

شبیه‌سازی سامانه تهویه مطبوع با انرژی زمین‌گرمایی به همراه کلکتور خورشیدی

سید امید داعی نیازی^۱، محسن پور فلاح^{۱*}، آرین زارع قادی^۲

^۱دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
^۲دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۳

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۱۱

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴

کلمات کلیدی:

انرژی زمین‌گرمایی

انرژی خورشیدی

پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

نرم‌افزار ترنسیس

خلاصه: نگرانی‌های آینده برای محدود بودن منابع فسیلی و همچنین کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی زمین‌گرمایی به همراه انرژی خورشیدی را گسترده می‌سازد. وجود این انرژی در کشور باعث می‌شود تا از آن برای گرمایش و یا سرمایش فضاهای مسکونی و تجاری بهره برده شود. در این مقاله بار حرارتی خانه‌ای ساخته شده طبق استانداردهای کارآمد انرژی، شبیه‌سازی می‌شود. سیستم تهویه مطبوع مبتنی بر پمپ حرارتی زمین‌گرمایی و کلکتور خورشیدی با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس، بر روی خانه مدل‌سازی شده و تأثیر استفاده از گرمایش جزء بازیاب انرژی از آب هدررفت در سیستم، عملکرد فنی-اقتصادی سیستم در شهرهای مختلف کشور به لحاظ اقلیمی و کارایی جزء کلکتور خورشیدی بر روی متوسط دمای ذخیره سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که گرمایش استفاده شده از جزء بازیاب باعث افزایش ۰/۹ درصدی بر روی دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در یک بازه پنج ساله و افزایش ۱/۹ درجه سلسیوسی بر روی میانگین دمای سیال تانک آب گرم طی یک سال می‌شود. کارایی سیستم در اقلیم‌های گرم و خشک با هزینه راه اندازی ۲۵۰۴۷ دلار بهتر از نقاط دیگر کشور است.

۱-مقدمه

زمین سرشار از انرژی حرارتی بوده که در انتظار مهار برای نیازهای بشر است، با فرض یک گرادیان متوسط زمین‌گرمایی $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ۲۵، تنها ۰/۱ درصد زمین، دمایی پایین‌تر از ۱۰۰ درجه سلسیوس دارد [۱]. انرژی زمین‌گرمایی با یک نرخ نسبتاً ثابتی از بخش درونی سنگ کره^۱، تأمین شده، بنابراین به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر انرژی شناخته می‌شود. استقلال انرژی زمین‌گرمایی از شرایط آب و هوایی در مقایسه با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر (به‌عنوان نمونه خورشید، جزر و مد، باد و غیره)، پایداری، فضای اندک موردنیاز، عمر بهتر و تعمیر و نگهداری کم‌هزینه تجهیزات، باعث شده ظرفیت استفاده از این انرژی از سال ۱۹۷۵ تا سال ۲۰۱۳ از ۱۳۰۰ MWe به ۱۱۷۶۵ MWe افزایش بیابد [۲ و ۳].

محدودیت‌های مختلف در قدرت خروجی، استفاده وسیع از فن‌آوری انرژی تجدیدپذیر را کاهش می‌دهد اما با اتخاذ یک ترکیب

افزایشی برای ارتقاء فن‌آوری انرژی تجدیدپذیر، می‌توان نقش مهمی را در بهینه‌سازی انرژی، از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کرد [۴ و ۵].

ایده متصل کردن یک کلکتور خورشیدی به لوله‌های مارپیچی دفن شده در زمین، با علم به اینکه انرژی خورشید می‌تواند در زمین ذخیره گردد، اولین بار توسط پنرود^۲ مطرح گردید. پس از چند دهه از آن، مترز^۳ [۶]، سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با خورشید را پیشنهاد داد.

بعد از چند سال چیاسون^۴ و یاووزترک^۵ [۷] با اتخاذ یک روش شبیه‌سازی، به بررسی امکان استفاده از سامانه‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با کلکتورهای خورشیدی در گرمایش ساختمان‌ها پرداختند. این روش شبیه‌سازی برای مدل کردن عملکرد ۲۰ ساله یک سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی ترکیبی و همچنین سامانه‌های

- 2 Penrod
- 3 Metz
- 4 Chiasson
- 5 Yavuzturk

1 Lithosphere

* نویسنده مدار مکاتبات: m.pourfallah@ustmb.ac.ir



بر روی عملکرد فنی-اقتصادی تولید انرژی زمین گرمایی مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر ذخیره سازی انرژی خورشید در زیرزمین به منظور گرمایش فضا با استفاده از مبدل حرارتی دولوله ای توسط ورما^۴ و موروگسان^۵ [۱۲] مورد آزمایش قرار گرفت. با استفاده از داده های تجربی، حرارت جذب شده توسط کلکتور خورشیدی، حرارت تزریق شده به زمین، حرارت استخراج شده از زمین و ضریب عملکرد سیستم مورد محاسبه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جرمی، جذب حرارت توسط کلکتور خورشیدی از ۲/۵۶ kW - ۲/۰۷ متغیر بوده و با توجه به هدر رفت حرارت تنها ۲/۴۱۴ kW - ۱/۹۹۱ از گرمای خورشید در طول روز می تواند به زمین تزریق گردد. همچنین گرمایش زمین، ۲۳ درصد افزایش در ضریب عملکرد این سیستم را به همراه داشته است. مهریویا و همکاران [۱۳] طراحی بهینه ای را برای گرمایش یک گلخانه با استفاده از سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی و کلکتور خورشیدی ارائه دادند. عملکرد فنی-اقتصادی این سیستم به طور همزمان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل انتخاب شده با ضریب عملکرد فصلی ۴/۴۱، مجموع عمق چاه ۱۵۰ متر و کلکتور خورشیدی به مساحت ۹/۴۲ متر مربع، ۲۷۲۰۰ دلار هزینه دربرداشته که با هزینه عملکردی سالانه ۲۱۰ دلار طی مدت ۱۴ سال برگشت می کند. در مطالعه موردی بر روی استفاده از یک مسیر اختصاصی به جای کلکتور خورشیدی به منظور بهره وری سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی توسط آزجنر^۶ و همکاران [۱۴]، نشان داده شد که استفاده از این مسیر اختصاصی باعث کاهش هزینه های اولیه و افزایش بهره وری سیستم می گردد.

در این مقاله شبیه سازی یک خانه واقعی و منطبق بر استانداردهای کارآمد انرژی به منظور محاسبه بار سرمایشی و گرمایشی انجام شده است. هدف از انجام این کار افزودن تجهیزات سامانه پمپ حرارتی زمین گرمایی به همراه کلکتور خورشیدی به خانه و مقایسه بار سرمایشی و گرمایشی آن با حالت پایه است. در گام نخست تأثیر استفاده از انرژی آب خاکستری بر دمای میانگین تانک آب گرم و دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در طول پنج سال بررسی خواهد شد. همچنین تأثیر استفاده از کلکتور خورشیدی بر دمای متوسط زمین و به دنبال آن دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در یک دوره پنج

مرسوم در شرایط آب و هوایی متفاوت به کار گرفته شد. کلکتورهای خورشیدی ثابت و متحرک در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. سرانجام، تجزیه و تحلیل هزینه عملکرد ۲۰ ساله این چرخه نشان داد که سامانه های پمپ حرارتی زمین گرمایی ترکیبی به همراه کلکتور خورشیدی یک انتخاب مناسب برای ساختمان های نیازمند به گرمایش می باشند. در یک پژوهش اسلامی نژاد و همکاران [۸] تأثیر افزایش تعداد چاه^۱ و ترکیب بندی های مختلف پمپ حرارتی و کلکتور خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. در حالت اول چاه ها دارای دو مدار مستقل، یکی متصل به پمپ حرارتی زمین گرمایی و دیگری متصل به کلکتور خورشیدی و در حالت دوم از یک سامانه یکپارچه پمپ حرارتی زمین گرمایی با کلکتور خورشیدی برای گرمایش ۲۴۰۰ مترمربع ساختمان و سه گلخانه استفاده شد. نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار ترنسیس^۲ [۹] که یک نرم افزار شبیه ساز انرژی های نو برای در نظر گرفتن رفتار گذرای سیستم است، نشان داد که تزریق انرژی خورشید به یک تک چاه اثر ناچیزی بر روی مصرف پمپ حرارتی داشته در صورتی که برای حالت چند چاه شارژ مجدد هسته توسط کلکتور خورشیدی یک امر ضروری است، زیرا باعث محدود ساختن کاهش دمای زمین و افزایش دمای سیال برگشتی به پمپ حرارتی در درازمدت می شود. معصومی راد و همکاران [۱۰] کارایی اقتصادی یک سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی با کلکتور خورشیدی در شهر میلتن^۳، در کانادا را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. شبیه سازی عملکرد ۲۰ ساله این سیستم نشان داد که هزینه خالص این سیستم ترکیبی نسبت به سامانه های پمپ حرارتی زمین گرمایی مرسوم ۳/۷-۷/۶ درصد با توجه به هزینه های حفر کمتر است. همچنین نشان داده شد که اتصال سه کلکتور خورشیدی با مساحت ۶/۸۱ مترمربع برای یک سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی، باعث کاهش طول مبدل حرارتی زمینی به میزان ۱۵ درصد می شود. قریشی مدیسه و همکاران [۱۱] یک مدل انتقال حرارت گذرا که قابلیت نرخ تزریق و استخراج بالاتری نسبت به مدل های مشابه را دارد مطرح کردند. این سیستم حلقه بسته پیشنهادی شامل یک مبدل حرارتی دو لوله ای بوده و در ماه های تابستان، انرژی حرارتی خورشید به آن تزریق می گردد. اثرات نرخ استخراج و تزریق حرارت

4 Verma
5 Murugesan
6 Ozgener

1 Borehole
2 Transient System Simulation Tool (TRNSYS)
3 Milton

توان واقعی انرژی‌های نو در کاهش مصرف سوخت باید شرایط آن را نیز مهیا ساخت، مثلاً در نظر گرفتن خانه‌ای با عدم رعایت نکات فنی و ایزوله سازی دقیق و پیاده‌سازی سیستم تهویه مطبوع مبتنی بر انرژی‌های نو، منجر به عدم کسب نتایج موردنظر و ناکارآمدی آن در مقابل سامانه‌های مرسوم و از دست رفتن جذابیت این نوع سامانه‌ها می‌گردد.

ترنسیس یک نرم افزار گرافیکی بسیار انعطاف‌پذیر است که برای شبیه‌سازی رفتار سامانه‌های گذرا استفاده شده و ترنیلد^۱ یک جزء از نرم‌افزار ترنسیس بوده که به وسیله آن می‌توان مشخصات بار حرارتی خانه را شبیه‌سازی نمود [۱۶]. در ترنسیس امکان مدل‌سازی ساختمان، فرآیندهای حرارتی خورشیدی، انتقال حرارت همراه با زمین، سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی و مشاهده تأثیرات پارامترهای مختلف خروجی این اجزاء در گذر زمان وجود دارد. به طور کلی بررسی سیستم‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با کلکتور خورشیدی شامل چهار جنبه اصلی مطالعاتی بوده که عبارتند از: ۱- امکان‌پذیری به لحاظ فنی ۲- امکان‌پذیری به لحاظ اقتصادی ۳- مدل‌سازی دقیق از سیستم ۴- عرصه آزمایشات که همه این جنبه‌های تحقیقاتی به صورت مجزا بررسی شدند و محققان الگوریتم‌های مختص به خودشان را برای مدل‌سازی کل سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی ارائه دادند. اما با پیشرفت شبیه‌سازی توسط نرم‌افزارهای مختلف، در ترنسیس قابلیت ادغام هر چهار جنبه تحقیقاتی ذکر شده برای محققان میسر گشته است.

برای به دست آوردن بار گرمایشی و سرمایشی خانه، اجزاء داخلی ترنیلد و در ادامه اجزایی به‌صورت جداگانه و خارجی به مدل خانه متصل شدند. در داخل ترنیلد امکان مدل‌سازی دیوارها بر اساس اجزاء تشکیل‌دهنده آن‌ها، پنجره‌ها، سامانه‌های گرمایش و سرمایش موجود، مقدار نفوذ هوا و بارهای افزایشی وجود دارد. خانه در این قسمت به سه بخش: ۱- طبقه اول ۲- طبقه دوم ۳- زیرزمین تقسیم‌شده و بار حرارتی به‌دست‌آمده از آن، با بار مدل شده از این ساختمان، مورد مطابقت قرار گرفته است. اختلاف موجود در بار حرارتی به‌دست‌آمده برای گرمایش و سرمایش نسبت به شبیه‌سازی اصلی آن به دلیل تنها مشخص بودن مقاومت حرارتی دیوارها و نداشتن اطلاعات لازم از ضخامت لایه‌های سازنده آن و همچنین ناکافی بودن اطلاعات

ساله ارزیابی می‌گردد تا میزان تغییرات نسبت به حالت بدون کلکتور استخراج شده و در ادامه تأثیر اقتصادی جزءهای بازیاب و کلکتور مشخص می‌گردد. تأثیر تغییر شرایط اقلیمی بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در سرمایش و گرمایش مطالعه خواهد شد و بهینه‌ترین شرایط اقلیمی تعیین می‌شود. یکی از نوآوری‌های اصلی تحقیق انجام شده استفاده از سیستم بازیاب گرمایش از آب هدر رفت خانه و بکارگیری مجدد آن برای گرمایش آب سرد ورودی به تانک آب گرم و همچنین محاسبه میزان صرفه‌جویی حاصل شده در صورت استفاده از این جزء در خانه است. نوآوری دیگر، مشاهده تأثیرات استفاده از سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با کلکتور خورشیدی در شرایط مختلف اقلیمی کشور ایران بر روی عملکرد فنی-اقتصادی آن می‌باشد. تحقیقات بسیاری بر روی سیستم‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی و کلکتور خورشیدی انجام گرفته است ولی هیچکدام از آن‌ها شرایط اقلیمی متفاوت کشور را بر روی آن بررسی نکرده و هزینه‌های راه‌اندازی سیستم در شرایط آب و هوایی متفاوت را بدست نیاورده‌اند.

۲- مدل خانه

خانه انتخاب شده برای این مدل پیش‌تر شبیه‌سازی شده و یکی از دو خانه ساخته‌شده طبق استانداردهای کارآمد انرژی توسط سازنده محلی، مت ایچی^۱ در شهر میلتن، در سال ۲۰۰۵ است [۱۵]. برای مقایسه دقت بار سرمایشی و گرمایشی خانه شبیه‌سازی شده با مرجع اصلی آن، ابتدا خانه در آب و هوای شهر میلتن شبیه‌سازی شد. در ادامه کار شرایط آب و هوایی هر شهر تحت بررسی در کشور بر کل مدل‌سازی و خانه اعمال گردید. این‌گونه فرض می‌شود که این خانه منطبق بر استانداردهای ساخته‌شده در داخل کشور وجود دارد. خانه مسکونی موردنظر به صورت دوبلکس^۲ با ۴۹۸ مترمربع مساحت گرمایشی به همراه زیرزمین^۳ بوده که اطلاعات اجزاء سازنده آن به شرح زیر است [۱۰]:

معمولاً شبیه‌سازی‌هایی که انجام می‌گیرد بر اساس خانه‌های ساخته شده در داخل کشور بوده، که رعایت تمامی نکات دقیق ایزوله‌سازی و ساخت‌وساز در آن‌ها انجام نمی‌پذیرد. برای مشاهده

- 1 Mattamy
- 2 Two Storey Building
- 3 Basement

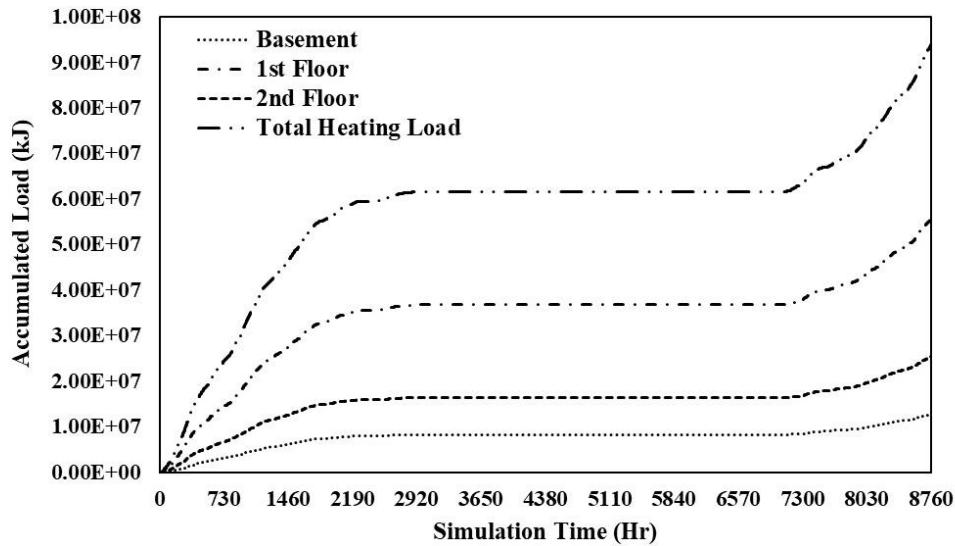
جدول ۱: مشخصات ساختاری خانه شبیه‌سازی شده [۱۰]

Table 1: Structural specifications of the simulated house

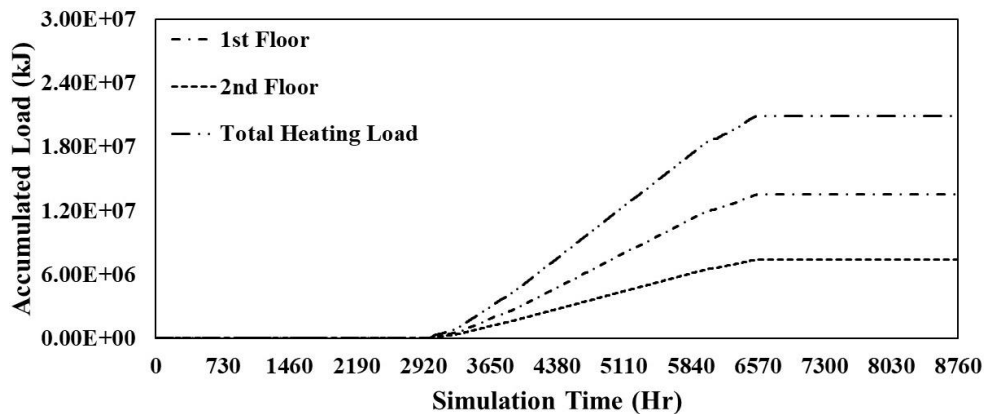
زیرزمین	پنجره‌ها	ایزوله	ساخت
کف بتونی، گرمایش از کف، مقاومت حرارتی $2/11 \text{ m}^2\text{K/W}$	پنجره کم انتشار آرگون دوجداره به همراه ایزوله در فواصل با مقاومت حرارتی $0/35 \text{ m}^2\text{K/W}$	اسپری فوم برای دیوارها با مقاومت حرارتی $3/5 \text{ m}^2\text{K/W}$ و عایق بالکن با مقاومت حرارتی ۷	قاب چوب سبک، ۵۰ در ۱۵۰ میلی‌متر دیوار خارجی نصب شده به مراکز ۶۱۰ میلی‌متر

دقیق از ضخامت لایه‌های سازنده سقف‌های به‌کاررفته در خانه است. بار حرارتی مدل شده برای گرمایش و سرمایش در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است. فصول نیازمند به گرمایش از ۱ اکتبر (۶۵۵۲ ساعت) تا ۳۰ آوریل (۲۸۸۰ ساعت) و فصول نیازمند به سرمایش از ۱ می (۲۸۸۱ ساعت) تا ۳۱ سپتامبر (۶۵۵۳ ساعت) در نظر گرفته شده است. جدول ۲ بار سرمایشی و گرمایشی شبیه‌سازی شده برای خانه مورد نظر در این مقاله و مرجع اصلی آن را نشان می‌دهد [۱۰]

فصول نیازمند به گرمایش از ۱ اکتبر (۶۵۵۲ ساعت) تا ۳۰ آوریل (۲۸۸۰ ساعت) و فصول نیازمند به سرمایش از ۱ می (۲۸۸۱ ساعت) تا ۳۱ سپتامبر (۶۵۵۳ ساعت) در نظر گرفته شده است. جدول ۲ بار سرمایشی و گرمایشی شبیه‌سازی شده برای خانه مورد نظر در این مقاله و مرجع اصلی آن را نشان می‌دهد [۱۰]



شکل ۱: بار گرمایشی جمع شده فضا
Fig. 1: space accumulated heating load



شکل ۲: بار سرمایشی جمع شده فضا
Fig. 2: space accumulated cooling load

۳- مدل‌سازی سیستم پمپ حرارتی منبع زمین با استفاده از کلکتور خورشیدی

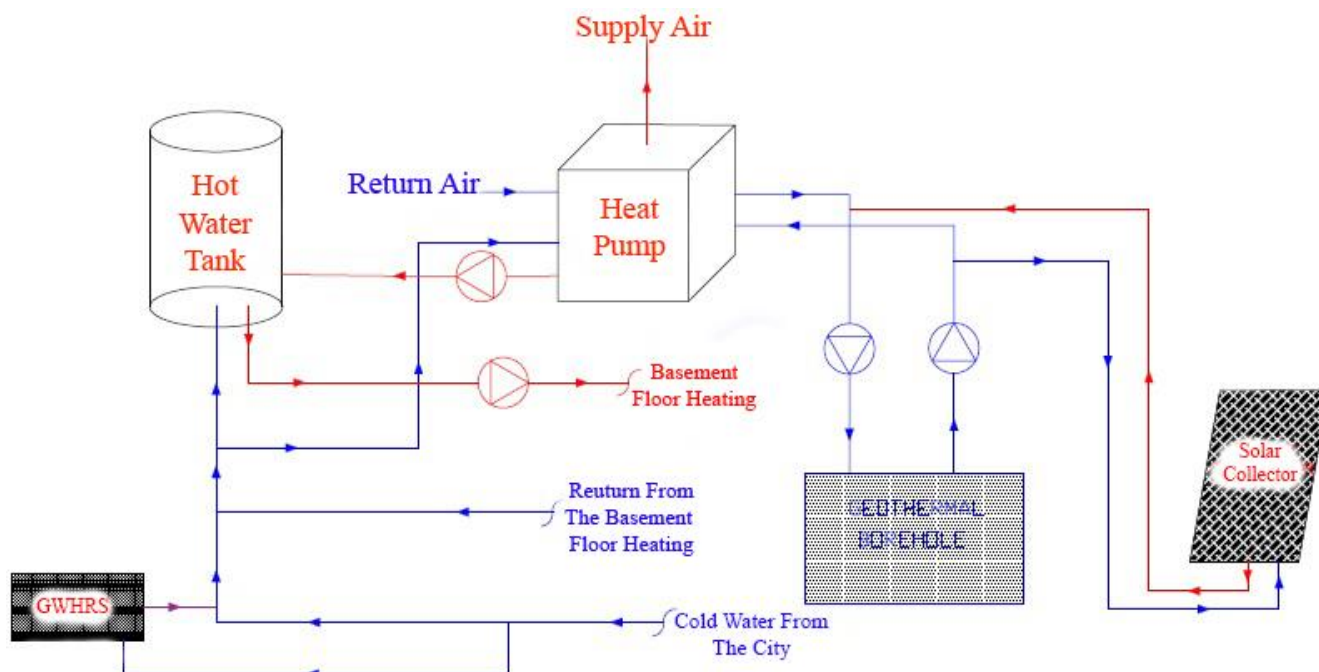
زمین‌گرمایی را به تصویر می‌کشد. شکل ۴ طرح‌بندی جزئیات این سیستم را در محیط نرم‌افزار ترنسیس نشان می‌دهد. محیط اصلی نرم‌افزار ترنسیس رابط اصلی بصری پروژه بوده که سیستم پمپ حرارتی منبع زمین با استفاده از کلکتور خورشیدی در آن ایجاد شده که در ادامه به توضیح اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده این سیستم پرداخته می‌شود. آب سرد از شهر وارد سیستم شده که دمای آن بر طبق دمای آب سرد گرفته شده در ماه‌های مختلف سال از آب و فاضلاب استان تهران است و در جدول ۳ و شکل ۵ مشخص شده است. نوع b ۱۴ از کتابخانه نرم‌افزار برای مدل‌سازی آب سرد ورودی مورد استفاده قرار گرفته است. حالت بررسی پایه این سیستم برای شهر تهران در نظر گرفته شده که در

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، پمپ حرارتی هوا به هوا است. نوع دیگر، پمپ حرارتی هوا به آب است که در ساختمان، با سیستم توزیع حرارت رادیاتوری کار می‌کند. در فصل سرد، پمپ حرارتی، گرما را از هوای خارج دریافت کرده و آن را به سیستم گرمایش می‌دهد. در فصل گرم، پمپ حرارتی گرما را از سیستم توزیع آب داخل ساختمان به محیط انتقال می‌دهد. شکل ۳ نحوه ارتباط اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده سیستم پمپ حرارتی

جدول ۲: بار گرمایشی و سرمایشی شبیه‌سازی شده در این مقاله و مرجع اصلی [۱۰]

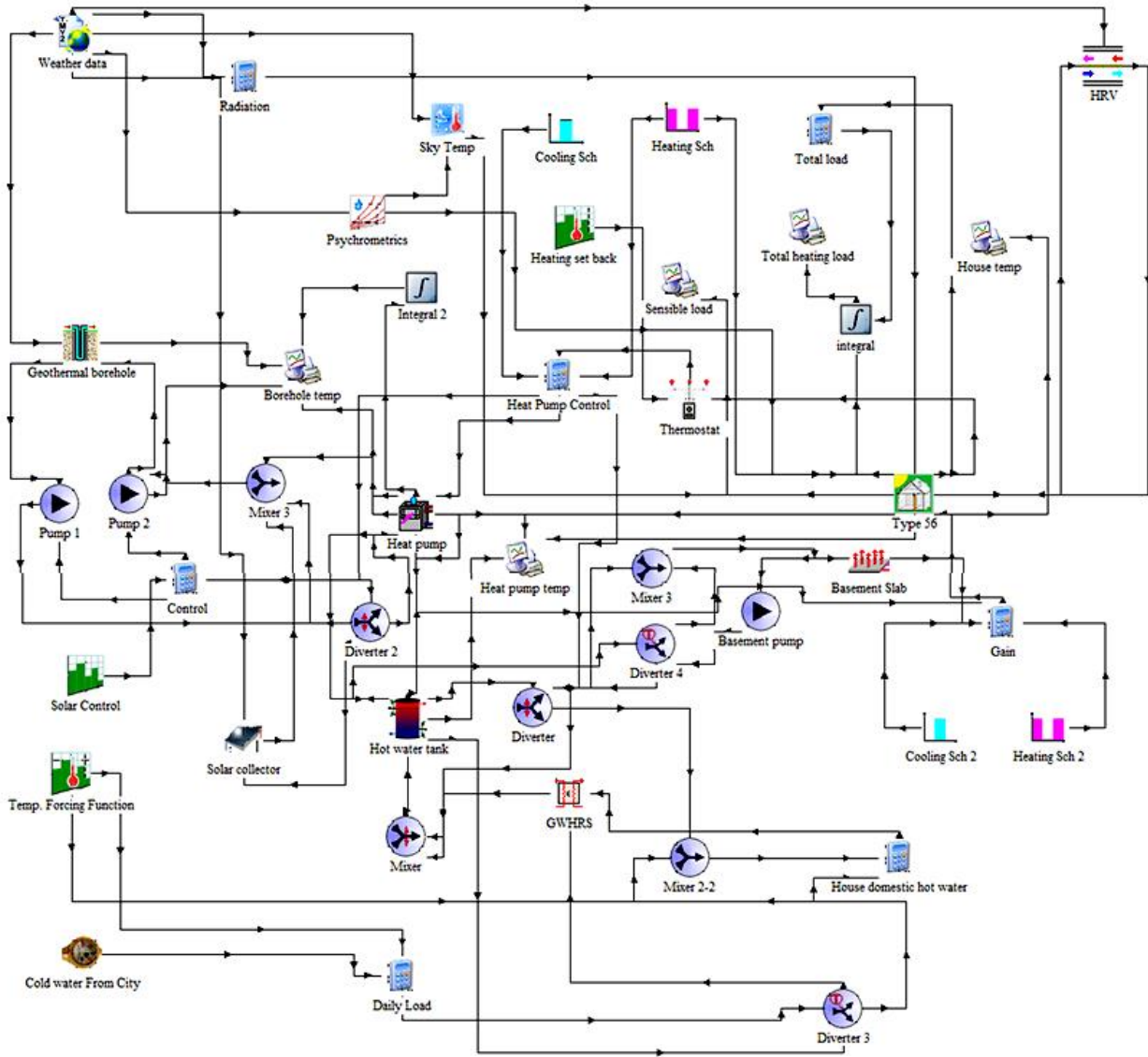
Table 2: Simulated cooling and heating load in this paper and its main reference

بار حرارتی	شبیه‌سازی شده در این مقاله	شبیه‌سازی اصلی
بار گرمایشی (GJ)	۹۳/۹	۹۵
بار سرمایشی (GJ)	۲۰/۹	۱۹



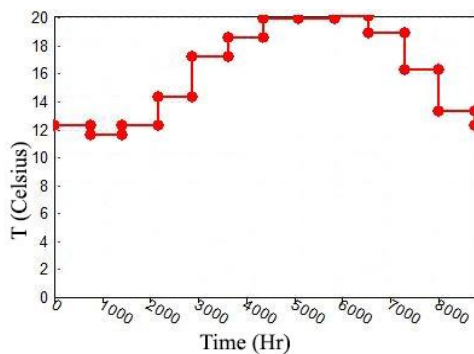
شکل ۳: شماتیک سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی به همراه کلکتور خورشیدی

Fig. 3: Schematic of the connection between the component in the system



شکل ۴: مدل شماتیک ترنسیس

Fig. 4: TRNSYS schematic model



شکل ۵: دمای آب سرد در مدت یک سال (ماهانه) [۱۷]

Fig. 5: Coldwater temperature during one year (monthly)

جدول ۳: دمای آب سرد ورودی در ماه‌های مختلف سال برای شهر تهران [۱۷]

Table 3: Coldwater temperature in different months of the year for Tehran

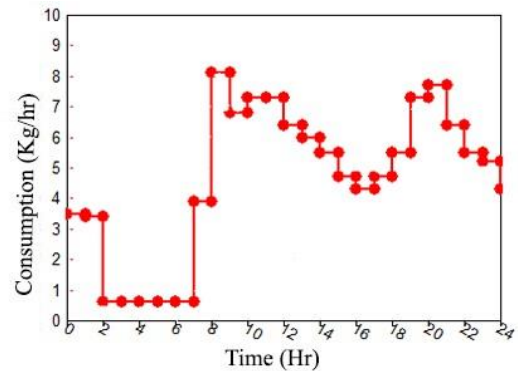
دمای آب (درجه سلسیوس)			ماه		
۱۸/۶	۱۷/۱۹	۱۴/۳	خرداد	اردیبهشت	فروردین
۲۰/۱	۱۹/۹	۱۹/۹	شهریور	مرداد	تیر
۱۳/۳	۱۶/۳	۱۸/۹	آذر	آبان	مهر
۱۲/۳	۱۱/۶	۱۲/۳	اسفند	بهمن	دی

استفاده قرار گیرد، گفته می‌شود. نوع ۹۱، به‌عنوان یک مبدل حرارتی با اثربخشی ثابت یک انتخاب ساده از کتابخانه نرم‌افزار ترنسیس برای مدل کردن سیستم بازیاب حرارت از آب خاکستری است. اثربخشی سیستم گرمایش آب خاکستری که نسبت واقعی انتقال حرارت مبدل حرارتی به ماکزیمم انتقال حرارتی که می‌تواند در مبدل حرارتی اتفاق بیافتد (Q/Q_{max}) ، ۸۵ درصد در نظر گرفته شده است. در واقع آب سرد ورودی می‌تواند ۸۵ درصد از انرژی حرارتی آب هدر رفته شده (آب خاکستری) را از یک مبدل حرارتی با اثربخشی ثابت که برای مدل‌سازی این جزء مورد استفاده قرار گرفته و از تجهیزات شرکت پاور پایپ^۲ است، دریافت کند [۱۸]. بیشترین مقدار نرخ انتقال حرارت بر اساس حداقل نرخ ظرفیت سیال و دمای ورودی آن به قسمت‌های سرد و گرم محاسبه می‌شود که در این حالت اثر مبدل حرارتی به عنوان پارامتر ورودی و مفهوم ضریب کلی انتقال حرارت برای مبدل حرارتی استفاده نمی‌شود. دمای قسمت آب هدر رفته (بخش گرم) ۳۷ درجه سلسیوس و قسمت سرد مبدل حرارتی که از میانگین آب سرد ورودی شهر در ماه‌های مختلف سال تغذیه می‌شود و دمای آن از ۱۱/۶ تا ۲۰/۱ درجه سلسیوس متفاوت است، تخمین زده می‌شود. آب پیش‌گرم شده از این مدل برای ذخیره‌سازی وارد تانک آب گرم^۳ می‌شود. نوع ۴، یک تانک ذخیره‌سازی طبقه‌بندی‌شده را با ورودی‌های متغیر و هدر رفت یکنواخت شبیه‌سازی می‌کند. عملکرد حرارتی مخزن ذخیره انرژی پر شده از مایع، با توجه به طبقه‌بندی حرارتی، با فرض اینکه تانک شامل N بخش $(N \leq 15)$ به‌طور کامل مخلوط شده برابر با حجم باشد، می‌تواند مدل شود. درجه طبقه‌بندی بر اساس مقدار N تخمین زده می‌شود. اگر N برابر با ۱ باشد، تانک ذخیره‌سازی به‌عنوان یک مخزن کاملاً مخلوط شده مدل می‌شود که هیچ اثری از طبقه‌بندی در آن ممکن نیست. این جزء یک مخزن طبقه‌بندی شده دارای موقعیت‌های ورودی متفاوت است، به طوری که سیال ورودی ممکن است به مخزن در دمایی تقریباً برابر با دمای خودش اضافه گردد. تانک آب گرم انتخاب شده مدل ریم ۶۲۰ تی^۴ با گنجایش ۲۲۰ لیتر بوده که دارای دو گرمایش برقی با توان ۴/۵ کیلووات است [۱۹]. مخزن دارای $N=6$ طبقه‌بندی کاملاً پر شده برابر با حجم بوده و ممکن است در یکی از سه حالت برای تعیین موقعیت

جدول ۴: ضرایب در نظر گرفته شده برای دمای آب سرد ورودی در شهرهای تحت بررسی [۱۷]

Table 4: Considered coefficients for the incoming cold water temperature in understudy cities

اقليم	شهر	ضريب
سرد و خشک	اردبیل	۰/۹
معتدل و مرطوب	آمل	۱
گرم و خشک	تهران	۱
گرم و شرجی	بوشهر	۱/۱



شکل ۶: آب گرم مصرفی در ۲۴ ساعت (ساعتی) [۱۷]

Fig. 6: Hot water consumed in 24 hours (hourly)

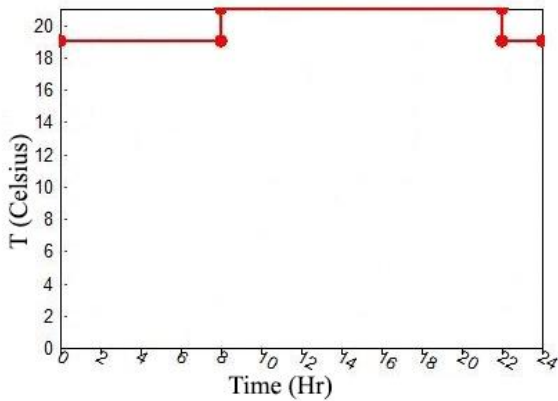
ادامه شهرهای مختلف کشور نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای مناطق دیگر تحت بررسی نیز یک ضریب افزایشی یا کاهششی بر اساس موقعیت جغرافیایی شهر در دمای آب سرد مفروض شده که در جدول ۴ قابل مشاهده است.

آب گرم مصرفی برای یک خانوار با چهار نفر جمعیت در ۲۴ ساعت که از آب و فاضلاب استان تهران استخراج شده به صورت شکل ۶ به نمایش گذاشته شده است [۱۷].

آب گرم مصرفی روزانه خانوار ۲۵۰ لیتر در روز در نظر گرفته شده است [۱۷]. در شبیه‌سازی از سیستم بازیاب گرمایش از آب خاکستری^۱ استفاده شده، آب خاکستری به آب بازیافتی یا فاضلاب‌های خانگی حاصل از فعالیت‌های معمول روزانه که دمایی بالاتر از دمای آب سرد شهری داشته و می‌تواند در یک مبدل حرارتی برای پیش‌گرم کردن آب سرد، قبل از ورود و ذخیره‌سازی در تانک آب گرم مورد

2 Power Pipe
3 Hot Water Tank
4 Rheem 620 T

1 Gray Water Heat Recovery System



شکل ۷: کنترل دمایی (درجه سلسیوس) در ۲۴ ساعت

Fig. 7: Temperature control (degrees Celsius) in 24 hours

جانب آن برای گرمایش فضا است.

پمپ حرارتی زمین گرمایی آب به هوا ۵ تنی دایکین مک وی^۲ سایز ۰۶۴ با دو مرحله گرمایش کمکی انتخاب شده است [۲۰]. عملکرد فصلی پمپ حرارتی با استفاده از یک ترموستات معین می‌شود. سیگنال کلی از طرف خروجی ترموستات به پمپ حرارتی با توجه به نیاز سرمایشی و یا گرمایشی (طبق زمان بندی سرمایش و گرمایش) فرستاده می‌شود. نوع ۶۹۸ این جزء را در محیط نرم‌افزار ترنسپس شبیه‌سازی می‌کند. سه ناحیه با اختلاف دمایی ۲ درجه سلسیوس تعریف شده‌اند. این یعنی اینکه ترموستات دارای اثر حساسیت به اختلاف دمایی ۲ درجه‌ای برای دماهای تعیین شده برای هر ناحیه از خانه بوده و در صورت کاهش و یا افزایش دما از مقدار معین شده، پمپ حرارتی را فعال می‌سازد. کنترل دمایی ترموستات در ۲۴ ساعت در شکل ۷ به نمایش گذاشته شده است. دمایی زیرزمین بر روی ۱۹ درجه سلسیوس و دمای طبقات اول و دوم بر روی ۲۴ و ۲۱ درجه سلسیوس به ترتیب در فصول نیازمند به سرمایش و گرمایش معین گردیده‌اند. این ترموستات پنج مرحله دارای ۵ سیگنال خروجی بوده و می‌تواند برای کنترل سیستم تهویه مطبوع دارای سه مرحله منبع گرمایش و دو مرحله منبع سرمایش مورد استفاده قرار گیرد.

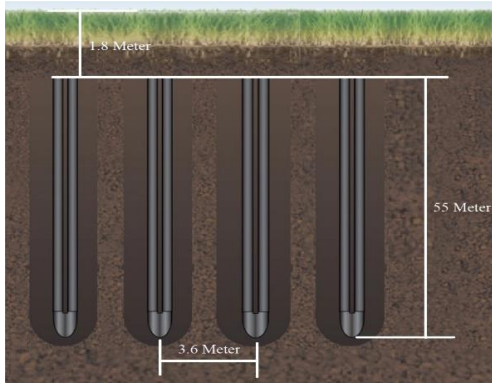
مدل‌سازی سیستم تهویه مطبوع خانه از جزء بازایب حرارتی هوا به هوا استفاده شده که دمایی محیطی و رطوبت نسبی آن توسط شرایط آب و هوایی و دما خروجی آن دمایی طبقه دوم تعیین شده است. نوع ۶۶۷b، یک بازایب حرارت هوا به هوا را در محیط نرم‌افزار ترنسپس شبیه‌سازی می‌کند. سیستم تهویه مطبوع از شرکت ونمار

جریان ورودی عمل کند، حالت ۲ انتخاب شده نشان می‌دهد که جریان سمت گرم و جریان سمت سرد به مخزن در نزدیک‌ترین گره‌ها به لحاظ دمایی به دمای جریان مربوطه وارد می‌گردند. دمای محیطی تانک با توجه به اینکه در زیرزمین جایگذاری شده ۱۹ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده و همچنین المنت‌های برقی زمانی که دمایی آب به دمای دلخواه نرسد، فعال می‌شوند.

آب گرم در چرخش گرمایش از کف زیرزمین، از مخزن آب گرم تأمین می‌شود. این آب در دمایی اولیه ۳۵ درجه سلسیوس از دمایی منبع ۵۵ درجه سلسیوسی وارد این سیستم شده و باعث تأمین گرمایش برای ظرفیتی معادل با ۱۵۰۰۰ kJ/K می‌گردد. نوع ۶۵۳، یک سیستم ساده گرمایش از کف را شبیه‌سازی می‌کند. این جزء یک سیستم ساده تابشی شعاعی را مدل کرده که تحت این فرض عمل می‌کند که تخته سنگ می‌تواند به عنوان یک توده ایزوترمال رفتار شود و انتقال انرژی مایع به تخته بتنی می‌تواند با استفاده از یک روش اثربخشی مبدل حرارتی مدل‌سازی گردد. دمایی زیرزمین ۱۹ درجه سلسیوس تنظیم شده است. خواص حرارتی تخته بتنی در کف زیرزمین که ضخامتی معادل با ۱۰۰ میلی‌متر و حجمی برابر با ۱۰/۲ مترمکعب دارد به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۰]:

$$C_p = 780 \frac{J}{kg.K}, \quad \rho = 1860 \frac{kg}{m^3}$$

هدر رفت محیطی که در اینجا همان از دست دادن گرما به خاک است، با در نظر گرفتن ایزوله کف، صفر فرض شده و انتقال حرارت به محیط از طریق همرفت طبیعی و تشعشع قابل چشم‌پوشی است. برای زیرزمین در فصول نیازمند به سرمایش، سیستم سرمایشی در نظر گرفته نشده است در حالی که گرمایش و سرمایش سایر نقاط خانه با استفاده از پمپ حرارتی صورت می‌پذیرد. پمپ حرارتی منبع آب تحت نوع ۵۰۵ در نرم‌افزار ترنسپس مدل می‌شود. این جزء یک پمپ حرارتی تک مرحله‌ای با منبع مایع و یک دی سوپر هیتر^۱ برای گرمایش آب گرم را مدل می‌کند. پمپ حرارتی شرایط جریان هوا مرطوب را با دفع انرژی (حالت سرمایش) و یا جذب انرژی از (حالت گرمایش) مایع در گردش، مدل‌سازی می‌کند. در حالت سرمایش، دی سوپر هیتر، با دفع انرژی به سیال در گردش کمک می‌کند در حالی که در حالت گرمایش، دی سوپر هیتر نیازمند به جذب انرژی بیشتر از



شکل ۸: نحوه قرارگیری چاه‌های زمین‌گرمایی
Fig. 8: Ground borehole circuits layout

قرار می‌گیرد یا برای ذخیره‌سازی و متعادل ساختن بار حرارتی زمین، به چاه زمین‌گرمایی فرستاده می‌شود.

چاه زمین‌گرمایی در حالت پایه متشکل از چهار چاه به عمق ۵۵ متر بوده که شعاع هر چاه ۱۰۰ میلی‌متر بوده و در نصب واقعی از این سیستم بکار گرفته شده است. نوع ۵۵۷ یک مبدل حرارتی زمینی را در نرم‌افزار ترنسیس شبیه‌سازی کرده که به صورت حرارتی با زمین تعامل دارد. فاصله‌ی سر چاه تا زمین ۱/۸ متر، فاصله چاه‌ها از یکدیگر ۳/۶ متر و حجم ذخیره‌سازی معادل با ۲۴۷۰ متر مکعب است، نحوه قرار گرفتن این چاه‌های زمین‌گرمایی در شکل ۸ قابل مشاهده بوده و محاسبه حجم ذخیره‌سازی به صورت رابطه (۱) است:

$$V = \pi \times (\text{فاصله چاه} \times 0.525) \times \text{عمق چاه} \times \text{تعداد چاه‌ها} \quad (1)$$

در این جزء یک مبدل حرارتی عمودی که با زمین تبادل گرمایی دارد، شبیه‌سازی می‌شود. این جزء بیشتر در سامانه‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی استفاده می‌شود، که دارای لوله‌هایی از جنس پلی‌اتیلن^۶ که به صورت U شکل در زمین قرار می‌گیرند. سیال گرم در طول این مبدل حرارتی زمین‌گرمایی می‌چرخد و بر اساس دمای سیال در گردش و زمین، گرما را جذب یا دفع می‌کند. معمولاً این مبدل‌های حرارتی چند متر پایین‌تر از سطح خاک قرار گرفته که کمتر دستخوش شرایط محیطی شوند همچنین این چاه‌ها را در ادامه با موادی که دوغاب^۷ نامیده می‌شوند، برای انتقال حرارتی کارآمدتر، پر می‌سازند. برنامه فرض می‌کند که چاه‌ها در کنار یکدیگر به صورت یکنواخت با حجم ذخیره‌سازی استوانه‌ای شکل از زمین قرار گرفته‌اند.

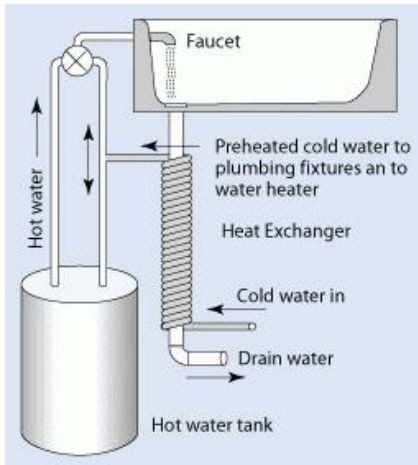
6 Polyethylene
7 Grout

وین^۱ با توان خروجی ۰/۱۱ کیلووات و ظرفیت ۶۲ L/s انتخاب شده است. برای اطلاعات ورودی سیستم تهویه مطبوع از بانک جامع آب و هوا نرم‌افزار ترنسیس استفاده گردیده ولی به دلیل محدودیت وجود شهرهای مختلف برای کشور ایران، تولید این اطلاعات برای شهرهای اردبیل، آمل و بوشهر با استفاده از نرم‌افزار میتینورم^۲ صورت گرفته است [۲۱ و ۲۲]. این نرم‌افزار قدرتمند و معتبر جهت ساخت داده‌های اقلیمی برای بسیاری از شهرها و نقاط جهان است. اطلاعات آب و هوا خروجی از این نرم‌افزار می‌تواند به عنوان داده‌های ورودی جزء هواشناسی نرم‌افزار ترنسیس استفاده شود.

مایع در گردش پمپ حرارتی با توجه به شرایط آب و هوایی در فصول سرد سال به‌عنوان محلول آبی با ۵۰ درصد پروپیلین گلیکول^۳ برای جلوگیری از شرایط یخ‌زدگی شدید، به‌ویژه برای بخشی که از کلکتور خورشیدی عبور می‌کند، مخلوط می‌شود. نوع ۱ در نرم‌افزار ترنسیس عملکرد حرارتی یک کلکتور صفحه تخت خورشیدی را مدل می‌کند. آرایه کلکتور خورشیدی ممکن است شامل کلکتورهایی متصل به‌صورت سری یا موازی باشد. عملکرد حرارتی آرایه کلکتور بر اساس تعداد واحدها در سری و ویژگی‌های هر واحد تخمین زده می‌شود. دمای سیال ممکن است به مقدار دمای ورودی، دمای متوسط و یا دمای خروجی باشد. در نوع ۱، ۵ احتمال برای در نظر گرفتن اثرات غیر طبیعی انتشار خورشید در نظر گرفته می‌شود. در نوع ۱، یک تابع درجه دوم مرتبه ۲ برای محاسبه زاویه اصلاح‌شده انتشار که این ضرایب توابع توسط اشری^۴ تعیین می‌شوند، مورد استفاده قرار گرفته است.

کلکتور خورشیدی استفاده‌شده از شرکت انورکز^۵ با سه ردیف پنل خورشیدی بوده که به‌صورت سری به هم متصل شده و مساحتی برابر با ۶/۸۱ مترمربع دارد [۲۳]. زاویه نصب‌شده کلکتور خورشیدی برای هر شهر مطابق با عرض جغرافیایی آن تعیین گردیده چراکه بهترین زاویه قرارگیری کلکتور خورشیدی مطابق با عرض جغرافیایی آن شهر است [۲۴]. عرض جغرافیایی شهرهای تهران، آمل، اردبیل و بوشهر به ترتیب ۳۵/۷، ۳۶/۴، ۳۸/۳ و ۲۸/۹ درجه است. سیال گرم شده در چرخه کلکتور خورشیدی یا به‌صورت مستقیم مورد مصرف

1 Venmar Vane 1.3HE
2 Meteonorm
3 Propylene Glycol
4 ASHRAE
5 Enerworks



شکل ۹: نحوه کارکرد سیستم بازیاب گرمایش از آب خاکستری [۲۵]
 Fig. 9: functionality of grey water heat recovery system

به خوبی کار می‌کند. اگر بتوان فاضلاب تولیدی را توسط لوله‌کشی جداگانه‌ای در محل مناسبی در داخل ملک جمع‌آوری کرد و یک سیستم تصفیه ساده و مقدماتی برای این پساب جمع شده اجرا نمود، به سادگی این بخش از فاضلاب می‌تواند بجای سرازیر شدن به شبکه فاضلاب‌رو، دوباره به مصارف خاصی در داخل همان مجموعه یا خارج آن برسد. این مصارف به صورت عمده شامل آبیاری فضای سبز مجموعه مثل باغچه، استفاده در فلاش تانک توالت‌ها، تغذیه منابع آب زیرزمینی و نظایر آن‌هاست. یکی از استفاده‌های آب خاکستری عبور آن از میان یک لوله در انتهای تانک آب گرم قبل از استفاده در مصارف دیگر است. این باعث گرمایش تانک شده که تا بالا ادامه پیدا کند. آب سرد با عبور از لوله‌های مارپیچی شکل که بر روی آب تخلیه شده قرار گرفته، پیش گرم شده و وارد مخزن آب گرم می‌شود. هزینه‌ها برای کل سیستم از ۳۰۰ تا ۵۰۰ دلار متغیر بوده و معمولاً نصب این سامانه‌ها در خانه‌های جدید ارزان‌تر است [۲۵]. دوره بازگشت سرمایه در استفاده از این سیستم ۲/۵ تا ۷ سال و وابسته به شرایط کاربری خواهد بود.

یکی از پارامترهای حیاتی سیستم تهویه مطبوع با پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، دمای ورودی سیال به پمپ حرارتی است. این دما در انتخاب سایز مناسب پمپ حرارتی و کاهش هزینه‌ها، همچنین بررسی میزان انرژی گرفته شده از چاه‌های زمین‌گرمایی در فصول مختلف سال تأثیرگذار است. در واقع هرچه دمای ورودی سیال به پمپ حرارتی کمتر باشد، میزان برق مصرفی برای گرمایش بیشتر این

انتقال حرارت همرفتی در لوله‌ها و انتقال حرارت رسانشی با حجم ذخیره‌سازی وجود دارد.

همچنین در مدل‌سازی سیستم از پمپ‌ها، مخلوط‌کننده‌های کنترلی جریان^۱ و مقسّم‌ها^۲ و ... نیز استفاده شده است. مخلوط‌کننده کنترلی جریان در دو قسمت مورد استفاده قرار گرفتند، در یک قسمت برای مخلوط جریان برگشتی از پمپ حرارتی و کلکتور خورشیدی و دیگری برای مخلوط سازی سیال خروجی از قسمت سرد مبدل آب خاکستری با قسمتی از جریان برگشتی از گرمایش از کف زیرزمین. مقسّم‌های کنترلی جریان که همان مخلوط‌کننده‌ها در جهت عکس‌اند در تقسیم‌سازی جریان مابین کلکتور خورشیدی و پمپ حرارتی و جریان سیال تانک آب گرم به خانه و گرمایش از کف زیرزمین به کار گرفته شدند. قطعه سه راه^۳ نیز که نوعی مخلوط‌کننده بدون کنترل بوده در دو قسمت، جریان برگشتی از گرمایش از کف زیرزمین و تانک آب گرم و دیگری در مخلوط آب سرد مصرفی با آب گرم در تانک آب گرم قرار داده شده است. شیر اعتدال^۴ که یک شیر کنترلی به لحاظ دمایی بوده در دو قسمت، کنترل دمای آب گرم فرستاده شده به خانه و کنترل دمای آب گرم فرستاده شده به گرمایش از کف زیرزمین مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- نتایج و بحث

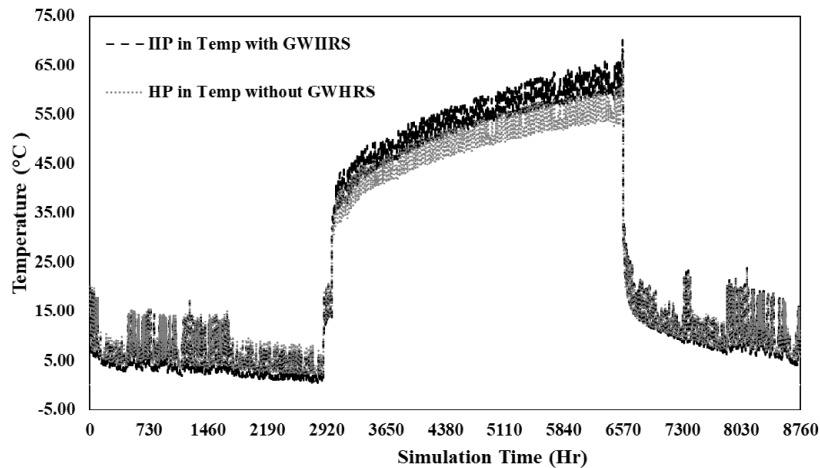
۴-۱- تأثیر گرمایش آب سرد ورودی با بازیاب گرمایش آب خاکستری

در سیستم

آب گرم برگشتی حامل انرژی بوده و به طور معمول ۸۰ تا ۹۰ درصد انرژی برای گرمایش آب در خانه مصرف می‌شود. سامانه‌های بازیاب گرمایش از آب خاکستری این انرژی را از آبی که مصرف شده (به طور مثال، حمام، شستن ظروف یا شستن لباس) به آب سرد ورودی به تانک آب گرم یا به سایر تجهیزات آبی منتقل می‌سازد. این عمل در واقع مقدار انرژی لازم برای گرمایش آب را کاهش می‌دهد. شکل ۹ نحوه کارکرد این سیستم را شرح می‌دهد [۲۵].

فناوری بازیاب گرمایش از آب خاکستری با انواع گرم‌کن‌های آبی به خصوص آب گرم‌کن‌های بدون تانک و آب گرم‌کن‌های خورشیدی

- 1 Control Flow Mixer
- 2 Diverter
- 3 Tee Piece
- 4 Tempering Valve



شکل ۱۰: تأثیر جزء بازیاب انرژی از آب خاکستری بر روی دمای ورودی به پمپ حرارتی در طول یک سال

Fig. 10: Effect of gray water recovery component on inlet temperature of heat pump during one year

درجه‌ای دما سیال ورودی به پمپ حرارتی را مشخص می‌سازد، این در حالی است که بیشترین دما ورودی سیال به پمپ حرارتی با وجود استفاده گرمایش از جزء بازیاب ۷۰/۲ درجه سلسیوس و بیشترین مقدار این پارامتر برای عدم استفاده از این جزء ۶۶ درجه سلسیوس است. جدول ۵ عملکرد ۵ ساله سیستم را در این دو حالت به نمایش می‌گذارد. همان‌طور که از نتایج این جدول بر می‌آید مشخص می‌شود که اختلاف دما سیال ورودی به پمپ حرارتی در هر سال بیشتر شده و این مقدار برای سیستم با گرمایش جزء بازیاب در یک بازه پنج ساله با ۴/۸ درصد رشد همراه بوده در حالی که سیستم بدون گرمایش جزء بازیاب رشدی ۳/۹ درصدی داشته است.

شکل ۱۱ نیز متوسط دمای تانک آب گرم در صورت وجود یا عدم جود این جزء را در طول یک سال به تصویر می‌کشد. طبق

سیال با توجه به نیاز خروجی افزایش یافته و باعث افزایش هزینه‌های کارکرد این تجهیزات می‌شود.

شکل ۱۰ تأثیر جزء بازیاب انرژی از آب خاکستری بر روی میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی را در شهر تهران طی مدت یک سال نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است عملکرد کلی سیستم با وجود استفاده از گرمایش جزء بازیاب انرژی از آب خاکستری کارآمدتر بوده و پمپ حرارتی توانایی تولید آب گرم‌تری و ذخیره‌سازی بیشتر این انرژی در چاه‌های زمین‌گرمایی را دارا است. نتایج نشان می‌دهد که بدون وجود این گرمایش، میانگین دمای سیال در طول یک سال ۲۵/۷ درجه سلسیوس بوده در صورتی که با در نظر گرفتن این جزء میانگین دمای ورودی سیال به پمپ حرارتی در طول یک سال به ۲۷ درجه سلسیوس می‌رسد. این نتیجه تأثیر ۱/۳

جدول ۵: میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی با گرمایش جزء بازیاب و بدون آن در مدت ۵ سال

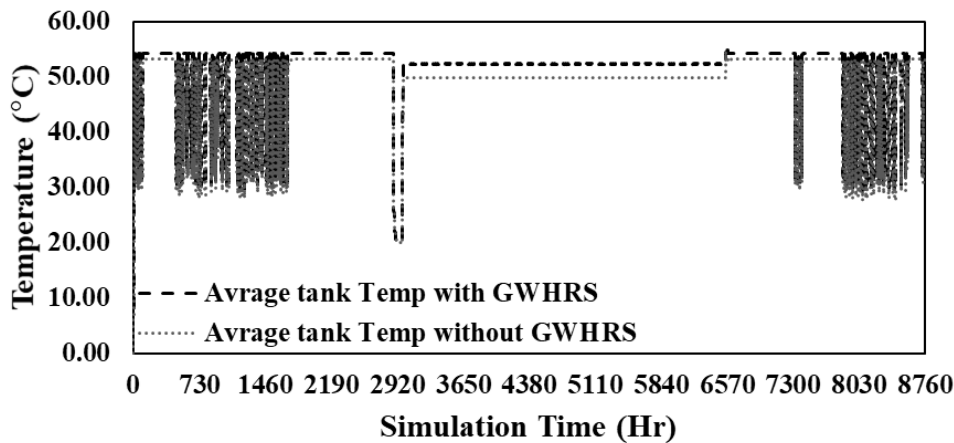
Table 5: Average fluid inlet temperature to heat pump with and without GWHR component heating during 5 years

میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی بدون گرمایش جزء بازیاب (°C)	میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی با گرمایش جزء بازیاب (°C)	سال شبیه‌سازی
۲۵/۷	۲۷	اول
۲۶/۱	۲۷/۶	دوم
۲۶/۴	۲۷/۹	سوم
۲۶/۶	۲۸/۱	چهارم
۲۶/۷	۲۸/۳	پنجم

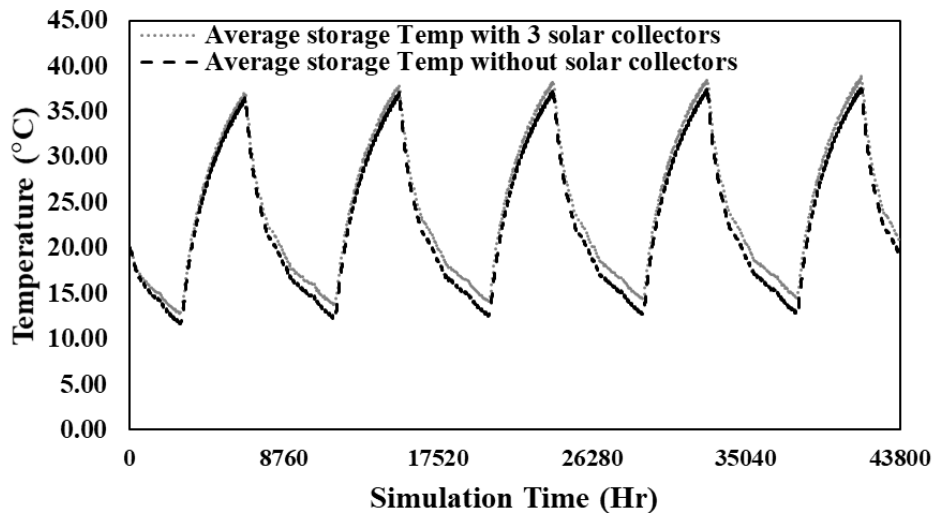
۴-۲- تأثیر استفاده از کلکتور خورشیدی بر عملکرد سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

در آب‌وهوای نیازمند به گرمایش، یک سیستم پمپ حرارتی متصل به زمین، ممکن است باعث کاهش حرارت زمین شده، که به تدریج می‌تواند سبب کاهش دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی گردد. در نتیجه سیستم کارآمدی خود را از دست می‌دهد. استفاده از یک دستگاه مکمل تولید حرارت، همانند یک کلکتور خورشیدی، به مقدار قابل توجهی می‌تواند از اندازه مبدل حرارتی زمینی و هزینه

مقایسه‌های انجام شده این نتیجه حاصل می‌شود که سیستم بازیاب انرژی از آب خاکستری که در خانه‌های تازه ساخت دارای هزینه کمتری برای نصب و راه‌اندازی می‌باشند، می‌تواند در دمای آب گرم تولیدی در سیستم کارایی مفیدی داشته باشد. با توجه به شکل ۱۱ میانگین دمای سیال تانک آب گرم در طول یک سال بدون وجود سیستم بازیاب گرمایش از آب خاکستری به ۴۹/۵ درجه سلسیوس رسیده در حالی که با نصب و راه‌اندازی این سیستم این میانگین دمایی به ۵۱/۴ درجه سلسیوس افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۱: تأثیر جزء بازیاب انرژی از آب خاکستری بر روی دمای متوسط تانک آب گرم در طول یک سال
Fig. 11: Influence of gray water heat recovery component on average temperature of hot water tank during one year



شکل ۱۲: تأثیر کلکتور خورشیدی بر روی دمای متوسط ذخیره‌سازی در طول پنج سال
Fig. 12: Effect of solar collector on average storage temperature over five years

جدول ۶: میانگین دمای متوسط ذخیره‌سازی با کلکتور خورشیدی و بدون آن در مدت ۵ سال
Table 6: Average storage temperature with and without solar collector for 5 years

سال شبیه‌سازی	میانگین دمای متوسط ذخیره‌سازی با کلکتور خورشیدی (°C)	میانگین دمای متوسط ذخیره‌سازی بدون کلکتور خورشیدی (°C)
اول	۲۳/۳	۲۲/۵
دوم	۲۴/۱	۲۲/۹
سوم	۲۴/۵	۲۳/۳
چهارم	۲۴/۸	۲۳/۳
پنجم	۲۵	۲۳/۵

نصب و راه‌اندازی گمانه کاسته و بنابراین، سیستم پمپ حرارتی متصل به زمین را به لحاظ اقتصادی در مناطق سرد سیری جذاب سازد. اساساً اندازه مبدل حرارتی زمینی بر مبنای بار سرمایشی و اندازه دستگاه مکمل تولید حرارت متناسب با گرمای اضافی که توسط مبدل حرارتی زمینی خواسته نشده است، تعیین می‌گردد. شکل ۱۲ میانگین دمای زمین در طول ۵ سال را با کلکتور خورشیدی و بدون آن به تصویر می‌کشد.

همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص است میانگین دمایی زمین بعد از ۵ سال بدون کلکتور خورشیدی دچار کاهش می‌شود، در واقع با نصب کلکتور خورشیدی، سیستم دمای استخراج‌شده از زمین را جبران سازی کرده و به لحاظ اقتصادی نیز عملکرد سیستم را طولانی‌تر می‌سازد. جدول ۶ میانگین دما متوسط ذخیره‌سازی را طی مدت ۵ سال با کلکتور خورشیدی و بدون آن، به تصویر می‌کشد.

جدول ۶ نشان می‌دهد که رشد میانگین دمای متوسط ذخیره‌سازی با در نظر گرفتن کلکتور خورشیدی در طول پنج سال شبیه‌سازی ۷/۳ درصد بوده است در حالی که این مقدار برای سیستم بدون وجود کلکتور خورشیدی به ۴/۴ درصد می‌رسد. از نتایج شبیه‌سازی این چنین بر می‌آید که رشد دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی با در نظر گرفتن کلکتور خورشیدی در بازه عملکردی ۲۰ ساله بسیار بیشتر خواهد بود و این رشد بر روی عملکرد فنی-اقتصادی سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی تأثیر گذار است.

در شکل ۱۳ حالت ۱ مقدار متوسط کارکرد گرمایش کمکی را در صورت وجود هر دو جزء بازیاب و کلکتور و در صورت وجود هر یک از این اجزاء طی مدت یک سال به تصویر می‌کشد.

در شکل ۱۳ حالت ۱ مقدار متوسط کارکرد گرمایش کمکی را (در فصول نیازمند به گرمایش) در صورت وجود هر دو جزء بازیاب و کلکتور، حالت ۲ مقدار متوسط کارکرد گرمایش کمکی را تنها در صورت وجود جزء بازیاب و حالت ۳ این کارکرد را تنها در صورت حضور جزء کلکتور به نمایش می‌گذارد. در نتیجه اختلاف حالت ۲ و ۱ مقدار صرفه‌جویی حاصل شده از کلکتور و اختلاف حالت ۳ و ۱ مقدار صرفه‌جویی حاصل شده از بازیاب را مشخص می‌سازد.

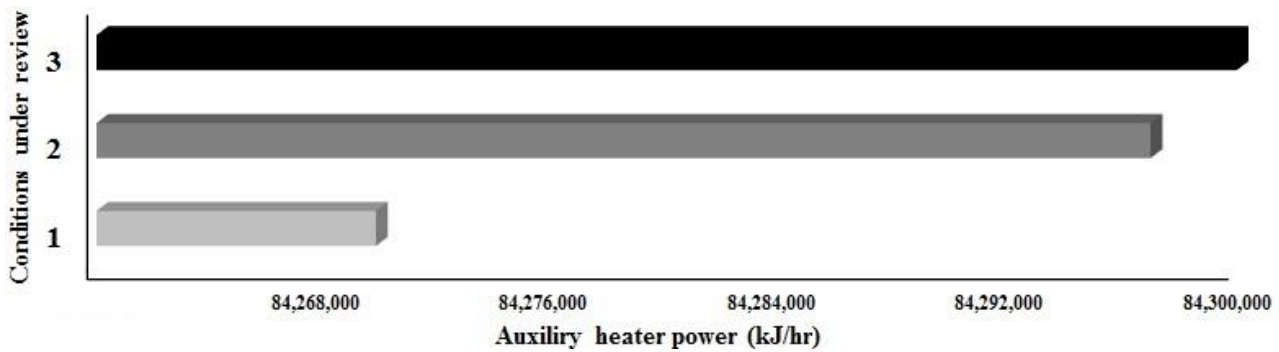
جدول ۷ مقدار متوسط افزایش استفاده از گرمایش کمکی در سیستم را در طول یک سال برای حذف جزءهای بازیاب و کلکتور نشان می‌دهد.

میزان صرفه‌جویی گاز حاصل شده از جزء بازیاب گرمایش از آب خاکستری و کلکتور خورشیدی در طول یک سال فقط در فصول نیازمند به گرمایش (۵۰۸۸ ساعت) با در نظر

۴-۳- تأثیر اقتصادی جزءهای بازیاب گرمایش از آب خاکستری و

کلکتور خورشیدی در سیستم

پمپ حرارتی زمین گرمایی استفاده شده دارای دو مرحله



شکل ۱۳: متوسط عملکرد گرمایش کمکی در سیستم در مدت یک سال برای شرایط تحت بررسی

Fig. 13: The average performance of the auxiliary heater in the system in one year for the conditions under consideration

جدول ۷: میزان متوسط افزایش استفاده از گرمایش کمکی در صورت عدم وجود جزء موردنظر در طول یک سال

Table 7: The average increase in the use of auxiliary heating in the absence of studied component within one year

میزان افزایش استفاده (کیلوژول بر ساعت)	جزء
۳۰۸۳۸/۹۴	بازیاب گرمایش از آب خاکستری
۲۷۱۷۳/۶۱	کلکتور خورشیدی

۴-۴- تأثیر شرایط اقلیمی بر عملکرد سیستم با پمپ حرارتی زمین گرمایی

عملکرد سیستم تهویه مطبوع با پمپ حرارتی زمین گرمایی و انرژی خورشیدی برحسب شرایط اقلیمی ایران در شهرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت کلی چهار اقلیم سرد و خشک، گرم و خشک، گرم و شرجی و معتدل و مرطوب انتخاب شده‌اند. شهرهای اردبیل، تهران، بوشهر و آمل برای بررسی از این اقلیم‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در واقع هدف از این بررسی مقایسه شرایط مختلف آب و هوایی و اقلیمی و تأثیر آن بر روی عملکرد سیستم تهویه مطبوع است. یکی از مهم‌ترین معیارها در بررسی این سیستم دمای ورودی به پمپ حرارتی بوده که این دما از خروجی سیال از چاه‌های زمین گرمایی نشأت می‌گیرد.

چاه‌های زمین گرمایی نیز تحت تأثیر شرایط جوی اطرافشان هستند. باید توجه داشت که بار گرمایشی و سرمایشی خانه نیز با توجه به شرایط متفاوت آب و هوایی دستخوش تغییرات می‌شود. شکل ۱۴ تأثیر شرایط اقلیمی متفاوت در کشور ایران را بر روی دمای ورودی به پمپ حرارتی در طول یک سال به نمایش می‌گذارد.

در جدول ۸ میانگین دمای ورودی سیال به پمپ حرارتی زمین گرمایی در مدت یک سال برای شهرهای متفاوت به لحاظ اقلیمی

گرفتن ارزش حرارتی ۳۶۱۲۰ کیلوژول بر مترمکعب برای گاز و هر مترمکعب ۱۲۰۰ ریال مطابق روابط (۲) و (۳) اس

$$GS = \frac{30838.94 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \times 5088 \text{ hr}}{36120 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} = 4344 \text{ m}^3 \quad (2)$$

$$GSC = 4344 \text{ m}^3 \times 1200 \frac{\text{Rial}}{\text{m}^3} = 5212908 \frac{\text{Rial}}{\text{Year}} \text{ for GWHRs}$$

$$GS = \frac{27173.61 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \times 5088 \text{ hr}}{36120 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} = 3828 \text{ m}^3 \quad (3)$$

$$GSC = 3828 \text{ m}^3 \times 1200 \frac{\text{Rial}}{\text{m}^3} = 4593333 \frac{\text{Rial}}{\text{Year}} \text{ for Collector}$$

باید خاطر نشان کرد که ماکزیمم جریانی که می‌تواند در کلکتور خورشیدی عبور کند کمتر از ۱۰ درصد است و این جریان برای افزایش دمای سیال خروجی از پمپ حرارتی و ورودی به چاه زمین گرمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد از این‌رو میزان صرفه‌جویی حاصل شده از این جزء کمتر از جزء بازیاب گرمایش از آب خاکستری در طول مدت یک سال است.

منطقه برای اجرا آن می‌باشند بعلاوه کاربرد این سامانه‌ها فقط برای سرمایش در نقاط گرم و شرجی بهتر از سایر نقاط تحت بررسی است.

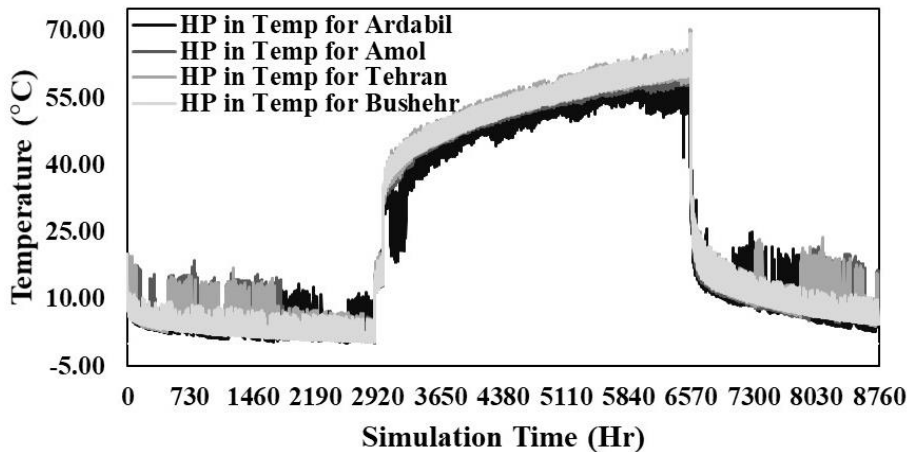
۴-۵- بررسی عملکرد اقتصادی راه‌اندازی سیستم

برای بررسی هزینه‌های اولیه راه‌اندازی سیستم در شهرهای مختلف، بهترین شهر در دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در فصول نیازمند به گرمایش (تهران با دمای ۱۷/۹ درجه سلسیوس) به عنوان مبنا و پایه نسبت به شهرهای دیگر تحت بررسی قرار گرفت. سعی شده است هر شهر تحت بررسی با افزایش مترائ عمق چاه در حجم ذخیره‌سازی به دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در فصول نیازمند به گرمایش در شهر مبنا نزدیک شود. جدول ۱۰ نشان‌دهنده افزایش مترائ عمق چاه برای رسیدن به میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در شهر پایه (تهران) برای شهرهای دیگر ذکر شده است.

برای محاسبه هزینه‌های اجرای سیستم در شهرهای مختلف ابتدا باید قطعات و هزینه‌های اولیه اجزاء برای راه‌اندازی سامانه را معین ساخت:

مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۸ نشان می‌دهد که میانگین دمایی ورودی سیال به پمپ حرارتی در شهر تهران با اقلیم گرم و خشک بیشتر از سایر شهرهای تحت بررسی و همچنین این دما برای شهر اردبیل با اقلیم سرد و خشک دارای کمترین مقدار خود نسبت به سایر شهرها است. در نتیجه این جمع بندی حاصل می‌شود که سیستم تهویه مطبوع با استفاده از انرژی زمین گرمایی و انرژی خورشیدی در اقلیم‌های گرم و خشک مؤثرتر می‌باشند.

دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در یک سال بر اساس فصول نیازمند به گرمایش و سرمایش در جدول ۹ دسته‌بندی شده است. نتایج نشان می‌دهد که شهر تهران دارای بیشترین میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی با ۱۷/۹ درجه سلسیوس بوده در حالی که بهترین شهر برای فصول نیازمند به سرمایش بوشهر، با میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی ۵۲/۹ درجه سلسیوس است. در نتیجه اگر بخواهیم سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی همراه با کلکتور خورشیدی را فقط برای گرمایش استفاده کنیم، اقلیم‌های گرم و خشک بهترین



شکل ۱۴: تأثیر شرایط اقلیمی متفاوت بر روی دمای ورودی به پمپ حرارتی در طول یک سال

Fig. 14: The effect of different climatic conditions on the fluid inlet temperature to the HP over a year

جدول ۸: میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در مدت یک سال برای شهرهای تحت بررسی

Table 8: The average inlet fluid temperature to the HP in one year for the studied cities

میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در مدت یک سال (درجه سلسیوس)	شهر	اقلیم
۲۴/۸	اردبیل	سرد و خشک
۲۶/۴	آمل	معتدل و مرطوب
۲۷	تهران	گرم و خشک
۲۶/۱	بوشهر	گرم و شرجی

موجود در ساختمان را گرفته و مستقیماً آن را به آب‌های زمینی و یا مخلوط آب و ضد یخ، منتقل می‌نماید. سپس حرارت به خارج منتقل شده، به یک منبع آب و یا به چاه (در سیستم باز) یا به مدار لوله‌کشی زیرزمینی (در سیستم بسته) انتقال می‌یابد. در برخی مواقع، قسمتی از این حرارت اضافی، برای پیش‌گرم کردن آب گرم مصرفی نیز، استفاده می‌شود. از این‌رو دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در فصول نیازمند به گرمایش مورد بررسی قرار گرفته که افزایش عمق چاه در فصول نیازمند به سرمایش باعث می‌شود تا عمل خنک‌سازی در لایه‌های عمیق‌تر زمین انجام نگیرد. از این‌رو مقایسه بین شهرهای تحت بررسی در این فصول صورت نگرفته تا هزینه‌های اولیه سیستم با دقت بیشتری محاسبه گردند.

جدول ۱۱ نشان می‌دهد که شهر تهران با هزینه اولیه ۲۵۰۴۷ دلار برای راه‌اندازی سیستم، مناسب‌ترین شهر برای اجرا سامانه تهویه مطبوع مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی به همراه کلکتور خورشیدی است. اگرچه کمک به بومی‌سازی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، حفر چاه‌های زمین‌گرمایی بر پایه دانش داخلی و استفاده از کلکتورهای

(۱) هزینه حفر چاه‌های زمین‌گرمایی بر اساس هر متر تعیین می‌شود و شامل تمامی مواد موردنیاز برای حفر چاه زمین‌گرمایی شامل: دوغاب، مواد لازم برای سوراخ‌کاری، حفر افقی زمین و ... است. از آنجایی‌که مرجع داخلی برای تعیین هزینه‌های حفر چاه زمین‌گرمایی وجود ندارد، هزینه‌های حفر مطابق شرکت‌های پیمانی در خارج از کشور به مبلغ ۵۰-۱۰۰ دلار برای هر متر تعیین شده است که در این تحقیق هزینه برای حفر چاه زمین‌گرمایی ۷۵ دلار در نظر گرفته شده است [۲۶].

(۲) هزینه پمپ حرارتی شامل نصب و راه‌اندازی آن ۶۰۰۰ دلار در نظر گرفته شده است [۲۱].

(۳) هزینه کلکتور خورشیدی بر مبنای هر مترمربع تعیین می‌شود و شامل تمام هزینه‌های نصب و مواد لازم برای راه‌اندازی آن به مبلغ ۳۷۴ دلار بر مترمربع محاسبه شده است [۲۴].

جدول ۱۱ نشان‌دهنده هزینه‌های لازم برای راه‌اندازی سامانه تهویه مطبوع در شهرهای تحت بررسی است. در سیکل سرمایش جهت جریان مبرد، توسط شیر کنترل، عوض می‌شود. مبرد، گرمای

جدول ۹: میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در مدت یک سال در فصول موردنظر برای شهرهای تحت بررسی

Table 9: The average inlet fluid temperature to the HP during one year in understudying seasons for the intended cities

شهر	میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در مدت یک سال (درجه سلسیوس) در فصول نیازمند به گرمایش	میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در مدت یک سال (درجه سلسیوس) در فصول نیازمند به سرمایش
اردبیل	۱۵/۲	۴۹/۳
آمل	۱۷/۴	۵۱/۶
تهران	۱۷/۹	۵۲/۷
بوشهر	۱۴/۴	۵۲/۹

جدول ۱۰: افزایش مترآژ برای چاه برای رسیدن دمای سیال ورودی به شهر تهران در فصول نیازمند به گرمایش

Table 10: Increasing the borehole depth to reach the fluid inlet temperature of Tehran in the heating demand seasons

شهر تحت بررسی	میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در فصول نیازمند به گرمایش (°C)	عمق چاه در نظر گرفته شده (متر)	عمق چاه موردنیاز برای رسیدن به دمای سیال ورودی شهر تهران (متر)
تهران	۱۷/۹	۲۲۰	—
آمل	۱۷/۴	۲۲۰	۲۲۸
اردبیل	۱۵/۲	۲۲۰	۲۶۸
بوشهر	۱۴/۴	۲۲۰	۲۸۰

جدول ۱۱: هزینه‌های اولیه برای راه‌اندازی سیستم در فصول نیازمند به سرمایش در شهرهای تحت بررسی

Table 11: The initial costs for running the system in cooling demand seasons in the cities under investigation

کلکتور خورشیدی		حلقه مبدل حرارتی زمینی		هزینه تجزیه و تحلیل (بر حسب دلار آمریکا)			شهر
تعداد کلکتور ها	مساحت (m ²)	طول کل (m)	هزینه کلکتور خورشیدی	هزینه حلقه مبدل حرارتی زمینی و پمپ حرارتی	هزینه کلی سامانه		
۳	۶/۸۱	۲۲۰	۲۵۴۷	۲۲۵۰۰	۲۵۰۴۷	تهران	
۳	۶/۸۱	۲۲۸	۲۵۴۷	۲۳۱۰۰	۲۵۶۴۷	آمل	
۳	۶/۸۱	۲۶۸	۲۵۴۷	۲۶۰۲۵	۲۸۵۷۲	اردبیل	
۳	۶/۸۱	۲۸۰	۲۵۴۷	۲۷۰۰۰	۲۹۵۴۷	بوشهر	

دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی می‌شود. همچنین تأثیر اقتصادی جزء‌های کلکتور و بازیاب گرمایش از آب خاکستری به وسیله گرمایش کمکی مورد محاسبه قرار گرفت.

در بخش بعدی این سامانه برای اقلیم‌های متفاوت در کشور مورد واکاوی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که عملکرد کلی سیستم در اقلیم‌های گرم و خشک بهتر از نقاط سرد و خشک در کشور بوده و دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در شهر تهران بیشتر از شهر اردبیل است. همچنین شهر تهران با هزینه کلی راه اندازی ۲۵۰۴۷ دلار برای سامانه بهترین انتخاب و با میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی ۱۷/۹ درجه سلسیوس بهترین عملکرد را در فصول نیازمند به گرمایش داراست. شهر بوشهر نیز با میانگین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی ۵۲/۹ درجه سلسیوس دارای بهترین عملکرد در فصول نیازمند به سرمایش است.

تشکر و قدردانی

از دکتر فرزین معصومی‌راد و دکتر علی قریشی مدیسه برای دریغ نکردن انتقال معلوماتشان و حمایت‌هایشان کمال تشکر را داریم.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

Q	انتقال حرارت، W/m ²
GS	صرفه جویی گاز، m ³
GSC	هزینه صرفه جویی گاز، Rial/Year
V	حجم، m ³

خورشیدی ساخت کشور باعث می‌شود هزینه‌های استفاده از این سامانه به طرز چشمگیری کاهش یافته و آن را در کنار سایر تجهیزات سرمایشی و گرمایشی مرسوم جذاب سازد.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر روی سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با کلکتور خورشیدی، دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی از چاه‌های زمین‌گرمایی است. نخست تأثیر جزء بازیاب حرارت از آب خاکستری بر روی این پارامتر بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از این جزء موجب افزایش ۳/۲ درجه سلسیوسی دمای میانگین تانک و همچنین دمای سیال ورودی به پمپ حرارتی در طی مدت یک سال می‌گردد. همچنین بیشترین دمای ورودی سیال به پمپ حرارتی در صورت استفاده از جزء بازیاب ۷۰/۲ درجه سلسیوس و در صورت عدم استفاده از آن ۶۶ درجه سلسیوس است. در واقع پیش‌گرم کردن آب سرد ورودی به تانک آب گرم با آب بازگشتی باعث مصرف کمتر انرژی از جانب تانک و پمپ حرارتی می‌شود.

اگر تعادل‌سازی در بارهای زمینی به‌صورت سالانه انجام نپذیرد، ممکن است دمای زمین افزایش و یا کاهش یافته (به ترتیب در حالت سرمایش و گرمایش) که با ناکارآمدی سیستم پمپ حرارتی منبع زمین همراه می‌شود. عملکرد ۵ ساله سیستم با کلکتور خورشیدی و بدون آن و تأثیرات آن بر روی متوسط دمای ذخیره‌سازی زمین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد شارژ مجدد زمین با استفاده از کلکتور خورشیدی باعث بهبود عملکرد ۳ درصدی سیستم و افزایش

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m^3

زیرنویس

max بیشترین

بالانویس

* شرایط مرجع

مراجع

- systems in cold climate, Canada, Energy and Buildings, 61 (2013) 224-232.
- [11] J. Templeton, F. Hassani, S. Ghoreishi-Madiseh, Study of effective solar energy storage using a double pipe geothermal heat exchanger, Renewable energy, 86 (2016) 173-181.
- [12] V. Verma, K. Murugesan, Experimental study of solar energy storage and space heating using solar assisted ground source heat pump system for Indian climatic conditions, Energy and Buildings, 139 (2017) 569-577.
- [13] M. Mehrpooya, H. Hemmatabady, M.H. Ahmadi, Optimization of performance of combined solar collector-geothermal heat pump systems to supply thermal load needed for heating greenhouses, Energy Conversion and Management, 97 (2015) 382-392.
- [14] O. Ozgener, L. Ozgener, Modeling of driveway as a solar collector for improving efficiency of solar assisted geothermal heat pump system: a case study, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46 (2015) 210-217.
- [15] M. Homes, Green Initiative, Accessed; www.mattamyhomes.com, Hawthorne Village, Milton, (2006).
- [16] TRNbuild, Multi-zone Building Modeling. TRNSYS 16 manual 6.
- [17] Tehran Province Water & Wastewater, Inc, Accessed; www.tpww.ir, Tehran, Iran, (2018).
- [18] Renewability Energy, Inc, The Power-Pipe™, Accessed; www.powerpipe.com, Waterloo, Ontario, Canada, (2005).
- [19] Rheem-Canada, Ltd, Hot water tank, Accessed; www.rheem.com, Hamilton, Ontario, Canada (2005).
- [20] SmartSource™, 2-Stage Horizontal & Vertical Water Source Heat Pumps, Accessed; http://www.smartsource.ca, (2017), 47.
- [21] Venmar Ventilation, Inc, Accessed; www.venmar.ca/home.html, Drummondville (Québec), Canada, (2005).
- [22] Meteotest, Accessed; www.meteotest.ch, Meteororm Software. Switzerland, (2017).
- [23] Enerworks, Inc, Solar water heating solutions, Accessed; https://www.solarthermal.com, Dorchester, Ontario, Canada, (2005).
- [24] TRNSYS, A Transient System simulation program, TRNSYS 16 manual 4, (2004), 474.
- [25] Drain-Water Heat Recovery, Energy saver, Accessed; https://energy.gov, (2018).
- [26] Brenner, L, The Average Cost of Drilling a Water Well, Accessed, http://www.hunker.com, (2018).
- [1] I.B. Fridleifsson, R. Bertani, E. Huenges, J.W. Lund, A. Ragnarsson, L. Rybach, The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change, in: IPCC scoping meeting on renewable energy sources, proceedings, Luebeck, Germany, Citeseer, 2008, pp. 59-80.
- [2] X. Bu, W. Ma, H. Li, Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells, Renewable Energy, 41 (2012) 80-85.
- [3] B. Matek, Geothermal power: International market overview, Geothermal Energy Association Reports [Internet], (2013).
- [4] M. Santamouris, K. Pavlou, A. Synnefa, K. Niachou, D. Kolokotsa, Recent progress on passive cooling techniques: Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households, Energy and Buildings, 39(7) (2007) 859-866.
- [5] I. Dincer, C. Acar, A review on clean energy solutions for better sustainability, International Journal of Energy Research, 39(5) (2015) 585-606.
- [6] P. Metz, Use of ground coupled tanks in solar assisted heat pump systems. 1: Comparison of experimental and computer model results, American Society of Mechanical Engineers, (1982).
- [7] A.D. Chiasson, C. Yavuzturk, Assessment of the viability of hybrid geothermal heat pump systems with solar thermal collectors, Ashrae Transactions, 109 (2003) 487.
- [8] P. Eslami Nejad, A. Langlois, S. Chapuis, M. Bernier, W. Faraj, Solar heat injection into boreholes, in: Proceedings of the Fourth Annual Canadian Solar Buildings Conference, 2009, pp. 237-246.
- [9] S. Klein, A Transient System Simulation Program (TRNSYS 16) Manual, Thermal Energy System Specialists. Madison, USA, (2000).
- [10] F.M. Rad, A.S. Fung, W.H. Leong, Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump