

الله  
الرحمن الرحيم



دانشکده علوم زمین

گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست‌محیطی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی

عنوان:

بررسی و تعیین پارامترهای هیدروژئولوژیکی مؤثر در عملکرد سیستم پمپ

حرارتی با منبع آب‌های زیرزمینی (GWHP)

هاجر برزگر

استاد راهنما:

دکتر هادی جعفری

استاد مشاور:

دکتر سید مجید هاشمیان

بهمن‌ماه ۱۳۹۴

تقدیم بہ

پدر و مادر مہربانم

سرو قاضیان، ہمیشہ ہمراہم

و

ہمسر عزیزم  
ہمراہ ہمیشگی ام

## تقدیر و تشکر

پاس خدای را بر آنچه از وجود مبارکش به ما شناسانده، و بر آنچه از شکرش به ما الهام فرموده، و بر آن درهای دانش که به پروردگارش بر ما گشوده، و بر اخلاص و ریزی در توحید و یگانگیش ما را، بنمون شده، و قلب ما را از اتحاد و شک در کار خودش دور داشت، چنان پاسی که با آن در حلقه پاسگزاران از بندگانش زندگی بگذرانیم، و با آن بر هر که به خشودی و بخشایش او پیشی حتره سبقت بگیریم « صحیفه سجاده، ص ۳۵ ».

خداوند را شکر می‌گذارم که توفیق داد تا با پایان رساندن این پژوهش، گامی کوچک در راستای افزودن به دانش خود بردارم. به همین منظور بر خود لازم می‌دانم تا از تمام کسانی که در بهر عمر رساندن این پایان نامه یاریم دادند، پاسگزاری نمایم.

از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر هادی جعفری به پاس همراهی و راهنمایی‌های موثر ایشان در تمامی مراحل پایان نامه و جناب آقای دکتر سید مجید هاشمیان، مشاور این پایان نامه به خاطر زحمات و دلسوزی‌های بی‌دریغشان کمال تشکر را دارم. از اساتید محترم جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی و دکتر رحیم باقری که زحمت داوری این پایان نامه را تقبل نموده‌اند پاسگزارم.

در نهایت از زحمات بی‌دریغ پدر و مادر بزرگوارم و همسر عزیزم که حمایت صمیمانه‌اش، همواره پشتیبان بزرگی برای بنده بوده تشکر و قدر دانی می‌کنم.

باجر بزرگ، بهمن ماه ۱۳۹۴

## تعهد نامه

اینجانب هاجر بزرگر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته آب‌شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی و تعیین پارامترهای هیدروژئولوژیکی مؤثر در عملکرد سیستم پمپ حرارتی با منبع آب‌های زیرزمینی (GWHP) تحت راهنمایی دکتر هادی جعفری متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت‌های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

فرآیندهای تبدیل و تأمین انرژی غالباً همراه با تولید آلاینده‌گی در محیط‌زیست است. به منظور ایجاد راه‌کاری برای کاهش آلودگی، بشر به فناوری ذخیره انرژی و انرژی پاک روی آورده است. یکی از این تکنیک‌ها، سیکل پمپ حرارتی مجهز به منبع حرارتی آب زیرزمینی (Ground Water Heat Pump or GWHP) است که در آن از دمای ثابت اعماق کم زمین به عنوان منبع انرژی پاک و قابل تجدید برای گرمایش و سرمایش استفاده می‌شود. بدین منظور، آب با دمای ثابت زمین، توسط چاه پمپاژ استخراج شده، از مبدل حرارتی عبور کرده و سپس از طریق چاه تزریق، به سفره بازگردانده می‌شود. در این تحقیق، برنامه رایانه‌ای MT3DMS که برنامه‌ای کاربردی در مدل‌سازی انتقال جرم می‌باشد به علت مشابهت معادلات حاکم با رویکرد بررسی انتقال حرارت در آب زیرزمینی به کار گرفته شد و با در نظر گرفتن سفره‌ای مفروض، مدل جریان آب زیرزمینی و مدل انتقال حرارت آن توسط کد مذکور شبیه‌سازی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی، آب تزریق شده به سفره، به علت تبادل انرژی در سیستم پمپ حرارتی، موجب تشکیل هاله‌ای 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. طبق نتایج این تحقیق وسعت و جهت حرکت هاله حرارتی مستقیماً تحت تأثیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی نظیر هدایت هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی و تخلخل آبخوان می‌باشد. به علت این‌که تنها پارامترهای ارتباط دهنده سیستم پمپ حرارتی با آب زیرزمینی دبی جریان آب و دمای آن می‌باشد، لذا هر عامل مؤثر بر دبی و دمای آب زیرزمینی، بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی تأثیرگذار می‌باشد. مهمترین عوامل مؤثر بر دبی چاه پمپاژ که در این تحقیق بررسی شده است شامل نوسان سطح ایستابی، انسداد در چاه پمپاژ، تأثیر چاه‌های مجاور و لایه‌بندی و تغییر در خصوصیات سفره آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دمای آب زیرزمینی که به عنوان ورودی به سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی قلمداد می‌شود، شامل عمق سطح ایستابی، موقعیت چاه تزریق نسبت به چاه پمپاژ و جهت جریان معرفی شده است. تغییر این عوامل می‌تواند بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی مؤثر باشد.

کلمات کلیدی: هاله حرارتی- پمپ حرارتی آب زیرزمینی - MT3DMS - GWHP.

## فهرست مطالب

### فصل اول: کلیات

- ۱-۱ - بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق ..... ۱
- ۲-۱ - آشنایی با سیستم‌های پمپ حرارتی ..... ۲
- ۱-۲-۱ - اصول عملکرد ..... ۳
- ۳-۱ - طبقه‌بندی پمپ‌های حرارتی ..... ۵
- ۱-۳-۱ - طبقه‌بندی پمپ‌های حرارتی با توجه به سیکل حرارتی ..... ۵
- ۲-۳-۱ - طبقه‌بندی پمپ‌های حرارتی بر اساس منبع مورد استفاده ..... ۶
- ۴-۱ - کاربرد پمپ‌های حرارتی ..... ۱۲
- ۵-۱ - فواید زیست محیطی ..... ۱۲
- ۶-۱ - کارآمدی پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی ..... ۱۲
- ۱-۶-۱ - مقایسه کارآمدی پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی با پمپ‌های حرارتی با منبع هوایی ..... ۱۲
- ۲-۶-۱ - مقایسه کارآمدی پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی با الکتروسیته ..... ۱۳
- ۷-۱ - مشوق‌های مالیاتی ..... ۱۳
- ۸-۱ - پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در ایران ..... ۱۴
- ۱-۸-۱ - پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در طالقان ..... ۱۵
- ۲-۸-۱ - پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در رشت ..... ۱۵
- ۳-۸-۱ - پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در اهواز ..... ۱۶
- ۴-۸-۱ - پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در شهر بندرعباس ..... ۱۶

### فصل دوم: مطالعات پیشین در مورد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی

- ۱-۲ - مقدمه ..... ۱۷
- ۲-۲ - پیشینه تحقیقات در مورد سیستم‌های پمپ حرارتی آب زیرزمینی ..... ۱۷
- ۳-۲ - پیشینه تحقیقات سیستم پمپ حرارتی در ایران ..... ۲۵

## فصل سوم: روش انجام تحقیق

- ۳-۱-مقدمه.....۲۷
- ۳-۲-توسعه مدل جریان آب زیرزمینی.....۲۷
- ۳-۳-شبیه‌سازی انتقال حرارت .....۲۸
- ۳-۴-ساخت مدل انتقال حرارت در آب زیرزمینی.....۳۲

## فصل چهارم: نتایج و بحث

- ۴-۱-مقدمه.....۳۵
- ۴-۲-مدل جریان آب زیرزمینی و نتایج حاصل از اجرای آن.....۳۵
- ۴-۲-۱-مدل مفهومی.....۳۵
- ۴-۲-۲-طراحی مدل جریان آب زیرزمینی.....۳۹
- ۴-۲-۲-۱-گسسته‌سازی مدل.....۳۹
- ۴-۲-۲-۲-تعریف هندسه آبخوان و شرایط مرزی.....۴۰
- ۴-۲-۳-ضرایب هیدرودینامیک آبخوان.....۴۰
- ۴-۲-۴-بار هیدرولیکی اولیه.....۴۰
- ۴-۲-۵-تنش‌های وارد به سفره.....۴۱
- ۴-۲-۵-۱-برداشت .....۴۱
- ۴-۲-۵-۲-تغذیه سفره .....۴۱
- ۴-۲-۶-اجرای مدل جریان آب زیرزمینی و نتایج حاصل از آن.....۴۲
- ۴-۳-ساخت مدل انتقال حرارت در آبخوان فرضی.....۴۳
- ۴-۳-۱-شرایط مرزی و شرایط اولیه حرارت.....۴۳
- ۴-۳-۲-دوره‌های تنش.....۴۴
- ۴-۳-۳-سایر پارامترهای مدل‌سازی انتقال حرارت.....۴۴
- ۴-۴-نتایج مدل‌سازی انتقال حرارت.....۴۶
- ۴-۴-۱-بررسی تأثیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی بر توسعه هاله حرارتی.....۵۰
- ۴-۵-تأثیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی.....۷۳
- ۴-۵-۱-عوامل مؤثر بر دبی چاه پمپاژ در سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی.....۷۴
- ۴-۵-۲-عوامل مؤثر بر دمای آب زیرزمینی پمپاژ شده، ورودی به سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی.....۷۹



## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۸۵	۱-۵ مقدمه.....
۸۵	۲-۵ نتایج حاصل از این تحقیق.....
۸۷	۳-۵ پیشنهادها.....
۸۸	منابع.....

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. پمپ حرارتی با سیکل بسته..... ۹
- شکل ۲-۱. پمپ حرارتی با سیکل باز..... ۱۰
- شکل ۳-۱. مکانیسم پمپ حرارتی با سیکل باز..... ۱۱
- شکل ۴-۱. مشخصات آبخوان فرضی جهت شبیه‌سازی سیستم **GWHP**..... ۳۷
- شکل ۴-۲. دمای آب تزریق‌شده به آبخوان فرضی..... ۳۸
- شکل ۴-۳. تغییرات دبی در چاه تزریق در دوره‌های تنش..... ۴۲
- شکل ۴-۴. توزیع هد هیدرولیکی در مدل آبخوان فرضی..... ۴۳
- شکل ۴-۵. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در مدل آبخوان فرضی..... ۴۷
- شکل ۴-۶. تغییرات زمانی دما در چاه تزریق در دوره‌های تنش..... ۴۸
- شکل ۴-۷. میانگین، بیشینه و کمینه دمای آبخوان مفروض با فاصله از چاه تزریق (متر)..... ۴۹
- شکل ۴-۸. تغییرات زمانی میانگین دما با فاصله از چاه تزریق..... ۵۰
- شکل ۴-۹. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۱۶ متر بر روز..... ۵۱
- شکل ۴-۱۰. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۳۳ متر بر روز..... ۵۲
- شکل ۴-۱۱. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۶۶ متر بر روز..... ۵۳
- شکل ۴-۱۲. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۱۵۰ متر بر روز..... ۵۴
- شکل ۴-۱۳. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۲۰۰ متر بر روز..... ۵۵
- شکل ۴-۱۴. تغییرات میانگین دما در هدایت هیدرولیکی‌های متفاوت با فاصله از چاه تزریق..... ۵۶
- شکل ۴-۱۵. میانگین، بیشینه و کمینه دما در هدایت هیدرولیکی ۱۵۰ متر بر روز در فواصل مختلف..... ۵۸
- شکل ۴-۱۶. میانگین، بیشینه و کمینه دما در هدایت هیدرولیکی ۱۲۹/۶ متر بر روز (اولیه) در فواصل مختلف..... ۵۸
- شکل ۴-۱۷. میانگین، بیشینه و کمینه دما در هدایت هیدرولیکی ۳۳ متر بر روز در فواصل مختلف..... ۵۹
- شکل ۴-۱۸. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۱..... ۶۰
- شکل ۴-۱۹. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۲۵..... ۶۱
- شکل ۴-۲۰. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۵..... ۶۲
- شکل ۴-۲۱. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در شیب هیدرولیکی ۰/۰۱..... ۶۳
- شکل ۴-۲۲. تغییرات زمانی دما در فاصله صد متری از چاه تزریق در شرایط مختلف شیب هیدرولیکی آبخوان..... ۶۴

- شکل ۴-۲۳. میانگین، بیشینه و کمینه دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در شرایط شیب هیدرولیکی ۰/۰۱..... ۶۵
- شکل ۴-۲۴. مقایسه میانگین، بیشینه و کمینه دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در شرایط شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۵..... ۶۵
- شکل ۴-۲۵. مقایسه میانگین، بیشینه و کمینه دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در شرایط شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۲۵..... ۶۶
- شکل ۴-۲۶. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در تخلخل ۰/۱..... ۶۷
- شکل ۴-۲۷. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در تخلخل ۰/۲..... ۶۸
- شکل ۴-۲۸. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در تخلخل ۰/۳..... ۶۹
- شکل ۴-۲۹. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در تخلخل ۰/۴..... ۷۰
- شکل ۴-۳۰. تغییرات زمانی دما در فاصله صد متری از چاه تزریق با مقادیر مختلف تخلخل..... ۷۱
- شکل ۴-۳۱. میانگین، بیشینه و کمینه دما در شرایط تخلخل ۰/۴ با فاصله از چاه تزریق..... ۷۲
- شکل ۴-۳۲. میانگین، بیشینه و کمینه دما در شرایط تخلخل ۰/۳ با فاصله از چاه تزریق..... ۷۲
- شکل ۴-۳۳. میانگین، بیشینه و کمینه دما در شرایط تخلخل ۰/۲ با فاصله از چاه تزریق..... ۷۳
- شکل ۴-۳۴. میانگین، بیشینه و کمینه دما در شرایط تخلخل ۰/۱ با فاصله از چاه تزریق..... ۷۳
- شکل ۴-۳۵. طرحی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی نشان دهنده ارتباط پمپ حرارتی و سفره آب زیرزمینی..... ۷۴
- شکل ۴-۳۶. منحنی هد سیستم (SHC)..... ۷۵
- شکل ۴-۳۷. طرحی از افت کل در سفره آب زیرزمینی..... ۷۵
- شکل ۴-۳۸. منحنی مشخصه پمپ (PCC)..... ۷۶
- شکل ۴-۳۹. ایجاد نقطه کار پمپ از انطباق منحنی‌های PCC..... ۷۶
- شکل ۴-۴۰. ایجاد نقاط کار پمپ از انطباق منحنی‌های PCC..... ۷۷
- شکل ۴-۴۱. منحنی‌های افت سطح ایستابی در سیستم چند چاهی..... ۷۸
- شکل ۴-۴۲. گسترش هاله حرارتی در شرایطی که چاه پمپاژ در پایین دست جریان قرار گرفته باشد..... ۸۱
- شکل ۴-۴۳. گسترش هاله حرارتی در شرایط پایین دست بودن چاه پمپاژ و هدایت هیدرولیکی ۲۰۰ متر بر روز..... ۸۲

## فهرست جداول

- جدول ۱-۴. میزان کاهش مصرف برق با استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در اهواز، بندرعباس، رشت و طالقان..... ۱۴
- جدول ۴-۱. مقادیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی و حرارتی آبخوان فرضی جهت شبیه‌سازی سیستم **GWHP** ..... ۳۸
- جدول ۴-۲. مقادیر دبی و دمای آب تزریق شده به سفره آب زیرزمینی..... ۳۹
- جدول ۴-۳. میانگین، بیشینه و کمینه دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی..... ۵۷

## فصل اول: کلیات

### ۱-۱ - بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

تأمین انرژی همواره یکی از دغدغه‌های بشر بوده است. امروزه رشد مصرف انرژی در جوامع مدرن صنعتی علاوه بر خطر اتمام سریع منابع فسیلی، جهان را با تغییرات برگشت‌ناپذیر و تهدیدآمیز زیست محیطی مواجه نموده است. به‌خصوص با افزایش رشد جمعیت و نیاز بشر به تأمین انرژی بیش‌تر و با تأکید بر این نکته که منابع انرژی فسیلی محدود هستند، بشر به دنبال جایگزینی منابع جدیدی است. لذا در برنامه‌ها و سیاست‌های بین‌المللی در راستای توسعه پایدار جهانی، به منابع تجدید پذیر انرژی توجه زیادی معطوف شده است. منابع جدید انرژی که قابلیت تجدید پذیری نیز دارند بسیار متنوع و زیاد هستند. انرژی باد، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی زیستی، انرژی امواج، انرژی حرارتی دریاها و انرژی آب چند نمونه از این منابع جدید انرژی هستند. مصرف انرژی در کشور ما طی سال‌های گذشته روند صعودی داشته تا جایی که با ادامه‌ی روند موجود پیش‌بینی می‌شود تا در کم‌تر از یک دهه آتی، میزان مصرف انرژی اولیه در کشور، از تولید پیشی گرفته و ایران به یک واردکننده‌ی انرژی تبدیل شود.

با توسعه‌ی کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر و تنوع‌بخشی سبد انرژی کشور، به سمت توسعه پایدار بخش انرژی کشور خواهیم رفت که موجب ارتقای امنیت انرژی، کاهش آلودگی‌های محیط زیست، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و اثر بر گرمایش جهانی، بومی‌سازی فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به منابع فسیلی خواهد شد. استفاده از انرژی پمپ حرارتی آب زیرزمینی به عنوان یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر نیازمند شناخت عوامل مؤثر بر عملکرد آن است تا بتوان کارایی آن را اثبات کرد و در سبد انرژی کشور آن را گنجانند. همان‌گونه که از اسم آن برمی‌آید این سیستم با آب زیرزمینی سروکار دارد و بنابراین شناخت ساز و کار آن نیازمند دانش هیدروژئولوژی می‌باشد. عملکرد سیستم پمپ حرارتی

آب زیرزمینی (Ground Water Heat Pump or GWHP) به پارامترهای زمین‌شناسی و شرایط آب زیرزمینی بستگی دارد. به علاوه هزینه اولیه که شامل حفاری و لوله‌گذاری است، نیز به شرایط زمین‌شناسی و کیفیت آب زیرزمینی محلی بستگی دارد. بدین منظور تحقیق حاضر به منظور شناخت و معرفی جایگاه سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی از دیدگاه علم هیدروژئولوژی پایه‌ریزی شده است. نظر به این‌که مدل‌سازی انتقال حرارت در آبخوان‌ها با هدف بررسی عوامل هیدروژئولوژیکی مؤثر بر سیستم پمپ حرارتی انجام شده است، تهیه یک مدل ریاضی و شبیه‌سازی انتقال حرارت در آن ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این تحقیق انتقال حرارت مرتبط با سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار PMWIN و کد MT3DMS شبیه‌سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

مهم‌ترین اهداف این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. شناخت و معرفی نگاه هیدروژئولوژیکی به سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی
۲. شبیه‌سازی انتقال حرارت ناشی از سیستم پمپ حرارتی در سفره آب زیرزمینی
۳. تعیین خصوصیات هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی
۴. بررسی تأثیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی بر سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی

### ۱-۲- آشنایی با سیستم‌های پمپ حرارتی

فرآیندهای تبدیل و تأمین انرژی غالباً همراه با تولید آلاینده‌گی در محیط‌زیست است و سطح آلودگی به‌طور روزمره در حال افزایش است. به منظور ایجاد راه‌کاری برای کاهش تولید دی‌اکسید کربن در جو، بشر به تکنولوژی ذخیره انرژی و انرژی پاک روی آورده است. منابع انرژی تجدیدناپذیر شامل سوخت‌های فسیلی و سوخت اتمی (هسته‌ای) و منابع انرژی تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی زیستی، انرژی‌های اقیانوسی و آبی می‌باشد. یکی

از تکنیک‌های منابع انرژی زمین‌گرمایی سیکل پمپ حرارتی مجهز به منبع حرارتی آب زیرزمینی است که در آن از دمای ثابت اعماق کم زمین به عنوان منبع انرژی پاک و قابل تجدید برای گرمایش و سرمایش استفاده می‌شود. به این دلیل که خاک و سنگ‌ها عایق‌های خوبی هستند، به نوسانات زیاد دمایی روزانه، واکنشی اندک نشان داده و دمایی تقریباً ثابت را حفظ می‌نمایند. بنابراین در ارتفاعات و عرض‌های جغرافیایی که اغلب انسان‌ها زندگی می‌کنند، دمای سنگ‌ها و خاک تنها چند متر زیر سطح معمولاً در گستره‌ای از ۵ تا ۱۰ سانتی‌گراد باقی می‌ماند (سایت انرژی‌های نو ایران، سانا). پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی نوعی سیستم تهویه گرمایش و سرمایش است. درجه حرارت زیرزمین تا اعماق کم ۲ تا ۱۵ متری تقریباً در تمام طول سال ثابت است؛ بنابراین با استفاده از این پدیده طبیعی می‌توان گرمایش و سرمایش منازل را در زمستان و تابستان فراهم کرد.

### ۱-۲-۱- اصول عملکرد

انرژی‌ها قابل‌تبدیل به یکدیگر می‌باشند. مطالعات گوناگونی برای تغییر شکل انرژی به طوری که بکارگیری آن ساده باشد، صورت گرفته است. بر اساس قانون دوم ترمودینامیک به هر سیستمی که برخلاف روند طبیعی با دریافت مقداری کار، عمل انتقال حرارت بین دو منبع گرمایی (از منبع دمایی به منبع دما بالا) را انجام دهد، پمپ حرارتی اطلاق می‌گردد. هر پمپ حرارتی گرما را از منبعی با دمای پایین به منبعی با دمای بالاتر با مصرف انرژی محرکه، حرکت می‌دهد. میزان کار دریافتی بستگی به اختلاف دمای بین دو منبع دارد و هر چه اختلاف دما کم‌تر باشد، کار کم‌تری مصرف خواهد شد. با توجه به این که دما در عمق کم زمین، بنا به موقعیت جغرافیایی، مقداری بین صفر تا دمای محیط است، لذا می‌توان از این دمای ثابت به عنوان یکی از دو منبع گرمایی استفاده کرد. در واقع سازوکار اصلی این سیستم‌های تهویه، تبادل حرارت با بخش‌های کم‌عمق زمین است. در

زمستان دمای لایه‌های کم‌عمق زمین گرم‌تر از هوای محیط و در تابستان سردتر از هوای محیط می‌باشد. لذا می‌توان در زمستان با استفاده از پمپ حرارتی گرما را از لایه‌های زیرزمین به داخل ساختمان منتقل نمود و در تابستان دمای پایین‌تر لایه‌های زمین این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان گرما را از داخل ساختمان به این لایه‌ها هدایت کرد.

یک مزیت پمپ حرارتی بر دستگاه‌های تهویه مطلوب مرسوم این است که پمپ حرارتی قابلیت انتقال حرارت برای سرمایش و گرمایش را دارد و مصرف انرژی آن نیز پایین‌تر است. پمپ حرارتی می‌تواند مانند سیستم‌های سردکننده (چیلر) یا سیستم‌های تبخیری تولید سرما کند که این عمل با چرخه سرمایش (مانند یخچال) مقذور می‌باشد. در مناطق سردسیر استفاده از پمپ حرارتی اغلب برای گرمایش می‌باشد. در اصل این روش یکی از روش‌های بهینه و مقرون به صرفه گرمایش و سرمایش است.

سیستم‌های گرمایش و سرمایش با پمپ‌های حرارتی شامل سه بخش اساسی است:

۱- **حلقه‌های زیرزمینی (Ground Loop):** این بخش شامل لوله‌های کار گذاشته شده در زیر خاک است و با مخلوطی از آب و ضدیخ پر شده و این مخلوط در لوله‌ها جریان یافته و گرمای زمین را جذب می‌کند.

۲- **پمپ حرارتی (Heat Pump):** این بخش شامل سه قسمت است و نحوه عملکرد آن شبیه یخچال است.

**الف) Evaporator (تبخیرکننده):** حرارت را از آب جاری در حلقه زیرزمینی دریافت می‌کند.

**ب) Compressor (متراکم‌کننده):** کمپرسور، سردکن (Refrigerant) را اطراف پمپ حرارتی حرکت داده و سردکن گازی را تا رسیدن به دمای مطلوب سیستم توزیع متراکم می‌کند.

**ج) Condenser (چگالنده):** گرما را به یک مخزن آب داغ که سیستم توزیع از این مخزن تغذیه می‌شود، می‌رساند.

۳. **سیستم توزیع گرما (Heat Distribution System):** این بخش شامل سیستم گرمایش کف



ساختمان و رادیاتورها برای گرمایش محیط و در بعضی موارد ذخیره آب برای تأمین آب گرم ساختمان می‌باشد.

یک پمپ حرارتی معمولاً زمانی که دمای هوای محیط بیرون به صورت نامطبوع سرد یا گرم می‌باشد، برای گرمایش و سرمایش بکار گرفته می‌شود. عملکردهای سرمایش و گرمایش نیاز به ورودی کار زیاد (معمولاً انرژی الکتریکی) برای وادار نمودن حرارت به جریان در خلاف جهت دارد. یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، بهره‌وری کارکرد سرمایشی و گرمایشی را با کاهش اساسی نیروی بالابردگی ستون دما افزایش می‌دهد.

### ۱-۳- طبقه‌بندی پمپ‌های حرارتی

#### ۱-۳-۱- طبقه‌بندی پمپ‌های حرارتی با توجه به سیکل حرارتی

##### الف) پمپ حرارتی با سیستم تراکم بخار

ساختار اصلی پمپ حرارتی با سیستم تراکم بخار از تبخیرکننده، چگالنده، کمپرسور و شیر انبساط تشکیل شده است. در کمپرسور، مبرد گازی متراکم شده و به گازی با فشار و دمای بالا تبدیل می‌شود. این گاز دارای فشار و دمای بالا در کندانسور، حرارت را به خارج دفع کرده و به سیال مایع تبدیل می‌شود. این سیال مایع مبرد دارای فشار بالا با عبور از شیر انبساط، منبسط شده و به سیال با فشار و دمای پایین تبدیل می‌شود. این سیال مایع مبرد در تبخیرکننده، حرارت محیط دما پایین را جذب می‌کند و به بخار تبدیل می‌شود و در نتیجه توسط این سیکل امکان انتقال حرارت دما پایین به دما بالا وجود خواهد داشت.

##### ب) پمپ حرارتی با سیستم جذبی

فرق پمپ حرارتی جذبی با پمپ حرارتی تراکمی، به غیر از کندانسور و تبخیرکننده معمولی در این است که پمپ حرارتی جذبی دارای دو نوع مبدل حرارتی به نام مولد و جاذب است که در واقع کار

کمپرسور را انجام می‌دهند. در تبخیرکننده، فشار بخار توسط بخار مبرد کاهش یافته و سپس در داخل جاذب توسط مایع، جذب شده و در نتیجه حرارت تولید می‌شود. فشار مایع توسط پمپ افزایش یافته و سپس وارد مولد می‌شود. در داخل آن، مبرد داخل مایع به واسطه یک منبع حرارتی از خارج نظیر هیتر، افزایش حرارت پیدا کرده و در نتیجه بخار جدا شده و به کندانسور هدایت می‌شود. بخار مبرد پس از تقطیر شدن حرارت را آزاد می‌کند. حرارت ایجاد شده در جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرد. مایع غلیظ شده از طریق شیر انبساط به جاذب برگردانده می‌شود.

### ۱-۳-۲- طبقه‌بندی پمپ‌های حرارتی بر اساس منبع مورد استفاده

#### الف) پمپ حرارتی با منبع هوایی (Air Source Heat Pump)

پمپ‌های حرارتی هوایی (ASHP)، در زمستان گرما را از هوای بیرون دریافت کرده و در تابستان گرما را به محیط بیرون می‌دهند. یکی از معایب سیستم پمپ حرارتی با منبع هوایی استفاده از هوا به عنوان منبع حرارتی می‌باشد. به دلیل پایین بودن ظرفیت حرارتی هوا، با افزایش دمای محیط میزان حرارت منتقل شده به هوا کاهش می‌یابد و به همان نسبت کاهش میزان حرارت منتقل شده از مبرد به هوا سبب می‌گردد تا راندمان کمپرسور کاهش یافته و مصرف انرژی آن افزایش یابد.

پمپ‌های حرارتی هوایی، در زمستان، گرما را از هوای بیرون دریافت کرده و در تابستان، گرما را به محیط بیرون می‌دهند. دو نوع اصلی از پمپ‌های حرارتی هوایی وجود دارد که متداول‌ترین نوع آن‌ها **پمپ حرارتی هوا - هوا (Air-to-Air)** می‌باشد که در زمستان، حرارت را از هوای محیط دریافت کرده و آن را به هوای داخل ساختمان و در تابستان، حرارت را از هوای ساختمان به هوای محیط، انتقال می‌دهد.

نوع دیگر، **پمپ حرارتی هوا - آب (Air-to-Water)** است که در ساختمان، با سیستم توزیع حرارت رادیاتوری یا فن کوئل، کار می‌کند. در فصل سرد، پمپ حرارتی، گرما را از هوای خارج دریافت کرده و آن را به آب سیستم گرمایش می‌دهد. در فصل گرم، پمپ حرارتی، گرما را از سیستم توزیع آب داخل ساختمان به محیط انتقال می‌دهد. یک پمپ حرارتی هوایی در سه سیکل شامل سیکل

گرمایش، سیکل سرمایش و سیکل دیفراست کار می‌کند.

### ۱) سیکل گرمایش:

در سیکل گرمایش، حرارت از هوای خارج، گرفته شده و به فضای داخل داده می‌شود. در ابتدا مبرد مایع، از شیر انبساط عبور کرده و به یک مخلوط مایع - بخار فشار کم تبدیل می‌شود. سپس این مخلوط با عبور از کویل خارجی (کویل تبخیرکننده)، گرم شده و در فشار کم به مایع و بخار تبدیل می‌گردد. در اکومولاتور، بخش مایع مبرد دو فاز، جدا شده و بخش بخار، پس از تراکم در کمپرسور، به کندانسور ارسال می‌شود. گرمای دفع شده از مبرد داغ در کندانسور، هوای خانه را گرم می‌نماید.

### ۲) سیکل سرمایش:

برای سرمایش در تابستان، پمپ حرارتی، حرارت را از هوای داخل ساختمان جذب نموده و آن را به محیط انتقال می‌دهد. مشابه سیکل گرمایش، مبرد مایع، از شیر انبساط عبور کرده و به مخلوط مایع-بخار با فشار کم، تبدیل می‌شود. مبرد سپس به کویل داخلی که به عنوان تبخیرکننده عمل می‌کند رفته و با جذب حرارت داخل اتاق، مبرد به بخار با دمای کم تبدیل می‌گردد. شیر معکوس‌کننده، این بخار را به یک اکومولاتور می‌فرستد، در آنجا، قسمت مایع جریان دوفازی، جدا شده و بخار اشباع در کمپرسور متراکم می‌شود. سرانجام شیر معکوس‌کننده، گازی را که اکنون گرم است به یک کویل خارجی (که به عنوان کندانسور عمل می‌کند) می‌فرستد. گرمای منتقل شده به هوای خارج در کندانسور، باعث می‌شود که بخار مبرد به مایع تبدیل شود. این مایع به شیر انبساط برمی‌گردد و سیکل تکرار می‌گردد. در طول سیکل سرمایش، رطوبت موجود در هوا پس از عبور از روی کویل داخلی، تقطیر شده و در ظرفی در زیر کویل جمع‌آوری می‌شود و یا از خانه خارج می‌گردد (سایت انرژی‌های نو، سانا).

### ۳) سیکل دیفراست (برفک‌زدا):

اگر دمای هوای خارج، وقتی که پمپ حرارتی در حالت گرمایش کار می‌کند، به نزدیک یا کمتر از نقطه

انجماد برسد، رطوبت موجود در هوای عبوری از روی کویل خارجی، تقطیر شده و روی کویل مربوطه، برفک تشکیل می‌شود. برفک تولید شده، به دلیل این‌که انتقال حرارت به مبرد را کاهش می‌دهد، باعث کاهش بازده کویل می‌گردد. برای دفع برفک، پمپ حرارتی باید در حالت دیفراسست عمل کند. ابتدا دستگاه توسط شیر معکوس‌کننده، در حالت سرمایش قرار می‌گیرد. این عمل، گاز داغ را برای ذوب کردن برفک، به کویل خارجی می‌فرستد و فن خارجی نیز خاموش می‌شود. در این حالت پمپ حرارتی، هوای سرد را به خانه می‌دهد. قبل از این‌که این هوا در سرتاسر خانه پخش شود، سیستم گرمایشی کمکی برای گرم کردن آن به کار می‌رود.

### ب) پمپ حرارتی با منبع زمینی (Ground Source Heat Pump)

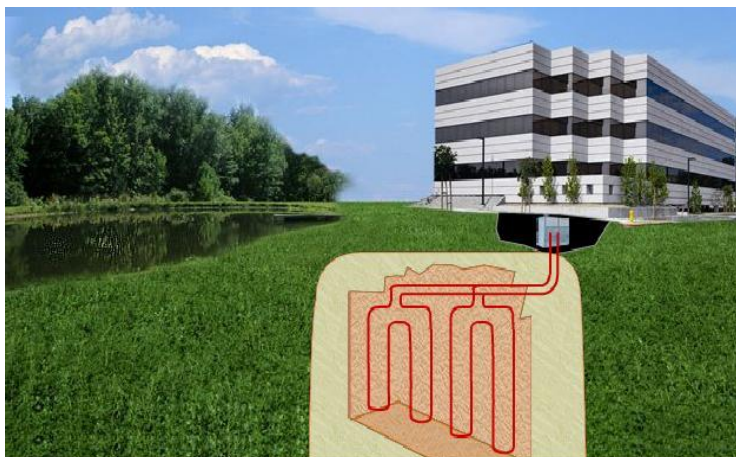
دمای زمین، برخلاف هوای محیط، تقریباً ثابت است. همان‌طور که گفته شد تکنولوژی پمپ‌های حرارتی بر این اصل استوار است که در عمق ۲ تا ۱۵ متری زمین، درجه حرارت ثابت بوده و در زمستان گرم‌تر از هوای بیرون و در تابستان سردتر از هوای محیط است. پمپ‌های حرارتی زمینی، از زمین یا آب‌های زیرزمینی و یا هر دو، به عنوان منبع حرارت در زمستان و به عنوان چاه حرارتی در تابستان، استفاده می‌کنند. پمپ حرارتی با منبع زمینی (GSHP) با استفاده از انرژی برق گرما را از زیر زمین جمع‌آوری کرده و توسط سیالی که از لوله‌های کار گذاشته شده می‌گذرد به واحد نصب شده در داخل ساختمان منتقل می‌کنند. این واحد گرمای سیال درون لوله‌ها را جذب می‌کند و با استفاده از قوانین متراکم‌سازی، حرارت را تشدید کرده و به دمای مطلوب جهت گرمایش ساختمان می‌رساند. گرمای حاصل از پمپ‌های حرارتی به واسطه احتراق نیست و فقط گرما را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند. هم‌چنین به‌طور معکوس در تابستان، هوای گرم داخل ساختمان از طریق یک مکنده وارد دستگاه شده و پس از سرد شدن دوباره به ساختمان دمیده می‌شود. در داخل دستگاه، حرارت به مبرد منتقل شده و پس از عبور مبرد از سیکل مربوطه، حرارت موجود در آن توسط یک مبدل دو لوله‌ای به آب داخل کویل زمینی منتقل می‌شود. سیکل کاری این سیستم کاملاً مانند یخچال بوده و فقط به جای انتقال گرمای

درون یخچال به اطراف یخچال، گرمای درون ساختمان را به زمین منتقل می‌کند. در واقع یک سیستم منفرد، کار دو سیستم گرمایش و سرمایش را انجام می‌دهد. استفاده از این سیستم‌ها تا ۶۶ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده و ۷۵ درصد کمتر از سیستم‌های گرمایش و سرمایش سنتی، الکتریسیته مصرف می‌کنند.

تبادل حرارتی سیستم فوق با زمین از طریق به جریان درآمدن سیال آب درون کویل دفن شده در زمین و یا آب‌های زیرزمینی انجام می‌گیرد. از اجزای سیستم تبرید پمپ حرارتی می‌توان به کمپرسور، کندانسور، شیر انبساط و کویل اشاره داشت که در میان آن‌ها مبرد جریان داشته و انتقال حرارت را انجام می‌دهد. پمپ‌های حرارتی زمینی دارای دو بخش عمده شامل یک مدار لوله‌کشی زیرزمینی در خارج ساختمان و یک دستگاه پمپ حرارتی در داخل ساختمان می‌باشند. سیستم لوله‌کشی خارج ساختمان می‌تواند یک سیستم حلقه باز یا یک سیستم حلقه بسته باشد. خصوصیات این سیستم‌ها در ادامه ارائه شده است.

### الف) پمپ حرارتی زمینی با سیکل بسته

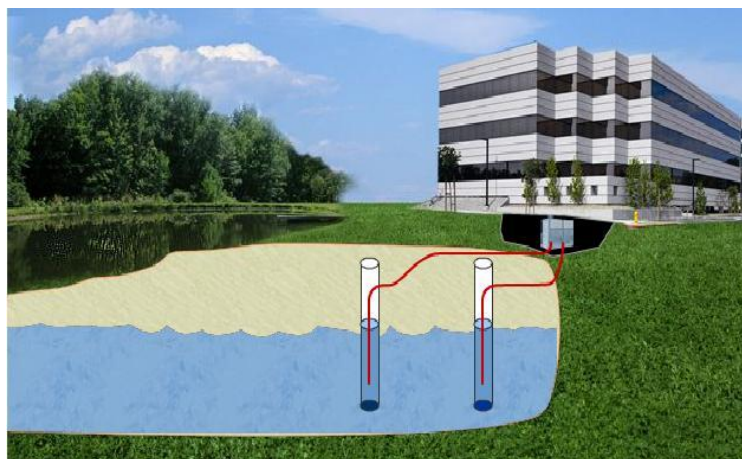
در پمپ‌های حرارتی با سیکل بسته، انتقال حرارت با زمین به وسیله یک حلقه لوله‌کشی که در زیر زمین مدفون شده است انجام می‌پذیرد. به عنوان مثال در حالت گرمایش، حرارت توسط یک محلول آب و ضدیخ که به وسیله سیستم تبرید پمپ حرارتی چندین درجه از خاک اطراف خنک‌تر شده است، از خاک گرفته می‌شود. شکل ۱-۱ نمونه‌ای از این گونه سیستم‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱. پمپ حرارتی زمینی با سیکل بسته

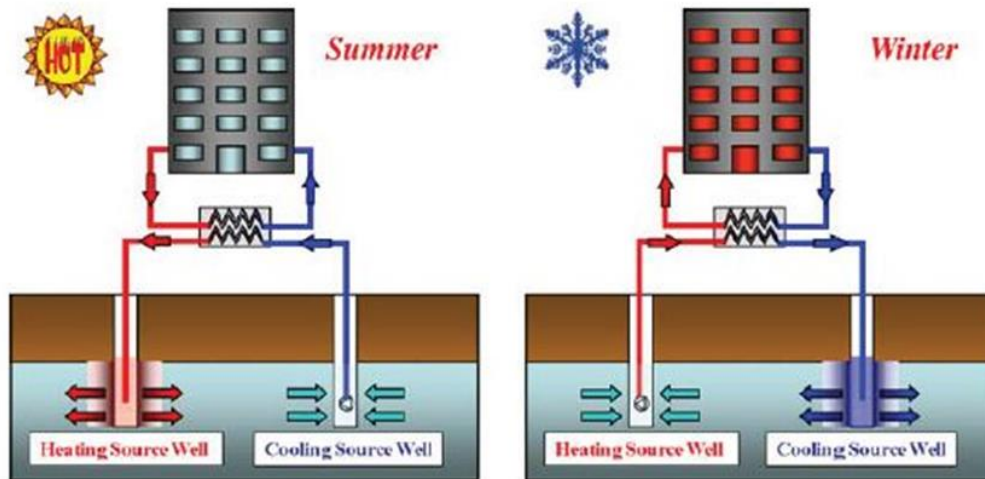
### ب) پمپ حرارتی با سیکل باز

در یک پمپ حرارتی با سیکل باز، انتقال حرارت بین آب‌های زیرزمینی و هوای داخل ساختمان انجام می‌شود. آب‌های زیرزمینی توسط یک پمپ از داخل چاه استخراج شده و به داخل دستگاه پمپ حرارتی جهت تأمین سرمایش یا گرمایش هدایت می‌شود. این آب سپس به داخل آب‌های سطحی مانند رودخانه و یا برکه تخلیه شده و یا از طریق یک چاه دیگر به سفره زیرزمینی برگردانده می‌شود. مهم‌ترین قسمت سیستم‌های باز، چاه‌های زیرزمینی هستند که آب را از لایه‌های زیرزمین دریافت نموده و یا به آنجا منتقل می‌کنند. در شکل ۱-۲ این نوع سیستم نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- پمپ حرارتی زمینی با سیکل باز

در شکل ۱-۳ طرح ساده‌ای از مکانیسم پمپ حرارتی حلقه باز نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل دیده می‌شود در تابستان چاه پمپاژ به عنوان یک منبع سرمایش (Cooling Source Well) آب زیرزمینی سرد را به سیستم هدایت کرده و چاه تزریق آب برگشتی از سیستم را که به علت تبادل حرارت با سیستم پمپ حرارتی گرم‌تر شده است به آبخوان برگردانده و به عنوان یک منبع گرمایش (Heating Source Well) برای آبخوان عمل می‌کند. در زمستان عکس این حالت اتفاق می‌افتد.



شکل ۱-۳- مکانیسم پمپ حرارتی زمینی با سیکل باز

به سیستم‌هایی که در آن‌ها، پمپ‌های حرارتی از آب زیرزمینی به عنوان منبع حرارت استفاده می‌- نمایند، سیستم‌های پمپ حرارتی آب زیرزمینی (Groundwater Heat Pump) یا به اختصار GWHP می‌گویند. سیستم آب زیرزمینی برای مکان‌هایی که چاه آب موجود باشد یا پتانسیل مناسب برای حفر چاه وجود داشته باشد ایده‌آل است.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، از این سیستم‌ها در هر منطقه‌ای نمی‌توان استفاده نمود، چرا که عملکرد آن‌ها بستگی زیادی به شرایط هیدروژئولوژیکی دارد. در نتیجه برای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد سیستم‌های GWHP لازم است پارامترهای هیدروژئولوژیکی مختلف مؤثر بر ضریب عملکرد (Coefficient Of Performance or COP) این سیستم‌ها شناخته شوند تا ارزیابی جامعی صورت گیرد. عملکرد پمپ حرارتی با ضریب عملکرد مشخص می‌شود که به صورت نسبت بین اثر مفید انرژی تولید شده (انرژی حرارتی مفید) و انرژی مصرف شده برای بدست‌آمدن آن انرژی محرکه تعریف می‌شود.

## ۴-۱- کاربرد پمپ‌های حرارتی

پمپ حرارتی در منازل، ساختمان‌های اداری و تجاری، هتل، بیمارستان، صنایع، مراکز پرورش دام و طیور، گلخانه‌ها و غیره کاربرد داشته است و در کاربردهای مختلف دارای تنوع مدل می‌باشد. پمپ‌های حرارتی کم قدرت در حد چند کیلووات می‌توانند مصارف خانگی آب گرم را نیز تأمین کنند. پمپ‌های حرارتی با قدرت در حدود ۱۲ تا ۲۰ کیلووات برای مصارف داخلی بزرگ‌تر مانند انبارهای ذخیره کالا و گرمایش آب در استخرها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۵-۱- فواید زیست‌محیطی

از مهم‌ترین مزایای استفاده از پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی کاهش اثرات مخرب محیط زیستی آن می‌باشد. با توجه به این‌که یکی از عوامل اصلی تولید آلاینده‌های محیط زیستی استفاده از سیستم‌هایی است که از سوخت‌های فسیلی مانند گاز طبیعی جهت تأمین گرمایش محیط استفاده می‌کنند، جایگزین نمودن انواع انرژی‌های نو به جای سیستم‌های با مصرف سوخت فسیلی، می‌تواند به میزان قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های محیط زیستی جلوگیری نماید.

## ۶-۱- کارآمدی پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی

### ۱-۶-۱- مقایسه کارآمدی پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی با پمپ‌های حرارتی با منبع هوایی

در یک پمپ حرارتی مرسوم با منبع هوایی یعنی سیستمی که انرژی حرارتی بین هوای داخل و بیرون از ساختمان را مبادله می‌نماید باید گرما از هوای سرد بیرون در زمستان گرفته شده و حرارت به هوای گرم بیرون در تابستان انتقال داده شود؛ اما یک پمپ حرارتی با منبع زمینی حرارت را با دمایی که در تمام طول سال تقریباً یکسان باقی می‌ماند، تبادل می‌نماید. در نتیجه دستگاه پایه زمین‌گرمایی که تقریباً همواره در حال پمپاژ حرارت با یک بالابردگی دمایی (Temperature Lift) خیلی کم‌تر از



دستگاه منبع هوایی می‌باشد، راندمانی بالاتر را از طریق انرژی اضافی کم‌تر مورد نیاز برای رسیدن به بالابرداری ایجاد می‌نماید.

تمامی پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی سبب صرفه‌جویی در مصرف برق می‌گردند. اما برخی از مصرف‌کنندگان در برابر پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی به این خاطر که هزینه خرید و نصب اولیه آن‌ها بیش‌تر از سیستم‌های با منبع هوایی است، مقاومت می‌کنند. هزینه اضافی اغلب به واسطه نیاز برای چال کردن لوله‌هایی که از میان آن‌ها سیال (آب یا ضدیخ) برای تبادل حرارت با زمین به چرخش در می‌آید و یا با حفاری یک چاه کم‌عمق برای بکار بردن آب زیرزمینی به عنوان منبع حرارتی، حاصل می‌گردد.

### ۱-۶-۲- مقایسه کارآمدی پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی با الکتریسیته

پمپ‌های حرارتی بیش از ۷۵ درصد در مقایسه با سیستم‌های گرمایش پایه الکتریکی و بین ۳۰ تا ۶۰ درصد در مقایسه با دیگر روش‌های گرمایش و سرمایش سبب ذخیره‌سازی مقادیر قابل ملاحظه انرژی می‌شوند. بسیاری از شرکت‌های برق، خصوصاً در شرق ایالات متحده، برای نصب پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی، یارانه پرداخت می‌نمایند تا بدین وسیله به کاهش اوج مصرف انرژی الکتریکی کمک نمایند.

### ۱-۷- مشوق‌های مالیاتی

در ایالات متحده و در برخی از کشورهای دیگر، دولت‌ها در حال حمایت از استفاده از انرژی زمین‌گرمایی با ارائه اعتبارات مالیاتی و دیگر مشوق‌ها هستند تا این‌که افراد یا شرکت‌ها به جای سیستم‌های گرمایشی / سرمایشی سوخت فسیلی، سیستم‌های زمین‌گرمایی را انتخاب نمایند. این مشوق‌ها از هزینه نصب خواهد کاست.

## ۱-۸- پمپ حرارتی زمین گرمایی در ایران

سازمان انرژی‌های نو ایران به کمک شرکت آساد صنعت جهت مطالعه در مورد سیستم پمپ حرارتی، چهار دستگاه پمپ حرارتی زمین گرمایی تهیه و آن را در آزمایشگاه کولر گازی "آزمایشگاه صرفه‌جویی ملی انرژی" مورد آزمایش قرار داد که منتج به محاسبه ضریب عملکرد (COP) برابر ۴/۵ و مصرف برق ۷۵۰ وات گردید که در مقایسه با بهترین کولر گازی موجود در ایران که دارای ضریب عملکرد کمتر از ۲/۵ با مصرف برق ۲۸۰۰ وات می‌باشد، از میزان قابل توجه کاهش مصرف برق برخوردار است. پس از آن جهت نمایش واقعی عملکرد و کاهش مصرف برق واقعی، آن‌ها را در چهار شهر مختلف آب و هوایی که دارای اقلیم مختلف هستند شامل طالقان، رشت، اهواز و بندرعباس نصب و راه‌اندازی نمود. در جدول ۴-۱ نتایج بدست آمده در این چهار مکان ارائه شده است.

جدول ۴-۱. میزان کاهش مصرف برق با استفاده از پمپ حرارتی زمین گرمایی در اهواز، بندرعباس، رشت و طالقان

نام سایت	ابعاد اتاق	توان مصرفی کولر گازی معمولی (وات)	توان مصرفی پمپ حرارتی زمین گرمایی برای سرمایش (وات)	دمای اتاق (°C)	دمای محیط (°C)	میزان کاهش مصرف برق
اهواز	۳×۷×۵	۲۵۰۰	۱۲۰۰	۲۵	۴۰	۱۳۰۰
بندرعباس	۳×۹×۵	۲۵۰۰	۱۲۰۰	۲۵	۳۴	۱۳۰۰
رشت	۴×۹×۵	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۲۲	۳۵	۱۵۰۰
طالقان	۴×۶×۵	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵	۳۳	۱۵۰۰

### ۱-۸-۱- پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در طالقان

یک دستگاه پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در سایت طالقان جهت مطالعه دقیق و برداشت اطلاعات میزان کاهش مصرف برق، دما و رطوبت هوا و خاک نصب گردید. برای این منظور مدارهای مختلف لوله پلی‌اتیلن کویل زمینی طراحی و در داخل ۹ حلقه چاه به عمق ۱۵ متر و به قطر ۸۰ سانتی‌متر نصب شد. هدف از حفاری این تعداد چاه مطالعه و تحقیق بر روی اثرات چیدمان‌های مختلف و سیکل‌های مختلف کویل زمینی می‌باشد. همچنین جهت مطالعه بهتر بر روی انتقال حرارت داخل زمین تعداد ۱۲ حس‌گر اندازه‌گیری دما در چاه‌ها نصب شده تا همزمان با برداشت اطلاعات میزان مصرف برق، دما و رطوبت هوای آزاد، دما و رطوبت داخل اتاق، بتوان دمای زمین و میزان حرارت تبادل شده بین سیال داخل کویل زمینی و خاک را نیز اندازه‌گیری نمود. نتیجه مطالعات بیان‌گر عملکرد مناسب سیستم در فصل گرما و سرما بوده و در مقایسه با کولر گازی معمولی ۶۵ درصد کاهش مصرف برق نشان می‌دهد.

### ۱-۸-۲- پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در رشت

به منظور بررسی عملکرد دستگاه در شرایط شمالی کشور، شهر رشت به عنوان نمونه انتخاب و پمپ حرارتی در آن نصب و راه‌اندازی شد. به دلیل بالا بودن سطح آب در شهر رشت و مشکلات حفر چاه، از کویل عمودی-افقی استفاده شد. به همین منظور در پست شهید سیادتی دو کانال به عمق ۵ متر حفاری و در آن‌ها لوله‌های پلی‌اتیلنی به صورت عمودی و افقی با فاصله ۳ متری و ۱/۵ متری نصب گردیده است. در این سایت برای اولین بار از یک آبگرمکن ۳۰۰ لیتری به صورت سری با کویل زمینی استفاده و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه ارزیابی عملکرد مناسبی را برای سیستم ارائه داد. به‌گونه‌ای که به کمک سیستم نصب شده ضمن خنک‌کاری فضای اداری به وسعت ۴۵ مترمربع با ارتفاع ۴/۵ متر، با مصرف برقی در حدود ۸۵۰ وات قادر به تأمین آب گرم موردنیاز مجموعه با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و با حجم ۳۰۰ لیتر گردید.

### ۱-۸-۳- پمپ حرارتی زمین گرمایی در اهواز

استان خوزستان از جمله مناطقی است که در ماه‌های گرم به دلیل داشتن رطوبت و دمای بالا از کولر گازی بسیار استفاده می‌شود. در شهر اهواز نیز یک دستگاه پمپ حرارتی زمین گرمایی نصب گردید. کویل زمینی این سیستم از نوع مارپیچ با طول ۲۰۰ متر در کانالی به طول هفت متر نصب شده است. در زمستان ۱۳۸۶ این سیستم در حالت گرمایشی راه‌اندازی شد و با مصرف برق ۸۵۰ وات گرمای مورد نیاز اتاقی به مساحت ۳۵ مترمربع را تأمین نمود. با شروع فصل گرما سیستم در حالت سرمایش با مصرف برق ۹۰۰ وات کار می‌کند. اطلاعات بدست‌آمده نشان از موفقیت این سیستم دارد.

### ۱-۸-۴- پمپ حرارتی زمین گرمایی در شهر بندرعباس

یک سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی در شهر بندرعباس و در کتابخانه اداره جهاد کشاورزی استان هرمزگان نصب شده است. شهر بندرعباس نیز به دلیل گرما و رطوبت بالا و نزدیکی به دریا انتخاب گردید تا تأثیر این ویژگی‌های مهم بر عملکرد پمپ حرارتی زمین-گرمایی مورد مطالعه قرار گیرد. کویل این سیستم به صورت افقی و مارپیچ است. در این سایت نیز مصرف برق حدود ۱۳۰۰ وات کاهش نشان داد.

## فصل دوم: مطالعات پیشین در مورد سیستم پمپ حرارتی

### آب زیرزمینی

#### ۲-۱- مقدمه

در دهه اخیر، کاربرد انرژی زمین‌گرمایی کم‌عمق برای گرمایش و سرمایش منازل و مناطق صنعتی افزایش زیادی پیدا کرده است (Sanner, 2003 و Lund, 2011). متعاقباً چگالی نصب سیستم‌های پمپ حرارتی آب زیرزمینی در نواحی مسکونی و تجاری نیز در حال رشد است. با این توصیف مسائل مرتبط با تغییرات دمای سفره به علت حضور این سیستم‌ها نگرانی‌هایی به وجود آورده است (Ferguson, 2009). بنابراین پیش‌بینی صحیح عملکرد این سیستم‌ها و تأثیر آن‌ها بر سفره آب زیرزمینی ضروری به نظر می‌رسد. در جهان تحقیقات زیادی به این موضوع اختصاص داده شده است که در ادامه به تعدادی از این مطالعات و نتایج حاصل از آن‌ها اشاره شده است.

#### ۲-۲- پیشینه تحقیقات در مورد سیستم‌های پمپ حرارتی آب زیرزمینی

روسو و همکاران (Russo *et al.*, 2011) برای انتخاب مطلوب‌ترین طرح در سیستم‌های پمپ حرارتی آب زیرزمینی و یافتن بهترین راه حل کم‌کردن اثرات مخرب زیست‌محیطی و به حداقل رساندن مصرف برق برای کل سیستم، پراکنش گرما را اطراف چاه‌های تزریق آب برگشتی از پمپ حرارتی با استفاده از نرم‌افزار FEFLOW مدل‌سازی نمود و COP طرح‌های مختلف را مقایسه نمودند. طرح‌های بررسی شده شامل موارد ذیل بود:

۱- سیستم پمپ حرارتی حلقه باز واقعی بدون مخزن

۲- سیستم پمپ حرارتی حلقه باز همراه با مخزن آب سرد

۳- سیستم پمپ حرارتی حلقه باز همراه با مخزن ذخیره آب زیرزمینی

نتایج تحقیقات نشان داد که ایزوترم‌های ایجاد شده توسط آب گرم تزریق شده به داخل سفره به مرور زمان و با فاصله از چاه تزریق کشیده و کم‌دما می‌شوند. با مقایسه ایزوترم‌ها در حالت‌های پایدار و ناپایدار مشاهده شد که در جریان ناپایدار وسعت هاله گرمایی بیشتر می‌باشد. طرح دوم مطلوب‌ترین طرح معرفی گردید چرا که کاهش مصرف برق و افزایش COP را به دنبال داشت.

روسو و همکاران (Russo *et al.*, 2014) با هدف ارزیابی صحیح منطقه تحت تأثیر حرارت (Thermally Affected Zone or TAZ) برای جلوگیری از تداخل با ساختارهای زیرزمینی مهم و نیز فهم این که آیا داده‌های میانگین روزانه، ماهانه و فصلی جایگزین مناسبی برای مقادیر ساعتی می‌باشند به مدل‌سازی عددی جریان حرارت در آب زیرزمینی پرداختند. در این تحقیق از نرم‌افزار FEFLOW استفاده شد. ابتدا TAZ با استفاده از جریان دبی ساعتی و داده‌های دما و سپس با مقادیر میانگین دبی‌های روزانه، ماهانه و فصلی محاسبه شد و نتایج آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد با این که میانگین‌گیری ارقام دبی و دما مدل‌سازی را آسان‌تر می‌سازد، اما برخلاف میانگین‌های روزانه و ماهانه داده‌های دما و نرخ جریان، استفاده از مقادیر میانگین فصلی باعث تخمین اشتباه TAZ می‌گردد و بنابراین استفاده از آن‌ها مجاز نمی‌باشد.

نام و اوکا (Nam and Ooka., 2009) برای ارزیابی عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی (COP) از مدل‌سازی عددی انتقال آب و حرارت و همچنین تست‌های واقعی استفاده نموده و نتایج مدل‌سازی را با نتایج واقعی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که COP این سیستم بستگی زیادی به شرایط آب زیرزمینی و خصوصیات حرارتی زیرزمین دارد. در کل هر چه جریان آب سریع‌تر باشد سیستم کارآمدتر می‌گردد.

یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2011) با هدف ارزیابی ظرفیت سفره برای طراحی صحیح و کاربرد سیستم GWHP از سه روش شامل مدل‌سازی عددی انتقال حرارت زیرزمینی، روش بقای انرژی و روش ذخیره حرارت، ظرفیت سطح واحد سفره‌های کم‌عمق در پکن را محاسبه نمود و نتایج بدست‌آمده را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که روش عددی که بر اساس ضریب عملکرد پمپ حرارتی آب زیرزمینی می‌باشد، رفتار فرایندهای تغذیه و پمپاژ آب زیرزمینی را بهتر منعکس می‌کند و بعلاوه دارای مزیت‌های ذخیره انرژی و حفظ محیط زیست نیز می‌باشد. در این تحقیق مشاهده شد که ظرفیت سفره، نسبت مستقیم با ضخامت آن دارد.

مندز و همکاران (Mendez *et al.*, 2010) از نرم‌افزار MT3DMS برای مدل‌سازی انتقال حرارت در سیستم‌های پمپ حرارتی آب زیرزمینی حلقه بسته استفاده نمودند. ابتدا نتایج مدل‌سازی انتقال حرارت توسط MT3DMS با حل‌های تحلیلی مقایسه شد و سپس نتایج مدل‌سازی انتقال حرارت توسط این نرم‌افزار با نتایج مدل‌سازی توسط FEFLOW که مناسب مدل‌سازی جریان آب و حرارت، می‌باشد مقایسه شد. این تحقیق کاربردی بودن کد MT3DMS در شبیه‌سازی انتقال حرارت سیستم‌های پمپ حرارتی حلقه بسته در یک سفره تحت فشار را نشان داد. بر اساس نتایج حاصله می‌توان با وجود شباهت‌های زیاد بین معادلات حاکم بر جریان محلول و جریان حرارت برای انتقال حرارت از نرم‌افزار MT3DMS که برای انتقال مواد محلول طراحی شده است، برای شبیه‌سازی انتقال حرارت استفاده نمود.

برتا و همکاران (Beretta *et al.*, 2014) برای مدل‌سازی انتقال حرارت در سیستم‌های حلقه باز پمپ حرارتی آب زیرزمینی از نرم‌افزار MT3DMS به علت وجود شباهت در معادلات حاکم بر جریان مواد محلول و جریان حرارت استفاده نمودند. تأثیر استخراج آب و وسعت هاله حرارتی توسط نرم‌افزار مذکور بررسی شد. طبق نتایج مدل‌سازی آرایش (چیدمان) چاه‌های پمپاژ و تغذیه در سیستم GWHP می‌تواند به گونه‌ای تعیین شود که بازدهی سیستم بالاترین مقدار باشد و از آب زیرزمینی محافظت شود

کاساسو و ستهی (Casasso and sethi, 2015) برای تهیه ابزاری ارزان و ساده برای آنالیزهای مقدماتی و حساسیت، از یک کد عددی رایگان استفاده نمودند که مسئله انتقال حرارت و هیدرولیک چاه‌ها را در حضور جریان زیرسطحی حل می‌نماید. به دلیل این‌که تهیه داده‌های ورودی قابل‌اطمینان از سفره با روش‌های مرسوم پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد از کد موسوم به TRS (Thermal Recycling Simulator) و بر اساس تقریب تفاضل متناهی استفاده شد. در این تحقیق TRS با مقادیر متفاوت پارامترهای سفره و دستگاه پمپ حرارتی اجرا شد و در نهایت سازگاری خوبی بین برخی کمیت‌های بدون بعد مهم مشاهده شد. روند تکامل دمای آب استخراج شده توسط این کد توصیف شد و صحت نتایج مدل‌سازی با مقایسه شبیه‌سازی انتقال حرارت و جریان با استفاده از نرم‌افزار FEFLOW تأیید شد.

لو و همکاران (Shilei Lu *et al*, 2014) با هدف ارزیابی عملکرد سیستم متمرکز پمپ حرارتی آب زیرزمینی حلقه باز برای شرایط آب و هوایی پکن در چین که دارای اقلیم سرد می‌باشد، تست طولانی مدتی در دوره گرمایش از دسامبر ۲۰۱۱ تا مارس ۲۰۱۲ انجام دادند. آنالیز داده‌های تست نشان داد که ضریب عملکرد (COP) میانگین پمپ حرارتی حدود ۴/۲۷ و COP کل سیستم ۲/۵۹ می‌باشد. علت مقدار اندک و نوسان زیاد ضریب عملکرد به خاطر تقاطع در حلقه مدار می‌باشد.

کیم و نام (Kim and Nam, 2015) عملکرد سیستم GWHP را برای یافتن بهترین نرخ پمپاژ با انتخاب صحیح مبدل حرارتی مورد مطالعه قراردادند. ضریب عملکرد گرمایش و سرمایش در سه سطح ایستابی مختلف شامل ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متری محاسبه شد. نتایج نشان داد که عملکرد سیستم با افت سطح آب کم می‌شود و کمترین نرخ جریان، معمولاً بالاترین عملکرد سیستم را به دنبال دارد. مقدار پمپاژ آب زیرزمینی و دمای آن تأثیر زیادی بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی دارد. تأثیر این پارامترها روی ضریب عملکرد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و مشاهده شد که در نرخ پایین جریان ضریب عملکرد ثابت می‌ماند اما با افزایش نرخ جریان ضریب عملکرد به سرعت کاهش می‌یابد.



هانلین و همکاران (Haehnlein *et al.*, 2010) وضعیت قانونی بین‌المللی کاربرد انرژی ژئوترمال کم‌عمق را برای جلوگیری از اثرات مخرب زیست‌محیطی بر آب زیرزمینی، مورد بررسی قرار دادند. محدودیت‌های دمایی برای گرمایش و سرمایش و حداقل فاصله بین چاه‌ها در چنین سیستم‌هایی تعریف شد. با هدف تأمین دید همه‌جانبه از وضعیت قانونی کاربرد انرژی ژئوترمال، پرسش‌نامه‌ای به بیش از ۶۰ کشور دنیا در مورد تدوین قانون ملی متناظر، محدودیت‌های دمایی و حداقل فاصله برای سیستم‌های GWHP و GSHP فرستاده شد. در نهایت مشاهده شد که تمام قوانین موجود دامنه گسترده‌ای برای حداقل فاصله (۵-۳۰۰ متر) و محدودیت دمایی برای آب زیرزمینی ارائه می‌دهند. تغییرات دما بین ۳ کلوین در سوئد تا ۱۱ کلوین در فرانسه گزارش شد که به علت شرایط متفاوت آب و هوایی هر کشور می‌باشد.

زیود و همکاران (Zyoud *et al.*, 2014) سیستم سفره کم‌عمقی در شمال شرقی اردن را برای استفاده از سرمایش آن بررسی نمودند. به خاطر گرمای زیاد تابستان در اردن، هزینه‌های سرمایش به روش مرسوم بسیار زیاد است. در این تحقیق مدل‌سازی عددی دوبرعی به منظور پیش‌بینی عملکرد آینده مخزن سرمایش استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد انرژی زمین‌گرمایی مخزن بازالتی مربوطه عملی خواهد بود و خواص گرمایی و هیدرولیکی آبخوان در عملکرد سرمایش نقش مهمی دارند.

گائو و همکاران (Gao *et al.*, 2013) بیان داشتند که در سیستم‌های GWHP و امثال آن مخصوصاً در سیستم‌های بزرگ مقیاس که ممکن است از چندین چاه استفاده نمایند، محل احداث چاه‌ها بسیار مهم بوده زیرا ممکن است منجر به تغییر تدریجی دمای آب پمپاژ و به دنبال آن کاهش COP سیستم شود. ایشان به منظور چیدمان صحیح چاه‌ها و تداخل نداشتن آن‌ها با یکدیگر از مدل‌سازی عددی برای سیستم آب زیرزمینی استفاده نمودند. در این تحقیق چهار مدل برای تعیین اثرات تداخل حرارتی بررسی شد و اعتبار مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشی تأیید شد. مقایسه نتایج سازگاری

خوبی بین داده‌های مدل و داده‌های واقعی نشان داد. هم‌چنین اثبات شد که تغییر دما مرتبط با حالت چیدمان چاه‌هاست و طبق نتایج مدل‌سازی، بهترین گزینه چیدمان ردیفی چاه‌ها می‌باشد.

روسو و همکاران (Russo *et al.*, 2010) در مطالعه‌ای که در شمال شرقی ایتالیا انجام دادند مشاهده کردند که با روشن بودن دستگاه پمپ حرارتی آب زیرزمینی، آب گرم تزریق شده در چاه تزریق پس از سی روز به چاه مشاهده‌ای می‌رسد که سرعت حرکت همرفتی آن متناسب با فاکتور R و دما می‌باشد. با خاموش نمودن پمپ این زمان به دو ماه افزایش می‌یابد. در این تحقیق مشاهده شد که هم آب زیرزمینی و هم حرارت تمایل به جریان افقی دارند که به خاطر هدایت هیدرولیکی افقی بیشتر سفره نسبت به هدایت هیدرولیکی عمودی بوده است. نتایج آنالیزها نشان داد که خصوصیات ژئوشیمیایی آب (هدایت الکتریکی) به مرور زمان تغییر کرده که به علت تغییر در دمای آب زیرزمینی می‌باشد.

یوان و همکاران (Ioan *et al.*, 2013) مروری کلی در مورد سیستم‌های پمپ حرارتی زمینی و پیشرفت‌های اخیرشان ارائه نمودند. ابتدا اصول عملکرد و بازدهی انرژی یک پمپ حرارتی توصیف شد. سپس یک معرفی کلی درباره انواع پمپ‌های حرارتی صورت گرفت. در نهایت عملکرد اقتصادی، انرژی و زیست‌محیطی یک سیستم پمپ حرارتی حلقه بسته به طور خلاصه مرور شد. مشاهده شد که فناوری پمپ حرارتی هم در سرمایه‌گذاری و گرمایش و هم در پتانسیل ذخیره انرژی، قابل توجه می‌باشد.

فی و همکاران (Fei *et al.*, 2011) در چین خصوصیات عملکردی سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی را با استفاده از روش آنالیز انرژی و انرژی (exergy) مطالعه نمودند. در مدت یک سال پارامترهای مختلف سیستم در دو فصل گرمایش و سرمایه‌گذاری پایش شدند و مقادیر COP سیستم و چیلر گرمایش و سرمایه‌گذاری به صورت جداگانه بدست آمد. مشاهده شد که COP در حالت گرمایش بیش از سرمایه‌گذاری می‌باشد و نیز کارآمدتر بودن پمپ حرارتی زمینی نسبت به پمپ حرارتی با منبع هوایی اثبات گردید.

ریز و همکاران (Rees *et al.*, 2004) در مورد شرایط هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی مؤثر بر عملکرد سیستم‌های پمپ حرارتی آب زیرزمینی توسط مدل‌سازی عددی جریان آب و انتقال حرارت در اطراف چاه‌ها تحقیق نمودند. در این تحقیق نشان داده شد که بهترین عملکرد سیستم زمانی است که مقادیر هدایت هیدرولیکی و هدایت حرارتی زیاد باشد و سطح ایستابی نیز بالا باشد که این موارد خارج از کنترل طراح سیستم می‌باشند؛ اما عوامل دیگری نیز در درجه دوم اهمیت قرار دارند که شامل مشخصات چاه مانند طول، قطر و عمق آن به‌علاوه نرخ پمپاژ سیستم است که در طراحی بهینه سیستم‌های GWHP باید کنترل شوند.

فنگ و همکاران (Feng *et al.*, 2015) با فرض برخی شرایط پایه مدل انتقال حرارت آب زیرزمینی را ساخته و با روش مدل‌سازی عددی میدان دمای آب زیرزمینی را در یک سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی مطالعه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که برای کاهش اثر تداخل حرارتی، فاصله چاه‌ها باید افزایش یابد و یا این که تعداد چاه‌های منبع حرارت با ثابت نگه‌داشتن میزان پمپاژ افزایش داده شود.

ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2015) برای ساختمان هتلی در چین که از سیستم‌های رایج برای سرمایش و گرمایش استفاده می‌کرد، آنالیز عملکرد سیستم پمپ حرارتی را ارائه نمودند. طبق نتایج بدست‌آمده مشخص شد که مصرف انرژی با این سیستم جدید در مقایسه با سیستم اولیه حدود ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که فناوری قابل‌تجدید سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی را می‌توان با هدف کاهش مصرف انرژی و توسعه پایدار در ساختمان هتل نصب نمود.

وردا و همکاران (Verda *et al.*, 2012) بر طراحی سیستم‌های گرمایش معقول برای مناطق شهری در ایتالیا متمرکز شدند. از نقطه نظر توسعه پایدار، گرمایش از طریق پمپ‌های حرارتی آب زیرزمینی، گزینه‌ای مهم برای تأمین حرارت در مناطق شهری است. تسهیلات انرژی این گزینه به نیاز انرژی سالیانه، چگالی جمعیت و کارایی در تولید گرما بستگی دارد. نتایج نشان داد که در مراکز شهرها تراکم

بالای پمپ حرارتی موجب کاهش COP می‌شود، زیرا به شدت بر دمای زیرزمین و بنابراین بر عملکرد خود پمپ حرارتی تأثیر منفی می‌گذارد.

نام و همکاران (Nam *et al.*, 2010) در چین به منظور پیش‌بینی اثر خصوصیات گرمایی زمین بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی از مدل‌سازی عددی استفاده نمودند. در نتیجه‌ی مدل‌سازی مشخص شد که با جریان سریع‌تر آب زیرزمینی و هدایت گرمایی بالاتر زمین، نرخ تبادل حرارت بیش‌تری بدست می‌آید. هم‌چنین مشاهده شد که حجم آب زیرزمینی و کیفیت آن نیز بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی اثر قابل توجهی دارد.

ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2014) از روش عددی و آزمایشگاهی و تست‌های صحرایی برای تعیین تأثیر منبع سرما بر پمپ حرارتی آب زیرزمینی در جیا جیداکی (Jiagedaqi) استفاده نمودند. در این پژوهش، ضخامت سازند، درصد رطوبت، چگالی و نفوذپذیری به‌عنوان عوامل عمده مؤثر در تفاوت پارامترهای فیزیکی گرمایی در نظر گرفته شد. براساس شرایط زمین‌شناسی منطقه و داده‌های حاصل از روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی، مدلی عددی توسعه داده شد. مشاهده شد که اثر منبع سرمایش طبیعی در GWHP رابطه مستقیمی با فاصله چاه‌های تزریق و پمپاژ دارد. فاصله ۸۵ متری در این تحقیق به‌عنوان فاصله بحرانی تداخل گرمایی در نظر گرفته شد. هم‌چنین ذکر شد که در منطقه‌ای که حجم آب زیرزمینی زیاد باشد و پارامترهای فیزیکی گرمایی سنگ و خاک بهینه باشند، سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی عملکرد بالایی خواهد داشت.

زو و همکاران (Zhou *et al.*, 2013) ابراز داشتند که منحنی گرمایی جنبه‌ای بسیار مهم در طراحی سیستم‌های GWHP دارند، چرا که موجب تغییر تدریجی دمای آب پمپاژ شده و بر کارایی GWHP اثر منفی دارد. در این تحقیق مدل‌سازی عددی انتقال آب-حرارت به همراه آزمایش واقعی انجام شد

تا قاعده تکامل میدان گرمایی سفره و میدان جریان آب زیرزمینی مطالعه شود. نتایج مدل سازی با نتایج تجربی مقایسه و اعتبار مدل تأیید شد. مشاهده شد که برای گروه چاه های پمپاژ و تزریق، اثر سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی برای انتقال حرارت به ویژه برای سفره های با هدایت هیدرولیکی و تخلخل بالا بسیار حائز اهمیت است.

رود و همکاران (Rode *et al.*, 2015) امکان پذیری طراحی سیستم تک چاهی برای پمپاژ و تزریق را در سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی بررسی نمودند. مدل سازی انتقال آب و حرارت انجام شد تا تأثیر پارامترهای فنی و هیدروژئولوژیکی متعدد بررسی شود. نتایج نشان داد که وقتی شیب هیدرولیکی و هدایت ها بالا باشند و نیز فاصله بین دو اسکرین چاه کافی باشد، سیستم تک چاهی گزینه مطلوبی در سفره های ماسه ای و گراولی برای طراحی سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی می باشد، چون نیاز به فضا و هزینه کمتری دارند.

گیل و همکاران (Gil *et al.*, 2015) بر اساس مدل سازی عددی خط مشی های جدید مدیریتی برای توسعه پایدار منابع انرژی زمین گرمایی کم عمق ارائه دادند.

### ۲-۳- پیشینه تحقیقات سیستم پمپ حرارتی در ایران

چنان که در فصل اول اشاره شد در ایران پمپ حرارتی زمین گرمایی در چهار شهر دارای آب و هوای مختلف شامل طالقان، رشت، اهواز و بندرعباس نصب و راه اندازی شده است؛ اما تاکنون جزئیاتی در مورد مطالعات صورت گرفته در این زمینه منتشر نشده است.



## فصل سوم: روش انجام تحقیق

### ۳-۱- مقدمه

عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی تا اندازه‌ای به پدیده انتقال حرارت در زیرزمین بستگی دارد و بنابراین تحت تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی محلی می‌باشد. برای نشان دادن اثر پارامترهای هیدروژئولوژیکی از نرم‌افزاری دارای قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان جریان آب زیرزمینی و انتقال حرارت استفاده شد. در این راستا ابتدا مدل جریان آب زیرزمینی که پیش‌نیاز شبیه‌سازی انتقال حرارت می‌باشد توسعه یافته و سپس انتقال حرارت شبیه‌سازی شده است. روش و مراحل انجام تحقیق در ادامه با جزئیات بیشتر ارائه شده است.

### ۳-۲- توسعه مدل جریان آب زیرزمینی

در این تحقیق مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی با کد MODFLOW و از طریق نرم‌افزار PMWIN انجام شده است. MODFLOW یک مدل تفاضل محدود سه‌بعدی جریان در سیستم آب زیرزمینی می‌باشد (Bear and Cheng, 2010). این نرم‌افزار اولین بار توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۱۹۸۴ به‌عنوان یک کد رایانه‌ای با کاربرد عمومی انتشار یافت (McDonald and Herbaugh, 1984) و در حال حاضر یکی از پرکاربردترین کدهای رایانه‌ای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌باشد. در نسخه‌های ۲۰۰۰ به بعد این برنامه، معادلات جریان چندگانه غیر از آب زیرزمینی مانند معادلات انتقال آلودگی به قابلیت‌های آن افزوده شد.

(Cheng and Bear, 2010). در ادامه مراحل توسعه مدل جریان آب زیرزمینی به‌طور مختصر شرح داده می‌شود. در این پژوهش به علت عدم دسترسی به اطلاعات کافی در خصوص سیستم پمپ

حرارتی آب زیرزمینی در ایران از اطلاعات ارائه شده در مقالات مرتبط (برای مثال، Russo *et al.*) استفاده شده است.

در این تحقیق آبخوانی فرضی با ضخامت ۳۰ متر و مساحت یک میلیون مترمربع در نظر گرفته شده است. آبخوان مورد نظر آبخوانی آزاد، ایزوتروپ، همگن و تک‌لایه می‌باشد. اطلاعات مربوط به شرایط اولیه سفره مانند مقادیر اولیه سطح آب در سلول‌های فعال و غیرفعال و شرایط مرزی آبخوان بر اساس اطلاعات ارائه شده در تحقیقات مشابه در نظر گرفته شده است. از طریق چاه پمپاژ، آب مورد نیاز سیستم پمپ حرارتی از سفره آب زیرزمینی استخراج شده و پس از هدایت به داخل ساختمان از طریق چاه تزریق، دوباره به آبخوان برمی‌گردد. دبی آب تزریق شده مشابه دبی پمپاژ و دمای آن متناسب با تغییرات رخ داده در سیستم پمپ حرارتی در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق از کد کامپیوتری MODFLOW که کد رایج در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌باشد در نرم‌افزار PMWIN استفاده شده است. این نرم‌افزار پیش‌پردازش و پس‌پردازش اطلاعات ورودی به مدل و خروجی از آن را از طریق ترسیم نقشه‌ها و نمودارهای مختلف فراهم می‌نماید. با توجه به مفروض بودن اجرای سیستم پمپ حرارتی در کل سال مدل جریان آب زیرزمینی بصورت ناپایدار با دوره‌های تنش یک‌ماهه و برای مدت سه سال اجرا شده و نتایج بررسی شده است.

### ۳-۳- شبیه‌سازی انتقال حرارت

در این تحقیق از کد MT3DMS برای شبیه‌سازی انتقال حرارت استفاده شده است. با توجه به این‌که این برنامه کامپیوتری برای انتقال جرم در آب زیرزمینی نوشته شده است در ابتدا توضیح مختصری در این‌باره ارائه شده و نحوه استفاده از آن برای شبیه‌سازی انتقال حرارت بر مبنای تشابه معادلات انتقال جرم و انتقال حرارت بیان می‌گردد.

کد MT3DMS از گسترش کد MT3D و MODFLOW ساخته شد. اختصار MS به ساختار چند



جزئی برای اضافه کردن بسته واکنش اشاره دارد. کد MT3DMS دارای سه نوع روش حل برای مسائل انتقال شامل روش تفاضل متناهی، انتقال املح بر اساس روش Eulerian-Lagrangian و روش TVD (Third-Order TVD Method) می‌باشد. علاوه بر فرمول‌های صریح، MT3DMS شامل روش‌های حل تکراری غیرصریح بر اساس شیب دوگانه کلی (GCG) نیز می‌باشد. استفاده از این روش باعث می‌شود عبارتهای پراکندگی، تخلیه و یا تغذیه و واکنشی بدون هیچ مانع پایداری به روش غیرصریح حل شود. کد MT3DMS به عنوان یک کد انتقال همراه با مدل جریان آب زیرزمینی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (MODFLOW) توسعه پیدا کرده است. ساختار عمومی معادله پراکنش-همرفت در انتقال جرم که با کد عددی MT3DMS حل می‌شود به صورت ذیل می‌باشد (Fried *et al.*, 1975):

معادله ۳-۱:

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}\right) \frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\theta x_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_m \delta_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right]$$

که در آن  $\rho_b$  [kg/m<sup>3</sup>] چگالی مواد جامد،  $\theta$  تخلخل،  $K_d$  [m<sup>3</sup>/kg] ضریب توزیع،  $C$  [mg/kg] غلظت ماده،  $t$  [s] زمان،  $x_i$  مختصات فضایی  $i$ ،  $u_i$  [m/s] بردار سرعت آب،  $D_m$  [m<sup>2</sup>/s] ضریب توزیع مولکولی و  $D_{ij}$  [m<sup>2</sup>/s] ضریب پراکنش هیدرودینامیک می‌باشند.

با فرض تعادل حرارتی بین مواد سفره و سیال، معادله عمومی برای توصیف انتقال حرارت در سفره آب زیرزمینی به صورت ذیل بیان می‌شود (Beretta *et al.*, 2014):

معادله ۳-۲:

$$\left[1 + \frac{(1-\theta)\rho_s}{\theta\rho_w} \frac{C_s}{C_w}\right] \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\theta v_i U) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\gamma}{\theta C_w \rho_w} \delta_{ij} \frac{\partial U}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_{ij} \frac{\partial U}{\partial x_j} \right]$$

که در آن  $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] چگالی جامد،  $C_s$  [J/kgK] گرمای ویژه جامد،  $C_w$  [J/kgK] گرمای ویژه آب،  $U$  [K] شیب دمایی  $T - T_0$ ،  $V_i$  سرعت مؤثر آب زیرزمینی [m/s]،  $\lambda$  هدایت حرارتی

مواد سفره [W/mK] و  $D_{ij}$  [m<sup>2</sup>/s] ضریب پراکنش حرارتی می‌باشند.

ساختار دو معادله بالا بسیار شبیه یکدیگر است و فرایندهایی که آن‌ها را تعمیم می‌دهند نیز به هم وابسته می‌باشند. عبارت اول در سمت راست معادله ۲-۳ بیان‌کننده انتقال گرمایی است که با فرایند همرفت (عبارت اول معادله ۱-۳) مرتبط است. عبارت دوم در معادله ۲-۳ نشان‌دهنده مؤلفه هدایت گرمایی است که به علت انتشار مولکولی همرفت-پراکنندگی بوجود می‌آید. عبارت سوم نشان‌دهنده مؤلفه پراکنش گرمایی در معادله ۲-۳ و پراکنش هیدرودینامیکی در معادله ۱-۳ می‌باشد. در نهایت عبارت سمت چپ ضریب تأخیر جمع شده با حرارت (در معادله ۲-۳) یا نمونه معین (در معادله ۳-۳) است که با سرعت مؤثر آب زیرزمینی مقایسه می‌شود. با توجه به تشابه این دو معادله با جای‌گذاری مقادیر معادل برای پارامترهای مختلف، معادله انتقال جرم را می‌توان برای حل مسائل مرتبط با انتقال حرارت در یک سفره با استفاده از کد MT3DMS به کار برد. ضریب توزیع ( $K_d$ ) برای انتقال جرم توسط ضریب توزیع گرمایی جایگزین می‌شود که با عبارت ذیل محاسبه می‌گردد

$$K_d = \frac{C_s}{C_w \rho_w} \quad \text{معادله ۳-۳}$$

که در آن  $K_d$  شیب ایزوترم یا ضریب توزیع (مترمکعب بر کیلوگرم)،  $C_s$  ظرفیت حرارتی ویژه مواد سفره (ژول بر کیلوگرم بر کلوین)،  $C_w$  ظرفیت حرارتی ویژه آب (ژول بر کیلوگرم بر کلوین) و  $\rho_w$  چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) می‌باشد.

انتشار مولکولی را در انتقال جرم می‌توان با هدایت حرارتی در انتقال گرما نشان داد، زیرا ضریب انتشار مولکولی برای انتقال گرما به صورت زیر می‌باشد:

$$D_m = \frac{\lambda}{\theta C_w \rho_w} \quad \text{معادله ۴-۳}$$

که در این معادله  $D_m$  ضریب انتشار مولکولی برای انتقال گرما،  $\lambda$  هدایت حرارتی مواد سفره [W/Mk]،  $\theta$  تخلخل،  $C_w$  ظرفیت حرارتی ویژه آب (ژول بر کیلوگرم بر کلوین) و  $\rho_w$  چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) می‌باشد.

در کد MT3DMS پنج روش حل مختلف تلفیق شده و کاربر می‌تواند پارامترهای اصلی مانند پراکنش

و انتشار را به شکل مرتب و قابل انعطاف وارد کند که برای حل مسائلی با دامنه گسترده‌ای از شرایط هیدروژئولوژیکی و انتقال حرارت مناسب است. جرم وارد شده یا خارج شده از آبخوان، در معادله انتقال حرارت، نشان‌دهنده ورود یا خروج انرژی است. برای سازگاری با ابعاد مرتبط با انتقال آلودگی و حرارت، واحد کلومین معادل با غلظت ( $\text{Kg/m}^3$ ) در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ورود یا خروج انرژی مانند یک بار جرمی در واحد حجم سفره بیان می‌شود.

محدودیت اصلی کاربرد MT3DMS برای مدل‌سازی انتقال حرارت در سفره‌ها، مربوط به تغییرات دما می‌باشد؛ زیرا با فرض چگالی ثابت از این نرم‌افزار می‌توان استفاده نمود. تغییر دما روی ویسکوزیته و چگالی اثر می‌گذارد و هدایت هیدرولیکی به تبع آن تغییر می‌نماید. دما هم‌چنین روی هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی محیط تأثیر دارد. تغییرات دما موجب همرفت آزاد می‌شود که ناشی از اختلاف چگالی (مانند شوری) است. همرفت آزاد موجب اثر شناوری می‌شود که در اثر سیال چگال‌تر به زیر سیال سبک‌تر جریان می‌یابد. در صورت نبود جریان‌های شورابه در سفره‌های کم‌عمق، تغییرات چگالی ضعیف است. اثر چگالی برای اختلاف چگالی بیشتر از  $0/8$  کیلوگرم بر مترمکعب به مفهوم تغییر دما از  $0$  تا  $15$  درجه سلسیوس می‌باشد. در سیستم‌های با اختلاف دمای بالای ده کلومین، مدل‌سازی انتقال حرارت با MT3DMS باید با احتیاط صورت گیرد، زیرا خطاها زیادتر می‌شوند. ماکزیمم تفاوت در ظرفیت‌های حرارتی و هدایت‌های حرارتی برای محدوده دمای معمولی آب زیرزمینی در حضور سیستم حلقه باز (از  $7$  تا  $10$  درجه) کمتر از دو درصد می‌باشد. حتی برای تفاوت‌های زیادتر (حدود  $60$  درجه) این خطا در مدل انتقال حرارت کمتر از  $3$  درصد می‌باشد (Mendez et al., 2010). تغییر دما در مناطق کم‌عمق اندک است و در نتیجه خطاهای احتمالی ناشی از کاربرد چگالی و ویسکوزیته ثابت، کم و قابل قبول می‌باشد در نتیجه بر اساس این مشاهدات، وابستگی دمایی پارامترهای حرارتی، یک محدودیت واقعی برای مدل‌سازی انتقال حرارت سیستم‌های کم‌عمق ژئوترمال نیست (Mendez et al., 2010).

## ۳-۴- ساخت مدل انتقال حرارت در آب زیرزمینی

برای شبیه‌سازی پدیده انتقال گرما در سفره‌های اشباع، توسط کد MT3DMS، حرارت به‌عنوان یک گونه آلودگی واحد معرفی شد (Beretta et al., 2014). مهم‌ترین وارد کننده‌ی حرارت به سفره آب زیرزمینی، آب برگشتی از سیستم GWHP می‌باشد که از طریق چاه تزریق به سفره، منتقل می‌شود. آب با دمای ثابت سفره آب زیرزمینی از طریق چاه پمپاژ استخراج شده و پس از عبور از سیکل‌های مربوطه با همان دبی پمپاژ و با دماهایی متفاوت از دمای آب پمپاژ شده (بسته به تبادل حرارتی در سیستم پمپ حرارتی)، به سفره آب زیرزمینی از طریق چاه تزریق بازمی‌گردد. هاله حرارتی تشکیل شده و در جهت جریان حرکت نموده تا جایی که به دمای زمینه سفره آب زیرزمینی رسیده و محو گردد. سطح استرس هیدرولیکی و گرمایی یک سفره به‌وسیله پمپاژ و تزریق آب زیرزمینی بسیار متغیر بوده و بستگی به نوسان نیازهای انرژی ساختمان دارد. مثلاً در تابستان نیاز به سرمایه‌ش در روز بیش‌تر از شب است. به‌علاوه تغییر شرایط آب و هوایی تأثیر متغیری روی تقاضای انرژی سیستم GWHP دارد. تغییر نیاز انرژی ساختمان با زمان، هم دبی و هم تفاضل دما را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Russo et al., 2014)، بنابراین برای پیش‌بینی صحیح هاله حرارتی لازم است از نرم‌افزاری استفاده شود که تغییرپذیری با زمان را برای دبی و تفاضل دما نشان دهد. در این تحقیق با توجه به دمای محیط و دمای آسایش در هر ماه از سال، اختلاف دمای آب پمپاژ شده با آب تزریق‌شده در هر ماه به صورت تجربی و با استفاده از نظر کارشناسی لحاظ گردید. سپس با این تفاضل دماها و با دانستن نیاز انرژی برای ساختمانی فرضی به مساحت هزار مترمربع از طریق فرمول زیر، دبی‌های مورد نیاز برای رساندن دمای ساختمان به دمای آسایش بدست آمد.

$$q = m^{\circ}c\Delta t \quad \text{معادله ۳-۴:}$$

که در آن  $q$  نیاز انرژی ساختمان (وات)،  $m^0$  دبی جرمی آب (کیلوگرم در ثانیه)،  $C$  ظرفیت حرارتی ویژه آب (۴۲۰۰ ژول بر کیلوگرم بر کلوین) و  $\Delta t$  اختلاف دما (کلوین) می‌باشند.

لازم به ذکر است سایر پارامترهای مورد نیاز مدل‌سازی انتقال حرارت در سفره آب زیرزمینی بر اساس مطالعات قبلی به‌ویژه تحقیقات روسو و همکاران (Russo *et al.*, 2014) در نظر گرفته شده است. برای ساخت مدل انتقال حرارت در آبخوان فرضی، ابتدا مدل جریان آب زیرزمینی در دوره زمانی مورد نظر اجرا شد و سپس اطلاعات مورد نیاز مدل انتقال حرارت در آن اعمال گردیده و در نهایت مدل انتقال حرارت اجرا گردید. مهم‌ترین داده‌های ورودی به مدل انتقال حرارت شامل تعیین نوع واکنش شیمیایی، شرایط اولیه، همرفت، پراکندگی، انتشار، واکنش شیمیایی، منابع ورودی و خروجی حرارت می‌باشند که به ترتیب از طریق تنظیمات مدل‌سازی، غلظت اولیه، بسته همرفت، بسته پراکندگی، بسته انتشار، بسته واکنش‌های شیمیایی و غلظت منابع ورودی و خروجی وارد مدل می‌شوند (ولی‌زاده، ۱۳۹۲).

در قسمت تنظیمات مدل‌سازی در کد MT3DMS نوع واکنش شیمیایی و تعداد اجزای واکنش‌دهنده مشخص می‌گردد. در کد MT3DMS گزینه No Kinetic Reaction is Simulated برای شبیه‌سازی انتقال حرارت به کار می‌رود. در این تحقیق دمای اولیه آب زیرزمینی به‌عنوان غلظت مواد اولیه وارد مدل گردید. یکی از مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده‌ی مقدار و گسترش حرارت در آب زیرزمینی، همرفت می‌باشد. در حل معادله انتقال حرارت در این تحقیق همانند مطالعات پیشین از روش TVD که بر اساس الگوریتم (ULTIMATE) است استفاده شد (Mendez *et al.*, 2010).

علاوه بر پدیده همرفت، پدیده پراکندگی هم بر انتقال حرارت در آب زیرزمینی مؤثر می‌باشد. قابلیت پراکندگی طولی اولیه برای مدل انتقال حرارت با توجه به محاسبات انجام‌شده بر مبنای فرمول‌های موجود (معادله ۳-۲)، تعیین و تنظیم گردید. طبق این فرمول پراکندگی طولی ( $\alpha_L$ ) برابر است با:

$$\alpha_L = 0.1 L \quad \text{معادله ۳-۵}$$

که در این معادله  $\alpha_L$  پراکندگی طولی و  $L$  طول مسیر جریان برحسب متر می‌باشند. مقدار پراکندگی طولی در این تحقیق برابر با ۱ در نظر گرفته شد. برای نسبت مقدار پراکندگی افقی به طولی و نسبت مقدار پراکندگی عمودی به طولی با توجه به اطلاعات حاصل از مطالعات پیشین مقدار ۰/۱ در

مدل اعمال شده است. به منظور تأثیر دادن واکنش‌های شیمیایی در آبخوان فرضی مورد مطالعه از بسته واکنش‌های شیمیایی استفاده شد. روش استفاده شده در مدل حاضر ایزوترم تعادل خطی (Linear isotherm equilibrium) می‌باشد. مقدار ضریب توزیع در این قسمت بر اساس مطالعات پیشین (Russo *et al.*, 2014)، ۰/۰۰۰۲۱۶ قرار داده شد.

جرم وارد شده یا خارج شده از آبخوان، در معادله انتقال حرارت، نشان‌دهنده ورود یا خروج انرژی است. برای سازگاری با ابعاد مرتبط با انتقال آلودگی و حرارت واحد کلوین معادل با غلظت ( $\text{Kg/m}^3$ ) در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین ورود یا خروج انرژی مانند یک بار جرمی در واحد حجم سفره بیان می‌شود.

## فصل چهارم: نتایج و بحث

### ۴-۱- مقدمه

شبیه‌سازی انتقال حرارت در سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی (GWHP) نیازمند ساخت مدل جریان آب زیرزمینی می‌باشد. اولین مرحله در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، ساخت مدل مفهومی آبخوان بوده و در مرحله بعد اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری‌شده‌ی موردنیاز برای مدل‌سازی وارد نرم-افزار گردیده و مدل جریان آب زیرزمینی ساخته می‌شود. در نهایت به مدل‌سازی انتقال حرارت پرداخته می‌شود. مهم‌ترین اهداف مدل‌سازی انتقال حرارت در آب‌های زیرزمینی که در این تحقیق دنبال می‌گردد، بررسی تغییرات مکانی و زمانی هاله حرارتی و پیش‌بینی تغییرات آن تحت تنش‌های هیدروژئولوژیکی مختلف در راستای بررسی نقش پارامترهای هیدروژئولوژیکی در سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی می‌باشد. در این فصل مراحل و نتایج ساخت مدل جریان آب زیرزمینی و انتقال حرارت سیستم GWHP ارائه می‌گردند.

### ۴-۲- مدل جریان آب زیرزمینی و نتایج حاصل از اجرای آن

#### ۴-۲-۱- مدل مفهومی

ساخت مدل مفهومی به منظور ساده‌تر کردن شرایط واقعی منطقه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل ساده‌تر آن است (Anderson and Woessner, 1992). تهیه مدل مفهومی یک سفره، نیازمند اطلاعات زیادی برای شناخت وضعیت آب زیرزمینی می‌باشد. در این تحقیق به علت عدم امکان دستیابی به داده‌های واقعی در مورد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی، شبیه‌سازی جریان در یک آبخوان مفروض انجام شده است. داده‌های موردنیاز در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال حرارت، از اطلاعات ارائه

شده در مقالات مرتبط استخراج شده است (Russo et al., 2014; Mendez et al., 2010). بدیهی است دقت مدل جریان آب زیرزمینی با بیش‌تر بودن دقت مدل مفهومی بالاتر می‌رود و اعتبار آن بیش‌تر خواهد شد.

آبخوان مفروض در این تحقیق، یک آبخوان مربع شکل به مساحت یک میلیون مترمربع ( $1000 \times 1000$  متر) است. آبخوان مذکور آبخوانی آزاد و تک‌لایه به ضخامت ۳۰ متر می‌باشد. آبخوان همگن و ایزوتروپ فرض شده و هدایت هیدرولیکی آن  $129/6$  متر بر روز می‌باشد. مرزهای شمالی و جنوبی آبخوان (شکل ۴-۱) 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 در راستای غرب به شرق بوده و گرادیان هیدرولیکی آبخوان برابر  $0/005$  محاسبه می‌گردد. تخلخل، آبدهی و ضریب ذخیره آبخوان مفروض، به ترتیب برابر  $0/2$ ،  $0/25$  و  $0/0001$  در نظر گرفته شده است. جهت شبیه‌سازی اثر پمپ حرارتی آب زیرزمینی، یک چاه پمپاژ در فاصله ۳۰۰ متری مرز غربی در نظر گرفته شده است. چاه مذکور آب مورد نیاز سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی را تأمین می‌نماید. آب پمپاژ شده پس از چرخش در سیکل‌های مربوطه از طریق یک چاه تزریق که در فاصله ۲۰۰ متری شرق چاه پمپاژ قرار دارد دوباره به سفره آب زیرزمینی بازمی‌گردد. ذکر این نکته ضروری است که دبی چاه تزریق و پمپاژ در این آبخوان معادل هم در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر کل آب پمپاژ شده از سفره آب زیرزمینی پس از عبور از سیستم پمپ حرارتی مجدداً به آبخوان هدایت می‌شود.

در شش ماه اول هر سال (دوره سرمایش) با توجه به بالا بودن دمای هوا و تبادل حرارت آن با آب زیرزمینی، دمای آب برگشتی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی نیز به نوبه‌ی خود بالاتر رفته و بنابراین هاله ایجاد شده در اطراف چاه تزریق گرم‌تر از دمای زمینه می‌شود. در شش ماه دوم (دوره گرمایش) دمای آب برگشتی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی به علت تبادل حرارت با محیط ساختمان نسبت به دمای اولیه آبخوان مفروض پایین‌تر بوده و هاله سرد اطراف چاه تزریق تشکیل می‌شود. دمای اولیه آب زیرزمینی برابر  $285/15$  درجه کلوین ( $12$  درجه سانتی‌گراد) و دمای مرز

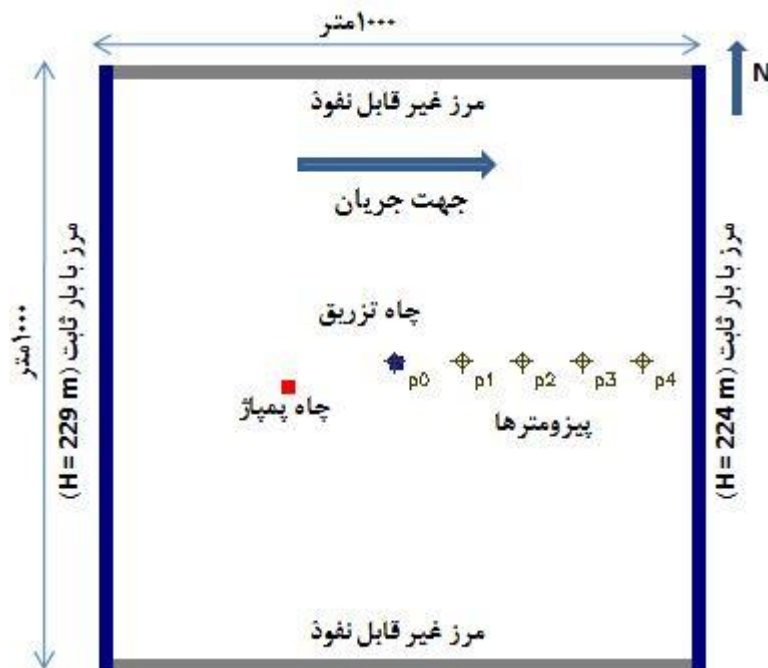


ورودی آبخوان که از نوع مرز با بار ثابت می‌باشد، نیز ۲۸۵/۱۵ کلوین فرض شده است. سایر پارامترهای حرارتی مطابق داده‌های جدول ۴-۱ لحاظ شده است.

در این تحقیق با در نظر گرفتن دمای آسایش (۲۲ درجه سانتی‌گراد) و تغییرات ماهانه دمای محیط، دمای فرضی آب تزریق شده به سفره آب زیرزمینی در هر ماه مطابق جدول ۴-۲ در نظر گرفته شد. با توجه به تفاضل دمای بین دمای اولیه آب زیرزمینی و دمای آب تزریق شده به آبخوان و نیز با دانستن نیاز انرژی برای مساحت هزار مترمربع (مساحت محدوده ایجاد دمای آسایش) دبی پمپاژ مورد نیاز برای تأمین دمای آسایش از طریق فرمول ذیل برای هر ماه محاسبه شد.

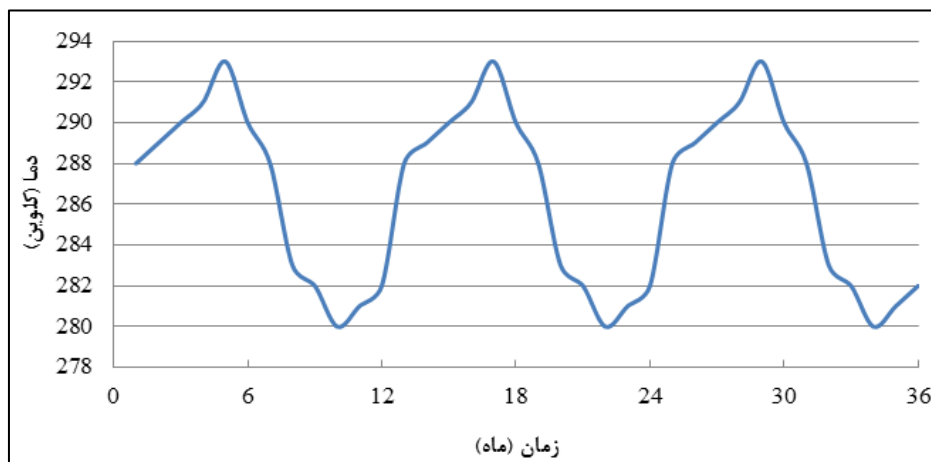
$$q = m^{\circ}c\Delta t \quad \text{معادله ۴-۱:}$$

که در این معادله  $q$  نیاز انرژی ساختمان (وات)،  $m^{\circ}$  دبی جرمی آب (کیلوگرم در ثانیه)،  $C$  ظرفیت حرارتی ویژه آب (۴۲۰۰ ژول بر کیلوگرم بر کلوین) و  $\Delta t$  اختلاف دما (کلوین) می‌باشند.



شکل ۴-۱. مشخصات آبخوان فرضی جهت شبیه‌سازی سیستم GWHP

پس از محاسبه دبی جرمی با استفاده از تعریف چگالی، دبی جرمی به دبی حجمی تبدیل شده است. در شکل ۴-۲ دماهای وارد شده برای آب برگشتی از سیستم پمپ حرارتی که به سفره آب زیرزمینی تزریق می‌گردد ارائه شده است. بیش‌ترین دمای آب تزریق شده به آبخوان مربوط به ماه مرداد در دوره سرمایش و کم‌ترین مقدار آن مربوط به دی ماه در دوره گرمایش می‌باشد. در این شرایط بیش‌ترین دبی‌ها (پمپاژ و تزریق) در ماه‌های مهر و آبان بوده است.



شکل ۴-۲. دمای آب تزریق شده به آبخوان فرضی

جدول ۴-۱. مقادیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی و حرارتی آبخوان فرضی جهت شبیه‌سازی سیستم GWHP

مقدار	پارامترهای حرارتی	مقدار	پارامترهای هیدروژئولوژیکی
$1/9 \times 10^{-6}$	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 برگشتی (کلوین)	۰/۰۰۵	شیب هیدرولیکی
۱	پراکنش طولی (متر)	۰/۲۵	آبدهی ویژه
۲۸۵/۱۵	دمای اولیه سفره (کلوین)	۳۴۰-۱۳۳۰	دبی (مترمکعب در روز)

جدول ۴-۲. مقادیر دبی و دمای آب تزریق شده به سفره آب زیرزمینی

دبی حجمی m <sup>3</sup> /day	دبی جرمی (kg/s)	دمای ورودی به سفره (کلوین)	اختلاف دما	ماه
۹۰۰	۱۰/۴۱۶۷	۲۸۸/۱۵	۳	فروردین
۶۷۰	۷/۷۵۴۶۳	۲۸۹/۱۵	۴	اردیبهشت
۵۴۰	۶/۲۵	۲۹۰/۱۵	۵	خرداد
۴۵۰	۵/۲۰۸۳۳	۲۹۱/۱۵	۶	تیر
۳۴۰	۳/۹۳۵۱۹	۲۹۳/۱۵	۸	مرداد
۵۴۰	۶/۲۵	۲۹۰/۱۵	۵	شهریور
۱۳۳۰	۱۵/۳۹۳۵	۲۸۳/۱۵	۲	مهر
۱۳۳۰	۱۵/۳۹۳۵	۲۸۳/۱۵	۲	آبان
۹۰۰	۱۰/۴۱۶۷	۲۸۲/۱۵	۳	آذر
۵۴۰	۶/۲۵	۲۸۰/۱۵	۵	دی
۶۷۰	۷/۷۵۴۶۳	۲۸۱/۱۵	۴	بهمن
۹۰۰	۱۰/۴۱۶۷	۲۸۲/۱۵	۳	اسفند

لازم به ذکر است جهت بررسی حرکت و توزیع هاله حرارتی در سفره آب زیرزمینی پنج حلقه چاه مشاهده‌ای به فواصل یکنواخت در پایین دست چاه تزریق در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۱).

#### ۴-۲-۲- طراحی مدل جریان آب زیرزمینی

##### ۴-۲-۲-۱- گسسته سازی مدل

حل معادله جریان آب زیرزمینی به روش تفاضل متناهی نیازمند گسسته‌سازی مکانی می‌باشد. به این منظور محدوده مربعی شکل آبخوان فرضی به سلول‌هایی با ابعاد یکسان ۲۰×۲۰ متر تقسیم گردید. با توجه مساحت آبخوان در نهایت شبکه‌ای متشکل از ۵۰ ردیف و ۵۰ ستون ایجاد شد.

#### ۴-۲-۲-۲- تعریف هندسه آبخوان و شرایط مرزی

با توجه به مدل مفهومی آبخوان فرضی، آبخوان مورد نظر بصورت آزاد و تک لایه در مدل عددی تعریف گردید. ارتفاع سنگ کف آبخوان برابر صفر و ارتفاع سطح فوقانی مدل برابر ۲۵۰ متر برای همه سلول‌های شبکه در نظر گرفته شد. با توجه به این که مرز شمالی و جنوبی آبخوان مرز غیرقابل نفوذ می‌باشند، این مرزها در مدل عددی به صورت مرز بدون جریان ( $IBOUND=0$ ) تعریف گردیدند. مرزهای شرقی و غربی آبخوان، از نوع مرز با بار ثابت ( $IBOUND=-1$ ) با ارتفاع به ترتیب ۲۲۴ و ۲۲۹ متر معرفی شدند. سایر سلول‌های شبکه مدل به عنوان سلول فعال ( $IBOUND=1$ ) در نظر گرفته شد.

#### ۴-۲-۳- ضرایب هیدرودینامیک آبخوان

با توجه به مدل مفهومی، آبخوان فرضی به صورت همگن و ایزوتروپ بوده و بنابراین هدایت هیدرولیکی افقی در همه بخش‌های آبخوان برابر  $۱۲۹/۶$  متر بر روز تعریف گردید. مقادیر آبدهی ویژه و ضریب ذخیره آبخوان نیز در تمام سلول‌های مدل به ترتیب برابر  $۰/۲۵$  و  $۰/۰۰۰۱$  لحاظ شد.

#### ۴-۲-۴- بار هیدرولیکی اولیه (Initial Hydraulic Head)

ثابت مقادیر بار هیدرولیکی اولیه در آغاز مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. بار هیدرولیکی در سلول‌های با بار ثابت (مرزهای شرقی و غربی) در کل مدل‌سازی جریان ثابت باقی می‌ماند. مقادیر آن در مرز ورودی جریان برابر ۲۲۹ متر و در مرز خروجی برابر ۲۲۴ متر در نظر گرفته شده است. بار اولیه در کلیه سلول‌های فعال با توجه به شیب هیدرولیکی بین مرز ورودی و خروجی درونیابی شده و در مدل اعمال گردید.

۴-۲-۵- تنش‌های وارد به سفره

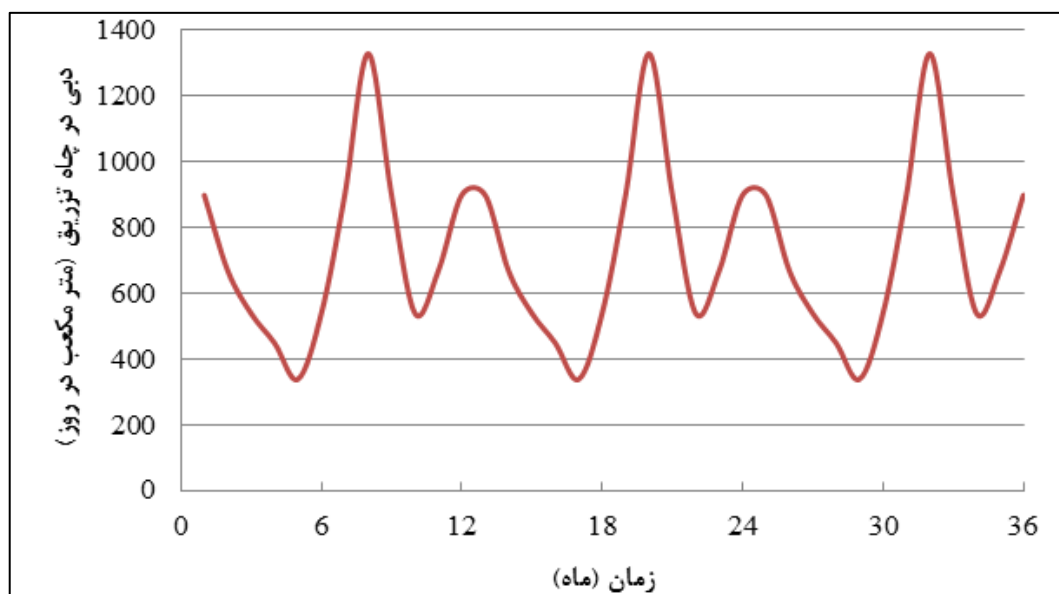
۴-۲-۵-۱- برداشت

مهم‌ترین منبع تخلیه آب زیرزمینی در آبخوان مفروض چاه پمپاژ بوده که دائماً آب زیرزمینی را تخلیه کرده و به سیستم پمپ حرارتی درون ساختمان هدایت می‌نماید. به‌منظور وارد کردن چاه‌ها از بسته چاه (Well) استفاده شده است. برای هر دوره تنش (هر ماه از سال)، دبی پمپاژ که بر اساس اختلاف دمای آب ورودی و خروجی سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی محاسبه شده است (جدول ۴-۲) اختصاص داده شد.

۴-۲-۵-۲- تغذیه سفره

همان‌گونه که گفته شد در یک پمپ حرارتی با سیکل باز، انتقال حرارت بین آب‌های زیرزمینی و هوای داخل ساختمان انجام می‌شود. بدین‌صورت که آب‌های زیرزمینی توسط یک پمپ از داخل چاه بیرون کشیده شده و به داخل دستگاه پمپ حرارتی جهت تأمین سرمایش یا گرمایش هدایت می‌شود. به علت تبادل دمایی در سیستم، این آب با دمایی متفاوت به سفره آب زیرزمینی تزریق می‌شود. بنابراین تنها عامل تغذیه سفره مفروض در این مطالعه، آب برگشتی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی می‌باشد.

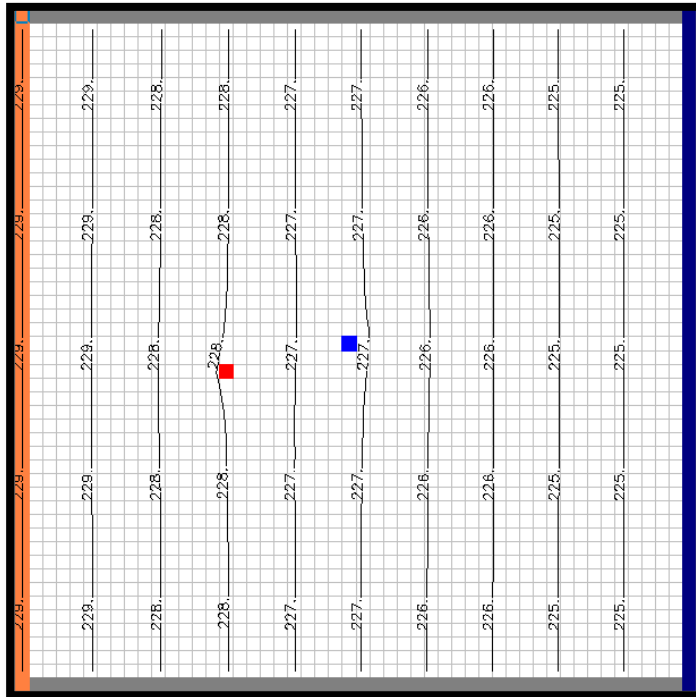
برای شبیه‌سازی جریان تزریق از بسته چاه (Well) استفاده شده است. دبی آب برای چاه تزریق در دوره‌های تنش، یکسان با دبی پمپاژ در نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۳ تغییرات دبی در چاه‌های تزریق و پمپاژ در دوره‌های تنش نشان داده شده است.



شکل ۴-۳. تغییرات دبی در چاه تزریق در دوره‌های تنش

#### ۴-۲-۶- اجرای مدل جریان آب زیرزمینی و نتایج حاصل از آن

پس از ساخت مدل جریان آب زیرزمینی، مدل اجرا شده است. نتایج حاصل از مدل جریان شامل توزیع بار هیدرولیکی در بخش‌های مختلف آبخوان فرضی در پایان هر یک از دوره‌های تنش می‌باشد. به عبارت دیگر تراز آب زیرزمینی در پایان هر یک از دوره‌های ۳۶ گانه تنش محاسبه شده و نقشه هم‌تراز (هم‌پتانسیل) آب زیرزمینی ترسیم شده است. شکل ۴-۴ نقشه هم‌پتانسیل آب زیرزمینی در پایان آخرین دوره تنش را نشان می‌دهد. بر این اساس مقادیر بار هیدرولیکی از تراز ۲۲۹ متر در بخش غربی به ۲۲۴ متر در بخش شرقی کاهش می‌یابد. با توجه به همگنی و ضخامت یکنواخت آبخوان شیب هیدرولیکی جریان در بخش‌های مختلف مدل یکنواخت می‌باشد. در محدوده چاه‌های پمپاژ و تزریق انحنای در خطوط تراز دیده می‌شود. انحنای در محدوده چاه پمپاژ به دلیل فروافتادگی سطح ایستابی و در محدوده چاه تزریق به دلیل بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در اثر تغذیه ناشی از چاه تزریق می‌باشد.



شکل ۴-۴. توزیع بار هیدرولیکی در مدل آبخوان فرضی

### ۳-۴- ساخت مدل انتقال حرارت در آبخوان فرضی

#### ۳-۴-۱- شرایط مرزی و شرایط اولیه حرارت

با توجه به مدل مفهومی آبخوان (شکل ۴-۱)، مقادیر حرارت در مرز غربی آبخوان ثابت بوده و برابر  $285/15$  کلوین ( $12$  درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. جهت تعریف این پارامتر در مدل عددی انتقال حرارت، مرز غربی آبخوان به‌عنوان مرز با دمای ثابت در نظر گرفته شد ( $ICBOUND=-1$ ). همچنین مرزهای شمالی و جنوبی آبخوان که در مدل جریان آب زیرزمینی غیرقابل نفوذ بودند در مدل انتقال حرارت نیز به‌عنوان سلول‌های عایق دمایی ( $IBOUND=0$ ) معرفی شدند. سایر سلول‌های شبکه مدل انتقال حرارت به‌عنوان سلول‌های فعال در نظر گرفته شدند ( $IBOUND=1$ ). دمای اولیه (شرایط اولیه) در کلیه سلول‌های فعال مدل برابر  $285/15$  درجه کلوین لحاظ شده است.

#### ۴-۳-۲- دوره‌های تنش

دوره‌های تنش در مدل انتقال حرارت برابر دوره‌های تنش در مدل جریان و به صورت ۳۶ دوره تنش ماهانه در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۳-۳- سایر پارامترهای مدل‌سازی انتقال حرارت

##### الف) حالت شبیه‌سازی (Simulation Mode)

در اولین قدم در مدل‌سازی انتقال حرارت با نرم‌افزار MT3DMS، حالت شبیه‌سازی مشخص می‌شود. در مدل‌سازی انتقال حرارت فرض می‌شود که توزیع حرارت تحت تأثیر چگالی و میدان جریان نیست (Mendez *et al.*, 2010) و فرایند انتقال در شرایط چگالی ثابت مدل‌سازی می‌شود. بنابراین از گزینه Constant Density Transport with MT3DMS استفاده می‌گردد.

##### ب) نوع واکنش (Type of Reaction)

در این قسمت، گزینه No kinetic reaction is simulated استفاده شد تا مدل‌سازی واکنش‌های جنبشی انجام نشود.

##### ج) همرفت (Advection)

نرم‌افزار MT3DMS پنج روش حل برای همرفت ارائه می‌دهد که شامل موارد ذیل می‌باشند:

۱- (Method Of Characteristics) MOC

۲- (Modified Method Of Characteristics) MMOC

۳- (Third-Order Tvd Method) TVD

۴- (Hybrid Method Of Characteristics) HMOC

۵- (Effective Molecular Diffusion Coefficient) GCG



در این تحقیق همانند مطالعات گذشته (Mendez *et al.*, 2010) در حل معادله انتقال حرارت از روش TVD بر اساس الگوریتم ULTIMATE استفاده شده است.

### د) پراکندگی (Dispersion)

پدیده پراکندگی نیز از عوامل مؤثر بر انتقال حرارت در آب زیرزمینی است. پارامتر پراکنش طولی در مدل عددی پس از مشخص کردن نسبت پراکنش عرضی افقی به پراکنش طولی (TRPT)، نسبت پراکنش عرضی عمودی به پراکنش طولی (TRPV) و ضریب انتشار مولکولی (DMCOEF) در بسته پراکندگی (Dispersion) تعیین می‌گردد.

در مدل‌سازی انتقال حرارت آبخوان مفروض بر اساس مطالعات قبلی برای قابلیت پراکندگی طولی، نسبت‌های پراکندگی عرضی افقی به طولی و پراکندگی عرضی عمودی به طولی به ترتیب مقادیر ۱، ۰/۱ و ۰/۱ در نظر گرفته شد. ضریب انتشار مولکولی در انتقال جرم را می‌توان با هدایت حرارتی در انتقال حرارت نشان داد که مقدار آن بر اساس مطالعات پیشین (Mendez *et al.*, 2010) برابر  $10^{-6} \times 1/9$  متر در روز قرار داده شد.

### ه) واکنش‌های شیمیایی (Chemical Reaction)

در کد انتقال جرم MT3DMS به منظور تأثیر دادن واکنش‌های شیمیایی در منطقه فرضی مورد مطالعه از بسته واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. روش به‌کار رفته در مدل تحقیق حاضر ایزوترم تعادل خطی (Linear Isotherm Equilibrium) می‌باشد. در این روش فرض می‌شود که غلظت جذب‌شده متناسب با غلظت ماده حل‌شده است. در مدل‌سازی انتقال حرارت فرض می‌شود که تمام حرارت واردشده به آبخوان توسط مواد سفره جذب می‌شود. با انتخاب این گزینه، باید ضریب توزیع (Distribution Coefficient) نیز برای مدل انتقال مشخص شود. ضریب توزیع برای انتقال جرم توسط ضریب توزیع گرمایی جایگزین می‌شود که با معادله ۴-۲ محاسبه می‌گردد. ضریب توزیع بر اساس

فرمول و نیز تحقیقات پیشین (Russo et al, 2014) برابر  $0.0021$  در نظر گرفته شده است.

$$K_d = \frac{C_s}{C_w \rho_w} \quad \text{معادله ۴-۲:}$$

در این معادله  $K_d$  ضریب توزیع (مترمکعب بر کیلوگرم)،  $C_s$  ظرفیت حرارتی ویژه مواد سفره (ژول بر کیلوگرم بر کلون)،  $C_w$  ظرفیت حرارتی ویژه آب (ژول بر کیلوگرم بر کلون) و  $\rho_w$  چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) می‌باشد.

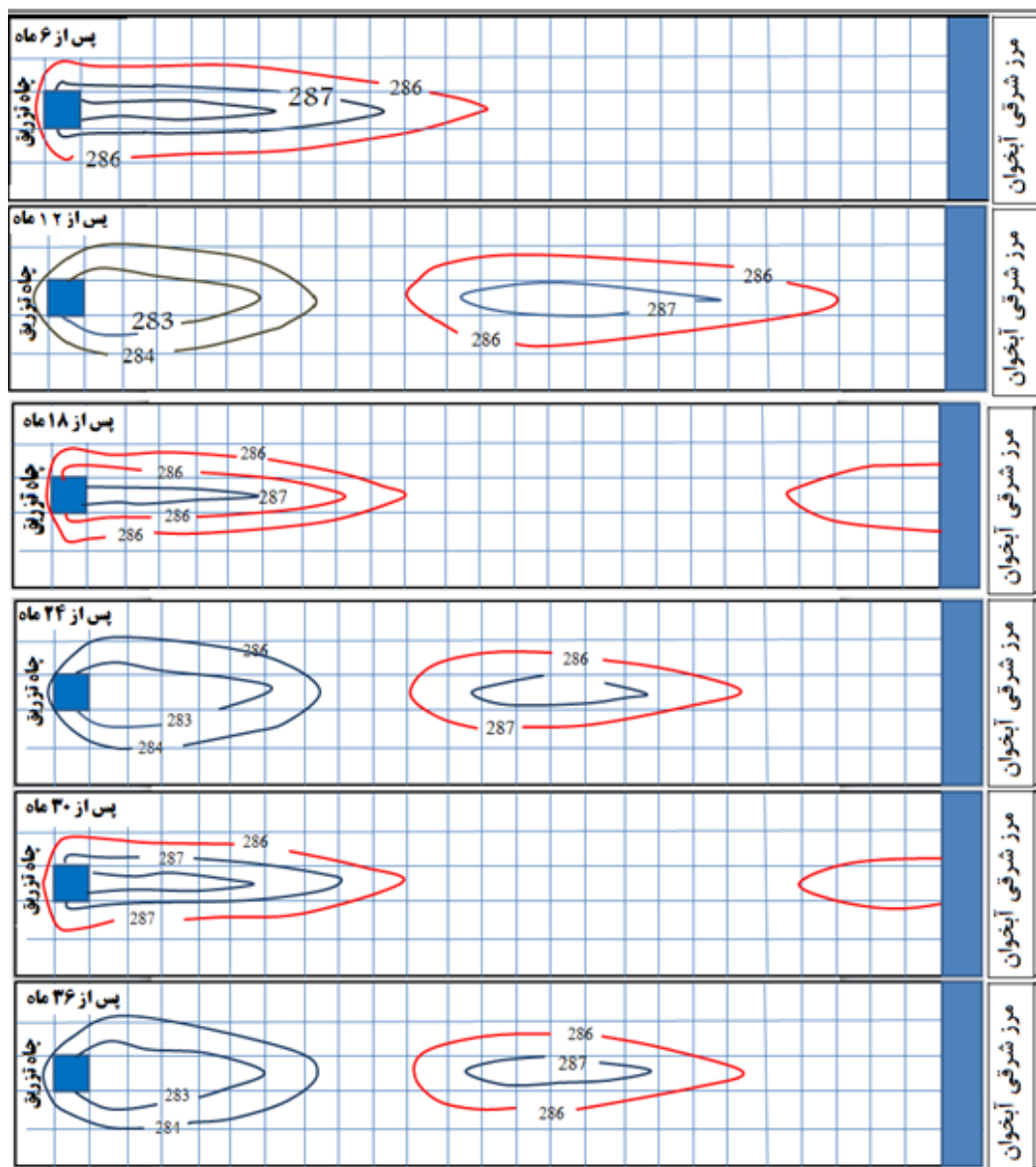
### و) دمای تزریق و برداشت

برای مشخص کردن ورود یا خروج حرارت از بسته Sink/Source Concentration استفاده شد. منبع حرارت در این تحقیق، چاه تغذیه می‌باشد که در دوره سرمایش آب گرم‌تر و در دوره گرمایش آب سردتری نسبت به آب زیرزمینی وارد سفره نموده و دمای مورد نظر از این نقطه شروع به توزیع در سفره آب زیرزمینی می‌نماید. دمای آب ورودی به سفره آب زیرزمینی در هر دوره تنش (ماه) متغیر بود که مقادیر آن مطابق جدول ۴-۲ در مدل عددی وارد شده است. دمای برداشت برابر دمای زمینه آبخوان فرضی ( $285/15$ ) در نظر گرفته شده است.

### ۴-۴- نتایج مدل سازی انتقال حرارت

با اطلاعات ورودی فوق، مدل انتقال حرارت ساخته شد. در شکل ۴-۵ گسترش هاله حرارتی در شش دوره زمانی (پایان هر شش ماه) نشان داده شده است که بسته به دوره گرمایش یا سرمایش در اثر دمای آب تزریق شده به سفره، هاله‌های گرم یا سرد تشکیل می‌شوند و در جهت جریان حرکت می‌نمایند. 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  $289$  کلون بوده و به تدریج با فاصله از منبع (چاه تزریق) کاهش می‌یابد تا این‌که تقریباً در فاصله  $300$  متری از آن با دمای زمینه سفره آب زیرزمینی ( $285/15$  کلون) 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 کلون) 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 مذکور (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.



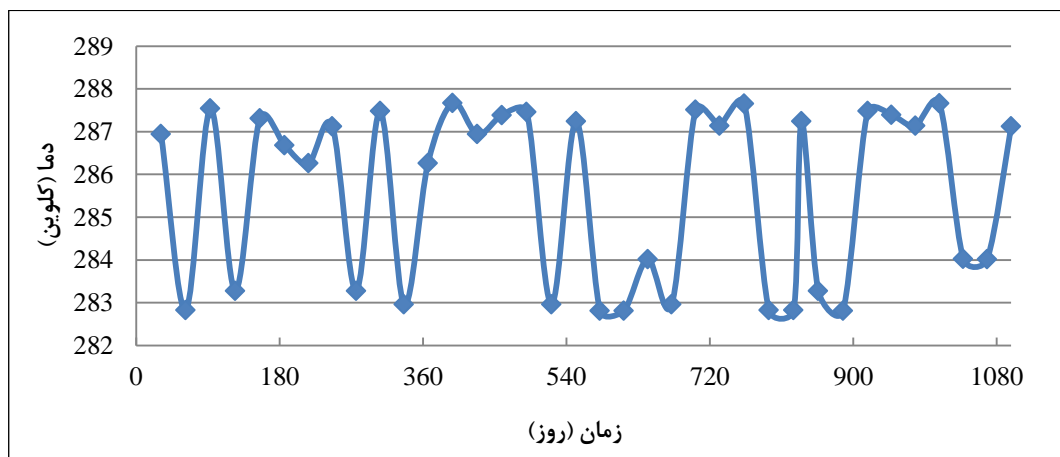
شکل ۴-۵. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در مدل آبخوان فرضی

پس از هجده ماه (پایان دوره سرمایش سال دوم) دما از مقادیر بالاتر در اطراف چاه تزریق به پایین‌ترین میزان آن (۲۸۴ کلوین) در سیصد متری از منبع (مکان جدید هاله سرد اول) رسیده و سپس تا فاصله ۵۰۰ متری سیر صعودی نشان می‌دهد. زیرا هاله گرم قبلی دمای آن مناطق را افزایش داده است.

بیست و چهار ماه پس از شروع کار سیستم (پایان دوره گرمایش سال دوم) هاله‌های گرم و سرد اول کاملاً از محدوده مدل خارج شده و هاله‌های جدید در محدوده مدل می‌شوند. دما از ۲۸۲ کلوین در اطراف چاه تزریق به تدریج با فاصله از منبع افزایش یافته تا این که در ۳۰۰ متری به اوج خود رسیده و سپس در ۵۰۰ متری به دمای زمینه آبخوان می‌رسد.

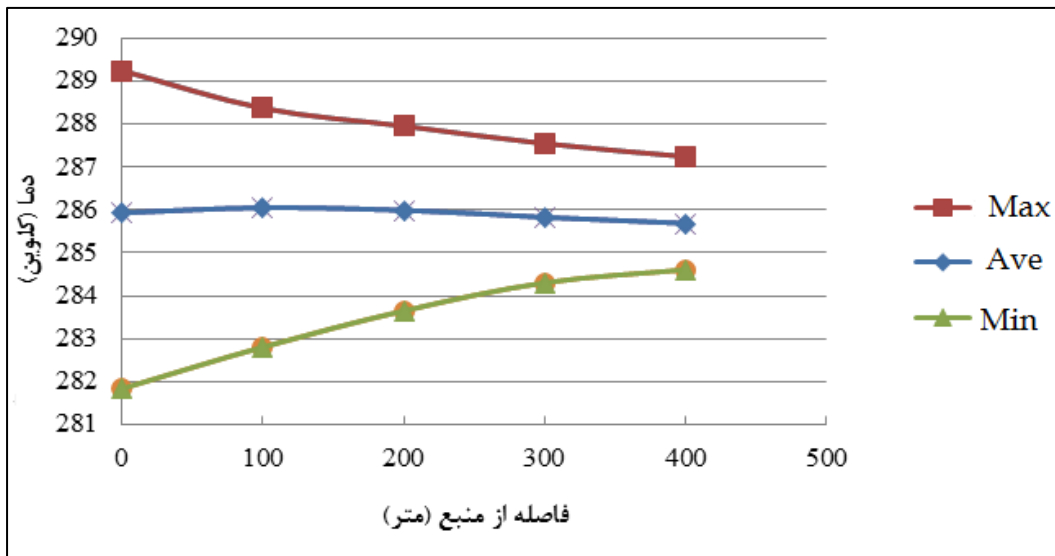
در ماه سی‌ام یعنی پس از تشکیل هاله گرم سوم و حرکت آن در جهت جریان، هاله دوم به انتهای مرز خروجی مدل نزدیک می‌شود و بنابراین دما در آن مناطق را افزایش داده است. رفتار هاله‌های حرارتی برای این دوره مشابه رفتار آن‌ها در ماه هجدهم است.

رفتار هاله‌های حرارتی در ماه سی و ششم شبیه به رفتار آن‌ها در ماه بیست و چهارم می‌باشد. در این دوره هاله‌های حرارتی دوم کاملاً از مرز مدل خارج شده و هاله‌های حرارتی سوم نیز در حال حرکت در مسیر جریان می‌باشند. در شکل ۴-۶ دمای آب در هر دوره تنش در چاه تزریق نشان داده شده است. در هر دوره تنش چاه تزریق دست‌خوش تغییرات دما می‌شود و به نوبه‌ی خود دمای سفره نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد.



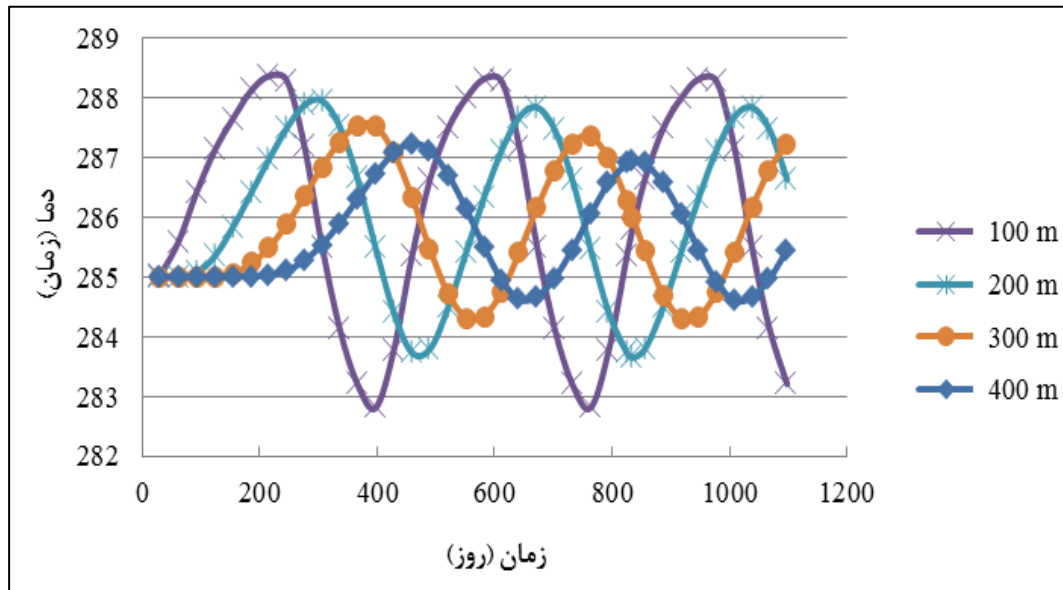
شکل ۴-۶. تغییرات زمانی دما در چاه تزریق در دوره‌های تنش

در شکل ۷-۴ تغییر دمای آب زیرزمینی با فاصله از چاه تزریق (منبع حرارت) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که دمای میانگین در شرایط اولیه آبخوان مفروض با افزایش فاصله تغییر چندانی ندارد و تقریباً در ۲۸۶ کلوین ثابت است. بیشینه و کمینه دما در این شرایط با افزایش فاصله از منبع به سمت دمای زمینه تمایل نشان می‌دهند.



شکل ۷-۴. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دمای آبخوان مفروض با فاصله از چاه تزریق (متر)

چنان‌که در این شکل دیده می‌شود در فاصله صد متری از منبع بیش‌ترین تغییرات دمایی رخ می‌دهد. سپس با افزایش فاصله این نوسانات کم‌تر می‌شود. این موضوع در شکل ۸-۴ نیز مشاهده می‌شود. در این شکل تغییرات میانگین دمای آبخوان در فواصل مختلف شامل ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متری از چاه تزریق نشان داده شده است. در فواصل نزدیک‌تر به منبع نوسانات دما حداکثر بوده و در فواصل دورتر نوسانات به حداقل مقدار خود رسیده است. با افزایش فاصله از چاه تزریق حداکثر دما کاهش و حداقل دما افزایش نشان می‌دهند.

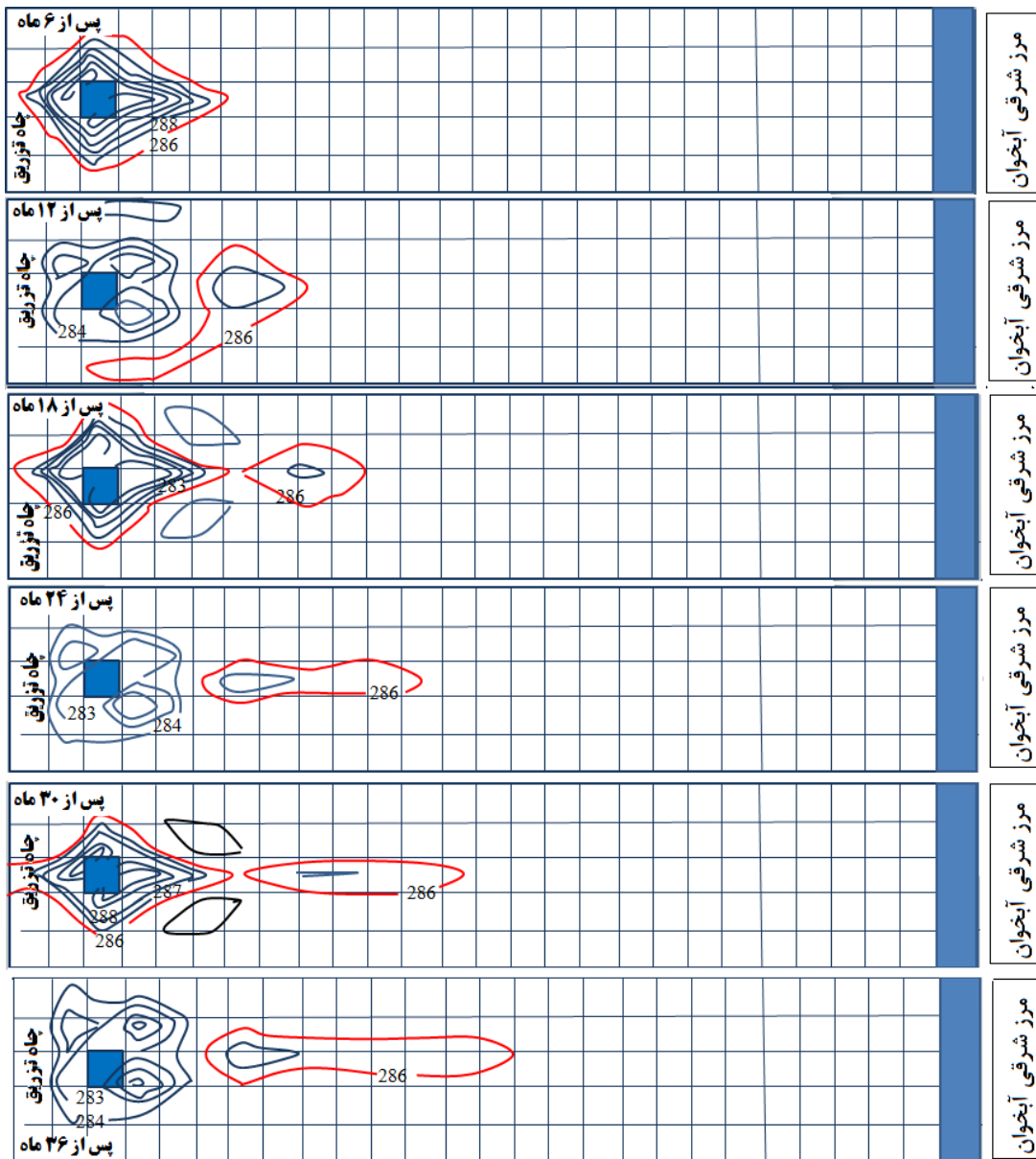


شکل ۴-۸. تغییرات زمانی میانگین دما با فاصله از چاه تزریق

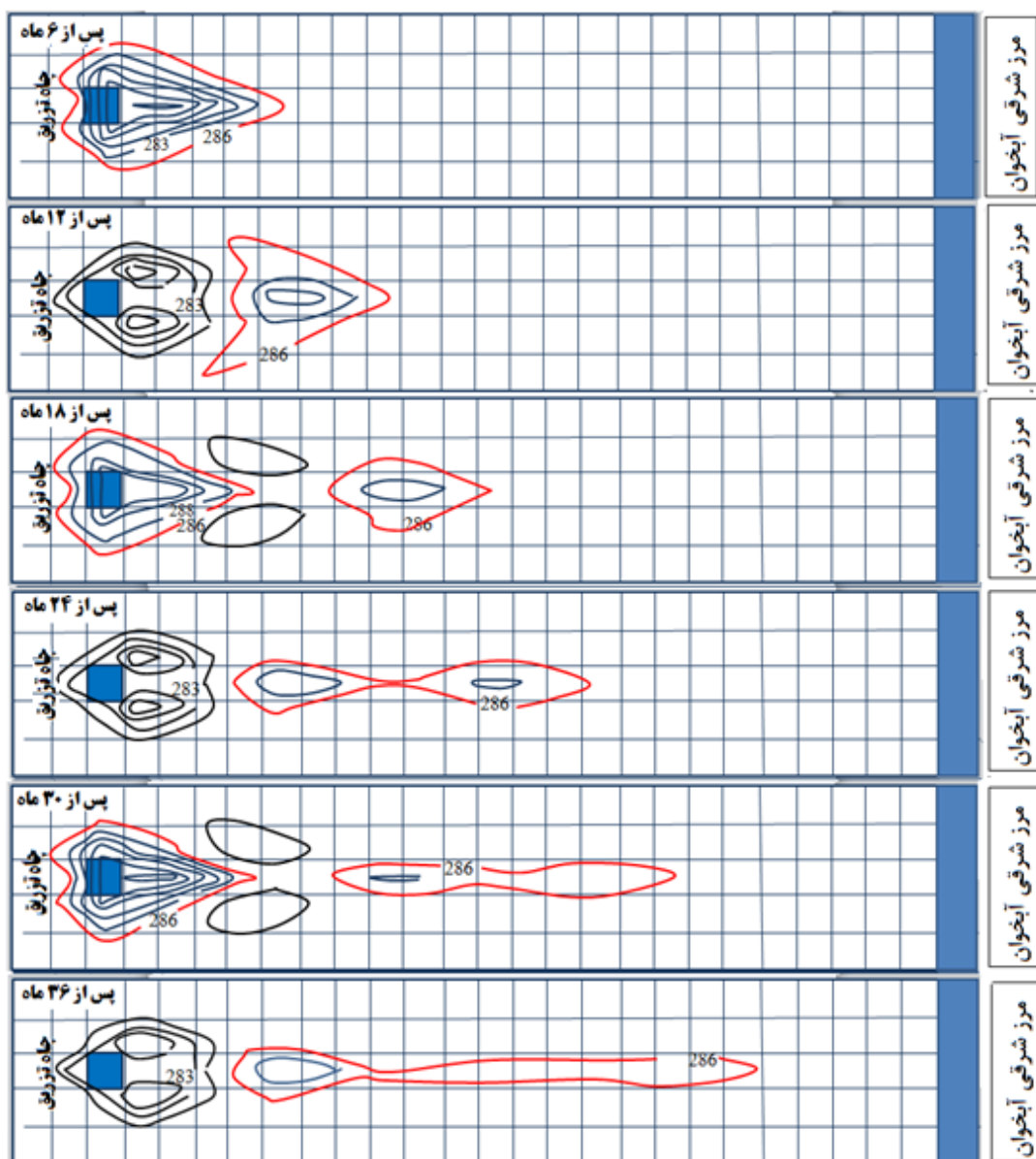
#### ۴-۴-۱- بررسی تأثیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی بر توسعه هاله حرارتی

##### الف) بررسی اثر هدایت هیدرولیکی

برای ارزیابی تأثیر پارامتر هدایت هیدرولیکی بر توسعه هاله حرارتی مقادیر آن نسبت به مقدار اولیه در آبخوان فرضی (۱۲۹/۶ متر بر روز) تغییر یافت و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر هدایت هیدرولیکی مورد بررسی شامل ۱۶، ۳۳، ۶۶، ۱۵۰ و ۲۰۰ متر بر روز می‌باشد. تغییرات گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش ماهه با مقادیر هدایت هیدرولیکی ذکر شده در شکل‌های ۴-۹ تا ۴-۱۳ ارائه شده است.

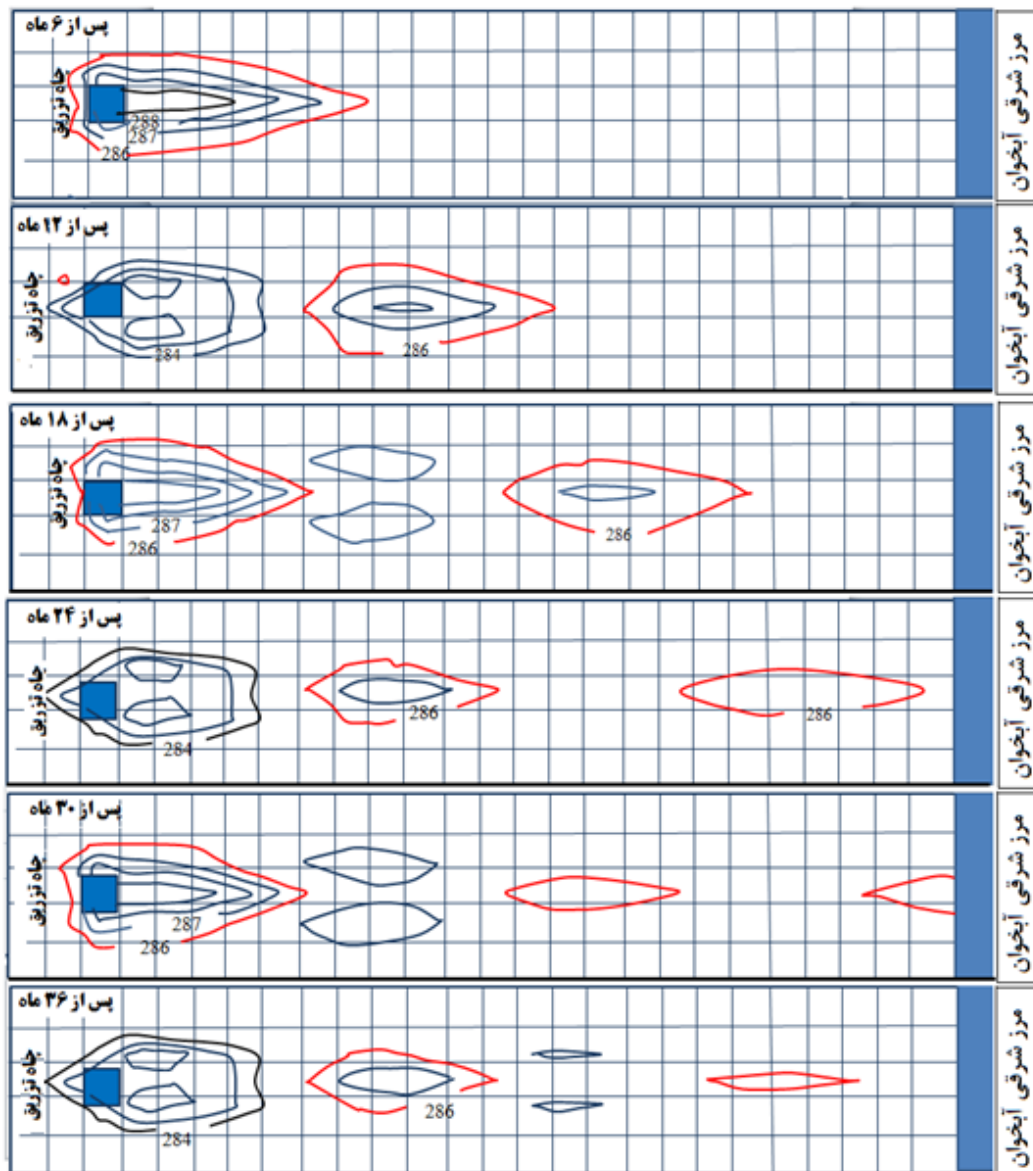


شکل ۴-۹. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش‌ماهه با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۱۶ متر بر روز

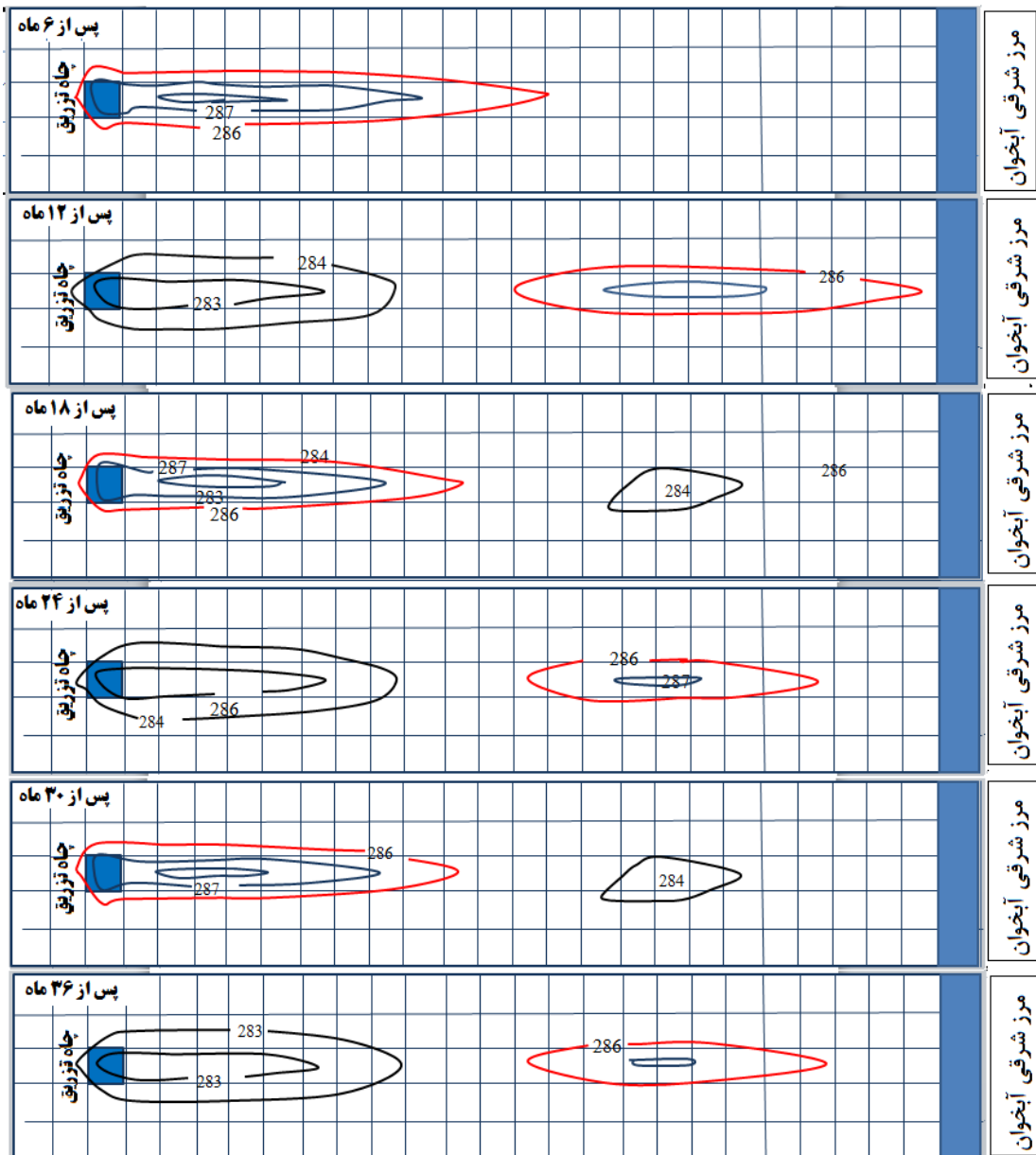


شکل ۴-۱۰. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش‌ماهه با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۳۳ متر بر روز

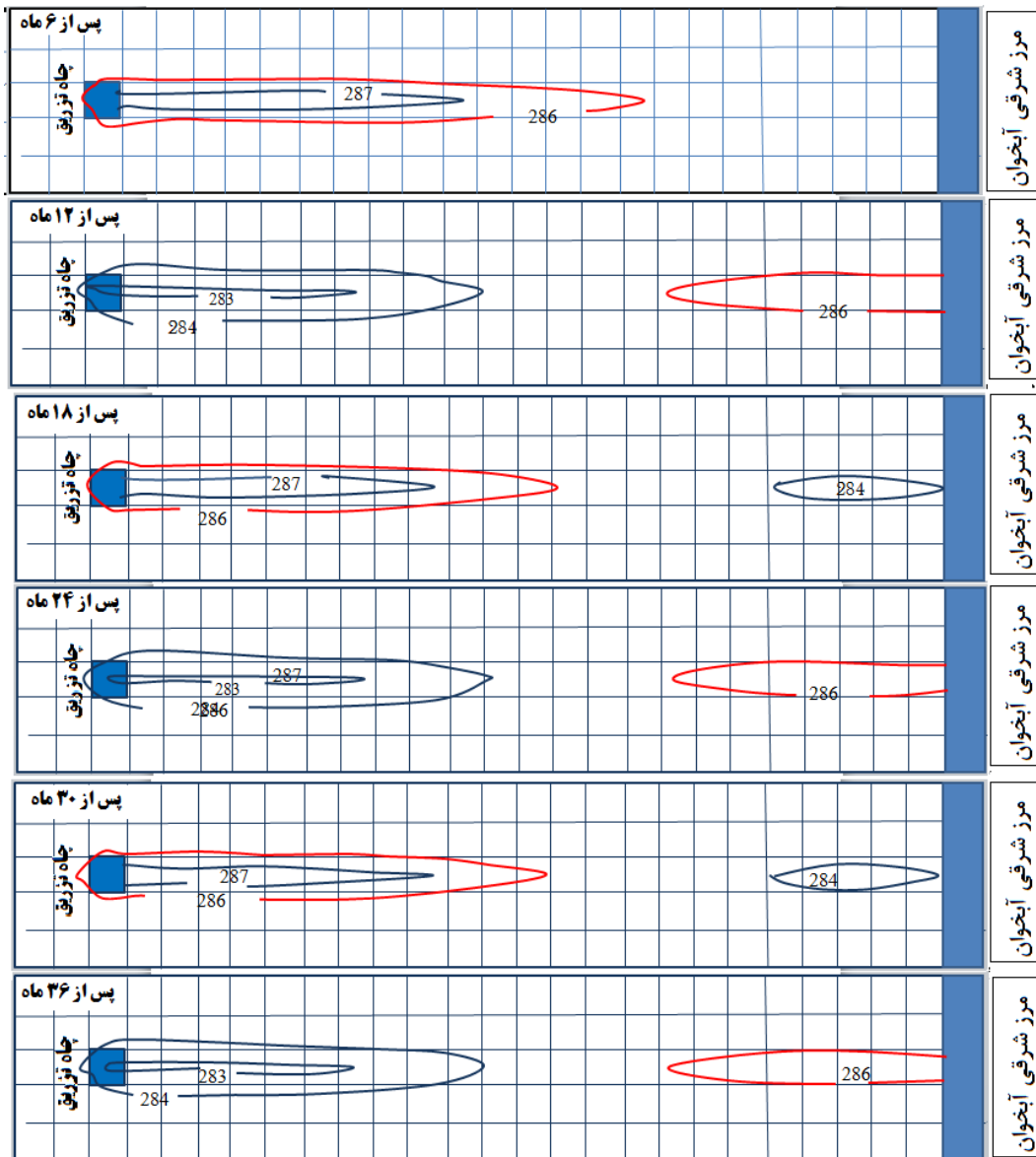




شکل ۴-۱۱. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش‌ماهه با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۶۶ متر بر روز



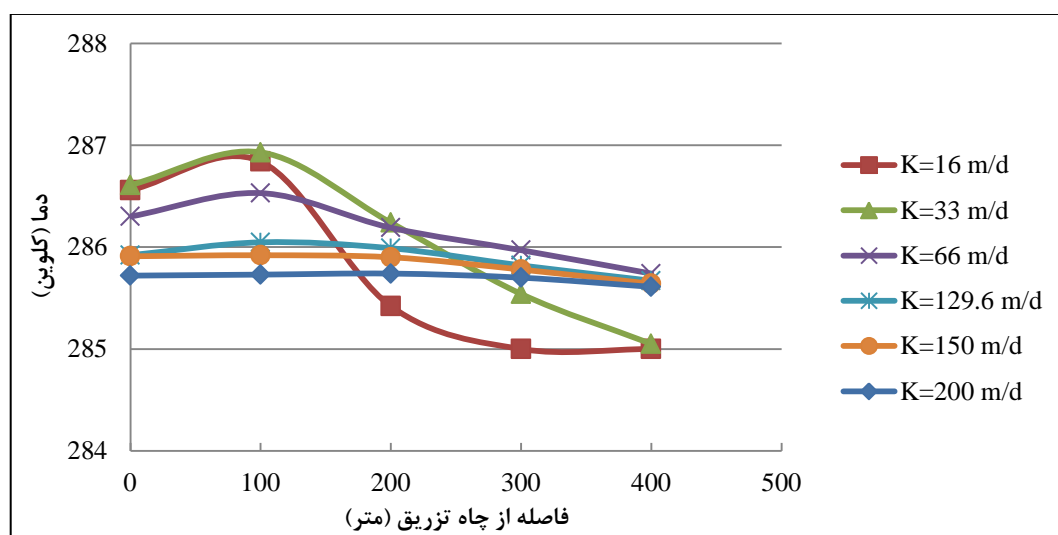
شکل ۴-۱۲. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش‌ماهه با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۱۵۰ متر بر روز



شکل ۴-۱۳. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در پایان دوره‌های شش‌ماهه با مقادیر هدایت هیدرولیکی ۲۰۰ متر بر روز

هدایت هیدرولیکی آبخوان علاوه بر خصوصیات سیال تابع بافت خاک است. تغییر هدایت هیدرولیکی به معنی تغییر در بافت خاک سفره آب زیرزمینی می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ۴-۹ تا ۴-۱۲ دیده می‌شود در آبخوان‌های با بافت خاک دانه درشت‌تر (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. مفهوم آن انتقال حرارت سریع‌تر در آبخوان می‌باشد. هر چه بافت خاک دانه‌ریزتر باشد

(هدایت هیدرولیکی کم‌تر) هاله تشکیل‌شده به آرامی در جهت جریان حرکت کرده و بنابراین گسترش طولی و عرضی هاله تقریباً یکسان شده و شکل هاله به دایره نزدیک می‌شود. در شکل ۴-۱۴ تغییرات میانگین دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در شرایط هدایت هیدرولیکی متفاوت ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در مقادیر هدایت هیدرولیکی‌های پایین‌تر از مقدار اولیه آبخوان (۱۲۹/۶ متر بر روز) یعنی مقادیر ۱۶، ۳۳ و ۶۶ متر بر روز میانگین دما حتی در فواصل دور از منبع نوسان زیادی دارد. با افزایش هدایت هیدرولیکی این نوسانات به حداقل رسیده و تقریباً در یک درجه بالاتر از دمای زمینه. اولیه آبخوان (۲۸۵/۱۵ کلوین) ثابت می‌باشد. با توجه به این شکل در فواصل مختلف میانگین دما با افزایش هدایت هیدرولیکی کم شده و با کاهش آن زیاد می‌شود.



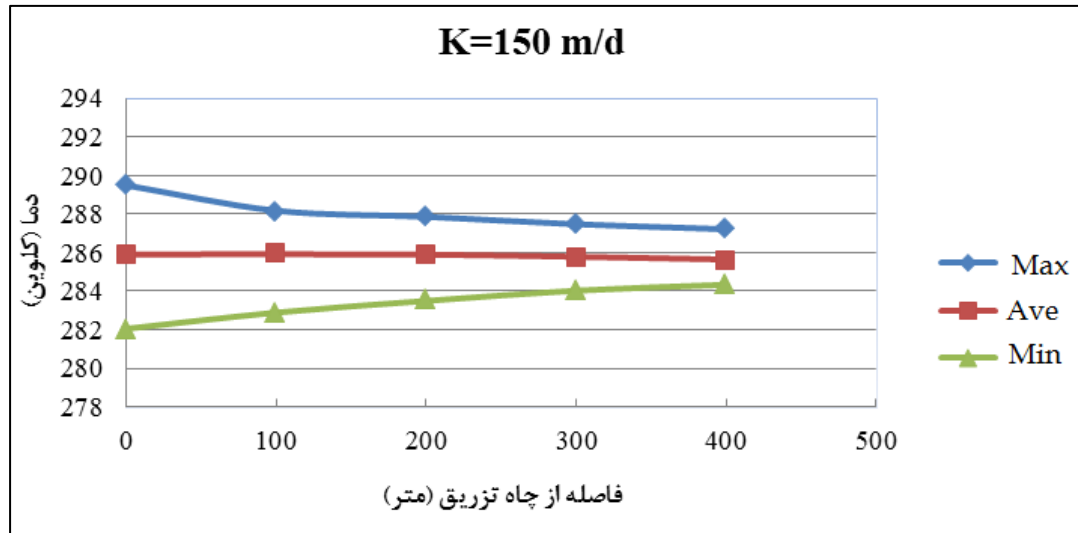
شکل ۴-۱۴. تغییرات میانگین دما در هدایت هیدرولیکی‌های متفاوت با فاصله از چاه تزریق

برای نشان دادن اثر هدایت هیدرولیکی بر گسترش حرارت در آبخوان در فواصل مختلف از چاه تزریق داده‌های دمایی شامل میانگین، حداکثر و حداقل دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی در جدول ۴-۳ ارائه شده است. مقادیر انتخابی هدایت هیدرولیکی کم‌تر و بیش‌تر از هدایت هیدرولیکی آبخوان فرضی (۱۲۹/۶ متر بر روز) انتخاب شدند تا تأثیر تغییرات هدایت

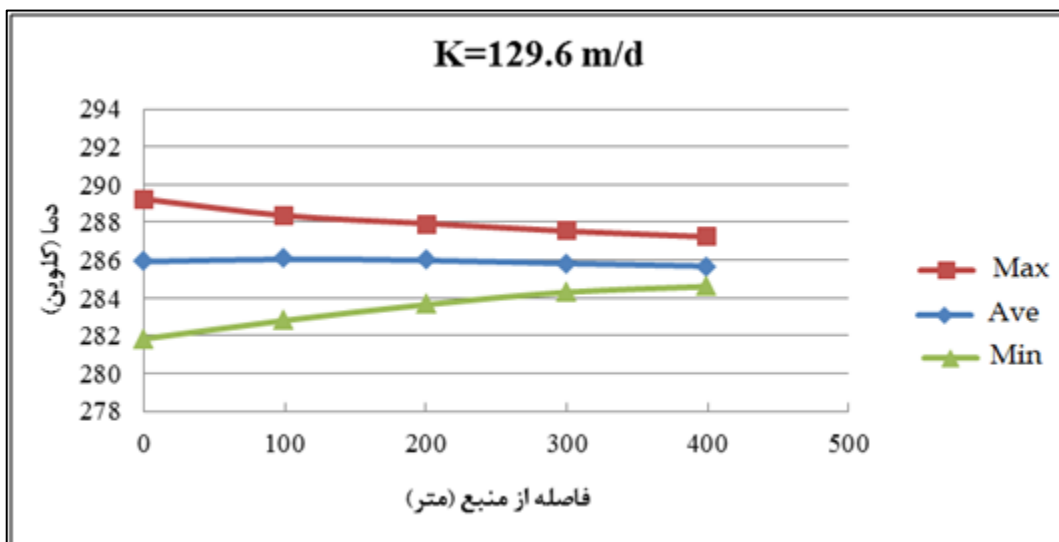
هیدرولیکی بر گسترش حرارت بررسی گردد. نمودارهای تغییرات دمایی در مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی در شکل‌های ۴-۱۵ تا ۴-۱۷ نشان داده شده است. به طوری که مشاهده می‌شود در کل با افزایش فاصله از چاه تزریق نوسانات دمایی کاهش زیادی نشان می‌دهند. بعلاوه محدوده تغییرات دما در مقادیر هدایت هیدرولیکی پایین برخلاف مقادیر هدایت هیدرولیکی بالا، بیش‌تر بوده و حتی مقدار میانگین دما نیز در فواصل مختلف در هدایت هیدرولیکی‌های پایین‌تر نوسان نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳. میانگین، بیشینه و کمینه دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی

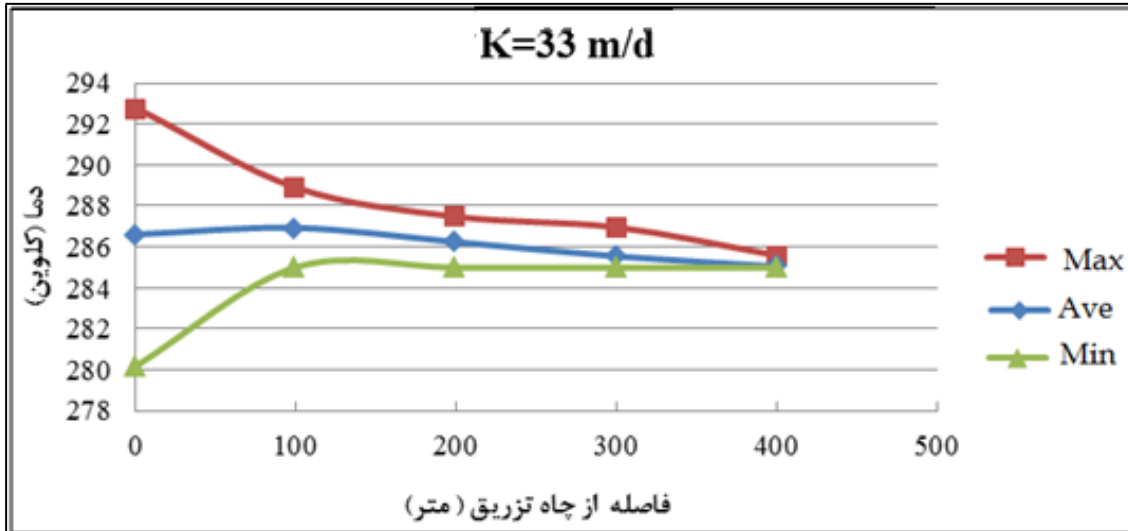
هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)	فاصله از چاه تزریق (متر)	حداکثر دما (کلوین)	حداقل دما (کلوین)	میانگین دما (کلوین)
۱۵۰	۰	۲۸۹/۴۹	۲۸۲/۰۵	۲۸۵/۹۱
	۱۰۰	۲۸۸/۱۸	۲۸۲/۸۹	۲۸۵/۹۲
	۲۰۰	۲۸۷/۸۶	۲۸۳/۵۰	۲۸۵/۹۰
	۳۰۰	۲۸۷/۴۷	۲۸۴/۰۳	۲۸۵/۷۸
	۴۰۰	۲۸۷/۲۲	۲۸۴/۳۳	۲۸۵/۶۴
۱۲۹/۶	۰	۲۸۹/۲۳	۲۸۱/۸۳	۲۸۵/۹۲
	۱۰۰	۲۸۸/۳۶	۲۸۳/۸۰	۲۸۶/۰۴
	۲۰۰	۲۸۷/۹۴	۲۸۳/۶۴	۲۸۵/۹۸
	۳۰۰	۲۸۷/۵۴	۲۸۴/۳	۲۸۵/۸۲
	۴۰۰	۲۸۷/۲۳	۲۸۴/۶	۲۸۵/۶۸
۳۳	۰	۲۹۲/۸	۲۸۰/۱۶	۲۸۶/۶۱
	۱۰۰	۲۸۸/۹	۲۸۵	۲۸۶/۹۴
	۲۰۰	۲۸۷/۴۸	۲۸۴/۹۹	۲۸۶/۲۴
	۳۰۰	۲۸۶/۹۶	۲۸۴/۹۹	۲۸۵/۵۴
	۴۰۰	۲۸۵/۵۹	۲۸۴/۹۹	۲۸۵/۰۵



شکل ۴-۱۵. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در هدایت هیدرولیکی ۱۵۰ متر بر روز در فواصل مختلف



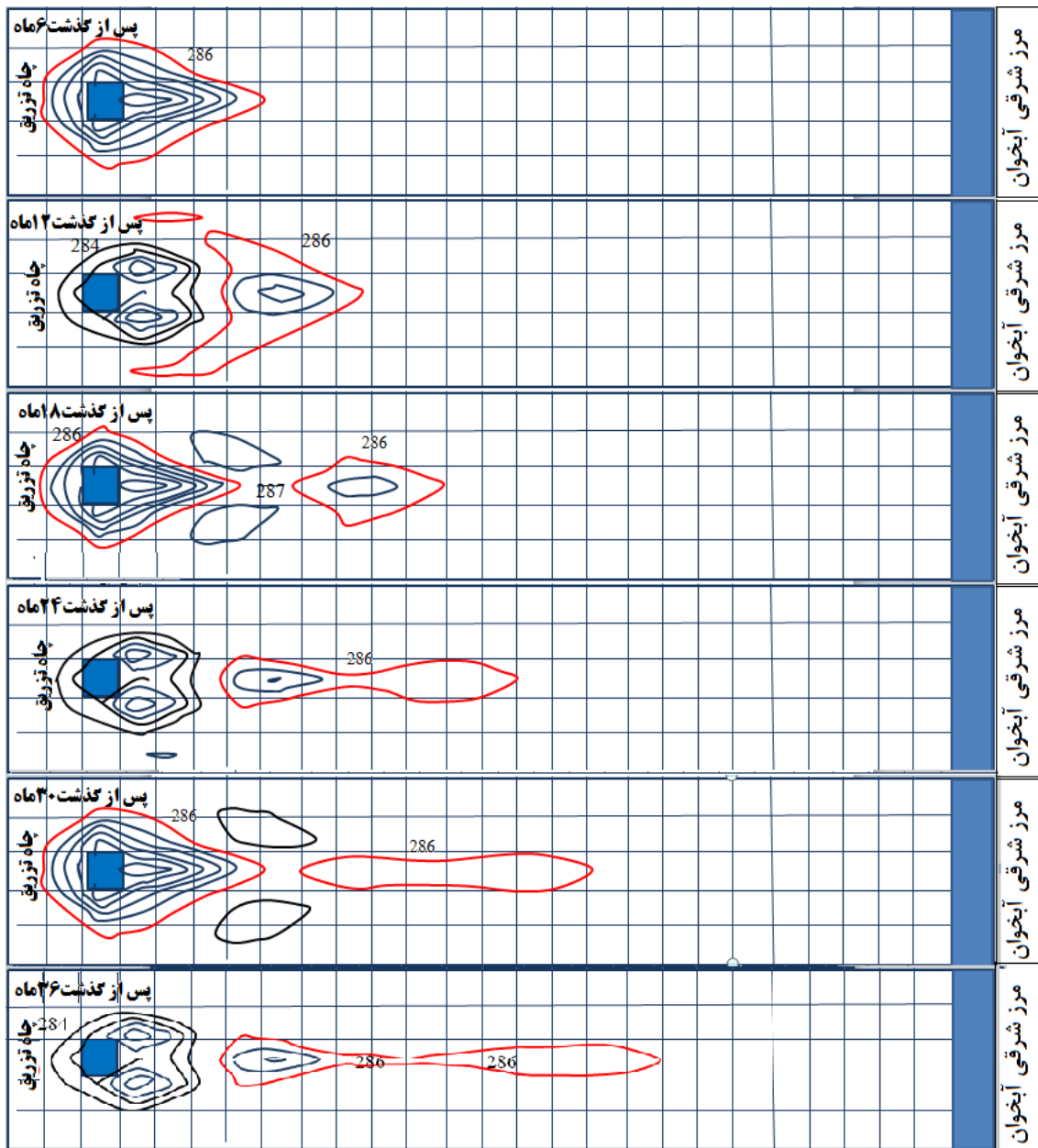
شکل ۴-۱۶. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در هدایت هیدرولیکی ۱۲۹/۶ متر بر روز (اولیه) در فواصل مختلف



شکل ۴-۱۷. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در هدایت هیدرولیکی ۳۳ متر بر روز در فواصل مختلف

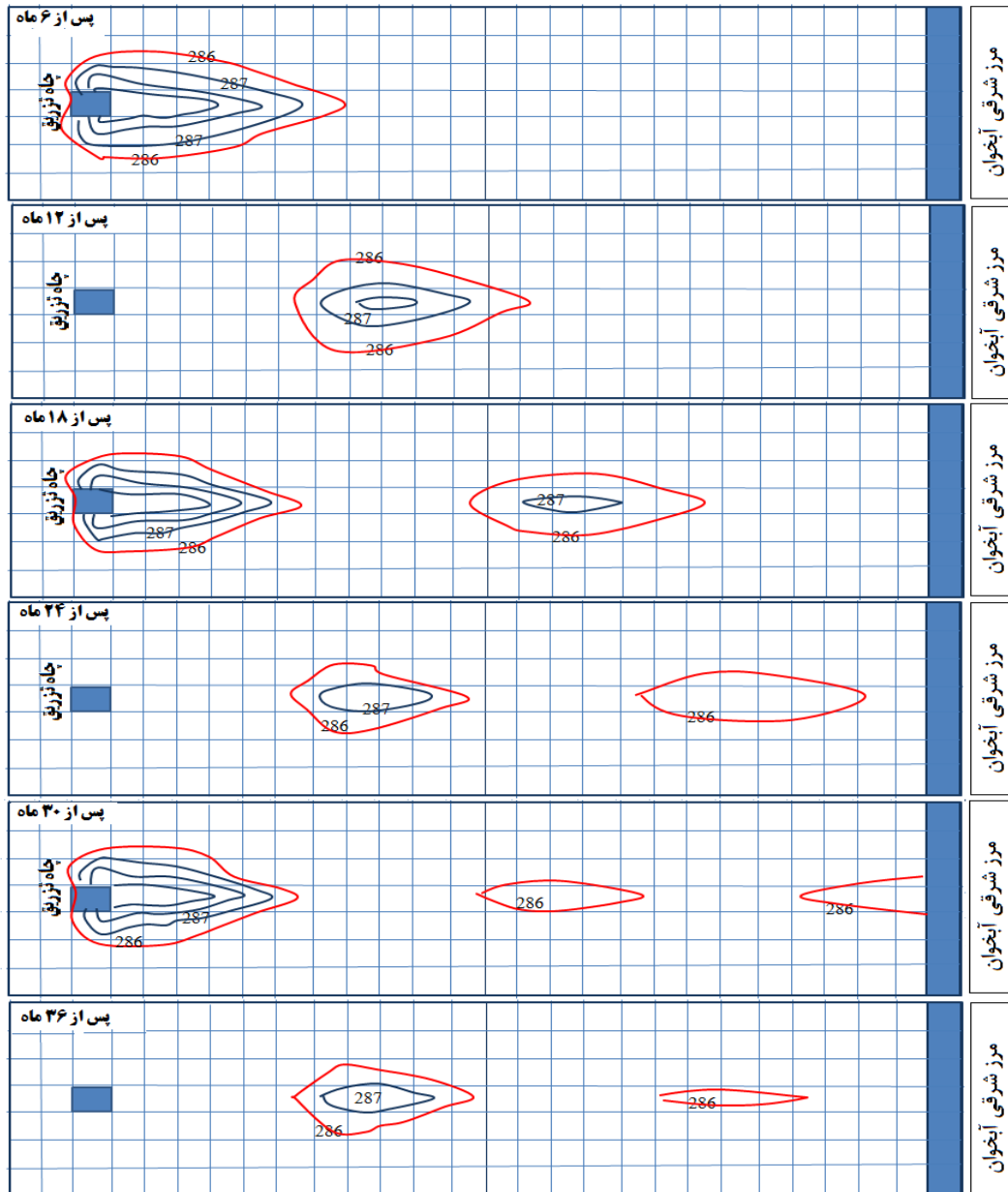
#### ب) بررسی اثر شیب هیدرولیکی

برای ارزیابی تأثیر پارامتر شیب هیدرولیکی بر گسترش هاله حرارتی مقادیر شیب هیدرولیکی نسبت به مقدار مفروض (۰/۰۰۵) تغییر داده شد و نتایج مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر بررسی شده شیب‌های هیدرولیکی شامل ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲۵ و ۰/۰۱ می‌باشد. در شکل‌های ۴-۱۸ تا ۴-۲۱ اثر تغییرات شیب هیدرولیکی بر توسعه هاله حرارتی نشان داده شده است.

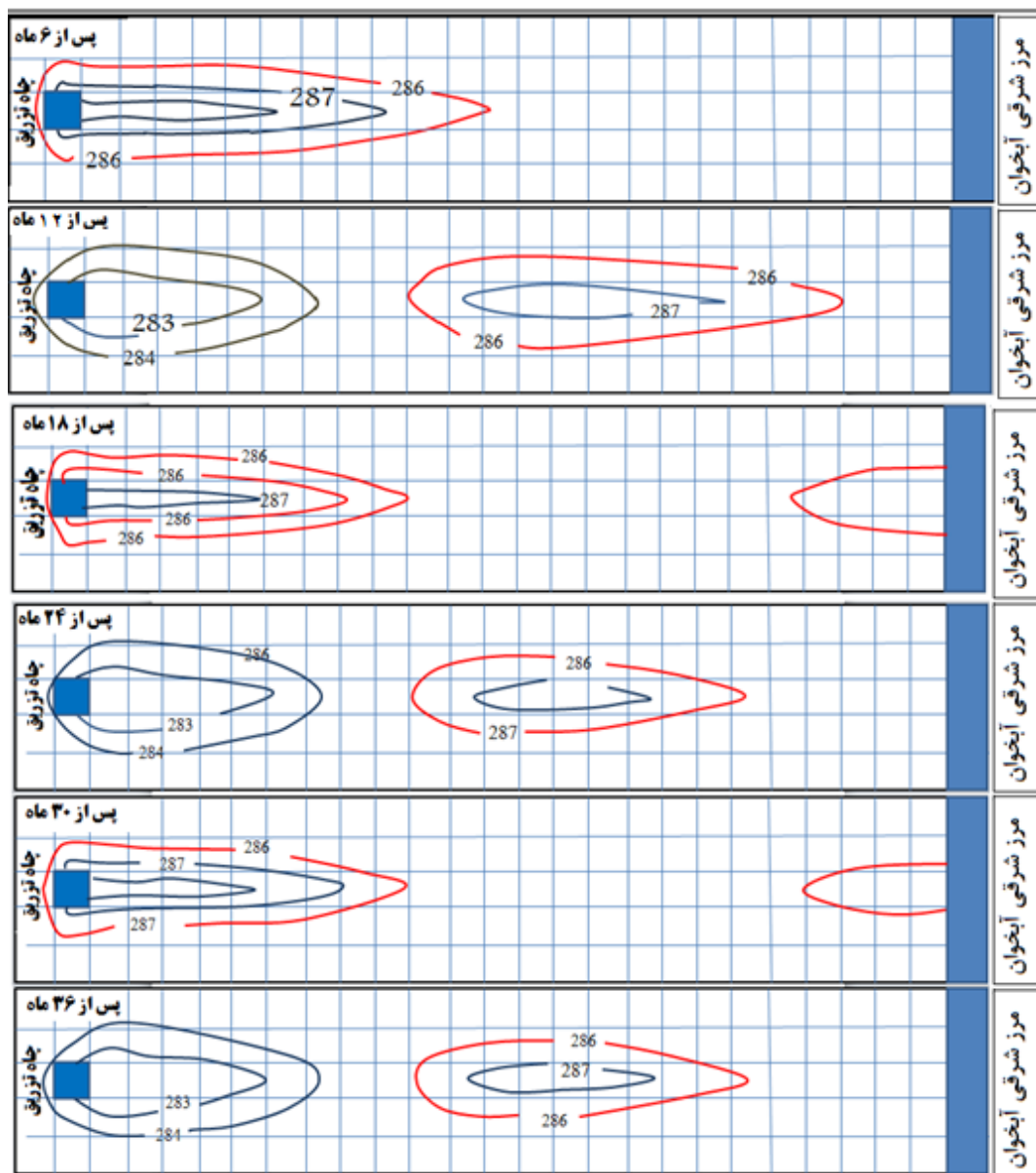


شکل ۴-۱۸. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۱

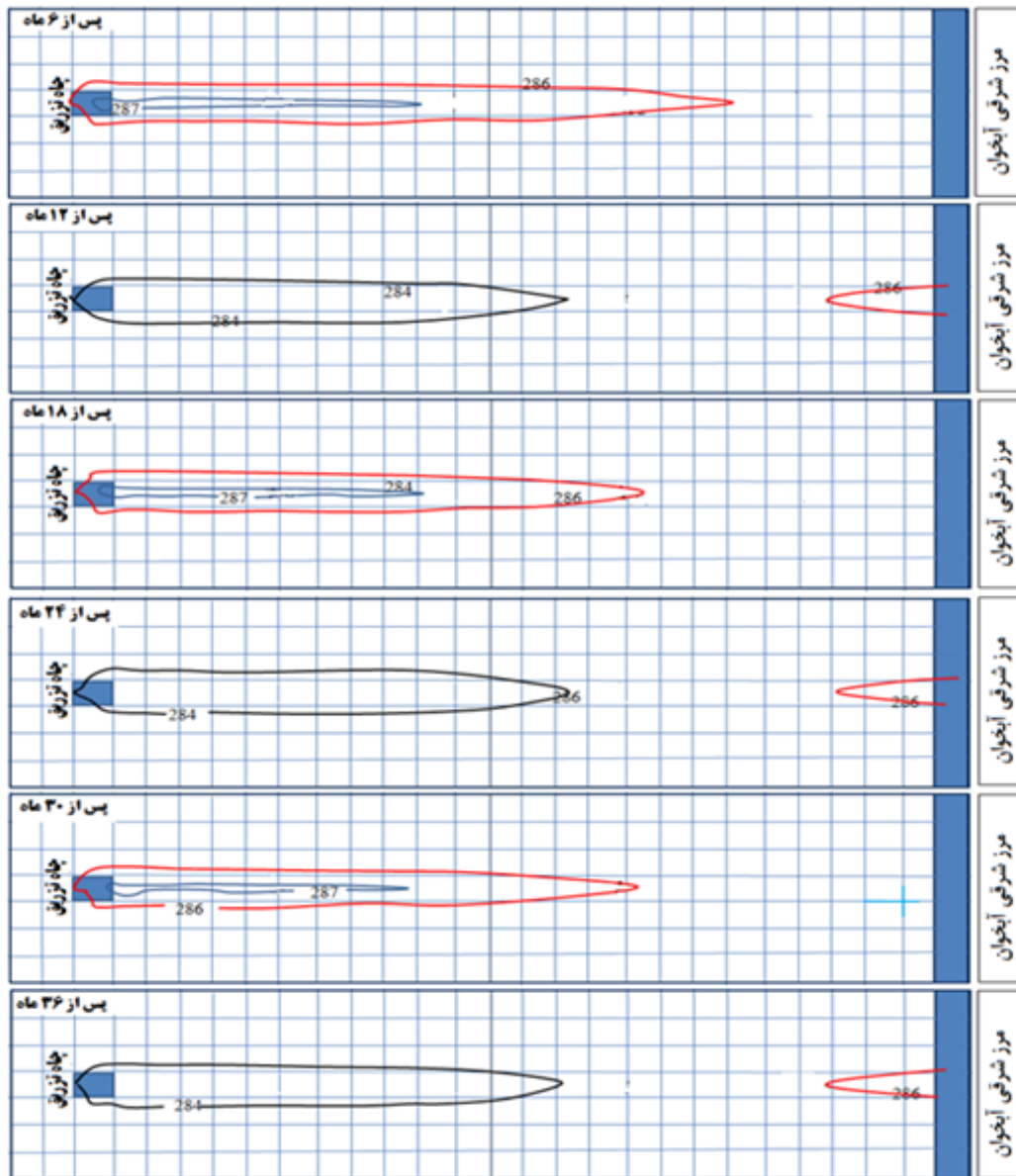




شکل ۴-۱۹. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۲۵.



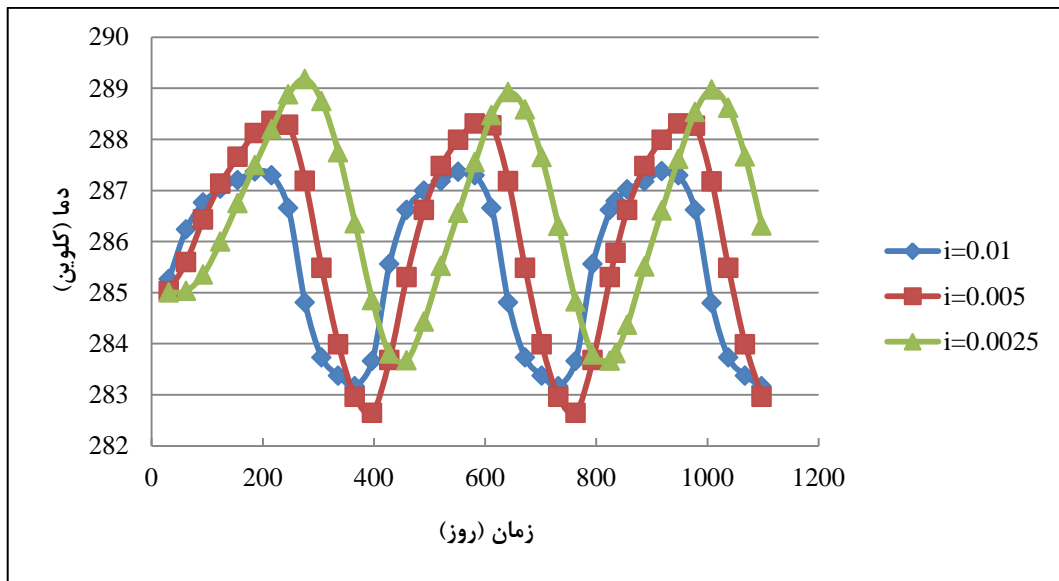
شکل ۴-۲۰. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۵



شکل ۴-۲۱. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی در شیب هیدرولیکی ۰/۰۱

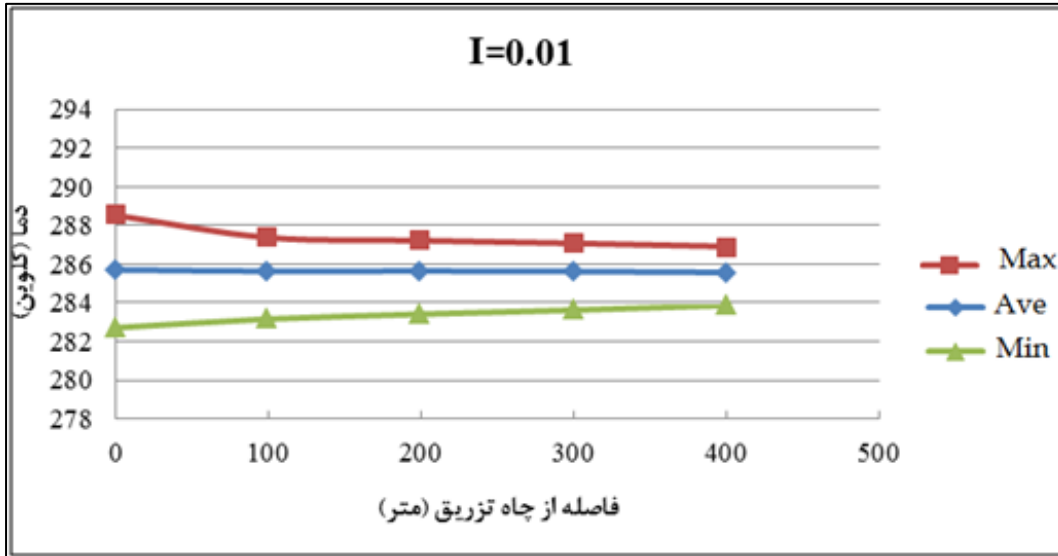
چنان که در شکل‌های ۴-۱۸ تا ۴-۲۱ می‌توان دید هر چه شیب هیدرولیکی بیشتر باشد، سرعت آب زیرزمینی بالاتر بوده و هاله حرارتی سریع‌تر در جهت جریان حرکت می‌کند. با افزایش شیب هیدرولیکی، هاله حرارتی گسترش طولی بیشتری خواهد یافت و در شیب‌های هیدرولیکی اندک کشیدگی هاله حرارتی کم‌تر شده و گسترش عرضی آن اطراف چاه تزریق بیشتر می‌شود. در شکل ۴-۲۲ تغییرات زمانی دما در مقادیر مختلف شیب هیدرولیکی در صد متری چاه تزریق نشان داده شده است. انتخاب فاصله صد متری از چاه تزریق به دلیل وجود بیش‌ترین نوسانات دمایی در این

فاصله می‌باشد.



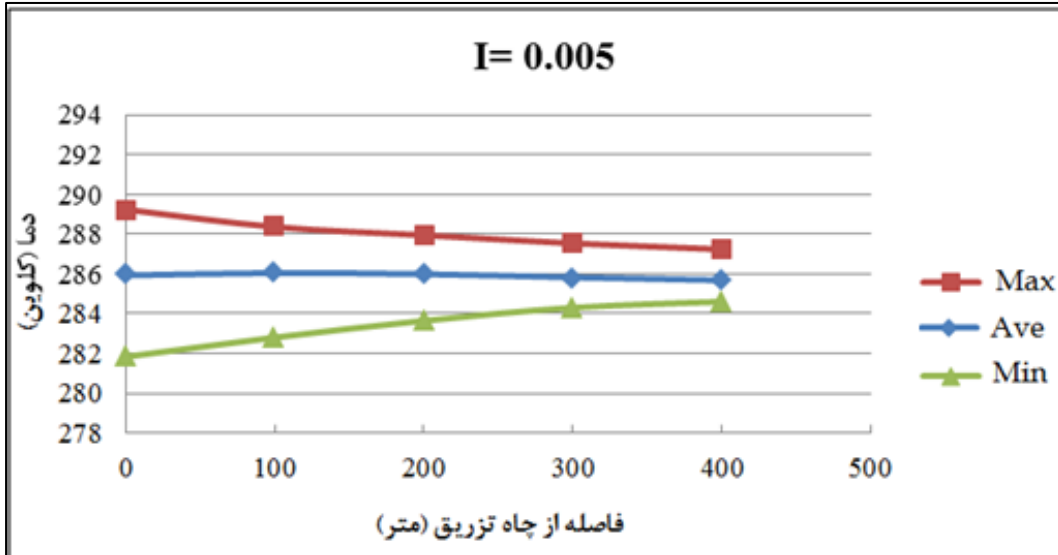
شکل ۴-۲۲. تغییرات زمانی دما در فاصله صد متری از چاه تزریق در شرایط مختلف شیب هیدرولیکی آبخوان

با توجه به شکل ۴-۲۲ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شیب هیدرولیکی آبخوان دمای ماکزیمم در فاصله ۱۰۰ متری کاهش یافته و زمان رسیدن به نقطه اوج دما نیز کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۴-۲۳ تا ۴-۲۵ تغییرات دمای میانگین، بیشینه و کمینه آبخوان در فواصل مختلف از چاه تزریق در شرایط متفاوت شیب هیدرولیکی آبخوان نشان داده شده است. بر این اساس در بالاترین شیب کمترین نوسانات دمایی و در کم‌ترین شیب بالاترین نوسانات دما صورت می‌گیرد. عمده تغییرات دما نیز مربوط به نزدیک‌ترین فاصله از چاه تزریق می‌باشد.



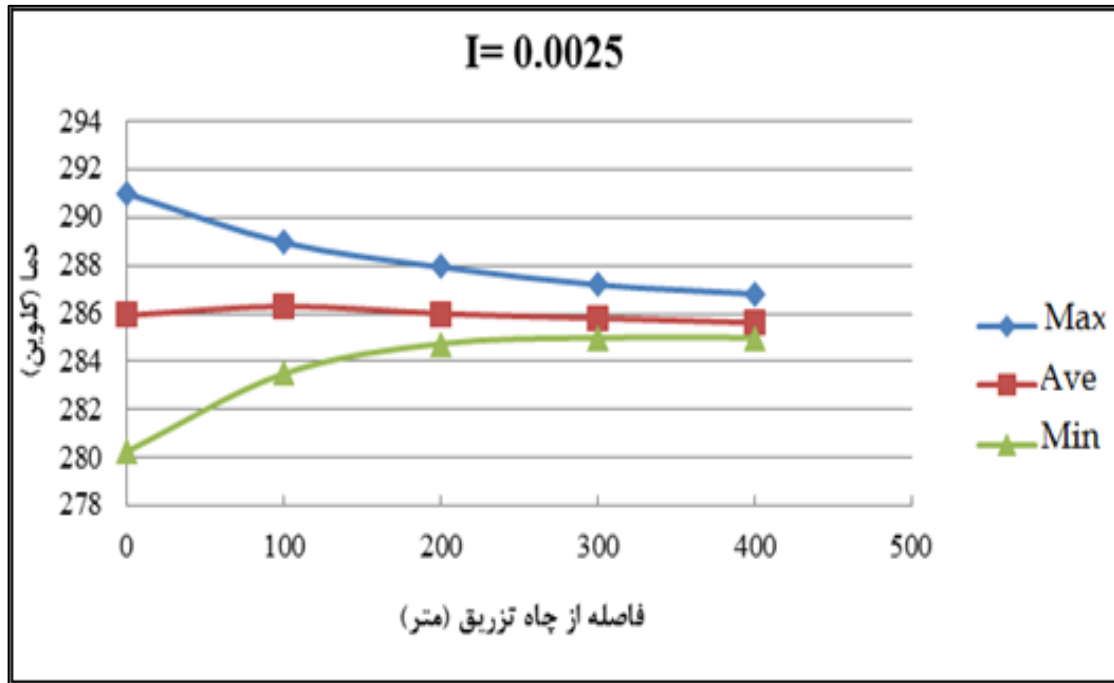
شکل ۴-۲۳. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در فواصل مختلف از چاه

تزریق در شرایط شیب هیدرولیکی ۰/۰۱



شکل ۴-۲۴. مقایسه میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در فواصل مختلف از چاه

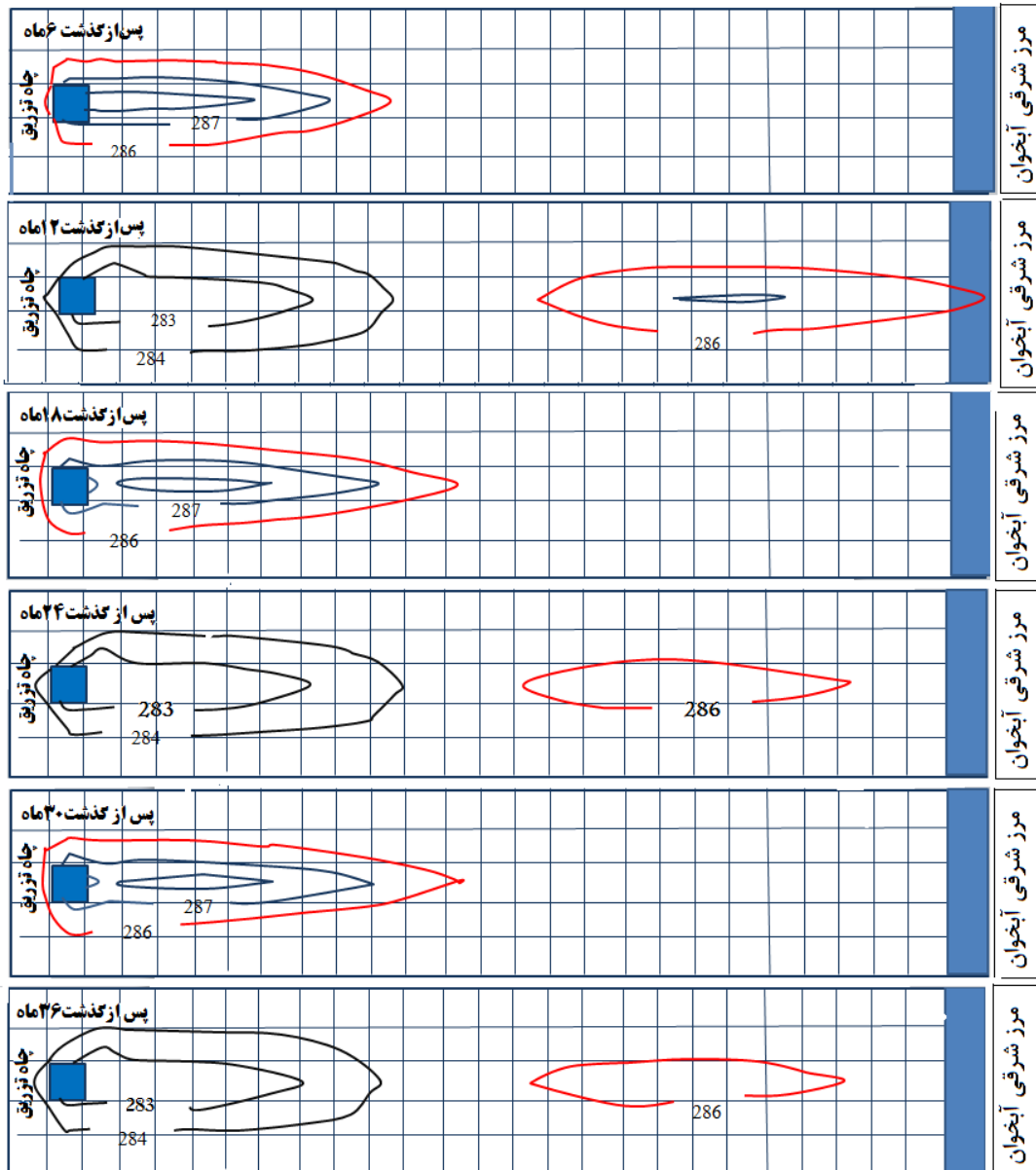
تزریق در شرایط شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۵



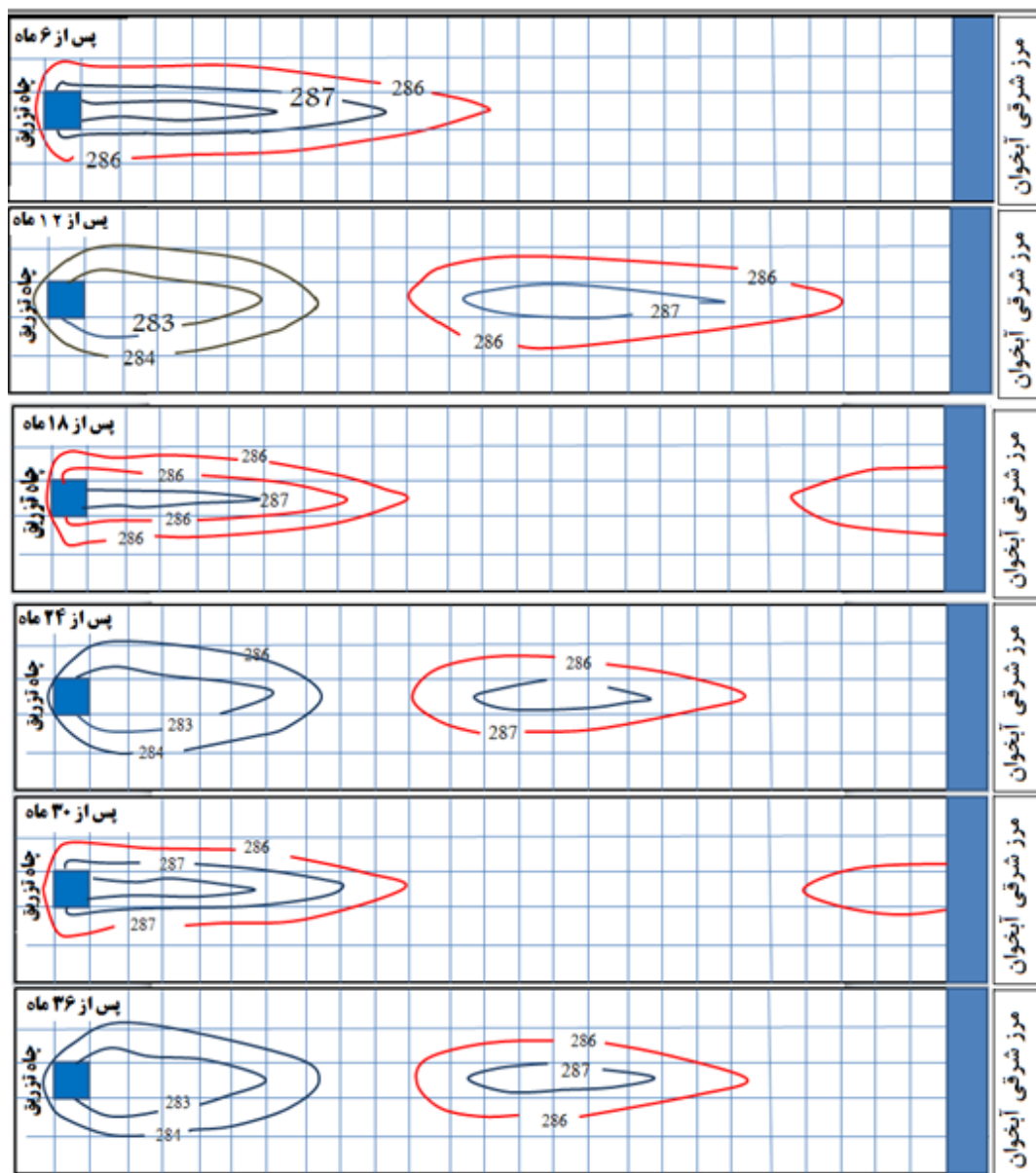
شکل ۴-۲۵. مقایسه میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در فواصل مختلف از چاه تزریق در شرایط شیب هیدرولیکی ۰/۰۰۲۵

### ج) بررسی اثر تخلخل

به منظور بررسی تأثیر تخلخل بر توسعه هاله حرارتی مقدار این پارامتر نیز نسبت به مقدار اولیه در آبخوان فرضی (۰/۲) تغییر داده شد. نتایج حاصل مدل‌سازی انتقال حرارت در توسعه هاله حرارتی برای تخلخل‌های ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۴ در شکل‌های ۴-۲۶ تا ۴-۲۹ نشان داده شده است.

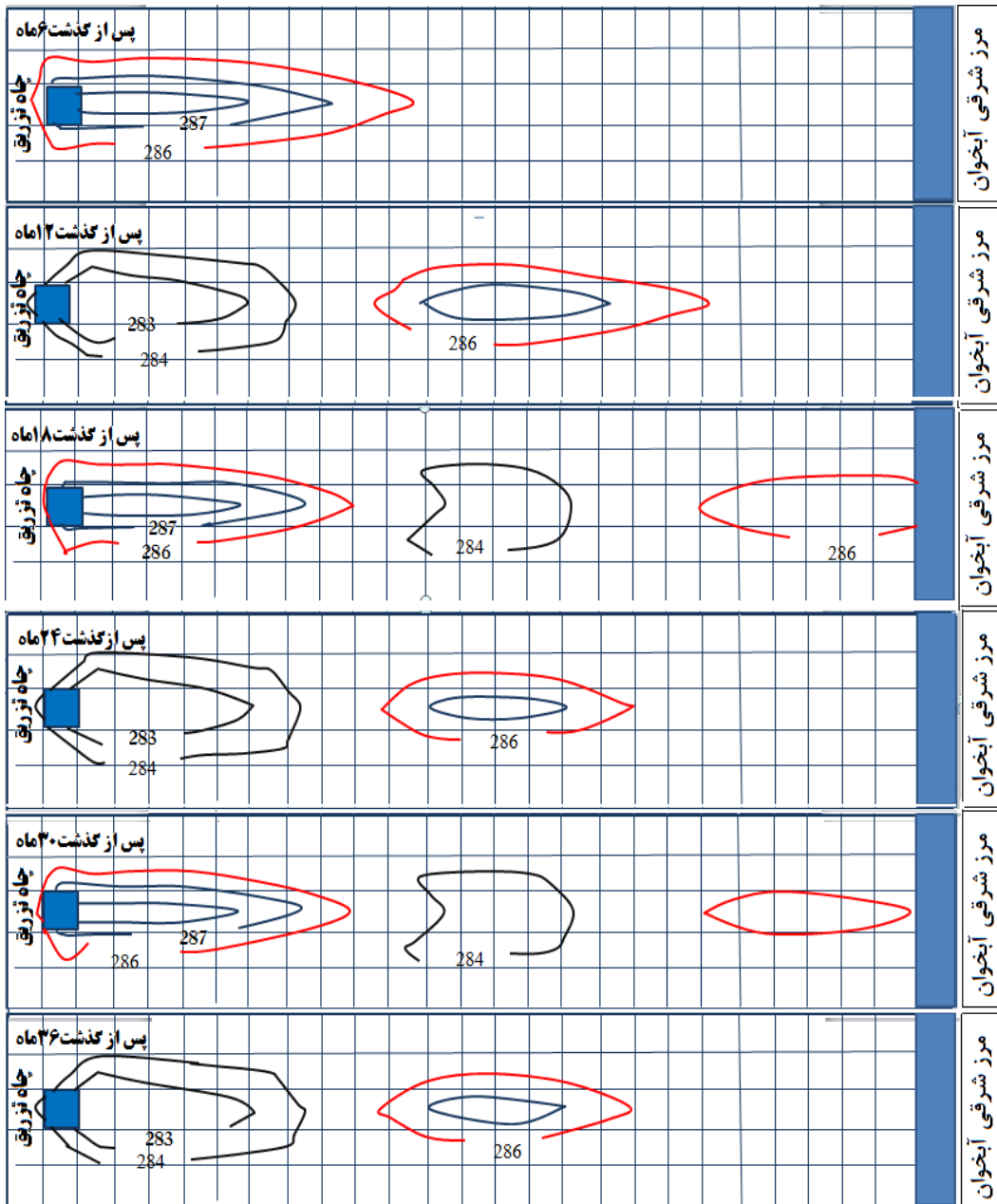


شکل ۴-۲۶. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در تخلخل ۰/۱

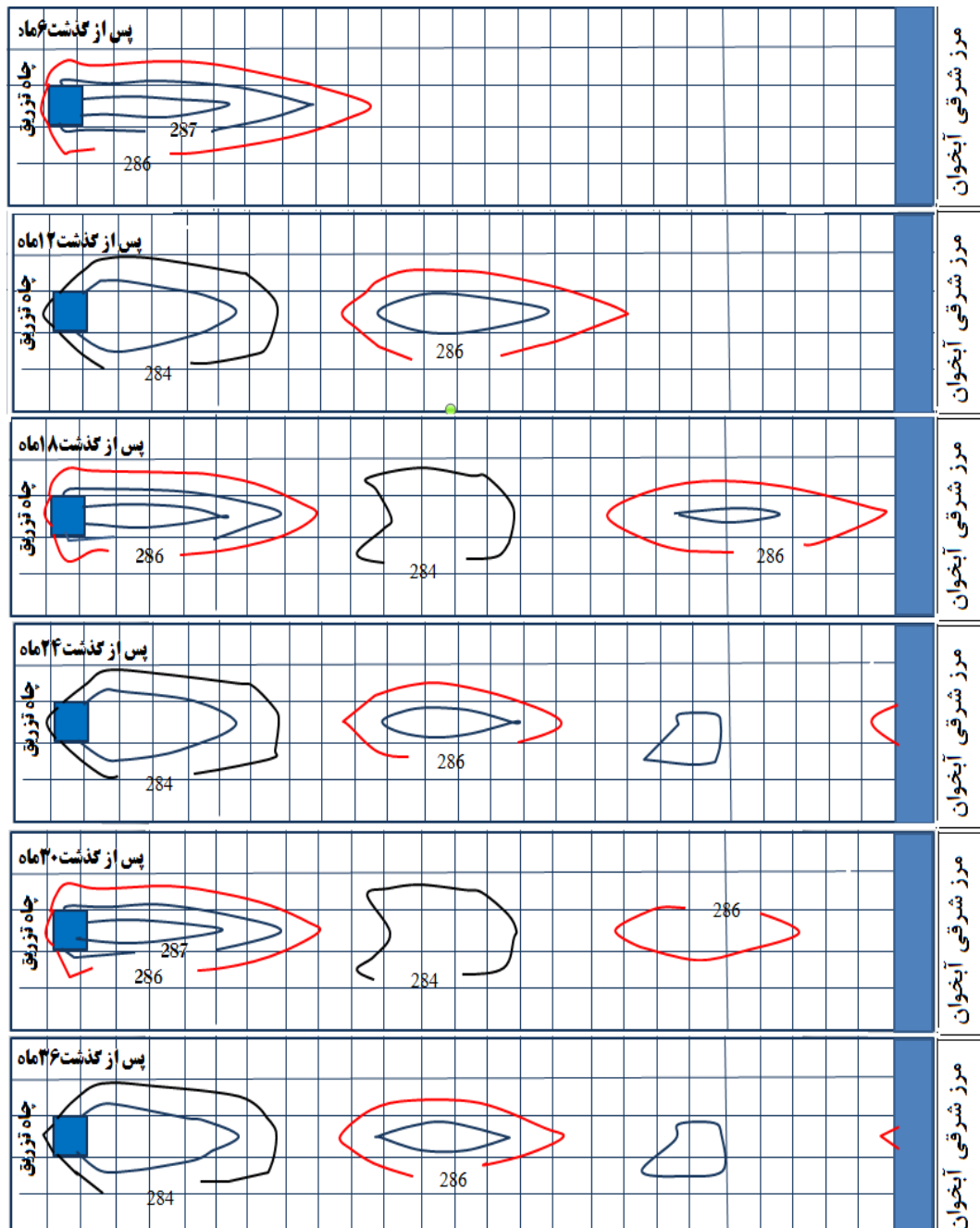


شکل ۴-۲۷. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در تخلخل ۰/۲



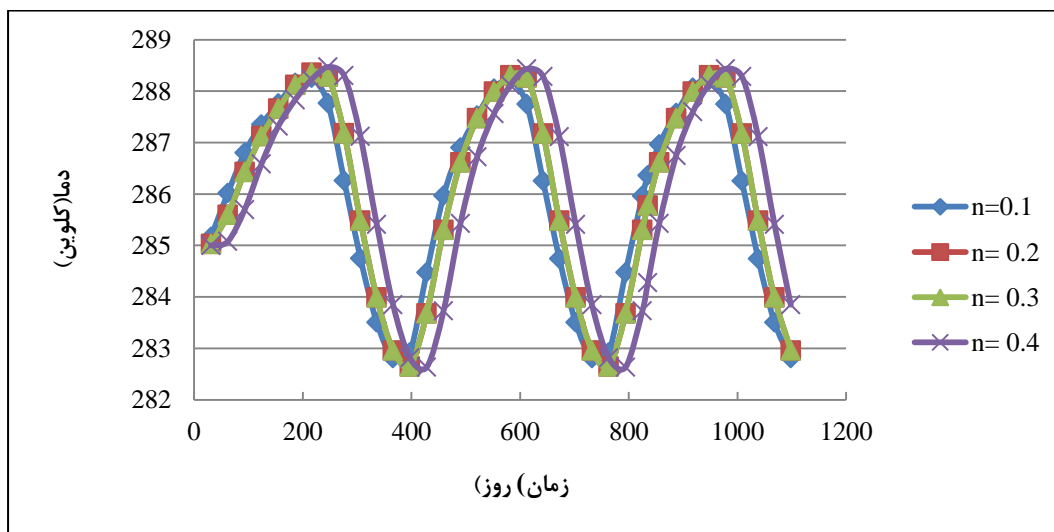


شکل ۴-۲۸. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در تخلخل ۰/۳



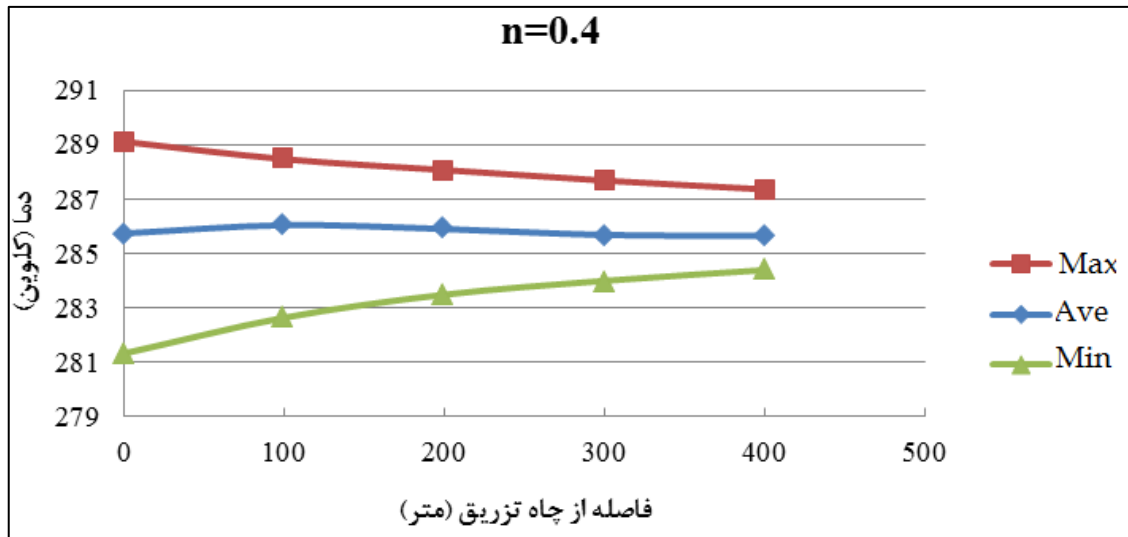
شکل ۴-۲۹. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در تخلخل ۰/۴

تخلخل سفره به بافت مواد تشکیل دهنده سفره بستگی دارد به نحوی که خاک‌های دانه‌ریز، تخلخل بیش‌تری دارند. چنان‌که در شکل‌های ۴-۲۶ تا ۴-۲۹ مشاهده می‌شود، با افزایش تخلخل (معرف بافت دانه‌ریزتر) هاله حرارتی وسعت کم‌تری پیدا خواهد کرد اما با کاهش تخلخل (معرف بافت دانه درشت‌تر) هاله حرارتی کمی سریع‌تر حرکت کرده و گسترش زیادتری می‌یابد. در شکل ۴-۳۰ تغییرات زمانی دما در مقادیر مختلف تخلخل مواد سفره ارائه شده است که تغییر محسوسی در روند نمودارها برای مقادیر تخلخل مورد بررسی دیده نمی‌شود. به عنوان نتیجه‌ای کلی می‌توان گفت که با افزایش تخلخل زمان رسیدن به نقاط حداقل و حداکثر دمایی در فاصله ۱۰۰ متری از چاه تزریق با تأخیر بیش‌تری همراه می‌باشد.

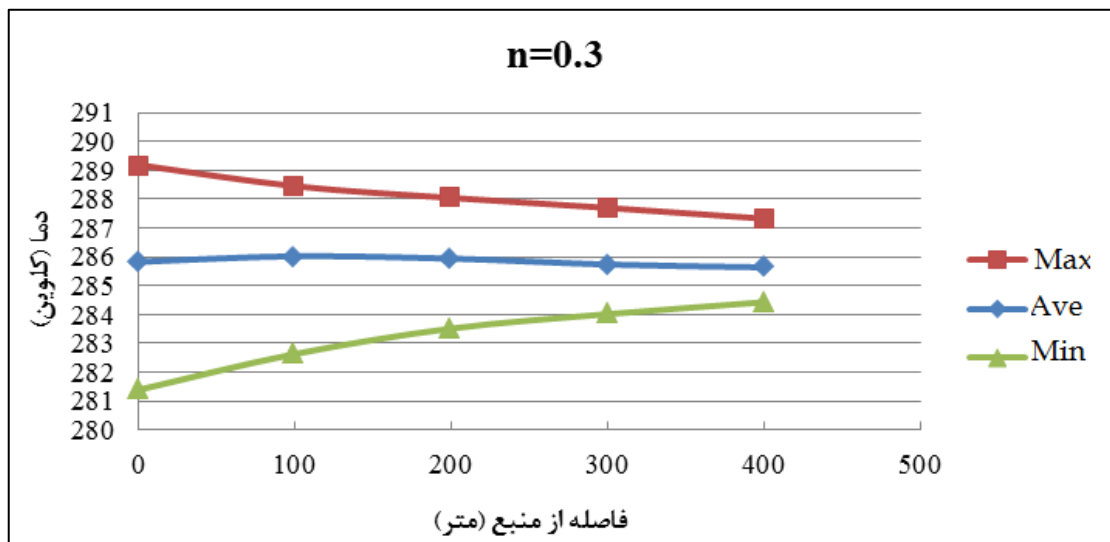


شکل ۴-۳۰. تغییرات زمانی دما در فاصله صد متری از چاه تزریق با مقادیر مختلف تخلخل

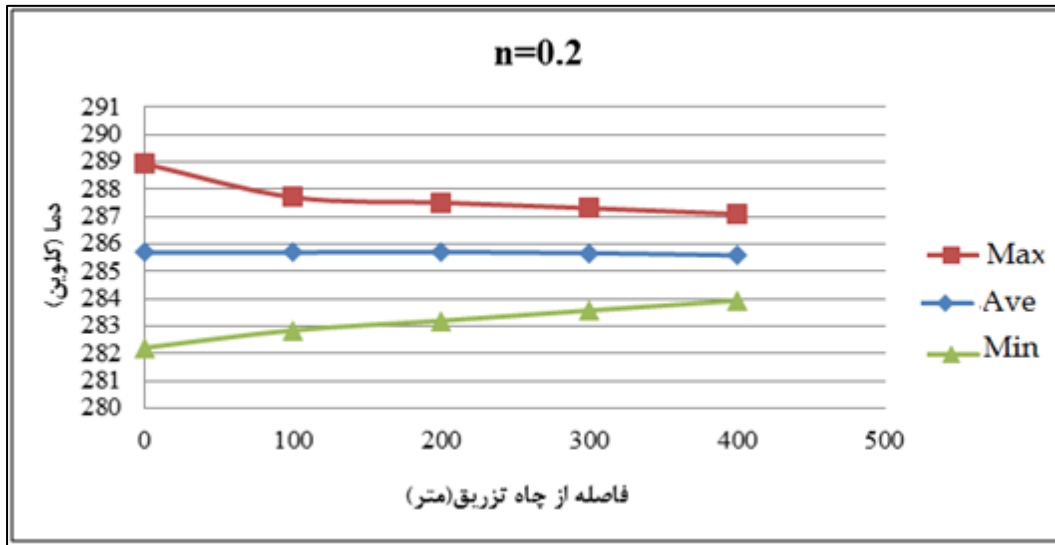
در شکل‌های ۴-۳۱ تا ۴-۳۴ تأثیر تخلخل در تغییرات دمایی در فواصل مختلف از چاه تزریق بررسی شده است. تشابه شکل‌ها بیانگر تأثیر اندک تخلخل مواد سفره در نوسانات دمایی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی می‌باشد.



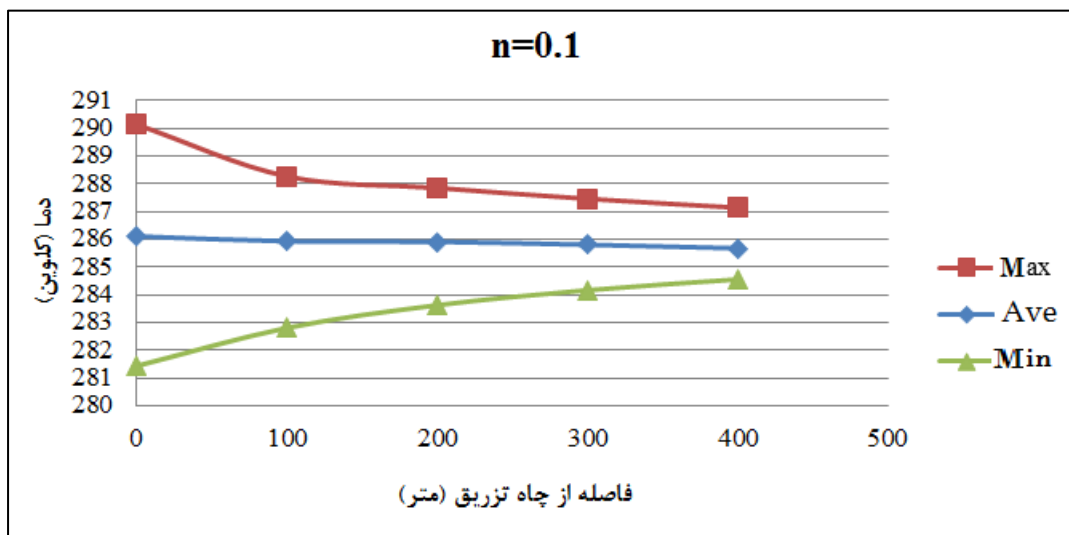
شکل ۴-۳۱. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در شرایط تخلخل ۰/۴ با فاصله از چاه تزریق



شکل ۴-۳۲. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در شرایط تخلخل ۰/۳ با فاصله از چاه تزریق



شکل ۴-۳۳. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در شرایط تخلخل ۰/۲ با فاصله از چاه تزریق.

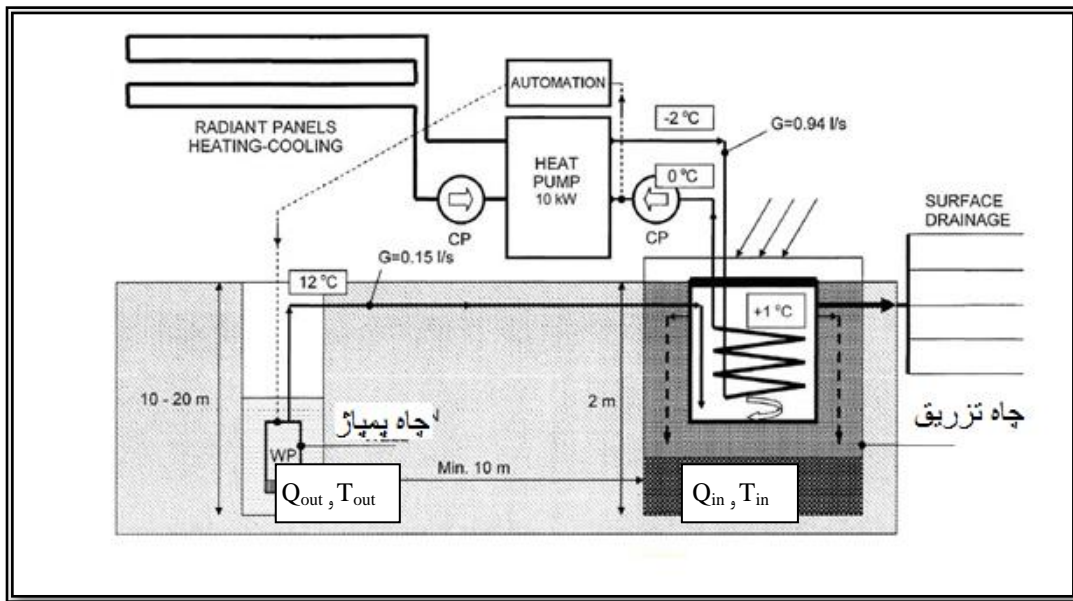


شکل ۴-۳۴. میانگین (Ave)، بیشینه (Max) و کمینه (Min) دما در شرایط تخلخل ۰/۱ با فاصله از چاه تزریق.

#### ۴-۵- تأثیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی

سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی شامل دو بخش (زیرسیستم) روزمینی و زیرزمینی می‌باشد. مطابق بررسی‌ها بخش روزمینی دربرگیرنده تأسیسات تبادل حرارتی و بخش زیرزمینی همان سفره آب زیرزمینی می‌باشد. ارتباط این دو بخش تنها از طریق جریان آب زیرزمینی و دمای آن برقرار می‌باشد.

(شکل ۴-۳۵). بنابراین شناخت عوامل هیدروژئولوژیکی مؤثر بر سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی، مستلزم شناخت عوامل مؤثر بر دبی آب زیرزمینی پمپاژ شده و دمای آن می‌باشد. با شناسایی عوامل مؤثر بر دبی و دمای آب زیرزمینی می‌توان نقش آن‌ها را بر سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی بررسی نمود.



شکل ۴-۳۵. طرحی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی نشان‌دهنده ارتباط پمپ حرارتی و سفره آب زیرزمینی. (اندیس‌های in و out به ترتیب نشان‌دهنده ورودی و خروجی از سفره آب زیرزمینی می‌باشند).

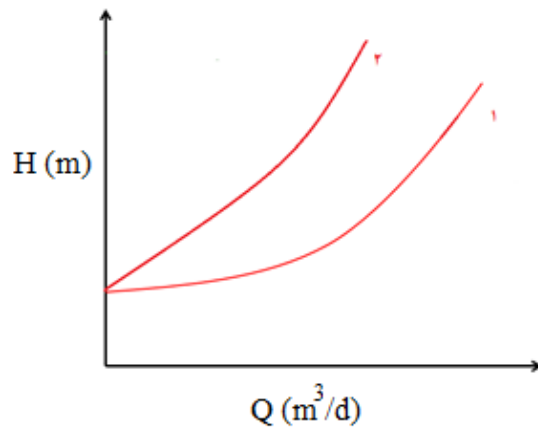
#### ۴-۵-۱- عوامل مؤثر بر دبی چاه پمپاژ در سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی

با توجه به بررسی‌های انجام شده مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دبی پمپاژ که می‌تواند بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی مؤثر باشد شامل موارد زیر می‌باشند:

##### ۱- نوسان سطح ایستابی

کاهش یا افزایش ارتفاع سطح آب زیرزمینی که در اثر تغییرات در تغذیه یا برداشت از آب زیرزمینی روی می‌دهد، بر دبی چاه پمپاژ تأثیرگذار می‌باشد. مطابق شکل ۴-۳۶ رابطه بین دبی (Q) و بار

هیدرولیکی کل سیستم (H) که اصطلاحاً منحنی بار هیدرولیکی سیستم (System Head Curve) نامیده شده و با علامت اختصاری SHC نمایش داده می‌شود به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۴-۳۶. منحنی بار هیدرولیکی سیستم (SHC)

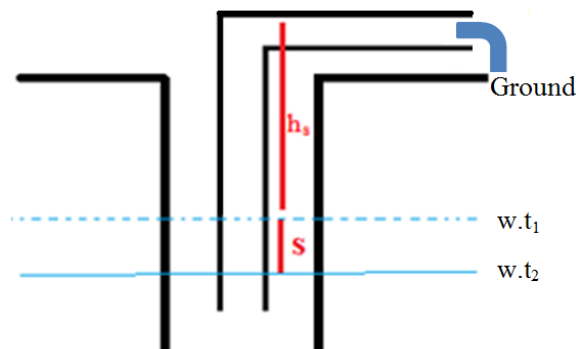
بار هیدرولیکی کل سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{Total Head of System} = h_s + s + h_f + \frac{v^2}{2g} \quad \text{معادله ۴-۳:}$$

که در این رابطه  $h_s$  اختلاف ارتفاع محل خروج آب از لوله تا سطح ایستابی اولیه (شکل ۴-۳۷)،  $s$  افت

سطح آب زیرزمینی،  $\frac{v^2}{2g}$  ارتفاع نظیر سرعت آب در لوله و  $T_{hl}$  کل افت بار (Total Head Loss) در

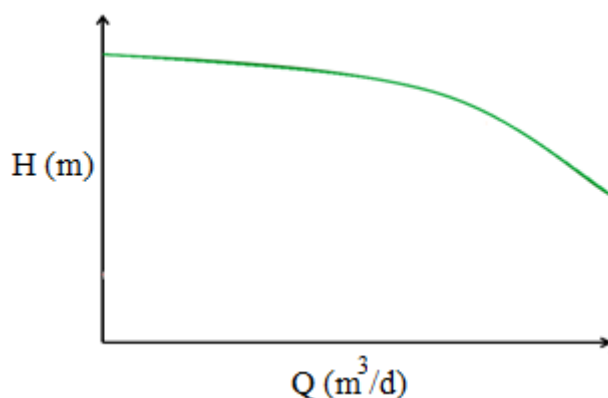
سیستم می‌باشد.



شکل ۴-۳۷: طرحی از افت کل در سفره آب زیرزمینی

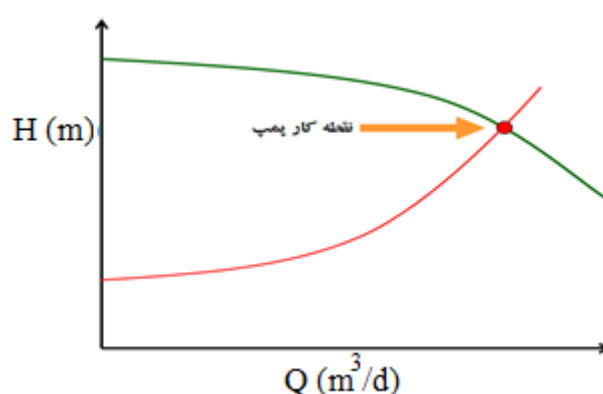
مطابق شکل با افزایش دبی میزان بار هیدرولیکی کل سیستم افزایش می‌یابد.

رابطه بین دبی و ارتفاع پمپاژ ( $h_{pump}$ ) توسط یک پمپ که اصطلاحاً منحنی مشخصه پمپ نامیده شده (Pump Characteristic Curve) و به اختصار PCC نشان داده می‌شود در شکل ۴-۳۸ ارائه شده است.



شکل ۴-۳۸. منحنی مشخصه پمپ (PCC)

مطابق این رابطه با افزایش دبی ارتفاع پمپاژ توسط پمپ کاهش می‌یابد. از انطباق منحنی‌های PCC و SHC بر روی هم با رعایت یکسان بودن مقیاس محورهای عمودی و افقی نقطه کار (Operating Point) تعیین می‌گردد که بر اساس آن می‌توان پمپ مناسب برای پمپاژ را انتخاب نمود. در شکل ۴-۳۹ نقطه کار پمپ نشان داده شده است.

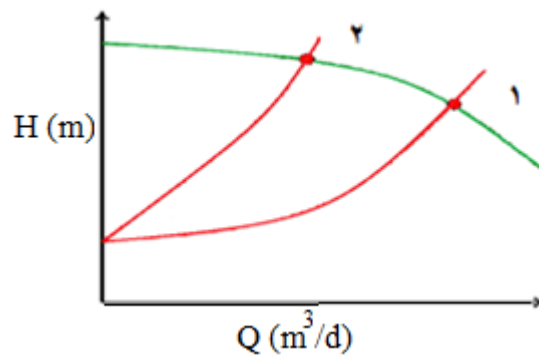


شکل ۴-۳۹. نقطه کار پمپ (محل تلاقی منحنی‌های PCC و SHC)

در صورتی که به دلایلی مقدار بار هیدرولیکی کل سیستم تغییر یابد مثلاً در اثر برداشت بیش از حد از



آب زیرزمینی سطح ایستابی افت نماید، منحنی SHC در وضعیت جدید به شکل منحنی شماره ۲ در شکل ۴-۳۶ درمی‌آید. از انطباق منحنی PCC بر روی منحنی SHC جدید نقطه کار به موقعیت جدید (نقطه ۲ در شکل ۴-۴۰) تغییر می‌یابد. این وضعیت نشان‌دهنده کاهش دبی پمپاژ توسط چاه می‌باشد. با این توضیح تغییر در ارتفاع سطح ایستابی که باعث تغییر در دبی پمپاژ می‌شود می‌تواند بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی تأثیر داشته باشد.



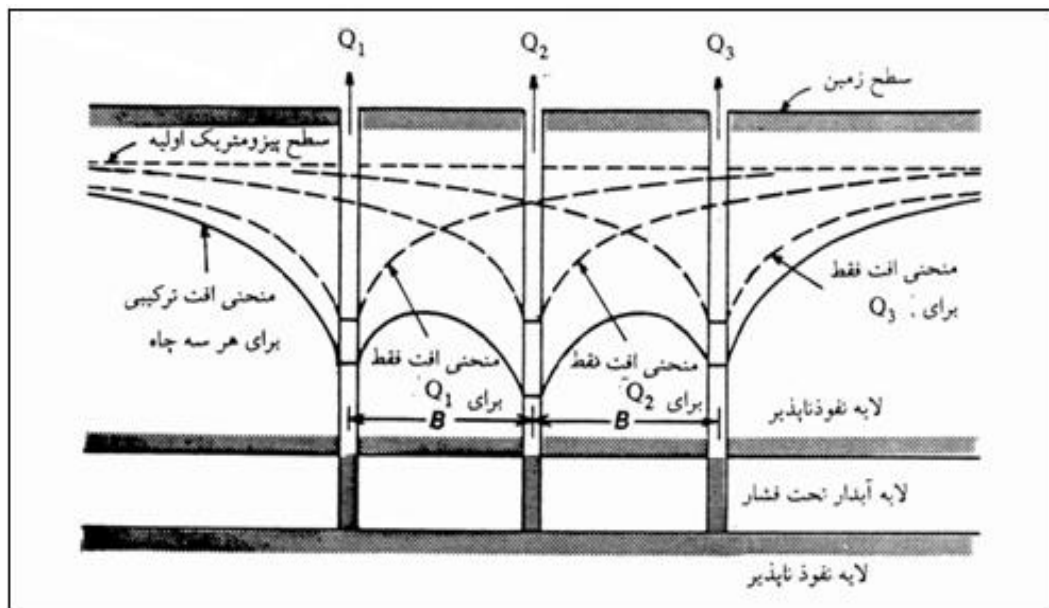
شکل ۴-۴۰. ایجاد نقاط کار پمپ از انطباق منحنی‌های PCC و SHC

## ۲- انسداد (Clogging) در چاه پمپاژ

حرکت مواد دانه‌ریز از سفره به سمت چاه پمپاژ و کاهش اندازه حفرات در مجاورت دیواره چاه، رشد میکروارگانیسم‌ها در فضای اسکرین چاه، رسوب کانی‌های مختلف نظیر کلسیت یا اکسیدهای منگنز و آهن در اثر تغییر در شرایط کیفی آب، زنگ‌زدگی اسکرین و ... از جمله مواردی است که سبب انسداد یا گرفتگی چاه پمپاژ شده و ضمن کاهش حرکت آب از سفره آب زیرزمینی به سمت چاه پمپاژ سبب افت بیش‌تر در چاه پمپاژ می‌گردد. افزایش افت در چاه به نوبه خود باعث کاهش دبی پمپاژ شده و بنابراین بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی مؤثر می‌باشد. بدیهی است استفاده از لوله‌های جداری نامرغوب، اسکرین‌بندی نامناسب و عدم توسعه چاه در زمان حفاری از جمله مواردی است که می‌تواند سبب تشدید در کاهش دبی پمپاژ شود و عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار دهد.

### ۳- تأثیر چاه‌های مجاور

از جمله عوامل مؤثر در کاهش دبی یک چاه، تأثیر چاه‌های مجاور می‌باشد. مطابق اصول اولیه در هیدرولیک چاه‌ها، پمپاژ از یک چاه سبب ایجاد مخروط افت در آن می‌گردد. در صورتی که دو چاه در فاصله نزدیک به هم قرار داشته باشند (سیستم چند چاهی) تداخل مخروط افت آن‌ها سبب افزایش افت در چاه پمپاژ مورد نظر می‌گردد (شکل ۴-۴۱)



شکل ۴-۴۱. منحنی‌های افت سطح ایستابی در سیستم چند چاهی

با این توضیح حفر چاه جدید در مجاور چاه‌های پمپاژ سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی ضمن تأثیر در دبی برداشت از چاه سبب تغییر در عملکرد پمپ حرارتی آب زیرزمینی می‌شود.

### ۴- لایه‌بندی و تغییر در خصوصیات سفره آب زیرزمینی

یکی از اثرات افت سطح ایستابی در سفره آب زیرزمینی که می‌تواند منجر به کاهش دبی چاه پمپاژ گردد، تغییر در خصوصیات سفره آب زیرزمینی می‌باشد. به این مفهوم که کاهش سطح ایستابی در

سفره آب زیرزمینی سبب کاهش ضخامت آبخوان شده و در شرایطی که تغییراتی به لحاظ لیتولوژیکی یا بافت مواد سفره وجود داشته باشد، کاهش ارتفاع سطح ایستابی می‌تواند سبب در معرض قرار گرفتن لایه‌ها با آبدهی کم‌تر شده، بنابراین سبب کاهش دبی پمپاژ گردد که به نوبه خود تغییرات در عملکرد پمپ حرارتی را به دنبال دارد.

### ۴-۵-۲- عوامل مؤثر بر دمای آب زیرزمینی پمپاژ شده، ورودی به سیستم پمپ حرارتی

#### آب زیرزمینی

مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دمای آب پمپاژ شده که به عنوان ورودی سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی است شامل موارد زیر می‌باشد:

#### ۱- عمق سطح ایستابی

کاهش عمق سطح ایستابی و نزدیک شدن زیاد آن به سطح زمین سبب تأثیرپذیری بیش‌تر آن از نوسانات دمای محیط شده که این موضوع استفاده از آب زیرزمینی به عنوان منبع حرارتی ثابت در سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی را با مشکل مواجه می‌نماید.

#### ۲- موقعیت چاه تزریق نسبت به چاه پمپاژ

همان‌طور که نتایج مدل‌سازی توسعه هاله حرارتی در این تحقیق نشان داد، هاله حرارتی در جهت جریان آب زیرزمینی به سمت پایین‌دست حرکت می‌نماید. چنان‌که موقعیت مکانی چاه‌های تزریق و پمپاژ به‌گونه‌ای باشد که چاه پمپاژ در پایین‌دست جریان (پایین‌دست چاه تزریق) قرار گیرد، توسعه هاله حرارتی و حرکت آن نهایتاً سبب می‌شود دمای آب زیرزمینی در محل چاه پمپاژ تحت تأثیر قرار گیرد. در این شرایط تأثیر گرادیان (شیب) هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی و تخلخل در تغییرات دمایی آب زیرزمینی در زمان‌های مختلف در محل چاه پمپاژ قابل پیش‌بینی می‌باشد. ذکر این نکته

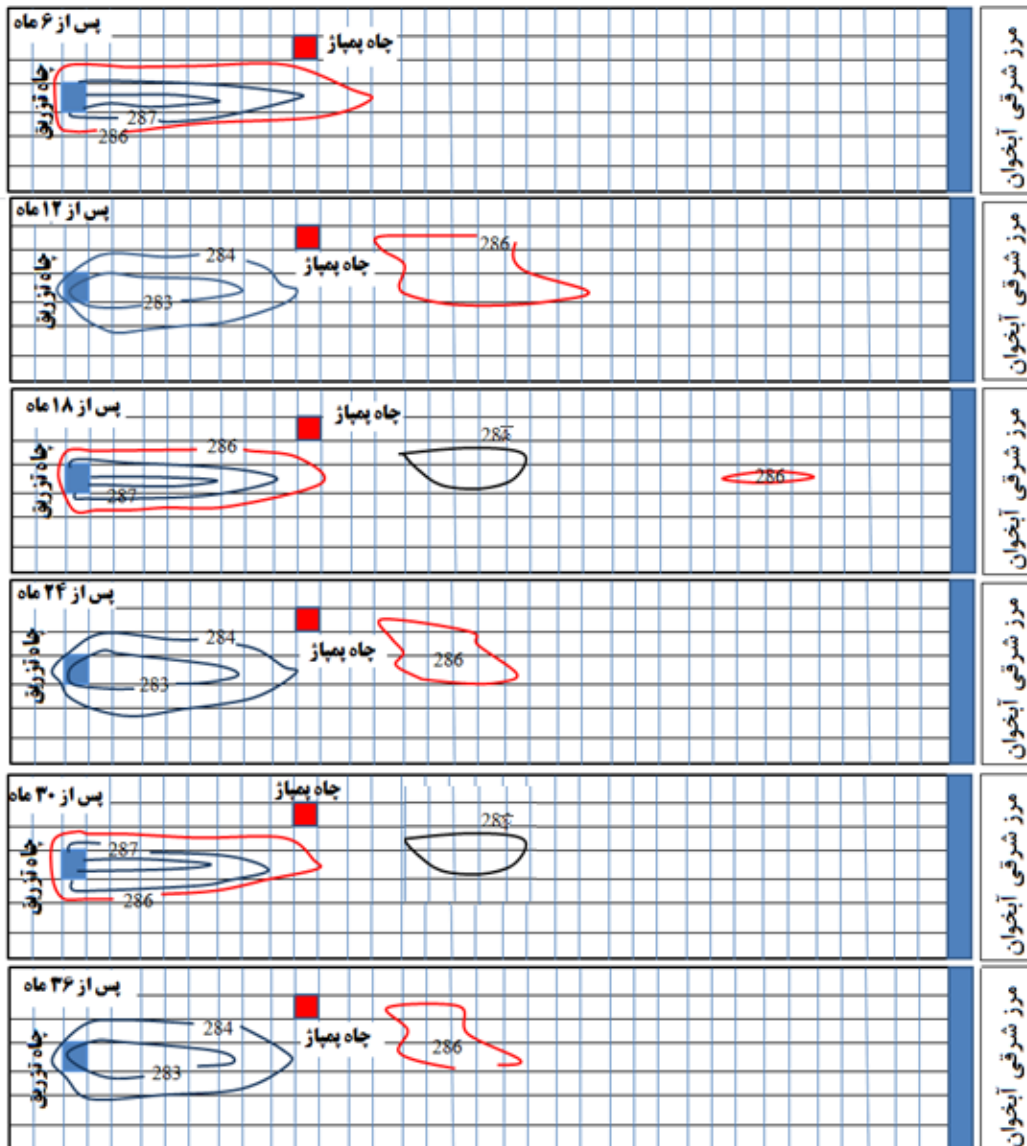
ضروری است که برای بررسی تأثیر این پارامترها در عملکرد سیستم پمپ حرارتی آگاهی از دمای آب پمپاژ شده مورد نیاز می‌باشد. به عبارت دیگر مدل‌های مورد استفاده باید قابلیت ارائه دمای آب پمپاژ شده را داشته باشند.

به منظور بررسی تأثیر موقعیت چاه تزریق در دمای آب زیرزمینی در محل پمپاژ، موقعیت چاه‌های پمپاژ و تزریق در آبخوان فرضی جابجا شده و توسعه هاله حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۴-۴۲ مشاهده می‌شود پس از گذشت ۱۵۰ روز هاله حرارتی به محل چاه پمپاژ رسیده که این موضوع می‌تواند سبب کاهش در عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی گردد. افزایش گرادیان هیدرولیکی و هدایت هیدرولیکی سبب می‌شود زمان تداخل هاله حرارتی با چاه پمپاژ کاهش یابد. برای مثال افزایش هدایت هیدرولیکی در آبخوان فرضی از ۱۲۹/۶ به ۲۰۰ متر بر روز (شکل ۴-۴۳) هاله حرارتی پس از ۱۲۰ روز به چاه پمپاژ می‌رسد.

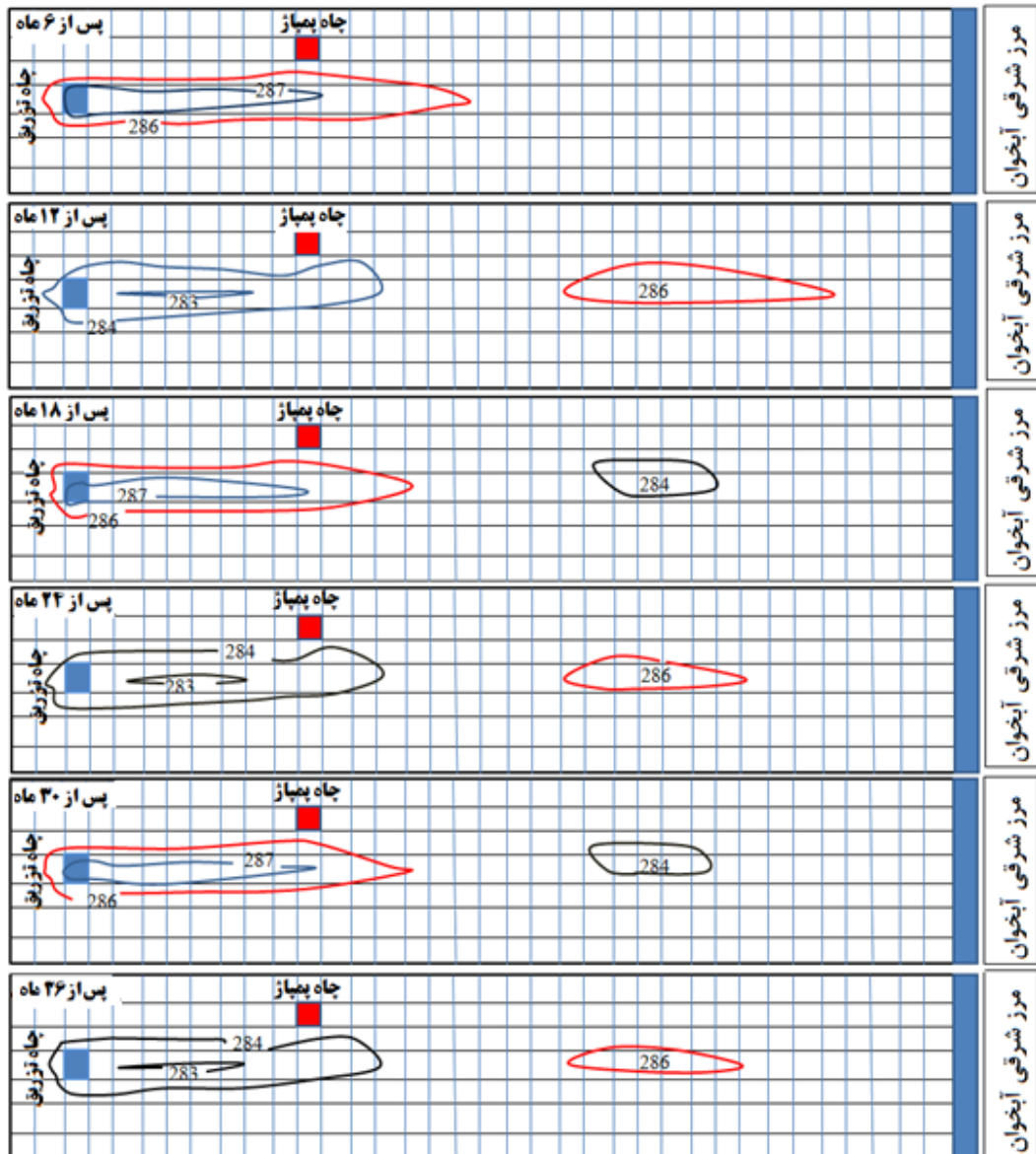
در این شرایط در صورتی که تخمینی از دمای آب پمپاژ شده موجود باشند، بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای هیدروژئولوژیکی مذکور در عملکرد پمپ حرارتی قابل بررسی می‌باشد.

### ۳- جهت جریان آب زیرزمینی

تغییر در جهت جریان آب زیرزمینی به هر دلیلی مثلاً تغذیه یا برداشت از آن می‌تواند بر حرکت و توسعه هاله حرارتی تأثیر داشته و بنابراین در شرایطی که سبب تداخل هاله حرارتی با محل چاه پمپاژ گردد در عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی مؤثر باشد.



شکل ۴-۴۲. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در شرایطی که چاه پمپاژ در پایین دست جریان قرار گرفته باشد.



شکل ۴-۴۳. گسترش هاله حرارتی ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در شرایطی که چاه

پمپاژ در پایین دست جریان قرار گرفته باشد و هدایت هیدرولیکی ۲۰۰ متر بر روز باشد.

سفره آب زیرزمینی (به عنوان بخش زیرسطحی) و پمپ حرارتی (به عنوان بخش روزمینی) رابطه‌ای دوسویه دارند. چنان‌که اگر یکی از آن دو تغییر یابد دیگری نیز متأثر خواهد شد. پمپ حرارتی آب زیرزمینی به علت استفاده از دمای ثابت آب زیرزمینی و تبادل حرارت با آن و برگرداندن آب گردش نموده در سیستم به آبخوان، بر سفره آب زیرزمینی اثر می‌گذارد چرا که حرارت نیز نوعی آلاینده سفره آب زیرزمینی محسوب می‌شود. با تحت تأثیر قرار گرفتن دمای آبخوان، دمای آب پمپاژ شده به

سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی نیز ممکن است تحت تأثیر قرار گیرد که این موضوع بر عملکرد پمپ حرارتی مؤثر می‌باشد. بنابراین در این تحقیق به بررسی هر دو جنبه موضوع پرداخته شد. به این صورت که اثر پمپ حرارتی آب زیرزمینی بر آبخوان با مدل‌سازی انتقال حرارت و بررسی هاله‌های حرارتی تشکیل‌شده مدنظر قرار گرفت. در بخش دوم که در حقیقت اثر پارامترهای هیدروژئولوژیکی بر سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی است، باید توجه کرد که تنها عوامل ربط‌دهنده دو سیستم روزمینی و زیرزمینی پمپ حرارتی آب زیرزمینی دبی و دمای آب پمپاژ شده به عنوان ورودی‌ها به سیستم پمپ حرارتی می‌باشد. با این توضیحات می‌توان نتیجه گرفت که اگر شرایطی در آبخوان حاکم باشد که دبی و دمای آب پمپاژ شده به سیستم پمپ حرارتی را تحت تأثیر قرار دهد، موجب تغییر در عملکرد این سیستم می‌شود. برای مثال، مدل‌سازی انتقال حرارت نشان داد که تغییر در هدایت هیدرولیکی بر گسترش هاله حرارتی نقش زیادی دارد. حال اگر شرایطی به وجود بیاید که هاله حرارتی به چاه پمپاژ برسد مسلماً به خاطر تحت تأثیر قرار دادن دمای آب زیرزمینی در محل چاه پمپاژ، بر عملکرد پمپ حرارتی نیز نقش خواهد داشت. تغییر دمای ورودی به سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی باعث تغییر در دبی مورد نیاز برای رساندن دمای ساختمان به دمای آسایش شده که این موضوع نیز به نوبه خود می‌تواند عملکرد سیستم را تحت تأثیر قرار دهد.





## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۵-۱- مقدمه

در این تحقیق انتقال حرارت در آب‌های زیرزمینی در سفره‌ای فرضی با روش مدل‌سازی بررسی شده است. برای این منظور ابتدا مدل جریان آب زیرزمینی ساخته شده و پس از آن به عنوان ورودی برای ساخت مدل انتقال حرارت از آن استفاده شد. به دلیل نداشتن اطلاعات واقعی در خصوص سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در ایران، از اطلاعات ارائه شده در مقالات مرتبط استفاده شده است. پس از ساخت مدل جریان و انتقال حرارت، شکل و نحوه گسترش هاله حرارتی در آبخوان فرضی بررسی شد. همچنین نقش پارامترهای هیدروژئولوژیکی در عملکرد پمپ حرارتی آب زیرزمینی از طریق بررسی ارتباط بخش‌های مختلف سیستم بررسی گردید. در ادامه هم‌چنین نتایج تحقیق ارائه می‌گردد.

### ۵-۲- نتایج

- (۱) در این تحقیق برنامه‌ی رایانه‌ای 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 به کار گرفته شد. نتایج بیانگر توانایی این مدل در شبیه‌سازی انتقال حرارت می‌باشد.
- (۲) مطابق پیش‌بینی‌های انجام‌شده در مورد دمای آب پمپاژ شده و تزریق شده به سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی، فصل‌های بهار و تابستان دوره‌های سرمایش بوده و بنابراین دمای آب تزریق‌شده به آبخوان گرم‌تر از دمای زمینه می‌باشد.

- (۳) این موضوع سبب گسترش هاله حرارتی گرم در آبخوان در این زمان‌ها می‌شود. فصل‌های پاییز و زمستان دوره‌های گرمایش بوده و آب تزریق‌شده به آبخوان سردتر از دمای زمینه می‌باشد. بنابراین هاله سرد در این زمان‌ها در آبخوان توسعه می‌یابد.
- (۴) نتایج نشان می‌دهد در فواصل نزدیک به چاه تزریق نوسانات دما حداکثر بوده و در فواصل دورتر به حداقل مقدار خود رسیده است.
- (۵) بررسی نقش پارامترهای هیدروژئولوژیکی در گسترش هاله حرارتی نشان می‌دهد در آبخوان‌های با بافت خاک درشت‌دانه که هدایت هیدرولیکی بالاتری دارند، سرعت حرکت هاله به سمت پایین‌دست بیش‌تر بوده و در جهت جریان کشیده می‌شود. در آبخوان‌های با بافت خاک دانه‌ریزتر که هدایت هیدرولیکی کم‌تری دارند، سرعت حرکت هاله حرارتی کم‌تر بوده و بنابراین گسترش طولی و عرضی آن تقریباً یکسان می‌شود. در فواصل مختلف میانگین دما با افزایش هدایت هیدرولیکی کم شده و با کاهش آن زیاد می‌شود. محدوده تغییرات دما ناشی از سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی در مقادیر هدایت هیدرولیکی پایین‌تر سفره آب زیرزمینی بیش‌تر می‌باشد.
- (۶) هر چه شیب هیدرولیکی آبخوان بیش‌تر باشد، سرعت جریان آب زیرزمینی بالاتر بوده و بنابراین هاله حرارتی در جهت جریان گسترش طولی بیش‌تری می‌یابد. در شیب‌های هیدرولیکی اندک به علت سرعت کم‌تر آب زیرزمینی کشیدگی هاله حرارتی نیز کم‌تر شده و گسترش عرضی آن اطراف چاه تزریق بیش‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش شیب هیدرولیکی آبخوان دمای بیشینه در فاصله صد متری کاهش یافته و زمان رسیدن به نقطه اوج دما نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین در بالاترین شیب هیدرولیکی آبخوان کم‌ترین نوسانات دمایی و برعکس در کم‌ترین شیب، بیش‌ترین نوسانات دما صورت می‌گیرد.
- (۷) با افزایش تخلخل (معرف بافت دانه‌ریزتر) هاله حرارتی وسعت کم‌تری داشته اما با کاهش تخلخل (معرف بافت دانه‌درشت‌تر) هاله حرارتی کمی سریع‌تر حرکت کرده و گسترش زیادتری می‌یابد.

۸) به علت این که تنها پارامترهای ارتباط دهنده‌ای دو بخش روزمینی و زیرزمینی سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی دبی جریان آب و دمای آن می‌باشد، لذا هر عامل مؤثر بر دبی و دمای آب زیرزمینی، بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی تأثیرگذار می‌باشد. عوامل مؤثر بر دبی چاه پمپاژ در سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی شامل نوسان سطح ایستابی، انسداد در چاه پمپاژ، تأثیر چاه‌های مجاور و لایه‌بندی و تغییر در خصوصیات سفره آب زیرزمینی معرفی شده است. هم‌چنین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دمای آب زیرزمینی که به عنوان ورودی به سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی قلمداد می‌شود، شامل عمق سطح ایستابی، موقعیت چاه تزریق نسبت به چاه پمپاژ و جهت جریان می‌باشد. تغییر این عوامل می‌تواند بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی مؤثر باشد.

### ۵-۳- پیشنهادها

۱) با توجه به نتایج این تحقیق موقعیت چاه‌های پمپاژ و تزریق و چیدمان آن‌ها اثر مهمی بر دمای آب پمپاژ شده ورودی به سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی دارد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود چاه تزریق در پایین دست چاه پمپاژ قرار گیرد تا تأثیر هاله حرارتی بر آن به کم‌ترین میزان خود برسد.

۳) استفاده از مدل‌های تخصصی شبیه‌سازی انتقال حرارت مانند FEFLOW با توجه به کاستی‌های MT3DMS در شبیه‌سازی انتقال حرارت در سفره آب زیرزمینی توصیه می‌گردد.

۴) نتایج تحقیق بیانگر تأثیر دبی و دمای آب پمپاژ شده بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی می‌باشد. بنابراین کنترل مقادیر دبی و دمای آب جهت افزایش عملکرد پمپ حرارتی توصیه می‌گردد.

۵) با توجه به نقش سیستم پمپ حرارتی در مصرف انرژی، استفاده از این سیستم برای کاهش مصرف انرژی در ایران توصیه می‌شود.

۶) با توجه به نقش پارامترهای هیدروژئولوژیکی بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی آب زیرزمینی مطالعه و شناخت هیدروژئولوژی محلی قبل از نصب سیستم‌های پمپ حرارتی آب زیرزمینی توصیه می‌گردد.



## فهرست منابع

ولی‌زاده م. (۱۳۹۲)، "مدل‌سازی انتقال آلاینده نیترات در آب‌های زیرزمینی دشت شاهرود"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

سایت سازمان انرژی‌های نو. <http://www.suna.org.ir>

## References

- 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.
- Casasso, A., & Sethi, R. (2015). Modelling thermal recycling occurring in groundwater heat pumps (GWHPs). *Renewable Energy*, 77, 86-93.
- Fei, L., & Pingfang, H. (2012). Energy and exergy analysis of a ground water heat pump system. *Physics Procedia*, 24, 169-175.
- Feng, G., Gong, H., & Yu, S. (2015). Simulation on the Groundwater Temperature Field of Groundwater Heat Pump System. *Procedia Engineering*, 121, 1556-1559.
- Fried, J. J. (1975). Groundwater pollution. Theory, methodology, modelling and practical rules (Vol. 4 of Developments in water Science, Chow, Y. T.(ed.)). Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam(Netherlands), 1975.
- 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.
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., & Bayer, P. (2010). Evaluating MT3DMS for heat transport simulation of closed geothermal systems. *Ground water*, 48(5), 741-756.
- Kim, J., & Nam, Y. Numerical Study on System Performance of Groundwater Heat Pumps.
- Liang, J., Yang, Q., Liu, L., & Li, X. (2011). Modeling and performance evaluation of shallow ground water heat pumps in Beijing plain, China. *Energy and Buildings*, 43(11), 3131-3138.
- Lo Russo, S., Taddia, G., & Gnani, L. (2012, April). An open-loop ground-water heat pump system: transient numerical modeling and site experimental results. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*.
- Lu, S., Cai, Z., Zhang, L., & Li, Y. (2014). Evaluation of the performance of a centralized ground-water heat pump system in cold climate region. *Frontiers in Energy*, 8(3), 394-402.

- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., (2011). Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics* 40 (3), 159–180,
- Nam, Y., & Ooka, R. (2010). Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real-scale experiment. *Energy and Buildings*, 42(1), 69-75.
- 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.
- 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.
- 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.
- Russo, S. L., Taddia, G., & Abidin, E. C. (2015). 167-Open-Loop Groundwater Heat Pump (GWHP) Injection Systems: Effects On Thermal Affected Zone (TAZ) Development.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zhang, Q., Zhang, Y., Gao, P., & Yu, Z. (2014). Effect of natural cold source on groundwater source heat pump according to laboratory and field geotechnical thermal physical tests. *Energy and Buildings*, 84, 557-566.
- 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.
- Zhu, N., Hu, P., Wang, W., Yu, J., & Lei, F. (2015). Performance analysis of groundwater-source heat pump system with improved control strategies for building retrofit. *Renewable Energy*, 80, 324-330.

## **Abstract**

Energy production and transformation processes are often associated with pollution in the environment. In order to make a solution for reduction of pollution, human has turned to energy saving and clean energy technologies. One of these techniques is groundwater heat pump (GWHP) system that uses from constant temperature of the ground in low depths as a source of clean and renewable energy for heating and cooling. In this technique groundwater with constant temperature is extracted by pumping wells, passed through the heat exchanger and then returned to aquifer through the injection wells. Owing to the mathematical similarities between heat and mass transport, the computer program MT3DMS that is an applied code in mass transport modeling was used for simulating heat transfer in groundwater in this study and groundwater flow and heat transport modeling was performed in a hypothetical aquifer. 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. Based on the results of this study the extent and direction of the thermal plume are directly affected by the hydrogeological parameters such as hydraulic conductivity, hydraulic gradient and porosity of aquifer. As the only parameters which link the heat pump system with groundwater are discharging flow rate and temperature, so their affecting factor are also influence performance of the GWHP system. The important effective factors on flow rate of the discharging well which were investigated in this study are included as water table fluctuation, clogging, impact of neighboring wells and layering and change in aquifer characteristics. The main factors affecting groundwater temperature as the input to GWHP system were also considered to be depth to water table, location of discharging and injecting wells and flow direction. Change in these parameters can affect the performance of the GWHP system, as well.

**Keywords:** Thermal plume, Groundwater heat pump, GWHP, MT3DMS.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Earth science**

**investigation and determination of the effective hydrogeological parameters on  
the performance of groundwater heat pump (GWHP) system**

**Hajar Barzegar**

**Supervisor:**

**Dr. Hadi Jafari**

**Advisor:**

**Dr. Seyed Majid Hashemian**

**February 2016**



