Journal of Sustainable Energy Systems

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Research Paper

Optimizing Energy Consumption of Buildings Using Vertical Ground Source Heat Pumps (Case study: Tehran province)

Hossein Yousefi[1*], Arash Kargarzadeh[2], Fatemeh Javanshir[2], Mohammad Montazeri[2]

[1] Associate professor, Department of new energies and environment, University of Tehran, Iran
[2] Master of Science student, Department of new energies and environment, University of Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 05 January, 2022
Revised 15 Februery, 2022
Accepted 09 March, 2022

Keywords:
Designbuilder software
Geothermal energy
Green building
Renewable energies
Sustainable development

ABSTRACT

Introduction
Global energy demand is increasing for various reasons, including industrial development, economic growth, population growth, and lifestyle changes. On the other hand, fossil fuels cause many environmental problems, including global warming, climate change, ozone depletion, acid rain, water, and air and soil pollution. Incineration of fossil fuels since the beginning of the Industrial Revolution has emitted about 500 billion tons of carbon dioxide, about half of which remains in the atmosphere.

Material and Method
The faculty building consists of 4 floors. The total number of zones under the control of the faculty, which includes rooms, classrooms, workshops, laboratories, classrooms, toilets, and halls, is 152. The basement has 28 areas; the first floor has 39 areas, and the second and third floors have 34 and 51 areas, respectively. The peak load for the building's cooling needs during the year is 300 kW, and the maximum load required for heating is 155 kW. The faculty currently uses natural gas for heating and electricity for cooling systems.

In this research, a vertical geothermal system is designed for this educational building. The pipes of the vertical geothermal system are of the borehole type and are wound vertically into the ground from top to bottom.

By considering the standards of the systems and the fact that the maximum loads related to cooling and heating are 300 kW and 155 kW, respectively, the number of boreholes is 80. For this reason, the 80-hole geothermal heat pump system, which is also defined as standard in the software, is selected.

Results and Discussion
By installing the earth tube system in the building, the energy consumption of the building faces general changes. Figure 1 shows the energy consumption during a year while the geothermal system is responsible for providing the needs.

As shown in Figure 1, the energy consumption of the geothermal system consists of three sections: fans, pumps, and cooling and heating sections. This whole new system uses less electricity, and by using geothermal energy, natural gas consumption is reduced to zero.

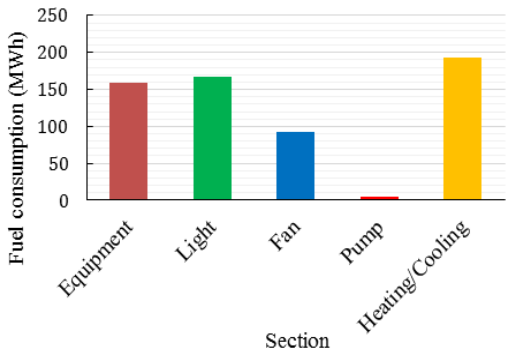


Figure 9. Building energy consumption over a year (Earth tube system)

The highest consumption is related to fans, and the lowest is related to pumps, equal to 92.07 and

*Corresponding Author, Email: hosseinyousefi@ut.ac.ir

3.36 MWh per year, respectively. The total energy consumption of this scenario is equal to 615.36 MWh per year, which produces 372.91 tons of carbon dioxide. By comparing the traditional system to this novel system, it is clear that the use of geothermal green energy has led to a significant reduction in energy consumption and carbon dioxide emissions. Total energy consumption decreased by 77.89 MW per year and carbon production by 20.83 tons.

Conclusion

This study aims to optimize energy consumption and reduce carbon emissions of buildings in Tehran province using a geothermal system. Therefore, the building of the Faculty of New Sciences and Technologies of the University of Tehran has been selected as the building under study. An 80-bore tube geothermal system installed vertically into the ground is designed for the building. The significant results of research and modeling are as follows:

- By using geothermal energy to provide the heating needs of the building, consumption of natural gas is reduced to zero.
- Replacing the traditional HVAC system and providing thermal comfort with the geothermal system is associated with a reduction in energy consumption of 77.89 MWh per year.
- The use of renewable geothermal energy reduces carbon production by 20.83 tons per year.

سیستم‌های انرژی پایدار، دورهٔ ۱، شمارهٔ ۱، زمستان ۲۰۲۲، ص ۳۱-۱۵

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

مقالهٔ پژوهشی

بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها با استفاده از سیستم زمین‌گرمایی عمودی (منطقهٔ مطالعاتی: استان تهران)

حسین یوسفی[1*]، آرش کارگرزاده[2]، فاطمه جوانشیر[2]، محمد منتظری[2]

[1] دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

[2] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۲۶

تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

کلیدواژه:

انرژی تجدیدپذیر

انرژی زمین‌گرمایی

توسعهٔ پایدار

ساختمان سبز

نرم‌افزار Designbuilder

چکیده

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای افزایش امنیت انرژی در کشورها، کاهش آلودگی‌های محیط زیستی و ایجاد توسعهٔ پایدار مدت‌ها است که در رأس توجه پژوهشگران است. این انرژی‌های پاک شامل استفاده از انرژی خورشیدی، بادی، آبی، زیست‌توده، هیدروژن، جزر و مد و زمین‌گرمایی است. ساختمان‌ها به عنوان یکی از مصرف‌کنندگان بزرگ انرژی و تولیدکنندگان بزرگ کربن دی‌اکسید، نیاز به حرکت به سمت توسعهٔ پایدار دارند. ساختمان سبز یا ساختمان پایدار طرحی نوین است که هدف از آن بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آلایندگی ساختمان‌ها با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. این تحقیق در نظر دارد که استفاده از سیستم زمین‌گرمایی را برای کاهش مصرف انرژی و تولید کربن دی‌اکسید در ساختمان‌های استان تهران بررسی کند. در همین راستا، ساختمان دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، واقع در استان تهران، به عنوان منطقهٔ مطالعاتی انتخاب شده است. برای طراحی و مدل‌سازی سیستم زمین‌گرمایی برای ساختمان مورد نظر، از نرم‌افزار Designbuilder استفاده می‌شود. تخصص این نرم‌افزار در مدل‌سازی سیستم‌های انرژی برای ساختمان‌ها است و یک ابزار قدرتمند در مدلسازی ساختمان سبز است. نتایج تحقیق در این مقاله نشان می‌دهد استفادهٔ سیستم زمین‌گرمایی برای تأمین نیاز حرارتی ساختمان، سبب حذف مصرف گاز طبیعی در ساختمان می‌شود. همچنین، با استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، برای تأمین نیاز سرمایش و گرمایش، مصرف الکتریسیته به میزان ۷۷/۸۹ مگاوات ساعت در سال کاهش یافته و تولید کربن نیز به میزان ۲۰/۸۳ تن در سال کاهش می‌یابد.

مقدمه

تقاضای انرژی جهانی به دلایل مختلفی از جمله توسعهٔ صنعتی، رشد اقتصادی، افزایش جمعیت و تغییرات سبک زندگی رو به افزایش است [۱]. از طرف دیگر، سوخت‌های فسیلی مشکلات محیط زیستی بسیاری را ایجاد می‌کنند؛ از جملهٔ آن‌ها می‌توان به گرمایش جهانی، تغییرات اقلیمی، نابودی لایهٔ ازن، باران‌های اسیدی، آلودگی آب، هوا و خاک اشاره کرد [۲]. سوزاندن سوخت‌های فسیلی از ابتدای انقلاب صنعتی، حدود ۵۰۰ میلیارد تن کربن دی‌اکسید منتشر کرده که تقریباً نیمی از آن در اتمسفر باقی مانده است [۳ و ۴].

منابع انرژی به دو دستهٔ تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم می‌شوند. منابع تجدیدناپذیر شامل سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ) و مواد رادیواکتیو

* نویسندهٔ مسئول

Email: hosseinyousefi@ut.ac.ir

(اورانیوم و ثوریوم) هستند و منابع تجدیدپذیر نیز عبارت‌اند از: خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی، آبی، جزر و مد، امواج و زیست‌توده [۵ و ۶]. امروزه سهم منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی از ۲۵ درصد تا ۴۰ درصد رو به افزایش است و انتظار می‌رود که این امر به وسیلهٔ ارتقای توسعهٔ سریع منابع انرژی تجدیدپذیر کم‌کربن و پاک و بهبود بازدهی انرژی تحقق یابد [۷]. کمیسیون اروپا میزان ۲۷ درصد را به عنوان هدفی در سهم تولید انرژی توسط منابع تجدیدپذیر تا سال ۲۰۳۰ تعیین کرده است [۸]. استفاده از منابع انرژی کم‌کربن راهی برای تأمین نیاز جهانی انرژی هم‌زمان با کاهش تأثیرات محیط زیستی است.

در این تحقیق، یک سیستم زمین‌گرمایی لوله‌ای مخصوص برطرف کردن نیازهای حرارتی ساختمان‌ها در نرم‌افزار Designbuilder طراحی و شبیه‌سازی شده است. استفاده از سیستم زمین‌گرمایی به جای سیستم خنک‌کاری و گرمایشی ساختمان به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آلودگی‌های محیط زیستی کمک می‌کند. شماتیک سیستم به صورت کامل گزارش شده است. وظیفهٔ این سیستم برطرف کردن نیازهای سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها در استان تهران است.

انرژی زمین‌گرمایی

انرژی زمین‌گرمایی به عنوان یک منبع انرژی پاک و پایدار از اوایل قرن ۲۰ به طور گسترده‌ای رواج یافته است. انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰، تولید الکتریسیته از طریق انرژی زمین‌گرمایی به میزان سالانه ۱۴۰۰ تراوات ساعت برسد که حدود ۳/۵ درصد از تولید برق جهانی است. تولید انرژی گرمایی توسط آن نیز می‌تواند به مقدار ۵/۸ EJ باشد که حدود ۳/۹ درصد مقدار نهایی پیش‌بینی‌شدهٔ انرژی برای گرمایش به گزارش آژانس بین‌المللی انرژی است [۹ و ۱۰].

انرژی زمین‌گرمایی یک منبع انرژی تجدیدپذیر است، زیرا گرما به طور مداوم در داخل زمین تولید می‌شود. حتی در مناطق زمین‌گرمایی که وابسته به یک مخزن آب گرم است، حجم آب گرم خارج‌شده را می‌توان دوباره به زمین تزریق کرد و آن را به یک منبع انرژی پایدار تبدیل کرد. همچنین، نیروگاه زمین‌گرمایی فقط میزان اندکی دی‌اکسید گوگرد آزاد می‌کند و بقیهٔ خروجی آن بخار آب است که به طبیعت باز می‌گردد.

انرژی زمین‌گرمایی بر اساس دمای منبع برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های زمین‌گرمایی با دمای منبع زیاد (بزرگ‌تر از ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد)، معمولاً به طور غیر مستقیم برای تولید توان و سیستم‌های پیچیده‌تر به کار می‌روند. به طور کلی، سیستم‌های با دمای منبع کم به صورت مستقیم برای گرمایش و سرمایش فضا به کار می‌روند. همچنین، سیستم‌های با دمای پایین و دمای متوسط (۹۰-۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد) می‌توانند با یک طراحی مخصوص و جدید به نیروی الکتریسیته تبدیل شوند [۱۱ و ۱۲]. در جدول ۱ دو نوع مختلف سیستم زمین‌گرمایی با توجه به عمق حفاری مختلف نشان داده شده است [۱۳].

انرژی زمین‌گرمایی یک انرژی سبز و تجدیدپذیر است که از انرژی گرمایی ذخیره‌شده در پوستهٔ زمین که توسط فرایندهای طبیعی واپاشی رادیواکتیو مواد موجود در زیر زمین تولید شده، استفاده می‌کند. با وجود مخزن عظیمی از ماگمای ذوب‌شده در هسته، زمین به طور پیوسته گرما را به پوستهٔ خارجی منتقل می‌کند [۱۴]. با توجه به برآورد شورای انرژی جهان[1]، میزان کل انرژی در دسترس موجود در پوستهٔ زمین برابر با $۵/۴x۱۰^{۲۷}$ ژول است. با به‌کارگیری فقط ۰/۱ درصد از این انرژی، می‌توان تقاضای انرژی ۲ هزار سال جهان را با توجه به تقاضای انرژی جهانی کنونی که برابر با $۲/۷x۱۰^{۲۱}$ ژول است، تأمین کرد [۱۵].

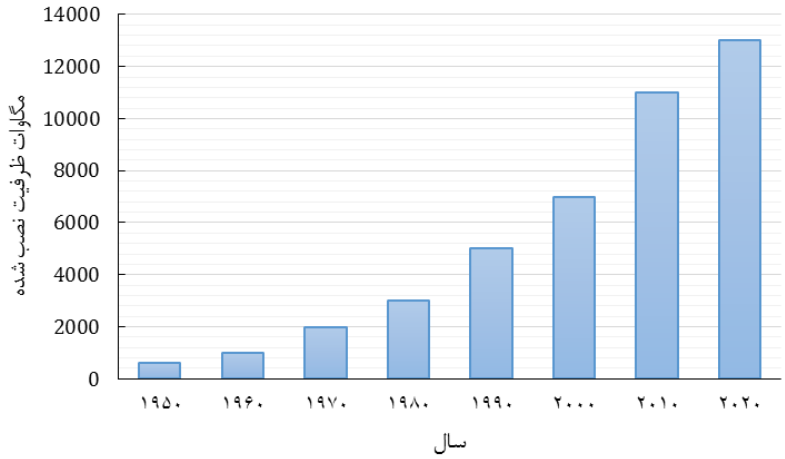
انرژی زمین‌گرمایی می‌تواند برای تولید برق از طریق ژنراتورهای توربینی یا برای کاربردهای مستقیم استفاده شود [۱۴].

تولید برق از طریق انرژی زمین‌گرمایی در حال حاضر در ۲۶ کشور سراسر دنیا صورت می‌پذیرد و میزان ظرفیت برق تولیدی از طریق انرژی زمین گرمایی در سال ۲۰۲۰ برابر با ۹۴ تراوات ساعت بوده است [۱۶]. حدود ۸۲ کشور در دنیا به صورت مستقیم از انرژی زمین‌گرمایی استفاده می‌کنند که ظرفیت گرمایی بهره‌برداری‌شدهٔ آن برابر با ۷۰۳۲۹ MWt است [۱۶]. شکل ۱ ظرفیت جهانی نیروگاه‌های زمین‌گرمایی بهره‌برداری‌شده و شکل ۲ سهم مناطق مختلف در ظرفیت زمین‌گرمایی در سال ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد [۱۲].

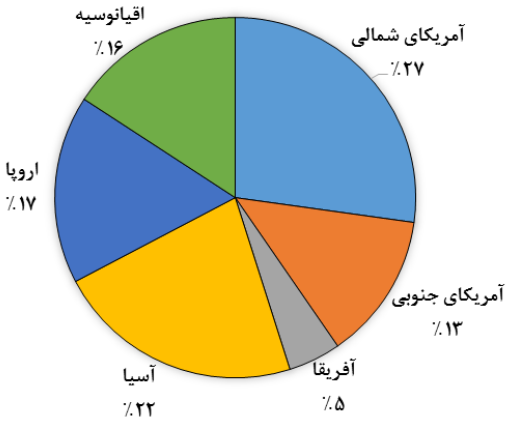
1. WEC: World Energy Council

جدول ۱. دو نوع سیستم زمین‌گرمایی، ویژگی و وضعیت آن‌ها [۱۳]

انواع	سیستم زمین‌گرمایی	عمق حفاری (متر)	بازه دمایی (°C)	وضعیت کنونی
سیستم زمین‌گرمایی کم‌عمق	سیستم زمین‌گرمایی متداول (دما پایین)		۱۰۰>	نیروگاه زمین‌گرمایی تجارت‌گرا
	سیستم زمین‌گرمایی متداول (دما متوسط)	۲۰۰۰-۱۰۰۰	۲۰۰-۱۰۰	
	سیستم زمین‌گرمایی متداول (دما بالا)		۳۰۰-۲۰۰	
	مبدل لوله‌ای افقی	تا ۱۰	دمای خاک محل	تجاری‌سازی‌شده
	مبدل لوله‌ای عمودی	۹۰ تا ۳۰۰		
سیستم زمین‌گرمایی عمیق	سیستم زمین‌گرمایی بهبودیافته[1]	۵۰۰۰-۳۰۰۰	۳۰۰-۱۰۰	نیروگاه زمین‌گرمایی بخشی تجارت‌گرا
	سیستم‌های زمین‌گرمایی فوق بحرانی	نزدیکی گدازه‌ها	۶۰۰-۴۰۰	در مرحلهٔ تحقیق و توسعه



شکل ۱. ظرفیت جهانی نیروگاه‌های زمین‌گرمایی بهره‌برداری‌شده [۲۱]



شکل ۲. سهم مناطق مختلف در ظرفیت زمین‌گرمایی در سال ۲۰۱۵ [۱۲]

1. EGS : Enhanced Geothermal System

عوامل مختلفی بر تولید انرژی زمین‌گرمایی تأثیرگذارهستند: ترکیبی از شرایط ژئولوژیکی بهینه که شامل گرادیان زمین‌گرمایی بالا، حضور سیال هیدروترمال، شار گرمایی بالا، نفوذپذیری و تخلخل بالای سنگ [۱۸].

بیشتر سیستم‌های زمین‌گرمایی مورد استفاده در نزدیکی مرزهای تکتونیک و آتشفشان‌ها در محل‌هایی که پوستهٔ زمین دچار شکستگی شده باشد، یافت می‌شوند که منابع گرمایی قابل دسترسی را عرضه می‌دهند [۱۹].

مبدل‌های حرارتی لوله‌ای زمینی[1]

طریقهٔ دیگر کاربرد انرژی زمین‌گرمایی به‌جز نیروگاه‌ها، مبدل‌های حرارتی لوله‌ای زمینی است که یک روش پاک برای تأمین بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌های مسکونی و تجاری می‌تواند باشد [۲۰].

در این سیستم، یک لولهٔ طویل در عمقی مشخص دفن شده که در آنجا هوای جوی به وسیلهٔ یک دمنده مکش شده، خنک می‌شود و سپس، در فصل تابستان به بیرون فرستاده می‌شود و به‌عکس این عمل در فصل زمستان روی می‌دهد [۲۱]. در واقع، این سیستم بر پایهٔ این مفهوم کار می‌کند که هرچه به اعماق زمین می‌رویم، تأثیرات تغییرات دمایی شروع به پدیدار شدن می‌کند [۲۲]. همچنین، استفاده از لوله‌های زمینی در فصل زمستان، سبب جلوگیری از یخ زدن آب حاصل از میعانی که روی صفحات مبدل قرار دارد نیز می‌شود [۲۳]. شکل ۳ شماتیکی ساده از آرایش یک سیستم لوله‌های زمینی را نشان می‌دهد [۲۴].

عملکرد حرارتی این نوع سیستم، به طور عمده به دو عامل بستگی دارد:

عامل اول شرایط جوی و ویژگی‌های خاک و عامل دوم پارامترهای عملیاتی مانند سرعت جریان هوا، قطر لوله، طول لوله و عمقی که لوله در آن دفن شده است. از آنجا که شرایط جوی و ویژگی‌های خاک قابل تغییر نیستند، بنابراین نیاز است تا پارامترهای عملیاتی بهینه شوند [۲۵].

با ترکیب این نوع سیستم با سایر سیستم‌های غیرفعال و با داشتن یک طراحی گرمایشی خوب در ساختمان می‌توان به پیش‌گرم کردن هوا در فصل زمستان و کاهش استفاده از وسایل سرمایشی در ساختمان، در فصل تابستان کمک کرد که در نتیجهٔ آن با یک کاهش اساسی در بار الکتریکی مصرفی ساختمان روبه‌رو خواهیم شد [۲۵].

نرم‌افزار Designbuilder

این نرم‌افزار اولین رابط کاربری جامع برای Energyplus که یک موتور شبیه‌سازی حرارتی پویا است و توسط آزمایشگاه لارنس برکلی آمریکا توسعه یافته است [۲۶].

نرم‌افزار Designbuilder به مدل‌سازی ساختمان در زمینه‌های مختلف مانند مصالح، معماری، بارهای سرمایشی و گرمایشی، سیستم‌های روشنایی، آسایش حرارتی و آب گرم مصرفی ساختمان می‌پردازد و این شبیه‌سازی‌ها را بر اساس اطلاعات ساعتی آب و هوا انجام می‌دهد [۲۷ و ۲۸].

پیشینهٔ تحقیق

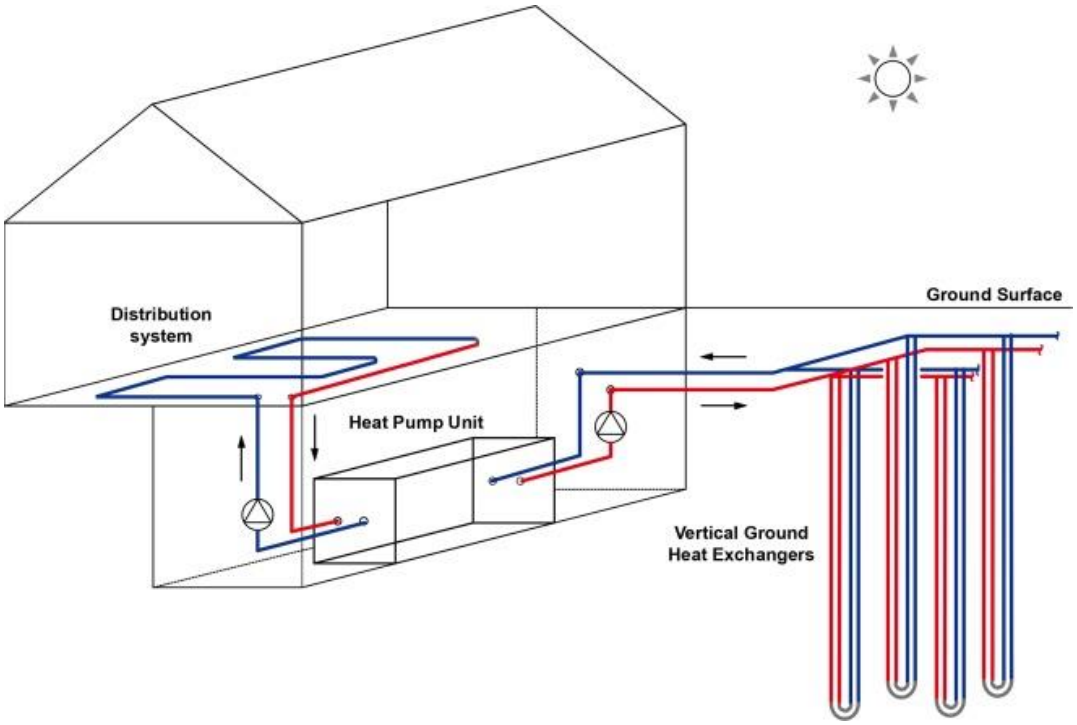
نوراللهی و همکاران، در مقاله‌ای تحت عنوان «امکان‌سنجی فنی، اقتصادی و محیط زیستی جایگزینی گرمایش شهری متعارف با انرژی زمین‌گرمایی در ایران»، به بررسی بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی با کاربری گرمایش ساختمان‌ها و فضاهای خانگی، تجاری و عمومی در شهرهای واقع در حوزه‌های زمین‌گرمایی پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد سالانه در مصرف بیش از ۳۷۸ میلیون لیتر نفت سفید، ۱۵۰ میلیون لیتر نفت گاز، ۶۴ میلیون نفت کوره و ۱۳۷۰ میلیون مترمکعب گاز طبیعی صرفه‌جویی خواهد شد که در صورت صادرات آن، بیش از ۷۲۵۲ میلیون دلار در سال عاید کشور می‌کند [۲۹].

کوهل و همکاران، به بررسی یک مبدل گرمایی نصب‌شده در ۲۳۰۲ متر زیر سطح زمین در یک چاه گمانه در سوئیس پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد با تنظیم مناسب میزان چرخش سیال، نیروی حرارتی تولیدشده از میزان ۴۰ کیلووات به مقدار ۲۰۰ کیلووات افزایش یافته است [۳۰].

سیوکری ایمران و همکاران در مقاله‌ای به مدل‌سازی یک ساختمان مسکونی معمولی در ساواراک توسط موتور Energyplus پرداختند و تأثیرات لوله‌های زمینی[2] را برای سرمایش ساختمان به صورت غیرفعال تعیین کردند.

1. Ground source heat exchanger (GSHE)

2. Earth tube



شکل ۳. شماتیکی ساده از آرایش یک سیستم لوله‌های زمینی [۲۳]

در نتیجه آن یافتند که دمای داخلی ناحیهٔ شرقی ساختمان می‌تواند از ۳۳ درجهٔ سانتی‌گراد به ۲۹/۵ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش پیدا کند. یک افت مضاعف به میزان ۰/۶ درجهٔ سانتی‌گراد نیز در صورت کاهش فضای اشغال‌شده توسط لوله‌های زمینی می‌تواند حاصل شود [۳۱].

یوسفی و همکاران، یک شبیه‌سازی برای ارزیابی تولید برق از طریق یک چاه زمین‌گرمایی به عنوان یک سیستم زمین‌گرمایی پیشرفته را با تزریق یک سیال ثانویه انجام داده‌اند. در نتیجهٔ این کار، نیروی الکتریکی به میزان ۲۷۰ کیلووات از چاه با استفاده از مبدل حرارتی درون‌چاهی[1] به دست آمد [۳۲].

شاران به توسعهٔ برخی کاربردهای مبدل‌های حرارتی لوله‌ای زمینی در گورجات هند پرداخته است. در این گزارش مشاهده شده است که این سیستم می‌تواند هوای سرد را به میزان ۱۲ تا ۱۳ درجهٔ سانتی‌گراد گرم کند و همچنین، می‌تواند هوا را از مقدار ۴۰/۸ درجهٔ سانتی‌گراد به میزان ۲۷/۲ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش دهد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد افزایش طول لوله عملکرد سیستم را بهبود بخشیده است [۲۵].

یوسفی و همکاران در مقاله‌ای با عنوان «مطالعهٔ امکان‌سنجی و ارزیابی اقتصادی پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی در ایران»، به بررسی تأثیر تغییرات دما و رطوبت بر اقتصاد سیستم پمپ‌های حرارتی زمینی پرداخته‌اند. آن‌ها ۹ منطقه با دما و رطوبت مختلف برای این کار انتخاب کردند. در نتیجه، شهری با پایین‌ترین دما نتایج بهینه را نشان داد و اثر رطوبت نیز قابل صرف نظر کردن بود. در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز شهری که بیشترین مصرف گاز طبیعی را داشت، بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را به دنبال داشت [۳۳].

چاونهان و همکاران، به انجام محاسبات تئوری لوله‌هایی با دو قطر متفاوت ۰/۱ و ۱/۵ متر و دو طول متفاوت ۱۵ و ۲۹ متر پرداخته‌اند. لوله‌ها که از جنس پلی وینیل کلراید بوده، در عمق ۳ تا ۵ متر دفن شده‌اند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد لوله با قطر کوچک‌تر در مقایسه با قطرهای بزرگ‌تر افت دمای بیشتری دارد و همچنین، هرچه طول لوله بیشتر باشد، افت دما نیز بیشتر است. یک مدل تحلیلی نیز با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent توسعه داده شد که یک افت دمای ۱۸ درجهٔ سانتی‌گرادی را با همان پارامترهای مشابه نتیجه داد [۲۱].

1. Down-hole

باراکات و همکاران نوعی مدل تک‌بعدی ناپایدار را برای پیش‌بینی تأثیر پارامترهای هندسی و دینامیکی مبدل حرارتی لوله‌ای زمینی مانند طول لوله، قطر و سرعت هوای این سیستم توسعه دادند. محاسبات عددی آن با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. نتایج به این صورت بود که لوله با قطر کوچک‌تر و طول بیشتر که در اعماق بیشتری دفن شده است، دمای هوای خروجی را کاهش خواهد داد. همچنین، این سیستم توان تولیدی خروجی و بازدهی حرارتی را به‌ترتیب به مقادیر ۹ درصد و ۴/۵ درصد افزایش خواهد داد [۳۴].

مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا منطقهٔ مطالعاتی بررسی شده و ویژگی‌های آن ذکر می‌شود. سپس، به بررسی پارامترهای مطالعاتی، روابط و معادلات حاکم بر سیستم، سیستم زمین‌گرمایی طراحی‌شده و ویژگی‌های آن می‌پردازیم. در نهایت، سناریوهای تحقیق تعریف شده و شرایط و اهداف هر یک مشخص می‌شود.

منطقهٔ مطالعاتی

هدف از این تحقیق، بررسی استفاده از سیستم‌های زمین‌گرمایی برای برطرف کردن نیاز حرارتی ساختمان‌ها در استان تهران است. از این‌رو، ساختمان دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران به عنوان منطقهٔ مطالعاتی این تحقیق انتخاب شده است.

ساختمان دانشکده شامل ۴ طبقه بوده که ۱ طبقه زیر زمین است. مجموع محیط‌های تحت کنترل[1] دانشکده که شامل اتاق‌ها، کلاس‌ها، کارگاه‌ها، آزمایشگاه‌ها، سلف، سرویس بهداشتی و سالن‌ها می‌شود، برابر ۱۵۲ عدد است. به این صورت که طبقهٔ زیرزمین دارای ۲۸ منطقه، طبقهٔ اول دارای ۳۹ منطقه، طبقهٔ دوم و سوم نیز به‌ترتیب دارای ۳۴ و ۵۱ منطقه‌اند.

اوج بار مصرفی برای نیازهای سرمایشی ساختمان طی سال برابر ۳۰۰ kW بوده و بیشینهٔ بار مورد نیاز برای مصارف گرمایشی برابر ۱۵۵ kW است. در حال حاضر، دانشکده از گاز طبیعی برای گرمایش و از الکتریسیته برای سیستم‌های سرمایشی استفاده می‌کند. هر دو منبع انرژی یادشده توسط شبکهٔ اصلی تأمین می‌شود.

شکل ۴ نمایی از دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران که در نرم‌افزار Designbuilder طراحی شده است را نشان می‌دهد. خطوطی که در بالای ساختمان دانشکده در شکل ۴ از شرق به غرب کشیده شده‌اند، مسیر خورشید در ساعت‌های مختلف در یک سال را نشان می‌دهد. علاوه بر آن، بلوکی که در زیر طبقهٔ اول طراحی شده از نوع بلوک زمین[2] بوده و طبقهٔ ۱- در آن قرار دارد. تمامی پنجره‌های ساختمان از جنس دو جدارهٔ شفاف بوده و هر دو طرف آن ضخامتی ۶ میلی‌متری دارد و سیال بین دو شیشه نیز هوا است.

چون دیوارهای خارجی[3] دانشکده به عنوان عاملی مهم در اتلاف انرژی نقش دارند، در نرم‌افزار مدل شده‌اند. شکل ۵ نمای برش‌خوردهٔ دیوار خارجی ساختمان که شامل جنس و ضخامت آن است را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۵ به‌وضوح قابل مشاهده است، دیوارهای خارجی شامل ۴ لایه می‌شوند. این لایه‌ها از داخل به بیرون ساختمان به‌ترتیب شامل موارد زیر می‌شوند:

- لایهٔ گچ به ضخامت ۱۳ میلی‌متر
- بلوک سیمانی به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر
- عایق پلی استایرن که ضخامتی برابر با ۷۹/۵ میلی‌متر دارد
- نمای آجری با ضخامتی ۱۰۰ میلی‌متری

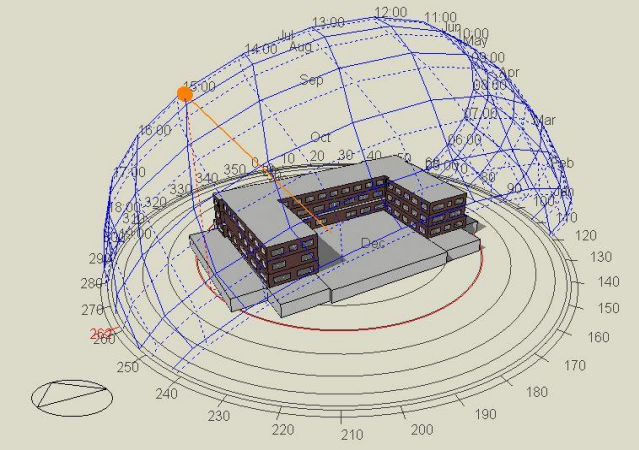
پارامترهای مطالعه‌شده

آسایش حرارتی، مصرف سوخت و تولید آلودگی‌های محیط زیستی همگی با تغییر سیستم گرمایش، سرمایش و تهویهٔ سنتی و جایگزین شدن سیستم زمین‌گرمایی تغییر خواهند کرد. بنابراین، پس از مدل‌سازی سیستم‌های زمین‌گرمایی برای ساختمان‌های مورد نظر، این سه پارامتر باید نسبت به حالت اولیه مقایسه شوند.

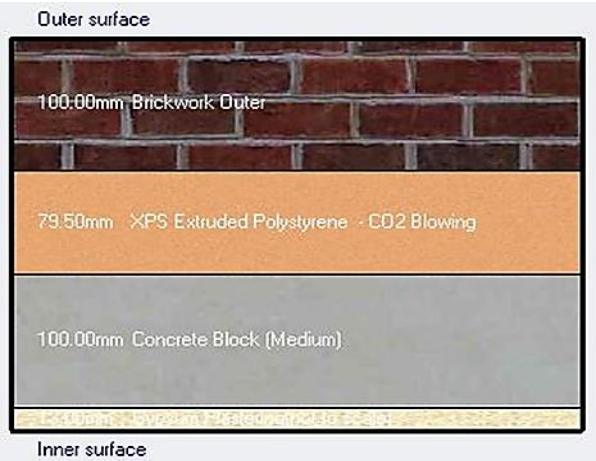
آسایش حرارتی شامل دمای هوای داخل ساختمان است. سوخت مصرفی نیز در این پژوهش شامل برق و گاز طبیعی است. کربن دی‌اکسید تولیدی نیز در انتها بررسی شده تا تأثیر سیستم مورد نظر را بر محیط زیست نشان دهد.

1. zones

2. Ground block
3. External walls



شکل ۴. نمایی از دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران در نرم‌افزار Designbuilder



شکل ۵. نمای برش‌خوردهٔ دیوار خارجی ساختمان شامل جنس و ضخامت

سیستم زمین‌گرمایی طراحی‌شده

دو نوع سیستم زمین‌گرمایی برای تأمین نیازهای ساختمان‌ها قابل استفاده است: نوع افقی و نوع عمودی. در این پژوهش سیستم زمین‌گرمایی عمودی[1] برای ساختمان آموزشی مورد نظر طراحی شده است. لوله‌های سیستم زمین‌گرمایی عمودی از نوع گمانه‌ای بوده و به صورت عمودی رو داخل زمین و از بالا به پایین پیچیده‌اند[2].

برای انتخاب تعداد گمانه‌های مورد نیاز، استاندارد موجود در جدول ۲ استفاده شده و تعداد و نوع این گمانه‌ها و لوله‌های انتقال سیال با توجه به این استاندارد در نرم‌افزار تعیین شده است. این استاندارد بر پایهٔ حداکثر میزان بار مورد نیاز برای گرمایش و یا سرمایش طراحی شده است [۳۵]. برای استفاده از جدول ۲ باید به محل تقاطع ستون و سطر مربوط به حداکثر بار سرمایشی و گرمایشی توجه کرد. به این صورت که اگر حداکثر بار سرمایشی ساختمان ۸۰ کیلووات و حداکثر بار گرمایشی آن ۶۰ کیلووات باشد، به طور تقریبی ۲۴ گمانه مورد نیاز است.

با در نظر گرفتن جدول ۲ و این موضوع که بیشینهٔ بار مربوط به سرمایش و گرمایش به‌ترتیب برابر ۳۰۰ kW و ۱۵۵ kW است، تعداد گمانه‌ها ۸۰ عدد در نظر گرفته شده است. به همین دلیل، سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی ۸۰ گمانه‌ای[3]، که در نرم‌افزار نیز به صورت استاندارد تعریف شده است، انتخاب شد.

از سیستم زمین‌گرمایی یادشده برای تأمین هر دو نیاز سرمایش و گرمایش ساختمان می‌توان استفاده کرد.

1. Vertical heat pump
2. U-tube borehole
3. Vertical U-tube 80 boreholes

جدول ۲. استاندارد انتخاب تقریبی تعداد گمانه‌های سیستم زمین‌گرمایی عمودی [۳۴]

		حداکثر بار سرمایشی (کیلووات)									
		۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
حداکثر بار گرمایشی (کیلووات)	۱۰	۴	۴	۸	۸	۸	۱۲	۱۲	۱۲	۱۶	۱۶
	۲۰	۸	۸	۸	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۶	۱۶
	۳۰	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
	۴۰	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
	۵۰	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
	۶۰	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۴۰
	۷۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
	۸۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
	۹۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
	۱۰۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰

سیستم انتقال حرارت و جابه‌جایی سیال در سیستم‌های زمین‌گرمایی که قابلیت طراحی در نرم‌افزار Designbuilder را دارند، سه نوع و به شرح زیر است: [۳۶]

- سیستم طبیعی: در این سیستم از جریان طبیعی حاصل از همرفت هوا در داخل واحد ساختمان برای انتقال حرارت استفاده می‌شود. این سیستم مصرف انرژی مازاد ندارد، ولی کمترین بازدهی را دارد.
- سیستم فن‌های محدود: از تعداد فن‌هایی برای انتقال هوا از روی لوله‌ها استفاده می‌شود. این سیستم بازدهی متوسط دارد.
- سیستم فن‌های کامل: در این روش سیستم با قرار دادن فن‌ها در تمامی مراکز مورد نیاز، بازدهی را به حداکثر می‌رساند.

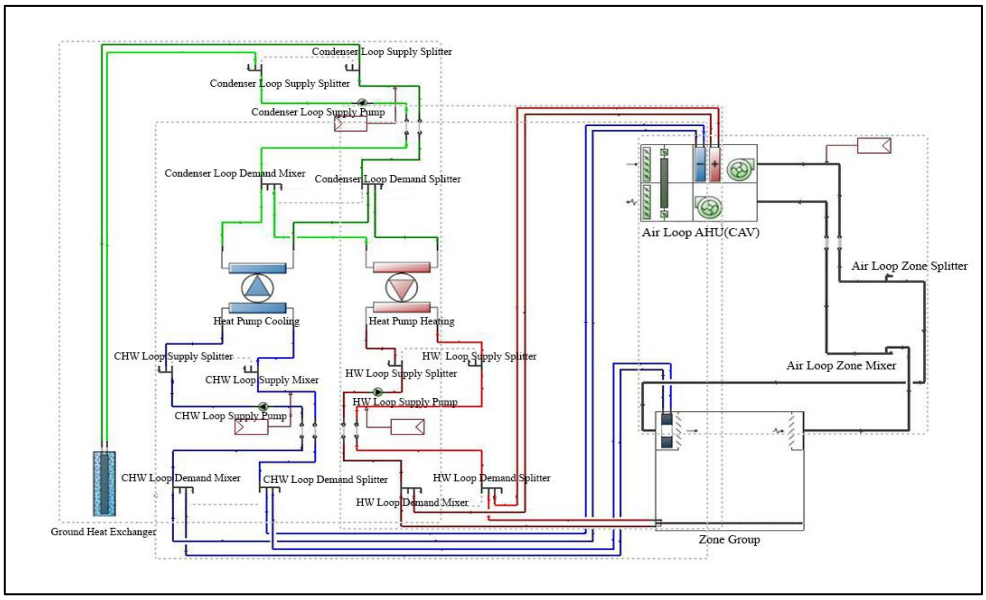
در مدل‌سازی صورت‌گرفته، از سیستم فن‌های کامل که بیشترین راندمان را دارد، استفاده شده است. علاوه بر فن‌ها، سیستم زمین‌گرمایی طراحی‌شده از پمپ نیز برای جابه‌جایی سیال داخل لوله‌ها استفاده می‌کند.

سیستم‌های زمین‌گرمایی قابلیت گرم کردن و خنک کردن را بسته به نیاز ساختمان دارند. هر یک از این عملکردها نیز طراحی خاص خود را دارد. در این پژوهش، سیستم زمین‌گرمایی طراحی‌شده در نرم‌افزار دارای هر دو قابلیت خنک کردن و گرم کردن با هم دارد. برای طراحی سیستم یادشده، از مدل سیستم تهویهٔ هوا و تأمین آسایش حرارتی با جزئیات[1] در نرم‌افزار استفاده شده است. این مدل کمک می‌کند تا سیستم‌هایی با کاربری‌ها و مشخصات ویژه در نرم‌افزار به‌راحتی تنظیم و شبیه‌سازی شوند. شکل ۶ سیستم زمین‌گرمایی طراحی‌شده برای این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶، سیستم طراحی‌شده دارای ۴ بخش اصلی است. بخش‌های اول و دوم به‌ترتیب مربوط به چرخهٔ سیستم خنک‌کاری و چرخهٔ سیستم گرمایش است. این دو به‌ترتیب از چپ به راست با فلش بالا و پایین در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند. بخش سوم چرخهٔ مربوط به کندانسور است. این چرخه از محل قرارگیری لوله‌های عمودی در زمین در پایین سمت چپ شکل ۶ شروع می‌شود و در بالاتر به تجهیزات اصلی کندانسور می‌رسد. بخش چهارم نیز چرخهٔ هوا است که در بالا سمت راست شکل ۶ قرار دارد. این بخش شامل فن‌ها و کویل‌های گرم‌کننده و خنک‌کننده است.

سه پارامتر کنترلی در سیستم زمین‌گرمایی طراحی‌شده وجود دارد که برای کنترل عملکرد این سیستم در ساختمان استفاده می‌شود. این سه پارامتر شامل حداقل دمای ساختمان برای خنک‌کاری، حداکثر دمای ساختمان هنگام گرم کردن و اختلاف دمای داخل و زمین[2] برای شروع فعالیت سیستم است. حداقل دمای ساختمان هنگام خنک‌کاری ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد و حداکثر دما برای گرم کردن نیز ۲۶ درجهٔ سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. پارامتر اختلاف دما نیز ۱ درجهٔ سانتی‌گراد تعیین شده است [۳۶].

1. Detailed HVAC system

2. Delta temperature



شکل ۶. سیستم زمین‌گرمایی طراحی‌شده با قابلیت گرم کردن و خنک‌کاری بسته به نوع نیاز

معادلات حاکم بر سیستم

مصرف الکتریسیته در سیستم‌های لوله‌ای زمین‌گرمایی از معادلهٔ ۱ به دست می‌آید [۳۷].

$$W_s = W_u + W_p + W_{fc} + W_{fa} \quad (۱)$$

در این معادله W_s، W_u، W_p، W_{fc} و W_{fa} به‌ترتیب برابر با مصرف برق سیستم، مصرف برق هر واحد آن، مصرف پمپ‌های انتقال سیال، میزان مصرف فن‌هایی که به انتقال حرارت از لوله‌ها کمک می‌کنند و الکتریسیته مصرفی واحدهای تولید هوای تازه است. واحد این پارامترها نیز kW است.

میزان بازده انرژی در سیستم خنک‌کننده و گرم‌کنندهٔ طراحی‌شده نیز به‌ترتیب از معادلهٔ ۲ و معادلهٔ ۳ پیروی می‌کند [۳۷].

در رابطهٔ ۲، E

$$EER_s = \frac{Q_c}{W_s} \quad (۲)$$

$$COP_s = \frac{Q_h}{W_s} \quad (۳)$$

ER_s برابر با بازده انرژی سیستم خنک کاری و Q_c متعلق به ظرفیت سرمایش است. در رابطهٔ ۳ نیز، COP_s متعلق به بازده سیستم گرمایشی است و Q_h نیز ظرفیت گرمایش است.

هنگامی که واحدهای انتقال حرارت سیستم زمین‌گرمایی فعال می‌شوند، برای محاسبهٔ میزان دریافت شده از خاک از معادلهٔ ۴ استفاده می‌شود. علاوه بر حرارت دریافتی از خاک، حرارتی که در خاک تخلیه می‌شود نیز توسط رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود [۳۶].

$$Q_{teu} = \sum_{i=1}^{n} Q_{h,i} \left(1 - \frac{1}{COP_{u,i}}\right) \quad (۴)$$

$$Q_{tru} = \sum_{i=1}^{n} Q_{c,i} \left(1 - \frac{1}{EER_{u,i}}\right) \quad (۵)$$

در رابطه‌های ۴ و ۵، Q_{teu} و Q_{tru} به‌ترتیب برابر با حرارت دریافتی و تخلیه‌شده در خاک است. Q_h و Q_c نیز به‌ترتیب ظرفیت گرمایش و سرمایش‌اند.

سیال آب در داخل لوله‌ها قرار دارد و طی دو نوع انتقال حرارت همرفتی و رسانش با محیط گرمای مورد نیاز را دفع یا جذب می‌کند. انتقال حرارت در داخل لوله در خود سیال از نوع همرفتی بوده و در بدنهٔ لوله از داخل به بیرون از نوع رسانش است. همچنین، فن‌ها نیز با دمیدن هوا روی لولهٔ انتقال حرارت همرفتی اجباری را رقم می‌زنند. میزان انتقال حرارت رسانشی از طریق رابطهٔ ۶ و میزان انتقال حرارت همرفتی از طریق رابطهٔ ۷ محاسبه می‌شوند [۳۸].

$$Q_{cond} = mC_p \Delta T \quad (۶)$$

$$Q_{conv} = hA\Delta T_{lm} \quad (۷)$$

در رابطهٔ ۶، m آهنگ انتقال جرم، Cp برابر ظرفیت گرمایی و ΔT اختلاف دمای نقطه‌های مورد بررسی است. در رابطهٔ ۷، h متعلق به ضریب جابه‌جایی انتقال حرارت همرفتی، A برابر مساحت سطح محل مورد بررسی و ΔT_{lm} از رابطهٔ ۸ به دست می‌آید [۳۸].

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_i - T_o)}{\ln(\frac{T_i - T_s}{T_o - T_s})} \quad (۸)$$

که در این رابطه، T_i دمای ورودی، T_o دمای خروجی و T_s دمای خاک است.

انتقال حرارت کلی سیستم زمین‌گرمایی لوله‌ای طراحی‌شده نیز با استفاده از رابطهٔ ۹ محاسبه می‌شود [۳۸].

$$Q = \frac{T_a - T_s}{R_{conv} + R + R_s} \quad (۹)$$

در رابطهٔ ۹، R_{conv}، R و R_s به‌ترتیب برابر با مقاومت انتقال حرارت همرفتی، مقاومت انتقال حرارت رسانایی لوله و مقاومت انتقال حرارت رسانایی خاک است. T_a نیز برابر با دمای هوا و T_s دمای خاک است. مقاومت انتقال حرارت همرفتی از رابطهٔ ۱۰، مقاومت انتقال حرارت رسانایی لوله از طریق رابطهٔ ۱۱ و در نهایت، مقاومت انتقال حرارت رسانایی خاک نیز از طریق رابطهٔ ۱۲ محاسبه می‌شود [۳۸].

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_i} \quad (۱۰)$$

$$R = \frac{1}{2\pi kL}\ln(\frac{r_o}{r_i}) \quad (۱۱)$$

$$R_s = \frac{L_w}{K_s A_o} \quad (۱۲)$$

در روابط یادشده، A_i برابر با سطح انتقال حرارت همرفتی، A_o برابر سطح انتقال حرارت رسانایی، L برابر طول، L_w برابر ضخامت دیوارهٔ خاک، r_o شعاع خارجی، r_i شعاع داخلی و k ضریب انتقال حرارت رسانایی است.

سناریوهای تعریف‌شده

به طور کلی، دو نوع مدل‌سازی در نرم‌افزار Designbuilder صورت گرفته است:

- سناریوی سیستم تهویهٔ سنتی: این مدل‌سازی در حالتی است که ساختمان از همان سیستم تهویه، گرمایش و سرمایش سنتی خود استفاده می‌کند. هدف از این سناریو، بررسی حالت امروزهٔ ساختمان و تأثیرات عدم استفاده از انرژی‌های سبز است.
- سناریوی سیستم تهویهٔ تجدیدپذیر: سیستم زمین‌گرمایی ۸۰ گمانه‌ای، که توسط استاندارد جدول ۲ طراحی شده و شماتیک آن در شکل ۶ نمایش داده شده، در ساختمان جایگزین سیستم سنتی قبلی شده است. در نهایت، نتایج این سناریو پس از گزارش شدن با سناریوی اول مقایسه می‌شود.

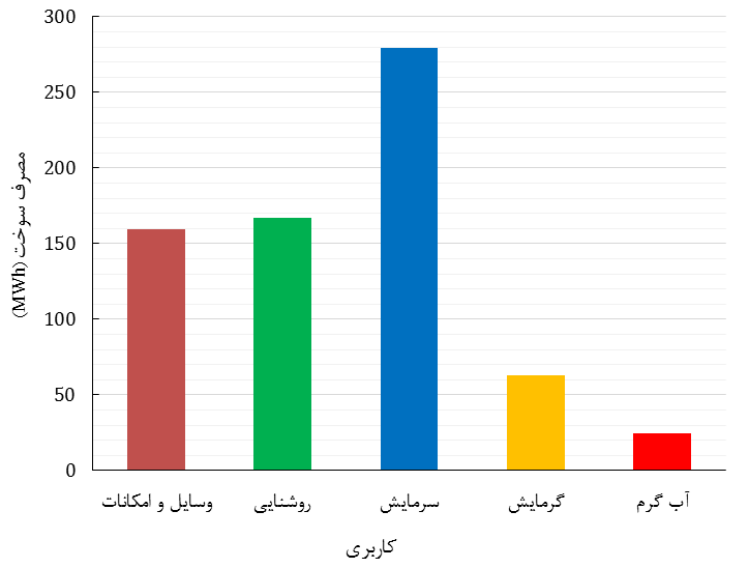
نتیجه‌گیری و بحث

در این بخش نتایج مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار ارائه می‌شود. این نتایج شامل دمای هوای داخل ساختمان، میزان مصرف انرژی و کربن دی‌اکسید تولیدشده در هر دو سناریو است.

سیستم تهویه و تأمین آسایش حرارتی سنتی

این حالت، همان حالت امروزهٔ ساختمان است که از گاز طبیعی برای گرم نگه داشتن ساختمان در فصول سرد و الکتریسیته برای خنک‌کاری در فصول گرم استفاده می‌کند. شکل ۷ مصرف انرژی ساختمان به تفکیک هر کاربری را طی یک سال نشان می‌دهد. شکل ۸ نیز دمای هوای داخل ساختمان طی ماه‌های مختلف سال را گزارش می‌کند.

با توجه به شکل ۷، بار انرژی مربوط به سرمایش ساختمان با میزان ۲۷۹/۳۲ مگاوات ساعت در سال بیشترین سهم مصرف را دارد. در مقابل آن، تأمین آب گرم ساختمان با میزان مصرف ۲۴/۴۳ مگاوات ساعت در سال صاحب کمترین میزان مصرف انرژی است. بار گرمایشی ساختمان نیز مصرفی معادل ۶۳/۰۱ مگاوات ساعت در سال دارد. به طور کلی، انرژی مصرفی نشان‌داده‌شده در شکل ۷، باعث تولید ۳۹۳/۷۴ تن کربن دی‌اکسید می‌شود. شکل ۸ نیز نشان می‌دهد دمای هوای داخل ساختمان طی یک سال بین ۱۹/۰۹ و ۲۵/۴۶ درجه نوسان می‌کند.



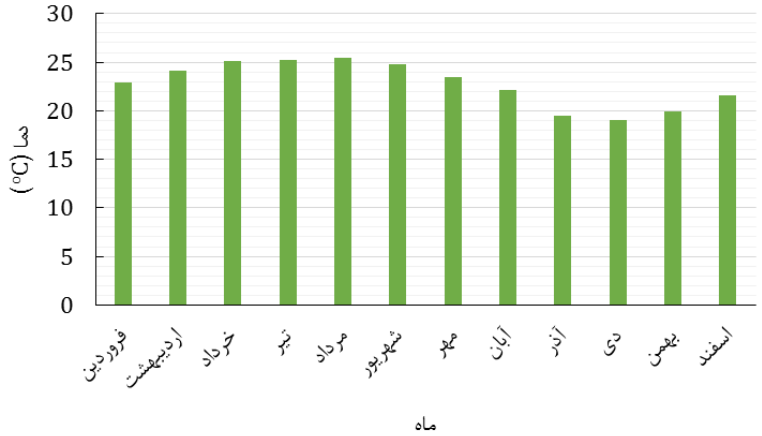
شکل ۷. مصرف انرژی ساختمان طی یک سال (سناریوی سیستم تهویهٔ سنتی)

بهینه‌سازی توسط سیستم زمین‌گرمایی

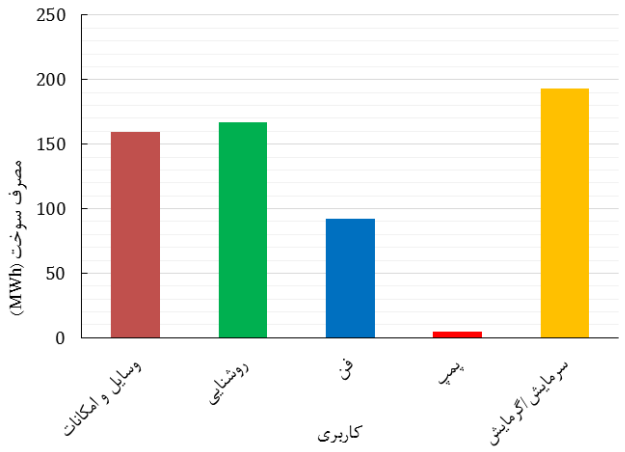
با نصب شدن سیستم زمین‌گرمایی در ساختمان مصرف انرژی ساختمان به طور کلی تغییر می‌کند. شکل ۹ مصرف انرژی طی یک سال را در حالی که سیستم زمین‌گرمایی وظیفهٔ تأمین نیازها را دارد، نمایش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، مصرف انرژی سیستم زمین‌گرمایی شامل سه بخش فن‌ها، پمپ‌ها و بخش ایجاد سرمایش و گرمایش است که در شکل ۶ نیز در بالا سمت راست نشان داده شده است. تمامی این سیستم جدید از الکتریسته استفاده می‌کند و با استفاده از سیستم زمین‌گرمایی، مصرف گاز طبیعی به صفر می‌رسد. بیشترین میزان مصرف مربوط به فن‌ها و کمترین میزان نیز مربوط به پمپ‌ها است و به‌ترتیب برابر ۹۲/۰۷ و ۳/۳۶ مگاوات ساعت در سال است. کل مصرف انرژی این سناریو برابر با ۶۱۵/۳۶ مگاوات ساعت در سال است که باعث تولید ۳۷۲/۹۱ تن کربن دی‌اکسید می‌شود. با مقایسهٔ سناریوی اول و دوم مشخص می‌شود که استفاده از انرژی سبز زمین‌گرمایی برای تأمین نیاز ساختمان منجر به کاهش مصرف انرژی و کاهش تولید کربن دی‌اکسید به میزان چشم‌گیری شده است. مصرف کلی انرژی به میزان ۷۷/۸۹ مگاوات ساعت در سال و تولید کربن به میزان ۲۰/۸۳ تن کاهش یافته است.

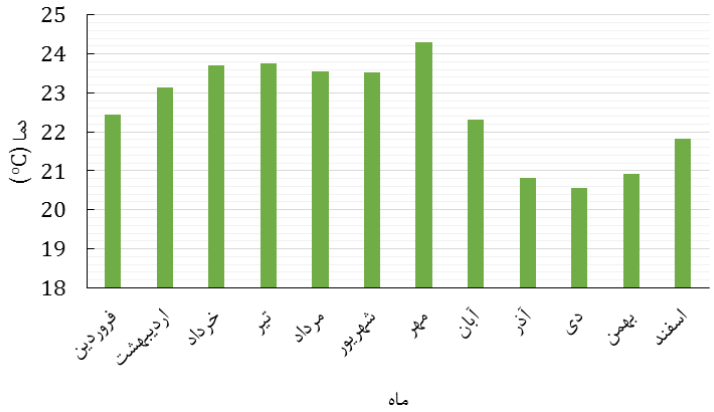
علاوه بر مصرف انرژی و آثار محیط زیستی، آسایش حرارتی نیز نیاز به بررسی دارد. دمای هوای داخل ساختمان طی ماه‌های مختلف سال در شکل ۱۰ گردآوری شده است.



شکل ۸. دمای هوای داخل ساختمان در ماه‌های مختلف سال (سناریوی سیستم تهویهٔ سنتی)



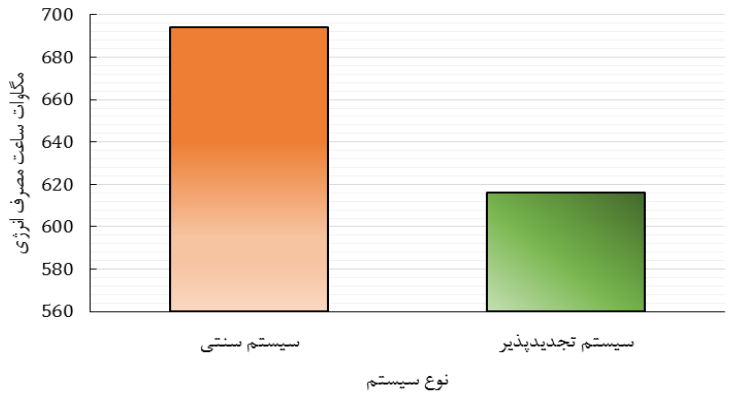
شکل ۹. مصرف انرژی ساختمان طی یک سال (سناریوی سیستم تهویهٔ تجدیدپذیر)



شکل ۱۰. دمای هوای داخل ساختمان در ماه‌های مختلف سال (سناریوی سیستم تهویهٔ تجدیدپذیر)

شکل ۱۰ نشان می‌دهد دمای هوای داخل ساختمان از ۲۰/۵۵ تا ۲۴/۳۱ درجهٔ سانتی‌گراد طی سال تغییر می‌کند. با مقایسهٔ شکل‌های ۸ و ۱۰ این نتیجه حاصل می‌شود که سیستم زمین‌گرمایی در برطرف کردن نیازهای حرارتی ساختمان و برقراری آسایش حرارتی موفق است.

شکل ۱۱ نیز میزان مصرف انرژی ساختمان در هر دو سناریو را به طور خلاصه نمایش می‌دهد. بر اساس این شکل، سیستم تجدیدپذیر نزدیک به ۷۸ مگاوات ساعت در مصرف انرژی سالانه صرفه‌جویی می‌کند.



شکل ۱۱. مقایسهٔ کلی مصرف انرژی در ساختمان در دو سناریوی طراحی‌شده

بررسی امکان احداث پروژه

با توجه به جغرافیا و محل قرارگیری ساختمان دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، فناوری موجود در زمینهٔ پمپ‌های حرارتی و پیشرفت‌های ایران در سال‌های اخیر امکان احداث پمپ‌های حرارتی در این ساختمان وجود دارد. با نصب سیستم طراحی‌شده در این ساختمان، ساختمان به صورت مستقل از گاز طبیعی نیازهای حرارتی خود را تأمین خواهد کرد. با استناد به محاسبات صورت‌گرفته در این پژوهش و معتبر بودن شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌های نرم‌افزار؛ در صورت نیاز به احداث این پروژه می‌توان از نتایج این مقاله بهره‌مند شد. سرمایه‌گذاری روی انرژی‌های تجدیدپذیر در ساختمان با کاهش هزینه‌های آینده همراه است. در صورت تأمین نیازهای مالی برای راه‌اندازی این پروژه پیش‌بینی می‌شود که هزینه‌های صرفه‌جویی‌شدهٔ ناشی از کاهش مصرف انرژی به بازگشت سرمایهٔ اولیه در زمانی معقول منجر شود. سرمایه‌گذاری در پروژه‌های مشابه برای سایر مراکز آموزشی و دولتی نیز باعث کاهش هزینه‌های انرژی این مراکز در آینده و همچنین، کاهش آلودگی‌های محیط زیستی خواهد شد.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تولید کربن ساختمان‌ها در استان تهران با استفاده از سیستم زمین‌گرمایی است. از این‌رو، ساختمان دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران به عنوان ساختمان تحت مطالعه انتخاب شده است. سیستم زمین‌گرمایی لوله‌ای ۸۰ گمانه‌ای که به صورت عمودی در خاک فرو رفته است، برای ساختمان طراحی شد. مهم‌ترین نتایج تحقیق و مدل‌سازی صورت‌گرفته به شرح زیر است:

- استفاده از سیستم زمین‌گرمایی برای برطرف کردن نیاز گرمایی ساختمان، باعث حذف مصرف گاز طبیعی شده است. در این حالت ساختمان یادشده مستقل از گاز طبیعی شده است.
- جایگزین کردن سیستم تهویه و تأمین آسایش حرارتی سنتی با سیستم زمین‌گرمایی با کاهش مصرف انرژی ۷۷/۸۹ مگاوات ساعتی در سال همراه است (درخور یادآوری است که این سیستم مستقل از شبکه نیست، اما باعث کاهش چشمگیر مصرف برق شده است).
- استفاده از انرژی تجدیدپذیر زمین‌گرمایی باعث کاهش تولید کربن به میزان ۲۰/۸۳ تن در سال می‌شود.
- سیستم زمین‌گرمایی طراحی‌شده در برقراری آسایش حرارتی ساختمان موفق است و دمای هوای داخلی ساختمان تفاوت چندانی با حالت استفاده از سیستم سنتی ندارد.

منابع

[1]. Kazemi AR, Mahbaz SB, Dehghani-Sanij AR, Dusseault MB, Fraser R. Performance evaluation of an enhanced geothermal system in the Western Canada Sedimentary Basin. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019 1 October;113:109278.

[2]. Yousefi H, Montazeri M, Rahmani A. Techno-economic Analysis of Wind Turbines Systems to Reduce Carbon Emission of Greenhouses: A Case Study in Iran. In7th Iran Wind Energy Conference (IWEC2021) 2021 May 17 (pp. 1-4). IEEE.

[3]. Mardiana A, Riffat SB. Building energy consumption and carbon dioxide emissions: threat to climate change. Journal of Earth Science & Climatic Change. 2015 1 January (S3):1.

[4]. Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature. 2010 Feb;463(7282):747-56.

[5]. Jahangir MH, Montazeri M, Mousavi SA, Kargarzadeh A. Reducing carbon emissions of industrial large livestock farms using hybrid renewable energy systems. Renewable Energy. 2022 Apr 1;189:52-65.

[6]. Kinney C, Dehghani-Sanij A, Mahbaz S, Dusseault MB, Nathwani JS, Fraser RA. Geothermal energy for sustainable food production in Canada’s remote northern communities. Energies. 2019 Jan;12(21):4058.

[7]. Dehghani-Sanij AR, Dehghani SR, Naterer GF, Muzychka YS. Marine icing phenomena on vessels and offshore structures: Prediction and analysis. Ocean engineering. 2017 Oct 1;143:1-23.

[8]. Oztig LI. Europe's climate change policies: The Paris Agreement and beyond. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy. 2017 3 October;12(10):917-24.

[9]. Heubaum H, Biermann F. Integrating global energy and climate governance: The changing role of the International Energy Agency. Energy Policy. 2015 Dec 1;87:229-39.

[10]. Beerepoot M, FRANKL P. Technology roadmap: Geothermal heat and power. Renewable Energy Division, International Energy Agency, OECD/IEA, Paris ed. 2011.

[11]. Nian YL, Cheng WL. Evaluation of geothermal heating from abandoned oil wells. Energy. 2018 1 January;142:592-607.

[12]. Nian YL, Cheng WL. Insights into geothermal utilization of abandoned oil and gas wells. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018 May 1;87:44-60.

[13]. Pan SY, Gao M, Shah KJ, Zheng J, Pei SL, Chiang PC. Establishment of enhanced geothermal energy utilization plans: Barriers and strategies. Renewable energy. 2019 Mar 1;132:19-32.

[14]. Kumari WG, Ranjith PG. Sustainable development of enhanced geothermal systems based on geotechnical research–A review. Earth-Science Reviews. 2019 1 December;199:102955.

[15]. Bertani R. Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. geothermics. 2012 1 January;41:1-29.

[16]. Olabi AG, Mahmoud M, Soudan B, Wilberforce T, Ramadan M. Geothermal based hybrid energy systems, toward eco-friendly energy approaches. Renewable Energy. 2020 Mar 1;147:2003-12.

[17]. Lund JW, Boyd TL. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. Geothermics. 2016 Mar 1;60:66-93.

[18]. Cheng WL, Wang CL, Nian YL, Han BB, Liu J. Analysis of influencing factors of heat extraction from enhanced geothermal systems considering water losses. Energy. 2016 Nov 15;115:274-88.

[19]. Elders WA, Moore JN. Geology of geothermal resources. Geothermal Power Generation. 2016 Jan 1:7-32.

[20]. Ghafoor DZ, Khdir YK. Experimental Investigation of Earth Tube Heat Exchanger (ETHE) for Controlled Ventilation in Erbil. In2020 6th International Engineering Conference "Sustainable Technology and Development"(IEC) 2020 26 February (pp. 80-85). IEEE.

[21]. Nethra MR, Kalidasan B. Earth tube heat exchanger design for efficiency enhancement of PV panel. Materials Today: Proceedings. 2021 1 January;45:587-91.

[22]. Butler TJ, Littlewood JR, Howlett R. Earth Tubes—Clean-Tech Method for Improving Occupant Health and Comfort. InSustainability in Energy and Buildings 2020 2021 (pp. 561-570). Springer, Singapore.

[23]. Kang Y, Nagano K. Field measurement of indoor air quality and airborne microbes in a near-zero energy house with an earth tube in the cold region of Japan. Science and Technology for the Built Environment. 2016 2 October;22(7):1010-23.

[24]. Darkwa J, Kokogiannakis G, Magadzire CL, Yuan K. Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system. Energy and Buildings. 2011 Feb 1;43(2-3):728-36.

[25]. Badgaiyan P, Agrawal S. CFD base performance evaluation of earth-air tube heat exchanger for natural air conditioning. Invention Journal of Research Technology in Engineering & Management. 2016;1(1):01-5.

[26]. Yaşar Y, Kalfa SM. The effects of window alternatives on energy efficiency and building economy in high-rise residential buildings in moderate to humid climates. Energy conversion and management. 2012 Dec 1;64:170-81.

[27]. Rasouli and Rahbar, Modeling the energy consumption of the amphitheater building of Semnan Azad University, using Design Builder software, Journal of Mechanical and Vibration Engineering. 2018 10 December (1): p. 14-23. (in Persian) [28] Heravi G, Qaemi M. Energy performance of buildings: The evaluation of design and construction measures concerning building energy efficiency in Iran. Energy and Buildings. 2014 1 June;75:456-64.

[28]. Noorollahi Y, Yousefi H, Rezayan AH, Farabi Asl H. Technical, Economical and Environmental Feasibility Study of Urban Heating System Replaced with Geothermal Energy in IRAN. Journal of Environmental Science and Technology. 2016 Dec 21;18(4):73-88.

[29]. Kohl T, Brenni R, Eugster W. System performance of a deep borehole heat exchanger. Geothermics. 2002 Dec 1;31(6):687-708.

[30]. Imran MS, Baharun A, Ibrahim SH, Abidin WA. Investigation of earth tube system application in low income building in Kuching, Sarawak. Journal of Engineering Science and Technology. 2017 1 June;12(6):1433-45.

[31]. Noorollahi Y, Mohammadzadeh Bina S, Yousefi H. Simulation of power production from dry geothermal well using down-hole heat exchanger in Sabalan Field, northwest Iran. Natural Resources Research. 2016 Jun;25(2):227-39.

[32]. Yousefi H, Ármannsson H, Roumi S, Tabasi S, Mansoori H, Hosseinzadeh M. Feasibility study and economical evaluations of geothermal heat pumps in Iran. Geothermics. 2018 Mar 1;72:64-73.

[33]. Barakat S, Ramzy A, Hamed AM, El Emam SH. Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system. Energy conversion and management. 2016 Mar 1;111:137-46.

[34]. Designbuilder, *GSHP case study*, 2018. https:// designbuilder.co.uk/helpv4.5/Content /GSHPCaseStudy.htm. Accessed 2020.09.22

[35]. Designbuilder, Earth Tubes Configuration, 2018. https:// designbuilder.co.uk/helpv4. 2/Content/EarthTubes.htm. Accessed 2020.09.22

[36]. Yuan T, Ding Y, Zhang Q, Zhu N, Yang K, He Q. Thermodynamic and economic analysis for ground-source heat pump system coupled with borehole free cooling. Energy and Buildings. 2017 Nov 15;155:185-97.

[37]. Nethra, M. R., and B. Kalidasan. Earth tube heat exchanger design for efficiency enhancement of PV panel. Materials Today: Proceedings, 2020.