



بررسی استفاده مستقیم از گمانه برای سرمایش در اقلیم آب و هوایی شهر تبریز برای ساختمان با کاربری مسکونی و اداری

عسگر مینایی¹، مهدی معرفت^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، maerefat@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 تیر 1395

پذیرش: 19 شهریور 1395

ارائه در سایت: 24 مهر 1395

کلید واژگان:

مبدل حرارتی گمانه

عمق طراحی

سرمایش مستقیم زمینی

شهر تبریز

چکیده

در این مقاله استفاده مستقیم از گمانه به عنوان چاه حرارتی ساختمان، سرمایش مستقیم زمینی با گمانه، در یک ساختمان نمونه در اقلیم آب و هوایی شهر تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. عمق لازم گمانه با استفاده از مدل تحلیلی برای کاربری مسکونی و اداری محاسبه شده است. عمق طراحی گمانه به مصالح استفاده شده در ساختمان و نحوه عملکرد حرارتی آن بستگی دارد. به همین دلیل براساس مصالح استفاده شده، چهار نوع ساختمان در نظر گرفته شده است. در این چهار نوع ساختمان تأثیر استفاده از عایق در دیوار خارجی و همچنین تأثیر جداره پنجره در عمق طراحی و عملکرد سیستم سرمایش زمینی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پنجره دو جداره به جای پنجره تک جداره سبب کاهش عمق طراحی گمانه تا مقدار 10% می‌شود. همچنین استفاده از عایق در دیوار خارجی ساختمان عمق طراحی گمانه را به بیش از نصف مقدار اولیه کاهش می‌دهد. در ادامه استفاده از سرمایش مستقیم زمینی برای شهر تبریز در این چهار حالت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که سرمایش مستقیم زمینی به جز ساعات اندک در بقیه ساعات می‌تواند آسایش حرارتی را هم در ساختمان مسکونی و هم در ساختمان اداری برای چهار نوع ساختمان یادشده برقرار کند.

Direct Cooling System Using Borehole Heat Exchanger for Residential and Office Building in Tabriz City

Asgar Minaei, Mehdi Maerefat*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 11 July 2016

Accepted 19 September 2016

Available Online 15 October 2016

Keywords:

Borehole heat exchanger

Borehole design depth

Ground sink direct cooling system

Tabriz city

ABSTRACT

In the present study, the direct utilization of borehole as a heat sink for both residential and office building is investigated in Tabriz city. The effect of external wall insulation and window glazing is studied in the form of four cases and the performance of the ground sink direct cooling system is investigated for these cases. The borehole design depth is calculated by analytical method. Both sample residential and office buildings are investigated. The borehole design depth depends on the quality of the building design and its heat emission. The results show that using double glazed windows, compared to single glazed windows reduces the borehole design depth by about 10 percent. Also, the utilization of insulation in external walls and roof decreases the borehole design depth more than half compared to buildings without insulation. Finally, the potential of the ground sink direct cooling in sample residential and office buildings is investigated for four cases. The results show that by using ground sink direct cooling system, thermal comfort is satisfied in almost all of the cooling hours in both sample residential and office buildings.

1-مقدمه

در حالت سرمایش اگر دمای زمین به حد کافی پایین باشد، در این صورت زمین می‌تواند مستقیماً به عنوان چاه حرارتی به کار رود. به این سیستم، سیستم سرمایش مستقیم زمینی گفته می‌شود. در این صورت پمپ حرارتی از سیستم حذف می‌شود که این کار هم سبب کاهش هزینه‌های اولیه و هم باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود.

یکی از مهم‌ترین پارامترها در کارکرد سیستم‌های سرمایش مستقیم زمینی، دمای مناسب زمین و پایداری آن است، هر چقدر دمای زمین کمتر باشد توانایی این سیستم‌ها برای سرمایش بیشتر است. مورد دیگری که در

استفاده از مبدل‌های حرارتی گمانه در کاربردهای تهویه مطبوع در کشورهای زیادی در سال‌های اخیر گسترش یافته است. این مبدل‌ها به طور متداول در پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پمپ‌ها زمین در حالت سرمایش به عنوان چاه حرارتی برای کندانسور و در حالت گرمایش به عنوان چشمه حرارتی برای اواپراتور عمل می‌کند. سربو و سبارچیویکی [1] به مرور سیستم‌های پمپ‌های حرارتی زمینی کوپل شده با گمانه در تهویه ساختمان پرداخته‌اند.

Please cite this article using:

A. Minaei, M. Maerefat, Direct Cooling System Using Borehole Heat Exchanger for Residential and Office Building in Tabriz City, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 274-266, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روز 12 ساعت است. محققان اطلاعات زیادی در مورد بار سرمایشی ساعتی ساختمان نداده‌اند و فقط اظهار کرده‌اند که باید دمای آب خروجی از گمانه کمتر از 23°C باشد. نتیجه بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از یک گمانه نمی‌شود بار سرمایش ساختمان در طول زمان سرمایش را تأمین کرد و به همین دلیل نیاز به چهار گمانه است که این خود هزینه‌های اولیه را افزایش می‌دهد.

پاهود و همکاران [4] نیز استفاده از یک سیستم مستقیم سرمایش زمینی را برای یک ساختمان اداری کم مصرف و استاندارد بررسی کرده‌اند. مبدل حرارتی زمین گرمایی در زمستان به یک پمپ حرارتی کوپل شده و در تابستان نیز مستقیماً به یک مبدل حرارتی صفحه تخت برای سرد کردن هوای تهویه کوپل شده است. آن‌ها اظهار کرده‌اند در صورتی این سیستم قابل قبول است که در یک سال مجموع ساعاتی که آسایش حرارتی برقرار نمی‌شود، کمتر از 100 ساعت (50 ساعت برای سرمایش و 50 ساعت برای گرمایش) باشد. برای مدل‌سازی سیستم از نرم‌افزار ترانسپس استفاده شده است. گام زمانی یک ساعت برای بررسی رفتار بازه زمانی کوتاه سیستم انتخاب شده است. پنج شهر برای بررسی انتخاب شده است. این محققان اظهار کرده‌اند که در صورت استفاده از روش‌های غیرفعال در طراحی ساختمان امکان استفاده از سیستم سرمایش مستقیم زمینی وجود دارد. در مورد تعداد و ترکیب گمانه‌ها و نحوه مدل‌سازی آن‌ها اطلاعات زیادی داده نشده است. در این مطالعه بیشتر کاهش بار مصرفی ساختمان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است تا استفاده از سیستم سرمایش زمینی امکان‌پذیر شود.

در ایران نیز حیدری‌نژاد و همکاران [5] استفاده مستقیم از یک گمانه با یک فن کوئل و یک سیستم سرمایش تبخیری مستقیم برای شهر تهران را به صورت عددی بررسی کرده‌اند. در این مطالعه مبدل حرارتی زمینی به‌عنوان سیستم کمکی برای سیستم سرمایش تبخیری مستقیم به‌کار رفته است. آب در داخل گمانه سرد شده و سپس با عبور از فن کوئل هوای ورودی به ساختمان را پیش سرد می‌کند، سپس هوا وارد سیستم سرمایش تبخیری مستقیم شده و با استفاده از سرمایش تبخیری بیشتر سرد می‌شود و در نهایت این هوای سرد به اتاق می‌رود. برای مدل‌سازی گمانه از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. مدل‌سازی فقط برای یک روز کاری از ساعت 9-17 انجام شده است. این روز گرم‌ترین روز تابستان انتخاب شده است. نتایج کار حیدری‌نژاد و همکاران نشان می‌دهد که در صورت استفاده تنها از سیستم سرمایش تبخیری مستقیم آسایش حرارتی برقرار نمی‌شود ولی در صورتی که از ترکیب گمانه و سیستم سرمایش تبخیری مستقیم استفاده شود می‌توان آسایش حرارتی را برقرار کرد.

همچنین یاری و همکاران [6] در یک مطالعه تجربی در شهر تبریز استفاده از پمپ حرارتی زمینی با لوله‌های افقی را بررسی کرده‌اند. مروری بر پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تا کنون مطالعات محدودی در زمینه استفاده مستقیم از مبدل‌های حرارتی زمین گرمایی در ساختمان انجام گرفته است. در این مطالعات ترکیب گمانه با فن کوئل در چند شهر مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در زمینه ترکیب گمانه با فن کوئل در شهرهای ایران مطالعه‌ای گزارش نشده است. هر چند که برآورد اولیه ما نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند برای سرمایش در بسیاری از شهرهای سرد و معتدل ایران مورد استفاده قرار گیرد. چون این سیستم‌ها تحت شرایط خاص پاسخ‌گوی بار سرمایش ساختمان هستند، به همین دلیل به بررسی رفتار دینامیکی این سیستم‌ها برای امکان‌سنجی استفاده از این

مورد کارکرد این سیستم‌ها اهمیت دارد پایداری سرمایش است. در این سیستم‌ها زمین به تنهایی بار سرمایش ساختمان را تأمین می‌کند، اگر در هنگام کار دمای زمین به شدت افزایش یابد توانایی سرمایش نیز به شدت کاهش می‌یابد [2].

در این سیستم همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است. آب با گردش در داخل گمانه گرمای خود را به زمین می‌دهد و خنک می‌شود و سپس این آب خنک شده با عبور از یک فن کوئل هوای ورودی به فضای داخلی ساختمان را خنک می‌کند. این سیستم سرمایش مستقیم زمینی (GSDCS^1) نامیده می‌شود. در این سیستم پمپ و فن تنها قسمت‌های مصرف‌کننده انرژی هستند که هر دو از مصرف انرژی پایینی برخوردار هستند. به دلیل عدم وجود قسمت‌های پر مصرف مانند کمپرسور، این سیستم یک سیستم غیر فعال است.

لی و همکاران [2] استفاده از سیستم GSDCS را برای تهویه یک ساختمان در شهر هاربین چین بررسی کرده‌اند. فضای مورد نظر آن‌ها برای تهویه یک اتاق کار دانشجویی با مساحت 23 متر مربع است. کارکرد این سیستم در 50 روز کار متوالی در تابستان بررسی شده است. ساعات کاری سیستم در یک روز 12 ساعت بوده است. اندازه‌گیری‌های محققین نشان می‌دهد که دمای اتاق در محدوده $24-26^{\circ}\text{C}$ درجه باقی می‌ماند. محققین آن را برای آن منطقه رضایت بخش اعلام کرده‌اند. همچنین نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که دمای زمین در طول ساعات کاری سیستم افزایش (در حد یک درجه) می‌یابد که همین امر نیز کارکرد این سیستم را کاهش می‌دهد.

دنگ و همکاران [3] نیز در یک کار تحلیلی به بررسی و تحلیل استفاده از گمانه همراه با یک فن کوئل پرداخته‌اند. برای موازنه حرارتی سالانه زمین، فرض شده است که در زمستان نیز از پمپ حرارتی زمین گرمایی برای گرمایش و تأمین آب گرم ساختمان استفاده می‌شود. ابعاد گمانه برابر با ابعاد مورد نیاز برای کارکرد پمپ حرارتی زمین گرمایی فرض شده است. طول گمانه 120 m در نظر گرفته شده است. بررسی‌ها برای شهر تیانجین با دمای عمق زمین 15.7°C انجام گرفته است. ساعات کاری سیستم در یک شبانه

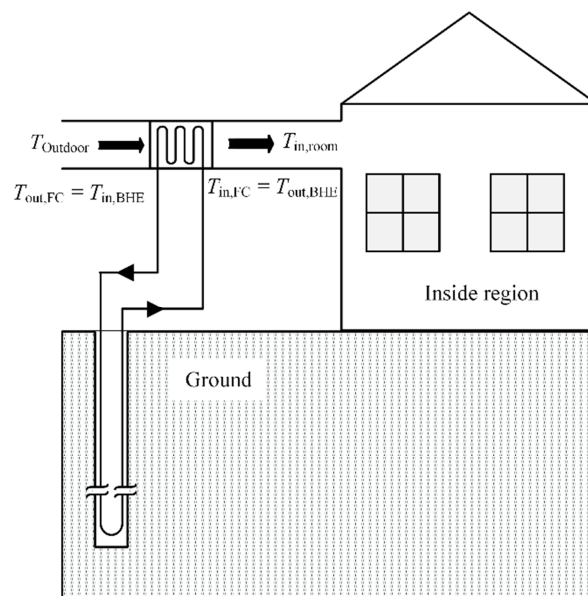


Fig.1 Schematic diagram of ground sink direct cooling system.

شکل 1 شماتیک سیستم سرمایش مستقیم زمینی

¹ ground sink direct cooling system

کرده است برای محاسبه توابع $G_b(t)$ از مدل منبع استوانه‌ای نامحدود استفاده شود. تابع $G_b(t)$ براساس مدل منبع استوانه‌ای نامحدود¹ (ICL) به صورت رابطه (8) است [9].

$$G_{b,ICL}(t) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2 \frac{2\alpha_s t}{r_b}} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} \times [J_0(\frac{r}{r_b} \beta) Y_1(\beta) - J_1(\beta) Y_0(\frac{r}{r_b} \beta)] \frac{d\beta}{\beta^2} \quad (8)$$

در رابطه (8) α_s بیانگر ضریب نفوذ حرارتی و r_b شعاع گمانه است. J و Y به ترتیب توابع بسل نوع اول و دوم است.

نویسندگان مقاله حاضر یک مدل تحلیلی برای بررسی انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی گمانه در بازه زمانی کوتاه ارائه کرده‌اند [10]. در این مدل از روش مقاومت ظرفیت در داخل گمانه و حل معادله مشتق جزئی انتقال حرارت رسانشی در راستای شعاعی در خارج از گمانه برای مدل‌سازی استفاده شده است. با توجه به این که این مدل می‌تواند برای دوره زمانی بالاتر از یک سال مورد استفاده قرار گیرد در این مقاله از این مدل هم برای طراحی و هم برای مدل‌سازی دینامیکی استفاده خواهد شد. شماتیکی از مدار معادل این مدل در شکل 2 نشان داده است. در این شکل $T_{f1}(t)$ و $T_{f2}(t)$ دمای سیال در لوله‌های رفت و برگشت است. q_{f1} و q_{f2} انتقال حرارت انتقال یافته بر واحد عمق است. هدف در این قسمت، محاسبه $T_{f1}(t)$ و $T_{f2}(t)$ و $T_b(t)$ به ازای مقادیر مشخص q_{f1} و q_{f2} است. تابع $G_b(t)$ براساس مدل توسعه داده شده براساس مدل مینایی و معرفت [10] در فضای لاپلاس به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود.

$$\bar{G}_{b,present}(s) = \frac{1}{1 + R_{gb}/\varphi(s)} \frac{1}{s(-\frac{2}{R_{fg}} + \psi(s) + C_f R_{fg} s \psi(s))} \quad (9)$$

که در آن روابط (11,10) به صورت زیر است.

$$\psi(s) = C_g s + \frac{2}{R_{fg}} + \frac{1}{R_{gb}} - \frac{1}{R_{gb}(1 + R_{gb}/\varphi(s))} \quad (10)$$

$$\varphi(s) = \frac{1}{2k_s \pi r_b \sqrt{s/\alpha_s}} \frac{K_0(r_b \sqrt{s/\alpha_s})}{K_1(r_b \sqrt{s/\alpha_s})} \quad (11)$$

در روابط (11-9) R_{fg} مقاومت سیال-دوگاب و R_{gb} مقاومت حرارتی بین دوگاب و دیوار گمانه است. C_f و C_g به ترتیب بیانگر ظرفیت حرارتی سیال و دوگاب است. برای محاسبه تابع $G_{st}(t)$ از تبدیل لاپلاس معکوس عددی استفاده می‌شود. روابط تبدیل لاپلاس معکوس عددی و همچنین نحوه محاسبه پارامترهای مورد استفاده در روابط (11-9) در مرجع [10] به طور کامل توضیح داده شده‌اند.

در رابطه (1) عبارت Q_y بیانگر بار متوسط حرارتی سالانه تبادل شده بین زمین و گمانه است. Q_m برابر با بار حرارتی بیشینه ماهانه تبادل شده بین زمین و گمانه است. Q_h نیز برابر با بیشینه مقدار بار ساعتی سالانه یا (با بیشینه 6 ساعته سالانه) تبادل شده بین زمین و گمانه است، همچنین عمق طراحی هم براساس بارهای گرمایش و هم براساس بارهای سرمایش محاسبه می‌شود و در نهایت بیشینه این دو مقدار به عنوان مقدار نهایی انتخاب می‌شود. برای محاسبه سه پارامتر Q_h ، Q_m و Q_y نیاز به محاسبه بار حرارتی

سیستم‌ها در شهرهای سرد و معتدل نیاز است. در همین راستا استفاده از گمانه برای سرمایش مستقیم ساختمان در شهر سرد و معتدل تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه ابتدا طراحی و شبیه‌سازی حرارتی این گمانه توضیح داده شده و سپس استفاده مستقیم از این گمانه‌ها برای سرمایش ساختمان بررسی خواهد شد.

2- استفاده مستقیم از گمانه در ساختمان

در این قسمت ابتدا طراحی گمانه و محاسبات مربوط به آن توضیح داده می‌شود و سپس سرمایش مستقیم زمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای طراحی فرض می‌شود که مبدل حرارتی زمین گرمایی در زمستان به یک پمپ حرارتی کوپل شده و در تابستان نیز مستقیماً به یک فن کوپل برای سرد کردن هوای تهویه کوپل شده است.

2-1- طراحی گمانه‌ها

در این مقاله برای طراحی مبدل‌های حرارتی زمینی از روش برنیر [7] استفاده خواهد شد. این روش همانند روش استاندارد اشری 2011 [9] است. براساس روش برنیر عمق طراحی لازم برای مبدل‌های حرارتی گمانه به صورت رابطه (1) است.

$$H = \frac{Q_h R_{bt} + Q_h R_{6h} + Q_y R_{10y} + q_m R_{1m}}{T_f - (T_{Ground} + T_p)} \quad (1)$$

در ادامه تمامی پارامترهای موجود در رابطه (1) توضیح داده شده و نحوه محاسبه آن‌ها بیان خواهد شد.

در رابطه (1) T_{Ground} برابر با دمای عمق زمین است. T_f برابر میانگین دمای سیال ورودی به گمانه و دمای سیال خروجی از گمانه است که به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود.

$$T_f = \frac{T_{in,BHE} + T_{out,BHE}}{2} \quad (2)$$

براساس استاندارد اشری 2011 [9] دمای $T_{in,BHE}$ برای محاسبه عمق طراحی گمانه در حالت سرمایش ساختمان باید $11-17^\circ\text{C}$ بالاتر از T_{Ground} و در حالت گرمایش باید $6-11^\circ\text{C}$ کوچک‌تر از دمای زمین در نظر گرفته شود.

رابطه (3) در ادامه دمای $T_{out,BHE}$ از رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$T_{out,BHE} = T_{in,BHE} + \frac{Q_h}{\dot{m}_w c_{pf}} \quad (3)$$

در رابطه (1) T_p دمای پنالتی است. این پارامتر ناشی از اثر گمانه‌های مجاور را بر هم است. در حالتی که فقط یک گمانه وجود دارد $T_p = 0$ است.

مقاومت‌های R_{6h} ، R_{1m} و R_{10y} به ترتیب مقاومت‌های حرارتی به ازای یک پالس حرارتی واحد شش ساعته، یک ماهه و ده ساله است. این مقاومت‌ها از روابط (4-6) محاسبه می‌شوند.

$$R_{6h} = \frac{G_b(t_{6h})}{k_s} \quad (4)$$

$$R_{1m} = \frac{(G_b(t_{1m+6h}) - G_b(t_{6h}))}{k_s} \quad (5)$$

$$R_{10y} = \frac{(G_b(t_{10y+1m+6h}) - G_b(t_{1m+6h}))}{k_s} \quad (6)$$

تابع $G_b(t)$ تابع پاسخ براساس دمای دیواره نامیده می‌شود و به صورت رابطه (7) تعریف می‌شود.

$$G_b(t) = k_s \frac{T_b(t) - T_{Ground}}{q_{f1} + q_{f2}} \quad (7)$$

که q_{f1} و q_{f2} گرمای داده شده به سیال داخل لوله‌های رفت و برگشت به ازای واحد طول لوله است. $T_b(t)$ نیز دمای دیوار گمانه است. برنیر [8] توصیه

¹ Infinite cylinder source

تعداد افراد حاضر در اتاق یک نفر در نظر گرفته شده است. با توجه به این که سطح اتاق برابر با 48m^2 است. با لامپ‌ها به‌طور معمول $5\text{W}/\text{m}^2$ برای هر مترمربع در نظر گرفته می‌شود. [12] به همین دلیل بار کل روشنایی $5\text{W}/\text{m}^2 \times 48\text{m}^2 = 240\text{W}$ در نظر گرفته شده است.

بار داخلی براساس کاربری ساختمان و وسایل گرمایشی استفاده شده داخل آن متفاوت است. در این اتاق فرض شده است که یک تلویزیون و یک لپ تاپ وجود دارد. براساس مرجع [12]. برای این دو وسیله مجموع بار داخلی 250W و نرخ تعویض هوا 0.5 ACH است.

برای محاسبه طول گمانه نیاز به توزیع بار حرارتی زمینی داریم. در صورتی که گمانه به‌صورت مستقیم استفاده شود بار حرارتی زمینی برابر با بار حرارتی ساختمان خواهد بود. در صورتی که گمانه کوپل با یک پمپ حرارتی استفاده شود. در این صورت بار حرارتی زمینی از روابط (13,12) در زیر محاسبه خواهد شد.

برای بارهای گرمایش

$$q_{\text{Ground}} = Q_{\text{heating load}} \cdot \left(\frac{\text{COP}-1}{\text{COP}} \right) \quad (12)$$

و برای بارهای سرمایش:

$$q_{\text{Ground}} = Q_{\text{Cooling load}} \cdot \left(\frac{\text{COP}+1}{\text{COP}} \right) \quad (13)$$

2-2- سرمایش مستقیم زمینی

در این قسمت هدف بررسی استفاده مستقیم از گمانه در ساختمان نمونه در شهر تبریز است. مبدل حرارتی و گمانه در نرم‌افزار مدل می‌شوند و ساختمان نمونه در نرم‌افزار انرژی پلاس مدل می‌شود. برای بررسی سرمایش مستقیم زمینی در اتاق نمونه نیاز به کوپل نرم‌افزار انرژی پلاس و مدل است. بدین منظور از نرم‌افزار مدل و کد GUI+ MLE+ استفاده می‌شود. کد GUI+ MLE+ توسط برنال و همکاران [13] در دانشگاه پنسیلوانیا توسعه یافته است. این ابزار برای استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار مدل در طراحی، بهینه‌سازی و... در نرم‌افزار انرژی پلاس توسعه داده شده است. این ابزار به‌عنوان رابط بین نرم‌افزار انرژی پلاس و نرم‌افزار مدل عمل می‌نماید.

در ادامه نحوه کارکرد این ابزار برای سرمایش مستقیم زمینی توضیح داده می‌شود. شماتیکی از سرمایش مستقیم زمینی در شکل 1 نشان داده شده است. آب در داخل گمانه به گردش درآمده و دمای آن کاهش می‌یابد. آب خروجی از گمانه به فن کوپل رفته و در آن‌جا هوای ورودی به اتاق را سرد می‌کند. در این شکل T_{Outdoor} دمای هوای محیط بیرون، $T_{\text{in,room}}$ دمای هوای ورودی به اتاق برای سرمایش اتاق، $T_{\text{in,BHE}}$ دمای آب ورودی به گمانه، $T_{\text{out,BHE}}$ دمای آب خروجی از گمانه، $T_{\text{in,FC}}$ دمای آب ورودی به فن کوپل و $T_{\text{out,FC}}$ دمای آب خروجی از فن کوپل است.

دما و دبی هوای خروجی از فن کوپل ورودی‌های نرم‌افزار مدل به انرژی پلاس هستند، همچنین دمای هوای محیط بیرون، بار حرارتی اتاق و دمای اتاق ورودی نرم‌افزار انرژی پلاس به نرم‌افزار مدل است. این ورودی و خروجی‌ها به‌صورت شماتیک در شکل 4 نشان داده شده است.

دبی هوای ورودی تعیین‌شده $\dot{m}_a = 0.2\text{ kg/s}$ است و در محاسبات، نرم‌افزار انرژی پلاس دبی را به‌صورت مقسوم‌های صحیح از دبی جرمی $\dot{m}_a = 0.2\text{ kg/s}$ در نظر می‌گیرد به‌گونه‌ای که آسایش حرارتی اتاق برقرار شود. سیستم کنترل گمانه به‌صورت روشن خاموش است. در حالت روشن دبی جرمی آب برابر با $\dot{m}_w = 0.2\text{ kg/s}$ و ثابت در نظر گرفته می‌شود. اگر بار صفر باشد سیستم گمانه به صورت خاموش در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان

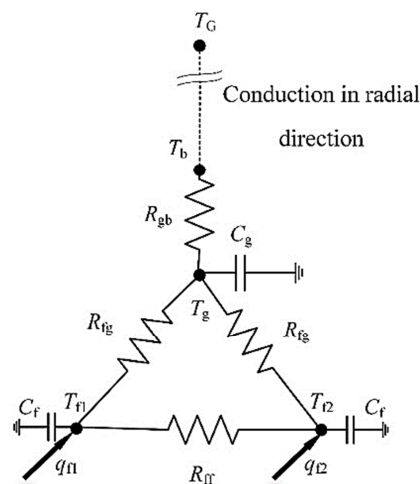


Fig. 2 Equivalent thermal network proposed by Minaei and Maerefat [10]

شکل 2 مدار معادل حرارتی در مطالعه مینایی و معرفت [10]

ساعتی و ماهانه ساختمان نمونه است. برای این منظور نیاز به مدل‌سازی ساختمان نمونه در نرم‌افزارهای مرتبط مانند انرژی پلاس است. به منظور محاسبه بار حرارتی لازم برای محاسبه عمق گمانه باید یک ساختمان نمونه در نظر گرفت. در این بخش اتاق 600 استاندارد انسا-اشری 2007-140¹ [11] انتخاب شده است. اتاق استاندارد 600 یک فضای نمونه به ابعاد $8 \times 6 \times 2.7$ متر و دارای دو پنجره به ابعاد 2×3 متر در دیوار جنوبی است. پنجره‌ها در ارتفاع 20 سانتی‌متری از کف زمین قرار گرفته‌اند. فضای نمونه در شکل 3 نشان داده شده است.

دیوار جنوبی و سقف در ارتباط با محیط خارج و دیگر دیوارها آدیباتیک (در ارتباط با محیطی مشابه) در نظر گرفته شده‌اند. کف اتاق نیز به‌صورت متصل با زمین در نظر گرفته شده است. اینرسی حرارتی مصالح ساختمان در نظر گرفته شده است.

برای طراحی دماهای تنظیم 23°C در گرمایش و 24°C در سرمایش در نظر گرفته می‌شود.

در این بخش چون هدف محاسبه بار سالانه است، هیچ‌گونه سیستم تهویه مطبوع و گرمایش در نرم‌افزار انرژی پلاس لحاظ نشده و فقط خود ساختمان مدل شده است. اقلیم سرد و معتدل شهر تبریز در این قسمت برای محاسبه بار ساعتی در یک سال انتخاب شده است.

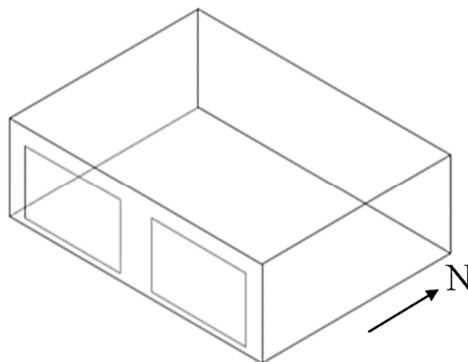


Fig.3 schematic presentation of Room 600 of ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 [11]

شکل 3 شکل فضای نمونه اتاق 600 استاندارد استاندارد انسا-اشری 2007-140 [11]

¹ ANSI/ASHRAE Standard 140-2007

در $T_{in,BHE}(t)$ دمای سیال در ورودی گمانه و $T_{out,BHE}(t)$ دمای سیال در خروجی گمانه است. مقدار کل انتقال حرارت انتقالی بین زمین و سیال عامل از رابطه (18) به دست می آید.

$$Q_f(t) = \dot{m}_w c_{pf} (T_{in,BHE}(t) - T_{out,BHE}(t)) \quad (18)$$

که در آن رابطه (19) را به صورت زیر داریم.

$$q_f(t) = \frac{Q_f(t)}{H} \quad (19)$$

\dot{m} دبی جرمی سیال در داخل لوله است. با استفاده از روابط (18,17) دمای خروجی به صورت رابطه (20) حساب می شود.

$$T_{out,BHE}(t) = T_f(t) - \frac{Q_f(t)}{2\dot{m}_w c_{pf}} \quad (20)$$

برای محاسبه دمای خروجی در لحظه t_n یعنی $T_{out,BHE}(t_n)$ نیاز به مقدار $Q_f(t_n)$ است، درحالی که برای محاسبه $Q_f(t_n)$ طبق رابطه (18) نیاز به مقدار $T_{out,BHE}(t_n)$ است. به همین دلیل در این قسمت از روش سعی خطا برای پیدا کردن مقدار $T_{out,BHE}(t_n)$ استفاده می شود. بدین ترتیب ابتدا یک مقدار برای $T_{out,BHE}(t_n)$ حدس زده می شود، سپس با استفاده از معادله (18) مقدار $Q_f(t_n)$ به دست می آید. در ادامه از معادله (17) مقدار $T_f(t_n)$ محاسبه می شود. سپس با استفاده از معادله (20) مقدار $T_{out,BHE}(t_n)$ جدید به دست می آید. مقدار جدید به دست آمده $T_{out,BHE}(t_n)$ با مقدار حدس زده شده اولیه مقایسه می شود، اگر اختلاف این دو مقدار کمتر از 10^{-6} باشد، فرایند در گام زمانی بعدی ادامه می یابد، و اگر این امر رخ ندهد مقدار جدید به دست آمده $T_{out,BHE}(t_n)$ با مقدار حدس اولیه جایگزین می شود و این حلقه تا محقق شدن شرط همگرایی ادامه می یابد.

در زمانی خاموشی سیستم با توجه به رابطه (21) مقدار $Q_f(t_n)$ برابر صفر است. در این حالت دمای سیال در تمامی نقطه ها برابر دمای متوسط سیال در نظر گرفته می شود، همچنین در زمان خاموشی چون دمای خروجی وجود ندارد. در نتیجه دمای سیال در لوله برگشت در عمق $z = 0m$ محاسبه شده و مقدار آن برابر با مقدار دمای خروجی به صورت رابطه (21) در نظر گرفته می شود.

$$T_{out,BHE}(t) = T_f(t) \quad (21)$$

با توجه به این که در زمان خاموشی سیستم مقدار $Q_f(t_n)$ مشخص و برابر صفر است؛ بنابراین برای پیدا کردن دمای سیال در خروجی نیازی به روش سعی و خطا نیست و دمای سیال طبق رابطه (21) به صورت مستقیم محاسبه می شود.

2-2-2-شبیه سازی حرارتی فن کویل

برای شبیه سازی فن کویل از روش ϵ -NTU استفاده می شود. در مدل سازی فرض می شود که فقط انتقال حرارت محسوس در فن کویل روی می دهد. هدف از شبیه سازی فن کویل محاسبه دمای آب و هوای خروجی از فن کویل به ازای دبی جرمی و دمای ورودی مشخص هوا و آب به فن کویل است. هوای خروجی از فن کویل به اتاق می رود و ورودی آن نیز هوای محیط بیرون است. در فن کویل دمای هوا و آب خروجی از مبدل به صورت روابط (23,22) است [14].

$$T_{in,room} = T_{outdoor} + \epsilon(T_{outdoor} - T_{in,FC}) \quad (22)$$

$$T_{out,FC} = T_{in,FC} + C(T_{outdoor} - T_{in,room}) \quad (23)$$

ϵ ضریب تأثیر مبدل حرارتی است و به صورت رابطه (24) تعریف می شود.

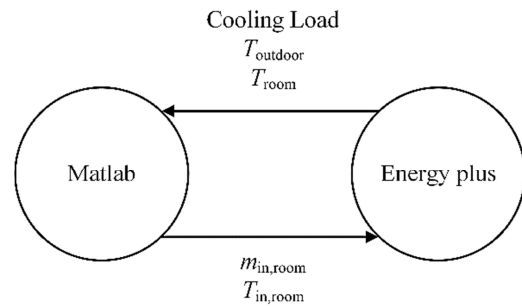


Fig.4 schematic presentation of inputs of the Matlab from the Energy plus and vice versa

شکل 4 شماتیکی از ورودی های انرژی پلاس به متلب و برعکس

می دهند که تغییر دبی جرم آب در گمانه تغییر محسوسی در عملکرد حرارتی سیستم گرمایش زیر زمینی ندارد.

2-2-1-شبیه سازی حرارتی گمانه

هدف از این قسمت به دست آوردن دمای سیال خروجی از گمانه به ازای دما و دبی های متغیر ورودی به گمانه با استفاده از تابع پاسخ براساس دمای متوسط سیال است. برای درک بهتر هندسه سه بعدی گمانه در شکل 5 نشان داده شده است. تابع پاسخ براساس دمای متوسط سیال به صورت رابطه (14) تعریف می شود.

$$G_{st}(t) = 2\pi k_s \frac{(T_{f1} + T_{f2})/2 - T_{Ground}}{q_{f1} + q_{f2}} \quad (14)$$

پس از حل مساله تابع پاسخ در فضای لاپلاس به صورت رابطه (15) به دست می آید [10].

$$\bar{G}_{st}(s) = \frac{2\pi k_s}{2s \left(C_{fs} + \frac{1}{R_{fg}} - \frac{2}{\psi(s) R_{fg}^2} \right)} \quad (15)$$

دمای متوسط سیال به ازای اعمال انتقال حرارت بر واحد عمق متغیر با زمان $(q_f = q_{f1} + q_{f2})$ از رابطه (16) به دست می آید.

$$T_f(t_n) = T_{Ground} + \frac{1}{2\pi k_s} \sum_{i=1}^n (q_{f,i} - q_{f,i-1}) G_{st}(t_n - t_{i-1}) \quad (16)$$

دمای متوسط سیال به صورت رابطه (17) تعریف می شود.

$$T_f(t) = \frac{T_{in,BHE}(t) + T_{out,BHE}(t)}{2} \quad (17)$$

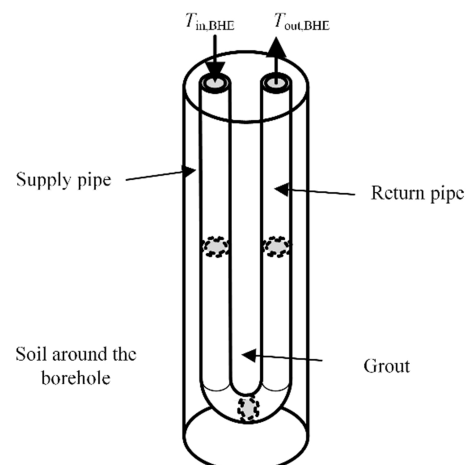


Fig.5 Schematic presentation of a Borehole heat exchanger

شکل 5 طرح نمادینی از یک مبدل حرارتی گمانه

جدول 1 چهار حالت مصالح ساختمان و جداره پنجره

Table 1 four different combinations of constructions and glazing

حالت 1: ساختمان بدون عایق و با پنجره تک جداره			
دیوار خارجی	گچ	بتن	سنگ نما
سقف	گچ	بتن	آسفالت
پنجره	شیشه		
حالت 2: ساختمان بدون عایق و با پنجره دو جداره			
دیوار خارجی	گچ	بتن	سنگ نما
سقف	گچ	بتن	آسفالت
پنجره	شیشه	هوا	شیشه
حالت 3: ساختمان با لایه عایق نازک و با پنجره دو جداره			
دیوار خارجی	گچ	عایق (2.5cm)	بتن
سقف	گچ	عایق (2.5cm)	بتن
پنجره	شیشه	هوا	شیشه
حالت 4: ساختمان مطابق مبحث 19			
دیوار خارجی	گچ	عایق (5.0cm)	بتن
سقف	گچ	عایق (5.0cm)	بتن
پنجره	شیشه	هوا	شیشه

پس از محاسبه این پارامترها نوبت به محاسبه مقاومت‌های R_{10y} و R_{1m} ، R_{6h} می‌رسد. این مقاومت‌ها را همان‌طور که در بخش 2-1 بیان شد می‌توان از مدل ارائه شده توسط مینایی و معرفت [10] و مدل منبع استوانه‌ای نامحدود [9] محاسبه کرد. برای محاسبه این مقاومت‌ها نیاز به خواص ترموفیزیکی و مشخصات هندسی اجزای گمانه است. یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی مبدل‌های زمینی مقدار ضریب هدایت حرارتی خاک است. یاری و همکاران [6] در یک مطالعه تجربی در شهر تبریز استفاده از پمپ حرارتی زمینی با لوله‌های افقی را بررسی کرده‌اند. ایشان در مطالعه خود ضریب هدایت حرارتی را به صورت تجربی برابر با $k_s = 1.08 \text{ W/mK}$ به دست آورده‌اند. در این مقاله این مقدار ضریب هدایت حرارتی خاک برای طراحی استفاده خواهد شد.

پارامتر مهم دیگر در طراحی گمانه ها مقدار ضریب هدایت حرارتی دوغاب می باشد. در استاندارد اشری 2011 [8] مقدار ضریب هدایت دوغاب برای چند ماده ارائه شده است. در این مقاله برای دوغاب از ترکیب 80 درصد خاک رس و 20 درصد بنتونیت استفاده خواهد شد. تمامی خواص ترموفیزیکی برای طراحی گمانه در جدول 3 و خواص هندسی در جدول 4 آمده است.

در محاسبه عمق طراحی گمانه نحوه کارکرد سیستم مبدل حرارتی تأثیر بسزایی دارد. برای محاسبه عمق طراحی دو روش وجود دارد: 1- در روش اول مبدل حرارتی گمانه هم در حالت سرمایش و هم در حالت گرمایش کوپل به پمپ حرارتی است.

جدول 2 خواص ترموفیزیکی مصالح ساختمان

Table 2 Thermal properties building construction materials

مواد	ρ (kgm^{-3})	c_p ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	thickness (cm)
بتن	2300	960	1.4	20
گچ	800	1000	0.3	3.0
سنگ نما	2590	880	2.9	2
آسفالت	2100	920	0.7	2
پلی استایرن	35	1300	0.037	2.5, 5

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{\dot{m}_a c_{pa} (T_{\text{Outdoor}} - T_{\text{in,room}})}{\dot{m}_a c_{pa} (T_{\text{Outdoor}} - T_{\text{in,FC}})} \quad (24)$$

در رابطه (24) \dot{m}_a دبی جرمی هوا، c_{pa} گرمای هوا ویژه در فشار ثابت، $T_{\text{in,room}}$ و $T_{\text{in,FC}}$ به ترتیب دمای هوای بیرون، دمای هوای ورودی به اتاق و دمای آب ورودی به مبدل است.

ضریب تأثیر به مشخصات هندسی فن کوپل، مشخصات حرارتی آب و هوا و دبی جرمی هر دو سیال بستگی دارد. برای یک مبدل حرارتی با جریان ناهمسو ضریب تأثیر به صورت رابطه (25) است [14].

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1 - CR))}{1 - CR \exp(-NTU(1 - CR))} \quad (25)$$

که $CR = \frac{(\dot{m}c_p)_{\min}}{(\dot{m}c_p)_{\max}}$ و NTU تعداد واحد انتقال است.

3- بحث و نتایج

در بخش 2 نحوه محاسبه عمق طراحی گمانه و مدل سازی دینامیکی سیستم سرمایش مستقیم توضیح داده شد در این قسمت ابتدا عمق طراحی محاسبه شده و سپس امکان سنجی استفاده مستقیم از گمانه انجام می‌شود.

3-1- عمق طراحی گمانه

برای طراحی گمانه فرض شده است که مبدل حرارتی گمانه در حالت گرمایش کوپل با پمپ حرارتی و در حالت سرمایش بصورت مستقیم استفاده شده است. برای محاسبه عمق گمانه مورد نیاز برای اتاق نمونه نیاز به محاسبه بارهای حرارتی زمینی Q_h ، Q_v و مقاومت‌های حرارتی R_{10y} و R_{1m} ، R_{6h} است. برای محاسبه بارهای حرارتی همان‌طور که در بخش 2 توضیح داده شد نیاز به محاسبه توزیع ساعتی بار حرارتی و برودتی ساختمان برای یک سال است. برای این ساختمان مصالح رایج در ایران در نظر گرفته شده است. مصالح ساختمان و نوع جداره پنجره‌ها به شدت بر بارهای حرارتی تأثیر می‌گذارند. در این قسمت براساس مصالح استفاده شده چهار نوع ساختمان در نظر گرفته شده است. این 4 نوع ساختمان در جدول 1 نشان داده شده‌اند. در جدول 1 مصالح به ترتیب از داخل به خارج نشان داده شده‌اند. ساختمان اول ساختمان معمولی و بدون عایق و با پنجره تک جداره، ساختمان دوم مشابه همان ساختمان اول است با این تفاوت که در آن از پنجره دو جداره استفاده شده است. به این دلیل این ساختمان را ساختمان با پنجره دو جداره می‌نامیم. در ساختمان سوم نیز از یک لایه عایق نازک به ضخامت 2.5cm در دیوار خارجی و سقف استفاده شده است. در ساختمان چهارم از یک لایه عایق با ضخامت 5cm در دیوار خارجی و سقف استفاده شده است. در ساختمان چهارم ضخامت عایق به گونه‌ای انتخاب شده است که که مقاومت حرارتی دیوارهای خارجی از منظر مبحث 19 مقررات ملی ساختمان در محدوده مجاز باشد [15].

در جدول 2 خواص حرارتی مصالح و ضخامت مصالح ساختمان نشان داده شده است. خواص حرارتی مواد در جدول 2 از مبحث 19 مقررات ملی ساختمان [15] استخراج شده است.

برای محاسبه بار حرارتی از نرم افزار انرژی پلاس استفاده می‌شود. برای ساختمان با پنجره تک جداره توزیع ساعتی بار حرارتی و برودتی برای شهر تبریز در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به این که در شهر تبریز بار حرارتی بیشتر از برودتی است؛ بنابراین طراحی گمانه برای حالت گرمایش انجام می‌شود. به عبارت دیگر Q_h بیشینه بار گرمایش ساعتی و Q_m بیشینه بار گرمایش ماهانه است.

جدول 3 خواص ترموفیزیکی مواد گمانه

Table 3 Thermal properties of borehole materials

مواد	ρ (kgm^{-3})	c_p ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
خاک	2000	752	1.08
HDPE	1100	1680	0.42
دوغاب	2000	1900	1.5
آب	998	4200	0.6

جدول 4 مشخصات هندسی گمانه [10]

Table 4 Geometric parameters of the borehole [10]

شعاع گمانه	6.5(cm)
شعاع داخلی لوله U شکل	1.37(cm)
شعاع خارجی لوله U شکل	1.67(cm)
فاصله دو لوله U شکل	8.0(cm)

یک سیستم سرمایش غیرفعال است، معیار آسایش نزدیک به محدوده بالایی یعنی 26°C انتخاب شده است.

در این قسمت کاربری مسکونی و اداری ساختمان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در کاربری مسکونی فرض می‌شود در تمام ساعات شبانه‌روز، اتاق در شرایط آسایش حرارتی است. بررسی ما نشان داد که در دو ماه نخست سال بار سرمایش برای ساختمان نمونه در شهر تبریز در تمامی ساعات به طور تقریبی برابر صفر است. به همین دلیل دوره زمانی مدل‌سازی از ابتدای خرداد تا آخر شهریور در نظر گرفته می‌شود. برای این حالت دمای متوسط اتاق در 123 روز مدل‌سازی در زمان روشن بودن سیستم در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌طور که پیشتر در این مقاله اشاره شد پاهود و همکاران معیار قابل بودن این سیستم را برای حالت سرمایش کمتر بودن ساعات عدم آسایش از 50 ساعت دانسته‌اند [3]. در این مقاله نیز از این معیار استفاده شده است. ساختمان با پنجره تک‌جداره در شهر تبریز در 123 روز 1655 ساعت سیستم تهویه روشن است. مشاهده می‌شود که به جز زمان اندک در باقی زمان‌ها دمای اتاق در زمان سرمایش کمتر از 26°C است. مجموع ساعاتی که دمای اتاق از 26°C بالاتر می‌رود، 13 ساعت است.

در جدول 5 مقدار عمق طراحی و نتایج حاصل از سرمایش مستقیم زمینی برای چهار ساختمان نشان داده شده است. در این جدول عملکرد گمانه‌های مختلف با عمق «محاسبه شده طبق استاندارد» مقایسه شده است. عمق طراحی گمانه برای چهار حالت متفاوت است. هدف از این مقایسه بررسی تأثیر مصالح ساختمان در عمق طراحی گمانه بوده است. با مقایسه مقادیر عمق طراحی ساختمان‌های با پنجره تک‌جداره و پنجره دو جداره مشاهده می‌شود که استفاده از پنجره دو جداره در ساختمان سبب کاهش عمق گمانه به مقدار بیش از 10% می‌شود، همچنین مشاهده می‌شود استفاده از عایق در ساختمان می‌تواند تا 50% عمق طراحی گمانه را کاهش دهد. به همین دلیل استفاده از گمانه در یک ساختمان کم مصرف می‌تواند تا حد بسیاری هزینه اولیه و جاری استفاده از گمانه‌ها را کاهش دهد. برای ساختمان با پنجره دو جداره و ساختمان با عایق نازک نیز تعداد ساعات عدم آسایش حرارتی در مقایسه با تعداد ساعات تهویه بسیار ناچیز است که نشان می‌دهد سیستم سرمایش زمینی با عمق طراحی به‌دست‌آمده برای این حالت پاسخگو است.

تنها در ساختمان مطابق با مبحث 19 مقدار عدم آسایش بیشتر از 50 ساعت است که محاسبات ما نشان می‌دهد که برای این حالت در صورتی که

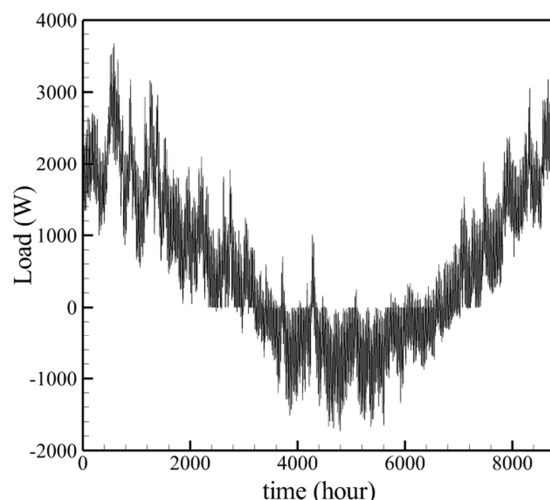


Fig.6 Hourly building loads for the building without insulation and with single glazings window for 123 days of cooling period

شکل 6 توزیع ساعتی بار حرارتی و برودتی برای اتاق نمونه در ساختمان بدون عایق و با پنجره تک‌جداره (حالت 1)

2- در روش دوم مبدل حرارتی گمانه در حالت سرمایش کوپل به ساختمان و در حالت گرمایش کوپل به پمپ حرارتی است.

با توجه این‌که در این مقاله هدف بررسی استفاده از گمانه به‌عنوان چاه حرارتی ساختمان می‌باشد به همین دلیل روش دوم برای محاسبه عمق طراحی استفاده شده است.

روابط (26,27) به ترتیب مقدار عمق طراحی حاصل از مدل منبع استوانه‌ای نامحدود و مدل مینایی و معرفت [10] را برای ساختمان بدون عایق و با پنجره تک جداره را در شهر تبریز نشان می‌دهند.

$$H_{\text{Present}} = 129 \text{ m} \quad (26)$$

$$H_{\text{ICL}} = 134 \text{ m} \quad (27)$$

مشاهده می‌شود که مدل منبع استوانه‌ای نامحدود و مدل مینایی و معرفت [10] برای محاسبه عمق طراحی گمانه مقدار عمق طراحی را به طور تقریبی یکسان برآورد می‌کنند. در مدل منبع استوانه‌ای نامحدود انتقال حرارت در داخل گمانه به‌صورت پایا و در خارج از آن به‌صورت گذرا در نظر گرفته شده است. در این مدل تأثیر هندسه داخل گمانه، ظرفیت حرارتی سیال داخل لوله، لوله و دوغاب در نظر گرفته نشده است. به همین دلیل این مدل‌ها برای زمان‌های کوتاه (از چند ساعت تا چند روز) که در آن باید رفتار دینامیکی گمانه را در نظر گرفت مناسب نیستند [10]. به همین دلیل مدل منبع استوانه‌ای نامحدود نمی‌تواند برای شبیه‌سازی دینامیکی مبدل حرارتی گمانه استفاده شود. مدل مینایی و معرفت [10] علاوه بر این‌که می‌تواند برای مدل سازی دینامیکی مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار گیرد، همچنین با توجه به معادلات (26,27) می‌تواند برای محاسبه عمق طراحی گمانه نیز استفاده شود.

3-2- نتایج سرمایش مستقیم زمینی

در نهایت پس از مدل‌سازی و لینک کردن دو نرم‌افزار محاسبات انجام می‌شود. در این قسمت برای محاسبات شهر تبریز انتخاب شده است. متوسط دمای سالیانه در این شهر 12°C است. استاندارد اشری 2009 [16] معیار آسایش حرارتی برای سرمایش به‌طور تقریبی بین $24-26.5^\circ\text{C}$ درجه سلسیوس بیان کرده است. با توجه این‌که سیستم سرمایش مستقیم زمینی

می‌شود در سیستم در لحظه آغاز به کار متحمل بار حرارتی بیشتری شود. ساختمان‌های اداری برخلاف ساختمان‌های مسکونی در قسمتی از شبانه‌روز کاربری دارند و در باقی ساعات بسته هستند؛ همین امر سبب می‌شود بیشینه بار ماهانه (Q_m) در ساختمان‌های اداری کمتر از ساختمان‌های مسکونی باشد. در ساختمان‌های اداری مقدار Q_y کمتر از ساختمان‌های مسکونی است. همان‌طور که نتایج جدول 5 و 6 نشان می‌دهند در ساختمان‌های با کاربری اداری افزایش Q_h و کاهش Q_m و Q_y به ساختمان‌های با کاربری مسکونی در نهایت سبب کاهش عمق طراحی در ساختمان‌های بدون عایق و افزایش عمق طراحی در ساختمان‌های حاوی عایق می‌شود.

در این مقاله سرمایش مستقیم زمینی در شهر تبریز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این‌که دمای متوسط سالیانه شهرهای سردسیر دیگر مانند همدان، زنجان، شهرکرد، ارومیه و اردبیل برابر یا کمتر از دمای متوسط سالیانه شهر تبریز است، نتایج حاصل از این شهر را می‌توان به این شهرها تعمیم داد.

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله استفاده مستقیم از مبدل حرارتی گمانه برای سرمایش ساختمان با کاربری مسکونی و اداری در شهر تبریز بررسی و عملکرد حرارتی این سیستم برای یک ساختمان نمونه با چهار نوع مصالح مختلف بررسی شده است.

ابتدا عمق طراحی گمانه برای هر چهار حالت استفاده شده است. برای طراحی گمانه فرض شده که مبدل حرارتی گمانه در حالت گرمایش کوپل با پمپ حرارتی و در حالت سرمایش به‌صورت مستقیم استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پنجره دو جداره نسبت به پنجره تک‌جداره عمق طراحی گمانه را تا حدود 10% می‌کاهد، همچنین استفاده از عایق در دیوار خارجی ساختمان تا 50% سبب کاهش عمق طراحی گمانه می‌شود.

در ادامه استفاده از گمانه در ساختمان مسکونی و اداری بررسی شده است. برای ساختمان با کاربری مسکونی در صورت از استفاده از عمق طراحی گمانه محاسبه شده، تعداد ساعات عدم آسایش در سه ساختمان با دیوارهای بدون عایق و با پنجره تک‌جداره، ساختمان با دیوارهای بدون عایق و با پنجره دو جداره و همچنین ساختمان با دیوارهای با عایق نازک و با پنجره دو جداره کمتر از 50 ساعت است که نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم قابل پذیرش است. در ساختمان طراحی‌شده مطابق مبحث 19 تعداد ساعات عدم آسایش از 50 ساعت تجاوز می‌کند که برای این حالت پیشنهاد شده که مقدار عمق طراحی 20% بیشتر در نظر گرفته شود تا تعداد ساعات عدم آسایش کمتر از 50 ساعت شود.

جدول 6 مقادیر عمق طراحی و عملکرد سیستم سرمایش مستقیم زمینی برای کاربری اداری در چهار حالت

Table 6 the values of the design length and performance of free ground cooling system for office building in four cases

ساختمان	عمق طراحی گمانه (m)	ساعات تهویه	ساعات عدم آسایش
حالت 1	125	869	9
حالت 2	115	795	16
حالت 3	78	658	40
حالت 4	64	593	44

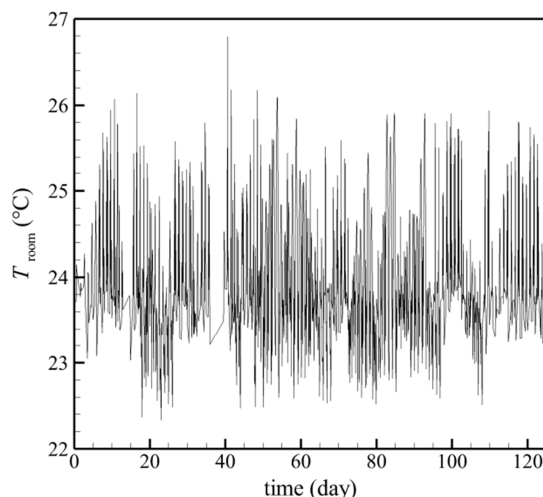


Fig.7 variations of the room temperature building without insulation and with single glazings window for 123 days of cooling period

شکل 7 تغییرات دمای اتاق برای ساختمان بدون عایق و پنجره‌های تک‌جداره (حالت 1) از 1 تیر تا 31 شهریور (123 روز)

جدول 5 مقادیر عمق طراحی و عملکرد سیستم سرمایش مستقیم زمینی برای کاربری مسکونی در چهار حالت

Table 5 the values of the design length and performance of free ground cooling system for residential building in four cases

ساختمان	عمق طراحی گمانه (m)	ساعات تهویه	ساعات عدم آسایش
حالت 1	129	1655	13
حالت 2	118	1586	18
حالت 3	74	1247	32
حالت 4	56	1163	58

عمق طراحی گمانه برابر با 66m (20% بیشتر از عمق طراحی به‌دست‌آمده) در نظر گرفته شود مقدار ساعات عدم آسایش به 26 ساعت می‌رسد.

استفاده از سیستم سرمایش زمینی برای تهویه ساختمان مسکونی و اداری در شهرهای سردسیر ایران در سه ساختمان با پنجره تک‌جداره، دو جداره و ساختمان با عایق نازک در صورتی که عمق طراحی از رابطه (1) محاسبه شود می‌تواند آسایش حرارتی را در داخل ساختمان برقرار کند. در صورت استفاده از مصالح ساختمان مطابق با مبحث 19 مقدار عمق طراحی باید از مقدار به‌دست‌آمده در رابطه (1) باید 20% بزرگ‌تر در نظر گرفته شود. جدول 6 مقادیر عمق طراحی و همچنین نتایج استفاده از اتاق نمونه را برای کاربری اداری نشان می‌دهد. در کاربری اداری فرض شده است که سیستم فقط در ساعات 8 تا 18 روشن است با توجه به جدول 6 مشاهده می‌شود که سیستم سرمایش مستقیم زمینی در صورتی که عمق گمانه برابر با عمق طراحی به‌دست‌آمده از رابطه (1) در نظر گرفته شود، می‌تواند آسایش حرارتی را به‌طور تقریبی در تمام زمان‌های نیازمند سرمایش برآورده کند.

مشاهده می‌شود برای ساختمان‌های بدون عایق، مقدار عمق طراحی گمانه برای کاربری مسکونی بیشتر از کاربری اداری است و برای ساختمان‌هایی که در دیوار آن‌ها عایق به‌کار رفته، مقدار عمق طراحی گمانه برای کاربری اداری بیشتر است. در ساختمان‌های اداری مقدار Q_h (بیشینه مقدار بار ساعتی زمینی) بیشتر از ساختمان‌های مسکونی است. دلیل این امر خاموش بودن سیستم در زمان بسته بودن اداره است که این امر سبب

در صورت استفاده از سیستم سرمایش مستقیم زمینی برای هر چهار حالت در ساختمان با کاربری اداری، تعداد ساعات عدم آسایش کمتر از 50 ساعت است که نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم در ساختمان اداری برای شهر تبریز قابل پذیرش است.

5-فهرست علائم

h	ساعتی	A	سطح مقطع (m)
heating load	بار گرمایش ساختمان	C	ظرفیت حرارتی
cooling load	بار سرمایش ساختمان	COP	ضریب عملکرد
m	ماهانه	c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
mean	متوسط	G	تابع پاسخ زمانی
out	خروجی	H	عمق طراحی گمانه (m)
Outdoor	محیط بیرون	k	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
p	پنالتی	L	عمق طراحی گمانه (m)
s	خاک	\dot{m}	دبی جرمی (kg s^{-1})
St	بازه زمانی کوتاه	NTU	تعداد واحد انتقال
w	آب	q	نرخ انتقال حرارت بر واحد طول لوله (Wm^{-1})
y	سالانه	Q	نرخ انتقال حرارت (W)
		R	مقاومت حرارتی (mKW^{-1})
		r	شعاع (m)
		T	دما (K)
		t	زمان (day)
		x_c	فاصله مرکز لوله - مرکز گمانه
		z	مشخصه طول در راستای عمق گمانه (m)

علائم یونانی

α	ضریب نفوذ حرارتی (m^2s^{-1})
β	عامل انتگرال گیری (m)
ε	ضریب تأثیر فن کوئل
θ	پارامتر اختلاف دما (K)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

زیرنویس‌ها

1m	یک ماهه
6h	شش ساعته
10y	ده ساله
a	هوا
BHE	مبدل حرارتی گمانه
b	دیوار گمانه
conv	جابه‌جایی
FC	فن کوئل
f1	سیال در لوله رفت
f2	سیال در لوله برگشت
fg	سیال - دوغاب
Ground	خاک خیلی دور از گمانه
gb	دوغاب - دیوار گمانه

6-مراجع

- [1] I. Sarbu, C. Sebarchievici, General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 70, pp. 441–454, 2014.
- [2] Z. Li, W. Zhu, T. Bai, M. Zheng, Experimental study of a ground sink direct cooling system in cold areas, *Energy and Buildings*, Vol. 41, No. 11, pp. 1233–1237, 2009.
- [3] N. Deng, X. Yu, Y. Zhang, H. Ma, H. Wang, Numerical analysis of three direct cooling systems using underground energy storage: A case study of Jinghai County, Tianjin, China, *Energy and Buildings*, Vol. 47, pp. 612–618, 2012.
- [4] D. Pahud, M. Belliardi, P. Caputo, Geocooling potential of borehole heat exchangers' systems applied to low energy office buildings, *Renewable Energy*, Vol. 45, pp. 197–204, 2012.
- [5] G. Heidarinejad, V. Khalajzadeh, S. Delfani, Performance analysis of a ground-assisted direct evaporative cooling air conditioner, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 11, pp. 2421–2429, 2010.
- [6] M. Yari, N. Javaani, A. Ansari, H. Moradian, Design and Installation of the First Geothermal Heat Pump in Iran, *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, April 24–29, 2005.
- [7] M. A. Bernier, Closed-loop ground-coupled heat pump systems, *Ashrae Journal*, Vol. 48, No. 9, pp. 12–25, 2006.
- [8] ASHRAE, 2011 ASHRAE Handbook-HVAC Applications, SI Edition, Chapter 34, Atlanta: ASHRAE Inc, 2011.
- [9] L. R. Ingersoll, H. J. Plass, Theory of the ground pipe source for the heat pump, *ASHRAE Transactions*, Vol. 54, pp. 339–348, 1948.
- [10] A. Minaei, M. Maerefat, A new analytical model to study heat transfer in Borehole heat exchangers in short time periods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 199–209, 2016. (in Persian)
- [11] ASHRAE, Standard Method of Test For The Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2007.
- [12] Equipment and Lighting Loads, <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/equipment-and-lighting-loads>, accessed on Julay 2016
- [13] W. Bernal, M. Behl, T. X. Nghiem, R. Mangharam, MLE+: a tool for integrated design and deployment of energy efficient building controls, *Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, ACM, pp. 123–130, 2012.
- [14] S.K. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, second edition, chapter 15, McGraw-Hill, 2001
- [15] Housing and urban development center, *National Building Regulations 19*, Iran, Tehran, 2010. (in Persian)
- [16] ASHRAE, 2009 ASHRAE Handbook-Fundamentals, SI Edition, Chapter 9, Atlanta: ASHRAE Inc, 2009.