

## بررسی پارامترهای مؤثر و روش‌های مختلف محاسبه عمق چاه مبدل زمینی عمودی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

ستاره مهرخو

کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

### چکیده

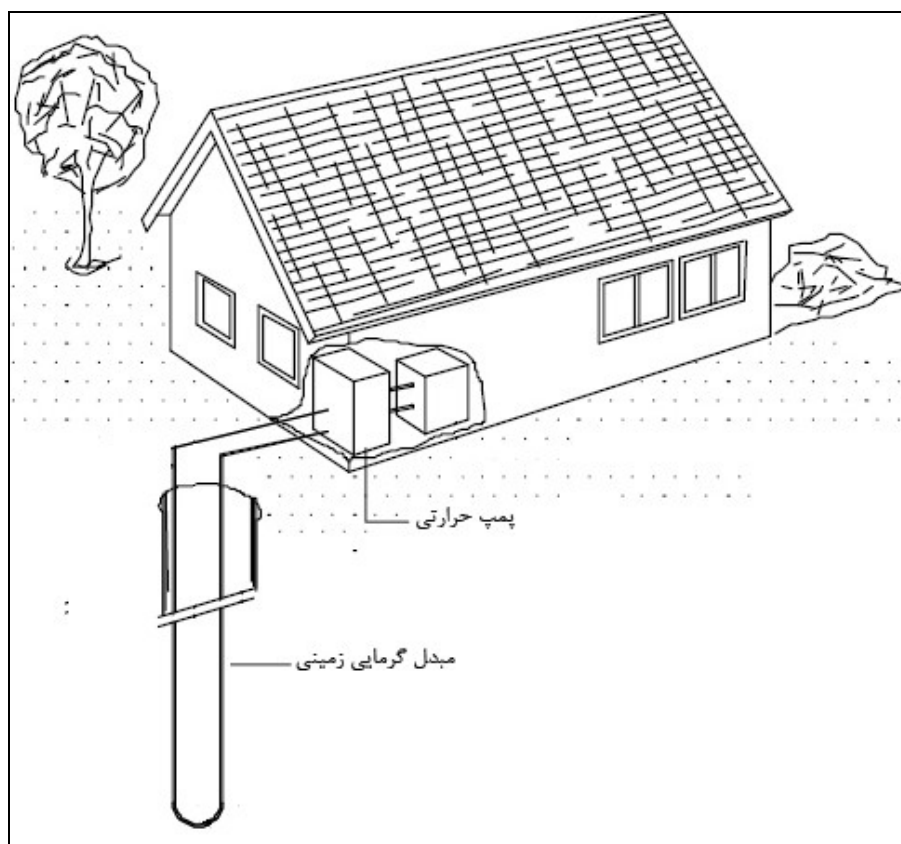
در پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی، تبادل گرما با زمین توسط مبدل حرارتی زمینی انجام می‌شود. به عبارت دیگر مبدل حرارتی زمینی برای استخراج انرژی گرمایی از زمین یا تزریق انرژی گرمایی به آن نصب می‌شود. از آنجایی که عمق چاه این مبدل تأثیر بسیاری بر هزینه اولیه و کارکرد سیستم می‌گذارد، دقت در محاسبه آن اهمیت فراوانی دارد. روش‌های مختلفی برای محاسبه عمق چاه مبدل حرارتی زمینی وجود دارد. ظرفیت پمپ حرارتی زمین‌گرمایی و ویژگی‌های خاک محلی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عمق چاه و طول مبدل حرارتی زمینی هستند.

در این مقاله، ابتدا ویژگی‌های مهم خاک بررسی می‌شوند. سپس، پنج روش اصلی موجود برای محاسبه عمق چاه مبدل حرارتی زمینی بررسی و پارامترهای مطرح در هر یک معرفی می‌شوند. یک مورد ساختمان نمونه، بررسی و محاسبات لازم با توجه به شرایط آب و هوایی کشور، شرایط خاک، و بارهای گرمایشی و سرمایشی آن ساختمان انجام می‌شوند. عمق چاه مورد نیاز برای ساختمان نمونه با استفاده از روش‌های مطرح شده، محاسبه و نتایج با هم مقایسه می‌گردند. در نهایت، ضمن مقایسه این روش‌ها با یکدیگر، اولویت استفاده از آنها مشخص می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، مبدل حرارتی زمینی عمودی، عمق چاه، ظرفیت پمپ حرارتی، دمای زمین

## ۱- مقدمه

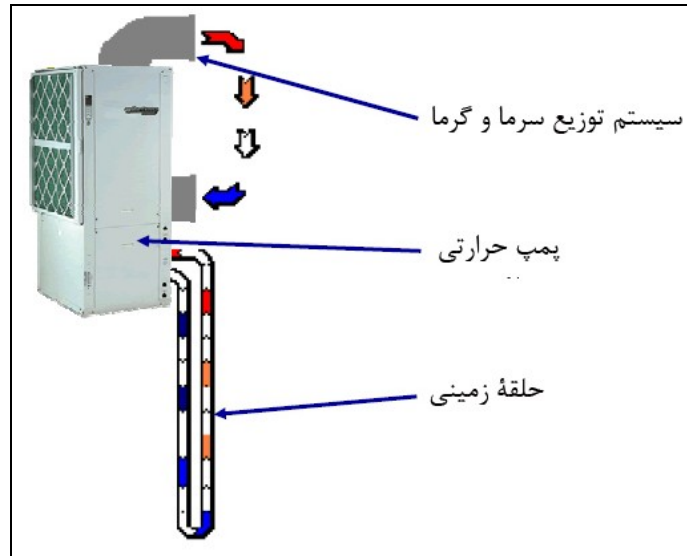
پمپ حرارتی دستگاهی است که با استفاده از کار بیرونی، گرما را از منبع دما پایین به منبع دما بالا انتقال می‌دهد. اصول عملکرد پمپ‌های حرارتی شبیه تجهیزات برودتی است. دو نوع متداول پمپ حرارتی، پمپ حرارتی با منبع هوایی و با منبع زمینی هستند که به ترتیب، با هوا و زمین تبادل گرما می‌کنند. پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، سیستم تهویه مطبوعی است که از زمین، آب زیرزمینی و آب سطحی به عنوان چشمه یا چاه گرمایی استفاده می‌کند. یعنی در هنگام گرمایش، انرژی گرمایی خورشید را که در لایه‌های بالایی زمین ذخیره شده است، استخراج کرده، آن را توسط سیکل تبرید تراکمی تبخیری افزایش می‌دهد و به ساختمان منتقل می‌کند. برعکس، در هنگام سرمایش، گرما را از ساختمان خارج می‌کند و به زمین انتقال می‌دهد. به این ترتیب، می‌توان از آن برای گرمایش، سرمایش، و تأمین آب گرم مصرفی ساختمان‌های خانگی، تجاری، و اداری استفاده کرد. در واقع، پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در زمستان، جایگزین بویلر، و در تابستان، جایگزین برج خنک‌کن می‌شود و انرژی مورد نیاز برای گرمایش، سرمایش، و تأمین آب گرم مصرفی را تا ۵۰٪ کاهش می‌دهد. در شکل (۱)، نمای شماتیکی یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با مبدل زمینی عمودی نشان داده شده است [۱ و ۲].



شکل (۱): نمای شماتیکی سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با مبدل زمینی عمودی [۲]

پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی از سه بخش اصلی تشکیل می‌شوند (شکل ۲): سیستم توزیع سرما و گرما، پمپ حرارتی، و حلقه زمینی [۳].

سیستم توزیع سرما و گرما، با استفاده از یک شبکه لوله‌کشی گرما و سرما را در کل ساختمان توزیع می‌کند.



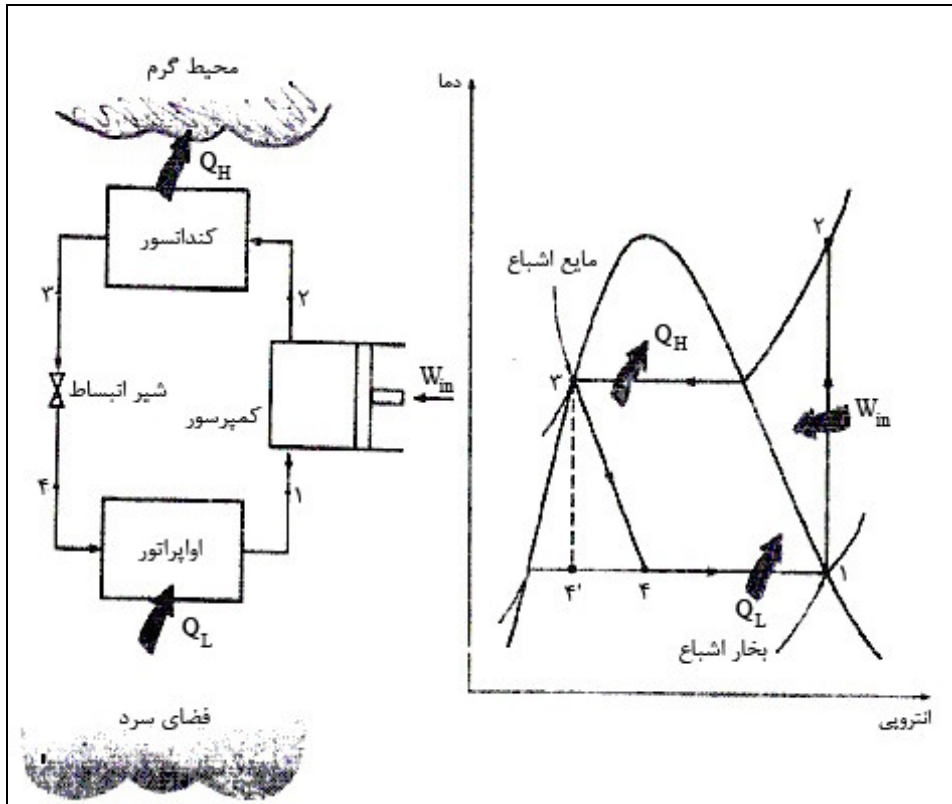
شکل (۲): اجزای اصلی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی حلقه‌بسته با مبدل زمینی عمودی [۳]

پمپ حرارتی، دستگاهی مکانیکی است که با سیال واسطه تبادل گرما می‌کند و حرارت به دست آمده را از طریق سیکل تبرید افزایش می‌دهد و آن را به هوای گردش انتقال می‌دهد [۴]. یکی از پرکاربردترین روش‌های انتقال گرما از منبع حرارتی دما پایین به دما بالا، استفاده از سیکل تبرید تراکمی بخار (شکل ۳) است [۴]. این سیکل که بیشترین کاربرد را در یخچال، سیستم تهویه هوا و پمپ گرمایی دارد، شامل چهار فرآیند است:

- ۱- جذب حرارت در فشار ثابت در اواپراتور
- ۲- تراکم آیزونتروپیک در کمپرسور
- ۳- دفع حرارت در فشار ثابت در کندانسور
- ۴- خفکان در یک وسیله انبساط

در یک سیکل ایده‌آل تبرید تراکمی بخار، مبرد به صورت بخار اشباع وارد کمپرسور می‌شود (حالت ۱) و با انجام کار بر روی آن ( $W_{in}$ ) تا فشار کندانسور تراکم می‌یابد. دمای مبرد طی این فرآیند تراکمی آنتروپی - ثابت به حد کافی بالاتر از دمای محیط اطراف (مثلاً هوای اتمسفر) افزایش می‌یابد. سپس، مبرد به صورت بخار مافوق گرم وارد کندانسور می‌شود (حالت ۲) و در اثر دادن حرارت به محیط اطراف ( $Q_H$ ) به شکل مایع اشباع، آن را ترک می‌کند (حالت ۳). مبرد با عبور از یک شیر انبساط یا لوله موئین، به فشار اواپراتور خفکان می‌یابد. دمای مبرد طی این فرآیند به زیر دمای فضای سرد شده افت می‌کند. مبرد به صورت یک مخلوط اشباع با کیفیت پایین وارد اواپراتور می‌شود (حالت ۴) و با جذب حرارت از فضای سرد شده ( $Q_L$ ) کاملاً تبخیر می‌شود. مبرد اواپراتور را به صورت بخار اشباع ترک می‌کند و با وارد شدن به کمپرسور، سیکل کامل می‌شود.

هنگام کارکرد دستگاه به عنوان سیستم گرمایش در زمستان، سیال واسطه با اواپراتور سیکل تبرید، تبادل گرما می‌کند و آب جهت گرمایش خانه، در کندانسور سیکل تبرید، گرم می‌شود. اما از همین سیستم می‌توان برای سرمایش داخل خانه در تابستان هم استفاده کرد. به این صورت که سیال واسطه با کندانسور سیستم تبرید، تبادل گرما می‌کند و آب داخلی ساختمان در اواپراتور سیکل تبرید، خنک می‌شود و لذا با استفاده از زمین به عنوان چاه حرارتی، از سیستم برای سرمایش استفاده می‌گردد.



شکل (۳): نمایی از یک سیکل تبرید تراکمی بخار [۴]

حلقه زمینی، پمپ حرارتی را به زمین مرتبط می‌سازد و امکان تبادل گرما میان پمپ حرارتی و زمین را فراهم می‌آورد، یعنی هنگام گرمایش، حرارت را از زمین به سیستم، و در هنگام سرمایش، گرما را از پمپ حرارتی به زمین منتقل می‌کند. حلقه زمینی، از مبدل حرارتی زمینی، شبکه لوله‌کشی، سیال واسطه (آب، به همراه ضدیخ در مناطق سردسیر) و پمپ سیرکولاتور تشکیل شده است. مبدل حرارتی زمینی، یک سیستم لوله‌کشی زیرزمینی شامل شبکه‌ای از لوله‌های پلی‌اتیلنی U شکل است که با استفاده از سیال واسطه جاری در خود با زمین تبادل گرما می‌کند. این لوله‌ها به صورت عمودی در عمق مشخصی از زمین در چاهی که به همین منظور حفر شده، دفن می‌شوند.

بخش مهمی از هزینه سرمایه‌گذاری در پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی مربوط به حلقه زمینی است. این بخش شامل هزینه حفاری و پر کردن چاه، پمپ سیرکولاتور، سیال ضد یخ (در مناطق سردسیر)، لوله‌های پلی‌اتیلنی و نصب آنها می‌باشد. این هزینه‌ها با عمق چاه مبدل زمینی رابطه مستقیم دارند. با افزایش عمق چاه مبدل زمینی، هزینه حفاری و پر کردن آن بیشتر خواهد بود. به علاوه، طول لوله U شکل مورد نیاز زیاد می‌شود، در نتیجه، هزینه خریداری و نصب آن بیشتر می‌شود. به دلیل افزایش طول لوله، افت فشار سیال واسطه در آن هم زیاد می‌شود، بنابراین پمپ سیرکولاتور قوی‌تری که قیمت و مصرف برق بیشتری دارد، لازم است. در نتیجه، با افزایش عمق چاه مبدل زمینی، هزینه‌های اولیه و کارکردی سیستم به طور چشمگیری زیاد می‌شوند. به این ترتیب، طراحی مبدل حرارتی زمینی از اهمیت بسیاری برخوردار است. اگر عمق چاه این مبدل بیش از اندازه مورد نیاز در نظر گرفته شود، هزینه اولیه و کارکردی اضافی به مصرف‌کننده تحمیل خواهد کرد و اگر عمق آن کمتر از اندازه لازم باشد، قادر به تأمین نیازهای گرمایشی و سرمایشی سیستم نخواهد بود.

روش‌های مختلفی برای طراحی مبدل حرارتی زمینی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی پیشنهاد شده‌اند.

در روش پیشنهادی انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا (ASHRAE) [۵] از پارامترهایی چون بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان، تبادل گرمای میانگین سالیانه با زمین، مقاومت گرمایی مؤثر زمین در دوره‌های روزانه، ماهیانه، و سالیانه، ضریب بار جزئی در طی ماه طراحی، مقاومت گرمایی زمین، و اختلاف دمای میان زمین و سیال واسطه در ورودی و خروجی پمپ حرارتی برای محاسبه عمق چاه مبدل زمینی استفاده می‌شود. راهنمای سازمان بین‌المللی پمپ حرارتی زمین گرمایی (IGSHPA) [۶] عمق چاه مبدل زمینی را با استفاده از بارهای سرمایشی و گرمایشی، مقاومت گرمایی خاک و لوله مبدل زمینی، ضریب عملکرد، ضریب بار جزئی، و اختلاف دمای زمین و سیال واسطه در ورود به پمپ حرارتی محاسبه می‌کند.

در مرجع [۷] با استفاده از مدار حرارتی معادل مبدل حرارتی زمینی، عمق چاه آن محاسبه می‌شود. پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه عمق چاه مبدل زمینی در این روش، ظرفیت اواپراتور در هنگام گرمایش، ظرفیت کندانسور در هنگام سرمایش، میانگین دما و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال جاری در مبدل زمینی، قطر و قابلیت هدایت حرارتی لوله U شکل، ضریب بار جزئی و ضریب انتقال گرمای کلی خاک هستند.

در مرجع [۸] مقادیری برای عمق چاه مبدل زمینی مورد نیاز به ازای هر تن ظرفیت پمپ حرارتی پیشنهاد می‌شود. در این روش، از دمای زمین، ظرفیت پمپ حرارتی، قطر لوله U شکل، قابلیت هدایت حرارتی مواد پرکننده چاه و زمین برای محاسبه عمق چاه مبدل زمینی استفاده می‌شود.

در راهنمای سیستم‌های زمین گرمایی تجاری (CEES) [۹] روابط ساده‌ای برای محاسبه عمق چاه مبدل حرارتی زمینی ارائه شده است. در این روش، عمق چاه مبدل زمینی با استفاده از بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان، دمای آب ورودی به پمپ حرارتی، ضریب عملکرد، و ساعات معادل کارکرد سالیانه سیستم با بار کامل محاسبه می‌شود.

در این مقاله، نظر به اهمیت ویژگی‌های خاک در محاسبه عمق چاه مبدل حرارتی زمینی مورد نیاز، ابتدا این ویژگی‌ها بررسی می‌شوند. سپس پنج روش پیش‌گفته برای محاسبه عمق چاه مبدل زمینی عمودی، بررسی و پارامترهای مطرح در آنها معرفی می‌شوند. در ادامه، یک ساختمان نمونه، معرفی و محاسبات لازم با توجه به شرایط آب و هوایی کشور، شرایط خاک، و ویژگی‌های تهویه مطبوع آن ساختمان انجام می‌شوند. عمق چاه مورد نیاز برای این ساختمان با استفاده از روش‌های مطرح شده، محاسبه و نتایج با هم مقایسه می‌گردند. در نهایت، ضمن مقایسه این روش‌ها با یکدیگر، شرایط استفاده از آنها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- ویژگی‌های خاک

به دست آوردن خواص حرارتی زمین جهت طراحی پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی برای مهندسان امری ضروری ولی ناآشناست. انتقال گرما بین مبدل زمینی و خاک زمین عمدتاً از طریق هدایت حرارتی انجام می‌پذیرد. بنابراین به میزان زیادی به نوع خاک، میزان رطوبت، چگالی خاک خشک و دمای آن بستگی دارد. برای تعیین خواص حرارتی خاک به آزمایش‌های مفصل و پرهزینه زمین‌شناسی نیاز است، اما می‌توان با استفاده از جداول موجود در منابع طراحی، نسبت به تعیین خواص، با دقت مطلوب اقدام نمود [۱۰].

ویژگی‌های ترموفیزیکی مهم خاک شامل دمای میانگین سالیانه ( $\bar{T}_G$ )، قابلیت هدایت گرمایی ( $k_G$ )، ضریب پخش گرمایی ( $\alpha_G$ )، و ضریب کلی انتقال گرمای آن ( $U_S$ ) هستند.

پارامترهای  $k_G$  و  $\alpha_G$  با توجه به چگالی، رطوبت و ترکیب خاک از جدول (۱) به دست می‌آیند.  $U_G$  بر حسب نوع خاک و با توجه به نسبت کاری (نسبت میان بار ساختمان و ظرفیت پمپ حرارتی) از جدول (۲) حاصل می‌شود [۱۱].

جدول (۱): قابلیت هدایت گرمایی ( $k_G$  [Btu/h ft °F]) و ضریب پخش گرمایی ( $\alpha_G$  [ft<sup>2</sup>/day]) خاک [۵]

۲۰٪ مرطوب		۱۵٪ مرطوب		۱۰٪ مرطوب		۵٪ مرطوب		چگالی خشک (lb/ft <sup>3</sup> )	نوع خاک
$\alpha_G$	$k_G$	$\alpha_G$	$k_G$	$\alpha_G$	$k_G$	$\alpha_G$	$k_G$		
-	-	۱/۰۶	۱/۹	۱/۱۲	۱/۷	۱/۲۳	۱/۵۵	۱۲۰	۱۰۰٪ شن درشت‌دانه
۰/۹۲	۱/۵۵	۱	۱/۴۵	۱/۰۸	۱/۳۵	۱/۰۴	۱/۱	۱۰۰	
۰/۷۱	۰/۹۵	۰/۷۶	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۹۵	۰/۸	۸۰	
-	-	۰/۵۵	۰/۹۵	۰/۴۷	۰/۷	۰/۵۶	۰/۷	۱۲۰	۱۰۰٪ خاک رس ریزدانه
۰/۴۸	۰/۷	۰/۴۳	۰/۶۵	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۵۵	۱۰۰	
۰/۳۸	۰/۵	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۴	۸۰	

جدول (۲): ضریب کلی انتقال گرمای خاک ( $U_G$  [W/m<sup>2</sup> K]) [۱۱]

نسبت کاری (%)				نوع خاک
۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	
۱۵/۳۳۳	۱۴/۱۹۸	۱۳/۰۶۲	۱۱/۹۲۶	رس مرطوب
۱۴/۷۶۵	۱۳/۶۳۰	۱۲/۴۹۴	۱۱/۳۵۸	ماسه اشباع شده
۱۳/۰۶۲	۱۱/۹۲۶	۱۰/۷۹۰	۱۰/۲۲۲	رس خشک
۱۱/۳۵۸	۱۰/۲۲۲	۹/۰۸۶	۸/۵۱۹	ماسه خشک
۷/۹۵۱	۷/۳۸۳	۶/۸۱۵	۶/۲۴۷	رس شن‌دار مرطوب
۵/۱۱۱	۴/۵۴۳	۴/۲۵۹	۳/۹۷۵	رس شن‌دار خشک

از خصوصیات دیگر زمین که باید اندازه‌گیری شود، میانگین دمای آن در طول سال می‌باشد. دمای زمین تا عمق ۵ الی ۶ متری از سطح زمین تحت تأثیر شارهای گرمایی خورشیدی، تغییرات دمای هوای محیط و بارش‌های جوی قرار دارد. ولی از عمق ۱۵ تا ۲۵ متری در طول سال ثابت بوده و یک تا دو درجه بیش از میانگین دمای هوای سالیانه محیط می‌باشد. در اعماق بیشتر، دما بر اثر شارهای ناشی از انرژی زمین‌گرمایی، با افزایش عمق، با گرادیان ثابت تقریباً برابر  $30^\circ \text{C/km}$  افزایش می‌یابد.

برای به دست آوردن دمای زمین، روش‌های متفاوتی وجود دارد. یک روش، استفاده از دمای چاه‌های آب در اعماق مورد نظر است. اما روابطی هم برای آن ارائه شده است. در واقع، دمای زمین ( $T_G$ ) تابعی از عمق خاک و زمان (روز چندم از سال) است و برابر است با [۱۲]:

$$T_G = \bar{T}_G - \frac{A_s}{2} \times \exp\left(-X_G \times \sqrt{\frac{\pi}{365 \alpha_G}}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi}{365} \times (t_{\text{now}} - t_{\text{shift}} - \frac{X_G}{2} \times \sqrt{\frac{365}{\pi \alpha_G}})\right) \quad (1)$$

که در آن:

$\bar{T}_G$ : دمای میانگین سالیانه زمین، °F، که با تقریب خوبی برابر با دمای میانگین سالیانه هوا در نظر گرفته می‌شود.

$A_s$ : تغییرات سالیانه دمای سطح خاک که معادل تغییرات سالیانه دمای هواست، °F

$X_G$ : عمق خاک، ft

$\alpha_G$ : ضریب پخش گرمایی خاک،  $\text{ft}^2/\text{day}$

$t_{\text{now}}$ : زمان (روز چندم از سال)

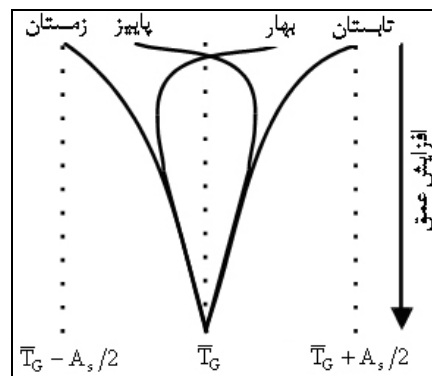
$t_{\text{shift}}$ : روزی از سال که دمای سطح کمترین مقدار را دارد

با توجه به این فرمول، می‌توان کمینه ( $T_{G,\text{min}}$ ) و بیشینه ( $T_{G,\text{max}}$ ) دمای زمین در طول سال را در عمق دلخواه به دست آورد:

$$T_{G,\text{min}} = \bar{T}_G - 0.5 \times A_s \times \exp\left(-X_G \times \sqrt{\pi/365 \alpha_G}\right) \quad (2)$$

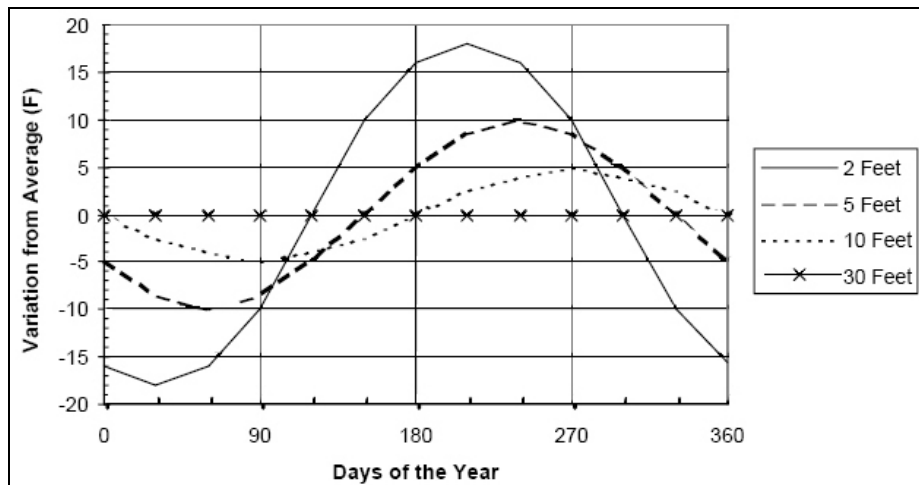
$$T_{G,\text{max}} = \bar{T}_G + 0.5 \times A_s \times \exp\left(-X_G \times \sqrt{\pi/365 \alpha_G}\right) \quad (3)$$

شکل (۴) تغییر دمای زمین را با افزایش عمق در فصل‌های مختلف سال نشان می‌دهد [۱۱]. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روند تغییر دمای خاک با افزایش عمق در تابستان، کاهشی و در زمستان، افزایشی است. یعنی اعماق زمین در تابستان، خنک‌تر و در زمستان، گرم‌تر از سطح آن هستند. روند این تغییرات در بهار، ابتدا کاهشی و سپس افزایشی، و در پاییز، ابتدا افزایشی و سپس کاهشی است. اما در هر چهار فصل، با افزایش عمق، دمای زمین به مقدار میانگین سالیانه ( $\bar{T}_G$ ) گرایش پیدا می‌کند.



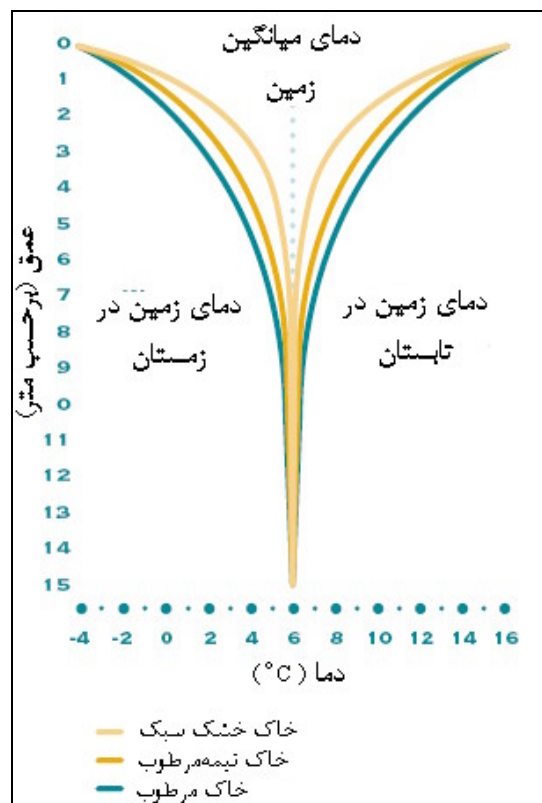
شکل (۴): تغییر دمای زمین با افزایش عمق در فصل‌های مختلف [۱۱]

انحراف نوعی دمای خاک در عمق‌های مختلف از دمای میانگین در شکل (۵) نشان داده شده است [۱۲]. این نمودار که با استفاده از رابطه (۱) رسم شده است، نشان می‌دهد که شکل تغییرات دمای هر عمق از زمین در طول سال به صورت سینوسی است و شدت این تغییرات با افزایش عمق کاهش می‌یابد تا جایی که در عمق ۳۰ فوتی نمودار به خط راستی تبدیل می‌شود.



شکل (۵): تغییرات نوعی سالیانه دمای خاک در عمق‌های مختلف [۱۲]

تغییرات دمای خاک با افزایش عمق در فصل‌های تابستان و زمستان با در نظر گرفتن رطوبت خاک در شکل (۶) نشان داده شده‌اند [۶]. مشاهده می‌شود که تغییر دما با افزایش عمق در خاک مرطوب که قابلیت هدایت گرمایی و ضریب پخش گرمایی بیشتری دارد، نسبت به خاک خشک با شدت کمتری انجام می‌شود.



شکل (۶): تغییرات دمای زمین بر حسب نوع خاک و عمق در تابستان و زمستان [۶]



### ۳- روش‌های مختلف محاسبه عمق چاه مبدل گرمایی زمینی

برای محاسبه عمق چاه مبدل زمینی روش‌های مختلفی در مراجع ذکر شده است. در این قسمت پنج روش اصلی مطرح در این زمینه معرفی می‌شوند. در هر پنج روش، ابتدا عمق چاه مبدل زمینی در حالت‌های سرمایش ( $L_c$ ) و گرمایش ( $L_h$ ) محاسبه می‌شود. پس از آن، عدد بزرگتر به عنوان عمق چاه مورد نیاز ( $L$ ) در نظر گرفته می‌شود:

$$L = \text{Max} \{L_c, L_h\} \quad (۴)$$

#### ۳-۱- روش انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا [۵]

در این روش، عمق چاه مبدل زمینی در حالت‌های سرمایش ( $L_c$ ) و گرمایش ( $L_h$ ) از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$L_c = \frac{Q_a \times R_{G,a} + (C_c \times Q_c) \times (R_b + F_{m,c} \times R_{G,m} + C_{sc} \times R_{G,d})}{\bar{T}_G - \bar{T}_{W,c} - T_p} \quad (۵)$$

$$L_h = \frac{Q_a \times R_{G,a} + (C_h \times Q_h) \times (R_b + F_{m,h} \times R_{G,m} + C_{sc} \times R_{G,d})}{\bar{T}_G - \bar{T}_{W,h} - T_p} \quad (۶)$$

که در آنها:

$Q_a$ : انتقال گرمای میانگین سالیانه خالص به زمین،  $\text{Btu/h}$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_a = \frac{C_c \times Q_c \times \tau_c + C_h \times Q_h \times \tau_h}{8760} \quad (۷)$$

که در آن:

$C_c$  و  $C_h$ : ضرایب تصحیح، برای به حساب آوردن گرمای دفع شده یا جذب شده توسط پمپ حرارتی تعریف می‌شوند و طبق جدول (۳) به مقدار  $EER$  و  $COP_h$  بستگی دارند. بازدهی گرمایشی سیستم با استفاده از  $COP_h$  (ضریب عملکرد) و بازدهی سرمایشی آن با استفاده از  $EER$  (نسبت بازدهی انرژی) نشان داده می‌شود. این ضرایب به صورت نسبت انرژی تولید شده توسط سیستم و انرژی ورودی به آن در حالت‌های گرمایش و سرمایش تعریف می‌شوند.

جدول (۳): مقادیر ضریب تصحیح  $C_c$  و  $C_h$  به ازای  $EER$  و  $COP_h$  [۵]

$C_c$	$EER$	$C_h$	$COP_h$
۱/۳۱	۱۱	۰/۷۵	۳
۱/۲۶	۱۳	۰/۷۷	۳/۵
۱/۲۳	۱۵	۰/۸۰	۴
۱/۲۰	۱۷	۰/۸۲	۴/۵

$Q_c$  و  $Q_h$ : بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان،  $\text{Btu/h}$ ، با علامت مثبت و  $Q_c$  با علامت منفی در فرمول قرار می‌گیرند.

$\tau_c$  و  $\tau_h$ : ساعات معادل کارکرد سالیانه با بار کامل برای حالات سرمایش و گرمایش،  $h/y$

$R_{G,d}$  و  $R_{G,m}$ : مقاومت گرمایی مؤثر زمین در پالس‌های سالیانه، ماهیانه و روزانه،  $h \text{ ft } ^\circ\text{F}/\text{Btu}$ ، برای

تعیین این مقادیر، چند مفهوم معرفی می‌شوند:

۱- پالس گرمایی (P): منظور از پالس گرمایی، الگوی کاری مورد نظر سیستم است. برای مثال، بیشتر سیستم‌ها پس از ۱۰ سال کار (۳۶۵۰ روز) به حالت پایدار می‌رسند و طول حلقه زمینی را می‌توان برای یک ماه تابستانی (۳۱ روز) در طی یک دوره پیک عصرگاهی ۴ ساعته (۰/۱۶۷ روز) طراحی کرد. در این حالت، سه دوره زمانی سالیانه ( $P_a$ )، ماهیانه ( $P_m$ ) و روزانه ( $P_d$ ) به ترتیب برابر ۳۶۵۰، ۳۱ و ۰/۱۶۷ روز تعریف می‌شوند.

۲- عدد فوریه ( $Fo$ ): عدد بی‌بعدی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fo = \frac{4\alpha_G t}{D_{eqv}^2} \quad (8)$$

که در آن:

t: مدت زمان کارکرد، روز

$D_{eqv}$ : قطر معادل لوله U شکل، ft، مقدار آن برای چهار قطر متداول لوله پلی اتیلنی در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴): قطرهای داخلی، خارجی، و معادل لوله پلی اتیلنی U شکل [۵]

قطر نامی [in]	قطر داخلی [m]	قطر خارجی [m]	قطر معادل [ft]
۰/۷۵	۰/۰۲۱۸	۰/۰۲۶۷	۰/۱۵
۱	۰/۰۲۷۴	۰/۰۳۳۴	۰/۱۸
۱/۲۵	۰/۰۳۴۵	۰/۰۴۲۲	۰/۲۲
۱/۵	۰/۰۳۹۴	۰/۰۴۸۳	۰/۲۵

به این ترتیب با جای‌گذاری مقادیر  $P_a$ ،  $P_m$  و  $P_d$  در رابطه فوق، مقدار عدد فوریه برای دوره‌های روزانه ( $Fo_d$ )، ماهانه ( $Fo_m$ )، و سالانه ( $Fo_a$ ) به دست می‌آید.

۳- ضریب G: ضریبی است که با استفاده از شکل (۷) برحسب عدد فوریه به دست می‌آید. با معلوم بودن  $Fo_d$ ،  $Fo_m$ ،  $Fo_a$  و با استفاده از شکل فوق مقدار ضریب G برای دوره‌های روزانه ( $G_d$ )، ماهانه ( $G_m$ )، و سالانه ( $G_a$ ) به دست می‌آید.

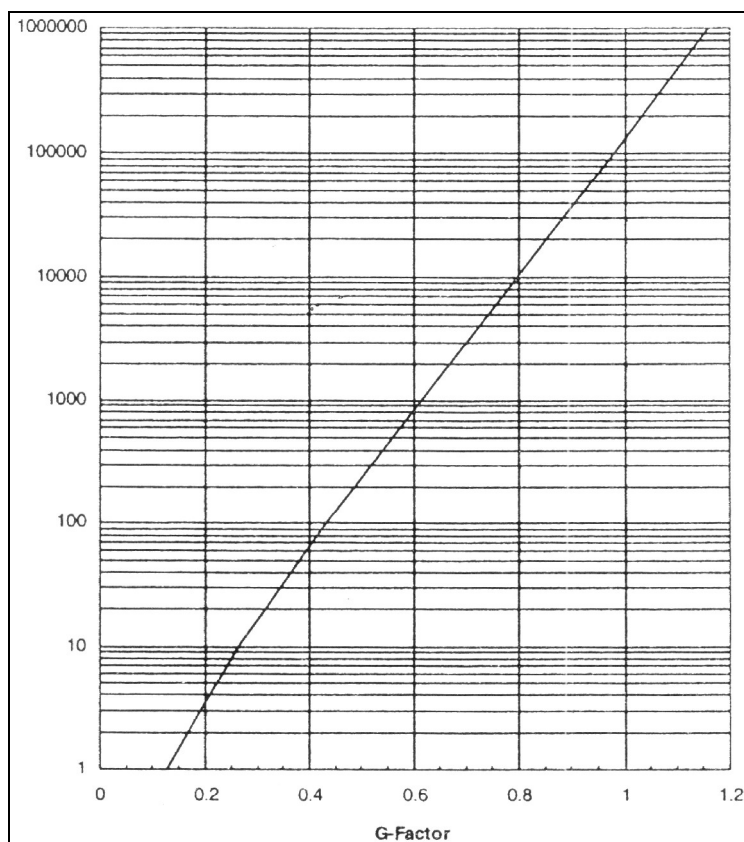
سرانجام، مقاومت گرمایی مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_G = \frac{G}{k_G} \quad (9)$$

به این ترتیب، با معلوم بودن  $G_d$ ،  $G_m$ ،  $G_a$  و مقدار مقاومت گرمایی مؤثر برای دوره‌های روزانه ( $R_{G,d}$ )، ماهانه ( $R_{G,m}$ )، و سالانه ( $R_{G,a}$ ) از رابطه فوق محاسبه می‌شود.

$R_p$ : مقاومت گرمایی لوله پلی اتیلنی،  $h ft^{\circ}F/Btu$

مقدار  $R_p$  برحسب قطر و نوع لوله U شکل، نوع سیال واسطه (وجود داشتن یا نداشتن ضدیخ در آب) و دبی جریان سیال در لوله با استفاده از جدول (۵) به دست می‌آید.



شکل (۷): مقدار ضریب  $G$  برحسب عدد فوریه [۵]

جدول (۵): مقدار مقاومت گرمایی لوله (  $R_p$  [hft °F/Btu] ) [۵]

مقاومت گرمایی لوله ( hft °F/Btu )				قطر لوله U شکل [in]
آب با دبی بیش از ۲ gpm	۲۰٪ پروپیلن گلیکول با دبی ۳ gpm	۲۰٪ پروپیلن گلیکول با دبی ۵ gpm	۲۰٪ پروپیلن گلیکول با دبی ۱۰ gpm	
۰/۰۹	۰/۱۲	نامناسب	نامناسب	۰/۷۵
۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۰	نامناسب	۱
۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۹	۱/۲۵
۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۹	۱/۵

$F_{m,c}$  و  $F_{m,h}$ : ضریب بار جزئی در طی ماه طراحی در حالت‌های سرمایش و گرمایش:

$$F_{m,c} = F_c \times \frac{DOH_c}{24} \times \frac{DOM}{30} \quad (10)$$

$$F_{m,h} = F_h \times \frac{DOH_h}{24} \times \frac{DOM}{30} \quad (11)$$

که در آنها:

$F_c$  و  $F_h$ : ضریب بار جزئی مبدل حرارتی زمینی در حالت‌های گرمایش و سرمایش که برابر نسبت ساعات

معادل کارکرد سالیانه با بار کامل ( $\tau$ ) به کل زمان کارکرد سالیانه ( $\beta$ ) در حالت‌های سرمایش و گرمایش

تعریف می‌شوند:

$$F_h = \tau_h / \beta_h \quad (12)$$

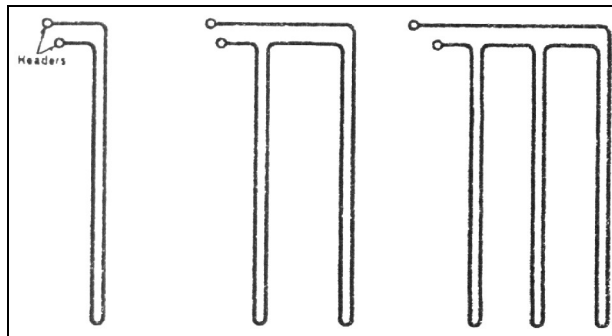
$$F_c = \tau_c / \beta_c \quad (13)$$

DOH<sub>h</sub> و DOH<sub>c</sub>: ساعات کارکرد روزانه سیستم در حالت‌های سرمایش و گرمایش، h/day

DOM: تعداد روزهای سکونت افراد در ساختمان در طی ماه، day/month

C<sub>sc</sub>: ضریب اتلاف گرمای اتصال کوتاه: این ضریب بسته به آرایش لوله‌کشی موازی (وجود ۱، ۲، یا ۳ چاه

در هر لوپ موازی طبق شکل ۸) از جدول (۶) به دست می‌آید.



شکل (۸): آرایش‌های لوله‌کشی موازی (وجود یک، دو یا سه چاه در هر لوپ) [۵]

جدول (۶): مقدار ضریب اتلاف گرمای اتصال کوتاه (C<sub>sc</sub>) [۵]

C <sub>sc</sub>	gpm/ton	آرایش لوله‌کشی موازی
۱/۰۴	۳	یک چاه در هر لوپ موازی
۱/۰۶	۲	
۱/۰۲	۳	دو چاه در هر لوپ موازی
۱/۰۳	۲	
۱/۰۱	۳	سه چاه در هر لوپ موازی
۱/۰۲	۲	

$\bar{T}_{W,c}$  و  $\bar{T}_{W,h}$ : میانگین دمای سیال واسطه در حالت‌های گرمایش و سرمایش، °F:

$$\bar{T}_{W,h} = 0.5 \times (T_{Wi,h} + T_{Wo,h}) \quad (14)$$

$$\bar{T}_{W,c} = 0.5 \times (T_{Wi,c} + T_{Wo,c}) \quad (15)$$

که در آنها:

$T_{Wi,h}$  و  $T_{Wi,c}$ : دمای سیال جاری در مبدل زمینی در ورودی پمپ حرارتی در حالت‌های سرمایش و

گرمایش، °F

$T_{Wo,h}$  و  $T_{Wo,c}$ : دمای سیال جاری در مبدل زمینی در خروجی پمپ حرارتی در حالت‌های سرمایش و

گرمایش، °F

$T_p$ : جریمه دمایی برای تداخل چاه‌های مجاور، °F، مقدار آن از جدول (۷) به دست می‌آید. مقدار  $T_p$  برای

گرمایش با علامت مثبت و برای سرمایش با علامت منفی در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۷): مقدار جریمه دمایی برای تداخل چاه‌های مجاور ( $T_p [^{\circ}F]$ )  
بر حسب فاصله چاهها [ft] و قابلیت هدایت گرمایی ( $k_G [Btu/h ft ^{\circ}F]$ )

دمای زمین ( $T_p [^{\circ}F]$ )						فاصله چاهها [ft]	$\frac{\tau_h}{\tau_c}$
۷۰		۶۰		۵۰			
$k_G = 1.5$	$k_G = 1$	$k_G = 1.5$	$k_G = 1$	$k_G = 1.5$	$k_G = 1$		
—	—	—	—	-۴/۴	-۴/۴	۱۵	$\frac{1500}{1000}$
—	—	—	—	-۲/۳	-۲/۳	۲۰	
—	—	—	—	-۱/۲	-۱/۲	۲۵	
—	—	۱۱/۸	نامناسب	۱۱/۸	۱۲/۹	۱۰	$\frac{1000}{1000}$
—	—	۴/۷	۴/۷	۴/۳	۵/۴	۱۵	
—	—	۲/۴	۲/۵	۱/۹	۳/۴	۲۰	
نامناسب	نامناسب	۱۲/۸	نامناسب	۱۵/۱	۱۵/۱	۱۵	$\frac{500}{1000}$
۶/۷	نامناسب	۶/۷	۶/۷	۸	۷/۸	۲۰	
۳/۵	—	۳/۵	۳/۵	۴/۳	۴/۱	۲۵	
نامناسب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	—	—	۱۵	$\frac{0}{2000}$
۱۰/۵	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۳	—	—	۲۰	
۵/۵	۵/۴	۵/۵	۵/۴	—	—	۲۵	

### ۳-۲- روش سازمان بین‌المللی پمپ حرارتی زمین گرمایی [۶]

فرمول‌های این روش برای حالت‌های گرمایش و سرمایش به قرار زیرند:

$$L_h = Q_h \times \frac{COP_h - 1}{COP_h} \times \frac{R_p + R_G \times F_h}{T_{G,min} - T_{Wi,h}} \quad (16)$$

$$L_c = Q_c \times \frac{COP_c + 1}{COP_c} \times \frac{R_p + R_G \times F_c}{T_{Wi,c} - T_{G,max}} \quad (17)$$

که در آنها:

$Q_h$  و  $Q_c$ : بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان، kW

$COP_h$  و  $COP_c$ : ضریب عملکرد سیستم در حالت‌های گرمایش و سرمایش

$R_p$ : مقاومت گرمایی لوله پلی اتیلنی، mK/kW، برابر است با:

$$R_p = \frac{\ln(D_{out}/D_{in})}{2\pi \times k_p} \quad (18)$$

$D_{in}$  و  $D_{out}$ : قطر خارجی و داخلی لوله مبدل زمینی، m، این مقادیر برای چهار قطر متداول لوله پلی اتیلنی از جدول (۴) به دست می‌آیند.

$k_p$ : قابلیت هدایت گرمایی لوله مبدل زمینی، kW/mK

$R_G$ : مقاومت گرمایی خاک، mK/kW، که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_G = \frac{1}{\pi \times U_G \times D_{out}} \quad (19)$$

$U_G$ : ضریب کلی انتقال گرمای خاک، kW/m<sup>2</sup> K

$T_{G,max}$  و  $T_{G,min}$ : کمینه و بیشینه دمای غیریکنواخت زمین، °C

$T_{Wi,c}$  و  $T_{Wi,h}$ : دمای سیال جاری در مبدل زمینی در ورودی پمپ حرارتی در حالت‌های سرمایش و گرمایش، °C

### ۳-۳- روش مدار گرمایی معادل [V]

در این روش، عمق چاه مبدل حرارتی زمینی بر اساس مدار حرارتی معادل آن به دست می‌آید:

$$L_h = \frac{Q_{Eva,h}}{\bar{T}_G - \bar{T}_{W,h}} \times \left( \frac{1}{2\pi \times h_{W,h} \times D_{in}} + \frac{\ln(D_{out}/D_{in})}{4\pi \times k_p} + \frac{F_h}{2\pi \times U_G \times D_{out}} \right) \quad (20)$$

$$L_c = \frac{Q_{Con,c}}{\bar{T}_{W,c} - \bar{T}_G} \times \left( \frac{1}{2\pi \times h_{W,c} \times D_{in}} + \frac{\ln(D_{out}/D_{in})}{4\pi \times k_p} + \frac{F_c}{2\pi \times U_G \times D_{out}} \right) \quad (21)$$

که در آنها:

$Q_{Eva,h}$ : ظرفیت اوپراتور در هنگام گرمایش، kW

$\bar{T}_{W,h}$  و  $\bar{T}_{W,c}$ : میانگین دمای سیال واسطه در حالت‌های گرمایش و سرمایش، °C

$h_{W,h}$  و  $h_{W,c}$ : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال واسطه در حالت‌های گرمایش و سرمایش، kW/(m<sup>2</sup> K)

$Q_{Con,c}$ : ظرفیت کندانسور در هنگام سرمایش، kW

### ۳-۴- روش تعیین عمق چاه مورد نیاز به ازای هر تن بار [A]

در این روش، عمق چاه مورد نیاز برای مبدل زمینی [ft] برای هر تن بار سیستم، با توجه به دما و قابلیت هدایت گرمایی زمین، قابلیت هدایت گرمایی مواد پرکننده چاه، و قطر لوله مبدل زمینی مشخص می‌شود. مقدار اولیه عمق چاه به ازای هر تن بار ( $\bar{L}_1$ ) برحسب دمای زمین و قطر لوله مبدل زمینی با استفاده از جدول (A) به دست می‌آید.

جدول (A): عمق پیشنهادی چاه به ازای هر تن بار ( $\bar{L}_1$  [ft/ton]) [A]

دمای زمین [°F]							قطر لوله U شکل [in]
۷۰ تا ۶۸	۶۷ تا ۶۴	۶۳ تا ۶۰	۵۹ تا ۵۶	۵۵ تا ۵۲	۵۱ تا ۴۸	۴۷ تا ۴۴	۰/۷۵
۲۳۰	۲۰۰	۱۸۰	۱۷۰	۱۵۵	۱۷۰	۱۸۰	۱
۲۱۵	۱۹۰	۱۷۰	۱۶۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۷۰	۱/۲۵
۲۰۰	۱۷۵	۱۶۰	۱۵۰	۱۴۵	۱۵۰	۱۶۰	۱/۵
۱۸۵	۱۶۵	۱۵۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۵۰	

مقادیر این جدول بر مبنای قابلیت هدایت گرمایی زمین  $k_G = 1.2 \text{ Btu/h ft } ^\circ\text{F}$  و قابلیت هدایت گرمایی مواد پرکننده چاه  $k_A = 0.85 \text{ Btu/h ft } ^\circ\text{F}$  به دست آمده‌اند. در حالت کلی، مقدار تصحیح شده عمق چاه به ازای هر تن بار ( $\bar{L}$ ) برابر است با:

$$\bar{L} = \bar{L}_1 \times C_G \times C_A \quad (22)$$

که در آن،  $C_G$  و  $C_A$  از جدول (۹) به دست می‌آیند.

در نهایت با ضرب  $\bar{L}$  در ظرفیت پمپ حرارتی بر حسب تن، عمق چاه منفرد مورد نیاز حاصل می‌شود.

جدول (۹): ضرایب  $C_A$  و  $C_G$  برای تصحیح  $\bar{L}_1$

بر حسب هدایت گرمایی زمین ( $k_G$ ) و مواد پرکننده چاه ( $k_A$ ) [۸]

$C_A$	$k_A$ [Btu/h ft °F]	$C_G$	$k_G$ [Btu/h ft °F]
۱/۲	۰/۴	۱/۲۳	۰/۸
۱/۰۸	۰/۶	۱/۱	۱
۱/۰۱	۰/۸	۱	۱/۲
۱	۱	۰/۹۳	۱/۴
۰/۹۸	۱/۲	۰/۸۷	۱/۶
۰/۹۳	۱/۴	۰/۸۳	۱/۸
۰/۹۱	۱/۶	۰/۷۹	۲

### ۳-۵- روش سیستم‌های زمین گرمایی تجاری [۹]

در این روش عمق چاه مورد نیاز در حالت‌های سرمایش و گرمایش برحسب متر به صورت زیر ارائه شده‌اند:

$$L_c = 0.05105 \times \frac{E_{rej}}{T_{wi,c} - \bar{T}_G} \quad (23)$$

$$L_h = 0.05506 \times \frac{E_{abs}}{\bar{T}_G - T_{wi,h}} \quad (24)$$

که در آنها:

$E_{rej}$ : انرژی سالیانه داده شده به زمین، MJ/y

$$E_{rej} = Q_c \times \tau_c \times \frac{1 + COP_c}{COP_c} \quad (25)$$

$E_{abs}$ : انرژی سالیانه گرفته شده از زمین، MJ/y

$$E_{abs} = Q_h \times \tau_h \times \frac{COP_h - 1}{COP_h} \quad (26)$$

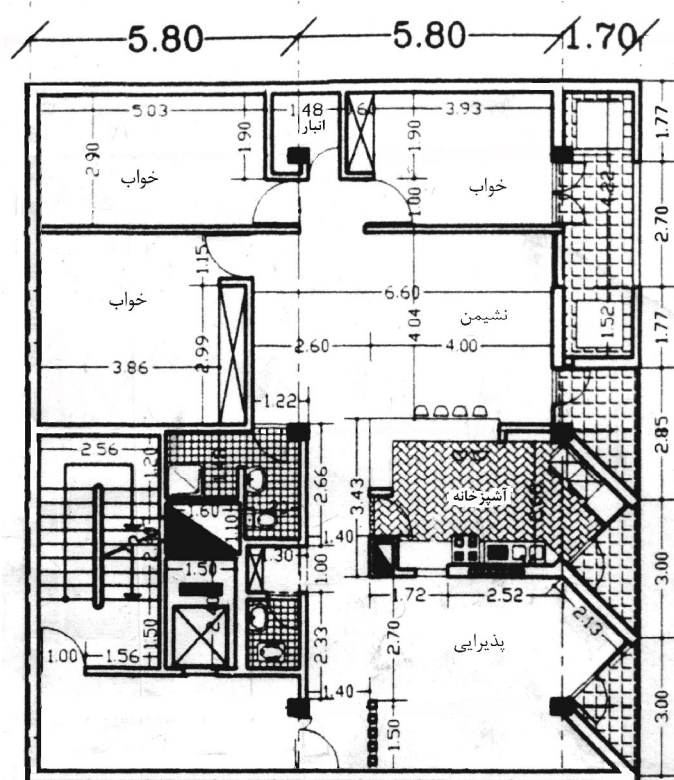
در این روش، مقدار نوعی  $T_{wi,c}$  و  $T_{wi,h}$  برابر  $29/4^\circ C$  و  $1/7^\circ C$  در نظر گرفته می‌شود.

این روش یک روش تقریبی است و پارامترهای زیادی می‌توانند مقدار به دست آمده از آن را تغییر دهند که مهم‌ترین آنها شرایط خاک است. بنابراین، در مورد خاک‌هایی که ویژگی‌های گرمایی ضعیفی دارند (مثل خاک رس)، عمق چاه مبدل مورد نیاز ممکن است تا دو برابر مقدار به دست آمده از این روش باشد.

### ۴- مطالعه موردی

در این بخش، یک ساختمان نمونه معرفی، و عمق چاه مبدل زمینی مورد نیاز برای آن با استفاده از روش‌های پیش‌گفته محاسبه می‌شود و نتایج با هم مقایسه می‌گردند. ساختمان نمونه، یک مجتمع آپارتمانی مسکونی ۴ طبقه تک‌واحدی واقع در تهران با زیربنای ۱۵۰ متر مربع می‌باشد. نمایی از نقشه این ساختمان در شکل (۹) نشان داده شده است. محاسبات تهویه مطبوع برای به دست آوردن بار حرارتی ساختمان انجام شده است و نتایج آن در جدول (۱۰) ارائه شده‌اند. مشخصات خاک منطقه مورد نظر در جدول (۱۱) نشان داده شده‌اند. عمق چاه مبدل

زمینی محاسبه شده برای این ساختمان با توجه به بارهای حرارتی، مشخصات خاک و شرایط آب و هوایی، بر اساس روش‌های بررسی شده، محاسبه و نتایج آن در جدول (۱۲) مقایسه شده‌اند. لازم به یادآوری است که در صورت وجود محدودیت در حفر چاه‌های عمیق، از چند چاه موازی استفاده می‌شود. برای مثال، اگر عمق چاه مورد نیاز، ۲۵۰ m و حداکثر عمق قابل حفر ۵۰ m باشد، می‌توان از ۵ چاه موازی به عمق ۵۰ m استفاده کرد.



شکل (۹): نمایی از نقشه ساختمان بررسی شده

جدول (۱۰): شرایط کارکرد سیستم و نتایج محاسبات تهریه مطبوع با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه

۱۸ h	ساعات کارکرد روزانه سیستم در حالت گرمایش	۱۶ kW	بار سرمایشی
۳۰ روز	تعداد روزهای سکونت افراد در ساختمان در طی ماه	۱۶ kW	بار گرمایشی
35°C	دمای سیال جاری در مبدل زمینی در ورودی پمپ حرارتی در حالت سرمایش	۱۳۲۰ h/y	کل زمان کارکرد سالیانه در حالت سرمایش
4°C	دمای سیال جاری در مبدل زمینی در ورودی پمپ حرارتی در حالت گرمایش	۱۲۲۵ h/y	کل زمان کارکرد سالیانه در حالت گرمایش
39°C	دمای سیال جاری در مبدل زمینی در خروجی پمپ حرارتی در حالت سرمایش	۵۰۰ h/y	ساعات معادل کارکرد سالیانه با بار کامل در حالت سرمایش
1°C	دمای سیال جاری در مبدل زمینی در خروجی پمپ حرارتی در حالت گرمایش	۵۸۰ h/y	ساعات معادل کارکرد سالیانه با بار کامل در حالت گرمایش
		۱۸ h	ساعات کارکرد روزانه سیستم در حالت سرمایش

جدول (۱۱): مشخصات خاک منطقه

$2/4W/(m^{\circ}C)$	قابلیت هدایت گرمایی خاک
16°C	دمای میانگین سالیانه خاک
1/09ft <sup>2</sup> /day	ضریب پخش گرمایی خاک
12W/(m <sup>2</sup> °C)	ضریب کلی انتقال گرمای خاک



جدول (۱۲): مقایسه عمق چاه مبدل زمینی محاسبه شده برای ساختمان مورد مطالعه بر اساس روش‌های بررسی شده

روش	طول در حالت سرمایش (m)	طول در حالت گرمایش (m)
روش انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا [۵]	۱۷۷/۸	۲۴۶/۵
روش مدار گرمایی معادل [۷]	۱۷۲	۲۲۸
روش سازمان بین‌المللی پمپ حرارتی زمین گرمایی [۶]	۱۹۳/۴	۳۱۰/۴
روش تعیین عمق چاه مورد نیاز به ازای هر تن بار [۸]	۲۱۹/۲	۲۱۹/۲
روش سیستم‌های زمین گرمایی تجاری [۹]	۹۳/۷	۱۵۶/۹

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

### ۵-۱- پارامترهای مؤثر در محاسبه عمق چاه مبدل زمینی عمودی

با توجه به روش‌های مذکور، پارامترهای اصلی مؤثر بر محاسبه عمق و طراحی چاه مبدل زمینی عمودی عبارتند از:

- بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان
- ویژگی‌های ترموفیزیکی خاک شامل دمای میانگین سالیانه، قابلیت هدایت گرمایی، ضریب پخش گرمایی، و ضریب کلی انتقال گرمای آن
- بازدهی گرمایشی (ضریب عملکرد) و سرمایشی (نسبت بازدهی انرژی) سیستم
- کل ساعات کارکرد سالیانه و ساعات معادل کارکرد سالیانه سیستم با بار کامل
- قطر و قابلیت هدایت گرمایی لوله پلی‌اتیلنی U شکل

### ۵-۲- مقایسه و رتبه‌بندی روش‌های محاسبه عمق چاه مبدل زمینی عمودی

مناسب‌ترین روش طراحی یک سیستم، روشی است که فرضیات اولیه مناسب و روش تجزیه و تحلیل علمی داشته باشد و تأثیر پارامترهای بیشتری را در نظر گرفته باشد. بر این مبنا و با مقایسه پنج روش پیش‌گفته معلوم می‌شود که در روش «ASHRAE» [۵] در مقایسه با روش‌های دیگر، تأثیر پارامترهای بیشتری بر عمق چاه مورد نیاز در نظر گرفته شده است. بنابراین، این روش، مطمئن‌ترین روش محاسبه عمق چاه از میان روش‌های ذکر شده به شمار می‌رود. پس از این روش، روش «مدار گرمایی معادل» [۷] مناسب‌ترین روش تحلیل را دارد و تأثیر پارامترهای بیشتری را لحاظ کرده است. به همین ترتیب، پس از روش مدار گرمایی معادل، روش‌های «IGSHPA» [۶]، «تعیین عمق چاه مورد نیاز به ازای هر تن بار» [۸]، و «CEES» [۹] قرار می‌گیرند.

در پاسخ‌های به دست آمده برای ساختمان مورد مطالعه (جدول ۱۲) هم مشاهده می‌شود که عمق چاه مبدل زمینی با استفاده از روش ASHRAE برابر ۲۴۶/۵ متر به دست می‌آید. نزدیک‌ترین پاسخ به این مقدار مربوط به روش مدار گرمایی معادل است. دورترین پاسخ به مقدار ASHRAE به روش سیستم‌های زمین گرمایی تجاری مربوط می‌شود.

به این ترتیب، اولویت‌بندی روش‌های بررسی شده از لحاظ دقت به قرار زیر است:

۱- روش انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا [۵]

۲- روش مدار گرمایی معادل [۷]

۳- روش سازمان بین‌المللی پمپ حرارتی زمین گرمایی [۶]

۴- روش تعیین عمق چاه مورد نیاز به ازای هر تن بار [۸]

۵- روش سیستم‌های زمین گرمایی تجاری [۹]

به این ترتیب، در صورتی که کلیه اطلاعات مورد نیاز برای استفاده از روش ASHRAE در دست باشند، از این روش برای محاسبه عمق چاه مبدل زمینی عمودی استفاده می‌شود. در غیر این صورت، می‌توان به ترتیب فوق از روش‌های دیگر برای طراحی چاه مبدل زمینی عمودی استفاده کرد.

### فهرست نشانه‌های اختصاری

تغییرات سالیانه دمای هوا، °C	$A_s$
ضریب تصحیح	C
ضریب عملکرد	COP
قطر لوله مبدل زمینی، in	D
ساعات کارکرد روزانه سیستم، h/day	DOH
تعداد روزهای سکونت افراد در ساختمان در طی ماه، day/month	DOM
انرژی سالیانه تبادل شده با زمین، MJ/y	E
ضریب بار جزئی	F
عدد فوریه	Fo
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $\text{kW}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$	h
قابلیت هدایت گرمایی، $\text{kW}/(\text{m } ^\circ\text{C})$	k
عمق چاه مبدل گرمایی زمینی، m	L
پالس گرمایی، روز	P
بار طراحی ساختمان؛ میانگین شدت انتقال حرارت، Btu/h	Q
حرارت آزاد شده در کندانسور سیکل تبرید، kW	$Q_H$
حرارت جذب شده در اواپراتور سیکل تبرید، kW	$Q_L$
مقاومت گرمایی، $\text{h ft } ^\circ\text{F}/\text{Btu}$	R
مدت زمان کارکرد، روز	t
دما، °C	T
دمای میانگین، °C	$\bar{T}$
ضریب کلی انتقال گرما، $\text{kW}/\text{m}^2 \text{ K}$	U
توان کمپرسور سیکل تبرید، kW	$W_{in}$
عمق، ft	X

### علائم یونانی

ضریب پخش گرمایی، $\text{ft}^2/\text{day}$	$\alpha$
---	----------

کل ساعات کارکرد سالیانه سیستم، h/y	$\beta$
ساعات معادل کارکرد سالیانه سیستم با بار کامل، h/y	$\tau$

#### زیرنویس‌ها

سالیانه	a
مواد پرکننده چاه	A
گرفته شده از زمین	abs
حالت سرمایش	c
کندانسور	Con
روزانه	d
معادل	eqv
اوپراتور	Eva
زمین	G
حالت گرمایش	h
ورودی	i
داخلی	in
ماهانه	m
کمینه	min
بیشینه	max
خروجی	o
خارجی	out
لوله مبدل زمینی	p
داده شده به زمین	rej
آب	w

#### مخفف‌ها

انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا	ASHRAE
سیستم‌های زمین‌گرمایی تجاری	CEES
سازمان بین‌المللی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی	IGSHPA

- [1]. Omer A. M., 2008, "Ground-source heat pumps systems and applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, 344-371.
- [2]. Deng Z., 2004, "Modeling of Standing Column Wells in Ground Source Heat Pump Systems", submitted to the Oklahoma State University for the degree of Ph. D.
- [3]. Rafferty K., 2003, "Geothermal Heat Pump Systems: An Introduction", Water Well Journal,.
- [4]. Van Wylen [G. J.](#), Sonntag [R. E.](#), "Fundamentals of Classical Thermodynamics", 4<sup>th</sup> Ed, John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [5]. Kavanaugh S. P., Rafferty K., 1997, "Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings", ASHRAE Inc., Atlanta,.
- [6]. RETScreen International, 2005, "Ground Source Heat Pump Project Analysis", Minister of Natural Resources, Canada.
- [7]. Sanaye S., Niroomand B., 2009, "Thermal-economic Modeling and Optmization of Vertical Ground-coupled Heat Pump", Energy Conversion and Management, Vol. 50, 1136-1147,.
- [8]. Kavanaugh S. P., Calvert T. H., 1995, "Performance of Ground Source Heat Pumps in North Alabama", Final Report. Alabama Universities and Tennessee Valley Authority Research Consortium, University of Alabama, Tuscaloosa.
- [9]. CANMET Energy Technology Centre, 2002, "Commercial Earth Energy Systems", Natural Resources Publication, Canada.
- [10]. "Geothermal Heat Pump Design Manual",2002, McQuay Air Conditioning Application Guide, United States.
- [11]. ECONAR ENERGY SYSTEMS, 1993, "GeoSource Heat Pump Handbook", Northland Heat Pump Association, Canada.
- [12]. Kasuda, T., Archenbach, P.R. 1965, "Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States", ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part 1.

**Investigating the effective parameters and  
various methods of computing the borehole depth  
of vertical ground heat exchanger of geothermal heat pump**

\*Setareh Mehrkhou

\*Graduate School of Energy & the Environment, Science & Research Branch, Islamic Azad  
University, Tehran, Iran

**Abstract**

In geothermal heat pumps, the heat exchange with ground is performed by the ground heat exchanger. In fact, the ground heat exchanger is installed to extract or inject the thermal energy from/to the earth. The borehole depth of this heat exchanger has a major effect on the system investment cost and operation; thus, this parameter must be computed with a high accuracy. There are various methods to compute the borehole depth of ground heat exchanger. The geothermal heat pump capacity and the regional

soil characteristics are the main parameters which affect the borehole depth and size of the ground heat exchanger.

In this paper, the important soil characteristics are first introduced. Then, the main five methods for computing the borehole depth of ground heat exchanger are investigated with their effective parameters. Finally, these methods are compared and their application priority is determined.

Keywords: "Geothermal heat pump", "Vertical ground heat exchanger", "Borehole depth", "Heat pump capacity", "Ground temperature"

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.