

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره هفت، مهرماه ۹۹

## ارزیابی هیدروژئولوژیکی سیستم پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی (GWHP)

هاجر برزگر<sup>۱</sup>

هادی جعفری<sup>۲\*</sup>

[h\\_jafari@shahroodut.ac.ir](mailto:h_jafari@shahroodut.ac.ir)

سید مجید هاشمیان<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۱۹

### چکیده

**زمینه و هدف:** پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی که در آن از دمای ثابت آب‌های زیرزمینی در قالب منبع انرژی پاک و قابل تجدید برای گرمایش و سرمایش استفاده می‌شود، راهکاری برای ذخیره انرژی و کاهش تولید دی‌اکسید کربن می‌باشد. بدین منظور آب زیرزمینی، توسط چاه پمپاژ استخراج شده و پس از عبور از مبدل حرارتی و انجام تبدلات گرمایی از طریق چاه تزریق به آبخوان بازگردانده می‌شود. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی هیدروژئولوژیکی پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی (GWHP) می‌باشد که در سال ۱۳۹۴ انجام شده است.

**روش بررسی:** نظر به مشابهت معادلات حاکم بر انتقال جرم و گرما در محیط متخلخل، کد تخصصی مدل‌سازی انتقال جرم MT3DMS، با رویکرد بررسی انتقال حرارت در آب زیرزمینی به کار گرفته شده و شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال حرارت انجام شده است.

**یافته‌ها:** نتایج نشان می‌دهد آب تزریق شده به سفره، به علت تبادل انرژی در سیستم پمپ حرارتی، موجب تشکیل هاله حرارتی در اطراف چاه تزریق می‌شود. وجود این هاله به عنوان نشانگر تأثیرگذاری دمای آب تزریق شده بر آبی که به عنوان منبع در زیرزمین وجود دارد تلقی می‌گردد. میزان بزرگی هاله از نظر انتقال حرارت و نهایتاً کارایی سیستم مطلوب نبوده و وسعت و جهت حرکت آن به‌طور مستقیم تحت تأثیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی می‌باشد.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۲- دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود. \* (مسئول مکاتبات)

۳- استادیار مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

**بحث و نتیجه گیری:** بر اساس نتایج واضح مدل سازی، با تغییر پارامترهای هدایت هیدرولیکی وابسته به نوع رسوبات در محیط متخلخل، شیب هیدرولیکی و تخلخل، وسعت هاله حرارتی دچار تغییر شده که می تواند عملکرد پمپ حرارتی را تحت تأثیر قرار دهد. از نتایج می - توان جهت به کارگیری این سیستم در کشور با توجیه پذیری فنی - اقتصادی استفاده نمود.

**واژه های کلیدی:** پمپ حرارتی آب زیرزمینی، شبیه سازی گرما، MT3DMS .GWHP

## Hydrogeological Assessment of the Groundwater Heat Pump (GWHP) System

Hajar Barzegar<sup>1</sup>

Hadi Jafari<sup>2\*</sup>

[h\\_jafari@shahroodut.ac.ir](mailto:h_jafari@shahroodut.ac.ir)

Seyed Majid Hashemian<sup>3</sup>

Admission Date: October 10, 2018

Date Received: October 11, 2017

### Abstract

**Background and objective:** Groundwater heat pump (GWHP) system that uses the constant temperature of the groundwater as the source of the clean and renewable energy for heating and cooling, is applied as a strategy for energy saving and the CO<sub>2</sub> reduction. In this technique, groundwater is extracted by pumping wells, passed through the heat exchanger and then returned to aquifer through the injection shafts. This research is aimed to assess the Groundwater Heat Pump (GWHP) System from hydrogeological point of view.

**Method:** Regarding the mathematical similarities between transport of the heat and mass in porous media, the applied computer code of MT3DMS in mass transport modelling, was used in this study for simulation of the heat transfer in the groundwater system to assess the GWHP from hydrogeological viewpoint.

**Finding:** The results show that a thermal plume is developed around the injection well due to the energy exchanges in GWHP system. This plume is regarded as an indicator of the impact of the injected water temperature on the underground source. Its extent and direction which are directly affected by the hydrogeological parameters is not fair from the heat transport aspect and finally the performance of the GWHP system.

**Discussion and Conclusion:** Modelling results clearly show that with the change in hydraulic conductivity in relation to the type of the sediments in porous media, hydraulic gradient and porosity of aquifer, the extent of the thermal plume is changed, expecting impacts on functionality of the GWHP system. The results of the study can be used in utilization of the GWHP system in the country, of course after the technical-and-economic justifications.

**Keywords:** Groundwater Heat Pump, Heat simulation, GWHP, MT3DMS.

---

1- Former M.Sc. Student of Hydrogeology, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Associate Professor of Hydrogeology, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran \*(Corresponding Author)

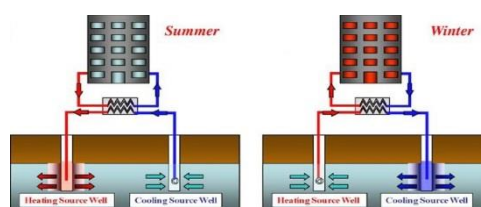
3- Assistant Professor of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

## مقدمه

هایی نیز به وجود آورده است (۴). شبیه‌سازی پراکنش گرما اطراف چاه‌های تزریق آب برگشتی از پمپ حرارتی آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار FEFLOW نشان می‌دهد منحنی‌های هم‌دمای (ایزوترم) ایجاد شده توسط آب گرم تزریق شده به داخل سفره آب زیرزمینی به مرور زمان و با فاصله از چاه تزریق کشیده شده و کم‌دما می‌شوند. مقایسه ایزوترم‌ها در حالت‌های پایدار و ناپایدار نشان‌دهنده وسعت بیشتر هاله گرمایی در جریان ناپایدار می‌باشد (۵-۷). ارزیابی منطقه تحت تاثیر حرارت بر اساس میانگین داده‌های روزانه، ماهانه و فصلی به منظور جلوگیری از تداخل با ساختارهای زیرزمینی مهم به مدل‌سازی حرارتی سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی بیانگر تخمین اشتباه منطقه تحت تاثیر حرارت بر اساس مقادیر میانگین فصلی می‌باشد (۶). تاثیر استخراج آب و وسعت هاله حرارتی در سیستم پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی نشان‌دهنده تاثیر چیدمان چاه‌های پمپاژ و تغذیه در بازدهی سیستم می‌باشد (۸). همچنین مطالعات مدل‌سازی (۹) در خصوص تاثیر چیدمان چاه‌ها بر کارایی سیستم پمپ حرارتی نشان‌دهنده آرایش (چیدمان) ردیفی به عنوان بهترین گزینه و با بیشترین کارایی می‌باشد. بررسی آثار گرمایی جنبه‌ای بسیار مهم در طراحی سیستم‌های پمپ حرارتی با منبع آب زیرزمینی بوده، چرا که موجب تغییر تدریجی دمای آب در چاه پمپاژ شده و بر کارایی سیستم اثر منفی دارد. در این راستا اثر سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی در انتقال حرارت به‌ویژه برای سفره‌های با هدایت هیدرولیکی و تخلخل بالا بسیار حائز اهمیت می‌باشد (۱۰).

فرآیندهای تبدیل و تأمین انرژی اغلب با تولید آلاینده‌گی در محیط زیست همراه بوده و بنابراین سطح آلودگی محیط به‌طور روزمره در حال افزایش می‌باشد. به منظور ایجاد راهکاری برای کاهش تولید دی‌اکسیدکربن در جو، بشر به تکنولوژی ذخیره انرژی و استفاده از انرژی‌های پاک روی آورده است. یکی از این تکنیک‌ها، پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی یا (GWHP) (Ground Water Heat Pump) است که در آن از دمای ثابت آب‌های زیرزمینی به عنوان منبع حرارتی استفاده می‌شود. در زمستان دمای آب‌های زیرزمینی گرم‌تر از هوای محیط بوده و برعکس در تابستان سردتر می‌باشد. لذا با استفاده از سیکل پمپ حرارتی می‌توان در زمستان گرما را از آب‌های زیرزمینی به داخل ساختمان منتقل نمود و در تابستان دمای پایین‌تر آب‌های زیرزمینی این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان گرما را از فضای درونی ساختمان به داخل زمین هدایت نمود. در یک پمپ حرارتی مجهز به منبع آب‌های زیرزمینی (شکل ۱)، آب زیرزمینی با دمای ثابت توسط چاه (های) پمپاژ استخراج شده و پس از عبور از مبدل حرارتی و انجام تبادلات گرمایی از طریق چاه (های) تزریق به سفره آب زیرزمینی (آبخوان) بازگردانده می‌شود (۱).

در دهه اخیر، استفاده جهانی از انرژی زمین‌گرمایی کم‌عمق نظیر تکنیک پمپ حرارتی آب زیرزمینی، جهت گرمایش و سرمایش منازل و مناطق صنعتی گسترش زیادی پیدا کرده و نصب چنین سیستم‌هایی در نواحی مسکونی و تجاری در حال رشد می‌باشد (۲، ۳). لیکن مسائل و مشکلات مرتبط با تغییرات دمای سفره آب زیرزمینی به خاطر حضور این سیستم‌ها نگرانی-



شکل ۱- مکانیزم پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی در فصول سرد (راست) و گرم (چپ) سال (۱)

Figure 1. GWHP mechanism in cold (right) and warm (left) seasons (1)

بررسی‌ها نشان می‌دهد عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی بستگی زیادی به شرایط آب زیرزمینی و خصوصیات حرارتی زمین دارد (۱۱). بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی سیستم پمپ حرارتی با منبع آب زیرزمینی (۹) در طراحی سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی، محل احداث چاه‌های پمپاژ و تزریق بسیار مهم می‌باشد. شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در سفره آب زیرزمینی به عنوان روشی مناسب در بررسی تاثیر پمپ حرارتی بر منابع آب زیرزمینی توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (۸ و ۱۲-۱۹). مطالعات انجام یافته در ایران در خصوص پمپ‌های حرارتی توسط سازمان انرژی‌های نو (سانا) انجام گرفته و سیستم‌های نصب شده فعلی همگی از منبع زمین (نه آب زیرزمینی) به عنوان منبع حرارتی برای تبادل گرما استفاده می‌نمایند. نتایج این مطالعات کارایی استفاده از این سیستم‌ها را در کاهش مصرف انرژی نشان داده، لیکن مدارک منتشر شده جامعی در خصوص این مطالعات وجود ندارد (۲۰). نظر به اهمیت سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در کاهش مصرف انرژی و همچنین حرکت به سمت استفاده از این تکنولوژی به عنوان انرژی پاک در ایران، انجام تحقیقات و پژوهش‌های بیشتر در خصوص این موضوع ضرورت دارد. لذا تحقیق حاضر ضمن معرفی سیستم

پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی، با هدف شبیه‌سازی انتقال حرارت در سفره آب زیرزمینی متاثر از پمپ حرارتی انجام گرفته است. بررسی گسترش هاله حرارتی و نقش پارامترهای هیدروژئولوژیکی در گسترش آن از دیگر اهداف تحقیق حاضر می‌باشد.

### روش بررسی

#### - آبخوان مورد بررسی

بر اساس اطلاعات موجود در خصوص آبخوانهای واقعی در مقالات مرتبط (۱۲، ۱۵) محدوده‌ای مربع شکل از یک آبخوان به ابعاد  $1000 \times 1000$  متر (شکل ۲) جهت شبیه‌سازی انتقال حرارت در نظر گرفته شده است. آبخوان مورد نظر آزاد و تک-لایه به ضخامت ۳۰ متر می‌باشد. آبخوان همگن و ایزوتروپ فرض شده و هدایت هیدرولیکی آن حدود ۱۳۰ متر بر روز می‌باشد. مرزهای شمالی و جنوبی آبخوان مرز غیرقابل نفوذ (بدون جریان) و مرزهای شرقی و غربی آن مرز با بار ثابت به ترتیب با ارتفاع برابر ۲۲۴ و ۲۲۹ متر می‌باشند. بر این اساس جهت جریان در آبخوان مدنظر در راستای غرب به شرق بوده و گرادیان هیدرولیکی برابر  $0/005$  محاسبه می‌گردد. تخلخل و آبدهی ویژه آبخوان مورد نظر که هر دو بدون بعد می‌باشند، به ترتیب برابر  $0/2$  و  $0/25$  در نظر گرفته شده است (۱۲، ۱۵).



شکل ۲- مشخصات آبخوان فرضی مورد بررسی جهت شبیه‌سازی پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی (GWHP).

Figure 2. Characteristics of the hypothetical aquifer for simulating GWHP system.

برگشتی از پمپ حرارتی که از طریق چاه تزریق به سفره آب زیرزمینی هدایت می‌گردد، افزایش می‌یابد. این دوره اصطلاحاً دوره سرمایش نام‌گذاری می‌شود. برعکس در شش ماه دوم سال که اصطلاحاً دوره گرمایش نامیده می‌شود، دمای آب برگشتی نسبت به دمای اولیه آبخوان موردنظر پایین‌تر می‌باشد. دمای اولیه آب زیرزمینی در آبخوان برابر ۲۸۵/۱۵ درجه کلون (۱۲ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای حرارتی و هیدروژئولوژیکی آبخوان مورد بررسی مطابق جدول ۱ لحاظ شده است.

جهت شبیه‌سازی اثر پمپ حرارتی مجهز به منبع آب زیرزمینی، یک چاه پمپاژ در فاصله ۳۰۰ متری مرز غربی در نظر گرفته شده است. چاه یادشده آب مورد نیاز سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی را تأمین می‌نماید. آب پمپاژ شده پس از چرخش در سیکل‌های مربوط و انجام تبدلات حرارتی (شکل ۱) از طریق یک چاه تزریق در فاصله ۲۰۰ متری شرق چاه پمپاژ، دوباره به سفره آب زیرزمینی باز می‌گردد.

مطابق شرایط اقلیمی ایران در شش ماه اول هر سال شمسی، با توجه به بالا بودن دمای محیط و تبادل حرارت آن با آب زیرزمینی مورد استفاده در سیستم پمپ حرارتی، دمای آب

### جدول ۱- مقادیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی و حرارتی آبخوان جهت شبیه‌سازی سیستم GWHP

Table 1. Hydrogeological and thermal parameters of the aquifer for simulating GWHP system

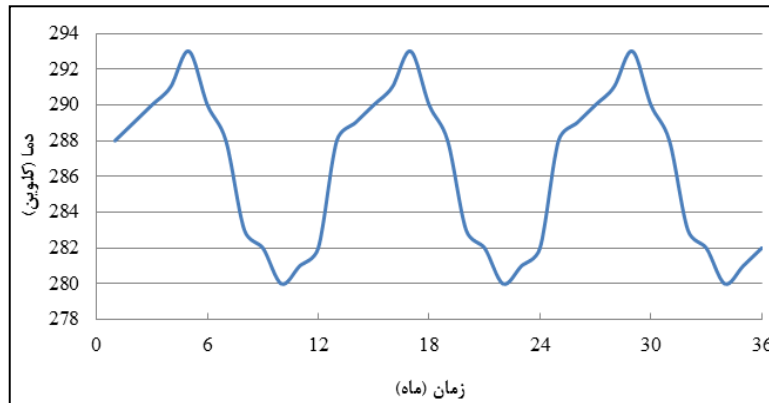
پارامترهای حرارتی		پارامترهای هیدروژئولوژیکی	
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱۰×۱/۹	ضریب انتشار مولکولی (متر مربع در روز)	۲۲۴-۲۲۹	بار هیدرولیکی اولیه (متر)
۰/۱	TRPT (نسبت پراکنش عرضی افقی به پراکنش طولی)	۰/۲	تخلخل
۰/۱	TRPV (نسبت پراکنش عرضی عمودی به پراکنش طولی)	۱۲۹/۶	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)
۰/۰۰۰۲۱	ضریب توزیع (متر مکعب بر کیلوگرم)	۱۹۶۰	چگالی مواد سفره (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۸۱-۲۹۳	دمای آب تزریقی (کلون)	۰/۰۰۵	شیب هیدرولیکی
۱	پراکنش طولی (متر)	۰/۲۵	آبدهی ویژه
۲۸۵/۱۵	دمای اولیه سفره (کلون)	۱۳۳۰-۳۴۰	دبی (مترمکعب در روز)

محاسبه شده و سپس با استفاده از تعریف چگالی، به دبی حجمی (نرخ پمپاژ یا برداشت از آبخوان) تبدیل شده است.

$$q = m^{\circ}C\Delta T \quad \text{معادله ۱:}$$

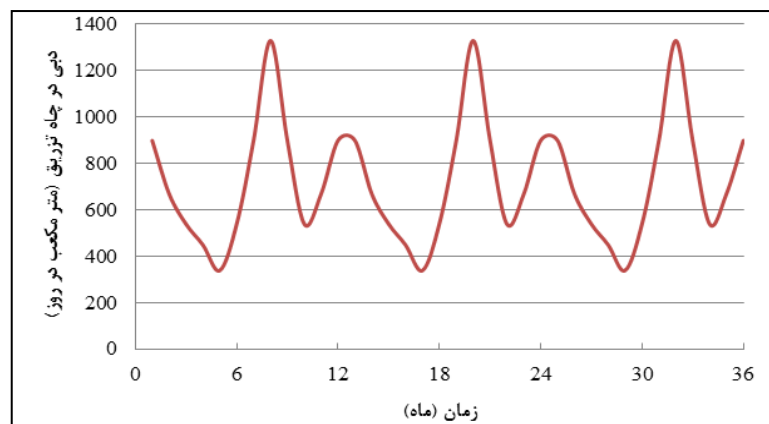
که در این معادله  $q$  نیاز انرژی ساختمان (برحسب وات)،  $m^{\circ}$  دبی جرمی آب (برحسب کیلوگرم در ثانیه)،  $C$  ظرفیت حرارتی ویژه آب (۴۲۰۰ ژول بر کیلوگرم بر کلون) و  $\Delta T$  اختلاف دما (بر حسب کلون) می‌باشند. نوسانات دبی چاه تزریق در طول سال در یک دوره سه ساله مطابق شکل ۴ محاسبه شده است. با توجه به شکل بیشترین دبی تزریق در ماه مهر هر سال رخ داده است.

در این تحقیق با در نظر گرفتن دمای آسایش برابر ۲۲ درجه سانتی‌گراد و با عنایت به تغییرات ماهانه دمای محیط، دمای آب تزریق شده به سفره آب زیرزمینی محاسبه شده که نوسانات آن در طول ماههای مختلف سال در یک دوره سه ساله مطابق شکل ۳ می‌باشد. با توجه به اختلاف بین دمای اولیه آب زیرزمینی (ورودی به سیستم حرارتی) و دمای آب تزریق شده به آبخوان (خروجی از سیستم حرارتی) و با عنایت به نیاز انرژی برای مساحت فرضی هزار مترمربع (مساحت محدوده ایجاد دمای آسایش مثلاً یک ساختمان) دبی جرمی آب مورد نیاز برای تأمین دمای آسایش از طریق معادله شماره ۱ برای هر ماه



شکل ۳- تغییرات دمای آب تزریق شده به آبخوان مورد بررسی در یک دوره سه ساله (شروع دوره فروردین ماه می باشد)

Figure 3. Temperature variations of the injected water into the aquifer in a 3-year period (starting March 21)



شکل ۴- تغییرات دبی در چاه تزریق در یک دوره سه ساله (شروع دوره فروردین ماه می باشد)

Figure 4. Flow rate variations of the injected well in a 3-year period (starting March 21)

#### یافته‌ها

##### - شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان

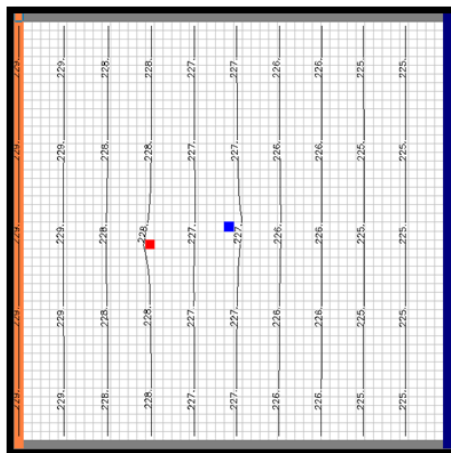
با توجه به مدل مفهومی آبخوان مورد بررسی (شکل ۲)، مدل - سازی جریان آب زیرزمینی در محدوده مربعی شکل آبخوان (متشکل از ۵۰ ردیف و ۵۰ ستون به ابعاد یکسان ۲۰×۲۰ متر) برای یک دوره سه ساله و با در نظر گرفتن ۳۶ دوره تنش یک ماهه انجام و نتایج حاصل از آن که شامل توزیع بار هیدرولیکی (ارتفاع سطح آب زیرزمینی) در بخش‌های مختلف آبخوان می - باشد، در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر بار هیدرولیکی از تراز ۲۲۹ متر در بخش غربی به تراز ۲۲۴ متر در بخش شرقی کاهش می‌یابد. فروافتادگی سطح آب زیرزمینی (ایستایی) در محدوده چاه پمپاژ در اثر برداشت آب زیرزمینی و بالا آمدگی

##### - شبیه سازی انتقال حرارت در آبخوان مورد بررسی

در این تحقیق ابتدا مدل جریان آب زیرزمینی در آبخوان مورد بررسی که پیش‌نیاز شبیه‌سازی انتقال حرارت می‌باشد، با کد کامپیوتری MODFLOW و با استفاده از نرم‌افزار PMWIN تهیه شده است. سپس با در نظر گرفتن حرارت به عنوان یک گونه آلودگی از کد MT3DMS برای شبیه‌سازی انتقال حرارت در آبخوان متأثر از پمپ حرارتی استفاده گردید. کد MT3DMS به صورت گسترده برای شبیه‌سازی انتقال جرم در محیط متخلخل به کار می‌رود. ساختار معادلات انتقال جرم و حرارت بسیار شبیه یکدیگر بوده و بنابراین با جاگذاری مقادیر معادل پارامترهای مختلف، می‌توان معادله انتقال جرم را برای حل مسایل مرتبط با انتقال حرارت در یک سفره با استفاده از کد MT3DMS به کار برد (۸).

بازگشتی از سیستم پمپ حرارتی ایجاد شده است.

سطح آب زیرزمینی در محدوده چاه تزریق در اثر تغذیه آب



شکل ۵- توزیع بار هیدرولیکی در آبخوان مورد بررسی در پایان دوره سه ساله شبیه‌سازی جریان با MODFLOW

Figure 5. Aquifer hydraulic head at the end of groundwater flow simulation using MODFLOW

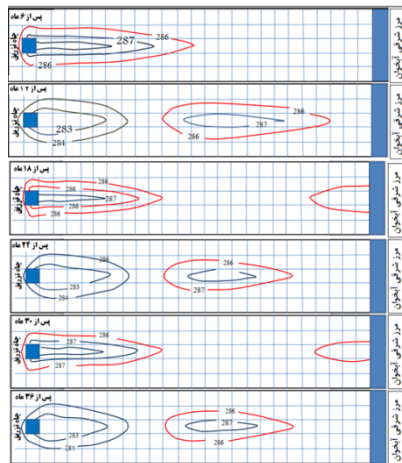
شکل ۶ گسترش هاله حرارتی در آبخوان مورد بررسی در شش دوره زمانی (پایان هر شش ماه) را نشان می‌دهد. شش ماه اول شروع کار سیستم (بهار و تابستان) دوره سرمایش بوده و بنابراین دمای آب تزریق شده به سفره، گرم‌تر از دمای زمینه می‌باشد. حداکثر دما در هاله حرارتی ۲۸۹ درجه کلوین بوده و به تدریج با فاصله از منبع (چاه تزریق) کاهش می‌یابد، تا اینکه تقریباً در فاصله ۳۰۰ متری از آن با دمای زمینه سفره آب زیرزمینی (۲۸۵/۱۵ کلوین) برابر می‌شود. شش ماه بعد (پاییز و زمستان) دوره گرمایش بوده و دمای آب برگشتی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی به آبخوان سردتر از دمای زمینه می‌باشد. دما در اطراف چاه تزریق سرد بوده (حدود ۲۸۲ کلوین) و به تدریج با فاصله از آن شروع به افزایش می‌نماید تا اینکه در فاصله ۳۰۰ متری به نقطه اوج خود می‌رسد، زیرا در این زمان هاله گرم تشکیل شده در دوره سرمایش، در نقطه یادشده (سیصد متری چاه تزریق) قرار گرفته است. سپس با افزایش فاصله دما کاهش یافته و در فاصله ۵۰۰ متری به دمای زمینه سفره آب زیرزمینی می‌رسد. توزیع حرارت در زمانهای بعدی مورد بررسی در شکل ۶ مشخص شده است.

#### - شبیه‌سازی انتقال حرارت در آبخوان

مطابق توضیحات ارائه شده قبلی، دما در مرز غربی آبخوان مورد بررسی ثابت و برابر ۲۸۵/۱۵ کلوین (۱۲ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. این مرز در مدل عددی انتقال حرارت (MT3DMS) به‌عنوان مرز با دمای ثابت (ICBOUND=-1) تعریف شده است. هم‌چنین مرزهای غیرقابل نفوذ شمالی و جنوبی آبخوان به عنوان سلول‌های عایق دمایی (IBOUND=0) معرفی گردید. سایر سلول‌های شبکه مدل انتقال حرارت به عنوان سلول فعال (IBOUND=1) در نظر گرفته شده و دمای اولیه (شرایط اولیه) در آنها برابر ۲۸۵/۱۵ درجه کلوین لحاظ شده است.

برای مشخص کردن ورود یا خروج حرارت به آبخوان از بسته Sink/Source Concentration استفاده شده است. دمای آب ورودی به سفره آب زیرزمینی در چاه تزریق در هر دوره تنش (ماه) به دلیل تأثیرپذیری از تبدلات حرارتی در سیستم پمپ حرارتی متغیر بوده که مقادیر آن مطابق شکل ۳ در مدل عددی انتقال حرارت وارد شده است. دمای برداشت (چاه پمپاژ) برابر دمای زمینه آبخوان (۲۸۵/۱۵ درجه کلوین) در نظر گرفته شده است.



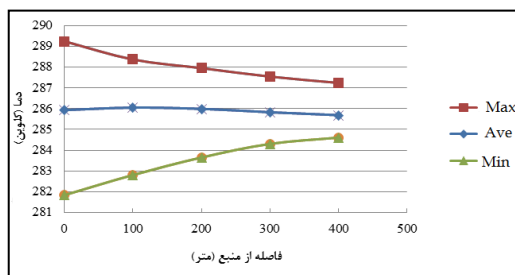


شکل ۶- گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در آبخوان مورد بررسی

Figure 6: Distribution of the GWHP-resulted thermal plume in the aquifer.

در شکل ۷ تغییر دمای آب زیرزمینی با فاصله از چاه تزریق (منبع حرارت) نشان داده شده است. بیشترین تغییرات دمایی در محل چاه تزریق و مناطق نزدیکتر به آن مشاهده شده و با افزایش فاصله نوسانات دمایی کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ تغییر دمای آب زیرزمینی با فاصله از چاه تزریق (منبع حرارت) نشان داده شده است. بیشترین تغییرات دمایی در محل چاه تزریق و مناطق نزدیکتر به آن مشاهده شده و با افزایش فاصله نوسانات دمایی کاهش می‌یابد.



شکل ۷- میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دمای آب زیرزمینی با فاصله از چاه تزریق (متر)

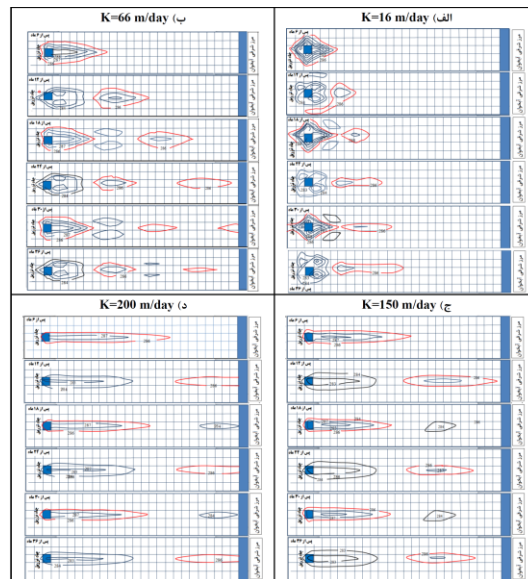
Figure 7. Temperature (Ave., Max., Min) variations of the groundwater with distance (m) from injected well.

تغییر در هدایت هیدرولیکی آبخوان به معنی تغییر در خصوصیات سیال و محیط متخلخل (برای مثال بافت خاک) می‌باشد (۲۱). گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش ماهه در مقادیر مختلف هدایت هیدرولیکی در شکل ۸ ارائه شده است.

بررسی تأثیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی بر توسعه هاله حرارتی

الف) هدایت هیدرولیکی

برای ارزیابی تأثیر پارامتر هدایت هیدرولیکی بر توسعه هاله حرارتی، مقادیر آن از حداقل ۱۶ متر در روز تا حداکثر ۲۰۰ متر در روز تغییر یافته و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

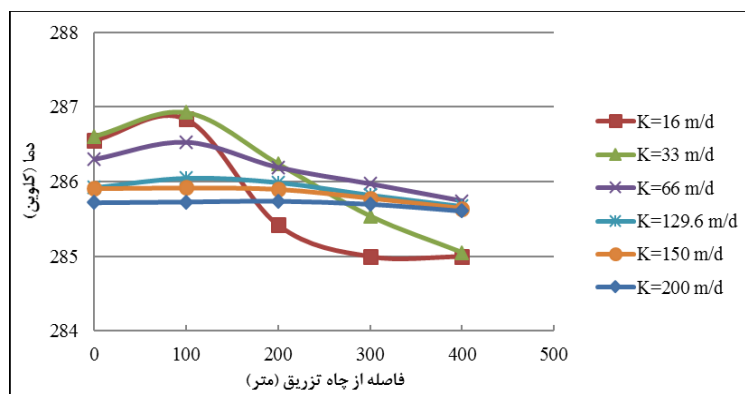


شکل ۸- گسترش هاله حرارتی پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش ماهه با مقادیر مختلف هدایت هیدرولیکی

Figure 8. Development of the GWHP thermal plume at 6-month periods with different hydraulic conductivities

شکل هاله حرارتی به دایره نزدیک می‌شود. تغییرات میانگین دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی در شکل ۹ ارائه شده است. در مقادیر هدایت هیدرولیکی کم، میانگین دما حتی در فواصل دور از منبع نوسان زیادی نشان می‌دهد. با افزایش هدایت هیدرولیکی این نوسانات به حداقل رسیده و تقریباً در یک درجه بالاتر از دمای زمینه و اولیه آبخوان ثابت می‌باشد.

در آبخوان‌های با بافت دانه درشت‌تر (مقادیر هدایت هیدرولیکی بالاتر)، سرعت حرکت هاله به سمت پایین‌دست بیش‌تر بوده و لذا پهنا یا عرض هاله کم‌تر شده و طول آن در جهت جریان کشیده‌تر می‌گردد. هر چه بافت خاک در محیط متخلخل دانه‌ریزتر باشد (هدایت هیدرولیکی کم‌تر) هاله تشکیل‌شده به آرامی در جهت جریان حرکت کرده و بنابراین گسترش طولی و عرضی هاله حرارتی تقریباً یکسان شده و



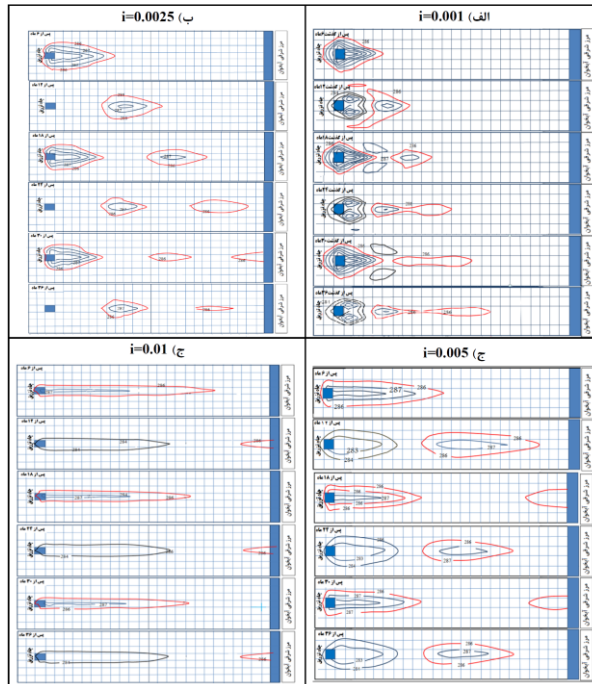
شکل ۹- تغییرات میانگین دما با فاصله از چاه تزریق در مقادیر مختلف هدایت هیدرولیکی

Figure 9. Mean temperature variations with distance from injected well in different hydraulic conductivities.

**ب) شیب (گرادیان) هیدرولیکی**

برای ارزیابی تأثیر پارامتر شیب هیدرولیکی بر گسترش هاله حرارتی، مقادیر شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ در مدل‌های جریان و انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۰). با افزایش شیب هیدرولیکی، هاله

حرارتی گسترش طولی بیش‌تری یافته و در شیب‌های هیدرولیکی اندک گسترش عرضی آن اطراف چاه تزریق بیش‌تر می‌شود. هر چه شیب هیدرولیکی بیش‌تر باشد، سرعت آب زیرزمینی بالاتر می‌شود و هاله حرارتی سریع‌تر در جهت جریان حرکت می‌کند.



**شکل ۱۰- گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در پایان دوره‌های شش ماهه با مقادیر مختلف گرادیان هیدرولیکی**

Figure 10. Development of the GWHP thermal plume at 6-month periods under different hydraulic gradients

در این تحقیق کد کامپیوتری MT3DMS که برنامه‌ای کاربردی در مدل‌سازی انتقال جرم می‌باشد، به علت مشابهت معادلات حاکم در انتقال جرم و انتقال حرارت با رویکرد بررسی انتقال حرارت در آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته که نتایج بیانگر توانایی این مدل در شبیه‌سازی انتقال حرارت می‌باشد. برداشت از آب زیرزمینی جهت انجام تبادلات حرارتی در سیستم پمپ حرارتی با منبع آب زیرزمینی و تزریق مجدد آن به آبخوان سبب تغییرات دمایی در منابع آب زیرزمینی می‌گردد. مطابق شرایط اقلیمی ایران، در فصول بهار و تابستان (دوره سرمایش) دمای آب تزریق شده به آبخوان بالاتر و در فصول پاییز و زمستان (دوره گرمایش) کمتر از دمای اولیه آب زیرزمینی می‌باشد. این موضوع توسعه هاله‌های حرارتی گرم و سرد را به ترتیب در دوره‌های سرمایش و گرمایش

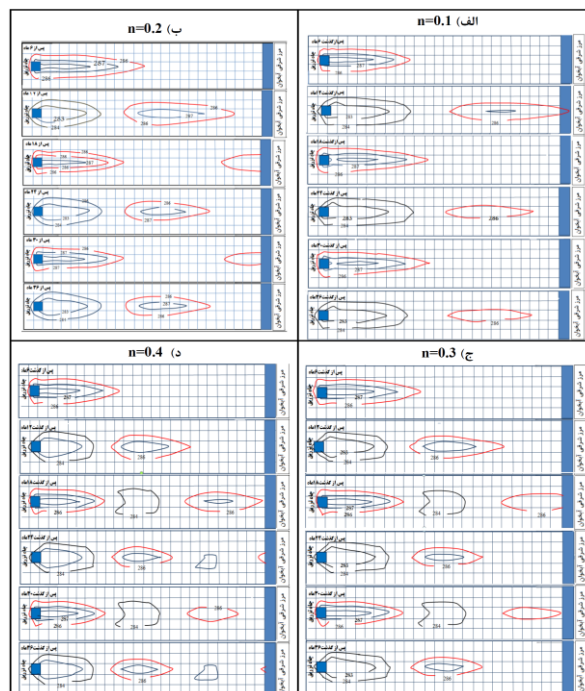
**ج) تخلخل**

به منظور بررسی تأثیر تخلخل بر توسعه هاله حرارتی مقادیر متفاوت تخلخل (۰/۱، ۰/۳ و ۰/۴) در مدل جریان و انتقال حرارت اعمال و نتایج مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۱). با افزایش تخلخل آبخوان که معرف بافت دانه‌ریزتر رسوبات می‌باشد، هاله حرارتی وسعت کم‌تری داشته و با کاهش آن (معرف بافت دانه درشت‌تر رسوبات) هاله حرارتی با سرعت بیشتری حرکت نموده و گسترش زیادتری می‌یابد.

**بحث و نتیجه‌گیری**

گسترش طولی بیش‌تری یافته و بیشترین نوسانات دمایی در فواصل مختلف از چاه تزریق در حداقل مقادیر شیب هیدرولیکی مشاهده می‌گردد. مطابق نتایج تغییرات تخلخل تاثیر ناچیزی بر گسترش هاله حرارتی و نوسانات دمایی در آبخوان دارد. با توجه به لزوم حرکت به سمت استفاده از انرژیهای پاک نظیر سیکل پمپ حرارتی در ایران، از نتایج تحقیق حاضر می‌توان به عنوان پیشنهادهایی جهت به‌کارگیری این سیستم در کشور با توجه پذیرد فنی - اقتصادی استفاده نمود.

در آبخوان سبب می‌گردد. مطابق نتایج تحقیق بیشترین نوسانات دمایی در فواصل نزدیک به چاه تزریق دیده می‌شود. در آبخوان‌های با بافت خاک درشت دانه که هدایت هیدرولیکی بالاتری دارند، سرعت حرکت هاله به سمت پایین‌دست بیش‌تر بوده و هاله در جهت جریان کشیده می‌شود. محدوده تغییرات دمایی در فواصل مختلف از چاه تزریق در مقادیر پایین‌تر هدایت هیدرولیکی، بیشتر بوده که این موضوع بایستی در طراحی و مکان‌یابی چاه تزریق در سیستم پمپ حرارتی مورد توجه قرار گیرد. همچنین با افزایش شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی، هاله حرارتی در جهت جریان



شکل ۱۱- گسترش هاله حرارتی ناشی از پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش ماهه با مقادیر مختلف تخلخل

Figure 11. Development of the GWHP thermal plume at 6-month periods with various porosity values

2. Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D., & Rybach, L. (2003). Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, 32(4), 579-588.
3. Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 2011. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics* 40 (3), 159-180.

#### تشکر و قدردانی

از دانشگاه صنعتی شاهرود به‌دلیل فراهم نمودن شرایط انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

#### Reference

1. Nam, Y., & Ooka, R. (2011). Development of potential map for ground and groundwater heat pump systems and the application to Tokyo. *Energy and Buildings*, 43(2), 677-685.

- MT3DMS for heat transport simulation of closed geothermal systems. *Ground Water* 48 (5), 741-756
13. Rode, A., Liesch, T., & Goldscheider, N. (2015). Open-loop geothermal heating by combined extraction-injection one-well systems: A feasibility study. *Geothermics*, 56, 110-118.
  14. Russo, S. L., Taddia, G., & Gnani, L., (2012). An open-loop ground-water heat pump system: transient numerical modeling and site experimental results. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*.
  15. Russo, S. L., & Taddia, G. (2010). Advective heat transport in an unconfined aquifer induced by the field injection of an open-loop groundwater heat pump. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(3), 253.
  16. Taddia, G., Russo, S. L., & Verda, V. (2015). Comparison Between Neural Network and Finite Element Models for the Prediction of Groundwater Temperatures in Heat Pump (GWHP) Systems. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 6* (pp. 255-258). Springer International Publishing.
  17. Casasso, A., Piga, B., Pace, F., Godio, A., & Sethi, R. (2017). Thermal impact assessment of Groundwater Heat Pumps (GWHPs): modelling assumptions and key parameters.
  18. Wu, Q., Tu, K., Sun, H., & Chen, C. (2018). Investigation on the sustainability and efficiency of single-well circulation groundwater heat pump systems. *Renewable Energy*.
  19. Russo, S. L., Taddia, G., Abdin, E. C., & Verda, V. (2016). Effects of different re-injection systems on the thermal affected zone (TAZ) modelling for open-loop
  4. Ferguson, G., 2009. Unfinished business in geothermal energy. *Ground Water*, 47(2), 167-167.
  5. Russo, S. L., Taddia, G., & Verda, V. (2012). Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: a sensitivity analysis. *Geothermics*, 43, 66-74.
  6. Russo, S. L., Gnani, L., Rocca, E., Taddia, G., & Verda, V. (2014). Groundwater Heat Pump (GWHP) system modeling and Thermal Affected Zone (TAZ) prediction reliability: Influence of temporal variations in flow discharge and injection temperature. *Geothermics*, 51, 103-112.
  7. Russo, S. L., Taddia, G., & Abdin, E. C. (2015). 167-Open-Loop Groundwater Heat Pump (Gwhp) Injection Systems: Effects On Thermal Affected Zone (Taz) Development.
  8. Beretta, G. P., Coppola, G., & Della Pona, L. (2014). Solute and heat transport in groundwater similarity: model application of a high capacity open-loop heat pump. *Geothermics*, 51, 63-70.
  9. Gao, Q., Zhou, X. Z., Jiang, Y., Chen, X. L., & Yan, Y. Y. (2013). Numerical simulation of the thermal interaction between pumping and injecting well groups. *Applied Thermal Engineering*, 51(1), 10-19.
  10. Zhou, X., Gao, Q., Chen, X., Yu, M., & Zhao, X. (2013). Numerically simulating the thermal behaviors in groundwater wells of groundwater heat pump. *Energy*, 61, 240-247.
  11. Yang, Q. C., Liang, J., & Liu, L. C. (2011). Numerical model for the capacity evaluation of shallow groundwater heat pumps in Beijing Plain, China. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 881-889.
  12. Hecht-Mendez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., 2010. Evaluating

Todd, D.K. and Mays, L.W., 2005.  
*Groundwater Hydrology*, Third Edition, John  
Wiley and sons, New York.

groundwater heat pumps (GWHPs).  
*Environmental Earth Sciences*, 75(1), 48.  
20. <http://www.sunu.org.ir>