ИСТРАЖИВАЊА ПРОЦЕСА СТАРЕЊА БУНАРА СА ХОРИЗОНТАЛНИМ ДРЕНОВИМА

- 5.1 Резултат израде 3Д хидрогеолошког модела анализираниог дела издани београдског изворишта подземних вода
- 5.2 Резултати реконструкције хидрауличног режима рада анализираниог бунара РБ–5м
- 5.3 Резултати анализе режима нивоа издани у зони анализираниог бунара РБ–5м
- 5.4 Резултати анализе утицаја дискретизације времена на хидродинамичком моделу
- 5.5 Резултати анализе утицаја дискретизације простора на хидродинамичком моделу бунара са хоризонталним дренама
- 5.6 Резултати израде хидродинамичког модела дела издани београдског изворишта
 - 5.6.1 Почетни и гранични услови хидродинамичког модела
 - 5.6.2 Калибрација модела
 - 5.6.3 Идентификација репрезентативних вредности филтрационих карактеристика седимената издани
 - 5.6.4 Идентификација репрезентативних вредности наслага дна површинских водних тела (реке Саве и рукаваца Адица)
 - 5.6.5 Квантификовање хидрауличких карактеристика дренава током времена
 - 5.6.6 Резултати анализе старења бунара РБ–5м у односу на критеријум биохемијског колмирања
- 5.7 Резултати испитивања генезе увећаних почетних отпора на дренама
- 5.8 Резултати анализе дефинисања оптималног капацитета бунара са хоризонталним дренама са аспекта процеса старења путем колмирања
- 5.9 Резултати хидродинамичке анализе рада групе хидраулички реално симулираних бунара са хоризонталним дренама у циљу дефинисања оптималних капацитета бунара
- 5.10 Резултати хидродинамичке анализе утицаја пропусности прифилтерске зоне дренава на капацитет и хидраулички режим рада бунара

6 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

7 ЛИТЕРАТУРА.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У *уводном делу* докторске дисертације, докторанд је представио типичне геолошке, хидрогеолошке и хидролошке услове терена у којима се захватање подземних вода (доминантно за потребе снабдевања пијаћим водама) врши изградњом и експлоатацијом бунара са хоризонталним дренама. Истакнут је хидраулички механизам функционисања изворишта подземних вода у условима тзв. обалске филтрације, као и његови бенефити по физички, хемијски и микробиолошки квалитет захваћених подземних вода, као и стабилност квалитета током времена.

У наставку уводног дела дат је приказ типичне конструкције бунара са хоризонталним дренама, кратак историјски приказ развоја изворишта подземних вода Београда и дата темељна основа за разумевање услова за настанак, динамику развоја и ефекте (тј. последице) процеса старења бунара са хоризонталним дренама на датом изворишту, као неизоставног пратиоца експлоатације подземних вода за потребе снабдевања пијаћим водама становништва и привреде у Београду. Представљене су врсте и типови процеса старења бунара (корозија, механичко, хемијско, биолошко колмирање, као и њихово садејство), као и детаљан приказ хидрауличног механизма процеса колмирања дренава, а нарочито прифилтерске зоне и филтерске конструкције дренава, будући да је старење бунара на рачун колмирања доминантно присутно на овим деловима дренава.

Будући да су дати основни појмови за јасно разумевање анализираног процеса старења бунара, још су у уводном делу текста дисертације приказани узроци, тј. фактори који у највећој мери утичу на динамику интензивног опадања капацитета бунара на београдском изворишту подземних вода – садржај двовалентног гвожђа у подземним водама, редокс потенцијал подземних вода, као и вредности улазних брзина подземних вода у дренаже, као једине водозахватне делове конструкције једног бунара.

Циљ хидродинамичких истраживања која је кандидат реализовао у оквиру израде докторске дисертације је био тај да се дискусијом и критичком анализом до данас коришћених приступа у хидраулички реалној симулацији дренажа на хидродинамичким моделима, представи утицај примењених методологија и техника симулације дренажа на идентификацију узрока колмирања, као и на квантификовање промене хидрауличких карактеристика дренажа током времена експлоатације.

Додатно, аутор је за примарни циљ својих истраживања одредио спровођење и промоцију савремене хидродинамичке анализе, кроз израду тродимензионалног нумеричког хидродинамичког модела, са тежњом да симулацијом нестационарних услова режима подземних вода дела београдског изворишта, у вишегодишњем временском периоду, изврши веродостојну идентификацију узрока старења бунара са хоризонталним дренажима на предметном изворишту, на начин што је детаљно квантификовао промене отпора на дренажима на примеру једног од бунара на изворишту подземних вода на којем су пре више година утиснути нови дренажи (а потом је детаљно праћен ефекат рада бунара са новим дренажима). Овако дефинисан циљ спроведених истраживања је имао значај у оцени ваљаности претходно дефинисаног функционалног односа пораста отпора на дренажима у зависности од садржаја наведених компоненти хидрохемијског састава подземних вода.

Након извршеног прегледа урађене докторске дисертације, може се констатовати да су истраживања кандидата Ђорђевића Божовића имала за циљ дефинисање нових закључака о узроцима и динамици колмирања дренажа бунара београдског изворишта, као и дефинисање репрезентативне методологије изучавања проблема старења бунара са хоризонталним дренажима израдом детаљних хидродинамичких модела (не само за бунаре анализираног изворишта, већ и у општем случају). Комплексност услова присутних на београдском изворишту подземних вода у погледу стратификације издани, хидрогеолошких одлика депонованих седимената, режима нивоа издани, услова прихрањивања издани, конструктивних карактеристика водозахватних објеката и другог, представља добар основ за препоруку усвојене и примењене методологије симулације бунара и софтверских алата које је докторанд користио у свом истраживању.

У делу текста предметне дисертације *Концепција хидродинамичких истраживања*, аутор даје приказ методологија, остварених резултата и заснованих закључака ранијих истраживања београдског изворишта подземних вода, која су претходила истраживањима која је конципирао и спровео кандидат. На овим основама, кандидат закључује да је у претходним хидродинамичким истраживањима процеса старења бунара коришћен принцип *хидраулички еквивалентних карактеристика дренажа*, због чега резултати ранијих истраживања не дају адекватан основ за идентификацију оних вредности филтрационих карактеристика прифилтерске зоне дренажа које могу указати на појаву увећаних почетних отпора на њима. Стога, кандидат усваја хипотезу да ће задавање реалнијих геометријских карактеристика дренажа (у првом реду дебљине прифилтерске зоне), на хидродинамичком моделу омогућити дефинисање *хидраулички реалних карактеристика дренажа*, а међу њима и оних критичних – које ће указати на евентуално присуство увећаних почетних отпора (на примеру анализираног бунара са хоризонталним дренажима РБ–5м).

На основу примене предложене концепције континуалне симулације и анализе оствареног режима нивоа подземних вода у оквиру хидродинамичких истраживања на моделу, створени су услови за пружање одговора на питање које је чинило полазну хипотезу предметних истраживања – *питање узрока и динамике процеса старења дренажа*, а уједно и границе репрезентативности и актуелности *критеријума биохемијског колмирања бунара*, који је до

спровођења истраживања у оквиру предметне дисертације био једини модел за разумевање процеса старења бунара на изворишту Београда.

Однос филтрационих карактеристика прифилтерске нових зоне дренажа непосредно по њиховом формирању и филтрационих карактеристика седимената порозне средине на коти и дуж траса утиснутих нових дренажа, аутор дисертације посматра у светлу репрезентативног показатеља механичког колмирања дренажа као узрока присуства увећаних иницијалних отпора на њима. Овакво схватање процеса старења би суштински значило то да су на дренажима постојали увећани почетни хидраулички отпори механичке генезе, који су током времена рада бунара увећавани хемијским колмирањем, тј. таложењем гвожђа у прифилтерској зони и на филтерској конструкцији дренажа, а које је инхибирано неадекватним режимом рада бунара.

Пораст почетних вредности отпора на дренажима бунара је посматран као ефекат смањења порозности филтерског засипа и филтерских цеви, што је на формираном хидродинамичком моделу представљено смањењем вредности филтрационих карактеристика прифилтерске зоне дренажа током анализираних времена рада бунара. Додатно, анализирана је и зависност динамике колмирања дренажа од режима експлоатације бунара, који је изражен преко улазних брзина подземних вода у дренаже, односно у прифилтерску зону дренажа.

Кандидат Ђорђевић Божовић је спроведена истраживања реализовао кроз поједине фазе и етапе, које су произашле из дефинисаних циљева израде дисертације. Тако су активности у оквиру прве фазе истраживања резултирале предлогом оптималног начина представљања дренажа на хидродинамичким моделима, у смислу примењеног граничног услова, хидрауличног механизма експлоатације подземних вода и квантификација реалних вредности хидрауличких карактеристика дренажа.

У оквиру прве фазе истраживања извршена је и даља експлоатација хидродинамичког модела у циљу утврђивања оптималног степена дискретизације истражног простора у плану и профилу (нарочито уже зоне бунара) и аспекта утицаја дискретизације простора на одабране граничне услове којима се представљају дренажи, као и дискретизације временског периода обухваћеног симулацијом режима подземних вода.

Друга фаза спроведеног истраживања је обухватила симулацију шест бунара са хоризонталним дренажима обухваћених хидродинамичким моделом, као реалних бунара са хоризонталним дренажима у складу са предложеном методологијом симулације дренажа и њиховог старења из прве фазе истраживања, у прогнозним, хипотетичким условима експлоатације подземних вода, са новим дренажима истих техничких и хидрауличких карактеристика задатим у истом просторном распореду на свим бунарима. При томе је капацитет појединачног дрена у првом кораку овог поступка дефинисан према *критеријуму биохемијског колмирања дренажа*, а у другом, завршном, прилагођен расположивој количини ресурса подземних вода присутној у зони сваког од симулираних бунара. Дакле, друга фаза спроведених хидродинамичких истраживања је резултирала предлогом методологије дефинисања оптималног капацитета бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода.

Анализу и синтезу свих резултата добијених спроведеним истраживањима у оквиру појединих фаза и етапа, њихово повезивање у јединствен научно–истраживачки резултат, са предлогом правца даљих хидродинамичких истраживања, кандидат је представио у *закључном поглављу дисертације*.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост, оригиналност и значај

У заравњеним, низијским теренима доњих делова токова већих река формиране су издани збијеног типа, кварталне старости, алувијалне генезе, које захваљујући значајном распрострањењу у плану, дебљини водоносних наслага и директној хидрауличкој вези са сталним површинским водотоком, представљају један од најзначајнијих извора снабдевања пијаћом водом становништва и индустрије. У оваквим хидрогеолошким условима, бунари са хоризонталним дренама су чест избор типа водозахватног објекта за обезбеђење потребних количина вода. Иако оригинално пројектовани за експлоатацију угљоводоника, бунари са хоризонталним дренама су широку примену нашли у области захватања подземних вода, првенствено за потребе снабдевања пијаћим водама. Последњих година је приметан пораст интересовања за изградњу овог типа водозахватних објеката широм Азије, а првенствено у Кини.

Са 99 изграђених бунара са хоризонталним дренама, на којима је до данас утиснуто око 900 дрена, београдско извориште подземних вода је једно од највећих изворишта овог типа на свету. Са просечним садржајем гвожђа у захваћеним подземним водама од око 2 мг/л (у дијапазону од 0,5 до готово 7 мг/л), старење бунара на београдском изворишту је било суштински неизбежно и као такво пратило рад водозахватних објеката од самог почетка њихове изградње.

Један од најважнијих и најкомплекснијих поступака у процесу дефинисања хидрогеолошких услова терена за изградњу бунара са хоризонталним дренама, дефинисања техно–економски оптималног техничког решења утискивања дрена (на новим или постојећим бунарима), као и квантитативне анализе експлоатационог режима издани и процеса старења дрена је реализација хидродинамичке анализе. Из разлога комплексних хидрогеолошких услова београдског изворишта подземних вода, заједно са техничким карактеристика водозахватних објеката, који укључују:

- сложен литофацијални састав седимената издани и просторно хетерогене хидрогеолошке одлике седимената, које треба идентификовати калибрацијом хидродинамичког модела;
- утицај присуства слабије пропусних седимената поводња, тзв. међуслојева, на хидрауличке услове рада водозахватног објекта, на услове експлоатације подземних вода у смислу анализе струјања, на хидродинамички режим издани и на прихрањивање зоне бунара из правца реке Саве;
- квалитет хидрауличког контакта реке и седимената издани у којима је корито непосредно усечено, као и утицај различитих хидролошких услова на интензитет прихрањивања издани;
- евентуални утицај других тела површинских вода (канала, рукаваца или Савског језера) на режим издани;
- утицај рада бунара на пијезометарске нивое у залеђу бунарског низа и величину прихрањивања из правца залеђа;
- хидрауличке карактеристике постојећих дрена на бунарима, као и њихову промену током времена експлоатације на рачун напредовања процеса старења;
- анализу утицаја рада групе бунара;
- дефинисање оптималне коте формирања нових дрена, заједно са њиховом дужином, пречницима и правцима утискивања;
- хемијски и микробиолошки састав подземних вода, као основ за дефинисање почетних хидрауличких карактеристика и оптималог почетног капацитета појединачног дрена;

јединствена метода истраживања којом се могу симулирати и евалуирати ефекти свих наведених, али и других утицаја, јесте савремена хидродинамичка анализа путем израде хидродинамичког модела режима анализираних дела издани.

Допринос у области фундаменталних сазнања у хидрогеологији предметне докторске дисертације се огледа у новом приступу код спровођења хидродинамичке анализе комплексних процеса филтрације подземних вода под утицајем рада бунара са хоризонталним дренажним изградњеним у сложеним хидрогеолошким условима, чији дренажи су угрожени дејством различитих процеса који изазивају њихово старење.

Развијен методолошки приступ хидрауличке идентификације присуства две генетски различите врсте колмирања омогућавају прецизно дефинисање пораста хидрауличког отпора на дренажним током рада бунара, а примењена методологија реалног хидрауличког представљања дренажа на детаљним 3D хидродинамичким моделима водозахватних објеката добила је међународну афирмацију публикавањем у часопису изузетних вредности из области хидрогеологије, категорије M21a.

Имајући у виду одабрану тему докторске дисертације, квалитет њене обраде, остварене резултате и закључке, сматрамо да израђена докторска дисертација представља савремено и оригинално научно дело које значајно доприноси сагледавању улоге и механизма старења бунара са хоризонталним дренажним на београдском изворишту подземних вода, као једном од највећих изворишта овог типа на свету и једном од најзначајнијих водопривредних објеката у нашој земљи.

Аутор је успешно обрадио и представио досадашња сазнања, национална и инострана искуства стечена у области хидродинамичког аспекта хидрогеолошких истраживања и самостално је, на основу примењене методологије и остварених резултата, дао значајан допринос методици истраживања у анализираним и сличним хидрогеолошким условима. Закључци методологије и анализа које су спроведене у оквиру израде дисертације ће корисно служити будућим истраживачима терена београдског изворишта подземних вода, али и истраживачима других терена у земљи и иностранству, нарочито у домену који се односи на аспект експлоатације подземних водних ресурса у условима сложених и релативно неповољних одлика првенствено алувијалних издани, које представља водоносна средина квартарне старости а комплексне генезе, изражено хетерогеног литолошког и гранулометријског састава, значајних разлика у хидрогеолошким одликама депонованих седимената у плану и профилу, као и неповољног хемијског и микробиолошког састава подземних вода.

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

Хидродинамичка истраживања бунара са хоризонталним дренажним имају релативно богату историју, чији хронолошки преглед, који је у оквиру наменског поглавља докторске дисертације извршио кандидат, говори да су на развој метода истраживања овог типа бунара одређеним делом утицали приступи у истраживањима и резултати добијени у области примене других типова хоризонталних водозахватних објеката до којих су долазили истраживачи широм света. Практично све врсте метода хидрауличких и хидродинамичких испитивања историјски присутне у области динамике подземних вода и њиховог захватања бунарима, примењиване су и у области бунара са хоризонталним дренажним.

Кандидат је у оквиру рада на одобреној теми дисертације, заједно са сарадницима, израдио и у националном научном часопису публикавао један од свега два присутна историјска прегледа развоја хидродинамичких истраживања бунара са хоризонталним дренажним на свету (заједно са хоризонталним бунарима и водозахватним дренажама), који су стручној јавности представљена недавно и у кратком временском размаку. Тако је кандидат са коауторима, своје резултате прегледа историјата хидрауличких и хидродинамичких истраживања наменио првенствено истраживачима у Србији, руководећи се тим да се

бунарима са хоризонталним дренажима обезбеђују подземне воде за потребе водоснабдевања Београда и Новог Сада, чија су изворишта највећа у нашој земљи у оквиру збијене издани и у погледу количина захваћених подземних вода.

У оквиру израде докторске дисертације, кандидат је темељно обрадио укупно 228 адекватних библиографских јединица, највећим делом публиковане иностране литературе у облику радова у часописима, ређе монографија и сасвим подређено техничке документације и извештаја о резултатима истраживања. Међу библиографским јединицама налази се и 10 извора у којима је кандидат први аутор, као и 4 јединице у којима је кандидат један од аутора, при чему се све оне односе на област истраживања и одобрену тему. На основу наведеног, може се констатовати да је кандидат Ђорђевић Божовић користио обимну литературу, релевантну по научној области и тематици, као и да је промоција методологије и резултата аутора од стране домаће и међународне и стручне јавности отпочела.

3.3 Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведена истраживања

У оквиру спроведене хидродинамичке анализе, у функцији моделских истраживања коришћене су научне методе и поступци који припадају области геолошких и хидрогеолошких истраживања, док су за потребе сагледавања процеса старења бунара коришћени резултати хидрохемијских и микробиолошких испитивања подземних вода. Од геолошких истраживања, нарочит значај је имала метода литолошке идентификације и литостратиграфске паралелизације, просторног повезивања сродних литолошких чланова на основу резултата израде истражних бушотина (израђених како у непосредној зони лепезе дренажа моделом обухваћених бунара, између два бунара, тако и у ближем или даљем залеђу бунара), детаљног картирања језгра бушотина и лабораторијског испитивања гранулометријског састава узорака набушених седимената, дефинисања хипсометријског положаја у профилу кварталних наслага, генетских услова стварања и др. Потом су резултати истражног бушења анализирани статистичким и геостатистичким методама уобичајеним у хидрогеолошким истраживањима. Будући да је реч о већем броју различитих података и информација о водоносној средини дела изворишта подземних вода града Београда, у сврху спровођења хидрогеолошке шематизације простора кандидат је израдио базу података, у наменском софтверу за реализацију различитих врста анализа и 2Д и 3Д интерпретацију резултата хидрогеолошких истраживања.

Дефинисана хипотеза спроведених хидродинамичких истраживања је утемељена на ставу да прифилтерска зона дренажа пресудно утиче на њихове хидрауличке карактеристике и да, као таква, представља меру водозахватне способности и хидрауличке ефикасности бунара са хоризонталним дренажима. Анализа утицаја хидрауличких карактеристика дренажа, сагледаних преко дебљине и филтрационих карактеристика прифилтерске зоне дренажа, на:

- капацитет и режим рада бунара са хоризонталним дренажима,
- на квалитет хидрауличног контакта дренажа и издани кроз величину отпора на дренажима,
- на утицај улазних брзина подземних вода у прифилтерску зону дренажа са аспекта процеса старења,

није била предмет досадашњих истраживања у предметној научној области, због чега је циљ предметне докторске дисертације кандидата Ђ. Божовића био да испитивањима на нумеричком хидродинамичком моделу ближе дефинише предметну зависност.

У циљу решавања дефинисаног задатка, развијена је и примењена методологија која подразумева да се ефекат смањења порозности засипа и филтерских цеви на моделу симулира смањивањем вредности коефицијента филтрације прифилтерске зоне дренажа током времена. Истовремено, динамика колмирања дренажа зависи од режима експлоатације бунара, који је изражен преко улазних брзина подземних вода у дренаже, а кроз прифилтерску зону.

Један од најважнијих и најкомплекснијих поступака у процесу дефинисања хидрогеолошких услова терена за изградњу бунара са хоризонталним дренама, дефинисања техно–економски оптималног техничког решења утискивања нових дрена на постојећим бунарима, као и квантитативне анализе експлоатационог режима издани и изучавања процеса старења бунара јесте реализација хидродинамичке анализе путем израде хидродинамичког модела. Хидродинамичка истраживања режима подземних вода на математичким моделима су по својој природи комплексна, док се су међу њима нумеричке методе, које су примењене у предметној докторској дисертацији кандидата Ђ. Божовића, сматрају најсложенијим.

Израда хидродинамичког модела бунара са хоризонталним дренама је истраживачки поступак који је у случају спроведених истраживања кандидата резултирао квантификавањем потенцијалности локације анализираних бунара у погледу расположивих количина подземних вода које се могу захватати на датој локацији, дефинисањем оптималне конфигурације водозахватних делова конструкције бунара, оптималним условима експлоатације и режима рада бунара, имајући у виду процесе старења.

Нарочит значај са аспекта дефинисања и предложене методологије је имало спровођење хидродинамичке анализе у стандардним рачунарским програмима и кодовима, који су доступни истраживачима у области предметних истраживања, како би добијени резултати могли бити верификовани, коришћени и унапређивани даљом применом на различитим извориштима и теренима широм света.

Добијени резултати везани за порекло хидрауличких отпора на примеру детаљно анализираних бунара са хоризонталним дренама су у супротности са ранијим ставовима, који узроке колмирања дрена на обновљеним бунарима посматрају као функцију хидрохемијских и микробиолошких услова присутних на локацији бунара. Спроведена хидродинамичка истраживања су указала да се, за разлику од досадашњих схватања колмирања дрена на бунарима београдског изворишта подземних вода, оно не може посматрати само са аспекта природних услова издани присутних у зони бунара (параметара хемијског и микробиолошког састава подземних вода који су индикатори потенцијала за настајак и развој процеса колмирања) и услова експлоатације бунара (суштински, улазних брзина подземних вода), већ се у хидродинамичку анализу процеса морају узети и геометријске и хидрауличке карактеристике самих дрена (били они стари или новоутиснути, у било ком тренутку њихове експлоатације), сагледане у функцији хидрауличких отпора. Реч је о дебљини и пропусности прифилтерске зоне дрена.

Било да је прифилтерска зона формирана кроз поступак разраде дрена – увећањем ефективне порозности типично песковито–шљунковитих алувијалних седимената путем изношења финозних фракција њиховог гранулометријског састава кроз отворе на филтерској конструкцији (у случају *Рени* и *Фелман* методе формирања дрена), било уградњом филтерског засипа (у случају *Пројсаг* методе), хидрауличка функција прифилтерске зоне је дефинисана геометријом и пропусношћу геолошког материјала од којег је изграђена. Ако се пође од тога да су оријентација, тј. аксијална оса и дужина дрена на неком бунару који је предмет хидродинамичких истраживања по правилу познате, питање хидрауличног утицаја подразумевано цилиндричне геометрије прифилтерске зоне се своди на анализу њене радијалне компоненте, тј. дебљине.

Са друге стране, заједничко за филтрационе карактеристике било које геолошке, а нарочито интергрануларне порозне средине па тако и за прифилтерску зону у области хидраулике бунара (била она танки слој на контури бушења бунара, односно утискивања дрена, зона формирана разрадом бунара или уграђени филтерски засип) је то да се могу сагледати дефинисањем репрезентативних вредности коефицијента филтрације.

Истраживање је указало на подједнак утицај и значај дебљине и коефицијента филтрације прифилтерске зоне на водозахватну способност и хидрауличку ефикасност дрена. Будући да се дебљина прифилтерске зоне у реалним условима терена мења ређе и спорије од

промена њених филтрационих карактеристика, то се може сматрати оправданим приступ примењен у истраживањима кандидата Ђорђија Божовића да на хидродинамичком моделу прифилтерска зона буде представљена константном вредношћу дебљине, а да се процес старења дренава путем механичког и биохемијског комирања симулира смањењем вредности коефицијента филтрације.

Механичко колмирање бунара се уобичајено посматра као процес покретања и акумулације финозрних честица порозне средине енергијом филтрационог тока, услед немогућности њиховог изношења кроз отворе на филтерској конструкцији. Резултати истраживања указују да се овај вид колмирања бунара, иако генетски сасвим различит, по својој манифестацији не разликује од иницијално нарушене хидрауличке способности дренава настале неадекватним димензионисањем техничких карактеристика филтерског засипа и отвора на филтерској конструкцији у случају одабраног, анализираног водозахватног објекта.

Истакнуту важност има и то што су резултати истраживања потврдили изузетно значајан утицај улазних брзина подземних вода у дренаве на динамику процеса старења, који је иницијално препознат од стране аутора *критеријума биохемијског колмирања бунара*. Када се добијени резултати упореде са резултатима иностраних аутора који су истраживали хидраулички утицај пропусности прифилтерске зоне у случају бушених (вертикалних) бунара и хоризонталних бунара, долази се до високог степена сагласности између величине и утицаја хидрауличког губитка на дренавима до којих је дошао аутор дисертације са вредностима друга два типа водозахватног објекта.

Приступ у хидродинамичкој анализи бунара са хоризонталним дренавима докторанда Ђ. Божовића, заједно са процесима старења дренава, подразумева да се улазне брзине као хидраулички параметар не могу посматрати са аспекта њихових апсолутних вредности (биле оне у оквиру или изван оквира дозвољених или тзв. критичних вредности), већ неизоставно у функцији конкретних хидрауличких карактеристика прифилтерске зоне дренава кроз коју се кретање подземних вода квантификованим улазним брзинама у датом тренутку одвија. То суштински значи да ће при истим улазним брзинама подземних вода у дренаве једног бунара – и онда када су оне одређене као дозвољене у складу са ранијим критеријумом биохемијског колмирања, дренави колмирати доминантно у зависности од хидрауличких карактеристика њихове прифилтерске зоне.

Хидродинамичка анализа утицаја дискретизације простора обухваћеног нумеричким моделом је резултирала препоруком у погледу адекватних димензија дискретних прорачунских поља модела у ужој зони бунара. Кандидат је утврдио и истраживачима ауторима будућих модела бунара са хоризонталним дренавима препоручио да се за димензионарање оптималне величине поља у зони дренава бунара може користити однос који говори да величина стране дискретног поља квадратног облика у плану буде највише десет пута већа од пречника конструкције дренава. На бази увида у детаљно образложеном и илустровану методологију и добијене резултате, предметна Комисија за оцену дисертације је мишљења да се ставови и препоруке кандидата Ђ. Божовића могу сматрати утемељеним.

Анализа утицаја дискретизације времена на хидродинамичком моделу је указала да се дужином једног прорачунског временског интервала трајања пет дана хидролошки услови водостаја реке Саве могу адекватним степеном репрезентативности представити на нумеричком моделу. Будући да се сваки водоток одликује јединственим режимом водостаја, то је дата препорука кандидата релевантна само за услове реке Саве и предметног београдског изворишта подземних вода.

Коначно, формиран хидродинамички модел дела изворишта подземних вода Београда је могуће даље унапређивати сукцесивним укључивањем околних бунара, у складу са резултатима анализе адекватног степена дискретизације простора модела у плану и профилу за репрезентативно представљање услова водоносне средине и самих бунара, све док у нарастајући простор модела не буду укључени сви водозахватни објекти једног дела београдског изворишта или коначно, целог изворишта. Могућности употребе таквог модела

биле би изузетне, како са аспекта управљања радом водозахватног система подземних вода, са аспекта заштите ресурса подземних вода од загађења, тако и утицаја експлоатације подземних вода на остале садржаје и активности присутне или планиране на простору изворишта у будућности.

3.4 Оцена примењивости и верификације остварених резултата

Потребе за водом, природне одлике издани и технички услови експлоатације одређују количину подземних вода која ће се захватати на једном изворишту, као суму појединачних капацитета водозахватних објеката. У случају бунара са хоризонталним дренажима, захватање подземних вода се остварује као функција снижења нивоа подземних вода у водосабирном бунарском шахту. При том, захватање једне те исте количине подземних вода одређеним бунаром, у истим хидролошким и другим условима, може бити остварено при сасвим различитим снижењима нивоа у његовом шахту, што првенствено зависи од хидрауличких карактеристика дренажа, које указују на способност дренажа за захватањем подземних вода и које се мењају током времена експлоатације бунара на рачун напредовања процеса старења. Из овог разлога се *капацитет бунара* и одговарајућа *величина снижења нивоа подземних вода* у водосабирном бунарском шахту, уз чији се услов одржања у шахту дати капацитет остварује, могу сматрати показатељима интензитета експлоатације или хидрауличног режима рада бунара, што кандидат исправно предлаже.

Хидродинамичка истраживања на нумеричком моделу кандидат је реализовао приступом *хидраулички реалне симулације бунара са хоризонталним дренажима*. Под хидраулички реалном симулацијом бунара са хоризонталним дренажима на хидродинамичком моделу се у истраживањима спроведеним у предметној дисертацији подразумева задавање дренажа као водозахватних делова конструкције бунара у складу са реалним техничким и геометријским карактеристикама, као и хидрауличким представљањем дренажа у виду једнодимензионалних, линијских елемената, кружног попречног пресека, са адекватним граничним условом задатим унутар и прифилтерском зоном око дренажа.

Хидраулички реална симулација бунара са хоризонталним дренажима не подразумева представљање дренажа преко привилегованих делова шематизоване водоносне средине, уз већи степен дискретизације простора модела у плану и профилу у ужој зони бунара, што је био уобичајен приступ у области хидродинамичког моделирања у претходним деценијама. Додатном вертикалном дискретизацијом простора обухваћеног моделом се у прошлости тежило томе да дебљина слоја на моделу у којем су задати дренажи генерално одговара пречнику дренажа, док се погушћавањем мреже поља у плану постиже задовољавајућа сагласност просторног положаја симулираних са трасама реалних дренажа (што је представљало значајно ограничење у случају израде модела применом методе коначних разлика и структуриране мреже правоугаоних поља).

У складу са наведеним, под реалном хидрауличком симулацијом дренажа није веродостојно, али ни оправдано сматрати примену традиционалних граничних услова који су присутни у програмима за хидродинамичко моделирање и који су доминантно коришћени за симулацију овог типа бунара у светској пракси (заснованих на MODFLOW, FEFLOW или другим кодовима), као ни употребу нумеричких пакета којима се ти гранични услови представљају на моделима: „дренажа“, „река“, „општи пијезометарски ниво“, константан ниво или константан капацитет.

У циљу хидродинамичке анализе старења бунара по предметној теми израде дисертације, хидродинамичким моделом су обухваћени сви они фактори утицаја који постоје у реалним условима истраживаног терена, који могу имати утицај на појаву процеса старења дренажа и њен мање или више интензиван развој током експлоатације бунара.

Као један од основних закључака својих анализа и препорука, аутор наглашава неопходност

успостављања адекватне мреже осматрачких објеката, заједно са потребом континуалног осматрања параметара режима подземних вода у тим објектима. Детаљним коментарима и дискусијом на крају предметне дисертације, кандидат је дао критички приказ усвојених метода (које су биле дефинисане у поступку пријаве теме докторске дисертације), дао објективну оцену њихових ограничења и будућим ауторима и истраживачима указао на правце даљих истраживања.

3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Ђорђевић Божовић, дипл. инж. геологије, је кроз израду предметне докторске дисертације демонстрирао своју способност за самостални научно–истраживачки рад. Докторанд је успешно одговорио на циљеве које је дефинисао предлогом за израду дисертације, што указује на његову способност да објективно и у целини сагледа истраживачки процес и услове потребне за његову реализацију.

Публиковање већег броја научних и стручних радова из области докторске дисертације и током докторских студија га додатно квалификују и свакако легитимишу у смислу истраживачке зрелости. Кандидат је допринео проширивању сазнања у области хидраулике и хидродинамике бунара са хоризонталним дренажима изван граница наше земље, што јасно потврђују цитати, афирмације и критике кандидатских резултата у водећим светским часописима из области подземних вода, али и вода уопштено.

Кандидат Ђорђевић Божовић је током докторских академских студија на матичном факултету постао афирмисани истраживач са стеченим богатим искуством, због чега постоје све претпоставке да његов даљи научни рад, за који је у пуној мери оспособљен, доприноси успешном раду и афирмацији националне школе хидрогеологије као научне дисциплине на међународном плану.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ оствареног научног доприноса

Научни допринос представљене докторске дисертације кандидата Ђ. Божовића је остварен кроз примењену методологију и добијене резултате хидродинамичких истраживања, која су пружила нова сазнања везана за комплексне процесе филтрације подземних вода под утицајем рада бунара са хоризонталним дренажима, изграђеним у сложеним хидрогеолошким условима, чији су дренажи угрожени дејством различитих видова процеса старења.

Најзначајнији резултати хидродинамичке анализе процеса старења бунара са хоризонталним дренажима београдског изворишта подземних вода су:

- Дат је одговор на питање репрезентативности критеријума биохемијског колмирања дренажа, који је на основу резултата ранијих истраживања представљао једини приступ разумевања процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода.
- Идентификација присуства две генетски различите врсте колмирања и прецизно дефинисање пораста отпора на дренажима током времена рада бунара, уз испитивање у којој мери су утврђени увећани почетни отпори на новим дренажима ограничили њихову хидрауличку функционалност у погледу захватања подземних вода.
- У оквиру хидродинамичких истраживања присуства увећаних иницијалних хидрауличких отпора на дренажима, испитивана је и њихова генеза, што је подразумевало анализу усклађености гранулометријских карактеристика уграђеног филтерског засипа и димензија отвора на филтерској конструкцији са гранулометријским карактеристикама

седимената издани депонованих на коту и дуж траса утиснутих дренава, што је био први покушај тумачења узрока колмирања ове врсте у предметној области у свету.

- Истраживањима везаним за утврђивање узрока и динамике старења дренава на бунарима београдског изворишта подземних вода, развијена је нова методологија примењеног хидродинамичког моделирања бунара са хоризонталним дренавима од које се очекује да на националном и међународном нивоу промовише репрезентативнији и свеобухватнији приступ симулације овог типа водозахватног објекта у односу на концепције присутне у предметној области истраживања, укључујући и аспект старења бунара са хоризонталним дренавима.
- За потребе израде хидродинамичког модела, израђен је детаљни 3Д хидрогеолошки модел. Његова израда је укључила литостратиграфску и хидрогеолошку шематизацију депонованих алувијалних кластита, заједно са геометријом усецања корита реке Саве у седименте издани, из чега је проистекла темељна основа за сагледавање квалитета хидрауличког контакта реке и издани, као основе за анализу услова прихрањивања водоносне средине.
- Симулација групе бунара на хидродинамичком моделу према предложеној методологији реалног хидрауличког представљања дренава, је омогућила сагледавање интерференције утицаја рада бунара у зависности од њиховог режима експлоатације, али и од природних услова терена (у првом реду значајнијег распрострањења слабије пропусних седимената међуслоја и пропусности седимената присутних на дну корита реке).
- Анализа рада групе хидраулички реално симулираних бунара са хоризонталним дренавима, чији су оптимални капацитети дефинисани на основу критеријума биохемијског колмирања дренава у првом кораку истраживања, а потом усклађени са оптималним условима хидрауличког режима рада сваког од бунара и расположивим ресурсом подземних вода на њиховим локацијама је био први пример ове врсте у предметној научно–истраживачкој области у светским оквирима.
- На основама научног вредновања добијених резултата, може се констатовати да је предложена методологија хидраулички реалне симулације бунара, заједно са симулацијом оствареног режима нивоа издани резултирала предлогом методологије свеобухватног дефинисања оптималног капацитета бунара са хоризонталним дренавима на београдском изворишту подземних вода и да као таква може служити као теоријски основ применљив и на другим теренима који се одликују неповољним хидрохемијским и хидрогеолошким условима, у којима је рад бунара праћен процесима интензивног старења.

У односу на досадашња хидродинамичка истраживања, у спроведеној хидродинамичкој анализи је примењен приступ који подразумева да се процес старења бунара: анализира симулацијом континуалног рада бунара (уместо симулације повремено вршених опита тестирања), да се дренави представљају реалним геометријским и конструктивним карактеристикама, да се квантификују реалне уместо хидраулички еквивалентних карактеристика пропусности дренава, да се утицај реке Саве као доминантног извора прихрањивања издани представи детаљном дискретизацијом водостаја, да се дотицај из правца залеђа представи временски променљивим нивоима подземних вода мереним у пијезометрима, да се изврши детаљна хидрогеолошка и хидродинамичка шематизација издани.

Спроведени поступак израде 3Д хидрогеолошког модела представља унапређење у односу на досадашњу методологију и искуства израде хидрогеолошких модела београдског изворишта и темељнију основу за формирање нумеричког хидродинамичког модела. Унапређење је везано за идентификацију свих оних природних и антропогених чинилаца (појава и објекта), који имају значајнијег утицаја на режим нивоа издани на истражном подручју које је обухваћено израђеним моделом. Такви су нпр., утицај рукавца Адица и канала Мала Адица у зони детаљно анализираних бунара са хоризонталним дренавима

РБ–5м. Иако су хидродинамички модели анализираног бунара рађени и раније, рукавац и канал су први пут укључени у простор модела четири бунара који су лоцирани дуж пружања рукавца и канала. Формирање хидродинамичког модела у оквиру истраживања спроведених за потребе израде предметне дисертације је показало да без задавања ових површинских водних тела предметни модел није могао бити адекватно калибрисан.

Имајући у виду претходне закључке о значају и утицају прифилтерске зоне дрена на капацитет и хидраулички режим рада бунара, као и утицаја прифилтерске зоне на процес старења дрена путем њиховог механичког и биохемијског колмирања, у спроведеним моделским испитивањима су под улазним брзинама подразумеване улазне брзине подземних вода у прифилтерску зону дрена, уместо улазних брзина у филтерску конструкцију дрена. Овај приступ представља новину у односу на досадашња нумеричка моделска хидродинамичка истраживања процеса старења бунара са хоризонталним дренама.

Утврђено је да су стварни узроци старења обновљених бунара вишеструки, тј. да нису везани само за природне услове водоносне средине (садржај раствореног гвожђа у захваћеним подземним водама и вредности улазних брзина подземних вода на контури дрена), као што се то претходно сматрало. Утврђено је да су на дренама анализираног бунара присутна два различита облика колмирања – механичко и биохемијско. Узрок механичког колмирања је везан за квалитет самих дрена, тј. квалитет уграђеног филтерског засипа и димензије отвора на филтерској конструкцији дрена. На овај начин иницијално нарушена хидрауличка способност дрена је предиспонирала даљи развој старења бунара, путем таложења гвожђа у порном простору прифилтерске зоне, коју представља филтерски засип дрена.

Предложен је оригиналан начин изражавања хидрауличке функционалности дрена на бунарима, који се може применити и на друге водозахватне објекте у интергрануларној порозној средини (нарочито на хоризонталне бунаре и водозахватне дренаже), као и нов, оригиналан приступ квантификовања процеса старења бунара путем нумеричке хидродинамичке анализе.

4.2 Критичка анализа резултата истраживања

Спроведено истраживање је указало да хидродинамичка анализа услова и ефеката рада бунара са хоризонталним дренама треба бити утемељена на перманентном уважавању карактеристичне просторне хетерогености литолошког састава алувијалних кластита, филтрационих карактеристика седимената водоносне средине, хемијског састава подземних вода присутних у конкретним условима терена у којима се ови објекти изводе, као и хидраулички репрезентативног начина представљања дрена и њиховог старења на хидродинамичким моделима.

У односу на питање поуздане идентификације присуства, генезе и утицаја хидрауличких отпора на интензивну динамику старења бунара са хоризонталним дренама београдског изворишта на којима су пре једне деценије утиснути нови дрена, које је стајало у темељу истраживања реализованих у оквиру докторске дисертације, добијени су следећи резултати:

- У претходним хидродинамичким истраживањима процеса старења бунара коришћен је принцип хидраулички еквивалентних карактеристика дрена, због чега резултати ранијих истраживања нису представљали адекватан основ за идентификацију оних вредности филтрационих карактеристика прифилтерске зоне нових дрена које могу указати на појаву почетних отпора на њима.
- Задавање реалнијих геометријских карактеристика дрена на хидродинамичком моделу је омогућило дефинисање реалнијих хидрауличких карактеристика дрена, а међу њима и оних критичних – које су указале на присуство увећаних почетних отпора на дренама (на примеру анализираног бунара).

- Однос филтрационих карактеристика прифилтерске зоне дренажа непосредно по њиховом формирању и филтрационих карактеристика седимента порозне средине на коти утиснутих дренажа је адекватно и оригинално посматран у светлу репрезентативног показатеља механичког колмирања дренажа као узрока присуства отпора на њима.
- Утврђено је да јесу и квантификовано у којој мери јесу укупни отпори на новим дренажима резултат две, генетски различите, врсте колмирања – механичког и биохемијског. Овакво схватање старења бунара суштински значи да су на дренажима постојали увећани почетни хидраулички отпори, који су током времена рада бунара додатно континуално увећавани хемијским колмирањем, тј. таложењем гвожђа у прифилтерској зони.
- Пораст почетних вредности отпора на дренажима бунара је посматран као ефекат смањења порозности филтерског засипа и филтерских цеви, што је на формираном хидродинамичком моделу кандидат адекватно представио смањењем вредности филтрационих карактеристика прифилтерске зоне дренажа током анализираних времена рада бунара симулираног на моделу.
- Зависност динамике колмирања дренажа од режима експлоатације бунара, који је кандидат изразио преко улазних брзина подземних вода у дренаже не представља новину у предметној области, али свакако чини потврду ранијих ставова које су дефинисали истраживачи предметног изворишта и чији се недостатак осећао у предметној области минулих година. Ипак, приступ коришћења улазних брзина дефинисаних на спољашњој контури прифилтерске зоне (уместо филтерске конструкције дренажа) је оригиналан и проистекао је из резултата и ставова аутора да се колмирање првенствено одвија у прифилтерској зони, а подређено на конструкцији дрена.
- У односу на ранија хидродинамичка истраживања, у истраживањима кандидата је примењен приступ који подразумева да се динамика напредовања старења бунара анализира симулацијом континуалног рада бунара, уместо симулације повремено вршених опита тестирања бунара, што је генерално општа препорука у свим хидрогеолошким истраживањима режима било које анализираних издани.

У циљу детаљне хидродинамичке анализе процеса старења бунара, хидродинамичким моделом требају бити обухваћени сви они природни и антропогени фактори који постоје у реалним условима истраживаног терена, који могу имати утицај на појаву старења дренажа и њен мање или више интензиван развој током рада бунара и експлоатације подземних вода, што представља значајан допринос аутора дисертације.

4.3 Верификација оствареног научног доприноса

Кандидат Ђорђевић Божовић, дипл. инж. геол, је током докторских академских студија објавио више научних и стручних радова у различитим категоријама научно-истраживачких резултата. Научни допринос докторске дисертације под насловом „Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода“ је верификован у следећим публикацијама, које су резултат примењених научних метода у истраживањима и на њиховим резултатима заснованих закључака:

Рад објављен у часопису са SCI листе (M20), међународни часопис изузетних вредности:

1. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., Ratković J., (2020). Hydrodynamic analysis of radial collector well ageing at Belgrade well field. *Journal of Hydrology*, 582. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124463. [M21a; IF=5,722]

Радови објављени у научним и стручним часописима (M24, M51, M52):

2. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., (2020). Pregled hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima numeričkim metodama. *Vodoprivreda*, 52 (303–305), 93–110. [M51]

3. Polomčić D., Bajić D., Ratković J., **Božović Đ.**, (2019). Simulacija režima i kvantifikacija bilansa podzemnih voda primenom hidrodinamičke analize: primer površinskog kopa „Jakovačka Kumša“. Tehnika, 70, 5, 56–65, DOI: 10.5937/tehnika1901056P. [M51]
4. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., (2016). Characteristic groundwater level regimes in the capture zones of radial collector wells and importance of identification (case study of Belgrade Groundwater Source). Geološki anali Balkanskog poluostrva, 77, DOI: 10.2298/GABP1677043B. [M24]
5. Polomčić D., **Božović Đ.**, Bajić D., (2016). Hydraulic characterization of laterals as applied to selected radial collector wells at Belgrade Groundwater Source. Geološki anali Balkanskog poluostrva, 77, DOI: 10.2298/GABP1677033P. [M24]
6. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., (2016). Hidrodinamička analiza opravdanosti utiskivanja novih drenova na većoj dubini na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda. Vodoprivreda, 48 (282–284), 221–233. [M51]
7. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., (2016). Inovirana „budimpeštanska“ metoda revitalizacije bunara sa horizontalnim drenovima i mogućnosti njene primene na beogradskom izvorištu podzemnih voda. Tehnika, 67, 5, 685–693, DOI: 10.5937/tehnika1605685B. [M51]
8. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., (2015). Hidrodinamička simulacija i analiza režima podzemnih voda pod uticajem bunara sa horizontalnim drenovima (primer beogradskog izvorišta). Tehnika, 66, 5, 777–786, DOI: 10.5937/tehnika1505777B. [M51]

Радови објављени у зборницима радова научних и стручних скупова (M33, M64):

9. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., (2022). Metodologija izrade 3D konceptualnog hidrogeološkog modela za potrebe hidrodinamičkog modeliranja bunara sa horizontalnim drenovima. 16. srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, 28. 09. – 02. 10. 2022., Zlatibor [M33]
10. Polomčić D., Bajić D., Ratković, J., **Božović Đ.**, (2022). Šematizacija hidrograma i nivograma radnog nivoa kod bunara sa horizontalnim drenovima. 16. srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, 28. 09. – 02. 10. 2022., Zlatibor [M33]
11. Đurković M., Polomčić D., **Božović Đ.**, (2019). Primena „budimpeštanske“ metode revitalizacije bunara sa horizontalnim drenovima. 19. međunarodna konferencija Vodovodni i kanalizacioni sistemi, 29–31. maj 2019, Jahorina [M33]
12. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., Ratković J., (2018). Definisavanje optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima u uslovima nepovoljnog hemijskog sastava podzemnih voda (primer izvorišta Beograda). XVII Kongres geologa Srbije, 18 – 20. maj 2018., Vrnjačka Banja, 433–438. [M64]
13. Zarić J., Mitrinović D., Anđelković O., **Božović Đ.**, Dimkić M., (2018). Usporedna analiza rezultata granulometrijskih analiza dobijenih na osnovu dve metode bušenja na lokaciji bunara RB–44 na beogradskom izvorištu. XVII Kongres geologa Srbije, 18 – 20. maj 2018., Vrnjačka Banja, 468–472. [M64]
14. Polomčić D., Bajić D., Ratković J., **Božović Đ.**, (2018). Primena hidrodinamičkog modeliranja pri izboru sistema zaštite izvorišta od zagađenja. XVII Kongres geologa Srbije, 18 – 20. maj 2018., Vrnjačka Banja, 499–504. [M64]
15. **Božović Đ.**, Polomčić D., Bajić D., (2016). Predlog sanacije bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda. 15. srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, 14–17. septembar 2016., Kopaonik. [M33]
16. Gaudenyi T., Stejić P., **Božović Đ.**, Nenadić D., (2015). Pleistocene vs. Holocene sediments of the Serbian segment of the Sava River. 2nd International Congress of Stratigraphy STRATI 2015, 19–23 July 2015, Graz, Austria. [M34]

4.4 Провера оригиналности докторске дисертације

Провера оригиналности докторске дисертације „Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода“, аутора Ђорђија Божовића, урађена је у складу са Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204 / 22.06.2018).

Према коришћеном софтверу за детекцију плагијаризма *iThenticate*, констатовано је да утврђени обим подударања текста по параметру Индекс сличности (*Similarity Index*) износи 11%. Укупно је анализом обухваћено 62.664 речи, од чега су са различитим изворима идентичне 348 речи, које су пронађене у 101 извору информације. Степен утврђењене подударности је резултат: цитата, библиографских података о коришћеној литератури која је заједничка библиографским јединицама кандидата са литературом коју су користили други аутори широм света, тзв. општих места и података (личних имена, топонима и др), а у највећој мери претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из рада на дисертацији, што је у складу са чланом 9. предметног Правилника.

Имајући у виду да је аутор доследно поштовао све академске норме при цитирању и парафразирању литературних извора, сматрамо да је дисертација у потпуности оригинална и резултат самосталног научно–истраживачког рада кандидата.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Докторска дисертација кандидата Ђорђија Божовића, дипл. инж. геологије, под насловом „Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода“, представља обиман, садржајан и оригиналан научни рад из уже научне области хидрогеологије, који разматра услове настанка, динамику развоја, хидрауличке механизме и хидродинамичку симулацију процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на изворишту подземних вода Београда, као једном од највећих изворишта овог типа на свету.

Примењујући оригиналну методологију симулације бунара са хоризонталним дренажима на хидродинамичком моделу режима подземних вода, као и искуства до којих је дошао реализацијом истраживања дефинисаних предлогом теме дисертације током докторских академских студија, кандидат је успешно обрадио и приказао сазнања и закључке о узроцима интензивног опадања капацитета бунара на анализираном изворишту подземних вода, као и о оптималном приступу симулације захватања подземних вода овим типом водозахватног објекта, заједно са процесима старења присутним на њима.

Допринос у области фундаменталних сазнања у хидрогеологији огледа се у новом приступу спровођења хидродинамичке анализе комплексних процеса филтрације подземних вода под утицајем рада бунара са хоризонталним дренажима изграђеним у сложеним хидрогеолошким условима, чији су дренажи угрожени дејством различитих процеса који изазивају њихово старење. Развијени методолошки приступ хидрауличке идентификације присуства две генетски различите врсте колмирања омогућава прецизно дефинисање пораста хидрауличног отпора на дренажима током рада бунара, а примењена методологија реалног хидрауличног представљања дренажа на детаљним 3D хидродинамичким моделима водозахватних објеката добила је међународну афирмацију публикавањем водећем међународном часопису из области хидрогеологије.

Кандидат је извршио анализу утицаја дебљине и пропусности прифилтерске зоне дренажа на капацитет и хидраулички режим рада бунара са хоризонталним дренажима, приликом чега је констатовао да прифилтерска зона има одлучујући утицај на хидраулички режим рада и водозахватну способност дренажа. Аутор је анализирао утицај дискретизације простора у ужој зони хидродинамичког модела у зони бунара, као и дискретизације временског интервала, што је имао нарочит утицај на симулацију хидролошких услова водотока реке Саве, као доминантног извора прихрањивања каптиране издани београдског изворишта.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључује да је урађена докторска дисертација кандидата Ђорђија Божовића написана према свим стандардима о научно–истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, Стандардима за акредитацију, Статутом Рударско–геолошког факултета и критеријумима које је прописао Универзитет у Београду.

На основу изнесених чињеница, Комисија предлаже Наставно–научном већу Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација кандидата Ђорђија Божовића, дипл. инж. геологије, под називом „Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренама на београдском изворишту подземних вода“ прихвати као успешно завршена докторска дисертација и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат позове на усмену јавну одбрану пред истом Комисијом.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

Др Душан Полоччић, редовни професор
Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду

Др Драгољуб Бајић, ванредни професор
Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду

Др Весна Ристић Вакањац, редовни професор
Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду

Др Саша Милановић, доцент
Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду

Др Зоран Никић, редовни професор у пензији
Шумарског факултета Универзитета у Београду
