

امکان سنجی استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی جهت تامین درصدی از انرژی بنا

(نمونه موردی: بررسی کارآیی سیستم در یک بنای آموزشی در تهران)*

صدیقه سادات میریان^{۱**}، مرتضی خلجی اسدی^۲، محمدتقی رضایی حریری^۳

^۱ کارشناس ارشد معماری و انرژی، تهران، ایران.

^۲ دانشیار دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

^۳ دانشیار دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۲/۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۰/۴/۲)

چکیده:

با شروع فصل گرم و سرد و خارج شدن شرایط دمایی از محدوده آسایش، برای دستیابی به دمای مطلوب درون ساختمان نیاز به یک منبع انرژی داریم. زمین به طور طبیعی منبع حرارتی بسیار عظیمی است که در زیر ساختمان ها، حیاط ها و میدانی شهری وجود داشته و به سهولت قابل دسترسی است. با استفاده از دمای یکنواخت اعماق خاک در طول سال می توان با عبور دادن هوای محیط از میان بستر خاک زیربنا، با استفاده از اصل انتقال حرارت و با توجه به اختلاف دمای خاک و هوای محیط، هوای عبوری را در فصل گرم، سرد و در فصل سرد، پیش گرم نمود. در این پژوهش، دمای خاک در تهران با استفاده از یک مدل حرارتی محاسبه گردیده و سپس با استفاده از یک مدل ساده از سیستم لوله های زیرزمینی، ظرفیت سرمایشی و گرمایشی این سیستم برای یک ساختمان آموزشی در تهران برآورد و میزان درصد صرفه جویی در مصرف انرژی تخمین زده شده است. نکته قابل توجه این است که با استفاده از اصل رسانش گذرا در مدل مذکور، بیشترین زمانی که این سیستم در تهران حداکثر کارایی را دارد، ۱۱۵ روز در فصل گرم و ۱۵۰ روز در فصل سرد از زمان شروع فعالیت سیستم می باشد.

واژه های کلیدی:

سیستم لوله های زیرزمینی، دمای یکنواخت خاک، مدل سازی حرارتی، صرفه جویی انرژی، بنای آموزشی.

*مقاله حاضر برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول تحت همین عنوان است که در دانشکده معماری دانشگاه تهران به انجام رسیده است.

**نویسنده مسئول: تلفن: ۰۲۱-۲۲۱۲۰۳۳۷، نماین: ۰۲۱-۶۶۹۷۲۰۷۶، E-mail: nasim_mirian@yahoo.com

مقدمه

در تونس صورت گرفته است، دمای خاک در اعماق مختلف به صورت تجربی و با استفاده از یک مدل ریاضی تخمین زده شده و با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین با استفاده از یک مدل ساده حرارتی در حالت پایا برای سیستم لوله های زیرزمینی، میزان ظرفیت گرمایشی و سرمایشی^۲ سیستم در اقلیم مدیترانه ای جنوبی ارزیابی و اثر پارامترهایی چون خواص فیزیکی خاک، طول و شعاع لوله ها بر آن سنجیده شده است و با توجه به اقلیم تونس که دارای ۳ ماه گرم، ۳ ماه سرد و ۶ ماه معتدل باشد، استفاده از این سیستم مفید خواهد بود. سودا و همکاران (Sodha et al, 1985)، با بررسی سیستم لوله های زیرزمینی نصب شده در یک مجتمع بیمارستانی در هند و با استفاده از اندازه گیری دمای هوای درون لوله ها به صورت تجربی و مقایسه آن با یک مدل ساده ریاضی به اندازه گیری میزان ظرفیت سرمایشی سیستم پرداخته و به این نتیجه رسیده است که مقدار ظرفیت گرمایشی برای تامین شرایط آسایش با توجه به شرایط موجود در محل ناکافی است.

مساله قابل توجهی که در بیشتر مقالات و پژوهش ها از نظر دور مانده است، تغییرات دمای خاک اطراف لوله های زیرزمینی در اثر گذشت زمان و در نتیجه کاهش کارایی سیستم در اواخر فصل گرم یا سرد خواهد بود. در شروع استفاده از سیستم دمای خاک در عمق ۴ الی ۶ متری، به اندازه دمای هوای میانگین سال خواهد بود که با گذشت زمان و مبادله حرارت از هوا به خاک و بالعکس، دمای خاک (روی سطح لوله) شروع به افزایش و یا کاهش کرده و در اثر گذشت زمان با کم شدن مقدار اختلاف دمای خاک و هوای درون لوله های زیرزمینی، مقدار شار گرمایی کاهش یافته و سیستم به مرور بازده پیشین خود را از دست می دهد. به همین دلیل نیاز است تا علاوه بر بررسی سیستم از نظر حرارتی (مانند پژوهش های ذکر شده)، سیستم لوله های زیرزمینی با استفاده از یک مدل حرارتی پیچیده تر (رسانش گذرا^۳) نیز بررسی شده تا بیشترین مدتی را که سیستم از لحاظ عملکرد در موقعیت خوبی به سر می برد را بیابیم. در این مقاله، در ابتدا با استفاده از یک مدل حرارتی ساده ریاضی (شرایط پایا^۴) دمای خروجی از لوله های زیرزمینی تحت شرایط مختلف بررسی و سپس پارامترهای مهم در طراحی سیستم لوله های زیرزمینی برای یک ساختمان آموزشی خاص در تهران محاسبه شده و میزان درصد صرفه جویی نهایی مشخص شده است. سپس با استفاده از یک مدل رسانشی گذرا تغییر دمای خاک بالایی سطح لوله ها در طول زمان محاسبه شده و با بررسی این تغییر دما، تعداد روزهایی را که می توان با بیشترین بهره از سیستم استفاده نمود، مشخص شده است.

آسایش محیطی، اقتصاد و میزان مصرف انرژی بخشی از مهم ترین ملاحظات در رابطه با ساختمان ها می باشند. در بیشتر ساختمان های آموزشی، تجاری، اداری و مسکونی سیستم های تهویه مطبوع الکتریکی به طور گسترده ای جهت تامین شرایط آسایش و سلامت ساکنین مورد استفاده قرار می گیرند که این تقاضا به مرور زمان به طور فزاینده ای رو به رشد است. افزایش هزینه ها، کاهش منابع انرژی های فسیلی و تجدید ناپذیر و آسیب های محیط زیست سبب انجام تحقیقات گسترده ای در زمینه تکنیک های خورشیدی و سیستم های فعال و غیرفعال^۱ از سال ۱۹۷۰ در کل جهان شده است. یکی از این سیستم ها که در بیشتر نقاط دنیا تحقیقات وسیعی روی آن انجام شده است، سیستم لوله های زیرزمینی^۲ می باشد. بر اساس بررسی های انجام شده دمای خاک در عمق ۴ الی ۶ متری به اندازه دمای هوای میانگین سال خواهد بود. در این سیستم هوای محیط خارج وارد لوله های زمینی شده و پس از تبادل حرارت با خاک، جهت تهویه و کاهش مقدار بار حرارتی ساختمان به کار می رود. این سیستم در بیشتر مواقع شامل یک یا چند لوله با طول و شعاع خاص می باشد که جهت سرمایش هوای عبوری از آن در تابستان و یا پیش گرمایش هوای عبوری در زمستان مورد استفاده قرار می گیرد. پدیده فیزیکی صورت گرفته بسیار ساده است. دمای خاک معمولاً در تابستان کمتر و در زمستان بیشتر از دمای هوای محیط است و به این دلیل می توان از خاک به عنوان یک جاذب گرما و سرما در طول سال استفاده کرد. در تابستان هوای گرم محتوای گرمای خود را از طریق جابجایی به لوله های زیرزمینی و سپس از طریق رسانش به خاک منتقل کرده و نسبتاً خنک می شود و سپس وارد فضای ساختمان و یا هواساز می شود. در زمستان نیز با عبور هوای سرد از درون لوله ها، خاک گرمای خود را به هوای درون لوله های زیرزمینی منتقل کرده و هوای خروجی را تا حدی پیش گرم می کند که این هوای پیش گرم شده پس از رسیدن به دمای مطلوب توسط هواساز وارد فضای ساختمان می شود.

آزمایشات و پژوهش های بسیاری بر روی این سیستم انجام شده است. اسیون و همکاران (Ascione et al, 2011) در مقاله خود میزان کارایی سیستم لوله های زیرزمینی را برای یک ساختمان اداری نمونه دارای سیستم تهویه مطبوع برای سه اقلیم مختلف در ایتالیا بررسی کرده و دریافته اند که بهترین عملکرد سیستم لوله های زیرزمینی از نظر بهره وری انرژی در اقلیم سردتر خواهد بود و در صورتی که طول لوله ها کمتر از ۱۰ متر باشند، سیستم از نظر حرارتی بازده بسیار کمی خواهد داشت. همچنین در پژوهشی که توسط دربل و همکاران (Derbel et al, 2010)

سالانه محیط در نظر گرفته شود. دامنه موج دمای روزانه سطح زمین معمولاً در تابستان و مخصوصاً در نواحی گرم و خشک هنگامی که تابش خورشیدی بر سطح زمین به حداکثر مقدار خود می‌رسد، بیشترین مقدار و در فصل زمستان مخصوصاً در نواحی سرد با پوشش برف روی سطح زمین کمترین مقدار را دارد. مقدار دامنه اصلی موج دمایی سطح زمین به قابلیت بازتابندگی سطح و پخشندگی خاک در محل وابسته است. در اکثر مواقع، دامنه تغییرات روزانه موج دمای زمین در تابستان، در عمق ۳۰ سانتی متری از ۵ درجه سانتی گراد بیشتر نخواهد شد. همچنین موج های گرما و سرما که فقط چند روز دوام می آورند تا عمق حدود ۶۰ سانتی متری بیشتر نفوذ نمی کنند. در اعماق بیش از ۶۰ سانتی متر فقط الگوی دمای سالانه هوا قابل توجه بوده و میانگین دمای ماهیانه به تنهایی می تواند جهت پیش بینی دمای زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. همانطور که ذکر شد دمای خاک در اعماق مختلف به صورت نوسانات سینوسی تابعی از دمای هوا در طول سال می باشد و هر چه از سطح خاک به سمت اعماق خاک پیش می رویم، این نوسانات کمتر شده و دمای خاک نسبتاً یکنواخت می شود. همین امر باعث می شود تا بتوان از خاک به عنوان جاذب گرما یا سرما استفاده نمود. دمای لایه های زیرین خاک، به صورت عددی بر پایه تئوری انتقال حرارت در جسم جامد نیم نامتناهی^۱ مدلسازی شده است. دمای خاک علاوه بر اینکه به عواملی چون عمق و زمان مورد بررسی بستگی دارد به عوامل دیگری نیز چون پخشندگی حرارتی خاک^۲ (α) که خود تابعی از چگالی^۳، رسانندگی گرمایی^۴ و گرمایی ویژه خاک^۵ می باشد، وابسته است (Kusuda et al., 1983).

رسانش گرمایی در خاک را می توان توسط معادله گرما به شکل زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

با توجه به حل تحلیلی این معادله، دمای خاک در هر عمقی از خاک و در هر زمانی توسط عبارت زیر قابل محاسبه است:

$$T(z, t) = T_{mean} + A \cos \left[\omega(t - t_0) - \frac{z}{d} \right] \times \exp \left(-\frac{z}{d} \right)$$

T_{mean} = دمای میانگین سالانه هوا (درجه سانتیگراد)

t_0 = زمان وقوع گرم‌ترین روز سال از اول ژانویه (ساعت)

A = دامنه موج دمای هوا در طول ۱۰ سال (درجه سانتیگراد)

z = ارتفاعی از خاک زیر سطح (متر)

ω = فرکانس موج دمای هوای سالانه $\left(\frac{2\pi}{365 \times 24} \right)$

α = پخشندگی حرارتی خاک (متر مربع بر ساعت) $\alpha = \frac{k}{\rho c}$

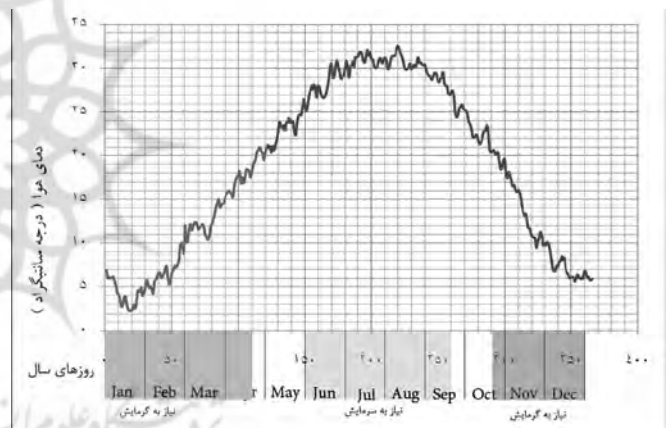
C = گرمایی ویژه خاک $\left(\frac{1}{kg \cdot ^\circ C} \right)$

ρ = چگالی خاک

مجهولات در رابطه فوق، با توجه به شرایط آب و هوایی در تهران طی ۱۰ سال گذشته و جنس خاک (مخلوط شن و ماسه ای در بیشتر نقاط شهر تهران)، جهت یافتن نمودار سینوسی دمای خاک در اعماق مختلف زیر سطح خاک، طبق جدول ۱ می باشد

۱- وضعیت جغرافیایی شهر تهران:

استان تهران با ۱۸۹۰۹ کیلومتر مربع مساحت، فضایی معادل ۱/۲ درصد مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از غرب به استان البرز و از شرق به استان سمنان محدود می‌شود. این استان از نظر موقعیت جغرافیایی در ۵۱ رجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه غربی و ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. ارتفاع کنونی از سطح دریا در حدود ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متر است و از نظر آب و هوایی غیر از نواحی کوهستانی شمالی که اندکی مرطوب و معتدل است، کلاً گرم و خشک است. فصل سرما در تهران معمولاً از آذرماه شروع می‌شود و بیشترین دمای سال را در اوایل تابستان (تیر ماه) دارا می باشد. با توجه به آمار ۱۰ ساله هواشناسی (۲۰۰۸-۱۹۹۸) در ایستگاه هواشناسی مهرآباد برای شهر تهران از اوایل آبان تا اواخر فروردین به گرمایش و از اوایل خرداد تا اوایل مهر به سرمایش نیاز خواهیم داشت (تصویر ۱).



تصویر ۱- دمای میانگین هوای تهران در ۱۰ سال گذشته.

ماخذ: (نگارندگان بر اساس آمار ۱۰ ساله (۲۰۰۸-۱۹۹۸) سازمان هواشناسی استان تهران، ایستگاه هواشناسی مهرآباد)

متوسط میزان بارندگی در سطح شهر تهران کم بوده و به مقدار ۳۱۶ میلی متر در طول سال اندازه گیری و تعداد روزهای یخبندان آن نیز ۳۶ روز در سال ثبت شده است. متوسط سالیانه رطوبت نسبی هوا در تهران ۴۰ درصد و در شمیرانات ۴۶ درصد می باشد. شهر تهران به وسیله دو رودخانه اصلی کرج و جاجرود و نیز تعدادی رودخانه های فصلی دیگر مشروب می شود، در واقع حد طبیعی فضای جغرافیایی تهران به واسطه این دو رودخانه مشخص می گردد.

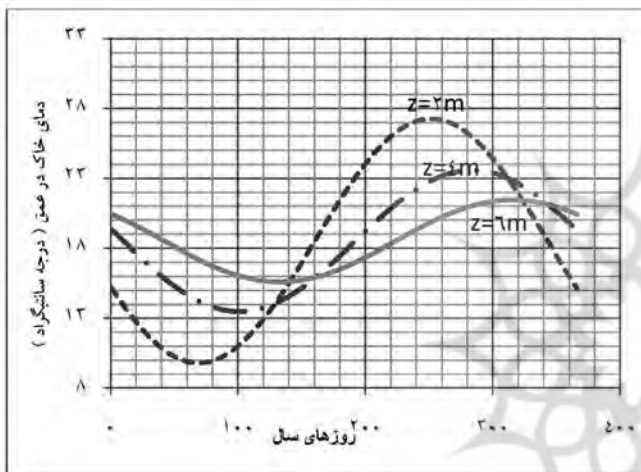
۲- دمای خاک در اعماق مختلف:

به عنوان مهم ترین عامل، الگوی سالانه دمای سطح زمین می تواند به صورت یک موج سینوسی از دمای هوای میانگین

جدول ۱- پارامترهای مورد نیاز برای یافتن دمای خاک در اعماق مختلف، بدست آمده بر اساس آمار ۱۰ ساله سازمان هواشناسی استان تهران.

$d = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$	فرکانس موج دمای هوای سالانه	زمان وقوع گرمترین روز سال از اول ژانویه به ساعت	دامنه موج دمای هوا	دمای میانگین سالانه هوا	پخشندگی حرارتی خاک
	$\omega \left(\frac{r}{h}\right)$	$t_0 (h)$	A (°C)	$T_{mean} (°C)$	$\alpha \left(\frac{m^2}{h}\right)$
۳/۶۵	$7/17 \times 10^{-4}$	۵۲۸۰	۱۵/۰۸	۱۸/۵۳	۰/۰۰۱۱۷

پروژه ای که در نظر است در آن از سیستم لوله های زیرزمینی استفاده شود این موضوع باید مدنظر قرار گیرد. همینطور با توجه به تصویر ۲ جهت استفاده از این سیستم در تهران عمق بهینه برای دفن لوله ها بین ۶-۵ متر خواهد بود.



تصویر ۲- دمای خاک از نوع شنی در طول سال برای اعماق مختلف.

$$\alpha = 13/286 \times 10^{-7} \left(\frac{m^2}{s}\right) = 0/00478 \left(\frac{m^2}{h}\right)$$

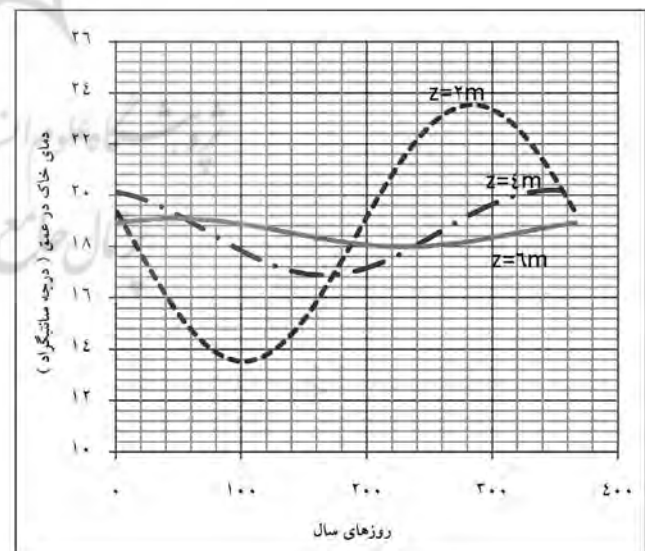
۳- مدل حرارتی سیستم لوله های زیرزمینی:

به طور کلی انتقال حرارت در سیستم لوله های زیرزمینی در ۲ مرحله به صورت همزمان صورت می پذیرد. در مرحله اول حرارت از طریق جابجایی، از هوای داخل لوله به سطح درونی لوله منتقل شده و در مرحله دوم از طریق رسانش، به سطح خارجی لوله رسیده و سپس به خاک منتقل می شود. این روند در فصل گرم صورت گرفته و در فصل سرد برعکس این جریان اتفاق می افتد و در اثر آن هوای ورودی به ساختمان و یا هواساز سرد و یا پیش گرم می شود.

در این پژوهش، بررسی حرارتی سیستم لوله های زیرزمینی در ۲ مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول با استفاده از یک مدل حرارتی در شرایط پایا (شرایط ثابت در طول زمان) و با استفاده از نرم افزار MATLAB، دمای هوا درون لوله با توجه

با توجه به داده های جدول ۱، می توان با استفاده از فرمول ذکر شده نمودار دمای خاک را در اعماق ۲، ۴ و ۶ متری بدست آورد و با استفاده از آن عمق مناسب برای قرار دادن لوله های زیرزمینی را تعیین نمود.

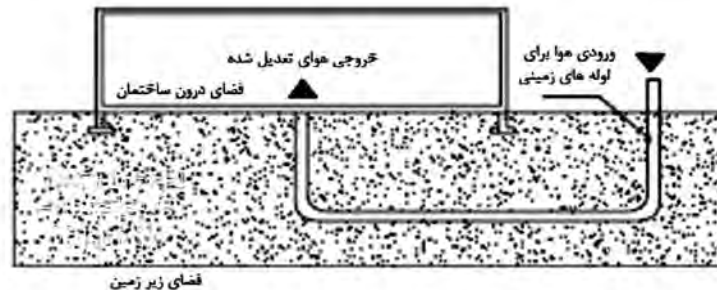
به دلیل تفاوت در پارامترهای فیزیکی خاک در نواحی مختلف، دمای خاک در اعماق با توجه به مکان ساختمان متفاوت است. طبق تحقیقات انجام شده برای عمق های کم زیر سطح خاک اثر خواص خاک قابل چشم پوشی است اما هنگامی که عمق افزایش می یابد، هرچقدر رسانندگی گرمایی خاک بیشتر باشد، نوسانات حرارتی خاک بیشتر است و هرچقدر ظرفیت گرمایی خاک افزایش یابد، دمای خاک در عمق خاصی از خاک کاهش می یابد (Derbel et al., 2010). خاک شنی دارای رسانندگی گرمایی بیشتری نسبت به خاک مخلوط شن و ماسه ای بوده و مقدار چگالی و گرمای ویژه آن از خاک مخلوط شن و ماسه ای کمتر می باشد. با مقایسه تصویر ۲ و ۳ در می یابیم که نوسانات دمایی با پیش رفتن در عمق، در خاک با پخشندگی حرارتی بیشتر (خاک شنی)، نسبت به خاک مخلوط شن و ماسه ای بیشتر است.



تصویر ۳- دمای خاک مخلوط شن و ماسه ای در طول سال برای اعماق مختلف.

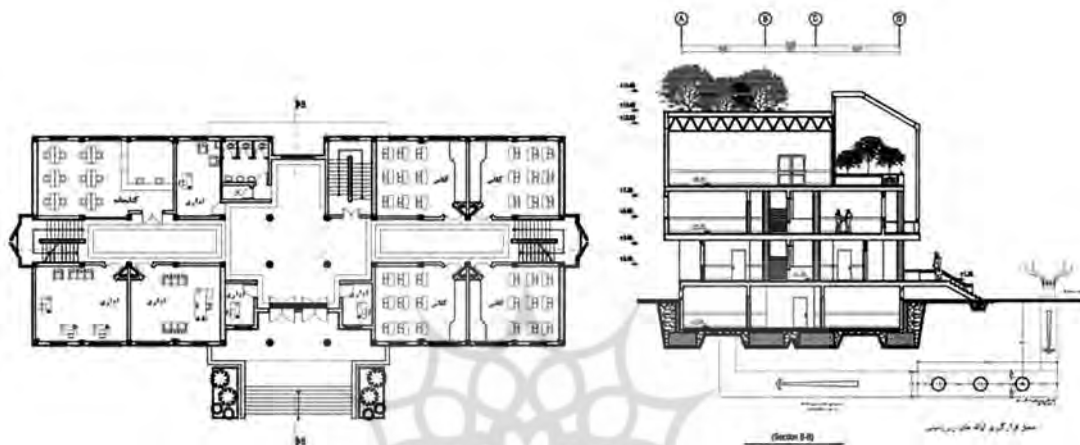
$$\alpha = 3/264 \times 10^{-7} \left(\frac{m^2}{s}\right) = 0/00117 \left(\frac{m^2}{h}\right)$$

همینطور می توان دریافت که هر چقدر رسانندگی گرمایی خاک بیشتر باشد، خاک برای رسیدن به دمای یکنواخت نیاز به عمق بیشتری دارد و در شروع کار عملیات ساختمانی برای



تصویر ۴- نمودار عملکرد سیستم لوله های زمینی به صورت شماتیک.

ماخذ: (Al-Ajmi et al.,2005)



تصویر ۵- پلان طبقه همکف و برش از ساختمان آموزشی مذکور (گلخانه و طرز قرارگیری لوله های زیرزمینی در برش نمایش داده شده است).

بار حرارتی و بروودی کل بنا (ساختمان آموزشی) در تابستان و زمستان با استفاده از نرم افزار CARRIER محاسبه شده است. این نرم افزار بعنوان یکی از شناخته شده ترین و پرکاربردترین نرم افزارها جهت تخمین بار حرارتی و بروودی ساختمان و طراحی سیستم ها و شبیه سازی مصرف انرژی ساختمان و محاسبه هزینه های انرژی می باشد. با استفاده از این نرم افزار، بار گرمایشی ساختمان، $(KW) 39/6$ (با در نظر گرفتن بار گرمایشی گلخانه در فصل سرد) و بار سرمایشی آن $(KW) 103/4$ خواهد بود که با فرض ساعات کاری در طول روز (۹ ساعت)، این بنا به $(KWh) 357/4$ انرژی جهت گرمایش روزانه در فصل سرد و $(KWh) 930/6$ انرژی جهت سرمایش روزانه در فصل گرم نیاز خواهد داشت.

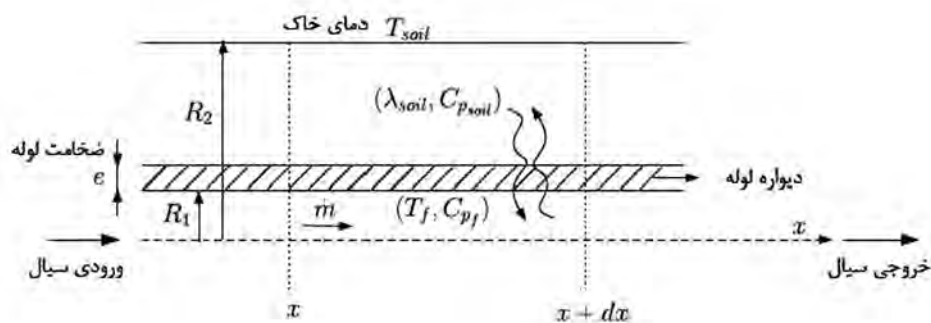
۳-۲- مدل حرارتی سیستم لوله های زیرزمینی در شرایط پایا:

در این بخش برای ساده شدن مدل حرارتی نیاز است که فرض هایی را در نظر بگیریم:
لوله در تمام قسمت ها دارای سطح مقطع یکنواخت می باشد.
خاکی که لوله ها را احاطه کرده است، در تمام جهات دارای رسانندگی گرمایی (k) یکسانی است.
اغتشاشات حرارتی ۱۱ خاکی که لوله ها را احاطه کرده است تا فاصله ای به اندازه ۲ برابر شعاع از سطح خارجی لوله ها قابل صرف نظر کردن است (Al-Ajmi et al.,2005).

به افزایش طول لوله های زمینی، تاثیر شعاع و سرعت هوا درون لوله ها و ظرفیت گرمایشی و سرمایشی سیستم در فصول گرم و سرد بررسی شده است. در مرحله دوم با استفاده از مدل حرارتی رسانشی گذرا (شرایط وابسته به زمان)، انتقال حرارت از سطح لوله به خاک و برعکس در طول مدت زمان فصل گرم یا سرد، جهت یافتن حداکثر زمان استفاده بهینه از سیستم بررسی شده است.

۳-۱- مشخصات ساختمان آموزشی طراحی شده با سیستم لوله های زیرزمینی:

ساختمان طراحی شده توسط نگارنده، جهت استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی، یک دبیرستان با ۱۲ کلاس می باشد و در تهران واقع شده است. مساحت زیر بنا در این مدرسه ۲۱۲۹ مترمربع بوده و در طراحی آن علاوه بر استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی از دیگر سیستم های خورشیدی غیرفعال نیز استفاده شده است. به عنوان مثال می توان از گلخانه ای که در بخش جنوبی بنا واقع شده است و همچنین سلول های فتولتائیک جهت تامین بخشی از الکتریسیته مصرفی، شیشه های دو جداره و کرکره های خارجی جهت کنترل تابش خورشید در ساعاتی از روز، نام برد. همچنین این بنا با توجه به مقررات ملی ساختمان میباید ۱۹ عایق بندی شده است.
این ساختمان در ۳ طبقه و ۱ طبقه زیرزمین جهت استفاده از ۸ ساعت صبح تا ۵ بعدازظهر در کل سال طراحی شده است.



تصویر ۶- نمودار تبادل حرارتی بین هوای درون لوله و خاک به صورت شماتیک.
 مأخذ: (Derbel et al., 2010)

صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$h = \frac{k_{air}}{2 \times R_1} \times Nu$$

عدد نوسلت Nu ، تابعی از عدد رینولدز Re و عدد پرانتل Pr می باشد و برای یک جریان آشفته درون لوله در صورتی که

$$2000 \leq Pr \leq 0.5 \text{ و } 10^4 < Re < 2300$$

به صورت زیر بیان می شود:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12/7 \times \sqrt{\frac{f}{8}} \times (Pr^{1/4}-1)}$$

$$f = (0.79 \ln Re - 1/64)^2 \text{ (ضریب اصطکاک درون لوله)}$$

مقاومت حرارتی کل سیستم R_{total} به صورت روبرو مشخص می شود:

$$R_{total} = R_{soil} + R_{pipe} + R_{conv}$$

در نهایت ضریب کل انتقال حرارت به ازای واحد طول لوله با استفاده از مقاومت حرارتی کل به صورت زیر اندازه گیری می شود:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

با در نظر گرفتن شرایط مرزی و حل معادله تعادل انرژی به معادله زیر خواهیم رسید که با استفاده از آن می توان دمای خروجی از لوله را بدست آورد:

$$T_{out} = T_{in} - [T_{in} - T(z, t)] \times [1 - e^{-bdx}]$$

$$b = \frac{U}{\dot{m} \times C_{pf}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_{pf} (T_{out} - T_{in})$$

T_{out} = دمای هوای خروجی از لوله (درجه سانتیگراد)

m = دبی جرمی هوا ($\frac{kg}{s}$)

T_{in} = دمای هوای ورودی به لوله (درجه سانتیگراد)

C_{pf} = گرمای ویژه هوا ($\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$)

$T(z, t)$ = دمای میانگین خاک در عمق z و زمان t

Q = مقدار گرمای انتقال یافته در طول لوله دفن شده (w)

برای مدلسازی حرارتی سیستم، لوله ای با سطح مقطع دایره در حالی که سیال هوا درون آن جریان دارد، در نظر گرفته شده است. همچنین یک مقاومت حرارتی خارجی به صورت لایه ای از خاک با ضخامت معین که لوله را احاطه کرده است، به عنوان شرایط مرزی برای مسئله در نظر گرفته شده و کل سیستم با خاکی با دمای میانگین $18/5$ درجه سانتیگراد در تماس می باشد (تصویر ۵). دمای میانگین خاک با توجه به تصویر $18/5.2$ درجه سانتیگراد محاسبه شده است که جهت دقت بیشتر در محاسبات این عدد در فصل گرم 18 و در فصل سرد 19 درجه سانتیگراد (مطابق با نوسانات موج سینوسی)، در نظر گرفته شده است. برای طول کوچکی از لوله زیرزمینی (dx) در جهت جریان هوا، مقاومت حرارتی مربوط به حلقه خاکی که پیرامون لوله را احاطه کرده است، طبق معادله زیر بیان می شود (Derbel et al., 2010):

$$R_{soil} = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi \times k_{soil} \times (dx)}$$

مقاومت حرارتی مربوط به لوله سیمانی درون خاک طبق معادله زیر بیان می شود:

$$R_{pipe} = \frac{\ln\left(\frac{R_1+e}{R_1}\right)}{2\pi \times k_{pipe} \times (dx)}$$

و مقاومت حرارتی مربوط به انتقال حرارتی جابجایی بین سیال درون لوله و سطح داخلی لوله نیز طبق معادله زیر بیان می شود:

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi \times R_1 \times h \times (dx)}$$

R_1 = شعاع درونی لوله زیرزمینی (متر)

k_{pipe} = رسانندگی حرارتی لوله ($\frac{w}{m \cdot k}$)

h = ضریب انتقال حرارت جابجایی

R_2 = شعاع حجم استوانه ای خاکی که لوله را احاطه کرده

است (متر)

e = ضخامت لوله (متر)

dx = واحد طول لوله زیرزمینی (متر)

k_{soil} = رسانندگی حرارتی خاک ($\frac{w}{m \cdot k}$)

k_{air} = رسانندگی حرارتی هوا ($\frac{w}{m \cdot k}$)

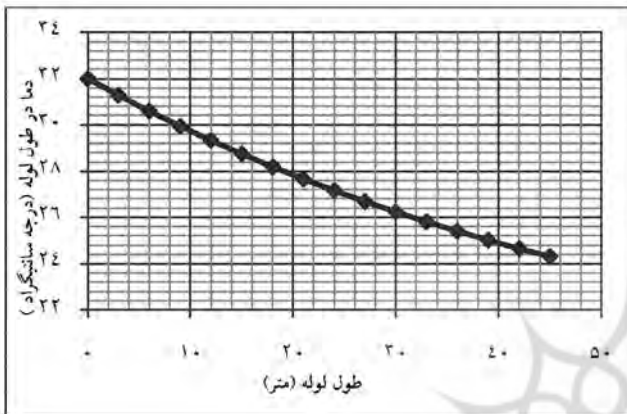
h در عبارت بالا، ضریب انتقال حرارت جابجایی بوده و به

جدول ۲- پارامتر های مورد نیاز برای دستیابی به عملکرد سیستم در نرم افزار MATLAB.

عمق دفن لوله ها	دمای خاک در تابستان	دمای خاک در زمستان	رسانندگی گرمایی لوله (سیمانی)	پخشندگی حرارتی خاک	رسانندگی گرمایی خاک (شن و ماسه ای)
(m)	(°C)	(°C)	$k \left(\frac{W}{m.K}\right)$	$\alpha \left(\frac{m^2}{h}\right)$	$k \left(\frac{W}{m.K}\right)$
۶	۱۸	۱۹	-/۲۹	-/۰۰۱۱۷	۱/۷

$$U = \text{ضریب کل انتقال حرارت} \left(\frac{W}{m^2.C}\right)$$

برای دستیابی به عملکرد کل سیستم، نرم افزار MATLAB نیاز به اطلاعات مربوط به خواص فیزیکی خاک و لوله های دفن شده در خاک، ضخامت دیواره لوله سیمانی مورد استفاده، دمای خاک در فصل گرم و سرد و عمقی از خاک که لوله ها در آن قرار گرفته اند، دارد (جدول ۲). شعاع، طول لوله های زیرزمینی و سرعت هوا درون لوله ها پارامتر هایی هستند که با بررسی اثر آنها بر عملکرد کل سیستم (میزان ظرفیت گرمایشی و سرمایشی سیستم)، به اندازه بهینه آنها با توجه به بنای آموزشی مذکور دست خواهیم یافت.



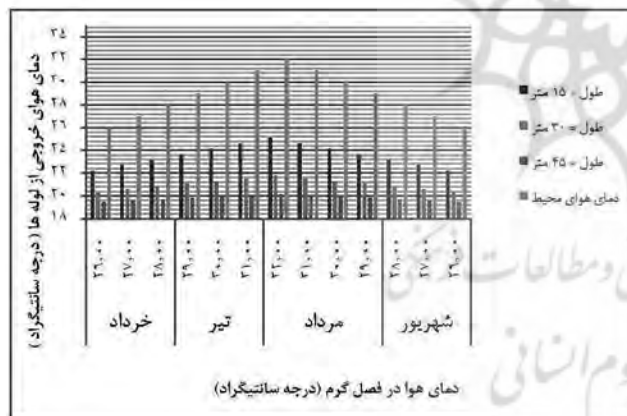
تصویر ۷- نمودار کاهش دمای ورودی در طول لوله با توجه به افزایش طول لوله.

۳-۲-۱- عملکرد سیستم لوله های زیرزمینی در فصل گرم:

طبق بررسی های انجام شده در این پژوهش، در صورت افزایش دمای هوا از ۲۶ درجه سانتیگراد نیاز به سرمایش خواهیم داشت که این شرایط از ۱۵ خرداد شروع تا ۱۰ مهر ادامه خواهد داشت و در کل ۱۱۹ روز در طول سال نیاز به سرمایش داریم. در این پژوهش عملکرد سیستم در شرایط مختلف طول، شعاع و سرعت هوا درون لوله بررسی شده است و در آخر بهترین حالت جهت دستیابی به بهترین مقدار صرفه جویی انرژی انتخاب شده است.

اگر فرض کنیم که دمای هوای ورودی به لوله در یک روز گرم تابستان ۳۲ درجه سانتیگراد باشد، با فرض ثابت بودن شعاع و سرعت هوا درون لوله می توان اثر افزایش طول لوله را بر کاهش دمای خروجی از لوله بررسی نمود (تصویر ۷). با افزایش طول لوله دمای هوایی که از لوله خارج می شود کاهش یافته و ظرفیت سرمایشی سیستم نیز افزایش می یابد.

اگر کل فصل گرم در تهران با توجه به آمار ۱۰ ساله هواشناسی، از ۲۶ درجه شروع و در نهایت به ۳۲ درجه سانتیگراد برسد، دمای هوای خروجی از لوله هایی با طول های مختلف در مقایسه با دمای هوای محیط در تصویر ۸ نشان داده شده است. با توجه به ابعاد طرح، موقعیت موتورخانه و جهت حداکثر بهره‌وری از سیستم طول لوله‌ها ۴۵ متر فرض شده است. هرچقدر طول لوله‌ها بیشتر باشد، سیستم زمان بیشتری را برای تبادل انرژی در اختیار خواهد داشت. چون شعاع لوله ها و مقدار سرعت هوا درون لوله ها بر میزان بار انرژی سیستم تاثیر دارند، این سیستم با مقادیر مختلفی از این پارامترها بررسی شد. تصویر ۹ اثر شعاع های مختلف را بر ظرفیت سرمایشی سیستم لوله‌های



تصویر ۸- نمودار تغییرات دمای هوای خروجی از لوله با طول های مختلف (شعاع=۲۵ سانتیمتر، سرعت هوا درون لوله=۱/۵ متر بر ثانیه).

زمینی نشان می دهد. با توجه به شکل با تغییر شعاع سیستم از ۱۵ سانتیمتر به ۵۰ سانتیمتر ظرفیت سرمایشی سیستم نیز به طور چشمگیری افزایش می یابد. پارامتر مهم دیگری که نقش عمده ای را در ظرفیت سرمایشی سیستم ایفا می کند، سرعت هوا درون لوله ها می باشد که اندازه آن با استفاده از پژوهش های قبلی صورت گرفته (Dhaliwal and Goswami, 1984)، در محدوده ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه انتخاب شده است. با ثابت نگه داشتن شعاع و طول لوله و تغییر دادن سرعت هوا درون لوله در محدوده ذکر شده، با افزایش سرعت هوا درون لوله مقدار پتانسیل سرمایشی سیستم افزایش می یابد،

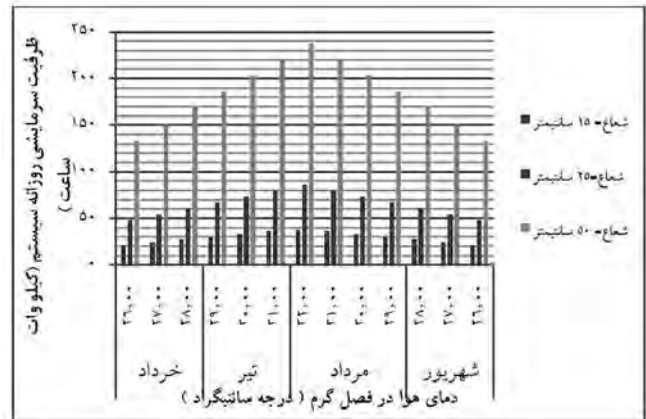
یک فن نیاز است که می تواند در سر راه ورودی هوا به لوله ها و یا در خروجی هوا قرار گرفته و با توجه به دمای هوای ورودی به لوله ها سرعت لازم را برای رسیدن به ظرفیت گرمایشی و یا سرمایشی مطلوب روزانه تامین نماید.

برای بدست آوردن پارامترهای بهینه جهت طراحی این سیستم در تابستان مقدار پتانسیل سرمایشی سیستم، در هر یک از حالات ذکر شده مورد بررسی قرار داده و این نتیجه حاصل شد که سیستمی با مشخصات زیر (جدول ۳)، می تواند بار حرارتی روزانه به طور میانگین (KWh) ۱۶۴/۶ را تامین کند که در صورت استفاده از ۳ لوله که با هم به صورت موازی قرار گرفته اند به طور همزمان، پتانسیل سرمایشی سیستم به ۳ برابر این مقدار افزایش می یابد.

۳-۲-۲- عملکرد سیستم لوله های زیرزمینی در فصل سرد:

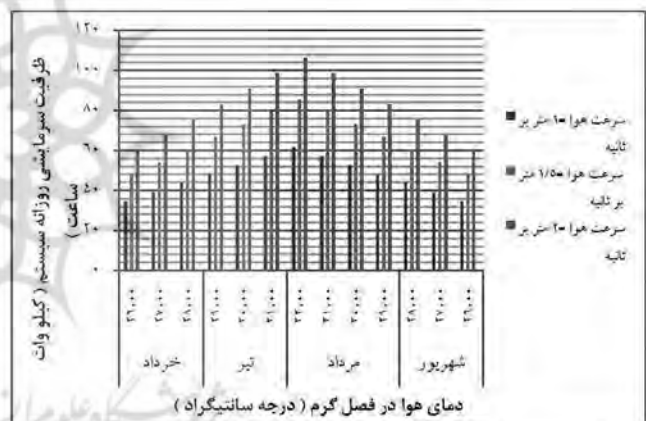
دمای خاک در فصل سرد، در عمق ۶ متری در تهران ۱۹ درجه سانتیگراد می باشد به همین دلیل اینطور فرض شده است که سیستم لوله های زیرزمینی تنها برای دمای هوا بین صفر تا ۱۵ درجه می تواند عملکرد خوبی داشته باشد و برای دماهای بیش از ۱۵ درجه سانتیگراد به علت اختلاف دمای کم بین دمای هوای محیط که وارد لوله های زیرزمینی می شود با دمای خاک، عملکرد ضعیفی خواهد داشت. چنانچه گفته شد، فصل سرد در تهران از نیمه آبان آغاز و تا نیمه فروردین ادامه دارد (۱۵۰ روز). لذا با توجه به پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سیستم لوله های زمینی که با توجه به نیاز سرمایشی سیستم در فصل گرم به صورت بهینه انتخاب شده اند، ظرفیت گرمایشی روزانه این سیستم به طور میانگین در فصل سرد نیز طبق جدول ۵ می باشد.

در فصل سرد با کم کردن سرعت هوا درون لوله ها از میزان پتانسیل گرمایشی سیستم کاسته می شود به این دلیل که از حجم هوای ورودی به لوله ها کاسته می شود ولی با این وجود دمای هوای خروجی از لوله ها که جهت رسیدن به دمای ۲۱ درجه سانتیگراد وارد هواساز می شود، افزایش خواهد یافت و این امر



تصویر ۹- نمودار تغییرات پتانسیل سرمایشی سیستم لوله های زیرزمینی با شعاع های مختلف لوله (سرعت هوا درون لوله = ۱/۵ متر بر ثانیه).

اما با افزایش سرعت درون لوله ها، اصطکاک هم افزایش یافته که خود یک عامل منفی به حساب می آید. از این رو برای انتخاب سرعت بهینه درون لوله باید این عامل را نیز به حساب آورد (تصویر ۱۰). برای ثابت نگه داشتن سرعت هوا درون لوله ها به



تصویر ۱۰- نمودار تغییرات پتانسیل سرمایشی سیستم لوله های زیرزمینی با سرعت های مختلف هوا (طول = ۳۰ متر، شعاع = ۲۵ سانتیمتر).

جدول ۳- پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سیستم در نرم افزار MATLAB.

ظرفیت گرمایشی روزانه میانگین (برای ۱ لوله)	شعاع لوله	طول لوله	سرعت هوا درون لوله	ضخامت لوله
(KWh)	(cm)	(m)	(m/s)	(mm)
۱۶۴/۶	۵۰	۴۵	۱/۵	۲

جدول ۴- دمای هوای خروجی از لوله ها با توجه به دمای هوای ورودی و سرعت هوا درون لوله.

شعاع لوله های زیرزمینی = ۵۰ سانتیمتر طول لوله های زیرزمینی = ۴۵ متر	دمای هوای ورودی (°C)	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲
	دمای هوای خروجی از لوله (°C)	۲۲/۴	۲۲/۱	۲۲/۷	۲۴/۳	۲۴/۸	۲۵/۴	۲۶/۱

جدول ۵- پتانسیل گرمایشی سیستم در فصل سرد با توجه به سرعت های متفاوت هوا درون لوله.

ظرفیت سرمایشی روزانه میانگین (برای ۱ لوله) (KWh)	سرعت هوا درون لوله ها (m/s)
۷۴/۸	۰/۵
۱۱۷/۴	۱
۱۴۳	۱/۵

شعاع لوله های زیرزمینی = ۵۰ سانتیمتر
طول لوله های زیرزمینی = ۴۵ متر

جدول ۶- دمای هوای خروجی از لوله ها با توجه به دمای هوای ورودی و سرعت هوا درون لوله.

سرعت هوا درون لوله (m/s)	دمای هوای ورودی (°C)	۱	۳	۵	۷	۹	۱۱	۱۳	۱۵
۰/۵	دمای هوای	۱۲/۵	۱۳/۲	۱۴	۱۴/۷	۱۵/۴	۱۶/۱	۱۶/۹	۱۷/۶
	خروجی از لوله (°C)	۹/۹	۱۰/۹	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
۱		۸/۲	۹/۵	۱۱	۱۲	۱۳/۱	۱۴/۳	۱۵/۵	۱۶/۷

باعث افزایش کارایی هواساز خواهد شد (جدول ۶).

۳-۳- مدل حرارتی سیستم لوله های زمینی در شرایط گذرا:

از آنجایی که بسیاری از مسائل انتقال گرما وابسته به زمان هستند، لذا مسائل گذرا نوعاً وقتی به وجود می آیند که شرایط مرزی سیستمی تغییر کند. در بیشتر مقالات بررسی شده، از اغتشاشات حرارتی و تغییرات دمایی حجمی از خاک که روی سطح لوله قرار گرفته است، صرف نظر می شود و آن به این دلیل است که بتوان سیستم لوله و هوای عبوری از آن را در تمام اوقات با خاک ۱/۵۳ درجه سانتیگراد (میانگین دمای خاک در عمق ۶ متری) در تماس گرفت که این فرض منجر به عملکرد بالای سیستم در کل فصل گرم و سرد می شود. اما در حقیقت، بلافاصله بعد از شروع استفاده از سیستم و دمیدن هوا به درون لوله های زیرزمینی، دمای لایه خاک بالای لوله در اثر انتقال حرارت شروع به تغییر می کند و در اثر گذشت زمان دمای این لایه در فصل گرم افزایش و در فصل سرد کاهش می یابد که این امر باعث کاهش کارایی کل سیستم می شود. برای در نظر گرفتن این اثر در مدلسازی حرارتی سیستم لوله های زیرزمینی باید فرض هایی را در نظر بگیریم:

دمای سطح لوله با دمای لایه نازک خاک بالای آن در هر لحظه برابر است. بنابراین فرض، با بدست آوردن دمای سطح لوله در طی زمان به تغییرات دمایی خاک دست خواهیم یافت. هنگامی که دمای سطح لوله (و خاک) با دمای هوای عبوری از آن برابر باشند، سیستم عملاً کارایی خود را از دست می دهد. در این حالت گرمای انتقال یافته در اثر جابجایی از هوای درون لوله به سطح لوله برابر است با مقدار گرمای منتقل شده از طریق رسانش از لوله به خاک. که طبق معادله زیر بیان می شود (Holman, 2010, 148):

$$hA(T_{air} - T(x, t))_{x=0} = -k_{soil}A\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0}$$

A = سطح مقطع لوله

$$k_{soil} = \text{رسانندگی حرارتی خاک} \left(\frac{W}{m.k}\right)$$

T_{air} = دمای هوای محیط

اگر محور x در رابطه بالا از سطح لوله به سمت سطح بیرونی خاک باشد، x=0 قرار داده شده است تا دمای سطح لوله پس از گذشت زمان بدست آید.

حل این معادله به صورت زیر بیان می شود (Holman, 2010, 148):

$$\frac{T_{pipe\ surface} - T_{soil}}{T_{air} - T_{soil}} = 1 - erf(X) - \left[\exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2\alpha t}{k^2}\right) \right] \times \left[1 - erf\left(x + \frac{h\sqrt{\alpha_{soil}t}}{k_{soil}}\right) \right]$$

با استفاده از رابطه بالا، دمای سطح لوله (T_{pipe surface}) و دمای خاک و تغییرات آن را پس از گذشت زمان مشخصی از زمان شروع به کار سیستم در فصل گرم یا سرد خواهیم داشت و با توجه به آن می توان تعداد روزهایی را که سیستم بهترین عملکرد را داراست بدست آورد.

با توجه به جدول ۷، در صورت ثابت بودن سرعت جریان هوا درون لوله ها، با افزایش شعاع لوله تعداد روزهای عملکرد قابل قبول سیستم افزایش می یابد. همینطور با افزایش سرعت جریان هوا درون لوله ها، ظرفیت سرمایشی و گرمایشی سیستم لوله های زیرزمینی افزایش می یابد. با این وجود تعداد روزهای عملکرد قابل قبول سیستم کاهش می یابد. لذا ضروریست برای طراحی سیستم بهینه لوله های زیرزمینی هر دو این پارامترها را در کنار یکدیگر مورد توجه قرار داد.

۴- بحث:

در این پژوهش به بررسی دمای خاک در اعماق مختلف در شهر تهران و امکان استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی و عوامل موثر بر آنها پرداخته و پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سیستم برای یک بنای آموزشی با ۱۲ کلاس در تهران محاسبه

جدول ۷- تعداد روزهای عملکرد قابل قبول سیستم با توجه به شعاع و سرعت هوا درون لوله ها.

فصل گرم	شعاع لوله ها (سانتیمتر)	تعداد روزهای عملکرد قابل قبول سیستم	
		سرعت هوا (متر بر ثانیه)	
فصل گرم	۱۵	۱	۱۱۵
		۱/۵	۱۰۰
		۲	۵۵
	۲۵	۱	۱۱۵
		۱/۵	۱۰۵
		۲	۶۸
	۵۰	۱	۱۱۵
		۱/۵	۱۱۵
		۲	۹۵
فصل سرد	۱۵	۱	۱۵۰
		۱/۵	۹۰
		۲	۶۰
	۲۵	۱	۱۵۰
		۱/۵	۱۵۰
		۲	۱۵۰
	۵۰	۱	۱۵۰
		۱/۵	۱۵۰
		۲	۱۵۰

جدول ۸- ظرفیت حرارتی کل بنا با و بدون سیستم لوله های زمینی و درصد صرفه جویی.

زمان	انرژی مورد نیاز کل بنا بدون استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی (KWh)	انرژی مورد نیاز کل بنا با استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی (KWh)	ذخیره انرژی در صورت استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی (۳ لوله موازی) (KWh)	درصد صرفه جویی کل
فصل گرم	۹۳۱	۴۲۷	۴۹۴	٪۵۳
فصل سرد	۳۵۶	۱۳۲	۲۲۵	٪۶۳

ثانیه رسانده شده است (Derbel et al., 2010). نکته قابل توجه این است که با افزایش سرعت هوا درون لوله ها، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) نیز افزایش یافته و تعداد روزهای عملکرد قابل قبول سیستم به طور قابل توجهی کاهش می یابد. در تحقیقات دیگری که در کویت برای دوره گرم سال صورت گرفته است، طول لوله ها ۶۰ متر و شعاع آنها ۲۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. با استفاده از این سیستم دمای هوای اتاقی که از این سیستم استفاده می کند بین ۲۸-۳۰ درجه سانتیگراد تغییر می کند (Al-Ajmi et al., 2005). دمای میانگین خاک در کشور کویت (حدود ۲۷ درجه سانتیگراد) حدود ۹ درجه از دمای میانگین خاک در شهر تهران بیشتر است و به همین علت هوای خروجی از لوله ها در فصل تابستان برای رسیدن به دمای آسایش باید وارد هواساز شوند. پس از بررسی سیستم لوله های زیرزمینی در شهر تهران در

گردید. سیستم لوله های زیرزمینی برای این بنای آموزشی به صورت ترکیبی از ۳ لوله (جهت دستیابی به حداکثر کارایی و با در نظر گرفتن محدودیت های پلان) به طول ۴۵ متر و شعاع ۵۰ سانتیمتر که به طور موازی قرار گرفته اند، در نظر گرفته شد. همچنین با تنظیم سرعت جریان هوای درون لوله ها به مقدار ۱/۵ متر بر ثانیه در تابستان و ۰/۵ متر بر ثانیه در زمستان به ترتیب به مقدار بهینه ای از ظرفیت سرمایشی سیستم و دمای هوای خروجی از لوله ها دست خواهیم یافت (جدول ۶ و ۷). در پژوهشی که در کشور تونس در این رابطه صورت گرفته است برای مدلسازی سیستم، طول لوله ها برابر ۳۰ متر و شعاع آنها برابر ۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. همانطور که گفته شد، با کاهش اندازه شعاع لوله ها، ظرفیت حرارتی سیستم کاهش می یابد که در پژوهش ذکر شده جهت جلوگیری از این پدیده سرعت جریان هوا درون لوله های زیرزمینی به ۶ متر بر

نتیجه

پژوهش حاضر، نتایج زیر حاصل شد:

۱- پس از شبیه سازی عددی دمای خاک در اعماق مختلف و بررسی نمودارها، این نتیجه حاصل می شود که بهترین عمق جهت قرارگیری لوله های زیرزمینی در تهران پنج الی شش متر می باشد. در این عمق از خاک نوسانات دمای خاک به حداقل مقدار رسیده و در نهایت باعث افزایش کارایی سیستم می گردد.

۲- با توجه به جدول ۸، این نتیجه حاصل می شود که سیستم در فصول گرم و سرد به تنهایی قادر به تامین شرایط آسایش در محدوده دمایی ۲۶-۲۱ سانتیگراد در یک بنای آموزشی نمی باشد اما در صورت ترکیب با یک سیستم تهویه مطبوع مناسب، درصد صرفه جویی انرژی قابل توجهی را نشان می دهد. در فصل گرم، ۵۳ درصد و در فصل سرد نیز دارای درصد صرفه جویی به مقدار ۶۳ درصد می باشد.

۳- همینطور نتیجه گرفته می شود که با توجه به شرایط اقلیمی تهران و استفاده از سیستم های خورشیدی غیر فعال (گلخانه خورشیدی) در بنا، در صورت استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی درصد صرفه جویی انرژی بیشتری در فصل سرد نسبت به فصل گرم خواهیم داشت.

۴- با استفاده از بررسی های انجام شده می توان با در نظر گرفتن طول لوله به اندازه ۴۵ متر، شعاع ۵۰ سانتیمتر و سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه در فصل گرم تعداد روزهای عملکرد قابل قبول

سیستم را به اندازه کل فصل گرم (۱۱۵ روز) رسانید که این عدد در صورت افزایش سرعت هوا داخل لوله، با وجود افزایش میزان ظرفیت سرمایشی روزانه سیستم به ۹۵ روز کاهش می یابد. همچنین این سیستم با مشخصات فوق و با تغییر سرعت هوای درون لوله به ۰/۵ متر بر ثانیه در کل فصل سرد نیز کارایی دارد.

۵- به طور کلی، با استفاده از سیستم لوله های زیرزمینی برای بنای آموزشی مذکور با مشخصات طراحی شده، در گرم ترین روز فصل گرم (۳۲ درجه سانتیگراد) کاهش دمایی به اندازه ۶ درجه سانتیگراد و در سردترین روز فصل سرد (۱ درجه سانتیگراد) افزایش دمایی به اندازه ۹ درجه سانتیگراد مشاهده می شود.

در خاتمه و بر اساس پژوهش حاضر مشخص می گردد که استفاده از این سیستم گامی بزرگ در جهت کاهش مصرف انرژی در فصل گرم و سرد در اقلیم تهران بوده و می توان با بررسی نوع خاک و شرایط دمایی در اعماق خاک و با استفاده از مدل حرارتی ارائه شده در این پژوهش، امکان استفاده از این سیستم را در اقلیم های دیگر ایران نیز بررسی نموده و با توجه به آن مشخصات سیستم را برای هر ساختمانی طراحی نمود تا با گسترش استفاده از این سیستم گام بزرگی در جهت صرفه جویی در مصرف انرژی برداشته شود.

پی نوشت ها:

فهرست منابع:

- Al-Ajmi F, Loveday DL, Hanby VI. (2006), The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, *Building and Environment*, Vol 41, 235-244.
- Athienitis A. K, Roy M, Zhao M. (2005), *Design and simulation of a hybrid ventilation system with Earth-Air heat exchanger*, Ninth International IBPSA Conference, Motreal, Canada.
- Ascione F, Bellia L, Minichiello F. (2011), Earth-to-air heat exchangers for Italian climates, *Renewable Energy*, Vol 36, 2177-2188.
- Bansal NK, Sodha MS, Bharadwi SS. (1983), Performance of earth air tunnels. *International Journal of Energy Research*.
- Derbel H, Kanoun O. (2010), Investigation of the ground thermal potential in Tunisia focused towards heating and cooling applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol 30, 1091-1100.
- Dhaliwal AS, Goswami DY. (1984), *Heat transfer analysis environment control using an underground air tunnel*. ASME Solar Energy.

- Passive and Active Systems.
- Earth tube systems.
- Daily cooling and heating potential.
- Unsteady-state Conduction.
- Steady-state Conduction.
- Semi-infinite solid.
- Thermal Diffusivity.
- Density.
- Thermal conductivity.
- Specific Heat.
- Soil Thermal Effect.
- Nusselt Number.
- Reynolds Number.
- Prandtl Number.
- Turbulent Tube Flow.

Kusuda TO, Bean W.(1983), *Annual variation of temperature field and heat transfer under heated ground surface*, slab-on grade floor heat loss calculation. Building Science Service.

Holman, J.P (2010), *Heat Transfer*, McGraw-Hill, Boston.

Sodha M. S, Sharma A. K, Singh S. P, Bansal N. K, Kumr A. (1985), Evaluation of an Earth-Air Tunnel System for cooling/heating of a hospital complex, *Building and Environment*. Vol. 20, No. 2, 115-122.

Wu H, Wang S, Zhu D.(2007), Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems, *Energy Conversion & Management*, Vol 48, 1462-1471.

