

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Мр Ружица И. Тодоровић, дипл. инж. маш.

**ПОДЗЕМНИ ВОДОНОСНИ СЛОЈ КАО
СЕЗОНСКИ ТЕРМИЧКИ РЕЗЕРВОАР
ТОПЛОТНЕ ПУМПЕ**

Докторска дисертација

Београд, 2017.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Мр Ружица И. Тодоровић, дипл. инж. маш.

**Подземни водоносни слој као
сезонски термички резервоар
топлотне пумпе**

Докторска дисертација

Београд, 2017.

University of Belgrade
Faculty of Mechanical Engineering

M.Sc Ružica I. Todorović

**Aquifer as seasonal thermal reservoir of
the ground source heat pump**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017.

Ментор: Проф. др Милош Бањац
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије: Проф. др Мирко Коматина
Универзитет у Београду, Машински факултет

Ван. проф. др Милан Гојак
Универзитет у Београду, Машински факултет

Доцент др Александар Тоћић
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Франц Коси, професор у пензији
Универзитет у Београду, Машински факултет

Датум одбране:

Овом приликом желим да се захвалим ментору проф. др Милошу Бањцу, који је својим стручним руковођењем најзаслужнији за коначан изглед ове докторске дисертације.

Посебно се захваљујем др Александру Тоћићу, доценту, на изузетном колегијалном односу и несебичној помоћи.

Желим, такође, да се захвалим др Богосаву Васиљевићу, професору у пензији, др Ненаду Јаћимовићу, ванредном професору Грађевинског факултета у Београду, проф. др Цветку Црнојевићу, др Жарку Стевановићу, научном саветнику Института за нуклеарне науке Винча, др Небојши Манићу, доценту, дипл. инж. маш. Вуку Ацићу, г-ђи Данијели Риђић из фирме Суперлаб и г-ну Драгану Ратковићу на помоћи током израде ово дисертације.

Велико хвала колеги др Нецаду Рудоњи, доценту, на другарској помоћи.

На крају, своју дубоку захвалност дугујем супругу, својим синовима, родитељима и брату, који су имали пуно разумевања, стрпљења и пружили ми безрезервну подршку.

Београд, новембра 2017. године

Ружица И. Тодоровић

Подземни водоносни слој као сезонски термички резервоар топлотне пумпе

Резиме

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације посвећена су изучавању проблема простирања топлоте у подземном водоносном слоју, током једногодишњег рада отвореног система геотермалне топлотне пумпе (ГТП), како при континуалном, тако и при цикличном, радном режиму, као и њиховој упоредној анализи. Истраживања су спроведена помоћу нумеричког моделирања. Новоформираним нумеричко-математичким моделом обухваћена су дејства чији утицај на температурно поље у подземном водоносном слоју до сада није детаљно проучаван: тродимензионалност развоја температурног поља, брзина струјања подземних вода, као и утицај слојевите хетерогености водоносног слоја. Истовремено, нумеричким моделом обухваћен је и утицај растојања између бунара, као и положај повратног бунара у односу на црпни бунар - низводан или узводан.

Провера тачности нумеричког модела извршена је са два аспекта. Први, сопственим експерименталним испитивањима - мерењем температурног поља које се формира у подземном водоносном слоју лабораторијског модела отвореног система ГТП и поређењем са одговарајућим вредностима температуре добијеним на основу нумеричких симулација. Други аспект представљају експериментални подаци других аутора. Уз задржавање непромењеног система моделираних једначина, који дефинишу неустаљено струјање нестишљивог флуида кроз хомогену и изотропну засићену порозну средину, нумерички модел је коригован у делу граничних услова, тако да буде усклађен за симулацију рада система геотермалне топлотне пумпе са 2 црпна и 3 повратна бунара, као и за случај одређивања дводимензионалног устаљеног температурног поља при принудном хоризонталном струјању воде у засићеној порозној средини са вертикалном температурском разликом. Из упоредног приказа и анализе експерименталних и резултата добијених нумеричком симулацијом, уочен је

висок степен њиховог слагања, чиме је потврђена поузданост и применљивост формираног нумеричког модела.

Анализом добијених резултата показано је да много значајнији утицај на поузданост предвиђања нумеричког модела има познавање тачних вредности термофизичких карактеристика чврсте фазе подземног водоносног слоја, него уведене ограничавајуће претпоставке под којима је нумерички модел изведен: ламинарност тока подземне воде, претпоставка хомогене, изотропне и потпуно засићене порозне средине за подземни водоносни слој, тренутно уједначавање температуре подземних вода и чврстих честица, занемаривање утицаја ефеката дисперзије, као и кондуктивних топлотних губитака у слојевима изнад и испод водоносног слоја.

Кључне речи: отворен систем геотермалне топлотне пумпе, континуалан режим рада топлотне пумпе, цикличан режим рада топлотне пумпе, температура у подземном водоносном слоју, нумеричко-математички модел, лабораторијска инсталација

Научна област: Област техничких наука - машинство

Ужа научна област: Термодинамика, Преношење топлоте и супстанције

УДК: 621.577.2:536.24:519.6(043.3)

Aquifer as seasonal thermal reservoir of the ground source heat pump

Abstract

Research in the framework of the doctoral dissertation is devoted to the study of the heat transfer in the underground aquifer during the one-year operation of the open-loop ground source heat pump system (GSHP), both in the continuous and cyclical working regime, as well as in their comparative analysis. The research was carried out using numerical modelling. The newly formed numerical-mathematical model includes effects whose influence on the aquifer temperature field has not been studied in detail until now: three-dimensional development of the temperature field, the velocity of underground water flows, and the influence of the layered aquifer heterogeneity. At the same time, the numerical model also includes the influence of the distance between the wells, as well as the position of the return well relative to the pumping well - downstream or upstream.

The verification of the accuracy of the numerical model was done in two aspects. First, by its own experimental tests - by measuring the temperature field formed in the aquifer of the open-loop GSHP laboratory model and by their comparison with the corresponding temperature values obtained on the basis of numerical simulations. The second aspect is the experimental data of the other authors. With the retaining of the unchanged system of modelled equations, that define the unsteady flow of incompressible fluid through a homogeneous and isotropic saturated porous medium, the numerical model has been corrected in part of the boundary conditions, so that it is coordinated for the simulation of the geothermal heat pump system operation with 2 pumping and 3 injection wells, as well as in the case of determining two-dimensional steady state temperature field during forced horizontal flow of water in saturated porous medium with vertical temperature difference. According to comparative presentation and analysis of experimental results and results obtained by numerical simulation, a high degree of their agreement was observed, which confirmed the reliability and applicability of the formed numerical model.

The analysis of the obtained results showed that a much more significant influence on the reliability of the numerical model prediction has the knowledge of the exact values of the aquifer solid phase thermophysical characteristics, than the introduced limiting assumptions under which the numerical model is derived: laminar flow of groundwater, the assumption of a homogeneous, isotropic and fully saturated porous medium for the aquifer, the current equilibrium of the groundwater and solid particles, neglecting the dispersion effects, as well as the conductive heat losses in layers above and below the aquifer.

Key words: open-loop ground source heat pump system, continuous operation of the heat pump, cyclical operation mode of the heat pump, temperature in the aquifer, numerical-mathematical model, laboratory installation

Scientific discipline: Field of technical sciences - Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Thermodynamics, Heat and Mass Transfer

UDC: 621.577.2:536.24:519.6(043.3)

Садржај

1. Увод	1
1.1. Отворен систем ГТП.....	2
1.2. Одрживост рада отвореног система ГТП	7
1.3. Преглед и синтеза досадашњих истраживања	9
1.4. Предмет рада докторске дисертације.....	21
2. Теоријске основе простирања топлоте у подземном водоносном слоју као засићеној порозној средини	26
2.1. Својства порозне средине	27
2.1.1. Порозност. Репрезентативна елементарна запремина	27
2.2. Једначине одржања за засићену порозну средину.....	29
2.2.1. Запреминско осредњавање физичких величина по РЕЗ.....	29
2.2.2. Једначина континуитета за засићену порозну средину.....	30
2.2.3. Једначина одржања количине кретања за засићену порозну средину	31
2.2.4. Једначина одржања енергије за засићену порозну средину	35
2.3. Бездимензијски облици једначина одржања за засићену порозну средину	38

2.4.	Раванско потенцијално струјање у подземном водоносном слоју отвореног система ГТП	40
2.4.1.	<i>Потенцијално струјање подземних вода.....</i>	41
2.4.2.	<i>Струјање у спољашњем кругу отвореног система ГТП - извор и понор у једноликој струји флуида</i>	42
3.	Експериментално одређивање температурног поља у подземном водоносном слоју при раду отвореног система ГТП	50
3.1.	Примена теорије сличности за одређивање експерименталних радних параметара	51
3.2.	Опис мерне инсталације	54
3.3.	Опис поступка мерења	61
3.3.1.	<i>Мерење температурног поља унутар подземног водоносног слоја....</i>	64
3.4.	Приказ експерименталних резултата	73
3.4.1.	<i>Мерни резултати при континуалном режиму рада ГТП и низводном положају повратног бунара</i>	74
3.4.2.	<i>Мерни резултати при континуалном режиму рада ГТП и узводном положају повратног бунара</i>	77
3.4.3.	<i>Мерни резултати при цикличном режиму рада ГТП</i>	80
3.5.	Анализа резултата	83
4.	Нумеричка анализа простирања топлоте кроз слојевити подземни водоносни слој при раду отвореног система ГТП.....	87
4.1.	Поставка физичког модела.....	88
4.2.	Поставка математичког модела	90
4.2.1.	<i>Основне билансне једначине.....</i>	90
4.2.2.	<i>Домен интеграције и гранични услови</i>	92

4.3.	Нумерички модел.....	94
4.3.1.	<i>Генерисање нумеричке мреже.....</i>	94
4.3.2.	<i>Поставка нумеричког прорачуна.....</i>	96
5.	Провера тачности предвиђања нумеричког модела.....	98
5.1.	Приказ резултата нумеричких симулација.....	99
5.1.1.	<i>Континуалан режим рада система ГТП и низводан положај повратног бунара.....</i>	99
5.1.2.	<i>Континуалан режим рада система ГТП и узводан положај повратног бунара.....</i>	107
5.1.3.	<i>Цикличан режим рада система ГТП.....</i>	114
5.2.	Провера тачности предвиђања нумеричког модела помоћу експерименталних података других аутора.....	122
5.2.1.	<i>Анализа термичког утицаја између групе црпних и групе повратних бунара, експерименти Гаоа и сарадника [56].....</i>	122
5.2.2.	<i>Одређивање утицаја природне конвекције на принудно хоризонтално струјање у подземном водоносном слоју, експерименти Нагана и сарадника [55].....</i>	123
5.3.	Анализа резултата нумеричких симулација.....	124
6.	Закључна разматрања.....	127
	Литература.....	131

Списак ознака

Латинична слова

A	[m ²]	површина
A_0	[m ²]	површина попречног пресека репрезентативне елементарне запремине порозне средине
A_k	[m ²]	унутрашња површина порозне средине
a_{eff}	[m ² /s]	топлотна дифузивност порозне средине
a_f	[m ² /s]	топлотна дифузивност флуида
$a_v = A_k/V_0$	[1/m]	специфична површина порозне средине
b	[m]	дебљина аквифера
Ca	[-]	капиларни број
Co	[-]	Куранов број
c_F	[-]	инерциони коефицијент
c_p	[J/(kg K)]	специфични топлотни капацитет при сталном притиску
d	[m]	полурастојање између бунара
d_{bun}	[m]	унутрашњи пречник бунара
d_s	[m]	пречник честице чврсте фазе
d_{sp}	[m]	спољашњи пречник
d_{un}	[m]	унутрашњи пречник
Fo	[-]	Фуријеов број
$F(T)$	[-]	функција порозности и термофизичких карактеристика аквифера
Gr	[-]	гравитациони број
g	[m/s ²]	Земљино убрзање
h	[m]	пиезометарска висина нивоа течности
h_{bun}	[m]	дужина бунара
h_{fs}	[W/(m ² K)]	коефицијент прелажења топлоте између фаза порозне средине
I	[-]	хидраулички градијент
K	[m/s]	хидраулична проводљивост
k	[m ²]	коефицијент пропусности
k_d	[m ² /s]	коефицијент у једначини енергије при нумеричком прорачуну
k_l	[-]	преводни коефицијент дужине
k_t	[-]	преводни коефицијент за време, коефицијент у једначини енергије при нумеричком прорачуну

L	[m]	дужина
l, L_b	[m]	растојање између бунара
\mathbf{n}	[-]	јединични вектор управан на одговарајућу површ
$P = \frac{\langle p \rangle^f}{\rho_f} - g z$	[m ² /s ²]	кинематички притисак
Pe	[-]	Пеклеов број
Pr	[-]	Прандтлов број
$p = \langle p \rangle^f + \tilde{p}$	[Pa, kg/(m s ²)]	тренутни, осредњени и флукуациони притисак
\hat{p}	[-]	бездимензијски притисак
$q_{v,f}$	[m ³ /s]	запремински проток подземне воде
q_v	[m ³ /s]	запремински проток црпне/повратне воде
$q_{v,b}$	[m ² /s]	запремински проток црпне/повратне воде по јединици дебљине аквифера
q^*	[-]	однос максималног и минималног измереног протока на излазу из модела аквифера
R	[kg/(m ² s ²)]	укупна сила отпора по јединици запремине порозног материјала услед присуства чврсте фазе
Re	[-]	Рејнолдсов број
S_H	[W/m ³]	запреминска издашност термичког извора
S_m	[kg/(s m ³)]	запреминска издашност масеног извора
S_V	[1/s]	специфична издашност масеног извора
$T = \langle T \rangle^f + \tilde{T}$	[K]	тренутна, осредњена и флукуациона температура
\hat{T}	[-]	бездимензијска температура
t	[s]	време
\hat{t}	[-]	бездимензијско време
Δt	[s]	временски корак
$U(t)$	[-]	јединична одскочна (степ) функција
u	[m/s]	брзина кретања зоне промене температуре
V	[m/s]	Дарсијева брзина струјања флуида
V_i, V_j	[m/s]	компоненте Дарсијеве брзине струјања флуида
\hat{V}	[-]	бездимензијска Дарсијева брзина
$\mathbf{v} = \langle \mathbf{v} \rangle^f + \tilde{\mathbf{v}}$	[m/s]	тренутна, осредњена и флукуациона брзина струјања флуида
v_{Π}	[m/s]	брзина струјања воде кроз црпни/повратни бунар
\bar{v}	[m/s]	комплексна брзина
$V_0 = V_f + V_s$	[m ³]	репрезентативна елементарна запремина порозне средине, запремина флуидне фазе и запремина чврсте фазе

$x_i = x, y, z$	[m]	Декартове координате
$(x_j = x, y, z)$		
\hat{x}_i	[-]	бездимензијска координата
w	[m ² /s]	комплексни потенцијал
$z = x + iy$	[m]	комплексна променљива
$z_0 = x_0 + iy_0$	[m]	комплексна променљива која дефинише положај извора/понора

Грчка слова

α	[rad]	угао струјања подземне воде у односу на правац који спаја црпи и повратни бунар
β	[s]	параметар времена
β_{TZ}	[-]	модификован фактор топлотног успоравања
δ_c	[m]	дебљина цеви
η	[-]	параметар који представља однос дужине зоне промене температуре и растојања између бунара
λ	[W/(mK)]	топлотна проводљивост
λ_{eff}	[W/(mK)]	ефективна топлотна проводљивост порозне средине
λ_0	[W/(mK)]	стагнантна топлотна проводљивост
λ_d	[W/(mK)]	дисперзиона топлотна проводљивост
μ_{eff}	[Pa s, kg/(ms)]	ефективна динамичка вискозност порозне средине
μ_f	[Pa s, kg/(ms)]	динамичка вискозност флуида
ν_f	[m ² /s]	кинематска вискозност флуида
ρ	[kg/m ³]	густина
$(\rho c)_{eff}$	[J/(m ³ K)]	ефективни топлотни капацитет порозне средине
τ	[s]	време задржавања зоне промене температуре
φ	[m ² /s]	потенцијал брзине
$\psi = \langle \psi \rangle + \tilde{\psi}$		општа ознака за променљиву физичку величину, њен тренутни, осредњени и флукуациони део
Ψ		векторска величина
$\underline{\underline{\psi}}$		тензор
Ψ	[m ² /s]	струјна функција
ϑ	[°C]	температура
ϑ_f	[°C]	температура термички ненарушеног аквифера
$\Delta \vartheta_{fn}$	[°C]	температурска разлика између термички ненарушеног аквифера и повратне воде
ϕ	[-]	запреминска порозност

ϕ_A [-] површинска порозност

Индекс

c	карактеристична константна вредност
f	флуидна фаза порозне средине
i	извор
M	лабораторијски модел аквифера
max	максимална вредност
min	минимална вредност
n.sl	непропусан слој са којим се граничи аквифер
P	прототип аквифера
p	поре унутар узорка порозне средине, понор
pes, 2	слој песка
пов	повратна вода
s	чврста фаза порозне средине
šlj, 1	слој шљунка
uk	укупан узорак порозне средине
ZT	зауоставна тачка
I - IV	ознака положаја бунара

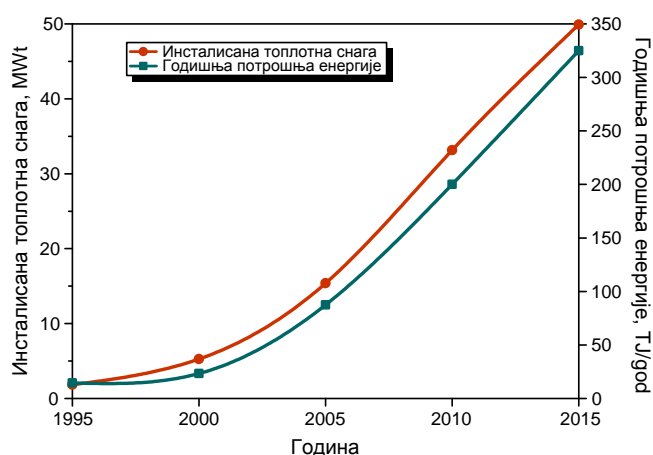
1. Увод

Прекомерна и све већа употреба фосилних горива, приближавање крају њихових резерви, историјски рекорди у емисији угљендиоксида, загађење животне средине, те последице које се манифестују у виду глобалног загревања Земље, основни су разлози због којих се предузимају мере рационалног и ефикасног односа према енергији. У сврху ублажавања и спречавања наведених негативних трендова, на глобалним регионалним и националним нивоима постављају се стратешки циљеви енергетског развоја [1], који подразумевају повећање удела обновљивих извора енергије и повећање ефикасности при коришћењу енергије. Податак да се у области зградарства у свету користи између 40% и 50% од укупно утошене енергије [2][3], од чега 2/3 за потребе грејања и хлађења, довео је до тога да се у земљама широм света стимулише развој и примена грејно-расхладних система који користе енергију из обновљивих извора [4][5][6], као замена традиционалним системима грејања и хлађења.

Као један од грејно-расхладних система који обједињује оба стратешка циља, и коришћење ОИЕ и ЕЕ, јесте систем геотермалне топлотне пумпе (ГТП). Овај систем као главни енергетски извор користи термичку енергију земље - геотермалну енергију, као један од појавних облика обновљиве енергије. При том, ГТП могу да користе нискотемпературну или геотермалну енергију подземних вода или сувих слојева земљине коре, до дубина од 400 метара. Примена ових система могућа је практично свуда, а њихов рад не зависи од временских прилика, годишњег доба и доба дана, што није случај са другим системима који користе обновљиве изворе енергије. Управо у томе је њихова главна предност. Поред тога,

може се сматрати да је температура подземних вода и самог земљишта, на дубинама испод тзв. неутралне зоне, стална током године. Та температура је лети нижа, а зими виша од температуре ваздуха, због чега тло представља идеалан извор и понор топлоте топлотних пумпи. Преостале предности коришћења система ГТП су: економичност, с обзиром да је њихова ефикасност у односу на конвенционалне грејно-расхладне системе за 50 до 70% виша у случају грејања, односно за 20 до 40% виша у случају хлађења [7], затим ниски трошкови одржавања система, трајност, тихи рад, еколошки аспект [8][9], те могућност коришћења истог система за потребе грејања објекта зими и хлађења лети.

Овакав вид грејања и/или хлађења у данашње време добио је на значају. Потврда томе је непрекидан пораст броја ових постројења у последњих 20 година [10][11], односно пораст инсталисане топлотне снаге и годишње потрошње енергије у целом свету (Слика 1.).



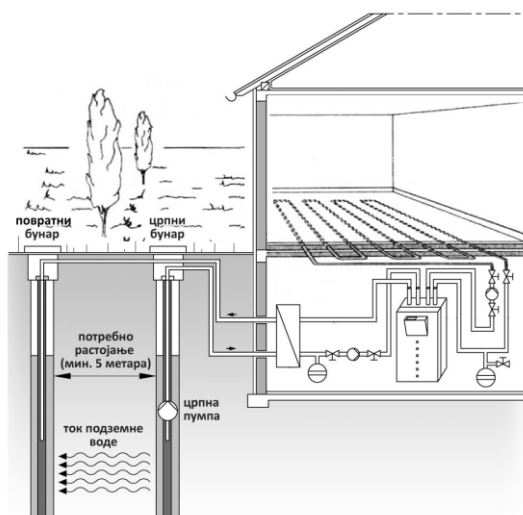
Слика 1. *Инсталисана снага и годишња потрошња енергије система ГТП за период 1995-2015 (на основу [12])*

1.1. Отворен систем ГТП

Систем ГТП чине три подсистема: спољашњи подсистем постројења, који чини везу система са земљом, затим подсистем топлотне пумпе и унутрашњи подсистем постројења, односно подсистем за предају топлоте грејаном, тј. хлађеном, простору. Најбоља ефикасност, односно степен корисности целокупног система ГТП постиже се када унутрашњи подсистем постројења чини панелни

грејно-расхладни систем, који због малих разлика између температуре панелних предајника топлоте и ваздуха у просторији представља подсистем са највећим степеном корисности [13][14].

У зависности од врсте топлотног извора, тј. понора, помоћу кога се врши размена топлоте са земљом, разликујемо два система ГТП. Системи ГТП који као извор топлоте користе само термичку енергију земљишта познати су под називом затворени системи ГТП. У том случају преносник топлоте представља флуид који циркулише кроз, у земљу укопан, размењивач топлоте. Системи ГТП који као топлотни извор користе воду подземног водоносног слоја, која уједно представља и преносник топлоте, познати су под називом отворени системи ГТП или системи ГТП вода-вода. Најчешће коришћени тип ових система су системи ГТП са паром спрегнутих бунара - црпним и повратним (Слика 2.).



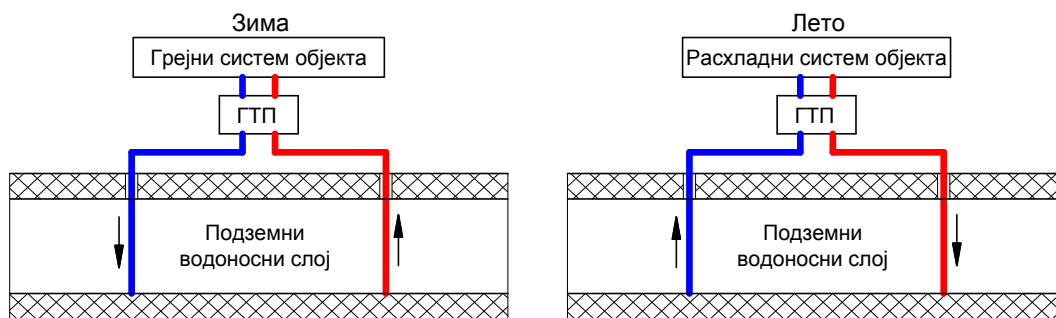
Слика 2. Отворен система ГТП са паром спрегнутих бунара

Подземни водоносни слој је геолошка формација, или слој, који садржи воду и кроз који, при уобичајеним условима на терену, може да струји значајна количина воде [15]. Друга дефиниција каже да је то слој пропусних стена засићених водом, из којег могу да се црпе економски профитабилне количине воде [16]. Уобичајен назив у стручној литератури широм света за подземни водоносни слој је аквифер. Реч аквифер (енг. *aquifer*) потиче од латинских речи *aqua* - вода и *ferre* – носити.

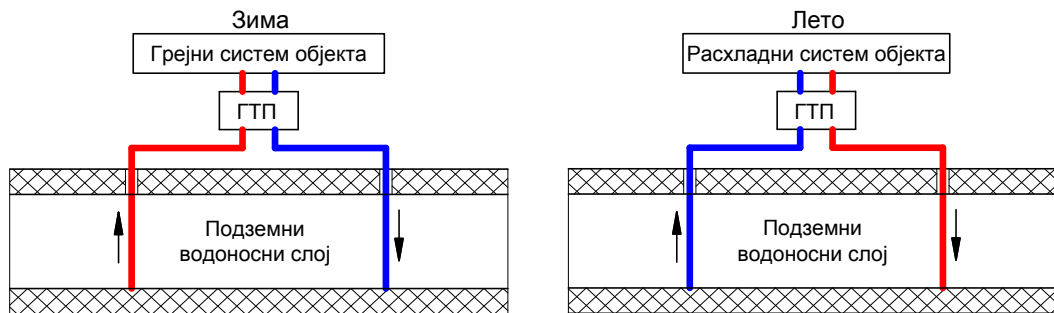
Са термодинамичког аспекта, отворени системи ГТП имају предност у погледу већег коефицијента грејања у односу на друге системе ГТП, услед директног коришћења подземне воде великог специфичног топлотног капацитета и сталне, релативно високе, температуре током године. Међутим, њихов учинак умногоме зависи од грејно-расхладног топлотног оптерећења објекта, радних карактеристика топлотне пумпе, те карактеристика подземног водоносног слоја [17].

Посматрано са аспекта аквифера, у току једне календарске године отворен систем ГТП пролази кроз четири периода: два радна периода током летње и зимске сезоне, и два периода опоравка термичке енергије током јесени и пролећа. Летњи радни период, када систем ради у режиму хлађења, и зимски радни период, када систем ради у режиму грејања, чине црно-повратне радне периоде, током којих се, након црпљења и топлотног искоришћавања, подземна вода враћа у аквифер. Током јесени и пролећа систем не обавља функцију грејања, односно хлађења, и не делује топлотним поремећајем на подземни водоносни слој, због чега се аквифер спонтано враћа у почетно стање.

Режим рада отвореног система ГТП може бити тзв. континуалан и тзв. цикличан. При цикличном режиму рада мењају се смерови струјања воде из црног и повратног бунара по сезони. Тако црни бунар из зимског режима у летњем режиму постаје повратни, и обрнуто, повратни постаје црни (Слика 3.а). До замене смерова струјања не долази при континуалном режиму рада ГТП (Слика 3.б).



а) *цикличан режим рада*



б) континуалан режим рада

Слика 3. Шематски приказ отвореног система ГТП

У зимском периоду, када систем ради у режиму грејања, подземни водоносни слој представља топлотни извор ГТП. Услед прострујавања преко испаривача и предаје топлоте радном флуиду топлотне пумпе подземна вода се хлади. Тако охлађена она се поновно убацује у земљу, у исти подземни водоносни слој из кога је црпљена, што резултира стварањем зоне хладне повратне воде у аквиферу, температуре ниже од температуре воде у термички ненарушеном делу аквифера. У летњем периоду, када систем ради у режиму хлађења, подземни водоносни слој чини понор топлоте. Под претпоставком тзв. континуалног режима рада топлотне пумпе, подземна вода се црпи из истог бунара, прострујава преко кондензатора топлотне пумпе, прима топлоту од радног флуида топлотне пумпе - термичку енергију преузету из хлађеног простора, и загрева се. Тако загрејана убацује се у водоносни слој и енергетски га обогаћује, стварајући у њему зону топле повратне воде, температуре више од температуре воде у термички ненарушеном делу аквифера.

У случају тзв. цикличног режима рада топлотне пумпе, у периоду летње сезоне - режиму хлађења, температура воде која се црпи из подземног водоносног слоја је ниска, што је последица постојања зоне хладне повратне воде, формиране у претходној грејној сезони. Захваљујући томе, систем ГТП може дужи временски период да ради у пасивном режиму хлађења - без употребе топлотне пумпе као расхладног уређаја. Касније, када се исцрпу резерве акумулисане хладне воде, и систем хлађења ГТП почне да ради у активном режиму, он ће радити са повећаним коефицијентом хлађења, будући да ће температура воде која се црпи из бунара и даље бити нижа од температуре топлотним дејством ненарушеног

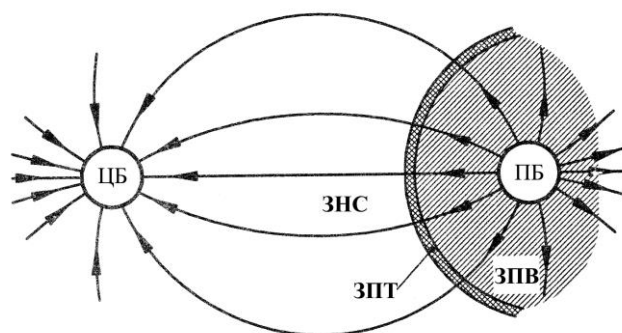
подземног водоносног слоја. Истовремено током летњег периода на страни повратног бунара, услед убацивања загрејане воде у аквифер, долази до акумулисања топлоте и стварања зоне топле повратне воде у подземном водоносном слоју. Ова термичка енергија допринеће да у почетном периоду зимског - грејног режима, када се поново замене смерови струјања воде, систем ГТП ради са нешто већим коефицијентом грејања. Управо због тога се као предност цикличног радног режима наводи већи сезонски коефицијент грејања и већи сезонски коефицијент хлађења система ГТП. С друге стране, континуалан радни режим има једноставнији дизајн и контролу система, али и ниже перформансе система - нижи сезонски коефицијент грејања и нижи сезонски коефицијент хлађења [18][19].

На основу описа принципа рада система ГТП, може се закључити да убацивање топлотно искоришћене подземне воде кроз повратни бунар, током летњег и зимског радног периода, доводи до нарушавања природног температурног поља унутар аквифера. Анализирајући даље струјање воде од повратног ка црпном бунару, чији је графички приказ струјница дат на слици 4, могу се уочити три температурне зоне [20]:

- Зона повратне воде (ЗПВ) - зона подземног водоносног слоја који се у зимском радном периоду већ охладио, односно у летњем периоду већ загрејао, до температуре повратне воде. Повратна вода кроз ту зону струји без размене топлоте са водоносним слојем, јер су им температуре једнаке.
- Зона промене температуре (ЗПТ) - зона у којој долази до изједначавања температуре повратне воде и температуре подземног водоносног слоја. У зимском режиму рада охлађена повратна вода се у овој зони загрева до природне температуре подземног водоносног слоја, док се подземни слој хлади до температуре повратне воде. У летњем режиму рада загрејана повратна вода се у овој зони хлади до природне температуре аквифера, док се аквифер загрева до температуре повратне воде. Услед малих унутрашњих и спољашњих термичких отпора чврстих честица, које сачињавају скелет стена водоносног слоја, изједначавање температуре повратне воде и аквифера дешава се на веома кратком путу,

услед чега је зона промене температуре уска, па се често назива и фронт промене температуре, односно термички фронт.

- Зона ненарушеног слоја (ЗНС) - зона подземног водоносног слоја са првобитном природном температуром. У ову зону повратна вода улази загрејана (у зимском режиму), односно охлађена (у летњем режиму), до вредности температуре у термички ненарушеном водоносном слоју, због чега са њим не размењује топлоту.



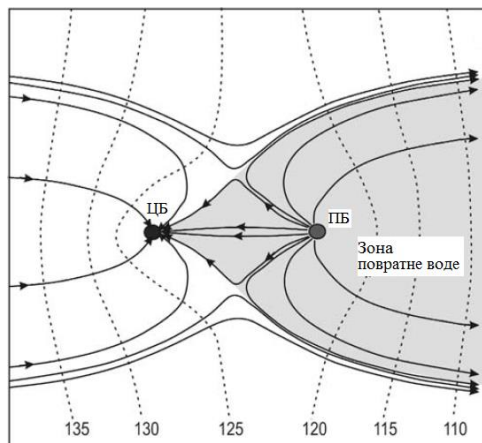
Слика 4. Температурне зоне које настају у подземном водоносном слоју при струјању повратне воде (ЦБ - црпни бунар, ПБ - повратни бунар) [20]

1.2. Одрживост рада отвореног система ГТП

Под одрживошћу рада геотермалних система подразумева се способност да одрже стабилан радни режим током дугог временског периода [21].

Да би рад система ГТП био одржив потребно је да количина топлоте која се у летњем периоду акумулише буде приближно једнака количини топлоте која се у зимском периоду црпи из водоносног слоја. Уколико ове количине топлоте значајно одступају рад система ГТП неће бити одржив. У том случају доћи ће до промене температуре црпне воде. При низводном положају повратног бунара црпна вода добија се мешањем повратне воде и подземне воде са природном температуром подземног водоносног слоја. Зимом, у режиму грејања, она ће почети да опада када, услед ширења зоне хладне повратне воде, зона промене температуре доспе до црпног бунара. Тада долази до продора хладне повратне

воде (Слика 5.), што има за последицу снижавање температуре воде која се црпи из подземног водоносног слоја.



Слика 5. Продор хладне повратне воде до црног бунара [22]

И након тренутка продора хладне повратне воде систем ГТП наставља да ради, али са смањеним коефицијентом грејања. Радни век система је окончан тек када проток те хладне повратне воде постане превелик, тј. када вода која се црпи постане трајно толико ниска да не постоји економска исплативост рада система ГТП. У овом тренутку долази до тзв. термичке исцрпљености земљишта и она одређује век трајања целокупног система.

При анализи одрживости рада отвореног система ГТП, као и његовог степена ефикасности, неопходно је изучавати понашање температурног поља које се формира у подземном водоносном слоју. Његово познавање након једногодишње експлоатације представља полазну тачку у циљу предузимања мера за очување хидрогеотермалног потенцијала - обнову температурне равнотеже у подземном водоносном слоју након његове примене као сезонског термичког резервоара топлотне пумпе.

Због наведеног значаја проучавања понашање подземног водоносног слоја са енергетског становишта, управо у овој дисертацији биће праћене температурне промене у аквиферу, током његове сезонске експлоатације отвореним системом ГТП са паром спрегнутих бунара.

1.3. Преглед и синтеза досадашњих истраживања

Као што је претходно већ напоменуто, познавање понашања температурног поља у подземном водоносном слоју, које је последица његове експлоатације системом ГТП, неопходно је за одређивање степена ефикасности и одрживости рада целокупног система. За анализу праћења тих температурних промена користе се **аналитичке, нумеричке и експерименталне методе**.

Аналитичке методе су најједноставније. Заснивају се на решавању парцијалних диференцијалних једначина, а као резултат дају мање или више сложене алгебарске, или тзв. аналитичке изразе.

Први **аналитички модел** којим је анализирано убацивање топле воде у геотермални резервоар, кроз велики број повратних бунара, објавио је Lauwergier 1955. године [23]. Он је извео дводимензионалан израз за одређивање промене температурног поља у резервоару током времена. Основне претпоставке модела биле су да је струјање воде линеарно и да је провођење топлоте заступљено само у вертикалном правцу кроз полубесконачне непропусне слојеве са обе стране подземног водоносног слоја, док је у правцу струјања заступљена само конвекција. Авдонин и Малофеев, независно један од другог, извршили су допуне и измене решења Lauwergier-а [23]. Авдонин (1964) је решење допунио, додајући при анализи и провођење топлоте у правцу струјања, док је Малофеев (1960) применио решење за случај радијалног струјања воде. Kobus и Mehlhorn (1980), су на основу енергетског биланса за коначну запремину аквифера извели једноставан израз за одређивање промене температуре подземне воде у водоносном слоју [24].

У аналитичком једнодимензионом моделу Ingerle-а објављеном 1988. године, чију допуну је извршио Rauch 1992. године, одређивање температуре подземних вода, које се врши итеративним поступком, заснива се на комбинацији анализе дисперзије топлоте и вредности угла који међусобно заклапају правац струјања подземне воде и хоризонтална раван [25].

Uffink (1983) анализира размену топлоте између подземног водоносног слоја, кроз који одређеном брзином протиче зона промене температуре, и непропусних слојева, са којима се граничи са горње и доње стране [26]. Проблем описује једнодимензионалном парцијалном диференцијалном једначином за

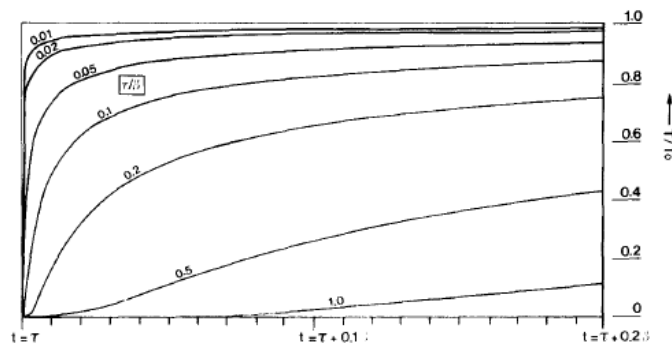
неустаљено провођење топлоте. Као решења једначине наводи изразе Carslaw-а и Jaeger-а, који су изведени под претпоставком простирања топлоте кондукцијом у вертикалном правцу кроз полубесконачне граничне слојеве, и конвекцијом у хоризонталном правцу кроз подземни водоносни слој, дуж кога устаљено струји подземна вода. Температура унутар релативно танког аквифера, дебљине b , одређује се помоћу израза:

$$T(x, t) = T_{\text{пов}} U(t - x/u) \operatorname{erfc} \left(\frac{\lambda_{\text{n.sl}} x/u (\rho c)_{\text{eff}} b}{4(t - x/u)^{1/2} a_{\text{n.sl}}^{1/2}} \right), \quad (1.1)$$

док се за одређивање температурног поља унутар суседних непропусних слојева користи израз:

$$T_{\text{n.sl}}(x, z, t) = T_{\text{пов}} U(t - x/u) \operatorname{erfc} \left(\frac{2z - b + \lambda_{\text{n.sl}} x/u (\rho c)_{\text{eff}} b}{4(t - x/u)^{1/2} a_{\text{n.sl}}^{1/2}} \right), \quad (1.2)$$

у којима u [m/s] представља брзину кретања зоне промене температуре, а $U(t)$ јединичну одскочну (степ) функцију. Криве продора зоне промене температуре кроз подземни водоносни слој, за различите вредности τ/β ($\tau = x/u$, $\beta = ((\rho c)_{\text{eff}} / (\rho c)_{\text{n.sl}})^2 ((b/2)^2 / a_{\text{n.sl}})$) приказане су на слици 6.



Слика 6. Криве продора зоне промене температуре кроз аквифер [26]

Проблемом описивања радијалног распореда температура током убацивања повратне воде у затворен подземни водоносни слој бавили су се и Chen и Reddell (1983), као и Yang и Yeh (2008). Chen и Reddell су, анализирајући простирање

топлоте конвекцијом и кондукцијом у хоризонталном правцу кроз водоносни слој, и кондукцијом у вертикалном правцу кроз непропусне слојеве са обе стране аквифера, развили аналитичко решење за описивање устаљеног и неустаљеног температурног поља око повратног бунара [27]. Својим математичким моделом, Yang и Yeh су обухватили конвекцију у хоризонталном правцу унутар водоносног слоја и провођење топлоте у вертикалном правцу кроз горњи и доњи непропусни слој, различитих термофизичких својстава [28].

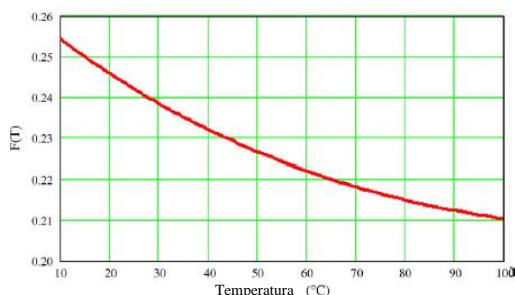
Простирање зоне промене температуре која настаје услед убацивања хладне повратне воде у топли геотермални резервоар проучавали си и Stora и Wojnarowski (2006), као и Ganguly и Kumar (2014). Stora и Wojnarowski [29] су, занемарујући провођење топлоте кроз аквифер, одредили аналитички израз за одређивање брзине ширења зоне промене температуре:

$$u = \langle v \rangle^f \beta_{TZ} . \quad (1.3)$$

У изразу, поред осредњене стварне брзине струјања подземне воде $\langle v \rangle^f$, фигурише и уведени модификован фактор топлотног успоравања:

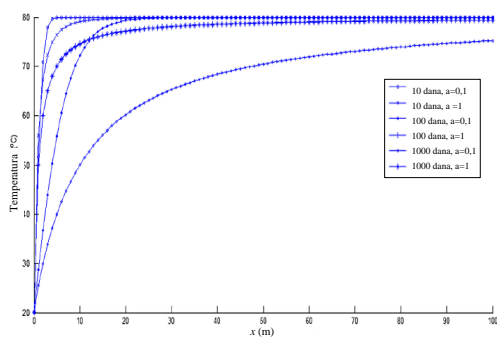
$$\beta_{TZ} = \frac{\int_{T_{\text{пов}}}^{T_f} (\rho c)_{\text{eff}}(T) F(T) dT}{\int_{T_{\text{пов}}}^{T_f} (\rho c)_{\text{eff}}(T) dT} . \quad (1.4)$$

Функција $F(T)$ зависи од порозности аквифера и термофизичких карактеристика чрсте и течне фазе које га чине, као и промене ових величина са температуром (Слика 7.).

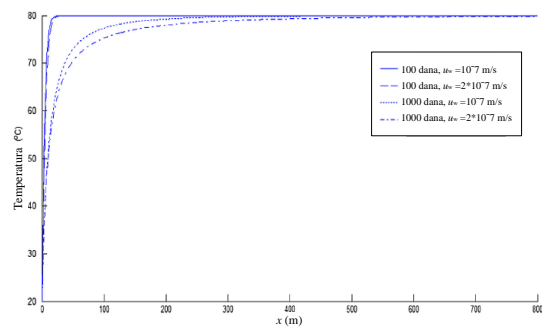


Слика 7. Графички приказ зависности $F(T)$ од температуре [29]

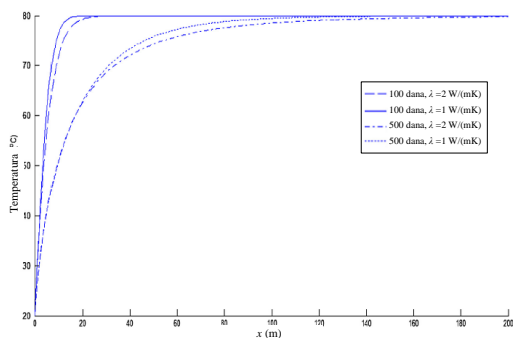
Ganguly и Kumar су, коришћењем Лапласових трансформација, извели једнодимензионе изразе за одређивање распореда температуре и положај зоне промене температуре у хетерогеном геотермалном резервоару [30]. Закључили су да хетерогеност аквифера, брзина струјања подземне воде и подужна ефективна топлотна проводљивост аквифера (Слика 8.а-8.в) имају знатан, а са друге стране порозност (Слика 8.г) незнатан, утицај на простирање топлоте у подземном водоносном слоју при убацивању хладне повратне воде.



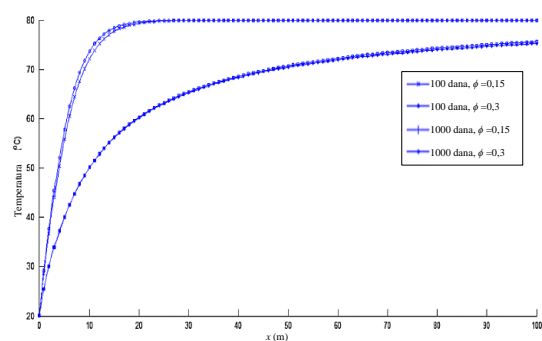
а) утицај хетерогености аквифера



б) утицај брзине струјања подземних вода



в) утицај топлотне проводљивости аквифера



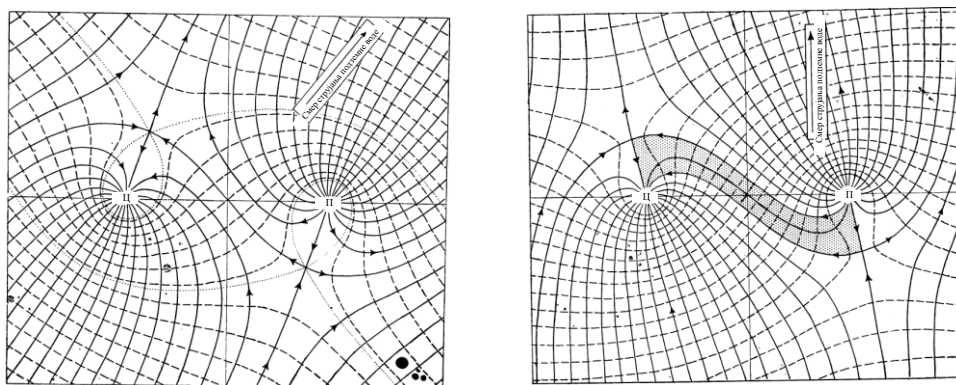
г) утицај порозности аквифера

Слика 8. Температурна расподела дуж аквифера - анализа утицаја [30]

Banks [22][31][32] представља аналитичка истраживања која су се односила на процену ризика од могућности појаве хидрауличног повратног тока, као и могућности продора зоне промене температуре до црног бунара. Наводи да су,

занемарујући струјање подземне воде, Lippmann и Tsang (1980), а потом Clyde и Madabhushi (1983), за случај када долази до хидрауличног продора повратне воде, дефинисали минимално потребно растојање између бунара да температурна зона повратне воде не допре до црпног бунара и не утиче на промену температуре воде у њему. Са друге стране, Hoopes и Harleman (1967), Grove (1971) и Güven и сар. (1986) су извели израз за одређивање времена до појаве хидрауличног повратног тока, док су Gringarten (1978, [33]), Clyde и Madabhushi (1983), те Banks (2012, [31]), извели израз за одређивање времена до појаве термичког продора повратне воде.

Поред наведених аналитичких модела, за проучавање струјања у подземном водоносном слоју при раду отвореног система ГТП, под претпоставком да је у питању устаљено дводимензионално струјање, користе се и **графоаналитичке методе**. Оне се заснивају на примени теорије функција комплексних променљивих и конструисању струјне мреже. Dacosta и Bennett (1960) су приказали изглед струјних мрежа и анализирали да ли долази до продора повратне воде (Слика 9.), при различитим угловима струјања подземне воде у односу на правац који спаја црпни и, низводно постављен, повратни бунар [34]. O'Donnell (1982) и Johnsen (2007) су дали општије решење овог проблема, уводећи претпоставку да су бунари различитих запреминских протока [35][36].



а) $\alpha = 50,5^\circ$

б) $\alpha = 90^\circ$

Слика 9. Струјна мрежа у аквиферу, при раду отвореног система ГТП, за различите углове струјања подземне воде [34]

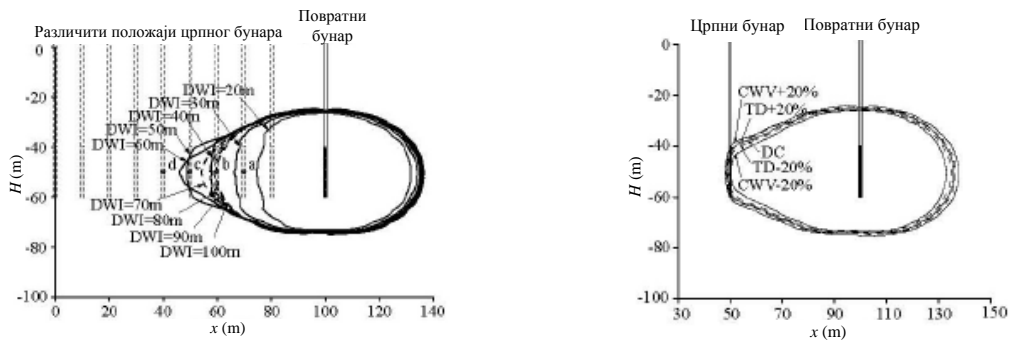
Примена свих наведених аналитичких модела спроводи се кроз једноставан прорачун, међутим они се могу применити само у најједноставнијим случајевима или за потребе квалитативне процене [37]. Због увођења претпоставки које у великој мери поједностављују анализу, аналитички модели нису у стању да довољно прецизно опишу, односно послуже за предвиђање температурних промена у подземним водоносним слојевима. Помоћу њих није могуће анализом обухватити све механизме простирања топлоте, нити тродимензионалност самог проблема. Управо због тога, наметнула се потреба коришћења нумеричких метода и формирање одговарајућих нумеричких модела да би се спровела анализа рада отворених система ГТП. При томе, ради провере поузданости формираног нумеричког модела, неходна је његова експериментална провера [38], те се по правилу ове две методе - нумеричке и експерименталне, изводе заједно и резултати се међусобно надопуњују.

Први **нумерички модели** датирају с почетка 70-тих година прошлог века [39]. Све до 80-тих година прошлог века претежно је анализиран модел са једним црно-повратним бунаром. 1976. године научници са Аубурн Универзитета у Алабама су спровели **експериментална истраживања на реалном постројењу**. Пратили су температурне промене у затвореном подземном водоносном слоју током два шестомесечна радна циклуса система ГТП са једним бунаром, који је радио са сезонским складиштење термичке енергије. Нумеричку симулацију ових експеримената, дајући просторни и временски распоред температура у водоносном слоју, у својим радовима објавили су Papadopoulos и Larson (1978, [40]), Tsang и сар. (1980, [41]), као и Sykes и сар. (1982, [42]).

Од 80-тих година прошлог века предмет нумеричког термичко-хидрауличког моделирања је првенствено отворен систем ГТП са два бунара - црпним и повратним. Andrews је 1978. године објавио рад у коме је анализирао утицај коришћења цикличног система ГТП, са бунарима постављеним на различитим дубинама, на промене температуре подземне воде. Применом дводимензионалног нумеричког моделирања, дошао је до закључка да би се након десет година рада система ГТП температура воде у подземном водоносном слоју променила за мање од 1°C на растојању већем од 40 метара од бунара [43].

Многа нумеричка истраживања заснивају се на анализи параметара који утичу на процес простирања топлоте у водоносном слоју при раду система ГТП. Dwyer и Eckstein (1987) су путем дводимензионалног нумеричког модела, занемарујући струјање подземне воде, вршили одређивање фактора енергетске искоришћености и температуре подземне воде на крају једног радног циклуса система ГТП, а у зависности од режима струјања у водоносном слоју, величине усвојене мреже и дужине временских интервала нумеричког модела, затим термичких и хидрогеолошких параметара водоносног слоја и температуре повратне воде. Закључено је да устаљен и неустаљен модел дају у суштини исте резултате, на које поред температуре повратне воде, највећи утицај има вредност подужне дисперзивности [44]. Vandenbohede и сар. (2011) су моделирали температурно поље, током летњег и јесењег радног периода ГТП, у горњем делу подземног водоносног слоја, који је под утицајем варијација температуре спољашњег ваздуха. Проверу нумеричких резултата вршили су на основу измерених температура у контролним бунарима. Дошли су до закључка да на процес простирања топлоте у водоносном слоју највећи утицај има топлотна проводност чврсте фазе, потом порозност, топлотни капацитет чврсте фазе, те подужна дисперзивност, на основу чега су закључили да је кондукција доминантан механизам простирања топлоте током мировања система, док је конвекција доминантна током процеса убризгавања, када се ни термичка дисперзија не сме занемарити [45].

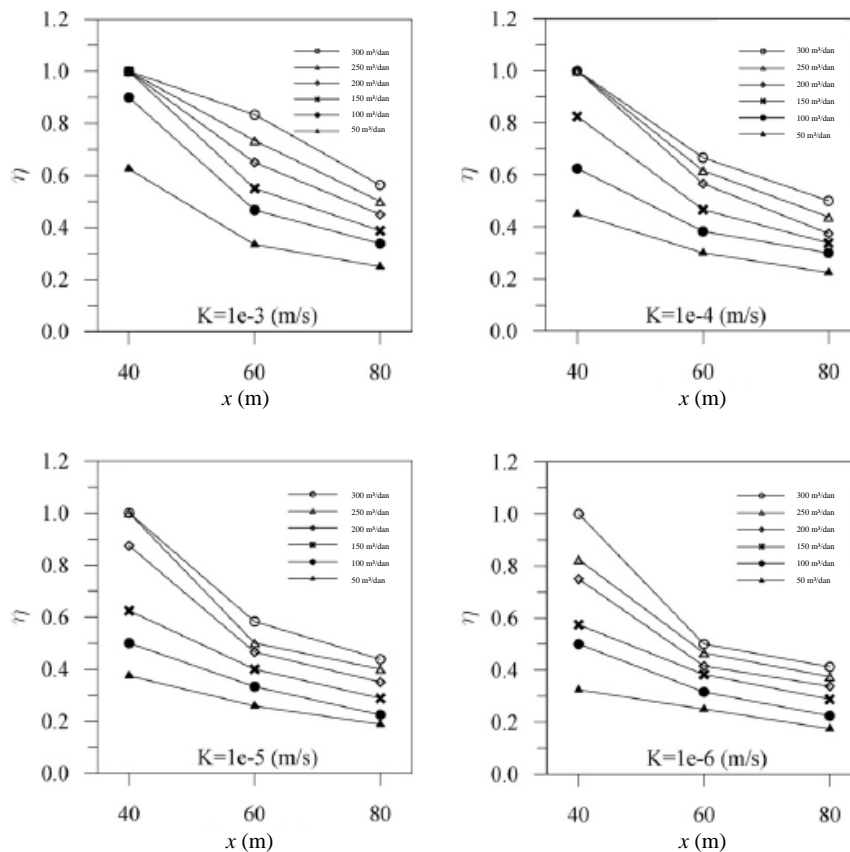
Zhou Y. и Zhou Z. (2009) и Kim и сар. (2010) су, занемарујући струјање подземне воде, анализирали параметре који утичу на формирање зоне хладне, односно топле, повратне воде у аквиферу. Zhou Y. и Zhou Z. су анализирали рад цикличног система ГТП, током временског периода од 1 године. На основу нумеричког модела дошли су до закључка да на положај зоне повратне воде у отвореном водоносном слоју велики утицај имају растојање између бунара (Слика 10.а) и топлотно оптерећење објекта (Слика 10.б). Такође су закључили да већи утицај на величину зоне повратне воде има вредност запреминског протока црпне/повратне воде, од разлике између температура црпне и повратне воде [46].



а) од растојања између бунара б) од расхладног оптерећења објекта

Слика 10. Зависност положаја зоне промене температуре у аквиферу на крају летње сезоне [46]

Kim и сар. су, поред растојања између бунара и протока црпне/повратне воде, анализирали и утицај коефицијента филтрације на рад цикличног система ГТП (Слика 11.).



Слика 11. Параметар η након 3 месеца убацивања топле повратне воде у подземни водоносни слој - зависност од протока црпне/повратне воде [47]

На основу тродимензионалног нумеричког модела закључили су да са смањењем растојања, а повећањем коефицијента филтрације и протока воде, расте термички утицај повратне воде, који су дефинисали на основу параметра η - односа дужине зоне промене температуре и растојања између бунара [47].

Lee (2010) је спровео параметарску анализу 10-годишњег рада континуалног система ГТП применом 3Д нумеричког модела, узимајући у обзир и топлотне губитке кроз непропусне слојеве изнад и испод подземног водоносног слоја. У циљу ефикасног рада система, тј. малих варијација термичке енергије која се црпи, дао је предлог да промене температуре повратне воде и запреминског протока црно-повратне воде буду мале [48]. Истовремено је дошао до закључка да дебљина подземног водоносног слоја и анизотропија коефицијента пропусности имају незнатан утицај на учинак система.

Nam и Ooka (2010) су такође спровели 3Д нумеричку симулацију струјања подземне воде и простирања топлоте у подземном водоносном слоју при раду система ГТП, чије резултате су верификовали мерењима на реалном постројењу у оба радна режима. Резултати су потврдили да се при пројектовању система ГТП мора узети у обзир смер и брзина струјања подземне воде, као и положај бунара [49].

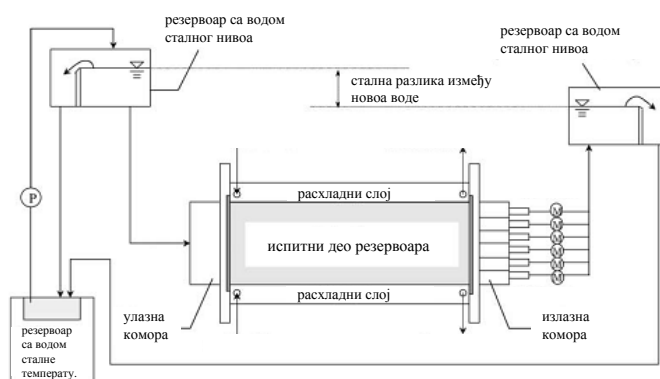
Lo Russo и Taddia (2010) су експерименталним путем, вршећи мерења температуре у пиезометру 35m удаљеном од повратног бунара, пратили ширење зоне повратне воде током једне сезоне хлађења реалног постројења ГТП. На основу израчунате брзине кретања зоне топле повратне воде, као и на основу експериментално потврђеног податка да подземна вода и зона повратне воде струје хоризонтално, закључили су да конвективни механизам простирања топлоте преовлађује у односу на дисперзију [50]. Lo Russo и сар. су у наредном периоду вршили нумеричко моделирање рада овог постројења. 2012. године су објавили рад у коме су спровели анализу утицаја параметара подземног водоносног слоја на величину формиране зоне топле повратне воде и дошли су до закључка да највећи утицај имају вредности топлотног капацитета флуида и чврсте фазе, као и хидродинамички параметри - коефицијент филтрације и хидраулички градијент [51]. У раду објављеном 2014. године дошли су до

закључка да нумерички модели у којима се, уместо вредности осредњених по сату, користе осредњене дневне или месечне вредности протока црпне, тј. повратне, воде и температуре повратне воде дају задовољавајуће резултате, што није случај када су улазни параметри модела осредњене сезонске вредност ових параметара [52].

Да би се резултатима нумеричког модела описао рад реалног постројења, у до сада наведеним радовима, аутори су као улазне параметре модела користили термофизичке и хидрогеолошке карактеристике флуида и чврстих честица у подземном водоносном слоју које су измерили на терену или одредили експерименталним путем у лабораторијским условима. Међутим, сама провера поузданости нумеричких модела мерењима унутар реалног подземног водоносног слоја није честа, јер их је веома тешко спровести. Због тога многи аутори проверу поузданости својих модела врше мерењима на лабораторијским експерименталним инсталацијама, што је случај у даље неведеним радовима.

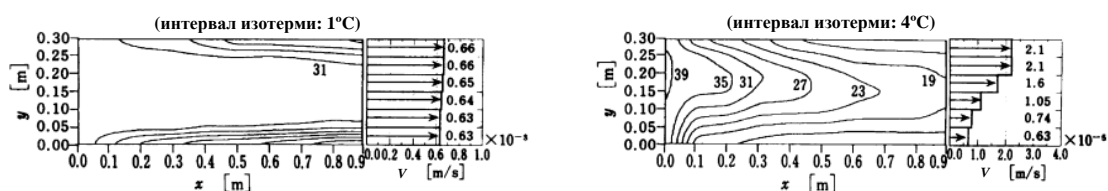
Saeid и сар. (2014) су путем **лабораторијских експеримената и нумеричког моделирања** анализирали утицај густине и вискозности флуида на процес простирања топлоте у засићеној порозној средини окруженој непропусним слојевима са обе стране. Одређујући положај зоне промене температуре за различите брзине струјања убризгаване хладне, односно топле, воде, као и за вертикалан и хоризонталан правац убризгавања, дошли су до закључка да се зависност анализираних параметара од температуре, као и присуство термичке дисперзије, мора узети у обзир при пројектовању геотермалних система са бунарима постављеним на великим дубинама [53]. Saeid и сар. (2015) су такође предложили нумерички модел помоћу кога би се предвидео радни век оваквих система, при чему су анализирали утицај порозности водоносног слоја, протока црпно/повратне воде, растојања између бунара, температуре термички ненарушене подземне воде и температуре повратне воде [54].

Nagano и сар. (2002) су, коришћењем резултата нумеричког модела и експерименталних резултата, добијених на 2Д инсталацији (Слика 12.), истраживали утицај природне конвекције на принудно хоризонтално струјање воде у засићеној порозној средини са вертикалном температурском разликом [55].



Слика 12. Шема експерименталне инсталације

Током више серија извођења експеримената, при различитим радним параметрима, вршено је убризгавања топле воде у подземни водоносни слој, који је био хлађен са горње и доње стране. На слици 13 дат је приказ изотерми и профила протока на излазу из испитног резервоара, а по успостављању устаљеног стања, за две серије извођења експеримената.



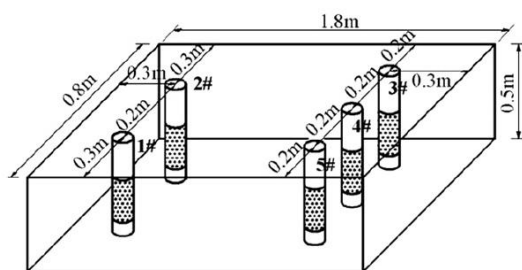
- а) експеримент бр. 1 ($V = 0,645 \text{ mm/s}$, $\vartheta_f = 42,6^\circ\text{C}$, $\vartheta_{n.sl} = 9,8^\circ\text{C}$, $q^* = 1,05$)
- б) експеримент бр. 12 ($V = 0,0137 \text{ mm/s}$, $\vartheta_f = 39,5^\circ\text{C}$, $\vartheta_{n.sl} = 6,5^\circ\text{C}$, $q^* = 3,28$)

Слика 13. Устаљени профили изотерми и брзине на излазу из испитног резервоара [55]

Аутори су, у циљу процене степена утицаја природне конвекције, дефинисали величину q^* , као однос максималног и минималног измереног протока на излазу из испитног резервоара. На основу профила изотерми, симетричног у односу на централну хоризонталну осу испитног резервоара, када се утицај природне конвекције може занемарити (Слика 13.а), односно асиметричног, када природна конвекција има утицаја на струјање воде (Слика 13.б), усвојили су граничну вредност q^* . Дошли су до закључка да при вредностима $q^* > 1,5$ природна

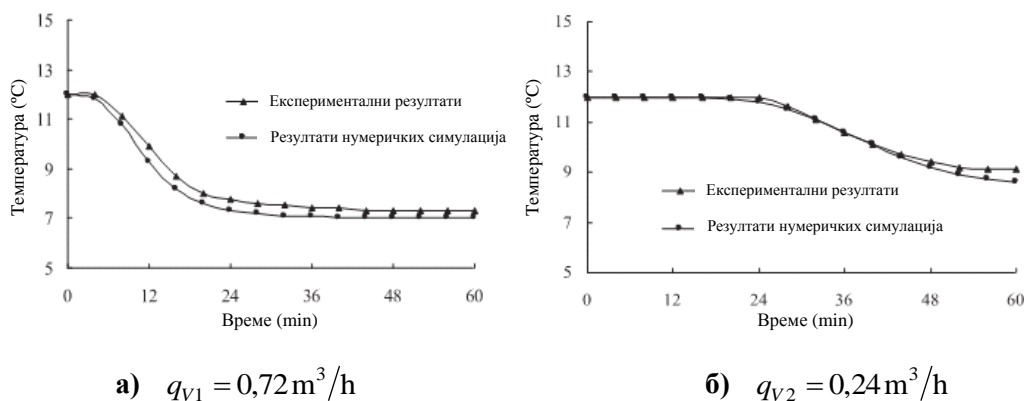
конвекција има утицај на хоризонтално струјање воде у подземном водоносном слоју, као засићеној порозној средини.

Рад система ГТП са већим бројем црпних и повратних бунара проучавали су Zhou, Gao и сар. (2013, 2015). Формирали су нумерички модел чије резултате су експериментално потврдили. Положај 2 црпна и 3 повратна бунара, унутар лабораторијског модела подземног водоносног слоја, приказан је на слици 14.



Слика 14. Шематски приказ положаја групе бунара [56]

Анализиран је зимски радни период система ГТП, при почетној температури подземног водоносног слоја од 12°C и температурској разлици између исцрпљене и убризгане воде 5°C . Време извођења експеримента износило је 1h. Промена средње вредности температуре црпне воде, за две вредности анализираног укупног протока воде који се црпи из аквифера, односно убрузгава у њега, приказана је на слици 15.



Слика 15. Промена средње температуре црпне воде током времена [56]

Са слике се види да након одређеног времена температура црпне воде почиње да опада, што значи да је зона промене температуре доспела до црпног бунара и да долази до продора хладне повратне воде. Такође се може уочити да се са порастом укупног протока црпне/повратне воде временски период протекао од почетка рада до појаве термичког продора скраћује. На основу спроведене анализе, аутори су дошли до закључка да при пројектовању отворених система ГТП са већим бројем црпних и повратних бунара треба узимати у обзир њихов међусобни положај, како зона промене температуре не би доспела до црпног бунара, [56], као и правац и брзину струјања подземне воде у односу на њих [57].

1.4. Предмет рада докторске дисертације

Анализом досадашњих истраживања чија је тема била предвиђање и понашање поља брзина и температура које се формирају у подземном водоносном слоју, при раду геотермалних топлотних пумпи, може се закључити да су она првенствено била усмерена на одређивање времена продора зоне промене температуре до црпног бунара. У новије време, истраживања су усмерена ка термичко-хидрауличком нумеричком моделирању и анализи параметара који утичу на формирање хладне, односно топле, зоне повратне воде у аквиферу. Спроведеним истраживањима установљено је да утицај формираних температурних зона у подземном водоносном слоју на учинак рада целокупног система ГТП, расте са смањивањем растојања између бунара, порастом коефицијента филтрације порозне средине, као и са порастом протока подземне воде у црпног/повратном бунару. Истраживања показују да при пројектовању система ГТП, а у случају већег броја црпних и повратних бунара, треба узимати у обзир њихов међусобни положај.

На основу прегледа досадашњих истраживања такође се може закључити да, када је у питању нумеричко моделирање простирања топлоте у подземном водоносном слоју, до сада није спроведена свеобухватна упоредна анализа оба радна режима отвореног система ГТП - континуалног и цикличног, већ су вршене само независне анализе учинка ових радних режима. При томе, све анализе спроведене су уз увођење бројних претпоставки и поједностављења. У већини

развијених ЦФД модела није узет у обзир утицај брзине струјања подземних вода, а домен модела је сматран хомогеним и изотропним. Такође, и у случају нумеричког моделирања, као и у случају спровођења експерименталних истраживања у циљу провере поузданости модела, често је занемаривана тродимензионалност овог проблема.

Предмет рада ове докторске дисертације јесте анализа понашања подземног водоносног слоја и формирање 3Д нумеричко-математичког модела за предвиђање и праћење промене температурног поља које се јавља у подземном водоносном слоју, током његове једногодишње експлоатације системом ГТП, и то за случај континуалног и цикличног рада грејно-расхладног система.

Анализиран је утицај следећих важних чиниоца на промене температурног поља подземног водоносног слоја:

- растојања између бунара,
- могућности да се повратни бунар налази узводно од црпног бунара,
- тродимензионалности развоја температурног поља,
- слојевите хетерогености подземног водоносног слоја, односно различитих хидрогеолошких и термофизичких особина слојева који га чине,
- брзине струјања подземних вода.

Последња три чиниоца се у већини нумеричких модела занемарују, док утицај преосталих обухваћених дејстава на температурно поље до сада није свеобухватно и систематично проучаван.

Верификација тачности предвиђања нумеричког модела извршена је помоћу доступних експерименталних података других аутора, као и сопствених резултата мерења, добијених на експерименталној инсталацији спољашњег круга система ГТП. У овој докторској дисертацији анализиран је затворен подземни водоносни слој¹ као термички резервоар ГТП. Да би лабораторијски модел аквифера по својој структури одговарао грађи реалног стенског масива, који је предмет анализе, претпостављено је да се водоносни слој састоји из два хомогена

¹ Под затвореним подземним водоносним слојем подразумева се потпуно засићен пропусни слој, који се налази између релативно непропусних граничних слојева. У њему се подземна вода налази под притиском који је виши од атмосферског.

водопрпусна слоја, различитог гранулометријског и минералног састава. На тај начин анализом је обухваћена слојевита хетерогеност подземног водоносног слоја. Уједно је претпостављено да је аквифер ограничен са горње и доње стране непрпусним слојевима. У сагласности са овим формирана је експериментална инсталација, на којој су добијени сопствени мерни подаци.

У складу са постављеним задатком, а ради стицања општег увида у ову проблематику, у 1. поглављу ове дисертације дат је опис отвореног система ГТП и принципа његовог рада. Детаљно је анализиран утицај рада отвореног система ГТП са паром спрегнутих бунара на стварање температурних зона у подземном водоносном слоју. На крају поглавља је дат преглед досадашњих истраживања која су се бавила праћењем ових температурних промена.

С обзиром да се анализа струјања подземне воде кроз водоносни слој може поистоветити са анализом једнофазног струјања флуида кроз засићену порозну средину са непокретном чврстом фазом, у 2. поглављу су дате теоријске основе струјања флуида кроз засићену порозну средину. Најпре су дефинисана основна својства порозне средине, а потом је дат преглед основних законитости из области струјања флуида и преношења топлоте који у њој важе. На крају поглавља приказана је графоаналитичка метода анализе струјања у подземном водоносном слоју током рада отвореног система ГТП, заснована на примени комплексних аналитичких функција и конструисању струјне мреже.

Треће поглавље посвећено је опису извршеног сопственог експерименталног одређивања динамичког температурног поља у подземном водоносном слоју током његове једногодишње експлоатације системом ГТП. С обзиром да су мерења обављена на лабораторијском моделу подземног водоносног слоја, на почетку поглавља описан је поступак одређивања експерименталних радних параметара модела применом теорије сличности, како би мерни резултати могли бити примењени при анализи промена температурног поље унутар реалног аквифера. Експеримент је изведен у три серије, како би била обухваћена анализа континуалног радног режима, при низводном и узводном положају повратног бунара, као и анализа цикличног радног режима система ГТП. Све три серије мерења изведене су за четири различита растојања између црпног и повратног бунара. Мерењима су биле добијене две врсте података. Прва,

која је дефинисала независне променљиве - експерименталне радне параметре, односно улазне параметре нумеричког модела, а обухватала је вредности температуре и запреминског протока термички ненарушеног тока воде, затим температуре и запреминског протока воде која се црпи, односно убацује у водоносни слој, као и својства порозне средине - порозност и коефицијент филтрације. Друга врста мерених величина биле су температуре које се, при претходно дефинисаним и измереним условима, успостављају у подземном водоносном слоју током његове једногодишње експлоатације. Поред описа инсталације, поступка мерења и обраде добијених података, у овом поглављу дат је приказ и неких од репрезентативних резултата мерења.

Формирање нумеричко-математичког модела и нумеричко решавање проблема простирања топлоте у подземном водоносном слоју, при раду отвореног система ГТП, приказано је у 4. поглављу. За нумеричко решавање система једначина, које чине основне билансне макроскопске једначине за случај неустаљеног струјања нестишљивог флуида кроз хомогену и изотропну засићену порозну средину, коришћен је софтвер отвореног програмског кода OpenFOAM. Новоформираним моделом обухваћен је утицај чинилаца на температурно поље у аквиферу који се у постојећим нумеричким моделима најчешће не узимају у обзир - тродимензионалност развоја температурног поља, брзина струјања подземних вода, као и утицај слојевите хетерогености водоносног слоја. Истовремено, нумеричким моделом обухваћен је и утицај растојања између бунара, као и положај повратног бунара у односу на црпи бунар - низводан или узводан. Доменом интеграције обухваћен је физички модел подземног водоносног слоја, односно спољашњег круга отвореног система ГТП, који је истоветан са реалном ситуацијом оствареном при извођењу експеримената. Поред геометријских, и сви радни параметри нумеричког модела, помоћу којих су дефинисани његови почетни и гранични услови, одговарају параметрима лабораторијског модела на коме су извршена мерења.

Пето поглавље посвећено је провери поузданости нумеричког модела, тј. његове способности тачног предвиђања промена брзинског и температурног поља воде у аквиферу. Провера је спроведена поређењем резултата добијених нумеричким симулацијама са сопственим експерименталним резултатима, као и

са доступним експерименталним резултатима других аутора. У случају поређења са сопственим експерименталним резултатима, поређење је извршено за све три групе спроведених експеримената, тј. за случајеве сва три анализирана режима рада отвореног система геотермалне топлотне пумпе. У случају поређења са експерименталним резултатима других аутора, уз задржавање непромењеног система моделираних једначина који дефинишу неустаљено струјање нестишљивог флуида кроз хомогену и изотропну засићену порозну средину, нумерички модел је коригован у делу граничних услова, тако да буде усклађен за симулацију рада система геотермалне топлотне пумпе са 2 црпна и 3 повратна бунара, као и за случај одређивања дводимензионалног устаљеног температурног поља при принудном хоризонталном струјању воде у засићеној порозној средини са вертикалном температурском разликом. Из упоредног приказа и анализе експерименталних и резултата добијених нумеричком симулацијом, уочен је висок степен њиховог слагања, чиме је потврђена поузданост и применљивост нумеричког модела.

У 6. поглављу дисертације дата су закључна разматрања са критичким освртом на остварене резултате спроведених истраживања. Истакнуто је да много значајнији утицај на поузданост предвиђања нумеричког модела има познавање тачних вредности термофизичких карактеристика чврсте фазе подземног водоносног слоја, него уведене ограничавајуће претпоставке под којима је нумерички модел изведен. Дате су перспективе и смернице за даља истраживања из области понашања аквифера као сезонског термички резервоара топлотне пумпе, са посебним освртом на могућности даљег побољшања нумеричког модела, узимањем у обзир додатних утицајних чиниоца. Истакнут је научни допринос дисертације и примењивост резултата истраживања у реалним условима.

2. Теоријске основе простирања топлоте у подземном водоносном слоју као засићеној порозној средини

Подземни водоносни слој, као што је већ наведено, дефинише се као слој пропусних стена засићених водом [16]. Иако постоји више типова водоносних формација, у овој дисертацији биће анализирани класичне седиментне стене, које су сачињене од чврстих минералних честица, које изграђују скелет стене, и међупростора - пора између чврстих честица, различитих величина [58], које су у потпуности испуњене водом у течном агрегатном стању. С обзиром на опште прихваћену дефиницију порозне средине, да је то чврст материјал са међусобно повезаним празнинама - порама [59][60], следи да анализа струјања подземне воде кроз водоносни слој може бити поистовећена са анализом једнофазног струјања флуида кроз засићену порозну средину, са непокретном чврстом фазом. Управо због тога су у 2. поглављу дате теоријске основе струјања флуида кроз засићену порозну средину. Најпре су дефинисана основна својства порозне средине, а потом је дат преглед основних законитости из области струјања флуида и преношења топлоте који у њој важе. На крају поглавља приказана је графоаналитичка метода анализе струјања у подземном водоносном слоју током рада отвореног система ГТП, која је заснована на примени комплексних аналитичких функција и конструисању мреже флуидних струјница. Приказана је струјна мрежа у случају хоризонталног струјања подземне воде при узводном и низводном положају повратног бунара у односу на црпни бунар.

2.1. Својства порозне средине

Описивање струјања флуида кроз засићену порозну средину, као и процеса простирања топлоте у њој, могуће је на микроскопском нивоу, применом статистичког приступа, и на макроскопском нивоу, применом методе хомогенизације. Коришћење микроскопског приступа је веома ретко због немогућности тачног дефинисања геометрије порозне средине. Различите карактеристичне димензије пора и чврстих честица са једне стране, и домена у коме се посматра струјање са друге стране, доводе до промене облика конститутивних закона, због чега се са микроскопског нивоа врши прелазак на макроскопски ниво. У случају макроскопског приступа порозни материјал се посматра као средина еквивалентна хомогеном простору, погодном за примену механике континуума. Елементарна запремина таквог хомогеног простора - репрезентативна елементарна запремина (РЕЗ) порозне средине, садржи обе фазе, и чврсту фазу - минералне честице и течну фазу - флуид који испуњава поре. У њој владају ефективне величине, добијене запреминским осредњавањем вредности локалних величина на микронивоу управо по РЕЗ запремини.

2.1.1. Порозност. Репрезентативна елементарна запремина

Укупна (запреминска, апсолутна) порозност (ϕ) дефинише се као однос запремине свих пора (V_p) и укупне запремине посматраног узорка порозне средине (V_{uk}):

$$\phi = \frac{V_p}{V_{uk}} . \quad (2.1)$$

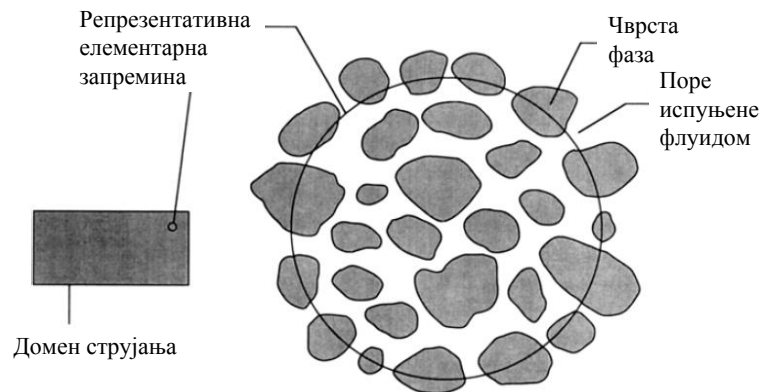
При проучавању струјања флуида кроз порозну средину од значаја је стварна (ефективна) порозност. Она представља однос између запремине међусобно повезаних пора и укупне запремине посматране порозне средине.

Површинска порозност (ϕ_A) дефинише се као однос површине „светлог“ попречног пресека порозног материјала, односно укупне површине пора у било ком пресеку порозног материјала управном на правац струјања (A_p), и површине целокупног попречног пресека порозног материјала (A_{uk}):

$$\phi_A = \frac{A_p}{A_{uk}} \quad (2.2)$$

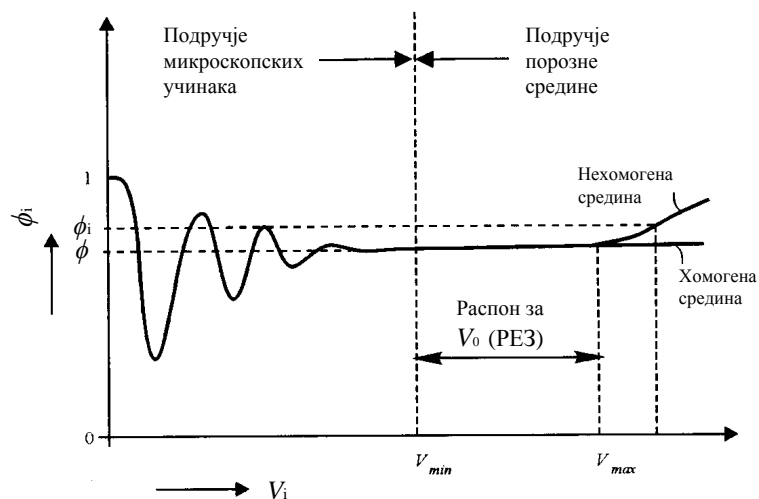
У случају хомогене и изотропне порозне средине усвајају се једнаке вредности површинске и запреминске порозности [59][60].

При одређивању порозности укупна запремина посматраног узорка порозног материјала представља његову елементарну запремину - репрезентативну елементарну запремину порозног материјала, чији приказ је дат на слици 16.



Слика 16. Приказ репрезентативне елементарне запремине порозне средине [60]

Дефиниција репрезентативне елементарне запремине, на примеру порозности, приказана је на слици 17. Запремина V_0 , тачније њен опсег $V_{\min} < V_0 < V_{\max}$, у коме су промене порозност ϕ_1 незнатне, представља репрезентативну елементарну запремину порозне средине [61].



Слика 17. Дефиниција порозности и репрезентативне елементарне запремине порозне средине [61]

2.2. Једначине одржања за засићену порозну средину

Процеси преноса на макро нивоу за засићену порозну средину дефинишу се једначинама одржања дефинисаним у „материјалној тачки“ једне од фаза, а потом запремински осредњеним по репрезентативној елементарној запремини порозне средине. С обзиром да је чврста фаза непокретна, једначине одржања чине три једначине: макроскопска једначина одржања масе и макроскопска једначина одржања количине кретања нестишљиве течне фазе унутар РЕЗ, те макроскопска једначина одржања енергије, која се добија спрезањем две енергијске једначине - прве, примењене на чврсту фазу унутар РЕЗ, и друге, која се односи на течну фазу унутар РЕЗ порозне средине.

2.2.1. Запреминско осредњавање физичких величина по РЕЗ

Запреминским осредњавањем локалне величине ψ - карактеристике флуида која влада у једној тачки течне (флуидне) фазе, односно карактеристике чврстих честица која влада у једној тачки чврсте фазе, по запремини те фазе, добија се унутрашње осредњена вредност дате величине, које одговарају свим тачкама посматране фазе:

$$\langle \psi \rangle^f \equiv \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \psi dV , \quad \text{тј.} \quad \langle \psi \rangle^s = \frac{1}{V_s} \int_{V_s} \psi dV . \quad (2.3)$$

Запреминско осредњавање величине ψ по репрезентативној елементарној запремини порозне средине V_0 , коју чине и чврста и флуидна фаза ($V_0 = V_f + V_s$), врши се применом израза [62][63]:

- за променљиву у флуидној фази:
$$\langle \psi \rangle \equiv \frac{1}{V_0} \int_{V_f} \psi dV = \phi \langle \psi \rangle^f , \quad (2.4)$$

- за променљиву у чврстој фази:
$$\langle \psi \rangle \equiv \frac{1}{V_0} \int_{V_s} \psi dV = (1 - \phi) \langle \psi \rangle^s , \quad (2.5)$$

на основу којих се добијају осредњене вредности које одговарају свим тачкама РЕЗ или свим тачкама посматране фазе унутар РЕЗ хомогене порозне средине.

2.2.2. Једначина континуитета за засићену порозну средину

Диференцијална једначина одржања масе - једначина континуитета, ако у контролној запремини постоје извори или понори флуида, гласи:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = S . \quad (2.6)$$

Њеним запреминским осредњавањем по РЕЗ, а с обзиром на везу између осредњене стварне брзине струјања флуида $\langle \mathbf{v} \rangle^f$ и фиктивне брзина струјања флуида \mathbf{V} , која се одређује осредњавањем по површини целокупног попречног пресека РЕЗ порозног материјала $A_0 = A_p + A_s$:

$$\langle \mathbf{v} \rangle^f = \frac{1}{A_p} \int_{A_p} \mathbf{v} dA , \quad \mathbf{V} = \frac{1}{A_0} \int_{A_p} \mathbf{v} dA = \phi \langle \mathbf{v} \rangle^f , \quad (2.7)$$

добија се макроскопски облик једначине континуитета за флуид који струји кроз порозну средину [38][18]:

$$\frac{\partial(\phi \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \phi \langle \mathbf{v} \rangle^f) = S_{m,f} \quad , \quad \text{односно} \quad \frac{\partial(\phi \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{V}) = S_{m,f} \quad . \quad (2.8)$$

При струјању нестишљивог флуида једначина континуитета има облик:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = S_{V,f} \quad . \quad (2.9)$$

2.2.3. Једначина одржања количине кретања за засићену порозну средину

Запреминским осредњавањем по РЕЗ Навије-Стоксове диференцијалне једначине одржања количине кретања за нестишљив флуид:

$$\rho_f \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{v}) \right] = \rho_f \mathbf{g} - \nabla p + \mu_f \nabla^2 \mathbf{v} \quad , \quad (2.10)$$

слиди општа макроскопска једначина одржања количине кретања при струјању флуида кроз порозну средину²:

$$\begin{aligned} \rho_f \left[\frac{\partial(\phi \langle \mathbf{v} \rangle^f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \langle \mathbf{v} \rangle^f \langle \mathbf{v} \rangle^f) + \underbrace{\nabla \cdot (\phi \langle \tilde{\mathbf{v}} \tilde{\mathbf{v}} \rangle^f)}_{\approx 0} \right] &= \quad , \quad (2.11) \\ &= \phi \rho_f \mathbf{g} - \nabla(\phi \langle p \rangle^f) + \mu_f \nabla^2(\phi \langle \mathbf{v} \rangle^f) + R \end{aligned}$$

у којој се трећи члан са л.с.ј., који представља хидродинамичку дисперзију услед локалних просторних флукуација брзине, занемарује [64].

² Поред претходно наведених дефиниција, коришћена правила запреминског осредњавања локалне променљиве $\psi = \langle \psi \rangle + \tilde{\psi}$ при извођењу једначина одржања су:

1. $\langle \psi_1 \cdot \psi_2 \rangle = \langle \psi_1 \rangle \langle \psi_2 \rangle + \langle \tilde{\psi}_1 \cdot \tilde{\psi}_2 \rangle$
2. $\langle \nabla \psi \rangle = \nabla \langle \psi \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_k} \psi \mathbf{n} dA$
3. $\langle \nabla \cdot \psi \rangle = \nabla \cdot \langle \psi \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_k} \psi \cdot \mathbf{n} dA$

Заменом последњег члана са д.с.ј., који представља укупну силу отпора по јединици запремине порозног материјала услед присуства чврсте фазе, тј. физички утицај порозности средине кроз коју се одвија струјање, изразом који су дефинисали Hsu и Cheng (1990) [64]:

$$R = -\frac{1}{V} \int_{A_k} p \mathbf{n} dA + \frac{\mu}{V} \int_{A_k} (\nabla \mathbf{v}) \mathbf{n} dA = -\frac{\phi \mu_f}{k} \mathbf{V} - \rho_f \frac{\phi c_F}{\sqrt{k}} |\mathbf{V}| \mathbf{V} \quad , \quad (2.12)$$

слиеди коначан облик макроскопске једначине одржања количине кретања за нестишљив флуид који струји кроз засићену порозну средину [60][62][64][65]:

$$\rho_f \left[\frac{1}{\phi} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{V} \mathbf{V}}{\phi} \right) \right] = \rho_f \mathbf{g} - \nabla \langle p \rangle^f - \frac{\mu_f}{k} \mathbf{V} + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \mathbf{V} - \rho_f \frac{c_F}{\sqrt{k}} |\mathbf{V}| \mathbf{V} \quad . \quad (2.13)$$

Закон о промени количине кретања дефинисан једначином (2.13) важи и при турбулентном струјању кроз порозну средину, с обзиром да је у општем случају ефективном вискозношћу обухваћена и турбулентна вискозност. Гранична вредност Рејнолдсовог броја, као бездимензионалног критеријума за одређивање режима струјања, при којој важи на овај начин формулисан закон износи $Re \leq 150 - 200$ [66].

При устаљеном струјању флуида кроз порозну средину, када се занемарује први члан са л.с.ј., и уз занемаривање другог члан са л.с.ј. (2.13), који представља макроскопске инерцијалне силе, а који је занемарљив у поређењу са члановима са д.с.ј. [59][60][62], слиеди израз:

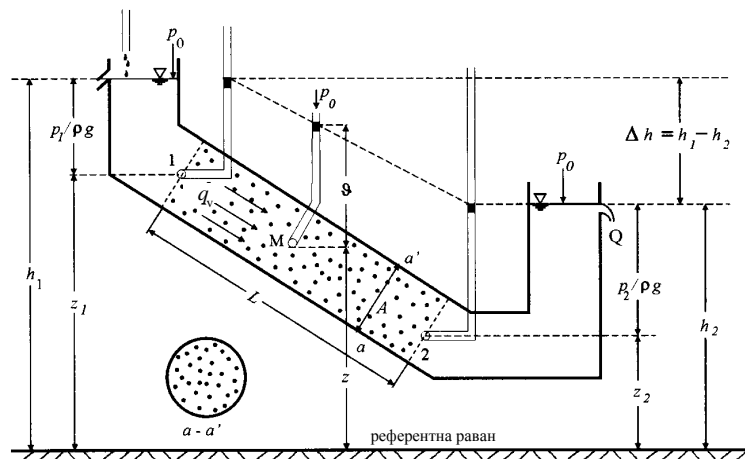
$$\nabla p = \rho_f \mathbf{g} - \frac{\mu_f}{k} \mathbf{V} + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \mathbf{V} - \rho_f \frac{c_F}{\sqrt{k}} |\mathbf{V}| \mathbf{V} \quad , \quad (2.14)$$

у коме је, ради једноставнијег писања и прегледности, изостављена угласта заграда као ознака запремински осредњеног притиска флуида: $\langle p \rangle^f \sim p$.

Једначина (2.14) у литератури је позната под називом Brinkman-Forchheimer-Дарсијева једначина и представља уопштену Дарсијеву једначину, као један од облика макроскопске једначине количине кретања при струјању флуида кроз порозну средину.

Занемаривањем Brinkman-овог трећег члана са д.с.ј. (2.14), којим су обухваћене вискозне силе унутар потпуно развијеног хидродинамичког граничног слоја непосредно уз граничну површ чврстих честица порозног материјала, као и Forchheimer-овог четвртог члана са д.с.ј, којим се узима у обзир утицај инерцијалних сила на пад притиска при струјање флуида кроз порозну средину, те увођењем релације између пиезометарске висине³, као висине нивоа воде изнад референтне равни (Слика 18.), и притиска:

$$h = \frac{P - P_0}{\rho_f g} + z \quad (2.15)$$



Слика 18. Струјање кроз нагнуту порозну средину [15][61][67]

$$(V = q_{V,f} / A = K \cdot I, I = -(h_2 - h_1) / l = -\Delta h / l, I = -\text{grad } h)$$

³ Брзина струјања подземне воде кроз аквифер је веома мала, због чега се кинетичка енергија занемарује, па пиезометарска висина одговара укупној висини потенцијала, односно хидрауличком потенцијалу. Разлика пиезометарских висина у смеру струјања последица је губитка енергије (по јединици тежине) услед трења при струјању флуида кроз уске, вијугаве и завојите путање унутар порозног материјала, а уједно представља покретачки потенцијал, с обзиром да се струјање одвија од места са вишом пиезометарском висином до места са нижом. У општем случају пиезометарска висина представља скаларно поље $h = h(x, y, z, t)$.

долази се до израза познатог под називом Дарсијев закон:

$$\mathbf{V} = -\overline{K} \cdot \text{grad } h \quad . \quad (2.16)$$

Једначина (2.16) представља општи облик Дарсијевог закона. У њој, поред претходно уведене фиктивне брзина струјања флуида \mathbf{V} , која се у литератури назива привидна макроскопска брзина флуида, „суперфицијелна“ брзина или брзина процеђивања, тј. филтрације, али је најпознатија под називом Дарсијева брзина, и хидрауличког градијента $\mathbf{I} = -\text{grad } h$, као губитка пиезометарске висине остварене на дужини тока воде кроз порозну средину, фигурише и хидраулична проводљивост, која се описује једначином:

$$\overline{K} = \overline{k} \frac{\rho_f g}{\mu_f} \quad . \quad (2.17)$$

Хидраулична проводљивост K [m/s] (енг. *hydraulic conductivity*), који се у литератури назива и коефицијент филтрације или коефицијент водопрпусности, у случају анизотропне порозне средине је симетричан тензор другог реда, док је за хомогену изотропну порозну средину стална скаларна величина. То је параметар који изражава „лакоћу“ са којом флуид струји кроз порозну средину [15], односно описује отпор струјању флуида кроз неку порозну средину. Зависи и од физичких својстава порозне средине: величине и облика чврстих честица, односно пора, коефицијента вијугавости, специфичне површине, порозности, као и од термофизичких својстава флуида који струји кроз порозну средину [15].

Коефицијент пропусности k [m²] (енг. *specific (intrinsic) permeability*), који се у литератури назива још и специфична или унутрашња пермеабилност, представља својство порозног материјала, које зависи само од његове геометрије, с обзиром да је чланом $\rho_f / \mu_f = 1/\nu_f$ обухваћен утицај карактеристика флуида.

Дарсијев закон дефинише пад притиска при струјању флуида кроз порозну средину, као последицу рада вискозних сила трења - силе унутрашњег трења течности која струји и силе трења течности о зидове чврсте фазе унутар порозног слоја. Он важи само при малим брзинама струјања флуида, када су управо вискозне силе трења доминантне и када је режим струјања флуида кроз порозну

средину изразито ламинаран. У том случају вредност Рејнолдсовог броја задовољава неједнакост [62][68][63]:

$$\text{Re} = \frac{V d_s}{\nu_f} < 1 \quad , \quad (2.18)$$

у којој карактеристичну дужину представља просечан пречник зрна, односно честице, чврсте фазе порозне средине d_s . Као његову најчешћу бројну вредност усваја се пречник ефективног зрна d_{10} - пречник зрна у односу на који узорак порозне средине садржи 10% ситнијих и 90% крупнијих фракција.

2.2.4. Једначина одржања енергије за засићену порозну средину

Запреминским осредњавањем по РЕЗ опште диференцијалне једначине одржања енергије при струјању флуида, која важи при малој брзини струјања флуида и незнатној вискозној дисипацији енергије [69][70], узимајући у обзир постојање извора топлоте:

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \nabla \cdot (\mathbf{v} T) = \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T) + S \quad , \quad (2.19)$$

слиди диференцијална макроскопска једначина одржања енергије при ламинарном струјању течне фазе кроз засићену порозну средину [64][65][71]:

$$\begin{aligned} & \rho_f c_{p,f} \left[\frac{\partial \phi \langle T \rangle^f}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \langle \mathbf{v} \rangle^f \langle T \rangle^f) \right] = \\ & = \nabla \cdot \left[\left(\phi \lambda_f \right) \bar{\bar{I}} \nabla \langle T \rangle^f + \underbrace{\frac{\lambda_f}{V} \int_{A_k} T_f \mathbf{n}_k dA}_{\approx 0} + \underbrace{\bar{\bar{\lambda}}_d \nabla \langle T \rangle^f}_{-\phi_f c_{p,f} \langle \tilde{v} \tilde{T} \rangle^f} \right] + \underbrace{a_v h_{fs} (\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f)}_{\frac{1}{V} \int_{A_k} \lambda_f \nabla T_f \mathbf{n}_k dA} + \phi S_{H,f} \end{aligned} \quad , \quad (2.20)$$

где је претпоследњим чланом са д.с.ј. обухваћен процес прелажења топлоте између фаза, које су у општем случају различитих температура, док су наведени

коэффициенти: h_{fs} - коэффициент прелажења топлоте између фаза, $a_v = A_k/V_0$ - специфична (унутрашња) површина порозне средине, при чему A_k представља унутрашњу површину порозне средине, тачније површину контакта, додирну површину између фаза, тј. укупну оквашену површину чврсте фазе, не рачунајући површину граничних зидова.

Запреминским осредњавањем по РЕЗ порозне средине Фуријеове опште парцијалне диференцијалне једначине другог реда, која дефинише распоред температуре у чврстом телу, узимајући у обзир постојање извора топлоте [72]:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T) + S \quad , \quad (2.21)$$

одређује се диференцијална макроскопска једначина провођења топлоте кроз чврсту фазу порозне средине [64][65][71]:

$$\begin{aligned} (1-\phi)\rho_s c_s \frac{\partial \langle T \rangle^s}{\partial t} = \\ = \nabla \cdot \left[\left[(1-\phi)\lambda_s \right] \bar{I} \nabla \langle T \rangle^s - \underbrace{\frac{\lambda_s}{V} \int_{A_k} T_s n_k dA}_{\approx 0} \right] + \underbrace{a_v h_{fs} (\langle T \rangle^f - \langle T \rangle^s)}_{\frac{1}{V} \int_{A_k} \lambda_s \nabla T_s n_k dA} + (1-\phi)S_{H,s} \end{aligned} \quad . \quad (2.22)$$

У једначинама (2.20) и (2.22) занемарен је други члан са д.с.ј., који представља топлотни проток услед локалне кондукције у обе фазе порозног слоја [65]. Спрезањем ове две једначине у једну, уз претпоставку локалне термичке равнотеже у порозном материјалу - $\langle T \rangle^f = \langle T \rangle^s = \langle T \rangle$, следи коначан облик макроскопске једначине одржања енергије за zasiћену порозну средину:

$$\begin{aligned} \left[\phi \rho_f c_{p,f} + (1-\phi)\rho_s c_s \right] \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \nabla \cdot (\mathbf{v}_f \langle T \rangle) = \\ = \nabla \cdot \left[\phi \lambda_f + (1-\phi)\lambda_s \right] \bar{I} + \bar{\lambda}_d \nabla \langle T \rangle + \phi S_{H,f} + (1-\phi)S_{H,s} \end{aligned} \quad , \quad (2.23)$$

односно:

$$(\rho c)_{\text{eff}} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \nabla \cdot (\mathbf{V} \langle T \rangle) = \nabla \cdot (\overline{\lambda_{\text{eff}}} \nabla \langle T \rangle) + S_H \quad (2.24)$$

У случају устаљеног струјања течне фазе макроскопска једначина одржања енергије за засићену порозну средину гласи:

$$(\rho c)_{\text{eff}} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \mathbf{V} \cdot \nabla \langle T \rangle = \nabla \cdot (\overline{\lambda_{\text{eff}}} \nabla \langle T \rangle) + S_H \quad (2.25)$$

Поједини чланови у изразу (2.24), тј. изразу (2.25), редом представљају:

$(\rho c)_{\text{eff}}$ - ефективни топлотни капацитет порозне средине:

$$(\rho c)_{\text{eff}} = \phi \rho_f c_{p,f} + (1 - \phi) \rho_s c_s \quad (2.26)$$

$\overline{\lambda_{\text{eff}}}$ - ефективну топлотну проводљивост порозне средине:

$$\overline{\lambda_{\text{eff}}} = \overline{\lambda_0} + \overline{\lambda_d} = [\phi \lambda_f + (1 - \phi) \lambda_s] \bar{I} + \overline{\lambda_d} \quad (2.27)$$

где $\overline{\lambda_0}$ представља стагнантну топлотну проводљивост порозне средине, а $\overline{\lambda_d}$ дисперзиону топлотну проводљивост флуида,

S_H - члан којим је обухваћено постојање запреминског извора, односно понора, топлоте унутар порозне средине:

$$S_H = \phi S_{H,f} + (1 - \phi) S_{H,s} \quad (2.28)$$

Једначина (2.24) представља конвективно-дифузиону, односно конвективно-кондуктивну једначину простирања топлоте кроз порозну средину. Њоме је, поред два основна механизма простирање топлоте у порозној средини: принудне конвекције, као последице размене топлоте при струјању флуида услед постојања хидрауличког градијента, и провођења топлоте кроз обе фазе, обухваћена и термичка дисперзија унутар флуида, изазвана узајамним деловањем флукуација брзине и температуре унутар пора.

2.3. Бездимензијски облици једначина одржања за засићену порозну средину

У циљу трансформације у бездимензијске облике једначина одржања масе, количине кретања и енергије, за случај струјања нестишљивог флуида кроз засићену порозну средину, уводе се бездимензијске физичке величине:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i}{l_c} \quad (x_i = x, y, z), \quad \hat{\mathbf{V}} = \frac{\mathbf{V}}{v_c}, \quad \hat{t} = \frac{t}{t_c}, \quad \hat{p} = \frac{p}{p_c}, \quad \hat{T} = \frac{T - T_0}{\Delta T_c}, \quad (2.29.a)$$

$$\hat{\nabla} = l_c \nabla = l_c \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right) = \frac{\partial}{\partial \hat{x}} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial \hat{y}} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial \hat{z}} \vec{k}, \quad \hat{\nabla}^2 = l_c^2 \nabla^2, \quad (2.29.b)$$

у којима су ради једноставнијег писања и прегледности изостављене угласте заграде, као ознаке запремински осредњених величина: $\langle p \rangle^f \sim p$, $\langle T \rangle \sim T$. У наведеним изразима са индексом „с“ означене су карактеристичне константне вредности. При томе, неке карактеристичне величине су зависне једне од других. Тако су карактеристична брзина v_c , време t_c и дужина l_c повезане зависношћу: $v_c = l_c / t_c$.

На основу уведених величина, бездимензијски облик једначине континуитета (2.9), при сталној вредности запреминског протока црпне/повратне воде, гласи:

$$\frac{v_c}{l_c} \hat{\nabla} \cdot \hat{\mathbf{V}} = S_{V,f}, \quad \text{односно} \quad \hat{\nabla} \cdot \hat{\mathbf{V}} = S_{V,f} t_c. \quad (2.30)$$

Дарсијев закон, написан у облику: $\mathbf{V} = -\frac{k}{\mu_f} (\nabla p - \rho_f g \vec{k})$, при сталним термофизичким карактеристикама флуида и у случају изотропне порозне средине, трансформише се у бездимензијски облик [73][74]:

$$\hat{\mathbf{V}} = -Ca \hat{\nabla} \hat{p} + Gr \vec{k}, \quad (2.31)$$

у коме се јављају бездимензијски параметри:

- капиларни број:
$$Ca = \frac{k p_c}{v_c l_c \mu_f}, \quad (2.32)$$

- гравитациони број:
$$Gr = \frac{k \rho_f g}{v_c \mu_f}. \quad (2.33)$$

Бездимензијски облик једначине одржања енергије за засићену изотропну порозну средину, при устаљеном струјању течне фазе (2.25), може се написати у облику:

$$\left(\frac{l_c^2}{\frac{\lambda_{\text{eff}}}{(\rho c)_{\text{eff}}} t_c} \right) \frac{\partial \langle \hat{T} \rangle}{\partial \hat{t}} = \hat{\nabla}^2 \langle \hat{T} \rangle - \left(\frac{V \cdot l_c}{\lambda_{\text{eff}}} \right) \hat{\nabla} \langle \hat{T} \rangle + \frac{S_H l_c^2}{\lambda_{\text{eff}} \Delta T_c}, \quad (2.34)$$

при чему је претпостављена стална вредност ефективне топлотне проводљивости порозне средине, која одговара вредности њене стагнантне топлотне проводљивости [75], као и стална вредност издашности топлотног извора. Након увођења бездимензијских параметара:

- Фуријеовог (Fourier) броја:
$$Fo = \frac{a_{\text{eff}} t_c}{l_c^2}, \quad (2.35)$$

- Пеклеовог (Péclet) броја:
$$Pe = Pr Re = \frac{V \cdot l_c}{a_f}, \quad (2.36)$$

у којима је са $a_{\text{eff}} = \lambda_{\text{eff}} / (\rho c)_{\text{eff}}$ означена топлотна дифузивност порозне средине, односно са $a_f = \lambda_{\text{eff}} / (\rho_f c_{p,f})$ топлотна дифузивност флуидне фазе унутар порозне средине, бездимензијски облик једначине одржања енергије гласи [75]:

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial \langle \hat{T} \rangle}{\partial \hat{t}} = \hat{\nabla}^2 \langle \hat{T} \rangle - Pe \hat{\nabla} \langle \hat{T} \rangle + \frac{S_H l_c^2}{\lambda_{\text{eff}} \Delta T_c}, \quad (2.37)$$

односно:

$$\frac{(\rho c)_{\text{eff}}}{\rho_f c_{p,f}} \frac{\partial \langle \hat{T} \rangle}{\partial \hat{t}} + \hat{\nabla} \langle \hat{T} \rangle = \frac{1}{\text{Pe}} \hat{\nabla}^2 \langle \hat{T} \rangle + \frac{S_H t_c}{\rho_f c_{p,f} \Delta T_c} . \quad (2.38)$$

Пеклеов број представља однос између преношења количине топлоте кретањем флуида - принудном конвекцијом и преношења количине топлоте кондукцијом. При анализи простирања топлоте у подземном водоносном слоју када се занемарује брзина струјања подземних вода, што значи да је $\text{Pe} = 0$, простирање топлоте се одвија једино путем провођења топлоте. У случајевима када се брзина струјања подземне воде узима у обзир, а вредност Пеклеовог броја износи $\text{Pe} \approx 1$, конвекција и кондукција имају сличан утицај на процес простирања топлоте у аквиферу. При већим брзинама струјања подземне воде и/или при дужим путањама струјања, тј. при већим вредностима Пеклеовог броја, доминантно је конвективно простирање топлоте.

2.4. Раванско потенцијално струјање у подземном водоносном слоју отвореног система ГТП

Под претпоставком да је струјање унутар спољашњег круга отвореног система ГТП, које формирају црпи и повратни бунар у струји подземне воде, устаљено и раванско, а водоносни слој хомоген и изотропан, струјање се може представити као потенцијално струјање које формирају усамљени извор и понор у једноликој праволинијској флуидној струји. На основу изведеног општег израза за комплексни потенцијал, односно потенцијал брзине и струјну функцију, као и комплексну брзину, приказана је струјна слика за случај устаљене хоризонталне струје подземне воде, при узводном и низводном положају повратног бунара.

2.4.1. Потенцијално струјање подземних вода

Општи облик Дарсијеве брзине:

$$\mathbf{V} = V_x \vec{i} + V_y \vec{j} + V_z \vec{k} , \quad (2.39)$$

се на основу Дарсијеве једначине примењене на хомогену и изотропну порозну средину, када је K скаларна величина, тј. вектори \mathbf{V} и $\text{grad } h$ колинеарни, може написати у облику:

$$\mathbf{V} = \frac{\partial(-Kh)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial(-Kh)}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial(-Kh)}{\partial z} \vec{k} = \text{grad}(-Kh) , \quad (2.40)$$

који након увођења потенцијала брзине:

$$\varphi = -Kh , \quad (2.41)$$

гласи:

$$\mathbf{V} = \text{grad } \varphi . \quad (2.42)$$

Представљање Дарсијеве брзине струјања флуида кроз порозну средину као градијента потенцијала брзине је доказ да, у случају хомогеног и изотропног подземног водоносног слоја, струјање подземне воде има особине потенцијалног струјања.

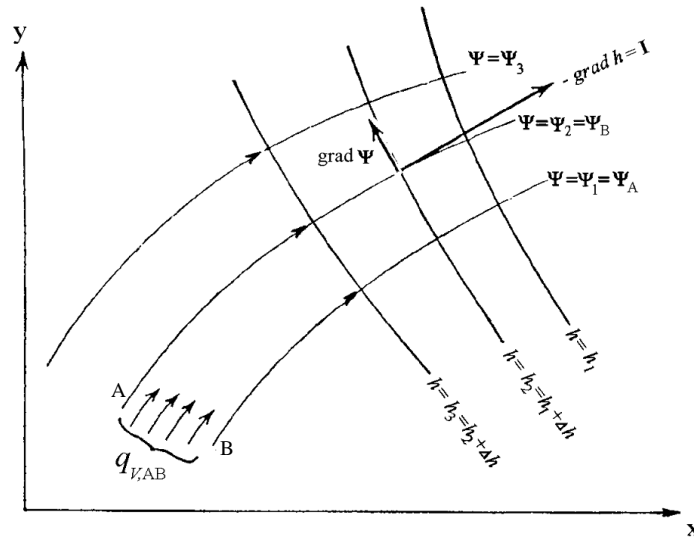
При устаљеном раванском струјању подземне воде, на основу једначине струјнице ($\mathbf{V} \times d\mathbf{L} = 0$), чији скаларни облик представља потпуни диференцијал струјне функције $\psi(x, y)$:

$$d\psi = V_x dy - V_y dx = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = 0 , \quad (2.43)$$

и на основу једначина (2.41) и (2.42) следе Коши-Риманове једначине:

$$V_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -K \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad \text{и} \quad V_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -K \frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} . \quad (2.44)$$

На основу једначина (2.44), односно вредности скаларног производа $\text{grad } h \cdot \text{grad } \psi = 0$, следи да су фамилије линија - струјница $\psi = \text{idem}$ и еквипотенцијала $h = \text{idem}$ међусобно ортогоналне линије у равни (Слика 19.).



Слика 19. Ортогонална струјна мрежа подземних вода [61]

Запремински проток подземне воде кроз струјну цев јединичне дебљине у правцу z -осе, која је омеђена суседним струјницама (Слика 19.), једнак је разлици њима одређених вредности струјних функција:

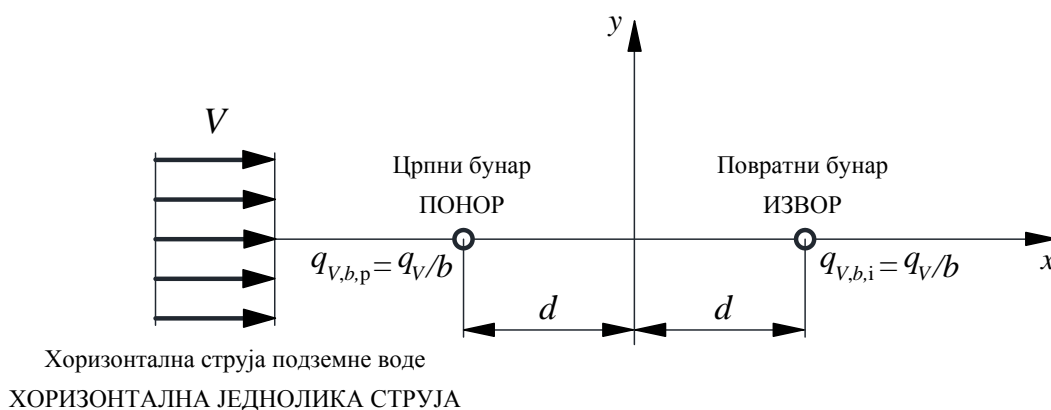
$$q_{V,b,AB} = \psi_B - \psi_A \quad (2.45)$$

2.4.2. Струјање у спољашњем кругу отвореног система ГТП - извор и понор у једноликој струји флуида

Реално потенцијално струјање које настаје у хомогеном и изотропном подземном водоносном слоју, услед коришћења подземне воде помоћу пара спрегнутих бунара као извора/понора топлоте отвореног система ГТП, може се на основу принципа суперпозиције, под претпоставком да је у питању устаљено раванско струјање, представити као збирно потенцијално струјање које формирају:

- а) једнолика струја флуида, којом се описује устаљени ток подземне воде,
- б) усамљени (линијски) извор, којим се описује повратни бунар, и
- в) усамљени (линијски) понор, којим се описује црпни бунар.

Приказ елемената који чине спољашњи круг отвореног система ГТП и на основу њих одређених основних потенцијалних струјања дат је на слици 20. У разматраном случају, усвојено је да су извор и понор истих јединичних запреминских протока $q_{V,b,i} = q_{V,b,p} = q_V/b$, при чему q_V представља проток кроз црпни/повратни бунар, а b дебљину подземног водоносног слоја. Координатни систем је постављен тако да се извор и понор налазе на x -оси у тачкама са координатама $(-d,0)$ и $(+d,0)$, на међусобном растојању $2d$. Такође је усвојено да је праволинијска флуидна струја, сталне брзине V , која одговара Дарсијевој брзини струјања подземне воде, хоризонтална, тј. да са позитивним смером x -осе заклапа угао $\alpha = 0^\circ$.



Слика 20. Елементи спољашњег круга отвореног система ГТП и основна потенцијална струјања

Комплексни потенцијал $[w(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)]$, комплексна брзина, потенцијал брзине и струјна функција хоризонталне једнолике струје су облика [76]:

$$\begin{aligned} w_1(z) &= Vz, & \bar{v}_1 &= V, \\ \varphi_1 &= Vx, & \psi_1 &= Vy, \end{aligned} \quad (2.46)$$

док у случају усамљеног извора (предзнак „+“), односно понора (предзнак „-“), гласе:

$$\begin{aligned} w_{2/3}(z) &= \pm \frac{q_V}{2\pi b} \ln(z - z_0), & \bar{v}_{2/3} &= \pm \frac{q_V}{2\pi b} \frac{1}{z - z_0}, \\ \psi_{2/3} &= \pm \frac{q_V}{4\pi b} \ln[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2], & \varphi_{2/3} &= \pm \frac{q_V}{2\pi b} \operatorname{arctg} \frac{y - y_0}{x - x_0}, \end{aligned} \quad (2.47)$$

при чему је са $z = x + iy$ означена комплексна променљива, док $z_0 = x_0 + iy_0$ дефинише положај извора, тј. понора.

Анализом су обухваћена два случаја раванског потенцијалног струјања у подземном водоносном слоју током рада отвореног система ГТП, тј. анализа је спроведена за два положаја повратног бунара:

- I. низводан положај повратног бунара у односу на црпни бунар,
- II. узводан положај повратног бунара у односу на црпни бунар.

I. Низводан положај повратног бунара

При хоризонталном струјању подземне воде - једнолике струје, у позитивном смеру x -осе, и положају повратног бунара - извора у тачки са координатама $(d, 0)$, а црпног бунара - понора у тачки са координатама $(-d, 0)$ (Слика 20.), применом принципа суперпозиције следе изрази за карактеристичне величине резултујућег потенцијалног струјања:

$$w(z) = Vz + \frac{q_V}{2\pi b} \ln(z-d) - \frac{q_V}{2\pi b} \ln(z+d) , \quad (2.48.a)$$

$$\bar{v} = \frac{dw}{dz} = V + \frac{q_V}{2\pi b} \frac{1}{z-d} - \frac{q_V}{2\pi b} \frac{1}{z+d} , \quad (2.48.б)$$

$$\begin{aligned} \varphi &= Vx + \frac{q_V}{4\pi b} \ln[(x-d)^2 + y^2] - \frac{q_V}{4\pi b} \ln[(x+d)^2 + y^2] = \\ &= Vx + \frac{q_V}{4\pi b} \ln \frac{(x-d)^2 + y^2}{(x+d)^2 + y^2} , \end{aligned} \quad (2.48.в)$$

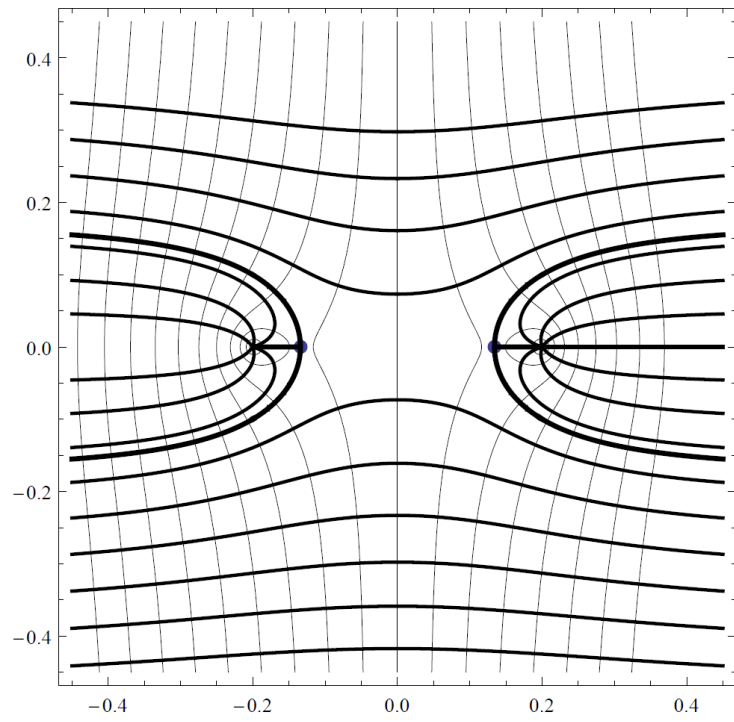
$$\psi = Vy + \frac{q_V}{2\pi b} \operatorname{arctg} \frac{y}{x-d} - \frac{q_V}{2\pi b} \operatorname{arctg} \frac{y}{x+d} . \quad (2.48.г)$$

Изједначавањем комплексне брзине (2.48.б) са нулом, добија се квадратна једначина чија решења одређују положаје зауставних тачака:

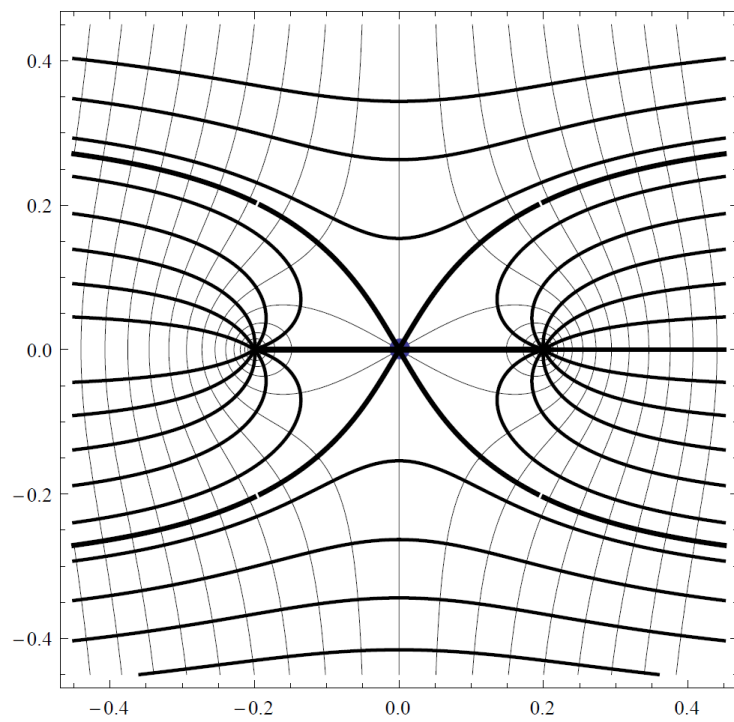
$$z_{1/2} = \pm d \sqrt{1 - \frac{q_V}{db\pi V}} . \quad (2.49)$$

У зависности од вредности израза под кореном можемо имати следеће случајеве:

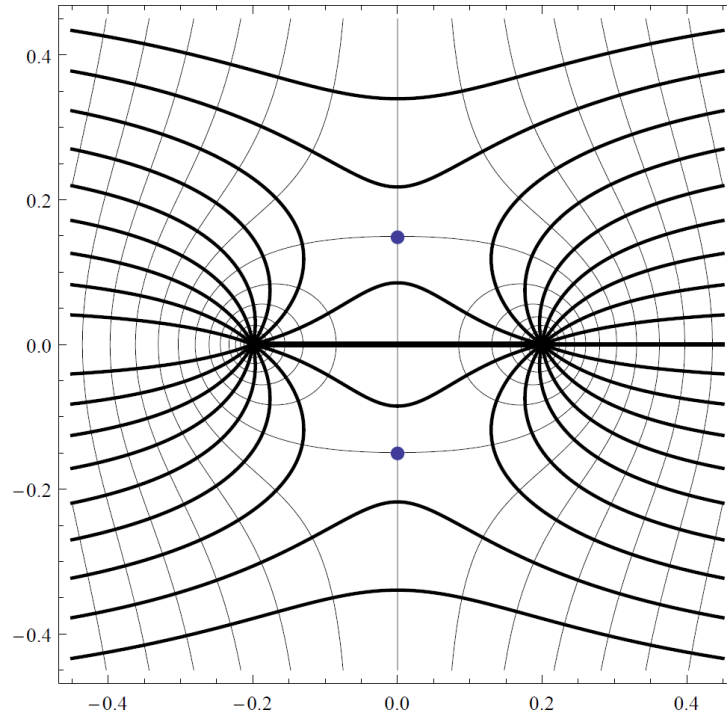
- за $q_V < db\pi V$ нема продора повратне воде до црпног бунара и могу се одредити две зауставне тачке на x -оси, тј. при $y = 0$ (Слика 21.а),
- за вредност $q_V = db\pi V$, која одговара критичној вредности запреминског протока црпне/повратне воде, постоји једна зауставна тачка у координатном почетку (Слика 21.б),
- за $q_V > db\pi V$ долази до продора повратне воде до црпног бунара и могу се одредити две зауставне тачке на y -оси, тј. при $x = 0$ (Слика 21.в).



а) *нема продора повратне воде до црног бунара*



б) *гранични случај*



в) постоји продор повратне воде до црпног бунара

Слика 21. Струјна слика у спољашњем кругу отвореног система ГТП при низводном положају повратног бунара у односу на црпни бунар

Запремински проток повратне воде која, по јединици висине аквифера, продире до црпног бунара може се, применом израза (2.45), одредити као разлика вредности струјних функција које пролазе кроз зауставне тачке са координатама $(0, y_{zT,1/2} = \pm d \sqrt{(q_V / db\pi V) - 1})$:

$$q_{V,b,pov} = \frac{2q_V}{b\pi} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{q_V}{db\pi V} - 1} - \frac{db\pi V}{q_V} \sqrt{\frac{q_V}{db\pi V} - 1} \right]. \quad (2.50)$$

II. Узводан положај повратног бунара

При хоризонталном струјању подземне воде - једнолике струје, у позитивном смеру x -осе, и положају повратног бунара - извора у тачки са координатама $(-d, 0)$, а црпног бунара - понора у тачки са координатама $(d, 0)$, такође применом принципа суперпозиције следе изрази за карактеристичне величине резултујућег потенцијалног струјања:

$$w(z) = Vz + \frac{q_V}{2\pi b} \ln(z+d) - \frac{q_V}{2\pi b} \ln(z-d) , \quad (2.51.a)$$

$$\bar{v} = \frac{dw}{dz} = V + \frac{q_V}{2\pi b} \frac{1}{z+d} - \frac{q_V}{2\pi b} \frac{1}{z-d} , \quad (2.51.б)$$

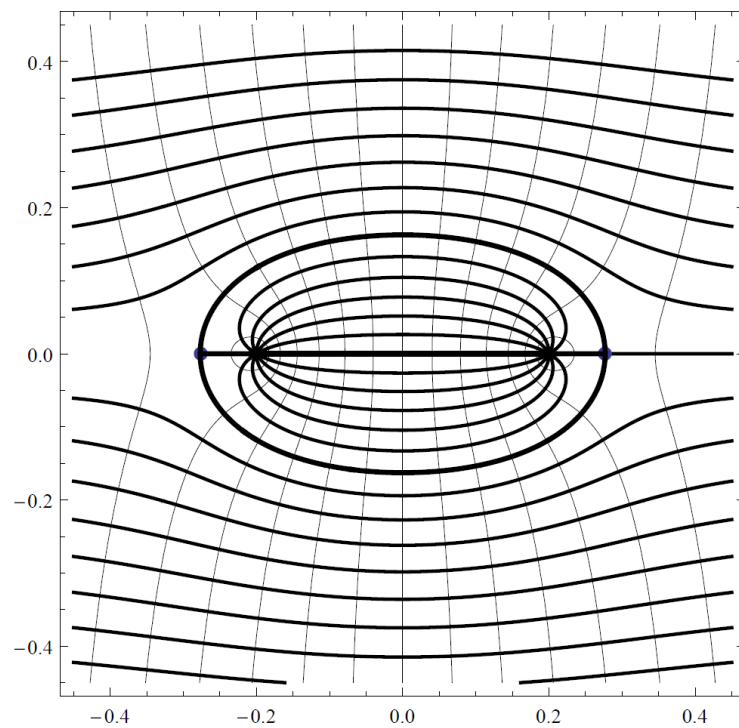
$$\begin{aligned} \varphi &= Vx + \frac{q_V}{4\pi b} \ln[(x+d)^2 + y^2] - \frac{q_V}{4\pi b} \ln[(x-d)^2 + y^2] = \\ &= Vx + \frac{q_V}{4\pi b} \ln \frac{(x+d)^2 + y^2}{(x-d)^2 + y^2} , \end{aligned} \quad (2.51.в)$$

$$\psi = Vy + \frac{q_V}{2\pi b} \operatorname{arctg} \frac{y}{x+d} - \frac{q_V}{2\pi b} \operatorname{arctg} \frac{y}{x-d} . \quad (2.51.г)$$

Изједначавањем комплексне брзине (2.51.б) са нулом, квадратна једначина чија решења одређују положаје зауставних тачака за случај узводног положаја повратног бунара има облик:

$$z_{1/2} = \pm d \sqrt{1 + \frac{q_V}{db\pi V}} . \quad (2.52)$$

На основу израза (2.52), с обзиром да је вредност израза под кореном увек позитивна и већа од 1, може се закључити да при узводном положају повратног бунара, без обзира на вредност запреминског протока кроз црпни/повратни бунар, увек долази до продора повратне воде до црпног бунара. Струјна мрежа у овом случају има изглед приказан на слици 22.



Слика 22. Струјна мрежа у спољашњем кругу отвореног система ГТП при узводном положају повратног бунара у односу на црпни бунар

3. Експериментално одређивање температурног поља у подземном водоносном слоју при раду отвореног система ГТП

Ово поглавље посвећено је приказу извршеног сопственог експерименталног одређивања динамичког температурног поља у подземном водоносном слоју током његове једногодишње експлоатације системом ГТП. С обзиром да су мерења обављена на лабораторијском моделу подземног водоносног слоја, на почетку поглавља описан је поступак одређивања експерименталних радних параметара модела применом теорије сличности, како би мерни резултати могли бити примењени при анализи промена температурног поље унутар реалног аквифера. Експериментом је обухваћена анализа континуалног радног режима, при низводном и узводном положају повратног бунара, као и анализа цикличног радног режима система ГТП. Све три серије мерења изведене су за четири различита растојања између црпног и повратног бунара. Мерењима су биле добијене две врсте података. Прва, која је дефинисала независне променљиве - експерименталне радне параметре, односно улазне параметре нумеричког модела, а обухватала је вредности температуре и запреминског протока термички ненарушеног тока подземне воде, затим температуре и запреминског протока воде која се црпи, односно убацује у водоносни слој, као и својства порозне средине - порозност и коефицијент филтрације. Друга врста мерених величина биле су

температуре које се, при претходно дефинисаним и измереним условима, успостављају у подземном водоносном слоју током његове једногодишње експлоатације. Поред описа инсталације, поступка мерења и обраде добијених података, у овом поглављу дат је приказ и неких од репрезентативних резултата мерења.

3.1. Примена теорије сличности за одређивање експерименталних радних параметара

Праћење динамичког температурног поља унутар реалног подземног водоносног слоја, током његове експлоатације системом ГТП, је из техничких разлога веома тешко спровести. Због тога се мерења и параметарска анализа веома често врше на лабораторијским експерименталним инсталацијама спољашњег круга ГТП, што је случај и у овој докторској дисертацији.

Да би резултати експерименталних испитивања температурних промена на лабораторијском моделу подземног водоносног слоја могли бити примењени при анализи промена температурног поље унутар реалног аквифера, неопходно је да геометријски и радни параметри на моделу буду дефинисани тако да су задовољени одређени критеријуми сличности између процеса струјања и простирања топлоте унутар модела и прототипа подземног водоносног слоја током рада отвореног система ГТП.

Из бездимензијског облика закона одржања енергије (2.37), следи критеријум термодинамичке сличности, тј. сличности температурних поља унутар лабораторијског модела и прототипа аквифера, који подразумева једнакост Фуријеових и Пеклеових бројева.

Анализиран временски период рада реалног постројења ГТП износи годину дана, односно $t_p = 365$ дана. Најпре је усвојено да овај временски период одговара периоду извођења експеримента од $t_M = 3650$ s, на основу чега је одређен преводни коефицијент за време: $k_t = t_p/t_M = 8640$. Потом је на основу једнакости Фуријеових бројева за модел и прототип одређен преводни коефицијент дужине:

$$Fo = \text{idem} \rightarrow \frac{a_{\text{eff,P}} t_P}{l_P^2} = \frac{a_{\text{eff,M}} t_M}{l_M^2} \rightarrow k_l = \frac{l_P}{l_M} = \sqrt{k_t} \approx 90 . \quad (3.1)$$

Помоћу овога коефицијента, а на основу усвојених димензија реалног аквифера $81\text{ m} \times 35,4\text{ m} \times 13,5\text{ m}$, ограниченог са горње и доње стране непропусним слојевима дебљине $4,5\text{ m}$, одређена је геометрија лабораторијског модела подземног водоносног слоја, као и дебљина непропусних слојева (Табела 1.).

За усвојену вредност Дарсијеве брзине кроз прототип подземног водоносног слоја ($V_P = 0,16\text{ m/dan}$), а на основу једнакости Пеклеових бројева за модел и прототип, одређена је Дарсијева брзина струјања воде кроз лабораторијски модел аквифера:

$$Pe = \text{idem} \rightarrow \frac{V_P l_P}{a_{f,P}} = \frac{V_M l_M}{a_{f,M}} \rightarrow V_M = V_P k_l = 10\text{ mm/min} . \quad (3.2)$$

Познајући Дарсијеву брзину и геометрију аквифера одређена је стална вредност запреминског протока природног тока воде кроз лабораторијски модел подземног водоносног слоја током извођења експеримента (Табела 1.).

При претходно спроведеној анализи, претпостављено да су подземни водоносни слојеви унутар модела и прототипа истих хидрогеолошких и термофизичких особина, док течну фазу у оба случаја чини деминерализована вода истих термофизичких карактеристика. На основу ових претпоставки следе идентичне бројне вредности топлотне дифузивности порозне средине и топлотне дифузивности флуидне фазе унутар порозне средине.

Брзина струјања црпне, односно повратне, воде кроз лабораторијске моделе бунара такође је одређена на основу теорије сличности. Струјање кроз бунар поистовећено је са струјањем кроз цев, па је као критеријум сличности усвојена једнакост Рејнолдсових бројева на моделу и прототипу. За усвојен запремински проток воде од $q_{V,P} = 1,5\text{ l/s}$ кроз прототип бунара, пречника $d_{\text{bun,P}} = 1,44\text{ m}$, односно на основу ових величина дефинисане брзине струјања црпне/повратне воде ($v_{\text{цп,P}} = 0,055\text{ m/min}$), из овог критеријума одређује се брзина струјања воде кроз лабораторијски модел бунара:

$$Re = idem \rightarrow \frac{v_{fl,P} l_P}{V_{f,P}} = \frac{v_{fl,M} l_M}{V_{f,M}} \rightarrow v_{fl,M} = v_{fl,P} k_l = 4,95 \text{ m/min} . \quad (3.3)$$

С обзиром на познату брзину струјања воде и површину попречног пресека модела бунара, одређену помоћу геометријске сличности, дефинисана је вредност запреминског протока воде кроз бунаре (Табела 1.), која је мерена и одржавана сталном током извођења експеримента.

На овај начин успостављена сличност између струјања унутар прототипа и модела подземног водоносног слоја испуњава услов кинематске сличности - сличности струјних поља, уколико се она дефинише преко односа између брзине црпне/повратне воде и Дарсијеве брзине струјања подземне воде. Однос ових брзина за случај модела и прототипа је исти ($v_{fl,P}/V_P = v_{fl,M}/V_M = 495$).

Упоредни приказ геометријских и радних параметара на прототипу и моделу подземног водоносног слоја спрегнутог са спољашњик кругом отвореног система ГТП приказан је у табели 1.

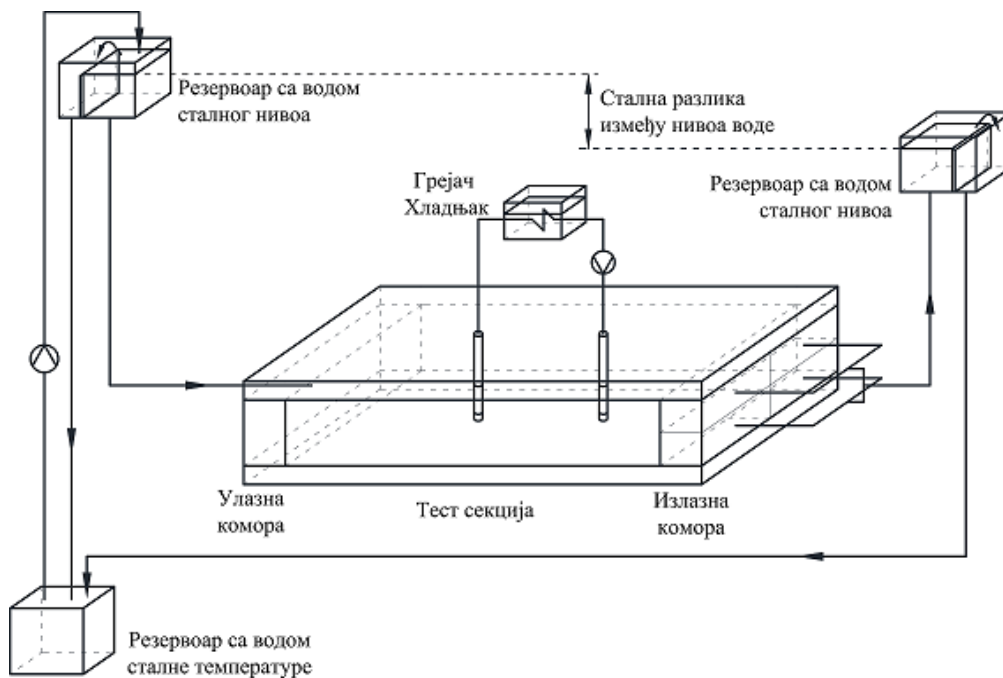
Табела 1. Геометријски и радни параметри на прототипу и лабораторијском моделу подземног водоносног слоја током рада отвореног система ГТП

Параметар	Прототип(Р)	Модел (М)
Временски период рада отвореног система ГТП, t	365 дана	3650 s
Геометрија аквифера: - дужина - ширина - дубина - дебљина горњег и доњег непропусног слоја	81 m 35,4 m 13,5 m 4,5 m	900 mm 393 mm 150 mm 50 mm
Растојање између бунара, l , за положај: - I, l_I - II, l_{II} - III, l_{III} - IV, l_{IV}	9 m 27 m 45 m 63 m	100 mm 300 mm 500 mm 700 mm
Запремински проток природног тока воде кроз подземни водоносни слој, $q_{v,f}$	76,5 m ³ /дан	590 ml/min
Унутрашњи пречник бунара, d_{bun}	1,44 m	16 mm
Запремински проток воде кроз црпни и повратни бунар, q_v	90 l/min	1 l/min
Температура термички ненарушеног подземног водоносног слоја, ϑ_f	14°C	
Темп. разлика између термички ненарушеног аквифера и повратне воде, у оба радна режима, $\Delta\vartheta_{fl}$	5°C	

Из табеле се види да су усвојене вредности температуре термички ненарушеног подземног водоносног слоја, као и температурске разлике између термички ненарушеног аквифера и повратне воде, у случају прототипа и лабораторијског модела подземног водоносног слоја исте.

3.2. Опис мерне инсталације

Експериментална инсталација спољашњег круга отвореног система ГТП на којој су спроведена мерења налази се у Лабораторији за термодинамику Машинског факултета Универзитета у Београду. Њен шематски приказ дат је на слици 23.



Слика 23. Шематски приказ мерне инсталације

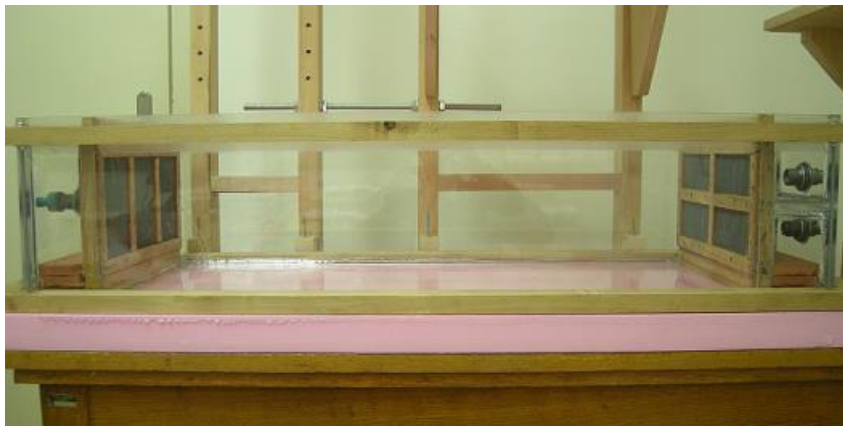
Мерна инсталација састоји се из три главна дела: (1) главног резервоара са испуном, (2) система за снабдевање главног резервоара водом, и (3) модела спреге спољашњег круга са унутрашњим кругом отвореног система ГТП.

Главни резервоар, облика правоуглог паралелопипеда, унутрашњих димензија $1100\text{ mm} \times 393\text{ mm} \times 250\text{ mm}$, израђен је од плексигласа дебљине 10 mm (Слика 24.).



Слика 24. Почетни изглед главног резервоара

Након ојачавања са спољашње стране, главни резервоар је, постављањем водопрпусних мембрана, дебљине 20 mm , преграђен на три дела: улазну комору, испитни део резервоара - тест секцију, претходно дефинисаних димензија ($900\text{ mm} \times 393\text{ mm} \times 250\text{ mm}$), и излазну комору (Слика 25.). Развијено струјање тока воде на улазу у испитни део резервоара обезбеђено је постављањем улазне коморе испред тест секције.



Слика 25. Делови главног резервоара

С обзиром да је истраживањима био обухваћен утицај кондуктивних топлотних губитака кроз непрпусне слојеве изнад и испод подземног водоносног слоја на температурно поље унутар аквифера, као и утицај слојевите хетерогености самог подземног водоносног слоја, испуну испитног дела резервоара чиниле су две целине, обе сачињене из по два слоја:

1. модел непрпусних слојева, представљен у виду доњег (Слика 26.а) и горњег слоја од опеке (Слика 26.г), оба дебљине 5 cm,
2. хетерогени модел подземног водоносног слоја, сачињен из 2 хомогена слоја:
 - први слој аквифера - слој шљунка, дебљине 8,5 cm, просечног пречника зрна $\varnothing 5$ mm (Слика 26.б),
 - други слој аквифера - слој крупног кварцног песка, дебљине 6,5 cm, просечног пречника зрна $\varnothing 2$ mm (Слика 26.в).

Пуњене испитног дела резервоара слојевима водоносног слоја вршено је у засићеним условима. То значи да је истовремено са шљунком, односно кварцним песком, резервоар пуњен и водом. На тај начин је спречен нежељен продор ваздуха у модел аквифера.



а) постављање доњег непрпусног слоја



б) *постављање првог слоја аквифера - слоја шљунка*



в) *постављање другог слоја аквифера - слоја кварцног песка*



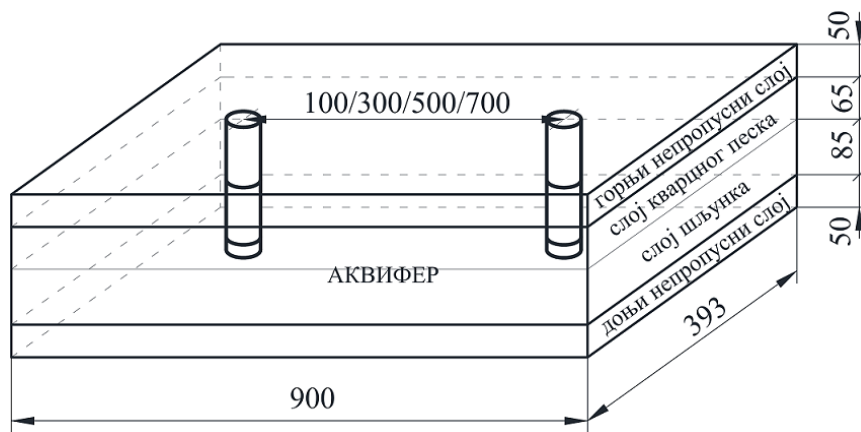
г) *постављање горњег непрпусног слоја*

Слика 26. *Резервоар са испуном - приказ постављања слојева*

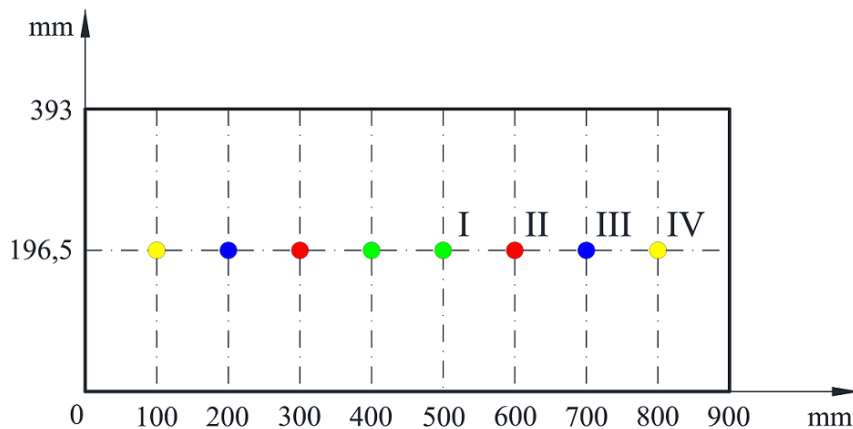
С обзиром да је анализиран утицај растојања између бунара на понашање температурног поља у подземном водоносном слоју током његове експлоатације, на експерименталној инсталацији предвиђена су четири различита положаја пара бунара, која су на слици 27 означена бројевима I - IV:

- 1) положај I, при растојању између бунара $l_I = 100 \text{ mm}$,
- 2) положај II, при растојању између бунара $l_{II} = 300 \text{ mm}$,
- 3) положај III, при растојању између бунара $l_{III} = 500 \text{ mm}$,
- 4) положај IV, при растојању између бунара $l_{IV} = 700 \text{ mm}$.

Отвори предвиђени за постављање бунара кроз горњи непропусни слој могу се уочити и на слици 26.г.



а) положај спрегнутих бунара унутар подземног водоносног слоја



б) ознаке положаја спрегнутих бунара

Слика 27. Приказ положаја спрегнутих бунара

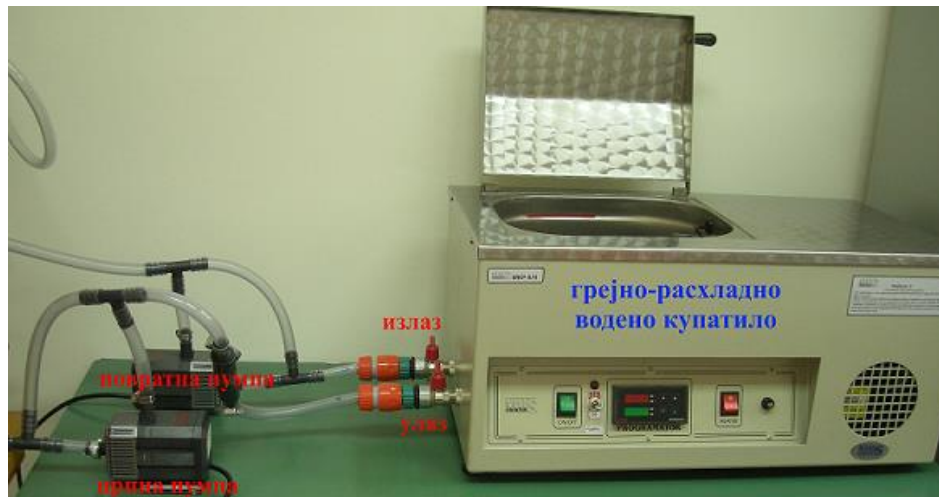
Снабдевање главног резервоара водом остварено је повезивањем улазне и излазне коморе са одговарајућим преграђеним помоћним резервоарима и резервоаром са водом сталне температуре. Помоћни резервоари су током експеримента били постављени на различитим висинама. Стална разлика између нивоа воде у њима омогућила је струјање воде кроз испитни резервоар устаљеном брзином. Са друге стране, пумпа постављена у резервоару сталне температуре обезбеђивала је континуално снабдевање помоћног резервоара водом (Слика 23.). Као радни флуид коришћена је дестилована вода. Температура убризгаване воде одржавана је у границама од $\pm 0,2^\circ\text{C}$ у односу на температуру подешену унутар резервоара сталне температуре.

Лабораторијски модел спреге спољашњег са унутрашњим кругом отвореног система ГТП чини пар међусобно повезаних бунара - црпни и повратни. Бунари су изграђени од поцинковане цеви, димензија $d_{sp} \times \delta_c = 21,3 \times 2,65 \text{ mm}$. Укупна дужина оба бунара износи 210 mm, што значи да се они простиру по целој дебљини подземног водоносног слоја, тј. допиру до доњег непропусног слоја. Доњи део омотача бунара чини челична мрежа, која омогућава црпљење и убацивање повратне воде, а уједно представља и филтер који спречава да чврсте честице доспеју у цев и касније у инсталацију. Приказ једног од бунара, непосредно пре постављања у резервоар, дат је на слици 28.



Слика 28. Приказ црпног/повратног бунара

Вода, након црпљења из резервоара, струји кроз грејно-расхладно водено купатило WKP-9/H фирме VIMS-elektrik (Слика 29.). С обзиром да мерења на лабораторијском моделу одговарају једногодишњој експлоатацији аквифера системом ГТП, температура воде у воденом купатилу је током извођења експеримента подешавана у два наврата, у односу на температуру термички ненарушене воде из резервоара - на за $\Delta\vartheta_{\text{п}}$ вишу температуру током летње сезоне, када систем ГТП ради у режиму хлађења, односно на за $\Delta\vartheta_{\text{п}}$ нижу температуру током зимске сезоне, када систем ГТП ради у режиму грејања. На тај начин водено купатило је представљало модел спреге спољашњег са унутрашњим кругом система ГТП. Током два периода опоравка термичке енергије, у јесен и пролеће, вода није црпљена из испитног дела резервоара, те није струјала кроз водено купатило.



Слика 29. Лабораторијски модел спреге спољашњег са унутрашњим кругом отвореног система ГТП

3.3. Опис поступка мерења

Током извођења експеримента извршена су мерења, односно одређивања, следећих физичких величина:

- за потребе математичко-нумеричког модела:
 - а) ефективне порозности оба слоја аквифера,
 - б) коефицијента филтрације оба слоја аквифера,
 - в) температуре термички ненарушеног тока воде,
 - г) запреминског протока природног тока воде кроз главни резервоар,
 - д) температуре повратне воде,
 - ђ) запреминског протока воде кроз црпи, односно повратни бунар, и
 - е) времена трајања сва четири радна периода,
- за проверу нумеричког модела било је неопходно експерименталним путем пратити температурно поље у подземном водоносном слоју.

Ефективна порозност оба слоја аквифера одређена је директном запреминском методом, и то одређивањем укупне запремине засићеног порозног узорка и запремине пора унутар узорка. Укупна запремина засићеног узорка порозног слоја одређена је прорачуном, као запремина правог ваљка одговарајућих димензија [15][16][77]. То је оправдано, с обзиром да је засићен узорак стављен у стандардну посуду за одређивање насипне густине (Слика 30.). Посуда, која је направљена од поцинкованог лима, је правилног цилиндричног геометријског облика, пречника 17 cm. Узорак је потом сушен у пећници на 105°C, како би из њега била уклоњена површински везана влага, све док није достигао сталну тежину. Потом је сув узорак поново доведен у засићено стање, тако што је до његовог горњег нивоа сипана дестилована вода из градуисане мензуре. Како запремина пора унутар засићеног узорка одговара запремини воде сипаној у суви узорак [78], она је одређена као разлика између почетне запремине дестиловане воде унутар мензуре и запремине воде преостале у мензури. Измерене вредности порозности оба слоја аквифера дате су у табели 2.



Слика 30. *Одређивање порозности оба слоја аквифера*

Коефицијент филтрације оба слоја аквифера одређен је лабораторијским мерењима помоћу Дарсијевог апарата. С обзиром да слојеве аквифера чине шљунак и песак, који се сврставају у тла са већим коефицијентом водопрпусности, при одређивању коефицијента филтрације коришћен је апарат у коме су узорци порозне средине подвргнути току који се одвија при сталној разлици пиезометарских нивоа (Слика 31.), што је уобичајено за овакве врсте тла. Устаљено и једнодимензијско струјање воде кроз узорак, облика правилног кружног цилиндра познатих димензија - дужине $L = 70\text{ cm}$ и површине попречног пресека (A), дефинисане унутрашњим пречником $d_{\text{ун}} = 55\text{ mm}$, било је узлазно. За већи број задатих сталних разлика нивоа воде (Δh), запреминском методом су мерени одговарајући протоци воде кроз апарат. На основу примене Дарсијевог закона, потом је одређен коефицијент филтрације слоја унутар аквифера.

Приказ графичке обраде резултата мерења за оба узорка, применом регресионе методе најмањих квадрата, у којој је усвојена нулта вредност константног члана регресијске функције, дат је на слици 32. Тражена вредност коефицијента филтрације представља тангенс угла, тј. нагиб регресионе криве. Измерене вредности коефицијента филтрације оба слоја аквифера приказане су у табели 2.

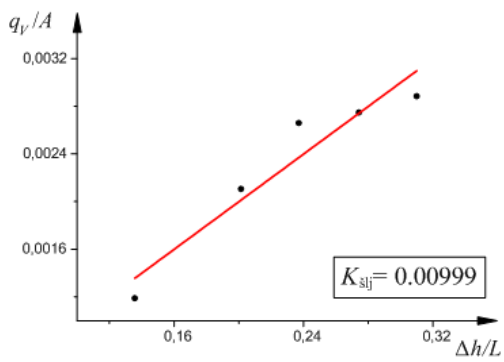


а)

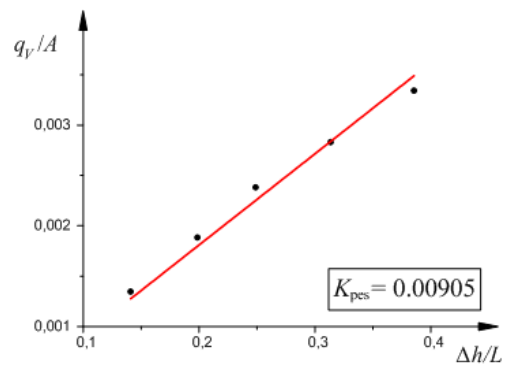


б)

Слика 31. Дарсијев апарат са сталном разликом нивоа, испуњен:
 а) узорком слоја шљунка, б) узорком слоја кварцног песка



а) слој шљунка



б) слој кварцног песка

Слика 32. Одређивање коефицијента филтрације графичком методом:

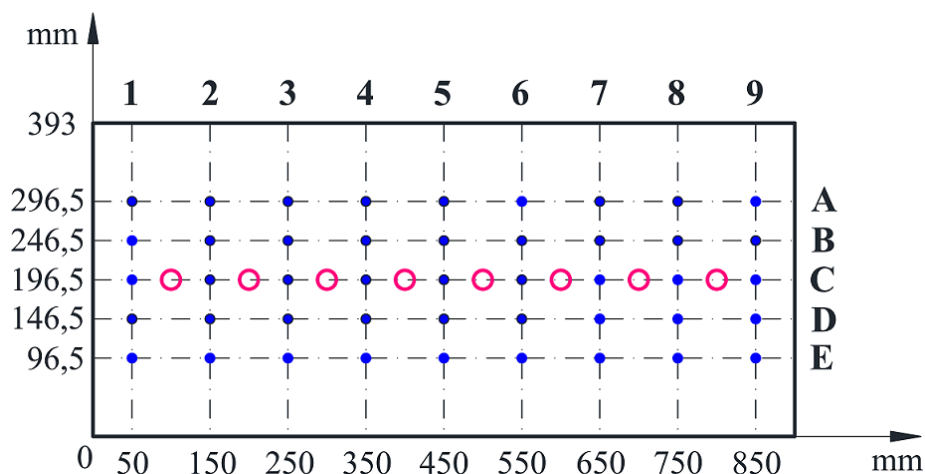
Табела 2. *Експериментално одређене карактеристике оба слоја аквифера*

Величина	Слој песка	Слој шљунка
Ефективна порозност, ϕ , –	0,38	0,36
Коефицијент филтрације, K , m/s	0,00905	0,00999

Током извођења свих серија мерења време трајања експеримената било је стално. Оно се састојало из четири временска периода једнаких дужина, која одговарају радним периодима система ГТП при једногодишњој експлоатацији подземног водоносног слоја. Истовремено, одржаване су сталне и бројне вредности следећих величина, које су одређене на основу примене теорије сличности (Табела 1.): температура термички ненарушног тока воде кроз главни резервоар и њен запремински проток, вредности запреминског протока воде кроз црпи и повратни бунар, као и температура повратне воде, односно разлика између температуре термички ненарушеног водоносног слоја и температуре повратне воде.

3.3.1. Мерење температурног поља унутар подземног водоносног слоја

Мерење температурног поља на лабораторијском моделу подземног водоносног слоја при раду отвореног система ГТП вршено је коришћењем мреже од 45 термопарова. Шематски приказ њиховог положаја и уведених ознака дат је на слици 33.



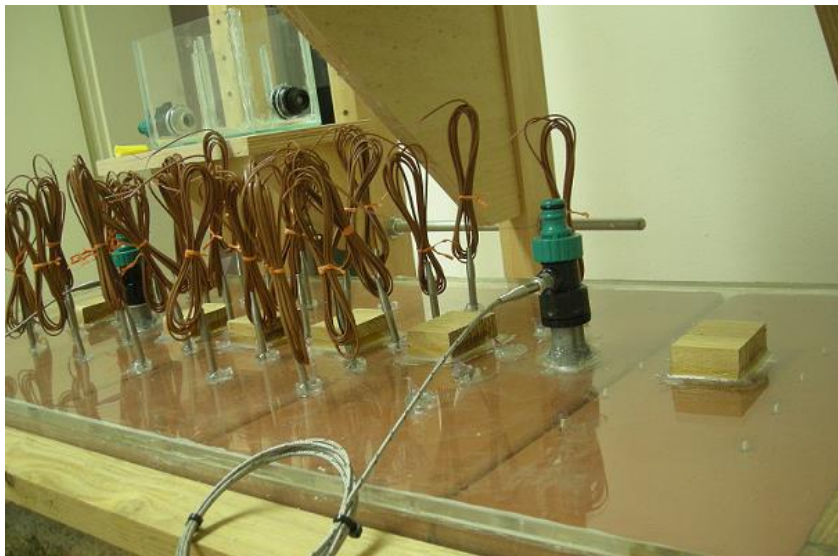
Слика 33. Шематски приказ положаја и ознака термопарова унутар испитног дела резервоара

Термопарови су постављени на међусобном растојању од 100 mm у подужном правцу - правцу струјања и 50 mm у попречном правцу - правцу управном на правац струјања. Како би се утицај бочних граничних површи резервоара на измерене вредности температура свео на минимум, растојање термопарова од ових површи било је веће и износило је 96,5 mm. Дубина постављања термопарова износила је 150 mm од горње површи резервоара, што значи да су се мерне тачке налазиле унутар слоја шљунка, на растојању 25 mm од површи раздвајања два различита слоја аквифера.

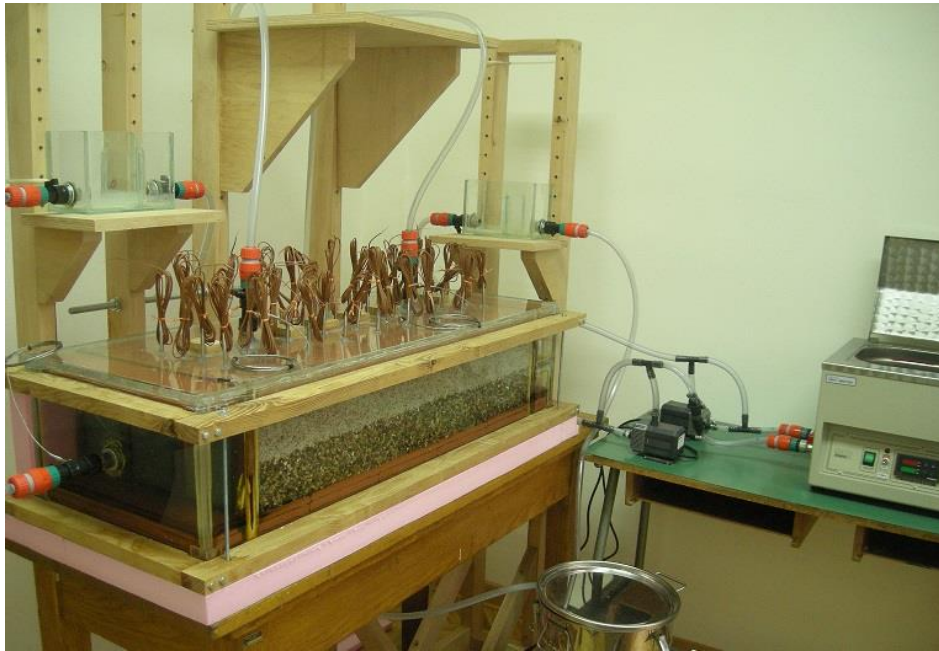
За мерења је одређен оплаштени термопар типа Т (Omega TJ80-CPSS-032U-б), спољашњег пречника и дужине заштитне цеви $\phi 0,80\text{mm} \times 150\text{mm}$, с обзиром да његов мерни опсег најприближније одговара радним температурама воде током извођења експеримента. Приказ процеса постављања термопарова унутар експерименталне инсталације дат је на слици 34.



а) приказ термопарова на почетку процеса постављања



б) упоредо са термопаровима постављен је и пар бунара



в) приказ термопарова на крају процеса постављања

Слика 34. *Постављање термопарова унутар испитног дела резервоара*

Након постављања термопарови су повезани са системом за аквизицију. За мерење температуре, тј. праћење напонских сигнала термопарова са променом температуре, коришћена су два модула Omega OMB-DAQ-3001 (Слика 35.). С обзиром да имају могућност надоградње, сваки од модула проширен је једним Omega OMB-PDQ30 експанзионим модулом, како би се добио потребан број диференцијалних аналогних улазних канала за повезивање термопарова - 45 канала за мерење температуре унутар модела подземног водоносног слоја, 2 канала за мерење температуре воде у црпном и повратном бунару, 1 канал за мерење температуре воде на улазу у испитни резервоар и 1 канал за мерење температуре ваздуха у просторији. Модулима, односно активним каналима, се, након повезивања са рачунаром преко USB порта, управљало коришћењем софтвера за аквизицију DaqView.

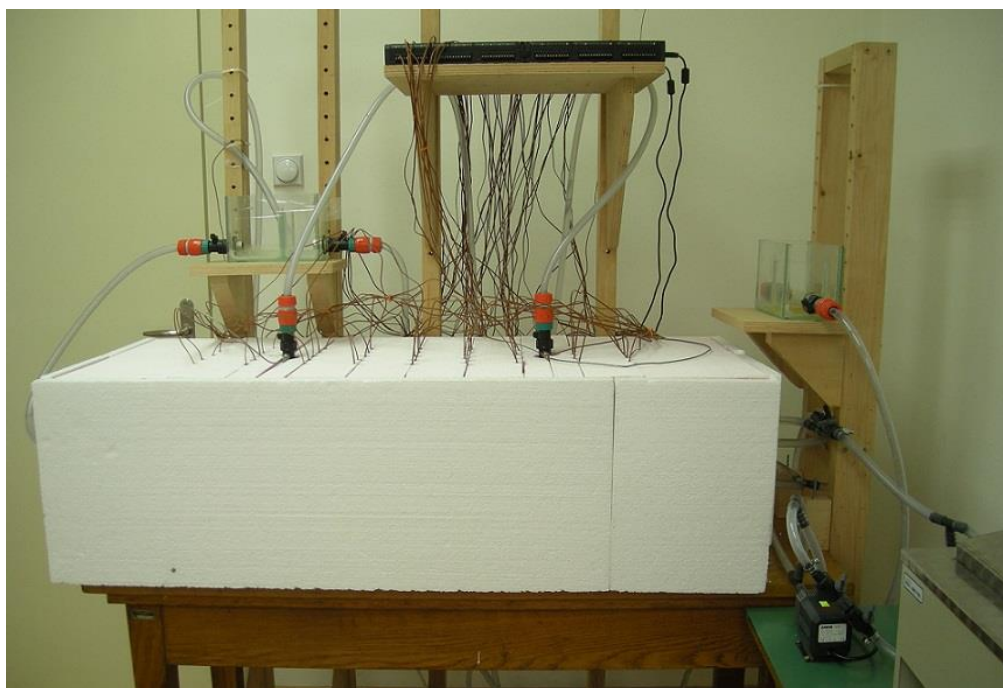


Слика 35. Приказ аквизиционе опреме

Непосредно пре извођења експеримента термопарови су калибрисани. У циљу добијања поузданих података испоштована је и процедура прописана од стране произвођача аквизиционог система. Поред софтверског задавања да су активни диференцијални канали Т типа, што одговара Т типу коришћених термопарова, и праћења температуре околног ваздуха, која је током извођења експеримента износила $26 \pm 1^\circ\text{C}$, што задовољава препоруку произвођача да мора бити у границама од 18°C до 28°C , испоштовано је и следеће: а) модули су били укључивани најмање 1 сат пре почетка мерења, како би референтни хладни крајеви термопарова, који су термички спрегнути са другим сензорима температуре (у овом случају термисторима) смештеним унутар самог модула, доспели у устаљено стање, б) поред софтверског задавања брзине мерења температуре (броја скенирања у одређеном временском периоду), односно на тај начин одређивања временског интервала између два мерења температуре, било је задато и да се измерена вредност температуре добија осредњавањем одређеног броја регистрованих вредности у временском интервалу између два мерења. Током извођења ових експеримената температура је мерена на сваких 10 секунди, а свака измерена вредност температуре добијена је осредњавањем 5 температурних вредности регистрованих у временском интервалу између два мерења. С обзиром на усвојен преводни коефицијент за време, на основу кога, као

што је већ наведено, временски период од 365 дана рада реалног постројења ГТП одговара временском периоду извођења експеримента од 3650 s, то значи да су измерене вредности температура унутар лабораторијског модела подземног водоносног слоја на сваких 10 секунди одговарале дневним променама температура унутар реалног подземног водоносног слоја.

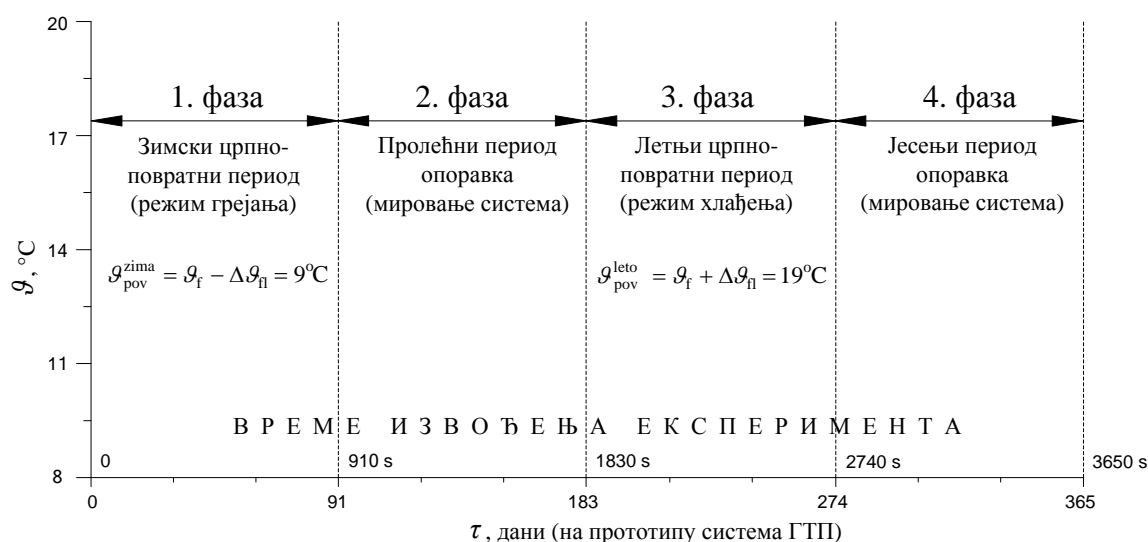
Како би утицај околине на температурно поље унутар модела подземног водоносног слоја био елиминисан, главни резервоар је током извођења експеримента топлотно изолован постављањем изолације сачињене од 5cm дебелог слоја стиродура (Слика 36.). Истовремено су били изоловани и помоћни резервоари, као и одговарајући цевни водови.



Слика 36. Приказ мерне инсталације након топлотног изоловања главног резервоара

Мерењима је претходило задавање сталне вредности температуре воде унутар резервоара сталне температуре, која је потом струјала кроз главни резервоар. По успостављању равномерног температурног поља унутар модела подземног водоносног слоја, односно када се температура аквифера усталила на 14°C, приступило се мерењима.

С обзиром на четири радна периода отвореног система ГТП током једне сезоне, чији периоди трајања приближно одговарају трајању годишњих доба, усвојено је да у реалном случају, тј. у случају прототипа система, сва 4 радна периода временски исто трају и то по 3 месеца, тачније 91 дан (изузев пролећне сезоне која траје 92 дана). На лабораторијском моделу система ГТП ово одговара радним периодима у временском трајању од по 910 секунди (изузев пролећне сезоне која траје 920 секунди). Постојање четири радна периода система условило је да се и сам експеримент састојао из четири фазе током којих су праћене температурне промене унутар модела подземног водоносног слоја, што је приказано на слици 37.



Слика 37. Фазе извођења експеримента

1. Прва фаза извођења експеримента, у трајању од 910 s, одговарала је црпно-повратном периоду рада система током зимске сезоне, када систем ради у режиму грејања и када се након топлотног искоришћавања охлађена подземна вода враћа у подземни водоносни слој. Током тог периода водено купатило је радило у режиму хлађења. Температура воде у њему била је подешена на за $\Delta\theta_{п} = 5^{\circ}\text{C}$ нижу вредност температуре од температуре термички ненарушеног аквифера: $\theta_{\text{пов}}^{\text{зима}} = \theta_{\text{f}} - \Delta\theta_{п} = 14 - 5 = 9^{\circ}\text{C}$. Кроз

црпни бунар вода из главног резервоара је црпљена у водено купатило у коме се хладила, а потом кроз повратни бунар убацивала назад у модел подземног водоносног слоја. Вредности запреминског протока воде кроз оба бунара износиле су 1 l/min и одговарале су вредности протока која је одређена на основу приказане теорије сличности (Табела 1.).

2. Наредних 920 s извођења експеримента, тј. период од 910 s до 1830 s, одговарао је пролећном периоду опоравка термичке енергије, када систем не обавља грејно-расхладну функцију и не делује топлотним поремећајем на подземни водоносни слој. Током тог периода подземни водоносни слој се, након убацивања охлађене повратне воде током претходне зимске сезоне, спонтано враћа у почетно стање. Током ове фазе водено купатило, као модел спреге спољашњег са унутрашњим кругом система ГТП, било је искључено, и вода није црпљена, нити враћа у резервоар.
3. Трећа фаза експеримента обухваћена је временским периодом од 1830 s до 2740 s његовог извођења, у коме је симулиран летњи црпно-повратни период рада система. Током тог периода, када систем ради у режиму хлађења, топлотно искоришћена загрејана подземна вода убацивана је назад у подземни водоносни слој. Вредност њене температуре, која је за $\Delta \vartheta_{\text{п}} = 5^{\circ}\text{C}$ виша од температуре ненарушеног подземног водоносног слоја износила је $\vartheta_{\text{пов}}^{\text{лето}} = \vartheta_{\text{f}} + \Delta \vartheta_{\text{п}} = 14 + 5 = 19^{\circ}\text{C}$, и уједно је представљала вредност температуре воде на коју је било подешено водено купатило, које је радило у режиму грејања.
4. Временом трајања експеримента од 2740 s до 3650 s, обухваћена је четврта и последња фаза извођења експеримента, која одговара јесењем периоду опоравка термичке енергије. Током тог радног периода систем топлотне пумпе не ради. Због тога се аквифер, након убацивања загрејане повратне воде током претходне летње сезоне, спонтано враћа у почетно стање. У овој фази експеримента, аналогно другој фази, односно пролећном радном периоду, водено купатило било је искључено, а вода није црпљена нити враћана у резервоар.

На описаном моделу отвореног система ГТП, познате геометрије подземног водоносног слоја и геометрије црно-повратног пара бунара, те за дефинисан временски период трајања сваке од фаза мерења, као и дефинисане радне параметре експеримента: брзину струјања и температуру природног тока подземне воде, запремински проток црпне, односно повратне воде, и температурску разлику између природног тока подземне воде и повратне воде (Табела 1.), анализиран је утицај растојања између црног и повратног бунара на температурно поље које се формира у подземном водоносном слоју при раду отвореног система ГТП током једне грејно-расхладне сезоне.

Како би експериментом била обухваћена оба режима рада отвореног система ГТП, мерења су спроведена у три серије - две серије мерења за случај континуалног и једна серија мерења за случај цикличног режима рада. Серије су се разликовале у зависности од међусобног положаја пара црног и повратног бунара током извођења експеримента:

1. Током анализе континуалног режима рада положај бунара био је фиксан у свим фазама експеримента, при чему су проучавана два случаја:
 - 1.а. низводан положај повратног бунара,
 - 1.б. узводан положај повратног бунара,
2. При анализи цикличног режима рада положај бунара био је мењан током мерења. У првој фази извођења експеримента, када је убацивана хладнија вода у резервоар, положај повратног бунара био је узводан. На крају друге фазе, тј. непосредно пре почетка треће фазе и убацивања топлије воде у резервоар, положај бунара био је мењан, тако да је положај повратног бунара постајао низводан.

У оквиру све три серије, мерења су вршена за случај наведена четири различита положаја црног и повратног бунара. Свака од серија мерења извршена је у већем броју понављања ради добијања поузданих експерименталних података.

3.4. Приказ експерименталних резултата

Приказ експерименталних резултата, у функцији параметара прототипа отвореног система ГТП, дат је за сваку од серија мерења понаособ.

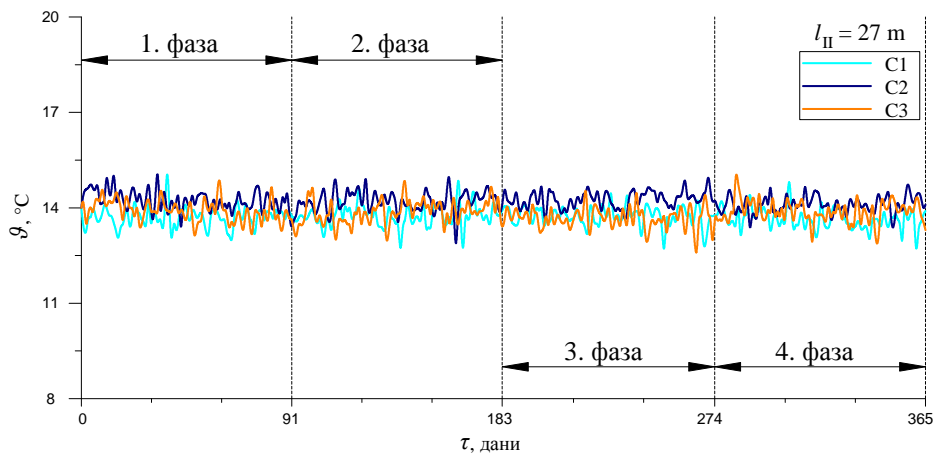
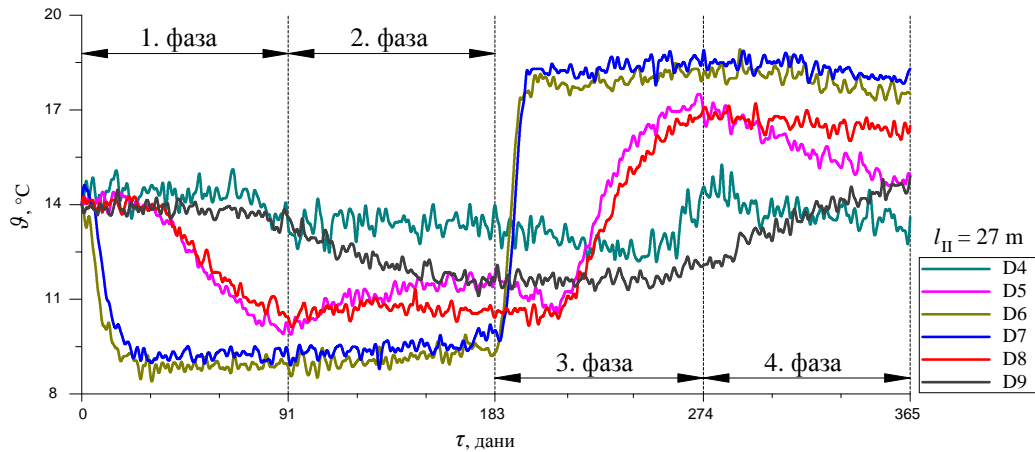
Најпре су, за случај II положаја бунара, приказане варијација температуре у одговарајућим мерним тачкама током целокупног периода извођења експеримента. С обзиром да ове промене температуре истовремено представљају њене годишње варијације унутар реалног подземног водоносног слоја, приказане су у функцији анализираних једногодишњег радног периода реалног система ГТП, а одговарају растојању између бунара од 27 m.

Затим је дата графичка анализа утицаја растојања од положаја бунара на температурне промене у подземном водоносном слоју. Она је спроведена при истом положају бунара, а за сваки радни период система понаособ. Разматрано је растојање у два правца: растојање у правцу струјања подземне воде - подужно растојање, као и растојање управно на правац струјања подземне воде - попречно растојање. При анализи подужног растојања дат је упоредни приказ температурних профила дуж подземног водоносног слоја у оси 4,5 m удаљеној од осе која спаја пар бунара - централне осе аквифера (D1-D9), у различитим временским тренуцима. Анализа утицаја попречног растојања од централне осе аквифера такође је спроведена приказом температурних профила дуж подземног водоносног слоја, али за три различите осе: за саму осу бунара (C1-C9), за осу 4,5 m удаљену од осе бунара (D1-D9), те за осу 9 m удаљену од осе бунара (E1-E9). У оквиру 1. и 3. фазе рада, када су температурне варијације највеће, приказани су резултати за три различита временска тренутка, док је за 2. и 4. фазу рада дат упоредан приказ у два временска тренутка.

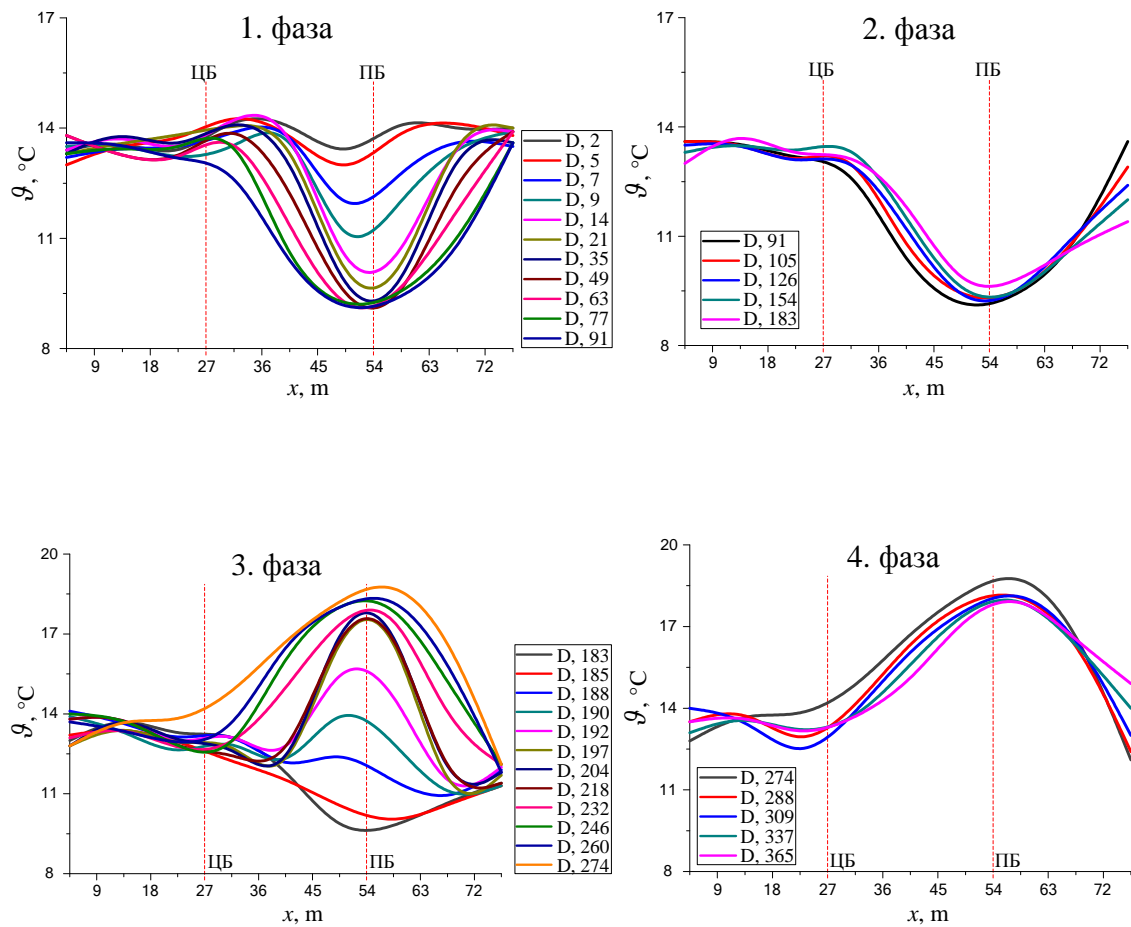
На крају приказа експерименталних резултата, дата је анализа утицаја различитих растојања између бунара на варијације температуре у подземном водоносном слоју. За сва четири анализираних растојања између бунара приказане су промене температуре у подужном правцу, у оси 4,5 m удаљеној од осе бунара (D1-D9), на крају зимског и летњег радног периода система ГТП.

3.4.1. Мерни резултати при континуалном режиму рада ГТП и низводном положају повратног бунара

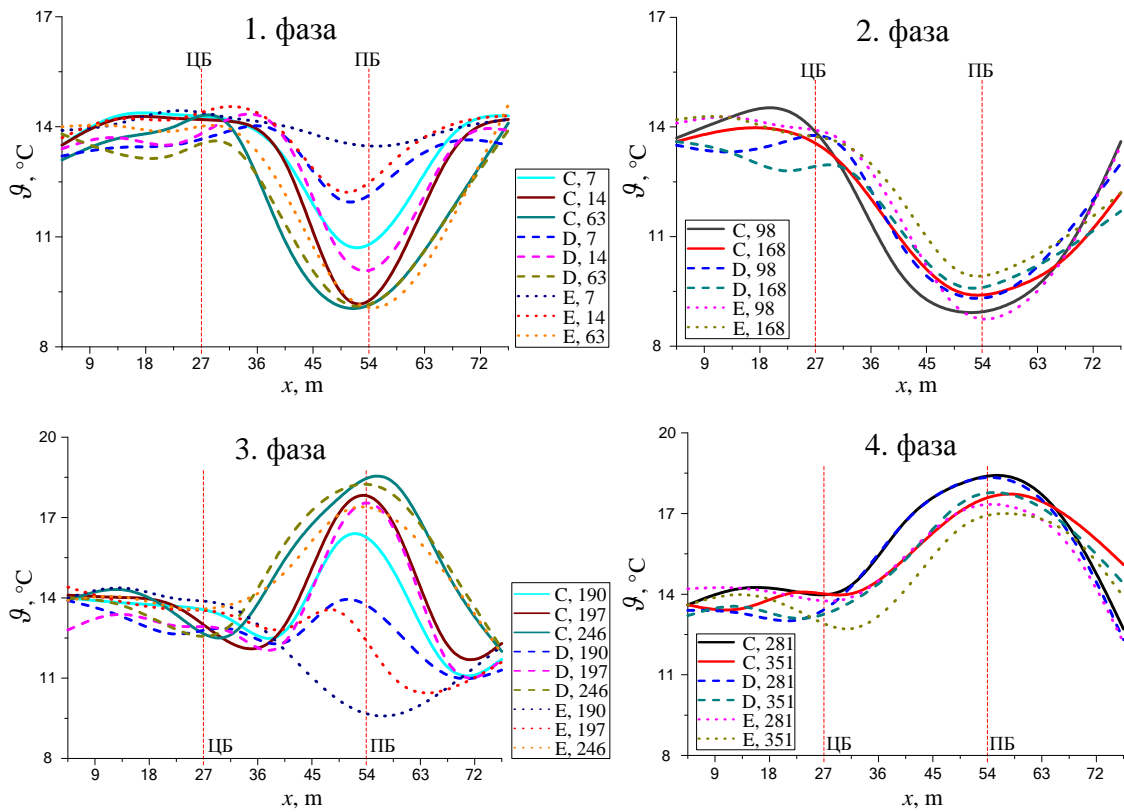
На слици 38.а приказане су промене температуре у подземном водоносном слоју низводно од црпног бунара, у оси на 4,5 m растојања од осе бунара. Мерним местима симетрично је обухваћен повратни бунар: мерна места D4, D5 и D6 налазе се између црпног и повратног бунара, а мерна места D7, D8 и D9 низводно од повратног бунара. Промене температуре у централној оси аквифера, узводно од црпног бунара (мерна места C1, C2 и C3) приказане су на слици 38.б.



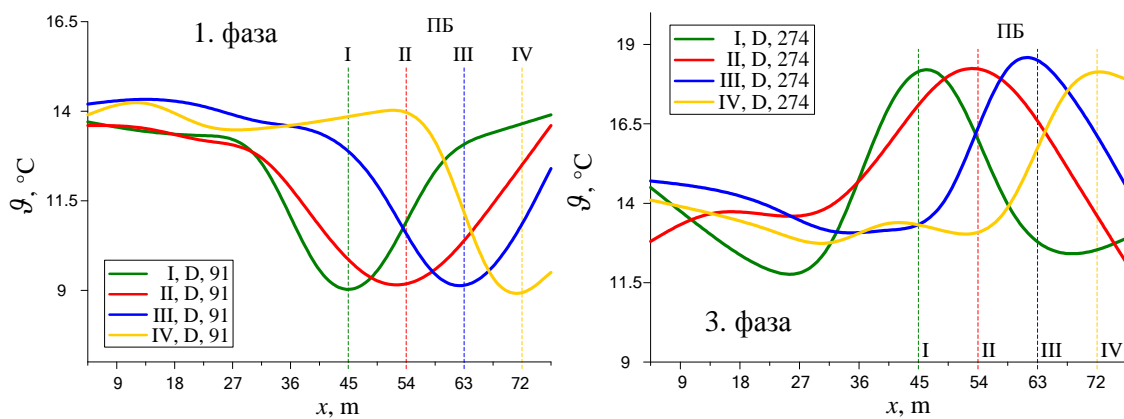
Слика 38. Годишње варијације температуре унутар аквифера при континуалном режиму рада и низводном положају повратног бунара



Слика 39. Температурне промене дуж аквифера (D1-D9) при континуалном режиму рада и низводном положају повратног бунара ($l_{II} = 27$ m)

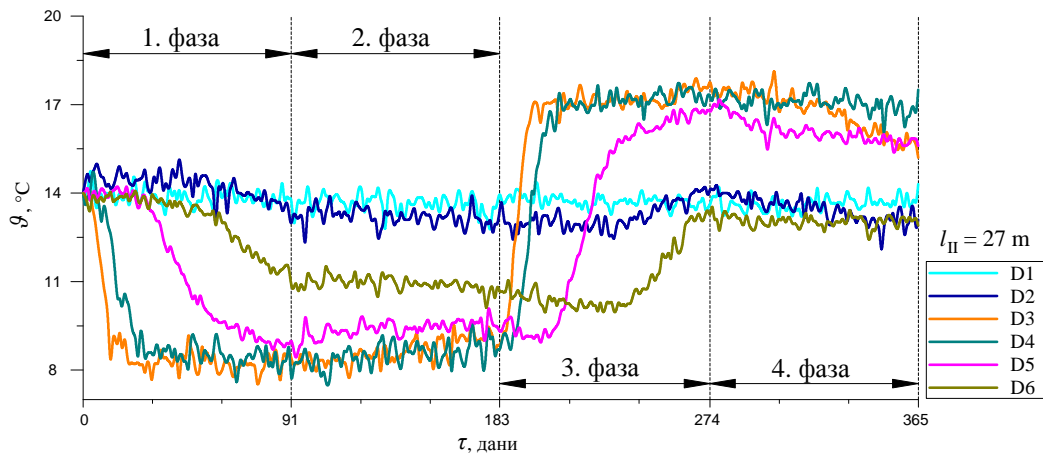


Слика 40. Утицај попречног растојања од осе бунара на температурне промене у подземном водоносном слоју при континуалном режиму рада и низводном положају повратног бунара ($l_{II} = 27$ m)

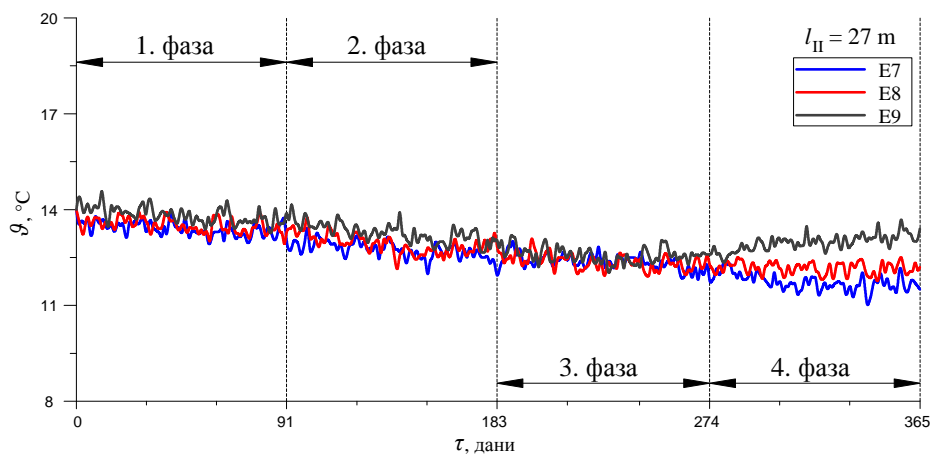


Слика 41. Утицај растојања између бунара на температурно поље у подземном водоносном слоју при континуалном режиму рада и низводном положају повратног бунара

3.4.2. Мерни резултати при континуалном режиму рада ГТП и узводном положају повратног бунара



а) узводно од црпног бунара

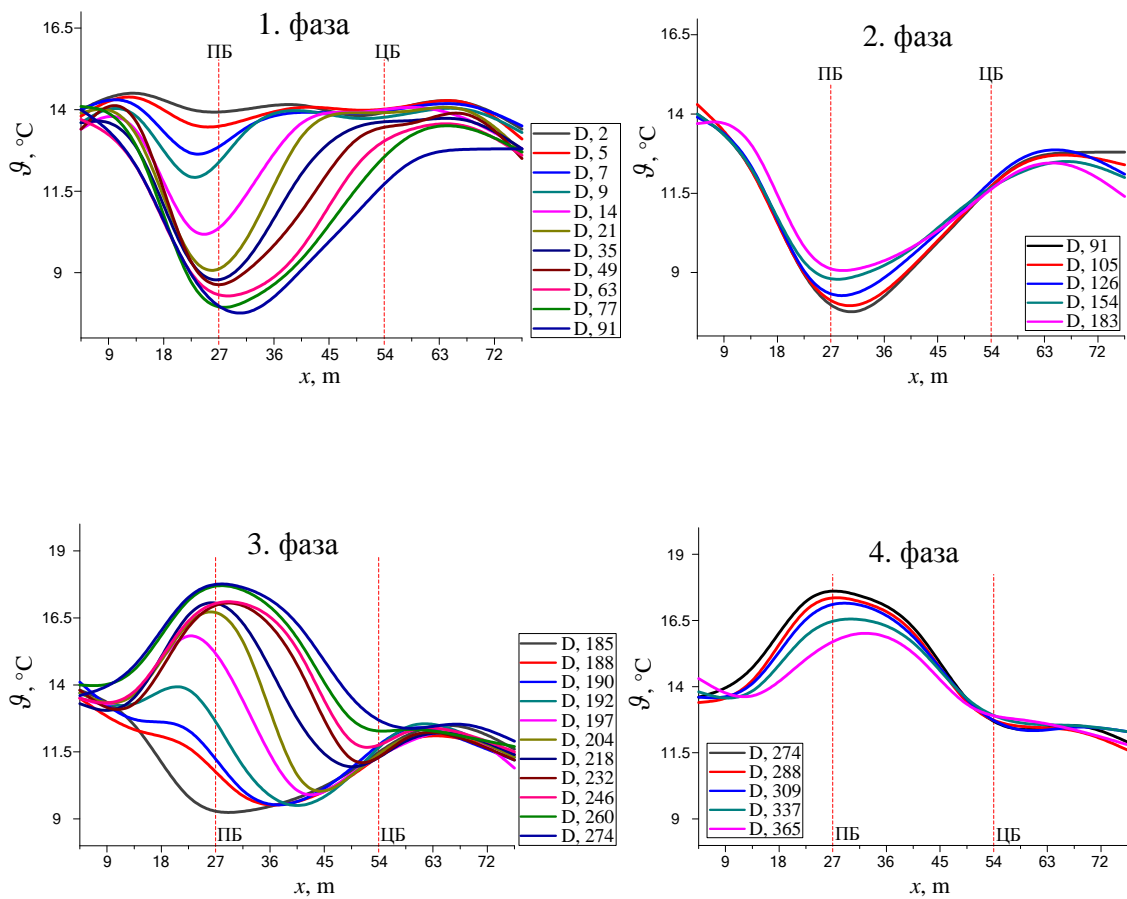


б) низводно од црпног бунара

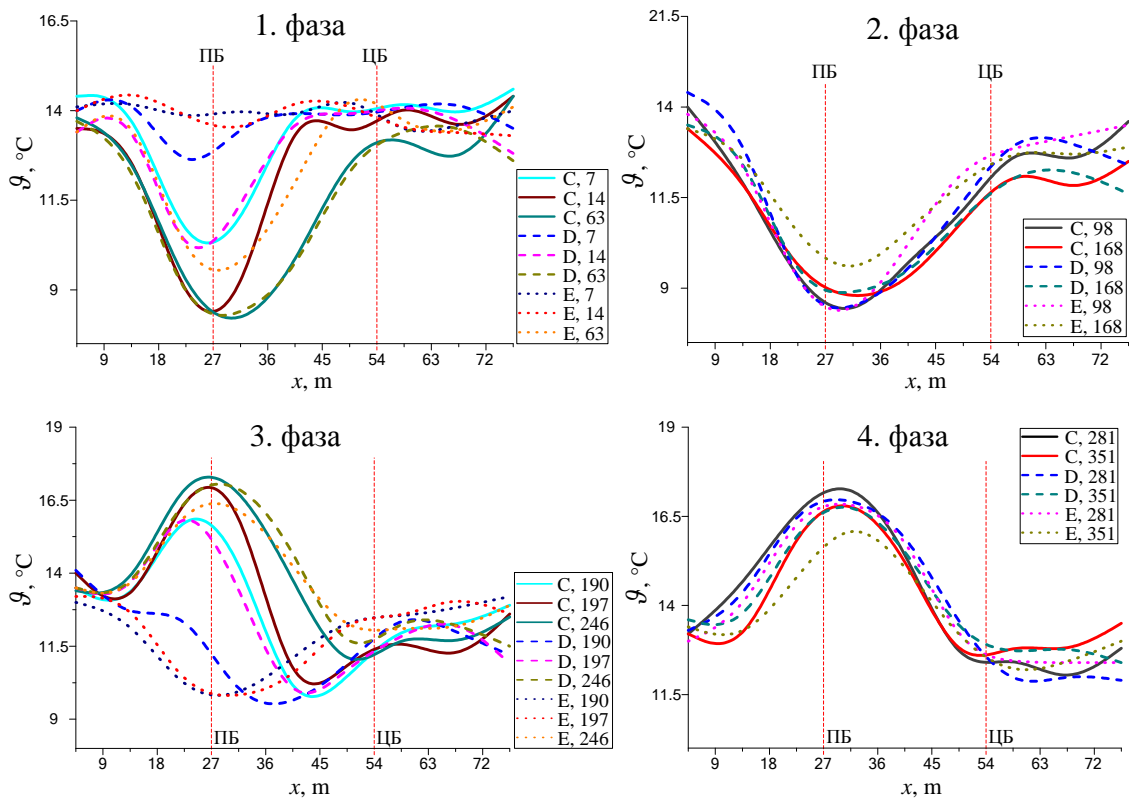
Слика 42. Годишње варијације температуре у аквиферу при континуалном режиму рада и узводном положају повратног бунара

Сликом 42.а обухваћене су промене температуре узводно од црпног бунара, у оси 4,5 m удаљеној од осе бунара. Мерним местима симетрично је обухваћен повратни бунар: D1, D2 и D3 налазе се узводно од повратног бунара, а D4, D5 и

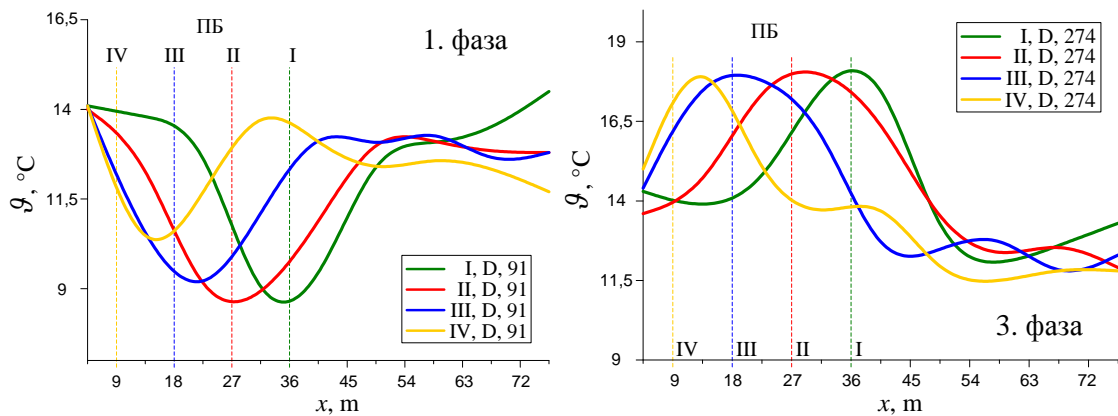
D6 су између црпног и повратног бунара. Промене температуре у оси 9 м удаљеној од осе бунара, низводно од црпног бунара (мерна места E7, E8 и E9) приказане су на слици 42.б.



Слика 43. Температурне промене дуж аквифера (D1-D9) при континуалном режиму рада и узводном положају повратног бунара ($l_{II} = 27$ m)



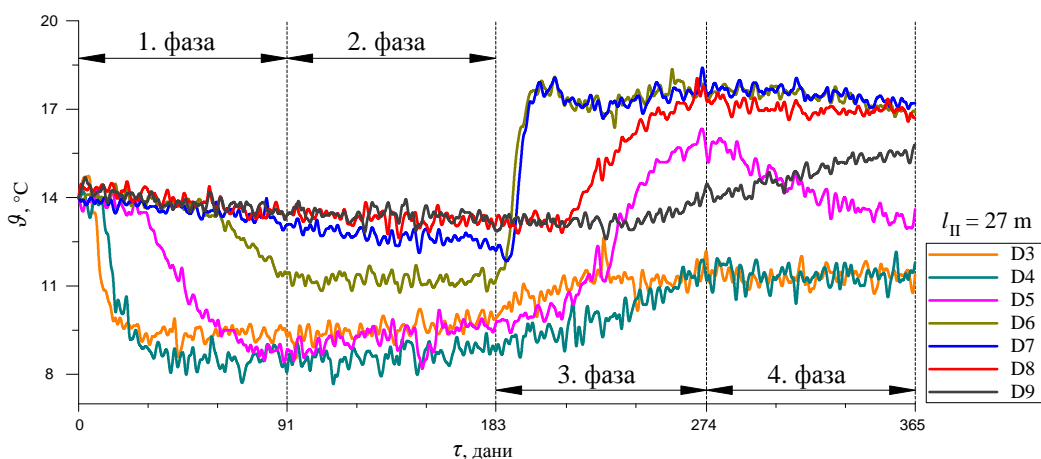
Слика 44. Утицај попречног растојања од осе бунара на температурно поље у аквиферу при континуалном режиму и узводном положају повратног бунара ($l_{II} = 27$ m)



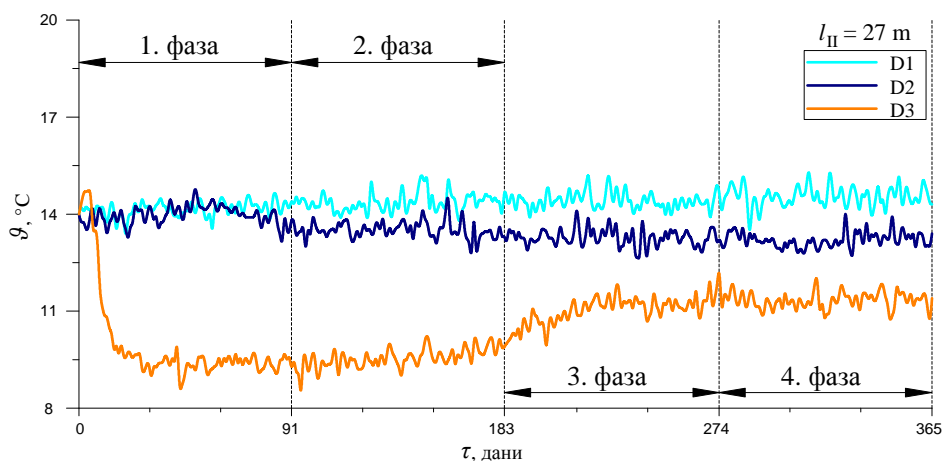
Слика 45. Утицај растојања између бунара на температурно поље у аквиферу при континуалном режиму рада и узводном положају повратног бунара

3.4.3. Мерни резултати при цикличном режиму рада ГТП

На слици 46.а приказане су промене температуре у подземном водоносном слоју низводно од првог бунара (мерна места D4-D9) и у најближе постављеном мерном месту узводно од њега (D3), за осу на 4,5 m растојања од осе бунара (услед цикличног режима рада ГТП, у 1. фази први бунар представља повратни бунар, док је у 3. фази он црпи бунар). Промене температуре узводно од првог бунара (мерна места D1, D2 и D3) приказане су на слици 46.б.

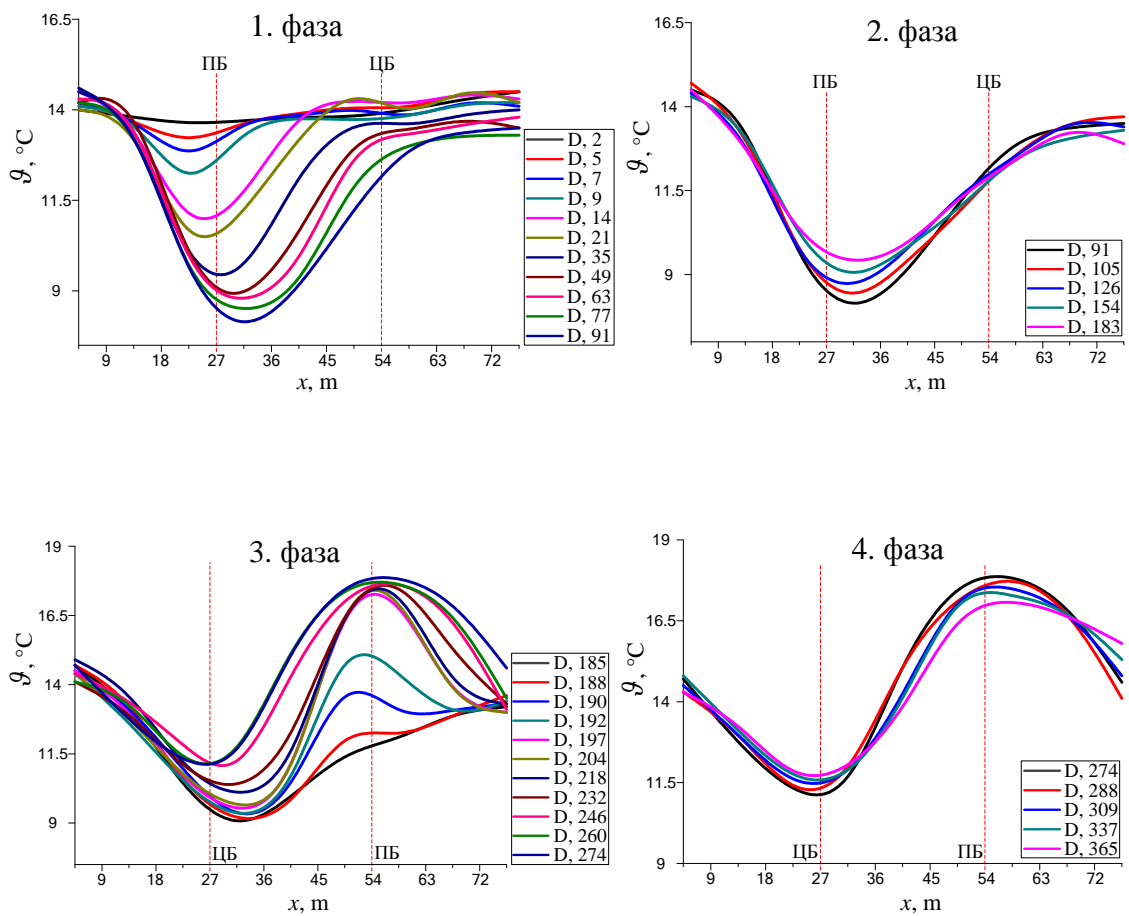


а) низводно од првог бунара

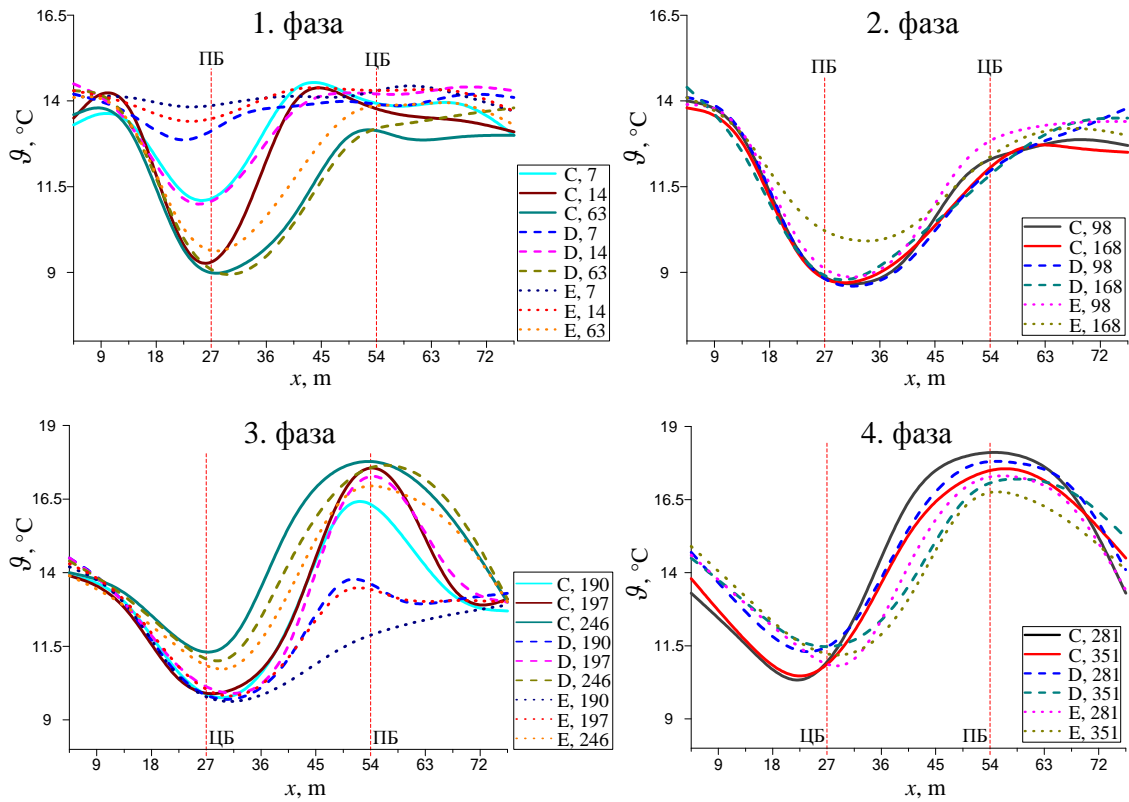


б) узводно од првог бунара

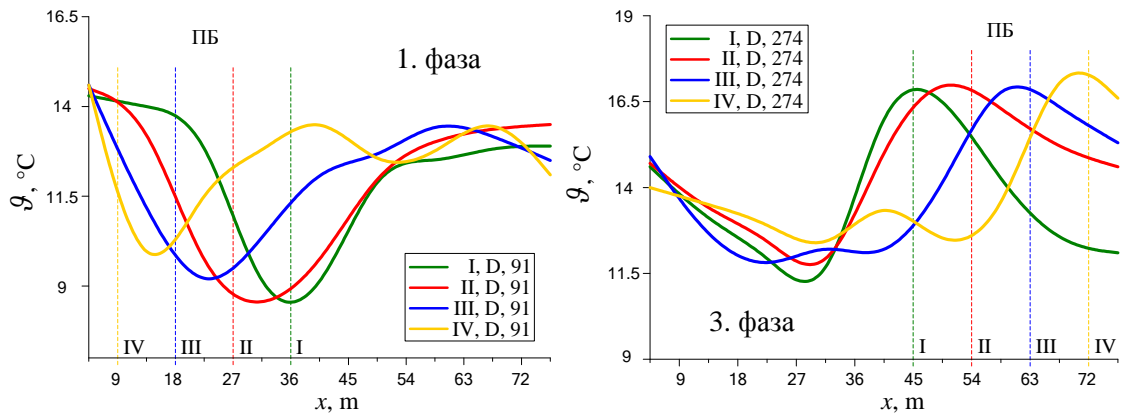
Слика 46. Годишње варијације температуре у подземном водоносном слоју при цикличном режиму рада система ГТП



Слика 47. Температурне промене дуж подземног водоносног слоја (D1-D9) при цикличном режиму рада система ($l_{II} = 27$ м)



Слика 48. Утицај попречног растојања од осе бунара на температурне промене у подземном водоносном слоју при цикличном режиму рада ($l_{II} = 27 \text{ m}$)



Слика 49. Утицај растојања између бунара на температурно поље у подземном водоносном слоју при цикличном режиму рада система

3.5. Анализа резултата

На основу анализе експерименталних података, приказаних на сликама 38-49, могуће је утврдити извесне законитости, које важе у случају сва три анализирана радна режима:

- **Најинтензивније промене температуре унутар подземног водоносног слоја одвијају се у околини повратног бунара. Са повећањем подужног растојања од повратног бунара утицај зоне повратне воде на температурно поље у подземном водоносном слоју опада.**

При континуалном режиму рада система и низводном положају повратног бунара највеће промене температуре регистроване су најближе повратном бунару - на мерним местима D6 и D7 која се налазе на растојању од 4,5 m узводно, односно низводно, од њега. Са повећањем растојања за 9 m - мерна места удаљена 13,5 m од повратног бунара (D5 узводно, D8 низводно), односно за још додатних 9 m - мерна места удаљена 22,5 m од повратног бунара (D4 узводно - најближе црпном бунару, и D9 низводно најдаље од повратног бунара), уочава се опадање температурних варијација унутар подземног водоносног слоја. Такође се може уочити да је утицај зоне повратне воде, узводно и низводно од повратног бунара, на растојањима већим од половине растојања између бунара (D4, D9) знатно блажи него у случају мањих растојања (D5-D9). У подручју узводно од црпног бунара утицај ове зоне на температурно поље у подземном водоносном слоју је занемарљив, с обзиром да вредности измерених температура (C1, C2, C3) нису значајно одступале од вредности природне температуре подземног водоносног слоја.

При континуалном режиму рада система и узводном положају повратног бунара највеће промене температуре измерене су најближе повратном бунару - на мерним местима D3 и D4 која се налазе на растојању од 4,5 m узводно, односно низводно, од њега. Са повећањем растојања на 13,5 m низводно од повратног бунара (D5), односно на 22,5 m низводно од повратног бунара (D6), уочава се опадање температурних варијација унутар подземног водоносног слоја. Истовремено је уочено да је утицај зоне

повратне воде на промене температурне узводно од повратног бунара, на растојањима једнаким (D2) или већим од половине растојања између бунара (D1), знатно блажи, готово незнатан, у поређењу са мањим растојањима. У подручју низводно од црпног бунара, на растојањима једнаким (E8) или мањим од половине растојања између бунара (E7), зона хладне повратне воде утиче на пад температуре у подземном водоносном слоју током 3. и 4. фазе рада система.

И при цикличном режиму рада система највеће промене температуре уочене су најближе повратном бунару, али се, због цикличног „премештања“ положаја повратног бунара, област унутар подземног водоносно слоја на коју зона повратне воде има највећи утицај такође циклично премешта. Током зимског радног периода (1. фаза), услед формирања зоне хладне повратне воде, до највећег пада температуре долази у мерним местима која се налазе у близини првог (повратног) бунара - D3 и D4, постављеним 4,5 m узводно, односно низводно од првог бунара. Са повећањем низводног растојања од првог бунара на: 13,5 m (D5), 22,5 m (D6), односно 31,5 m (D7), пад температуре је све блажи. У летњем радном периоду (3. фаза), највећи пораст температуре је у мерним тачкама најближим другом (повратном) бунару: D6 и D7, постављеним 4,5 m узводно, односно низводно од њега, а затим редом све блажи у тачкама такође узводно и низводно симетрично постављеним у односу на други бунар: D5 и D8 (13,5 m удаљене), D4 и D9 (22,5 m удаљене). Утицај зоне повратне воде на промене температуре у подземном водоносном слоју узводно од првог бунара, на растојању једнаком (D2) или већем од половине растојања између бунара (D1), је занемарљив.

- **Са повећањем попречног растојања од осе бунара утицај зоне повратне воде на температурно поље у подземном водоносном слоју опада.**

У случају сва три анализирана радна режима, након четрнаест дана трајања грејно-расхладних периода температура у попречној оси повратног бунара опада (1. фаза), односно расте (3. фаза), на вредност температуре приближно једнаку температури повратне воде (C,14 и C197), док је промена температуре, након истог времена рада система, у оси постављеној

на 9 m попречног растојања од осе бунара незнатна (E,14 и E197). Међутим, услед ширења зоне повратне воде у попречном правцу, на крају 1. и 3. фазе рада долази до промене температуре унутар аквифера на вредност температуре повратне воде и у најудаљенијој анализираној оси (E63, E246).

- **На основу вредности температуре у оси црпног бунара на крају црпно-повратних радних периода, може се установити да ли је зона промене температуре доспела до црпног бунара и на тај начин утицала на степен ефикасности рада система ГТП.** Уколико је на крају зимског радног периода температура у оси црпног бунара нижа од температуре природног подземног водоносног слоја следи да је зона хладне повратне воде доспела до црпног бунара. Последица тога је снижавање температура воде која се црпи из подземног водоносног слоја током зимске грејне сезоне, што утиче на снижавање коефицијента грејања топлотне пумпе. Аналогно томе, уколико је на крају летњег радног периода температура у оси црпног бунара виша од температуре природног подземног водоносног слоја следи да је зона топле повратне воде доспела до црпног бунара. То утиче на пораст вредности температуре воде која се црпи из подземног водоносног слоја током летњег радног периода, односно снижавање коефицијента хлађења.

У случају континуалног режима рада система и низводног положаја повратног бунара зона хладне повратне воде доспева до црпног бунара при I и II положају бунара, који одговарају растојањима између бунара од 9 m, односно 27 m. У случају растојања између бунара од 45 m (III положај бунара) и 63 m (IV положај бунара) не долази до продора повратне воде током зимског радног периода. Зона топле повратне воде доспева до црпног бунара само при I положају бунара. Наиме, услед природног струјања подземне воде малом брзином, током пролећног периода опоравка зона хладне повратне воде померила се низводно од повратног бунара само при најмањем анализираном растојању између бунара. Због тога она нема утицаја на зону топле повратне воде која се формира у аквиферу током летњег радног периода. При већим растојањима између бунара (од II-IV положаја) на почетку 3. фазе рада система зона хладне повратне воде

доспева у област повратног бунара, те утиче на дужину простирања зона топле повратне воде.

Када је у питању континуалан режим рада и узводан положај повратног бунара зона хладне повратне воде доспева до црпног бунара при свим анализираним растојањима. Са друге стране, зона топле повратне воде доспева до црпног бунара само при најмањем анализираним растојању. Наиме, зона хладне повратне воде се током пролећног периода опоравка креће низводно и доспева низводно од црпног бунара у случају најмањег растојања између бунара (I положај), па нема утицаја на зону топле повратне воде која се формира. При већим растојањима између бунара (од II-IV положаја) зона хладне повратне воде се на почетку летње сезоне налази у области црпног бунара, због чега је и температура црпне воде нижа од природне температуре подземног водоносног слоја током летњег радног периода.

При цикличном радном режиму зона хладне повратне воде такође доспева до црпног (другог) бунара при свим анализираним растојањима. Међутим, као последица њеног низводног кретања током пролећа, као и услед цикличне промене положаја повратног бунара, зона топле повратне воде током летње сезоне не доспева до црпног првог бунара ни у случају најмањег анализираним растојања.

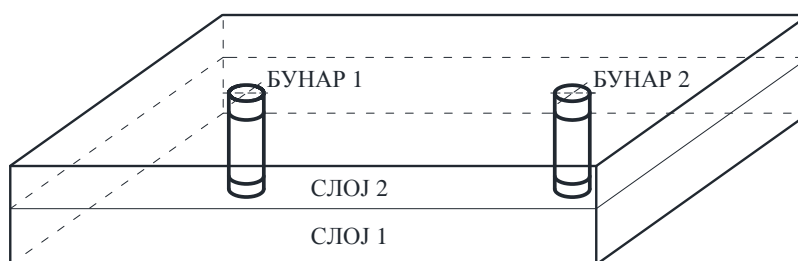
4. Нумеричка анализа простирања топлоте кроз слојевити подземни водоносни слој при раду отвореног система ГТП

Досадашњи покушаји предвиђања температурског поља које се формира у подземном водоносном слоју при раду отвореног система ГТП, спроведени нумеричким моделирањем, најчешће не узимају у обзир брзину струјања подземних вода кроз водоносни слој. Такође, ни тродимензионалност целокупног процеса није увек разматрана. Управо због тога формиран је нови нумерички модел којим је, поред наведених утицаја - тродимензионалности развоја температурског поља и брзине струјања подземних вода, обухваћен и утицај слојевите хетерогености водоносног слоја на температурско поље, као и утицај, како низводног тако и узводног, положаја повратног бунара у односу на црпни бунар. Поставке математичког и нумеричког новоформираног модела приказане су у 4. поглављу. За нумеричко решавање система једначина, које чине основне билансне макроскопске једначине за случај неустаљеног струјања нестишљивог флуида кроз хомогену и изотропну засићену порозну средину, коришћен је софтвер отвореног програмског кода OpenFOAM. Доменом интеграције обухваћен је физички модел подземног водоносног слоја, односно спољашњег круга отвореног система ГТП, који је истоветан са реалном ситуацијом оствареном при извођењу експеримената. Поред геометријских, и сви радни

параметри нумеричког модела, помоћу којих су дефинисани његови почетни и гранични услови, и то за сваку од фаза понаособ, одговарају параметрима лабораторијског модела на коме су извршена мерења.

4.1. Поставка физичког модела

Да би могло да се изврши поређење резултата добијених нумеричким моделирањем и података добијених помоћу сопствених експеримената, замишљен је физички модел спољашњег круга отвореног система ГТП, истоветан са реалном ситуацијом оствареном при извођењу експеримената. Затворен подземни водоносни слој чине два хомогена, изотропна и потпуно засићена порозна слоја, различитих дебљина, као и различитог гранулометријског и минералног састава (Слика 50.). Хидрогеолошке карактеристике ових слојева - порозност и коефицијент филтрације, одговарају експериментално одређеним вредностима приказаним у табели 1, при чему слој 1 одговара слоју шљунка ($\phi_1 = 0,36$, $K_1 = 0,00999$ m/s), а слој 2 слоју крупног кварцног песка ($\phi_2 = 0,38$, $K_2 = 0,00905$ m/s). Вредности термофизичких својстава чврстих честица унутар слојева подземног водоносног слоја (Табела 3.), које су сматране сталним и независним од промене температуре, узете су из литературе [79].



Слика 50. Физички модел подземног водоносног слоја

При моделирању, као и при извођењу експеримента, анализирани су температурне промене у подземном водоносном слоју проузроковане коришћењем тог слоја као извора, односно понора, топлоте при раду топлотне пумпе у једној грејно-расхладној сезони. Сви геометријски и радни параметри

одговарају параметрима лабораторијског модела на коме су извршена мерења (Табела 1.).

Радни флуид - подземна вода, сталне температуре у термички ненарушеном делу простора ($\vartheta_f = 14^\circ\text{C}$), струји кроз подземни слој, димензија $L_x \times L_y \times L_z = 900 \times 393 \times 150 \text{ mm}$, са сталном вредношћу запреминског протока $q_{V,f} = 590 \text{ ml/min}$. Ток подземне воде је ламиран, док су њена термофизичка својства (Табела 3.), усвојена из литературе [80], сматрана сталним и независним од температуре⁴.

Табела 3. Термофизичке карактеристике чврсте и течне фазе слојева аквифера

Величина	СЛОЈ 1 сл. шљунка	СЛОЈ 2 слој песка	Подземна вода
Густина, ρ , kg/m^3	2300	2710	998.2
Специф. топлотни капацитет, c_p , kJ/(kg K)	840	858	4183
Топлотна проводљивост, λ , W/(m K)	2,46	4,19	0,599

Експлоатација подземног водоносног слоја врши се помоћу пара бунара - црпног и повратног, пречника $d_{\text{bun}} = 16 \text{ mm}$. Бунар чини цев, наведеног унутрашњег пречника и дужине $h_{\text{bun}} = 150 \text{ mm}$, с обзиром да се простире по целокупној дубини аквифера. Цев се делом састоји од непропусног омотача, а делом од проточне филтер мреже. Црпљење и убацивање повратне воде врши се кроз филтер мрежу омотача цеви, висине 100 mm , постављене 20 mm од доње површи аквифера, осно симетрично у свим правцима. При томе стална вредности запреминског протока црпне и повратне воде износи $q_{V,\text{п}} = 1 \text{ l/min}$, док је температура повратне воде за $\Delta\vartheta_{\text{п}} = 5^\circ\text{C}$ нижа, односно виша, од температуре термички ненарушеног водоносног слоја, у зависности од радног режима.

⁴ Утицај промене температуре на термофизичке карактеристике воде - густину и вискозност, као и на топлотни капацитет и топлотну проводљивост воде, може се занемарити уколико је максимална разлика између температуре повратне воде и природне температуре подземног водоносног слоја мања од $10\text{-}15^\circ\text{C}$ [50], што је управо случај у овом нумеричком моделу и одговарајућем експерименту.

Нумеричким моделом симулиран је једногодишњи рад реалног постројења ГТП, који одговара временском периоду извођења нумеричког експеримента од 3650s. Симулације, којима су анализирани све четири фазе рада система, спровођене су за четири различита растојања између бунара $L_b = 100/300/500/700\text{mm}$.

4.2. Поставка математичког модела

Нумеричке симулације вршене су у три серије, за случај сва три анализираних режима отвореног система ГТП: континуалан режим са низводним положајем повратног бунара, континуалан са узводним положајем повратног бунара и цикличан режим рада. Серије су се разликовале у зависности од међусобног положаја пара црпног и повратног бунара током извођења нумеричких прорачуна, односно њима дефинисаног сталног или променљивог у времену граничног услова положаја извора и понора флуида.

При изради математичког модела усвојено је да се изједначавање температуре подземне воде и чврстих честица аквифера врши тренутно, што значи да влада локална термичка равнотежа између фаза, као и да се утицај ефеката дисперзије и утицај кондуктивних топлотних губитака кроз слојеве изнад и испод подземног водоносног слоја могу занемарити.

4.2.1. Основне билансне једначине

Према усвојеним претпоставкама физичког модела простирања топлоте при раду отвореног система ГТП, основне билансне макроскопске једначине за случај неустаљеног струјања нестишљивог флуида кроз хомогену и изотропну засићену порозну средину, а које следе из осредњене једначине континуитета (2.9), осредњене једначине одржања количине кретања (2.13) и осредњене једначине одржања енергије (2.24), имају следеће облике:

- осредњена једначина континуитета

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0 \quad , \quad (4.1)$$

- осредњена једначина количине кретања:

$$\frac{1}{\phi} \frac{\partial V_i}{\partial t} + \frac{1}{\phi^2} \frac{\partial(V_i V_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{v_f}{k} V_i + \frac{v_f}{\phi} \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j \partial x_j}, \quad (4.2)$$

у којој је са $P = \langle p \rangle^f / \rho_f - g z$ означен кинематички притисак.

Једначина (4.2) у литератури је позната као Навије-Стокс-Брикманова једначина. Она следи из једначине (2.13), након што је у њој занемарен Forchheimer-ов пети члан са д.с.ј, који узима у обзир утицај инерцијалних ефеката у порозној средини. У овом случају то је потпуно оправдано с обзиром на изразито ламинарно струјање флуида. Наиме, карактеристични Рејнолдсови бројеви за разматране порозне средине су $Re < 1$.

- осредњена једначина енергије:

$$(\rho c)_{\text{eff}} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \frac{\partial(V_j \langle T \rangle)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} \right). \quad (4.3)$$

Термофизичке карактеристике слојева подземног водоносног слоја, које фигуришу у једначини (4.3), дефинисане су изразима:

- ефективни топлотни капацитет порозне средине:

$$(\rho c)_{\text{eff}} = \phi \rho_f c_{p,f} + (1 - \phi) \rho_s c_s, \quad (4.4)$$

- ефективна топлотна проводљивост порозне средине:

$$\lambda_{\text{eff}} = \phi \lambda_f + (1 - \phi) \lambda_s, \quad (4.5)$$

Имајући у виду вредности физичких карактеристика како флуида, тако и чврсте фазе, ред величина термофизичких карактеристика на десној страни једначине (4.3) је $\approx 10^6$, па се ради ефикаснијег и стабилнијег нумеричког прорачуна користи облик једначине енергије који се добија њеним дељењем са $\rho_f c_{p,f}$, тј.:

$$k_t \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \frac{\partial (V_j \langle T \rangle)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_d \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} \right), \quad (4.6)$$

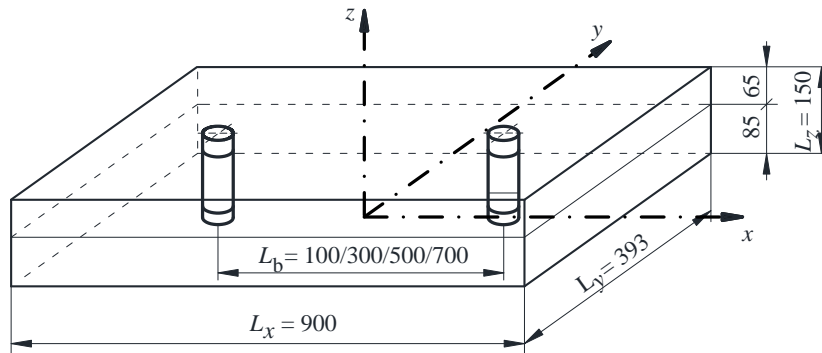
где су:

$$k_t = \phi + (1 - \phi) \frac{\rho_s c_s}{\rho_f c_{p,f}} \quad \text{и} \quad k_d = \phi \frac{\lambda_f}{\rho_f c_{p,f}} + (1 - \phi) \frac{\lambda_s}{\rho_f c_{p,f}}. \quad (4.7)$$

Како се ради о струјању нестишљивог флуида, једначина количине кретања и једначина енергије нису спрегнуте. То значи да се поље брзина и поље притисака најпре одређују из једначине континуитета (4.1) и једначине количине кретања (4.2), па се потом на основу једнозначно одређеног поља брзине из једначине (4.6) одређује поље температуре.

4.2.2. Домен интеграције и гранични услови

Доменом интеграције обухваћен је физички модел подземног водоносног слоја. За координатни систем усвојен је Декартов правоугли координатни систем десне оријентације, чији је почетак, због осносиметричности проблема, постављен у средишту доње основе (Слика 51.).



Слика 51. Положај координатног система

Да би систем једначина, које чине основне билансне једначине (4.1), (4.2), (4.6), уз једначине (4.4) и (4.5), које дефинишу термофизичке карактеристике водоносног слоја, и једначине (4.7), био једнозначно решен дефинисани су

гранични услови. Они су одређени на основу геометрије лабораторијског модела спољашњег круга отвореног система ГТП и радних параметара током извођења експеримената. С обзиром на четири фазе рада нумеричког модела, разликују се по фазама. Задати су: на улазним површима флуидног тока у домен интеграције (улазна површ устаљене ненарушене флуидне струје и улазна површ флуида кроз омотач повратног бунара), затим на месту контакта флуида са зидовима, односно чврстим површима, које чине омотач модела, те на површима која представљају места излаза флуида из домена интеграције, тј. на излазној површи из модела подземног водоносног слоја и излазној површи флуида кроз омотач црпног бунара. Приказ почетних и граничних услова по фазама, којима су дефинисани притисак, температура и брзина струјања радног флуида на граничним површима модела, дат је у табели 4.

Табела 4. Почетни и гранични услови нумеричког модела по фазама

Површ	Притисак	Температура и брзина струјања			
		1. фаза	2. фаза	3. фаза	4. фаза
УЛАЗ $x = -L_x/2$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\mathcal{G}_f _{t=0} = 14^\circ\text{C}$, за $x, y, z \in \Omega$			
		$\mathcal{G}_f = 14^\circ\text{C} = \text{idem}$, $q_{v,f} = 590\text{ml/min} = \text{idem}$			
ИЗЛАЗ $x = L_x/2$	$P = 0$	$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$			
ЗИД $y = \pm L_y/2$ $z = 0, z = L_z$ ЗИД ЦЕВИ $r = d_b/2$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} = 0$, $V = 0$			
Црпни бунар $r = d_b/2$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} = 0$ $q_v = 11/\text{min}$	$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} = 0$ $V = 0$	$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} = 0$ $q_v = 11/\text{min}$	$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} = 0$ $V = 0$
Повратни бунар $r = d_b/2$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\mathcal{G}_{\text{пов}} = 9^\circ\text{C}$ $q_v = -11/\text{min}$	$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} = 0$ $V = 0$	$\mathcal{G}_{\text{пов}} = 19^\circ\text{C}$ $q_v = -11/\text{min}$	$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial n} = 0$ $V = 0$

Положај црпног и повратног бунара унутар домена интеграције за анализирани радне режима дат је у табели 5.

Табела 5. Положај црпног и повратног бунара унутар домена интеграције

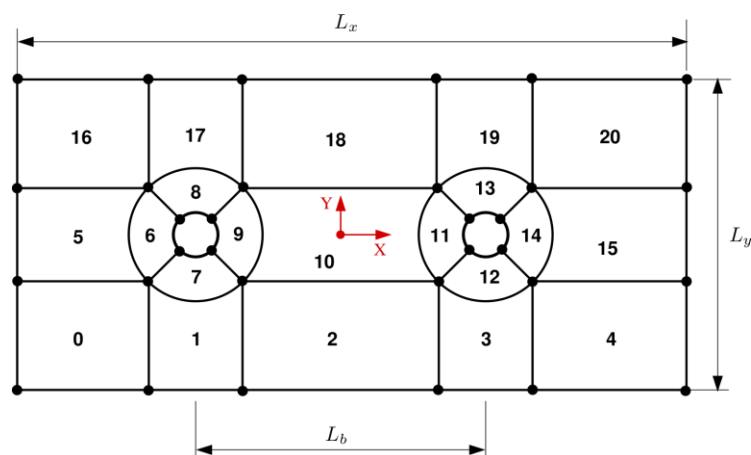
Радни режим	Континуалан режим рада и низводан ПБ	Континуалан режим рада и узводан ПБ	Цикличан режим рада	
			1. фаза	3. фаза
Црпни бунар (ЦБ)	БУНАР 1	БУНАР 2	БУНАР 2	БУНАР 1
Повратни бунар (ПБ)	БУНАР 2	БУНАР 1	БУНАР 1	БУНАР 2

4.3. Нумерички модел

За нумеричко решавање система једначина (4.1), (4.2) и (4.6) коришћена је „foam-extend-4.0“ [81] верзија софтвера отвореног програмског кода OpenFOAM [82]. Овај софтвера је базиран на методи коначних запремина, написан је у C++ програмском језику, и у оквиру њега постоји велики број програмских модула (класа) којима су описани поступци при нумеричком решавању једначина методом коначних запремина. Захваљујући отворености програмског кода, коришћењем постојећих класа и имплементацијом једначине енергије (4.6) у програмски код, направљена је одговарајућа апликација (солвер) којим се решава споменути систем једначина.

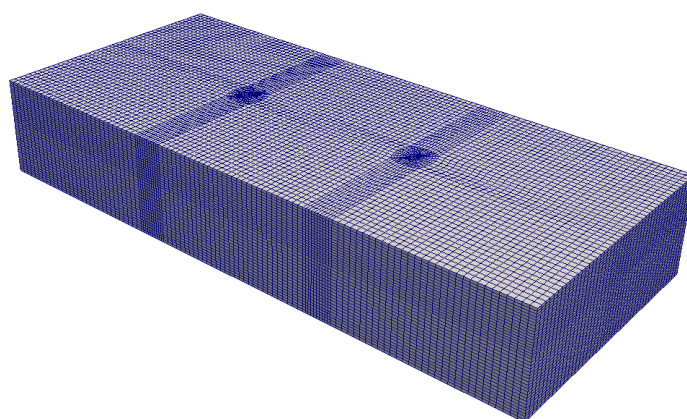
4.3.1. Генерисање нумеричке мреже

Дискретизацијом домена интеграције, дефинисаног у оквиру поглавља 4.2.2, добијена је одговарајућа нумеричка мрежа. При томе је прво извршена подела домена на одговарајуће блокове, а потом подела блокова на одговарајући број прорачунских ћелија. Топологија блокова при дискретизацији домена је приказана на слици 52.

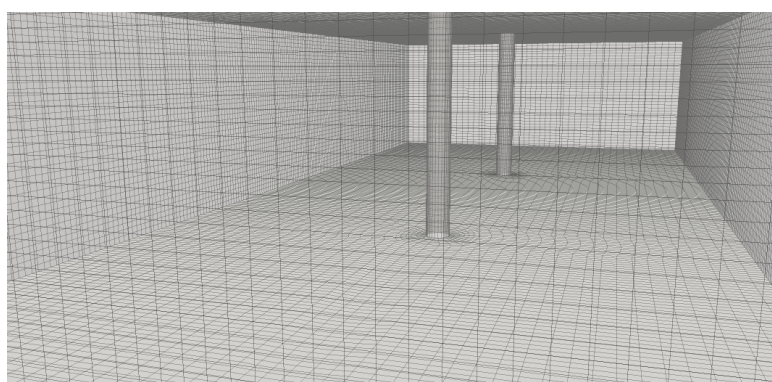


Слика 52. Темена и топологија блокова у равни x - y

Приликом дефинисања блокова дефинисане су и одговарајуће зоне у прорачунском домену, које одговарају различитим порозним срединама (слој 1 - шљунак, слој 2 - песак), и у њима су пре почетка прорачуна дефинисана одговарајућа физичка својства. Приликом поделе блокова на ћелије водило се рачуна да нема наглих прелаза између ћелија у суседним блоковима. Како је анализирано различито растојање између бунара, број ћелија по блоковима је задат параметарски, на основу познатих вредности тих растојања. Сходно том броју, бројеви ћелија у блоковима 0, 5, 16 и 4, 15, 20 су такође дефинисани параметарски, тако да услов непостојања наглих прелаза у величини суседних ћелија буде задовољен. На тај начин је постигнуто да се за нумерички прорачун сваког радног режима и при свим положајима бунара користи нумеричка мрежа са истим бројем ћелија. Та оптимална мрежа по питању ортогоналности и што мање асиметрије између суседних елемената у њој има 202312 ћелија. Извршен је прорачун и на мрежи са дупло већим бројем ћелија у сваком правцу за сва три анализирана режима рада, а при једном растојању између бунара. Добијени су идентични резултати, те је мрежа са 202312 ћелија коришћена за све прорачуне. Приказ те нумеричке мреже дат је на слици 53.



a) за случај $L_b = 300 \text{ mm}$



б) поглед са улазне површи прорачунског домена

Слика 53. Нумеричка мрежа

4.3.2. *Поставка нумеричког прорачуна*

Почетни услови унутар домена, као и гранични услови на границама домена, су задати сходно табели 4. На цилиндричним површима које одговарају црпном и повратном бунару, на основу познатог запреминског протока и проточне површине, израчуната је средња, константна брзина струјања и дефинисано је да је вектор брзине правца нормале те површи, тј. да вода радијално улази у црпни, односно радијално излази из повратног бунара.

Како се у систему једначина који се решава не појављује експлицитно притисак, тј. кинематички притисак, већ само његов градијент, онда је могуће

изабрати неку референтну вредност кинематичког притиска у односу на коју се рачунају вредности притиска у свим осталим тачкама домена. Та вредност не мора да буде физикално оправдана, јер је битна разлика притисака, а не његова сама вредност, те се стога, ради једноставности нумеричког прорачуна, задаје вредност $P = 0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ на излазу из домена. У оквиру нумеричког поступка за повезивање и итеративно решавање поља брзине и поља притиска из спрегнутог система једначине континуитета (4.1) и једначине количине кретања (4.2) коришћен је PISO (енг. Pressure Implicit with Splitting of Operators) алгоритам [83].

Изабран је временски корак од $\Delta t = 0,5 \text{ s}$, и при њему је максимална вредност Курановог броја увек била мања од 1, $Co_{\max} < 1$. За дискретизацију временског члана у једначинама (4.2) и (4.6) коришћена је имплицитна Ојлерова метода. Дискретизација конвективног члана у једначини количине кретања (4.2) је извршена коришћењем узводне схеме другог реда тачности (енг. linear upwind), док је за дискретизацију конвективног члана у једначини енергије (4.6) коришћена централна схема дискретизације са лимитерима (енг. limited linear). Дифузиони чланови су дискретизовани централном схемом дискретизације. За решавање добијеног система алгебарских једначина коришћен је итеративни поступак конјугованих градијената са прекондиционерима ради брже конвергенције решења за поље физичких величина у сваком временском кораку. Као критеријум за конвергенцију решења у итеративном поступку изабрана је вредност резидуала 10^{-6} за све физичке величине.

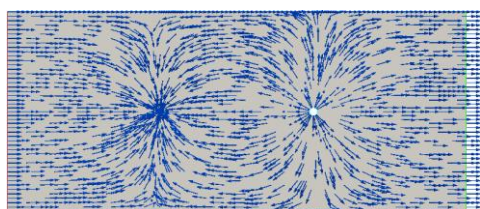
5. Провера тачности предвиђања нумеричког модела

У 5. поглављу приказана је провера поузданости предвиђања температурних промена у подземном водоносном слоју применом новоформираног нумеричког модела. Провера је најпре извршена помоћу сопствених експерименталних резултата, а потом и помоћу доступних експерименталних резултата других аутора. Сопствени резултати мерења добијени су на лабораторијском моделу слојевитог подземног водоносног слоја, током три серије извођења експеримената. Нумеричке симулације су такође вршене у три серије, тј. за случај сва три анализирана радна режима отвореног система ГТП. Верификација нумеричких резултата вршена је за сваку серију прорачуна, тј. за сваки режим рада, понаособ. У случају поређења са експерименталним резултатима других аутора, уз задржавање непромењеног система моделираних једначина које дефинишу неустаљено струјање нестишљивог флуида кроз хомогену и изотропну засићену порозну средину, нумерички модел је коригован у делу граничних услова и њиме су извршене две верификације резултатима мерења других аутора. Наиме, упоређени су нумерички са експерименталним резултатима за случај рада система геотермалне топлотне пумпе са 2 црпна и 3 повратна бунара - експеримент Гаоа и сар. (2013), као и за случај одређивања дводимензионалног устаљеног температурног поља при принудном хоризонталном струјању воде у засићеној порозној средини са вертикалном температурском разликом - експеримент Nagana и сар. (2002).

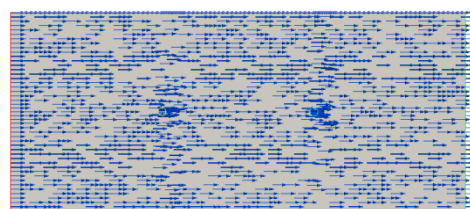
5.1. Приказ резултата нумеричких симулација

Приказ резултата нумеричких симулација дат је за сваку од серија нумеричког прорачуна понаособ, тј. за сва три анализирана радна режима отвореног система ГТП. Најпре је за случај II положаја бунара приказано поље брзина које се устали унутар подземног водоносног слоја у свакој од фаза. Затим је, за исти положај бунара, дат упоредни приказ температурних промена у појединим мерним тачкама подземног водоносног слоја, које су одређене експерименталним путем, и температурних промена у истоветним тачкама унутар домена интеграције, добијених путем нумеричких симулација. С обзиром да, на основу теорије сличности, ове промене температуре представљају годишње варијације температуре унутар реалног подземног водоносног слоја оне су дате у функцији анализираних једногодишњег радног периода реалног система ГТП. На крају упоредо је приказано поље температуре у x - y равни домена интеграције, која одговара равни у којој су постављени мерни уређаји унутар лабораторијског модела подземног водоносног слоја. Током зимског и летњег црпно-повратног радног периода, за сва четири анализирана растојања између бунара, дат је приказ температурног поља у четири временска тренутка, док је током пролећног и јесењег периода опоравка термичке енергије унутар аквифера дат упоредни приказ у два временска тренутка.

5.1.1. *Континуалан режим рада система ГТП и низводан положај повратног бунара*

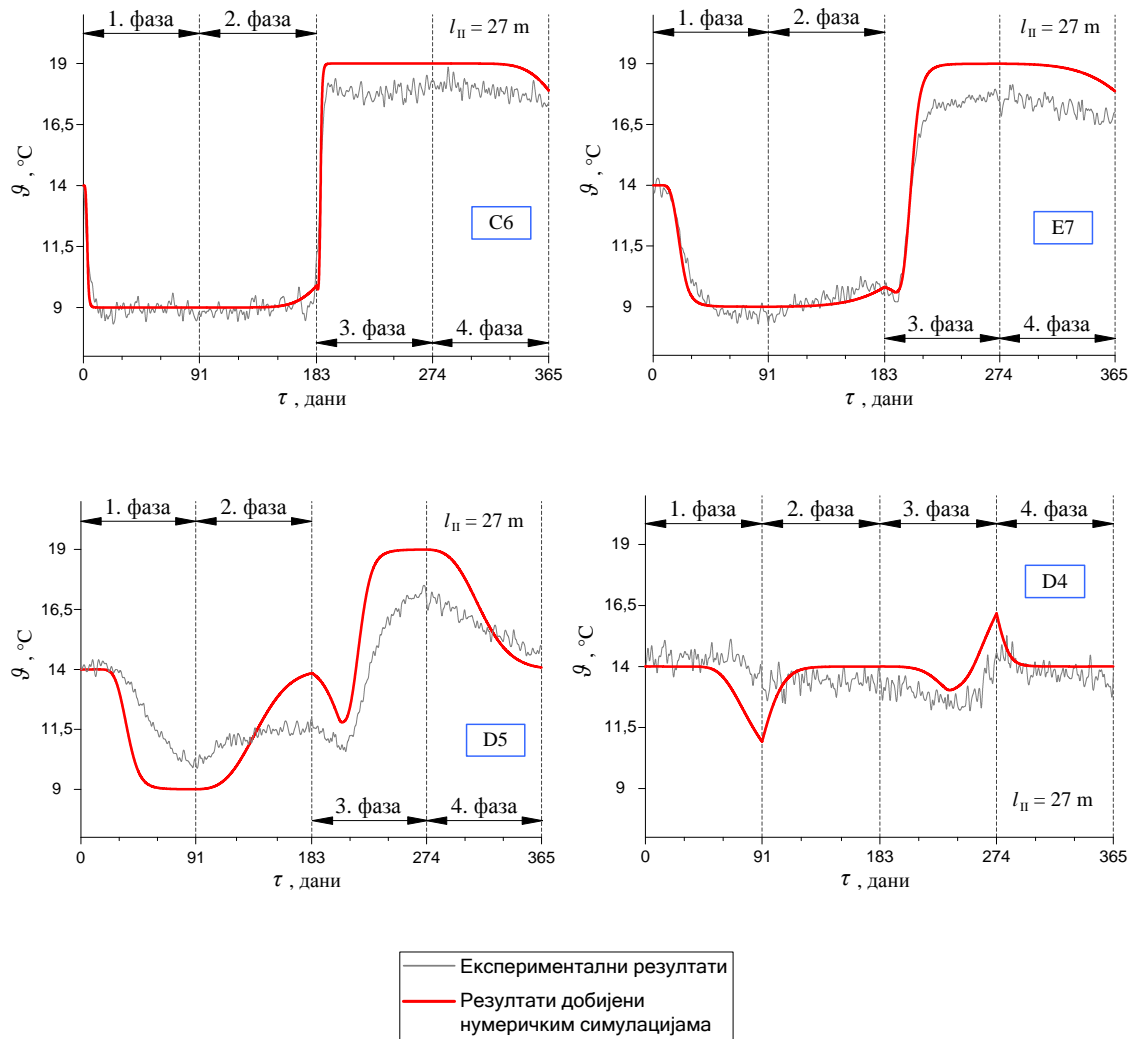


а) *током I и III фазе рада*

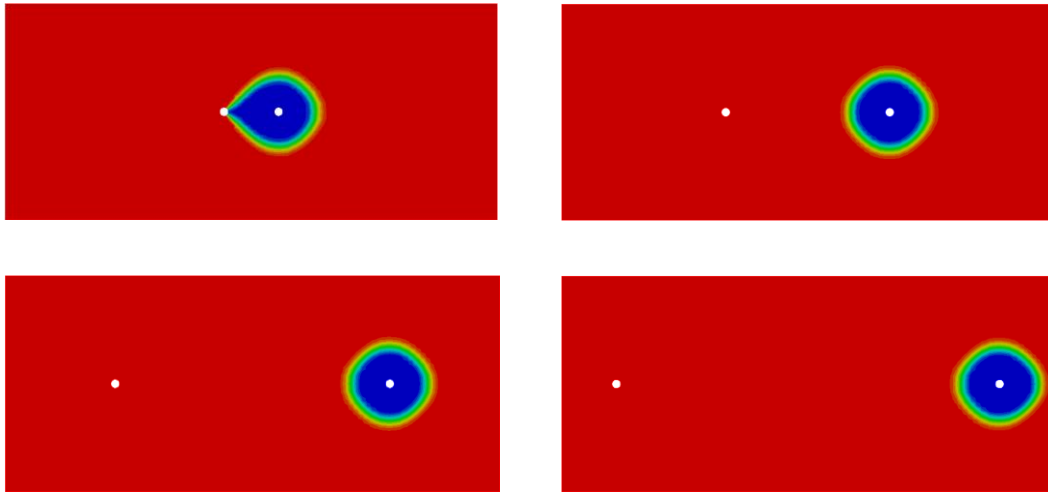


б) *током II и IV фазе рада*

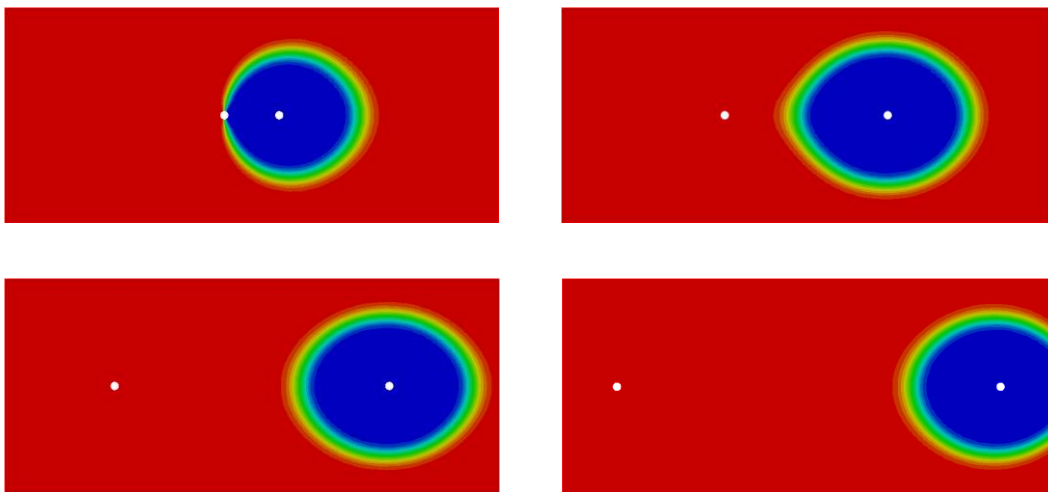
Слика 54. *Поље брзина које се устали унутар подземног водоносног слоја одређено нумеричким симулацијама*



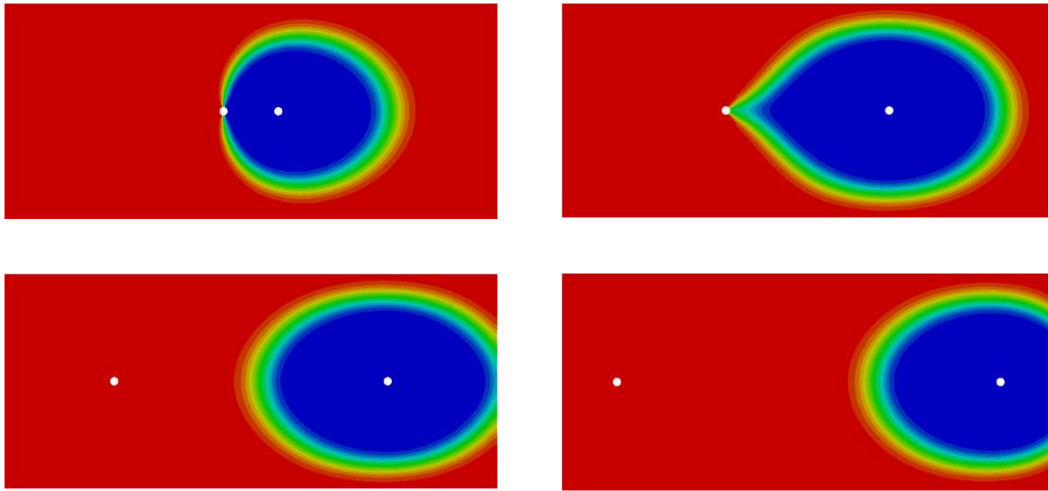
Слика 55. Годишње варијације температуре унутар подземног водоносног слоја при континуалном режиму рада и низводном положају повратног бунара - поређење експерименталних и нумеричких резултата



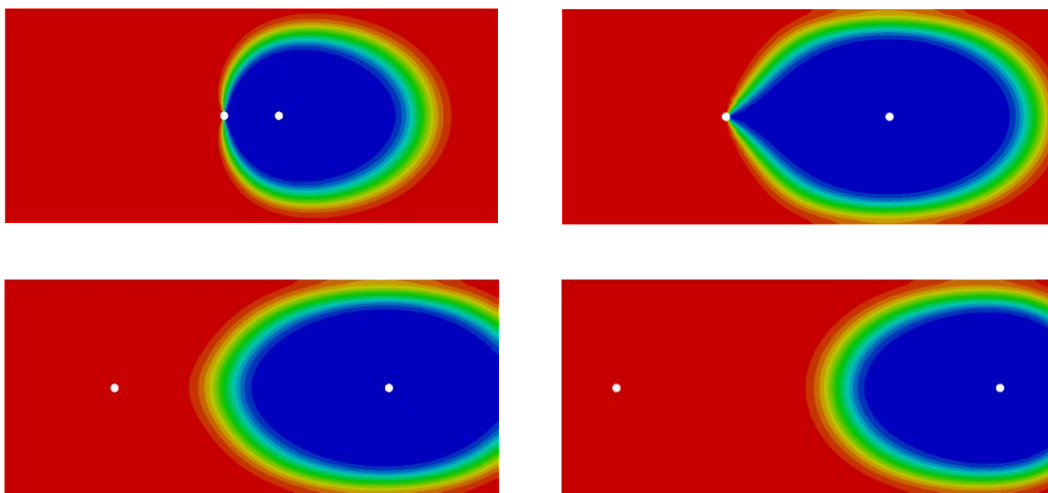
I фаза - после 7 дана рада система



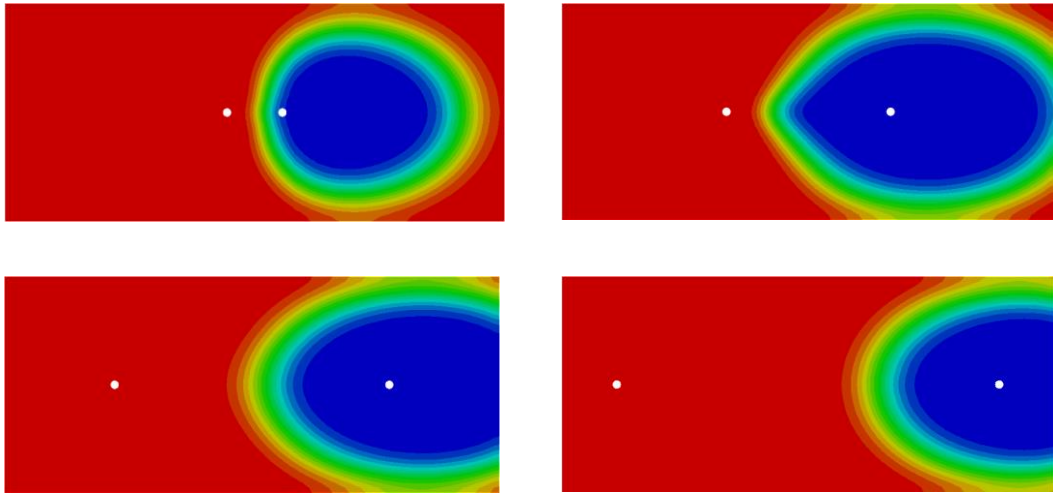
I фаза - после 35 дана рада система



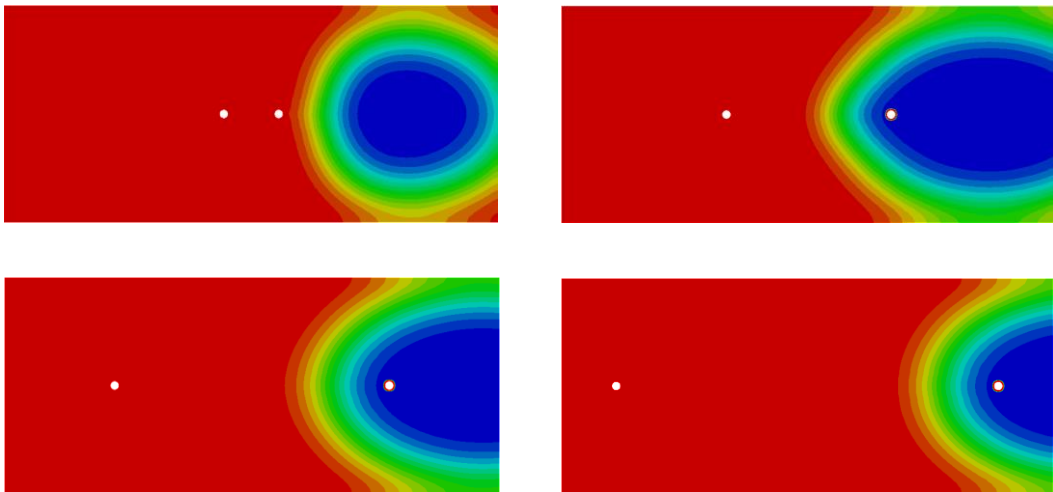
I фаза - после 63 дана рада система



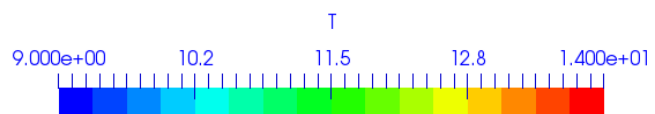
крај I фазе - после 91 дана рада система

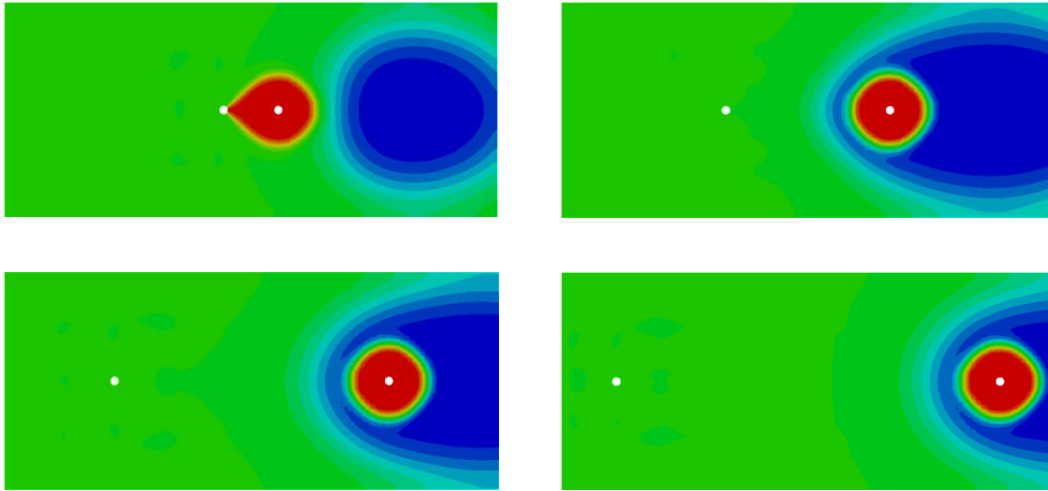


II фаза - после 126 дана рада система

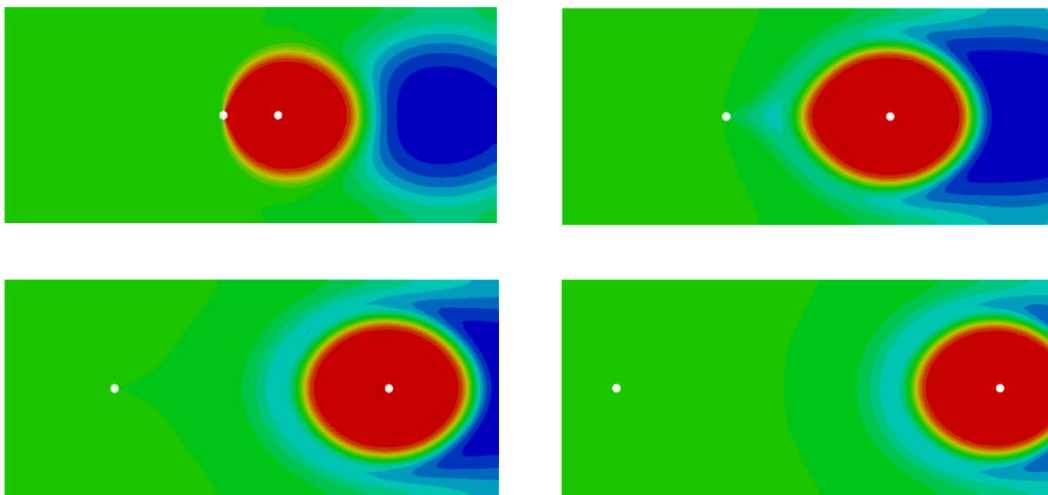


крај II фазе - после 183 дана рада система

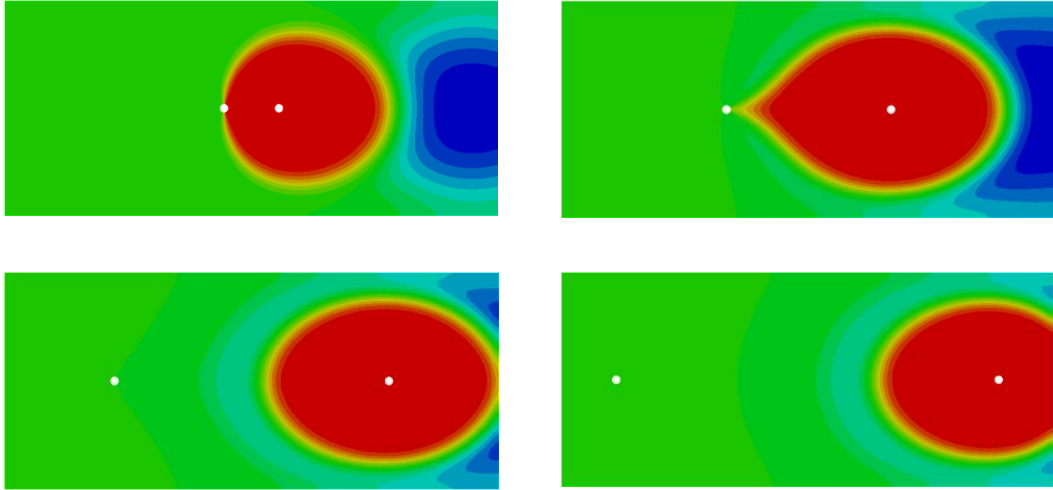




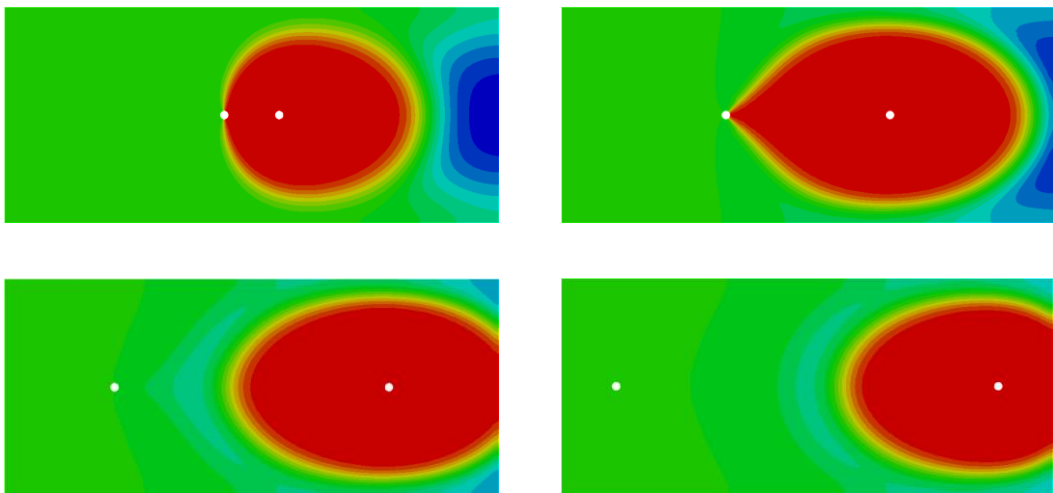
III фаза - после 190 дана рада система



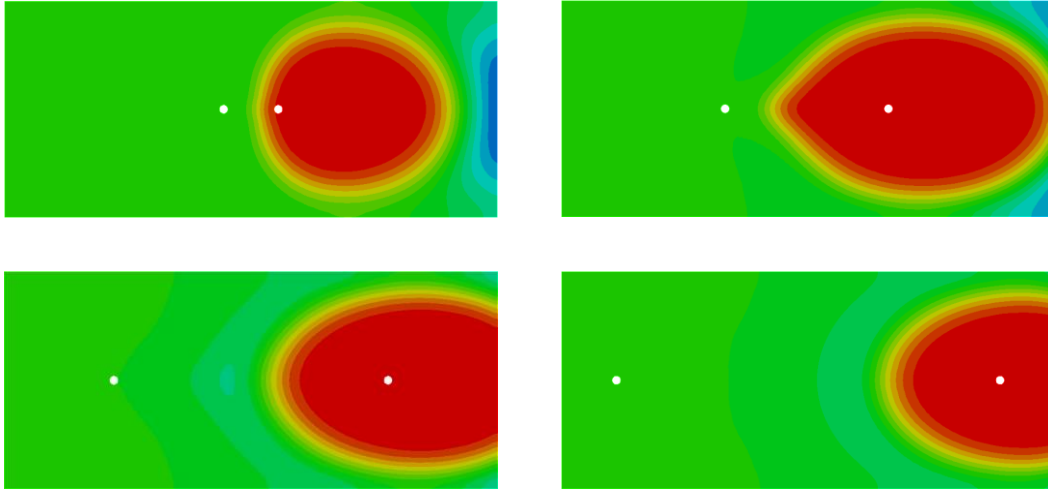
III фаза - после 218 дана рада система



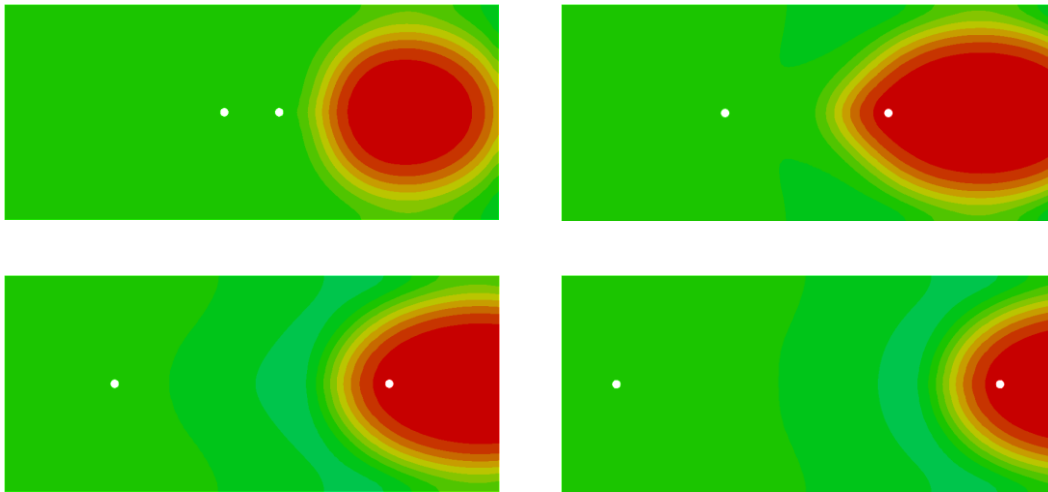
III фаза - после 246 дана рада система



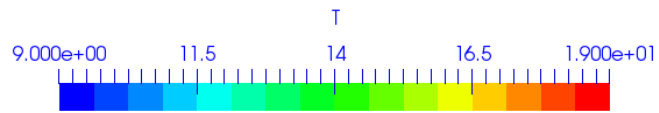
крај III фазе - после 274 дана рада система



IV фаза - после 309 дана рада система

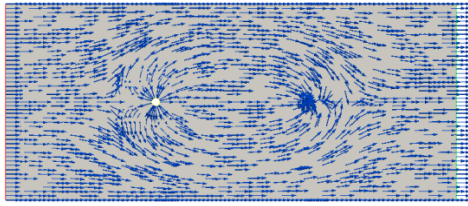


крај IV фазе - после 365 дана рада система

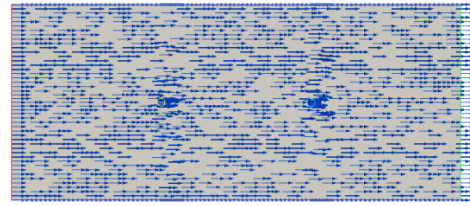


Слика 56. Упоредни приказ поља температуре унутар подземног водоносног слоја за четири различита растојања између бунара, при континуалном режиму рада и низводном положају повратног бунара

5.1.2. *Континуалан режим рада система ГТП и узводан положај повратног бунара*

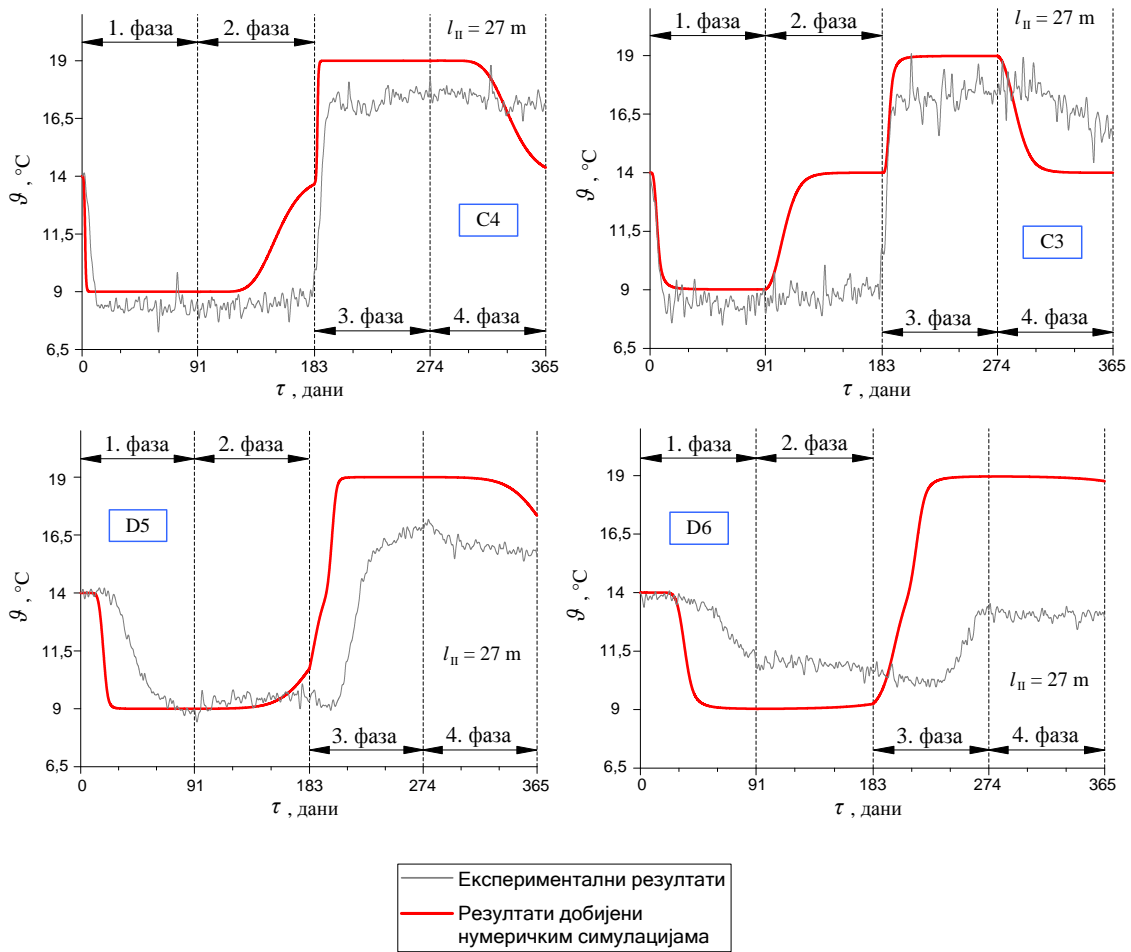


а) *током I и III фазе рада*

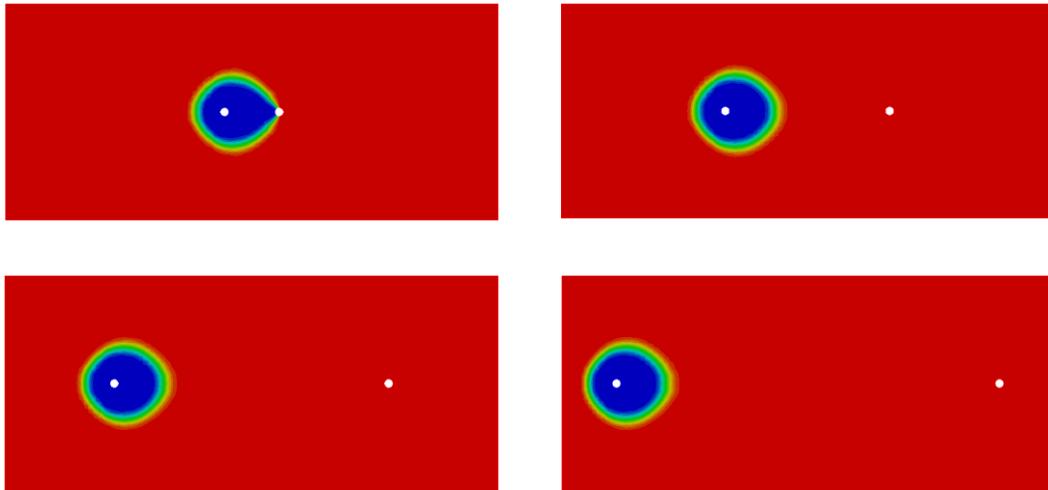


б) *током II и IV фазе рада*

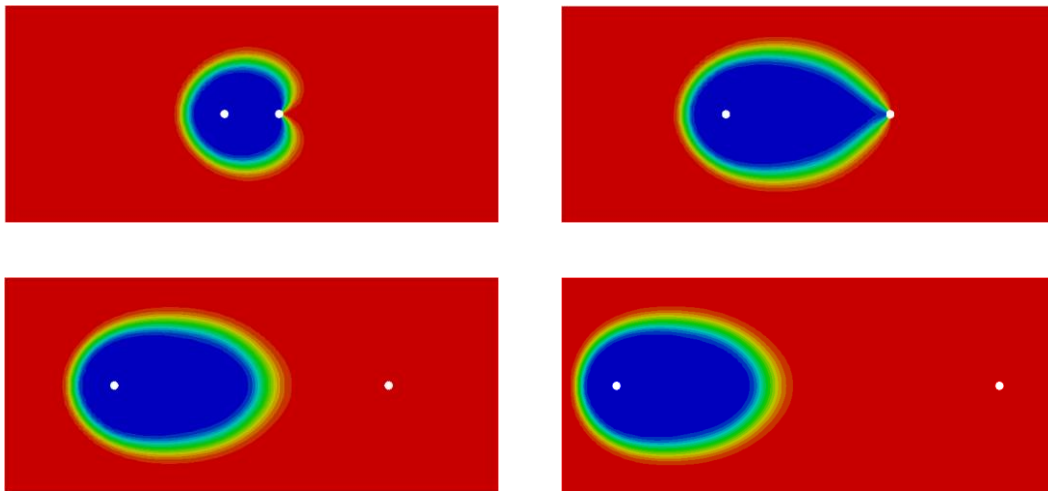
Слика 57. *Поље брзина које се устали унутар подземног водоносног слоја одређено нумеричким симулацијама*



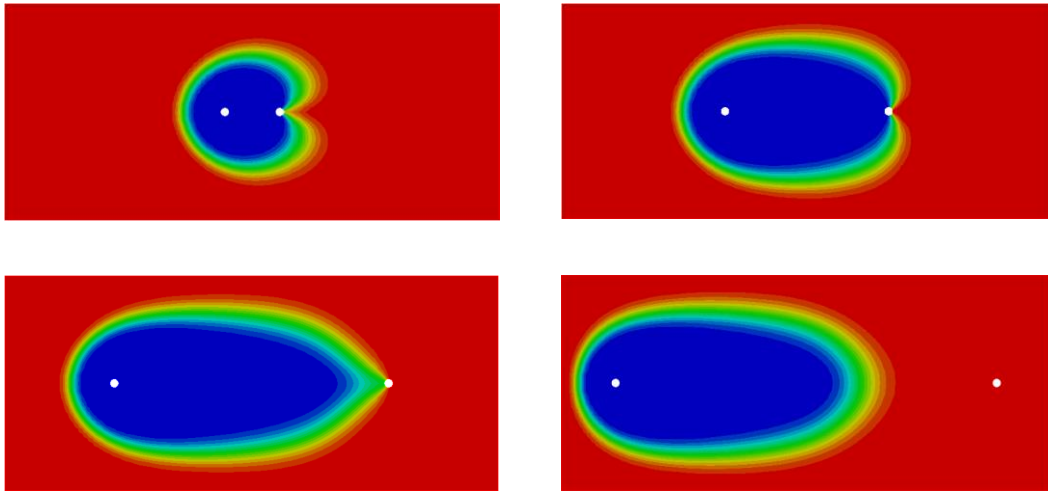
Слика 58. *Годишње варијације температуре унутар подземног водоносног слоја при континуалном режиму рада и узводном положају повратног бунара - поређење експерименталних и нумеричких резултата*



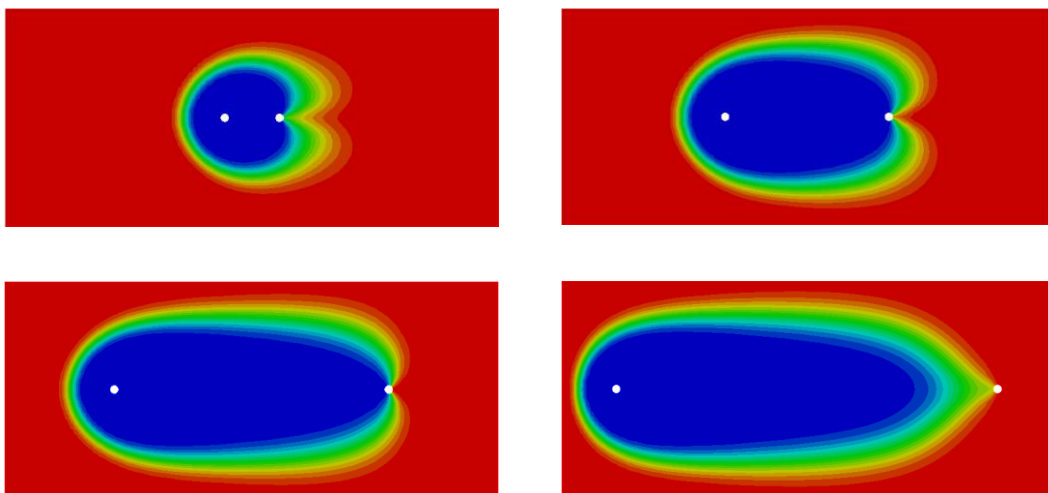
I фаза - после 7 дана рада система



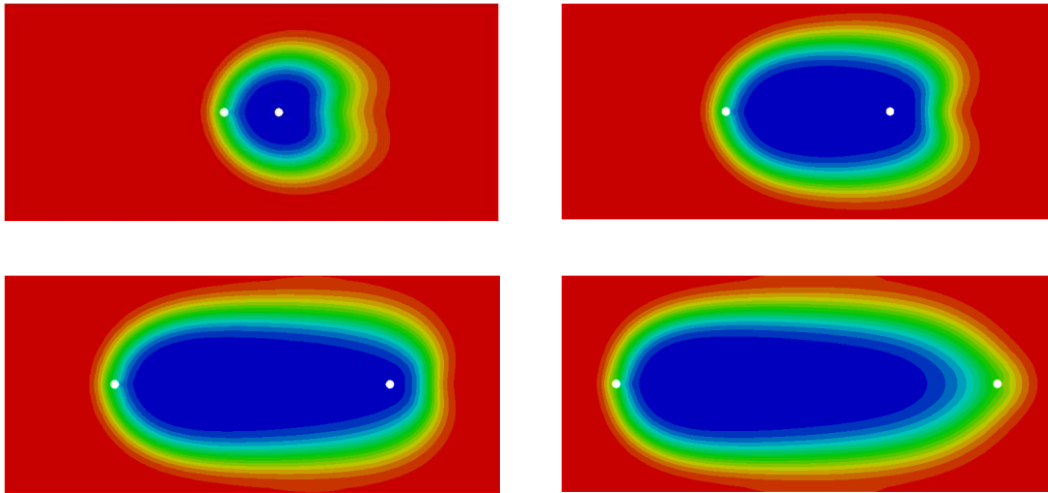
I фаза - после 35 дана рада система



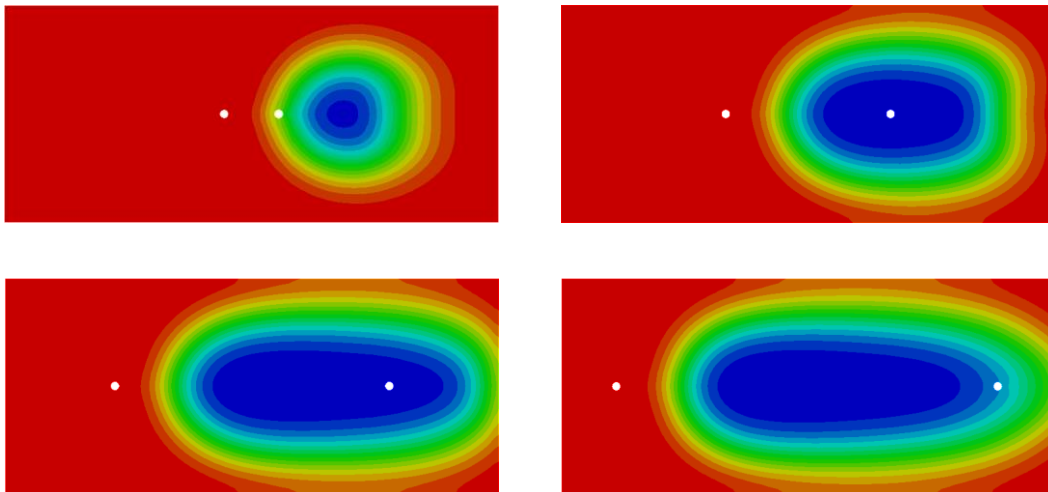
I фаза - после 63 дана рада система



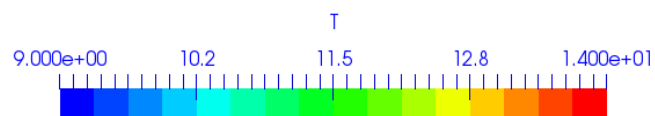
крај I фазе - после 91 дана рада система

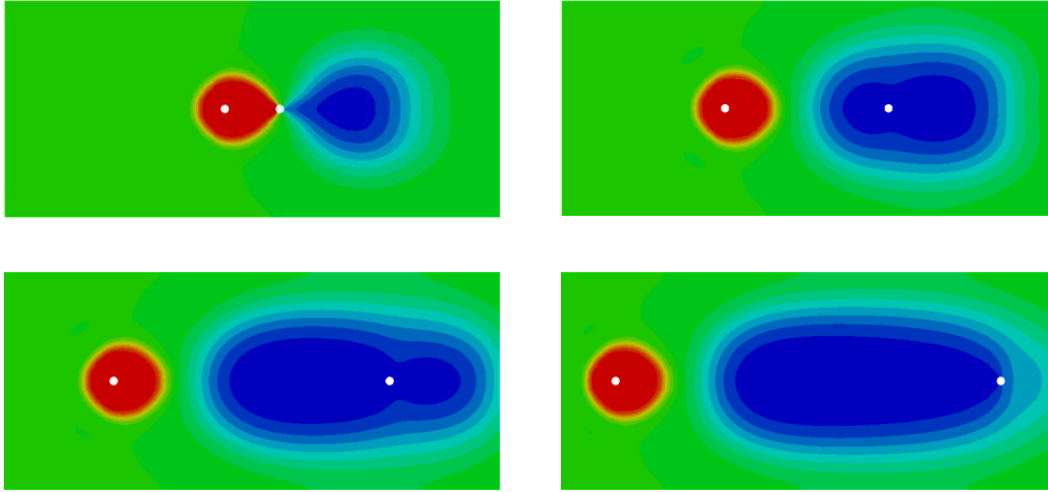


II фаза - после 126 дана рада система

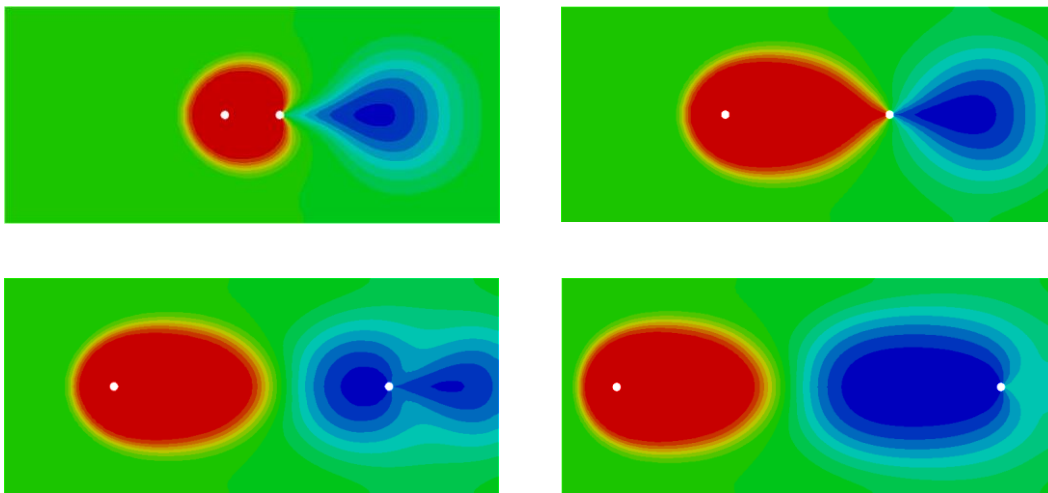


крај II фазе - после 183 дана рада система

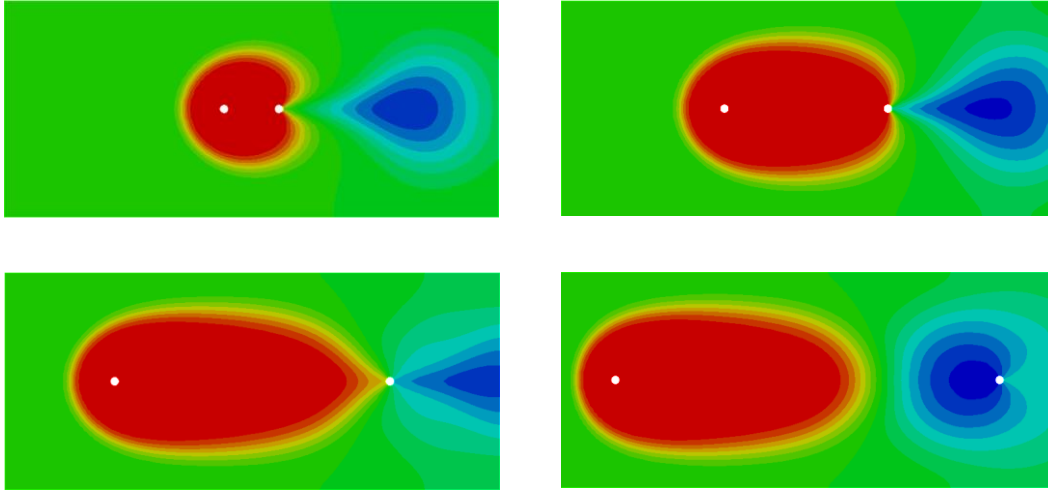




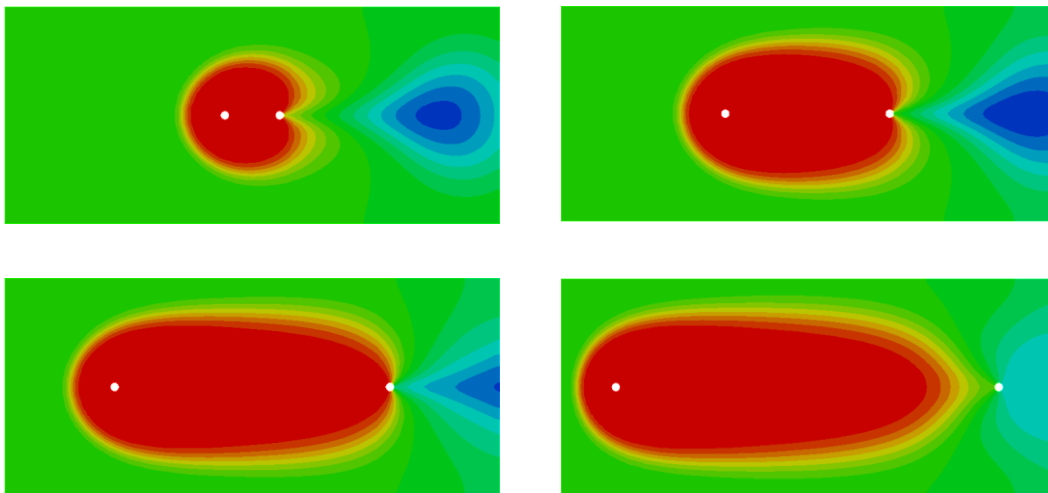
III фаза - после 190 дана рада система



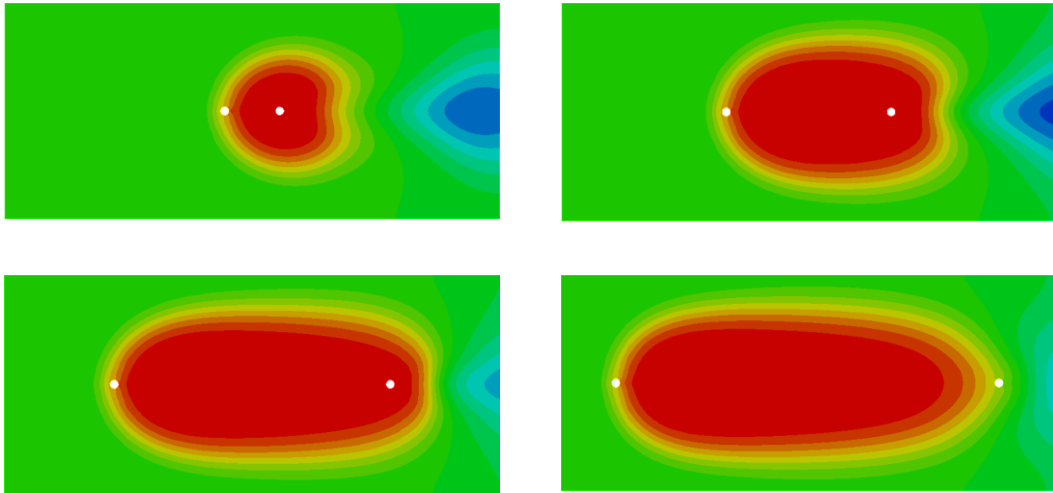
III фаза - после 218 дана рада система



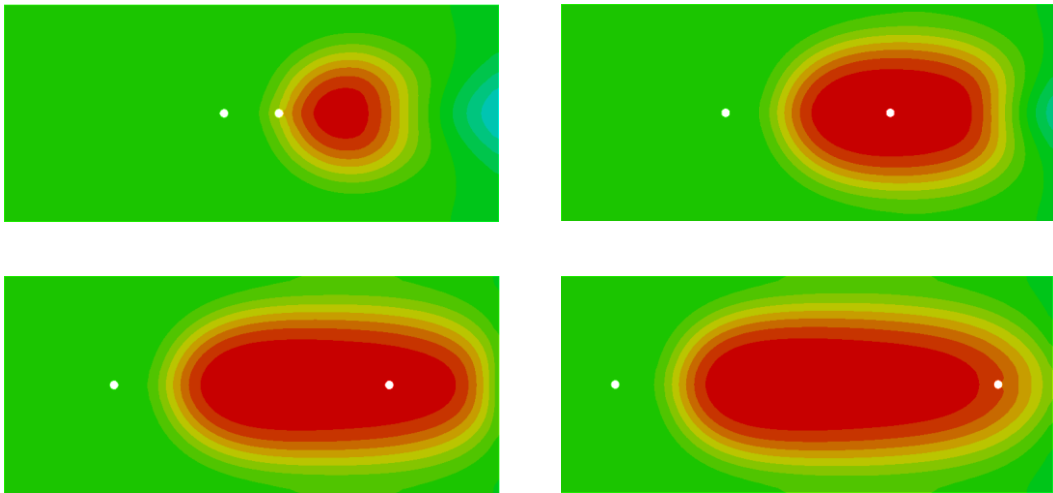
III фаза - после 246 дана рада система



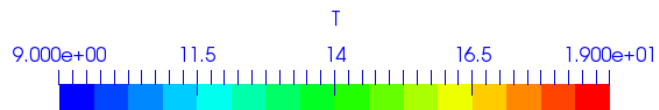
крај III фазе - после 274 дана рада система



IV фаза - после 309 дана рада система

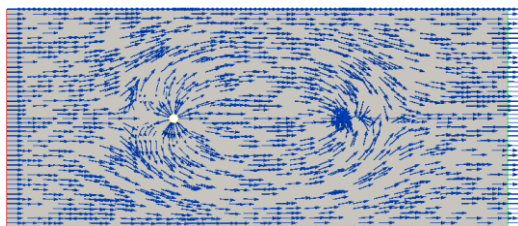


к) *крај IV фазе - после 365 дана рада система*

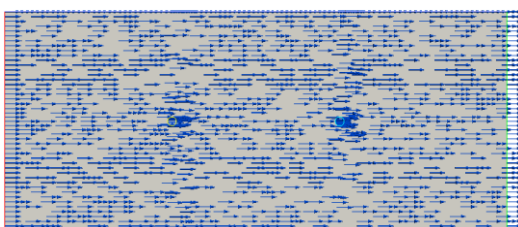


Слика 59. Упоредни приказ поља температуре унутар подземног водоносног слоја за четири различита растојања између бунара, при континуалном режиму рада система ГТП и узводном положају повратног бунара

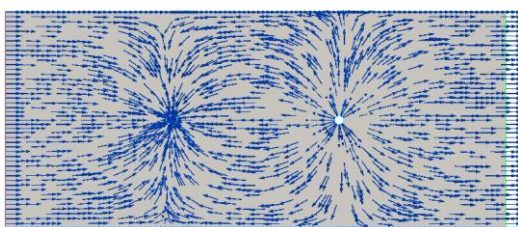
5.1.3. Цикличан режим рада система ГТП



током 1. фазе рада

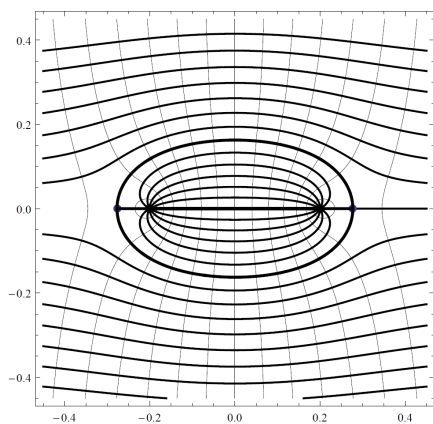


током 2. и 4. фазе рада

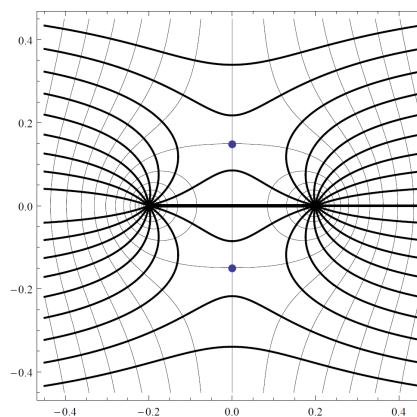


током 3. фазе рада

а) одређено нумеричким симулацијама



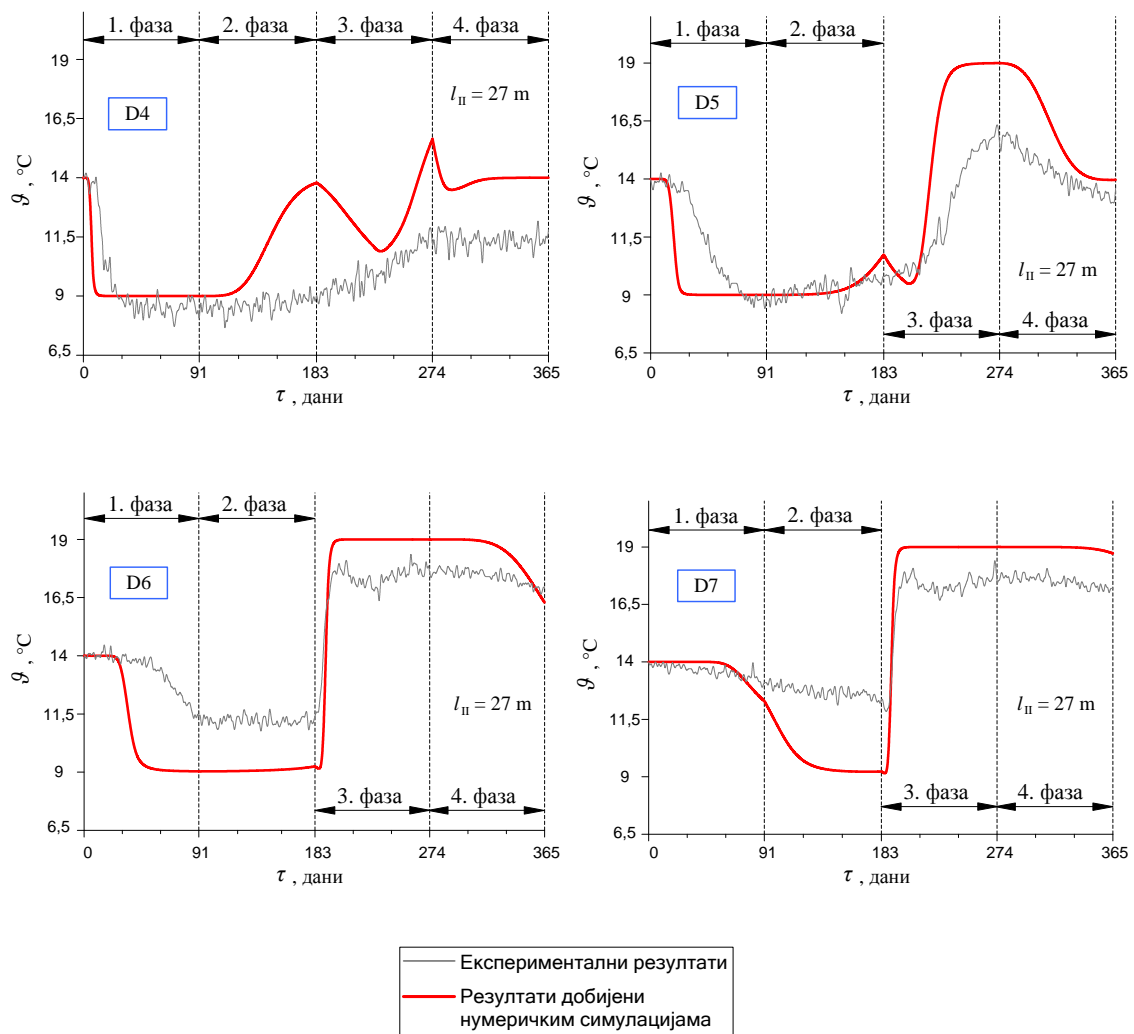
током 1. фазе рада



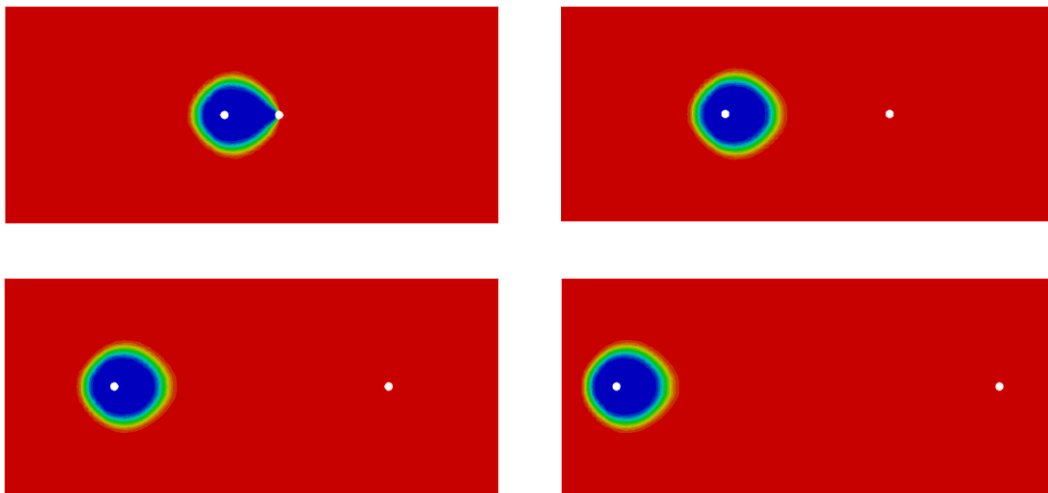
током 3. фазе рада

а) одређено применом комплексних аналитичких функција

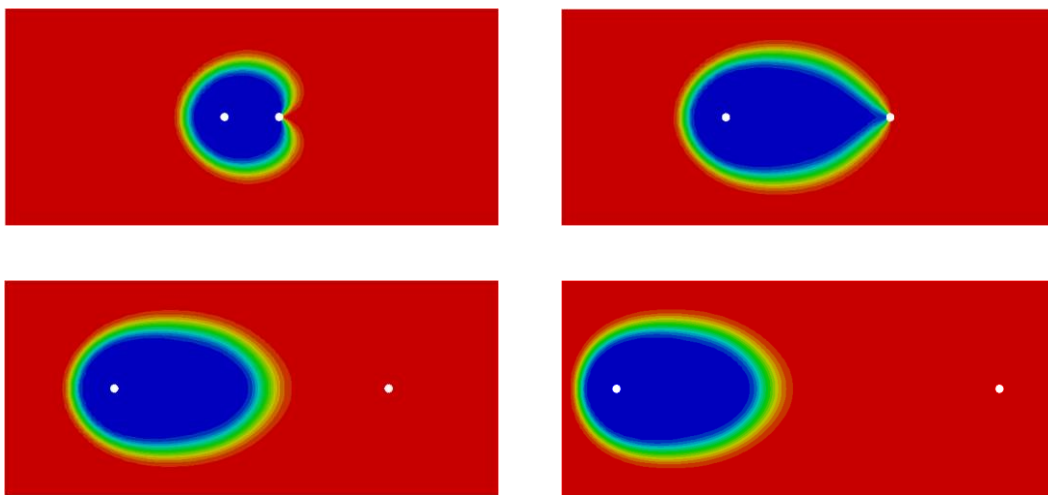
Слика 60. Поље брзина које се устали унутар подземног водоносног слоја



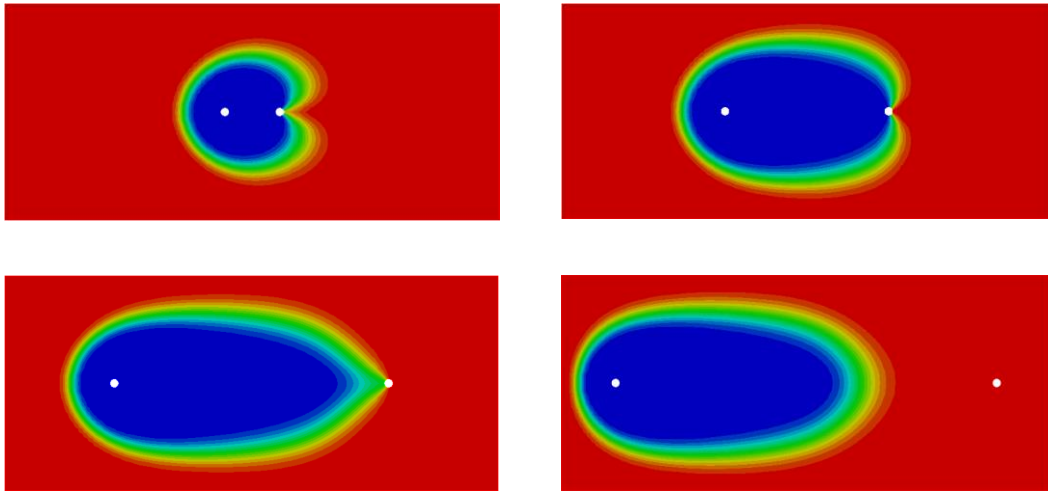
Слика б1. *Годишње варијације температуре унутар подземног водоносног слоја при цикличном режиму рада - поређење експерименталних резултата и резултата добијених нумеричком симулацијом*



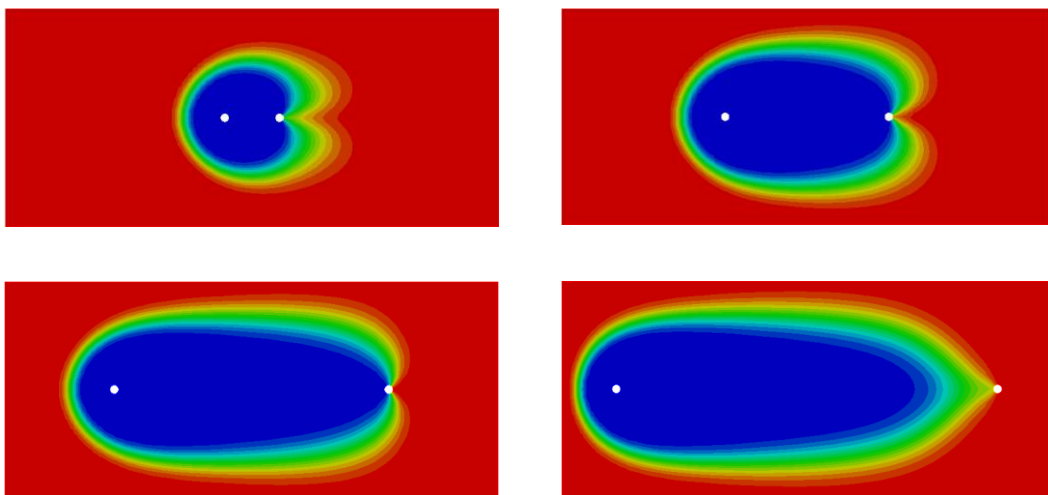
I фаза - после 7 дана рада система



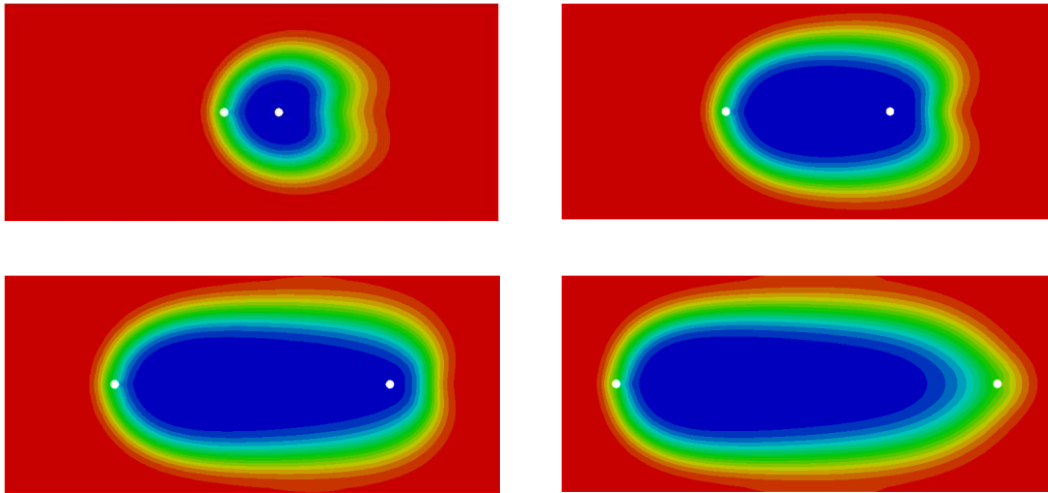
I фаза - после 35 дана рада система



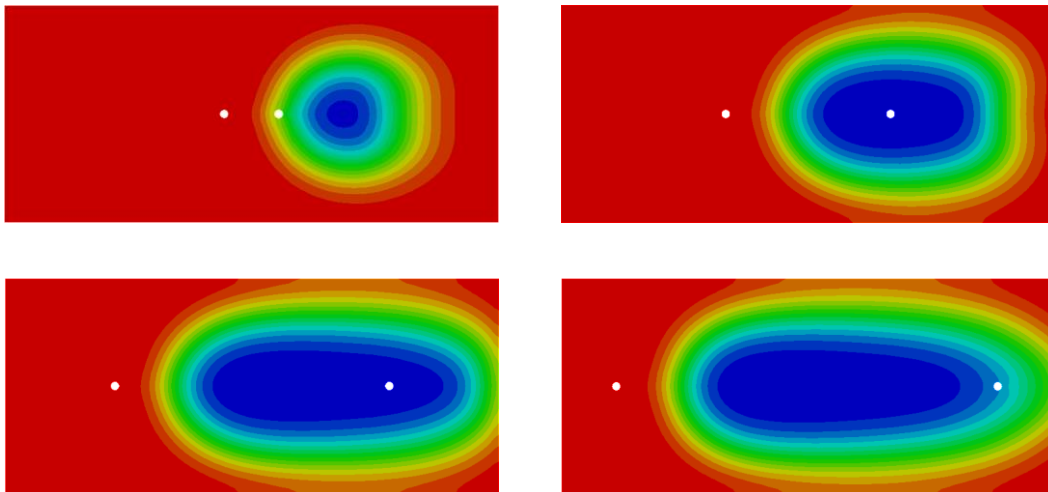
I фаза - после 63 дана рада система



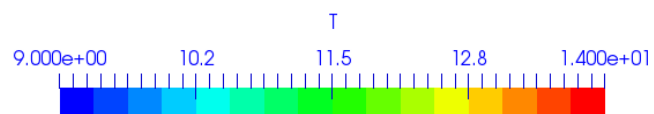
крај I фазе - после 91 дана рада система

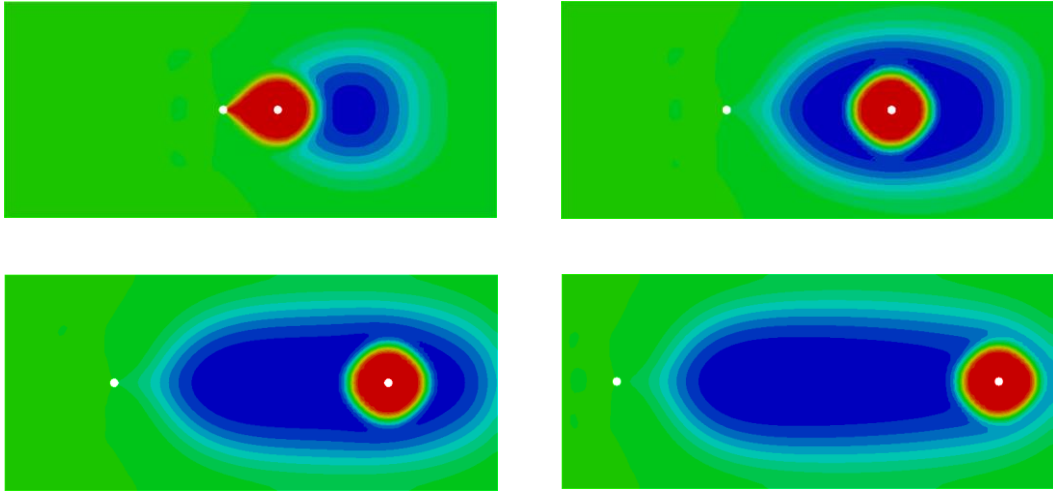


II фаза - после 126 дана рада система

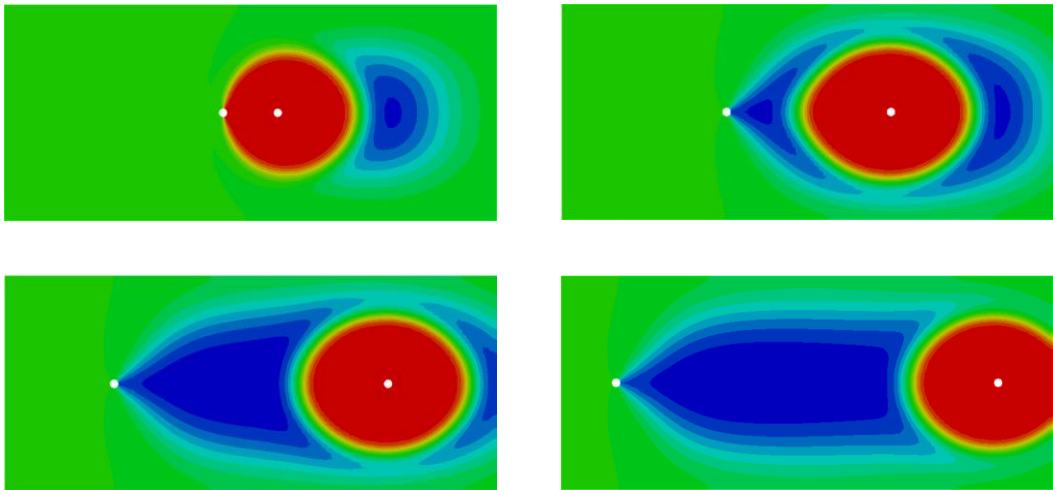


крај II фазе - после 183 дана рада система

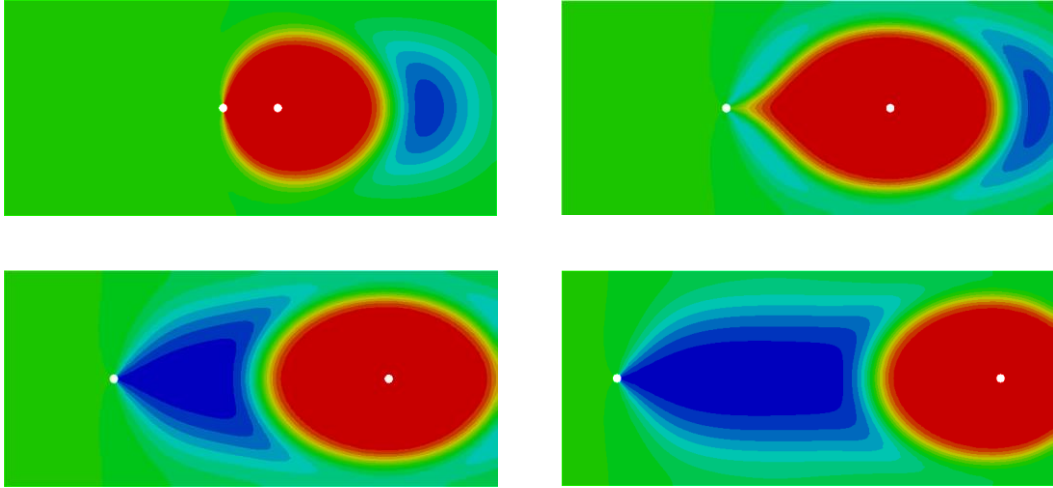




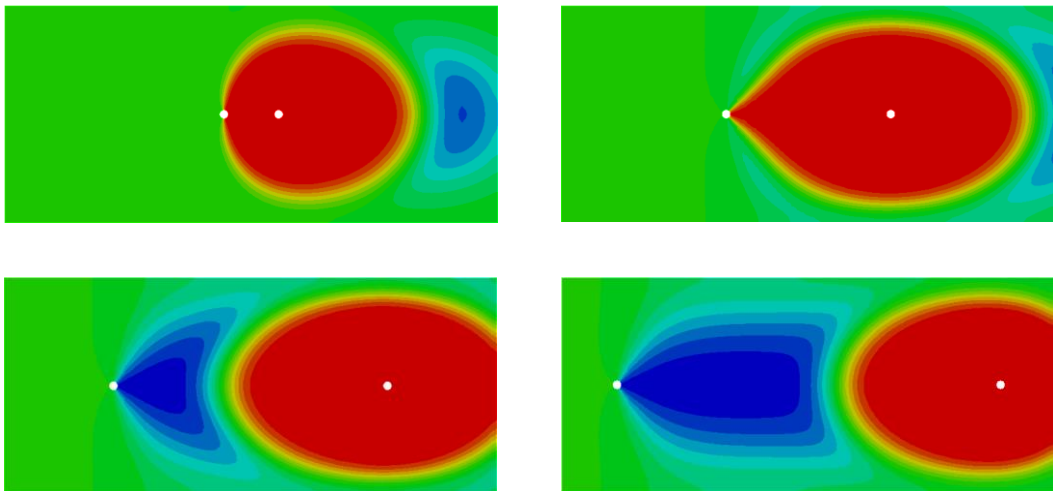
III фаза - после 190 дана рада система



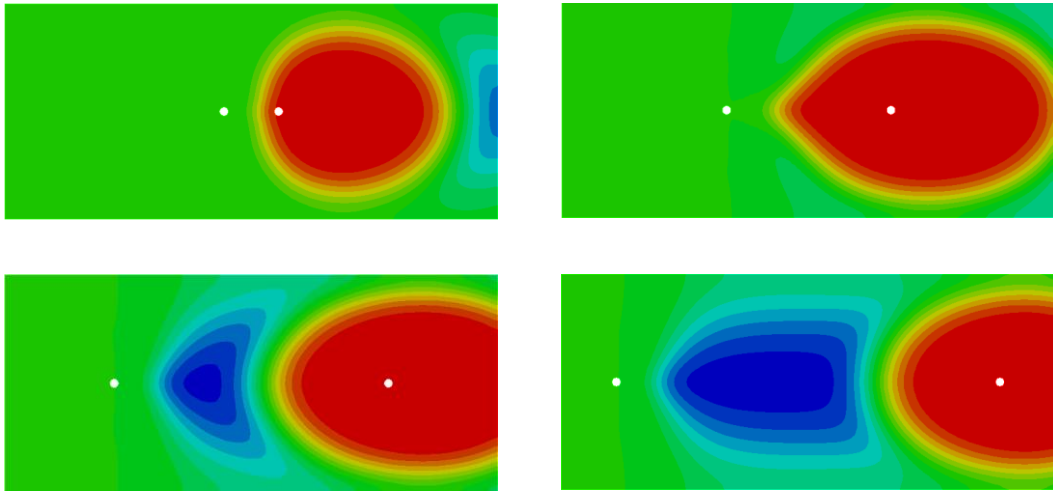
III фаза - после 218 дана рада система



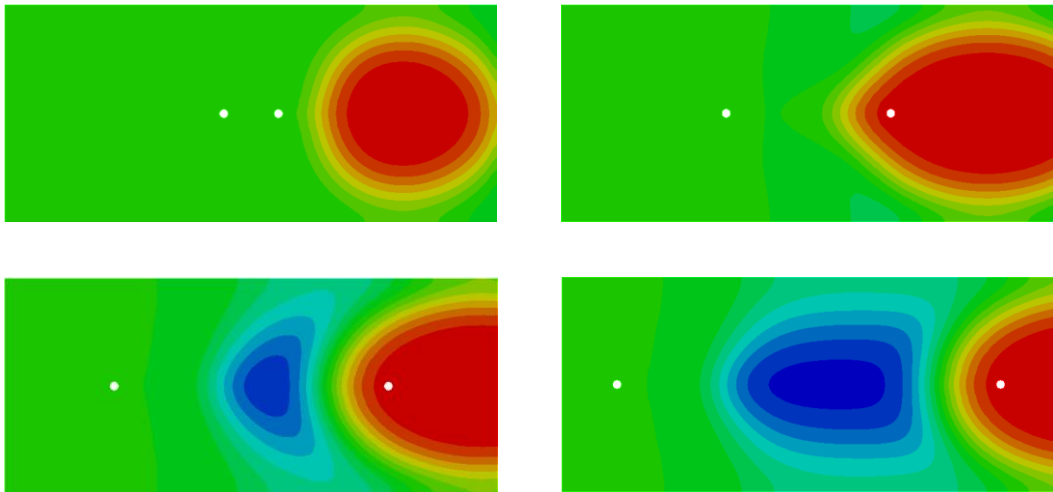
III фаза - после 246 дана рада система



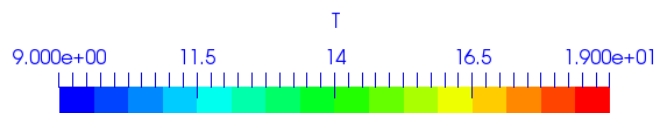
крај III фазе - после 274 дана рада система



IV фаза - после 309 дана рада система



крај IV фазе - после 365 дана рада система

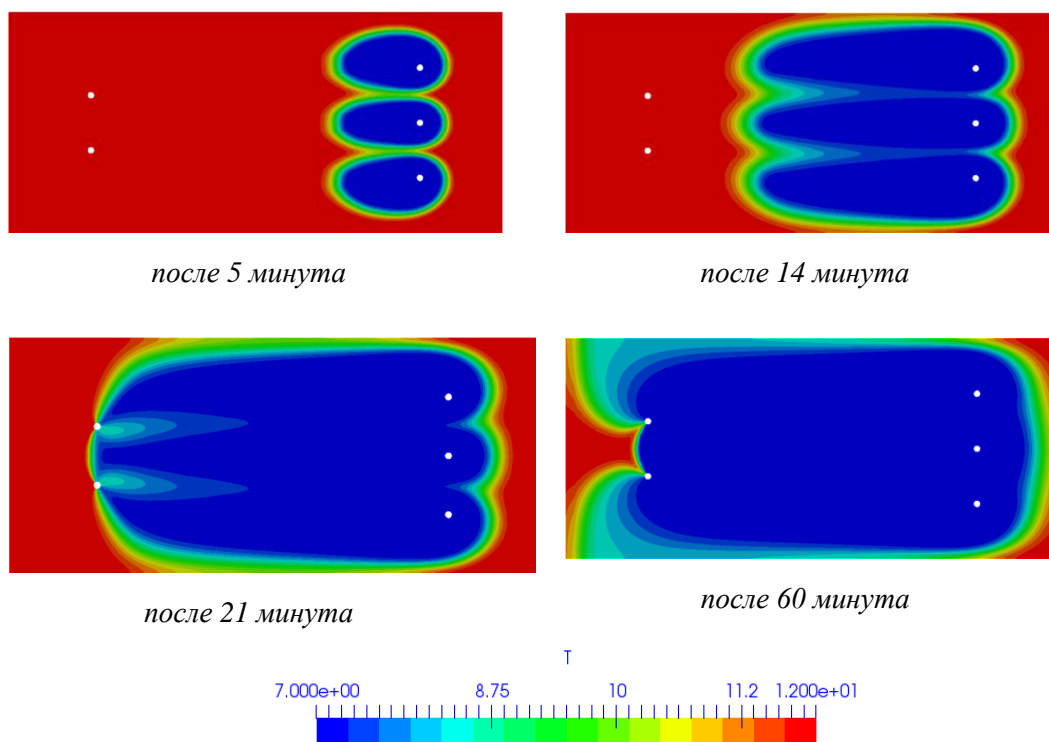


Слика 62. Упоредни приказ поља температуре унутар подземног водоносног слоја, за четири различита растојања између бунара, при цикличном режиму рада система ГТП

5.2. Провера тачности предвиђања нумеричког модела помоћу експерименталних података других аутора

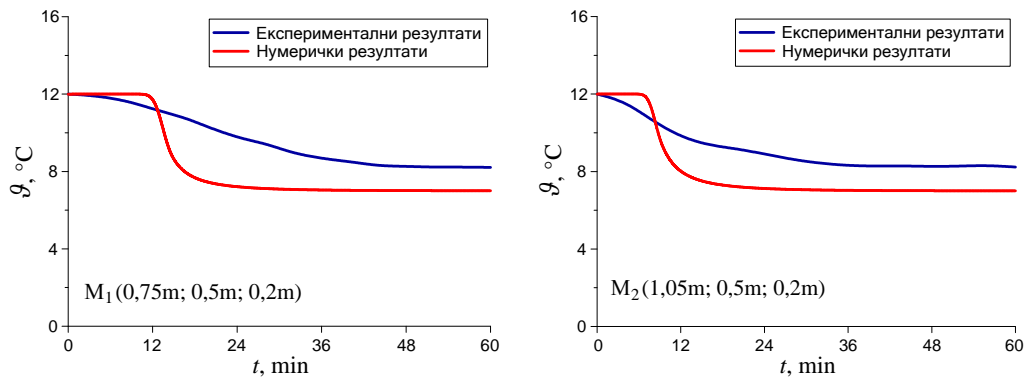
5.2.1. *Анализа термичког утицаја између групе црпних и групе повратних бунара, експерименти Гаоа и сарадника [56]*

Приказ поља температуре у подземном водоносном слоју који настаје при раду система ГТП са 2 црпна и 3 повратна бунара током зимске грејне сезоне, добијен применом формираног нумеричког модела, дат је на слици 63.



Слика 63. Положај зоне повратне воде унутар подземног водоносног слоја одређен применом формираног нумеричког модела

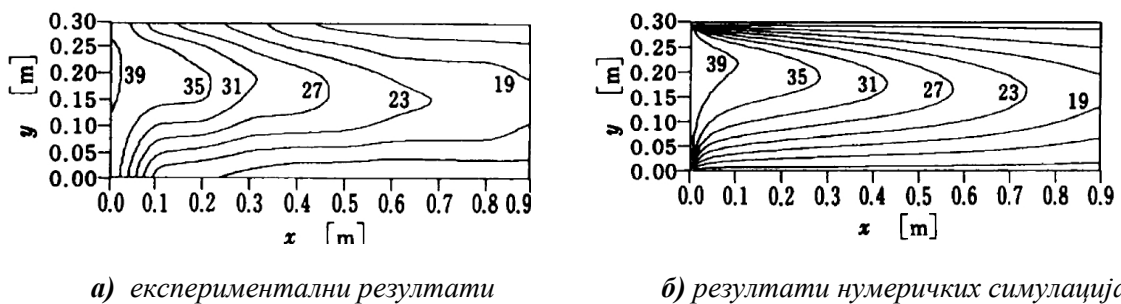
На слици 64 приказана је промене температуре током времена у две мерне тачке, одређена мерењима Гаоа и сар. и нумеричким симулацијама.



Слика 64. Температурско поље у аквиферу - поређење експерименталних резултата и резултата добијеним нумеричким симулацијама

5.2.2. Одређивање утицаја природне конвекције на принудно хоризонтално струјање у подземном водоносном слоју, експерименти Nagana и сарадника [55]

На слици 65 дат је упоредни приказ устаљеног температурног поља које настаје при струјању топле воде кроз засићену порозну средину хлађену са горње и доње стране. Резултати су одређени експерименталним путем - резултати Nagana и сар., и путем нумеричких симулација, употребом формираног нумеричког модела.



Слика 65. Устаљени профили изотерми при принудном хоризонталном струјању воде у засићеној порозној средини са вертикалном температурском разликом

5.3. Анализа резултата нумеричких симулација

При добијању поља температуре нумеричким симулацијама обухваћени су чиниоци који се у већини постојећих нумеричких модела занемарују: тродимензионалност развоја самог температурског поља, брзина струјања подземних вода, као и слојевита хетерогеност подземног водоносног слоја.

На основу поређења графичког приказа поља брзина које се устали у подземном водоносном слоју добијеног нумеричким симулацијама, са струјницама одређеним под претпоставком да је струјање воде при раду отвореног система ГТП раванско и потенцијално, може се уочити велика сличност између ових струјних слика.

Следи да се на основу услова $q_v > db\pi V$, изведеног при одређивању зауставних тачака за низводан положај повратног бунара применом комплексних аналитичких функција, може релативно једноставно да утврди, уколико је он испуњен, да долази до продора зоне повратне воде, тј. да зона повратне воде доспева до црпног бунара. Како би поузданост ове једноставне параметарске провере била већа, неопходан услов је и да је растојање између бунара приближно једнако или мање од половине домена интеграције. Наиме, у случају IV положаја бунара ($L_x = 900\text{ mm}$, $L_b = 700\text{ mm}$) нумеричке симулација показују да до продора зоне повратне воде долази, док на основу параметарске анализе следи да то није случај. При анализи од I - III положаја бунара, које одговарају мањим растојањима између њих, обе анализе дају исте резултате.

Када је у питању узводан положај повратног бунара, без обзира на вредност радних параметара, на основу анализе применом комплексних аналитичких функција следи да увек долази до продора зоне повратне воде до црпног бунара, што се добија и као резултат одређивања поља брзина путем нумеричких симулација.

Анализом резултата температурских промена у подземном водоносном слоју, добијених нумеричким симулацијама, у односу на она добијена сопственим изведеним експериментима, може се установити следеће:

- **При мањим растојањима од повратног бунара уочава се висок степен слагања између вредности температура у температурском пољу одређених нумеричким симулацијама и експерименталних резултата.**

У случају континуалног режима рада и низводног положаја повратног бунара висок степен слагања вредности температура у температурском пољу одређених нумеричким симулацијама и резултата мерења заступљен је у све четири фазе рада на хоризонталном растојању једнаком трећини растојања између бунара, узводно (С6) и низводно (Е7) од њега.

Када је у питању континуалан режим рада и узводан положај повратног бунара слагање резултата током једногодишњег радног периода заступљено је низводно од повратног бунара, такође на растојању једнаком трећини растојања између бунара (С4).

И при цикличном режиму рада резултати се слажу на растојању једнаком трећини растојања између бунара. Међутим, због промене положаја повратног бунара циклично се мења и област унутар подземног водоносног слоја у којој се слажу резултати. Тако је током прве две фазе рада уочено највеће поклапање између резултата нумеричких симулација и експерименталних резултата у мерном месту D4, а током треће и четврте фазе рада система у мерном месту D6.

- **Са повећањем растојања од повратног бунара тачност предвиђања температура у температурском пољу у аквиферу применом нумеричког модела опада.**

Разлог за лошија предвиђања нумеричког модела током периода грејања и хлађења треба тражити у занемаривању утицаја кондуктивних топлотних губитака у вертикалном правцу, односно у слојевима изнад и испод подземног водоносног слоја. Због тога се, у поређењу са експерименталним резултатима, нумеричким симулацијама добијају незнатно умањене вредности температурског поља током 1. фазе рада, односно незнатно увећане вредности температурског поља током 3. фазе рада.

Са друге стране, одступања у радним периодима опоравка термичке енергије током јесени и пролећа, односно током 2. и 4. фазе рада, у највећој мери су последица усвојених вредности термофизичких својстава чврсте фазе подземног водоносног слоја, њене густине, специфичног топлотног капацитета и топлотне проводљивости. Вредности ових својстава дефинишу коефицијенте нумеричког модела, те имају најзначајнији утицај на поузданост његових предвиђања.

На основу упоредне анализе температурних промена унутар подземног водоносног слоја добијених применом формираног нумеричког модела и доступних експерименталних резултата других аутора може се закључити да су слагања резултата задовољавајућа.

При поређењу експерименталних резултата Гаоа и сар. са резултатима нумеричких симулација може се уочити да температурно поље добијено применом нумеричког модела има исту тенденцију промене као и резултати мерења. Анализирана мерна места имају исту y и z координату, али је тачка М2, с обзиром на већу x координату, ближа групи повратних бунара, а тачка М1 ближа групи црпних бунара. Управо због тога зона промене температуре раније доспева до тачке М2, те у њој раније долази до пада температуре (Слика 64.).

Велика сличност између устаљеног температурског поља одређеног експерименталним путем од стране Нагана и сар. и путем нумеричких симулација, за случај принудног хоризонталног струјања воде кроз засићену порозну средину са вертикалном температурском разликом, такође потврђује поузданост предвиђања формираног нумеричког модела (Слика 65.).

На основу великог степена слагања резултата нумеричког модела и сопствених експерименталних резултата, као и доступних експерименталних резултата других аутора, потврђена је поузданост и применљивост новоформираног нумеричког модела за одређивање температурних промена унутар подземног водоносног слоја.

6. Закључна разматрања

У овој дисертацији, чији је предмет истраживања био изучавање понашања подземног водоносног слоја током његове експлоатације системом геотермалне топлотне пумпе, у спроведеном експериментално-нумеричком поступку формиран је нов тродимензионални нумеричко-математички модел, који омогућава предвиђање и праћење промене температурног поља у подземном водоносном слоју, чиме је успешно остварен њен основни циљ.

Формирани нумеричко-математички модел омогућава предвиђање промене температурног поља у водоносном слоју за произвољну геометрију, протоке воде и грејну, односно расхладну снагу топлотне пумпе, у случају њеног континуалног или цикличног радног режима, како при низводном, тако и при узводном положају повратног бунара.

Новоформираним нумеричко-математичким моделом обухваћена су дејства чији утицај на температурно поље у подземном водоносном слоју до сада није детаљно проучаван: тродимензионалност развоја температурног поља, брзина струјања подземних вода, као и утицај слојевите хетерогености водоносног слоја. Истовремено, нумеричким моделом обухваћен је и утицај растојања између бунара, као и положај повратног бунара у односу на црпни бунар - низводан или узводан.

При развоју нумеричко-математичког модела, као кључне претпоставке, усвојено је да се изједначавање температуре подземне воде и чврстих честица аквифера врши тренутно, што значи да влада локална термичка равнотежа између

фаза, као и да се утицај ефеката дисперзије и утицај кондуктивних топлотних губитака кроз слојеве изнад и испод подземног водоносног слоја могу занемарити.

Провера квалитета нумеричко-математичког модела извршена је поређењем резултата добијених нумеричким симулацијама помоћу развијеног модела и сопствених експерименталних података, као и експерименталних података других аутора.

У првом случају, када су поређени сопствени нумерички и сопствени експериментални резултати, поређење је вршено са вредностима температура у температурном пољу измереном на лабораторијској инсталацији, при симулацији рада отвореног система геотермалне топлотне пумпе.

У другом случају, када је поређење вршено са експерименталним подацима других аутора, извршено је поређење нумеричких са експериментално одређеним вредностима температура у температурном пољу оствареном у лабораторијским условима, при испитивању утицаја природне конвекције на принудно хоризонтално струјање воде у засићеној порозној средини, као и у случају симулације рада отвореног система геотермалне топлотне пумпе са већим бројем црпних и повратних бунара.

Анализом добијених резултата установљен је висок степен поузданости новоформираног нумеричко-математичког модела. При том, констатовано је да много значајнији утицај на поузданост предвиђања нумеричко-математичког модела има познавање тачних вредности термофизичких својстава чврсте фазе подземног водоносног слоја, него уведене ограничавајуће претпоставке под којима је нумерички модел изведен: ламинарност подземног тока, претпоставка хомогене, изотропне и потпуно засићене порозне средине за подземни водоносни слој, тренутно уједначавање температуре подземних вода и чврстих честица, занемаривање утицаја ефеката дисперзије, као и кондуктивних топлотних губитака у слојевима изнад и испод водоносног слоја.

Као основи научни доприноси ове дисертације могу се издвојити следећи резултати:

- Израђена је потпуно нова лабораторијска инсталација за симулацију и праћење кинетике температурног поља у аквиферу, а отуда и одрживости

рада аквифера као сезонског извора топлоте у грејно-расхладним системима помоћу геотермалне топлотне пумпе, при различитим процесним условима рада.

- Формиран је нови нумеричко-математички модел за предвиђање и праћење промене температурног поља у подземном водоносном слоју, који за разлику од до сада развијених модела узима у обзир утицај тродимензионалности развоја температурног поља, затим брзине струјања подземних вода, као и утицај слојевитости, односно хетерогености подземног водоносног слоја.
- На лабораторијској инсталацији за симулирање понашања подземног водоносног слоја, кроз спроведене експерименте добијени су нови и репрезентативни експериментални подаци кинетике промене температуре воде током једногодишње експлоатације подземног водоносног слоја, при различитим радним и геометријским режимима.
- Формирана је јединствена база експерименталних података кинетике промене температуре воде у лабораторијском моделу подземног водоносног слоја, која се може користити како при развијању нових математичких модела, тако и при пројектовању нових постројења.

Основне недостатке формираног нумеричко-математичког модела представљају ограничавајуће претпоставке под којима је он изведен. То су пре свега: ламинарност подземног тока, претпоставка хомогене, изотропне и потпуно засићене порозне средине за слојеве који чине подземни водоносни слој, тренутно уједначавање температуре подземних вода и чврстих честица, занемаривање утицаја ефеката дисперзије, као и кондуктивних топлотних губитака у слојевима изнад и испод подземног водоносног слоја.

Међутим и поред наведених недостатака, на основу великог степена слагања између резултата нумеричких симулација и резултата како сопствених експеримената, тако и експеримената других аутора, потврђена је поузданост предвиђања нумеричког модела. Изменом малог броја параметара и граничних услова, развијени математичко-нумерички модел могуће је користити за прорачуне температурног поља и одрживости рада аквифера као сезонског извора

топлоте у грејно-расхладним системима помоћу геотермалне топлотне пумпе, при свим произвољним геометријама и процесним радним условима.

Рад на даљем усавршавању предложеног модела пре свега би требало усмерити на стварање могућности да се при дефинисању граничних услова могу обухватити и кондуктивни топлотни губици у слојевима изнад и испод подземног водоносног слоја.

С обзиром на универзалност развијеног нумеричко-математичког модела и његове способности једноставне измена граничних и почетних услова, у будућим истраживања у овој области пажњу би требало усмерити на коришћење овог модела за предвиђање понашања подземног водоносног слоја као сезонског складишта термичке енергије током његове експлоатације системом геотермалне топлотне пумпе.

Литература

- [1] European Commission, “Europe 2020 – Europe’s growth strategy”, *Eur. Website - Eur. 2020*, 2011.
- [2] European Commission, “Energy Efficiency Plan 2011”, *Energy*, p. 16, 2011.
- [3] Iea, “Policies for renewable heat An integrated approach,” 2012.
- [4] European Parliament, “Labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products & Energy Performance of buildings”, *Off. J. Eur. Union*, vol. 53, no. ISSN 1725-2555, p. 40, 2010.
- [5] Zhao Z. Y., J. Zuo, L. L. Fan, G. Zillante, “Impacts of renewable energy regulations on the structure of power generation in China - A critical analysis”, *Renewable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 24–30, 2011.
- [6] Lee J.-Y., “Current status of ground source heat pumps in Korea”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1560–1568, 2009.
- [7] Kelley I., “Ground-source heat pumps deliver both high efficiency and reliability –good news for both contractors and their customers”, *Wisconsin Perspective*, vol. September-October, 2006.
- [8] Blum P., G. Campillo, W. Munch, T. Kolbel, “CO₂ savings of ground source heat pump systems – A regional analysis”, *Renewable Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 122–127, 2010.
- [9] Fridleifsson I. B., R. Bertani, E. Huenges, John W. Lund, A. Ragnarsson, L. Rybach, “The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change”, *IPCC SCOPING MEETING ON RENEWABLE ENERGY SOURCES*, Proceedings, Luebeck, Germany, pp. 59–80, 2008.
- [10] Bayer P., D. Saner, S. Bolay, L. Rybach, P. Blum, “Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1256–1267, 2012.

- [11] Rybach L., “Status and Prospects of Geothermal Energy”, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, pp. 25–29, 2010.
- [12] Lund J. W., T. L. Boyd, “Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review”, *Proceedings of World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, pp. 19-25, 2015.
- [13] Todorović R., M. Banjac, B. Vasiljević, “Analytical and experimental determination of the temperature field on the surface of wall heating panels”, *Thermal Science*, vol. 19, no. 2, pp. 497–507, 2015.
- [14] Todorović R., M. Banjac, M. Gojak, “Theoretical and experimental study of heat transfer in wall heating panels”, *Energy and Buildings*, vol. 98, pp. 66–73, 2015.
- [15] Bear J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, originally published: American Elsevier Pub. Co. New York, reprinted by Dover Publications, Inc., 1988.
- [16] De Marsily G., *Quantitative Hydrogeology, Groundwater Hydrology for Engineers*. Academic Press, Inc., 1986.
- [17] Baccino G., S. Lo Russo, G. Taddia, V. Verda, “Energy and environmental analysis of an open-loop ground-water heat pump system in an Urban area”, *Thermal Science*, vol. 14, no. 3, pp. 693–706, 2010.
- [18] Ghaebi H., M. N. Bahadori, M. H. Saidi, “Performance analysis and parametric study of thermal energy storage in an aquifer coupled with a heat pump and solar collectors, for a residential complex in Tehran, Iran”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, no. 1, pp. 156–170, 2014.
- [19] Lee K. S., “A review on concepts, applications, and models of aquifer thermal energy storage systems”, *Energies*, vol. 3, no. 6, pp. 1320–1334, 2010.
- [20] Маркоски М., *Раскладни уређаји, други део*, I издање. Београд: Машински факултет Универзитета у Београду, 2006.
- [21] Rybach L., W. J. Eugster, “Sustainability aspects of geothermal heat pump operation, with experience from Switzerland”, *Geothermics*, vol. 39, no. 4, pp. 365–369, 2010.

- [22] Banks D., “Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: A review and synthesis of analytical approaches”, *Hydrogeology Journal*, vol. 17, no. 5, pp. 1149–1155, 2009.
- [23] Stauffer F., P. Bayer, P. Blum, N. Molina-Giraldo, W. Kinzelbach, *Thermal Use of Shallow Groundwater*. CRC Press, 2013.
- [24] Kobus H., H. Mehlhorn, “Beeinflussung von Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen”, *Das Gas- und Wasserfach, Wasser, Abwasser*, pp. 261–268, 1980.
- [25] Wagner V., P. Blum, “Prozessmodellierung und Chancenanalyse oberflächennaher Erdwärme in Baden-Württemberg”, *Karlsruher Institut für Technologie*, Abschlussbericht, 2012.
- [26] Uffink G. J. M., “Dampening of fluctuations in groundwater temperature by heat exchange between the aquifer and the adjacent layers”, *Journal of Hydrology*, vol. 60, pp. 311–328, 1983.
- [27] Chen C., D. Reddell, “Temperature distribution around a well during thermal injection and a graphical technique for evaluating aquifer thermal properties”, *Water Resources Research*, vol. 19, no. 2, pp. 351–363, 1983.
- [28] Yang S., H. Yeh, “An analytical solution for modeling thermal energy transfer in a confined aquifer system”, *Hydrogeology Journal*, vol. 16, no. 8, pp. 1507–1515, 2008.
- [29] Stopa J., P. Wojnarowski, “Analytical model of cold water front movement in a geothermal reservoir”, *Geothermics*, vol. 35, no. 1, pp. 59–69, 2006.
- [30] Ganguly S., M. S. Mohan Kumar, “Analytical solutions for movement of cold water thermal front in a heterogeneous geothermal reservoir”, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38, no. 2, pp. 451–463, 2014.
- [31] Banks D., *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, John Wiley & Sons, Ltd, 2nd Edition, 2012.

- [32] Banks D., “Thermogeological assessment of open loop well doublet schemes - an analytical approach”, *Proceedings of the IAH (Irish Group) 27th annual groundwater conference*, Ireland, Session IV, pages 4-3 to 4-15, 2007.
- [33] Gringarten A. C., “Reservoir lifetime and heat recovery factor in geothermal aquifers used for urban heating”, *IASPAIN/IASVEI Symposium*, 1977.
- [34] DaCosta J. A., R. R. Bennett, “The pattern of flow in the vicinity of a recharging and discharging pair of wells in an aquifer having areal parallel flow”, *IASH General Assembly, Helsinki, Commission of Subterranean Waters*, pp. 524–536, 1960.
- [35] O Donnell T., “Interflow between recharge and abstracting wells in ambient confined aquifer flow”, *Proceedings of the Exeter Symposium*, IASH Publ. no. 139, pp. 37–48, 1982.
- [36] Johnsen S. G., “An Analytical Mathematical Theoretical Study of Single-Well Push-Pull Echo Tests”, Norwegian University of Science and Technology, Doctoral theses, 2007.
- [37] Kangas M. T., P. D. Lund, “Modeling and simulation of aquifer storage energy systems”, *Solar Energy*, vol. 53, no. 3, pp. 237–247, 1994.
- [38] Tsang C. F., “Aquifer Storage Simulation - in Theory and in Practice”, *International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*, Stockholm, 1983.
- [39] O’Sullivan M. J., K. Pruess, M. J. Lippmann, “State of the art of geothermal reservoir simulation”, *Geothermics*, vol. 30, pp. 395–429, 2001.
- [40] Papadopoulos S. S., S. P. Larson, “Aquifer Storage of Heated Water: Part II- Numerical simulation of Field Results”, *Ground Water*, vol. 16, no. 4, pp. 242–248, 1978.
- [41] Tsang C. F., T. Buscheck, C. Doughty, “Aquifer Thermal Energy Storage - A Numerical Simulation of Auburn University Field Experiments”, 1980.

- [42] Sykes J. F., R. B. Lantz, S. B. Pahwa, D. S. Ward, “Numerical Simulation of Thermal Energy Storage Experiment Conducted by Auburn University”, *Ground Water*, vol. 20, no. 5, pp. 569–576, 1982.
- [43] Andrews C., “The Impact of the Use of Heat Pumps on Ground-Water Temperatures”, *Ground Water*, vol. 16, no. 6. pp. 437–443, 1978.
- [44] Dwyer T., Y. Eckstein, “Finite-element simulation of low-temperature, heat-pump-coupled, aquifer thermal energy storage”, *Journal of Hydrology*, vol. 95, no. 343, pp. 19–38, 1987.
- [45] Vandenbohede A., T. Hermans, F. Nguyen, L. Lebbe, “Shallow heat injection and storage experiment: Heat transport simulation and sensitivity analysis”, *Journal of Hydrology*, vol. 409, no. 1–2, pp. 262–272, 2011.
- [46] Zhou Y., Z. Zhou, “Simulation of Thermal Transport in Aquifer: A GWHP System in Chengdu, China”, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 21, no. 5, pp. 647–657, 2009.
- [47] Kim J., Y. Lee, W. S. Yoon, J. S. Jeon, M. H. Koo, Y. Keehm, “Numerical modeling of aquifer thermal energy storage system”, *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4955–4965, 2010.
- [48] Lee K. S., “Numerical Simulation on the Continuous Operation of an Aquifer Thermal Energy Storage System”, *Energy Storage, Chapter 7*, 2010.
- [49] Nam Y., R. Ooka, “Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real-scale experiment”, *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 1, pp. 69–75, 2010.
- [50] Lo Russo S., G. Taddia, “Advective heat transport in an unconfined aquifer induced by the field injection of an open-loop groundwater heat pump”, *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 6, no. 3, pp. 253–259, 2010.
- [51] Lo Russo S., G. Taddia, V. Verda, “Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis”, *Geothermics*, vol. 43, pp. 66–74, 2012.

- [52] Lo Russo S., L. Gnavi, E. Rocchia, G. Taddia, V. Verda, “Groundwater Heat Pump (GWHP) system modeling and Thermal Affected Zone (TAZ) prediction reliability: Influence of temporal variations in flow discharge and injection temperature”, *Geothermics*, vol. 51, pp. 103–112, 2014.
- [53] Saeid S., R. Al-Khoury, H. M. Nick, F. Barends, “Experimental-numerical study of heat flow in deep low-enthalpy geothermal conditions”, *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 716–730, 2014.
- [54] Saeid S., R. Al-Khoury, H. M. Nick, and M. A. Hicks, “A prototype design model for deep low-enthalpy hydrothermal systems”, *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 408–422, 2015.
- [55] Nagano K., T. Mochida, K. Ochifuji, “Influence of natural convection on forced horizontal flow in saturated porous media for aquifer thermal energy storage”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, no. 12, pp. 1299–1311, 2002.
- [56] Gao Q., X. Z. Zhou, Y. Jiang, X. L. Chen, Y. Y. Yan, “Numerical simulation of the thermal interaction between pumping and injecting well groups”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, no. 1–2, pp. 10–19, 2013.
- [57] Zhou X., Q. Gao, X. Chen, M. Yu, X. Zhao, “Numerically simulating the thermal behaviors in groundwater wells of groundwater heat pump”, *Energy*, vol. 61, pp. 240–247, 2013.
- [58] Драгишић В., “Физичка и хидрогеолошка својства стена (поглавље III)”, *Основи хидрогеологије, Изводи са предавања*, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, 2014.
- [59] Narasimhan A., *Essentials of Heat and Fluid Flow in Porous Media*, CRC Press Taylor and Francis Group, 2013.
- [60] Nield D., A. Bejan, *Convection in Porous Media*, Third Edit. Springer Science+Business Media, Inc., 2006.
- [61] Урумовић К., *Физикалне основе динамике подземних вода*, Свеучилиште у Загребу Рударско-геолошко-нафтни факултет, 2003.

- [62] Илић Г., Н. Радојковић, И. Стојановић, *Термодинамика II - основе простирања топлоте*, Машински факултет у Нишу, 1996.
- [63] Kaviany M., *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, Second edi. Springer-Verlag New York, Inc., 1995.
- [64] Hsu C. T., P. Cheng, “Thermal dispersion in a porous medium”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 33, no. 8, pp. 1587–1597, 1990.
- [65] Nakayama A., F. Kuwahara, Y. Kodama, “An equation for thermal dispersion flux transport and its mathematical modelling for heat and fluid flow in a porous medium”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 563, pp. 81-96, 2006.
- [66] De Lemos M. J. S., “The Double-decomposition Concept for Turbulent Transport in Porous Media”, *Transport phenomena in porous media Volume III*, D. B. Ingham and I. Pop, Eds., p. 476, 2005.
- [67] Dullien F. A. L., *Porous media: Fluid transport and pore structure*, Second edi. Academic Press, Inc., 1992.
- [68] Lage J. L., M. J. D. De Lemos, D. A. Nield, “Modeling Turbulence in Porous Media”, *Transport phenomena in porous media II*, First edit., D. B. Ingham and I. Pop, Eds. Pergamon, p. 449, 2002.
- [69] Patankar S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor and Francis, 1980.
- [70] Murthy J. Y., “Numerical Methods in Heat, Mass, and Momentum Transfer”, School of Mechanical Engineering Purdue University, Draft Notes, 2002.
- [71] Saito M. B., M. J. S. de Lemos, “Laminar heat transfer in a porous channel simulated with a two-energy equation model”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 10, pp. 1002–1007, 2009.
- [72] Cornwell K., *The Flow of Heat*, Van Nostrand Reinhold Company, 1977.
- [73] Kumar V., “Coupling of Free Flow and Flow in Porous Media - A Dimensional Analysis and Numerical Investigation”, Universität Stuttgart - Institut für Wasserbau, Master Thesis, 2011.

- [74] Vadasz P., “Modeling of Flow and Heat Transfer in Porous Media”, *Fluid Flow and Heat Transfer in Rotating Porous Media, Chapter 2*, Springer International Publishing, p. 78, 2015.
- [75] Domenico P. A., F. W. Schwartz, *Physical and Chemical Hydrogeology*, Second Edi. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [76] Црнојевић Ц., *Механика флуида*, Прво издање, Машински факултет Универзитета у Београду, 2014.
- [77] Todd D. K., L. W. Mays, *Groundwater hydrology*, Third Edit. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [78] Fetter C. W., *Applied hydrogeology*, Fourth Edi. Prentice-Hall, Inc., 2001.
- [79] Eppelbaum L., I. Kutasov, A. Pilchin, “Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids”, *Applied Geothermics, Chapter 2*, Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [80] Васиљевић Б., М. Бањац, *Приручник за термодинамику, Табеле и дијаграми*. Машински факултет Универзитета у Београду, 2010.
- [81] “<https://sourceforge.net/p/foam-extend/foam-extend-4.0/ci/master/tree/>.” .
- [82] Weller H. G., G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby, “A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques”, *Computers in Physics*, vol. 12, no. 6, pp. 620–631, 1998.
- [83] Issa R. I., “Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting”, *Journal of Computational Physics*, vol. 62, pp. 40–65, 1986.

Биографија аутора

Мр Ружица И. Тодоровић, рођена Стипић, је рођена 05.11.1974. године у Београду, где је завршила основну школу и IX београдску гимназију. Школске 1993/94. године уписала је Машински факултет Универзитета у Београду. 29.06.2000. године дипломирала је на Одсеку за термотехнику, са просечном оценом у току студија 8,53 (осам и 53/100), положивши дипломски испит из предмета Парни котлови са оценом 10 (десет). Последипломске магистарске студије уписала је школске 2000/01. године на Машинском факултету у Београду, на Одсеку за термотехнику. Магистарску тезу под насловом „Прилог термодинамичкој анализи рада зидних грејно-расхладних панела“ успешно је одбранила 06.07.2009. године.

01.02.2001. засновала је радни однос на одређено време од годину дана на Катедри за термомеханику Машинског факултета у Београду, у својству истраживача. На истој катедри 15.07.2002. године изабрана је у звање асистента-приправника на предметима Термодинамика и Преношење топлоте и супстанције. 06.11.2009. године изабрана је у звање асистента за ужу научну област ТЕРМОМЕХАНИКА, на Катедри за термомеханику Машинског факултета у Београду, где ради и данас. У току свог рада на факултету учествовала је у извођењу наставе на предметима: Термодинамика Б, Термодинамика М и Основи преношења количине топлоте.

Активно се служи програмима из пакета MS OFFICE, програмом за цртање и пројектовање AutoCAD, математичким програмом MathCAD. Течно говори енглески језик.

Аутор је и коаутор на више од 10 стручних и научних радова. У својству истраживача учествовала је у раду на 7 научних пројеката на националном нивоу и једном међународном пројекту.

Удата је и има три сина.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана мр Ружица И. Тодоровић

Број индекса

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ПОДЗЕМНИ ВОДОНОСНИ СЛОЈ КАО СЕЗОНСКИ ТЕРМИЧКИ РЕЗЕРВОАР ТОПЛОТНЕ ПУМПЕ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 21.09.2017. год.

Тодоровић Ружица

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора мр Ружица И. Тодоровић

Број индекса

Студијски програм

Наслов рада ПОДЗЕМНИ ВОДОНОСНИ СЛОЈ КАО СЕЗОНСКИ ТЕРМИЧКИ
РЕЗЕРВОАР ТОПЛОТНЕ ПУМПЕ

Ментор проф. др Милош Бањац

Потписана мр Ружица И. Тодоровић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 21.09.2017. год.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ПОДЗЕМНИ ВОДОНОСНИ СЛОЈ КАО СЕЗОНСКИ ТЕРМИЧКИ
РЕЗЕРВОАР ТОПЛОТНЕ ПУМПЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 21.09.2017. год.

Тодорчић Радиса

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.