

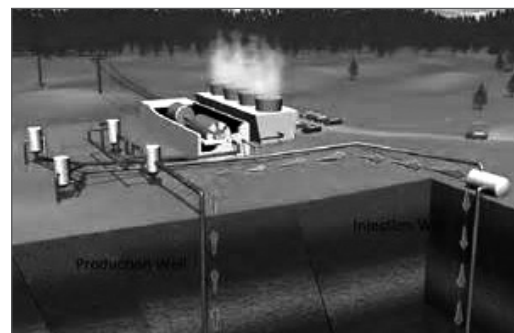


سامانه‌های شمع مبدل حرارتی و روند توسعه جهانی انرژی زمین گرمایی

کیخسرو تورانی* احمد رضا محبوبی اردکانی** جلال کاسب‌زاده***

چکیده

ساختمان‌های سبز با رویکردهای مختلف در جستجوی راه کارهایی به منظور کاهش مصرف انرژی و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک هستند. منابع انرژی زمین گرمایی، پتانسیل بسیار زیادی برای مصرف انرژی بطور مستقیم، به‌خصوص در ارتباط با پی‌های عمیق و پمپ حرارتی دارند. گونه‌ای از پی‌های عمیق، شمع مبدل حرارتی است که به‌طور قابل توجهی هزینه مؤثر نسبت به سامانه‌های سرمایشی مرسوم را کاهش داده و بدلیل استفاده از انرژی تجدیدپذیر و پاک، سازگار با محیط‌زیست می‌باشد. ترکیب موازی از چند شمع مبدل حرارتی و شبکه هیدرولیکی که متصل به پمپ حرارتی می‌باشد، اجازه استخراج گرما از زمین برای برآوردن نیاز حرارتی در زمستان و خارج نمودن گرمای اضافی ناشی از تهویه مطبوع در فصل تابستان را می‌دهد. شمع انرژی ممکن است به روش شمع درجا یا شمع مارپیچی (حفاری با مته حلزونی) اجرا و از بتن مسلح ساخته شود. شمع شامل لوله‌های پلاستیکی (HDPE) به منظور انتقال حرارت متوسط (آب شور یا معمولی) می‌باشد. در این مقاله به بررسی



* دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

** دانشیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

*** دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

شبیه‌سازی‌های شمع مبدل حرارتی انجام شده در جهان و بیان فرضیات صورت گرفته در تحلیل و پارامترهای مؤثر در طراحی این سامانه پرداخته و در ادامه روند توسعه جهانی این سامانه بیان می‌گردد.

کلمات کلیدی: شمع مبدل حرارتی، انرژی زمین‌گرمایی

۱- مقدمه

افزایش مشکلات زیست‌محیطی مهندسين را به سوی یافتن راه‌های تازه برای کسب انرژی سوق داده است؛ به‌نحوی که از آغاز دهه هشتاد، استخراج انرژی زمین‌گرمایی از اجزای پی‌ها مانند محور شمع‌ها در سال ۱۹۸۵ و از دیوارهای دیافراگمی در سال ۱۹۹۶ در اتریش و سوئیس توسعه یافته است. مزیت سامانه‌های مبدل انرژی زمین‌گرمایی آن است که از زمین به عنوان منبع ذخیره انرژی استفاده می‌کنند. فناوری شمع‌های مبدل حرارتی در اروپا بسیار موفق بوده است؛ به‌نحوی که به طور مثال در بریتانیا به سرعت در حال پیشرفت می‌باشد (جدول ۱).

مطالعه اخیر مرکز (DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) آلمان در زمینه راهبردهای ممکن برای گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر نشان داد که در آلمان، انرژی زمین‌گرمایی همراه با بازیابی انرژی از سامانه‌های خورشیدی، بیشترین پتانسیل رشد بلندمدت را دارند (Nitsch, ۲۰۰۷) {۲}.

شمع مبدل حرارتی شامل دو سامانه جاذب انرژی و انتقال انرژی گرمایی زمین با استفاده از جریان مایع در لوله‌های که در درون شمع‌ها قرار گرفته، می‌باشد. ترکیب موازی از چند شمع مبدل حرارتی و شبکه هیدرولیکی که متصل به پمپ حرارتی می‌باشد، اجازه استخراج گرما از زمین برای برآوردن نیاز حرارتی در زمستان و خارج نمودن گرمای اضافی ناشی از تهویه مطبوع در فصل تابستان را می‌دهد.

به‌طور کلی شمع مبدل حرارتی می‌تواند به صورت پیش ساخته یا درجا اجرا گردد. در شمع پیش‌ساخته که به صورت توخالی می‌باشد، لوله‌های پلاستیکی (HDPE) منظور انتقال حرارت متوسط (آب شور یا معمولی) در داخل قسمت خالی که در تماس با دیوار داخلی است قرار می‌گیرند. در شمع‌های درجا، این لوله‌ها توسط شبکه آرماتوربندی در بتن ثابت می‌شوند {۱}. در صورت استفاده از شمع‌های پیش‌ساخته یا درجا، لوله‌ها در کنار شبکه آرماتوربندی نصب می‌شوند. شکل ۱ نصب لوله‌های جاذب در کنار شبکه آرماتوربندی را نشان می‌دهد {۳}.

این سامانه بر اساس ظرفیت بالای انباشت گرمایی بتن شکل گرفته است. انواع مختلفی از سازه‌های ژئوتکنیکی از قبیل دیوارهای حائل، دال‌ها، پی‌ها و مهارها می‌توانند به عنوان یک

مبدل حرارتی زمین (GHE, Ground Heat Exchanger) عمل کنند. این اعضای بتنی در طراحی ساختمان به کار رفته و به عناصر اضافی مانند سامانه‌های مرسوم استفاده از انرژی حرارتی نیاز نیست. با طراحی مناسب سامانه، این امکان وجود دارد که نیاز به چیلر آبی الکتریکی به طور کامل حذف شود.

به دلیل پیچیدگی مسأله، روش‌های معمول تحلیلی برای مدل سازی فرآیندهای ترمودینامیکی واقعی از سامانه زمین‌گرمایی کفایت نمی‌کنند. شبیه‌سازی عددی می‌تواند جریان ناپایدار و وضعیت انتقال گرمای مصالح خاکی چند فازه ناهمگن و اندرکنش بین خاک و سامانه زمین‌گرمایی را در نظر بگیرد. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای برای به دست آوردن پیش‌بینی بهتر عملکرد سامانه انجام می‌شوند. این شبیه‌سازی‌ها تحت تأثیر نوع خاک و شرایط آب زیرزمینی از یک سایت خاص و مکانیزم‌های مختلف انتقال گرما در منطقه خاک زیر سطحی قرار می‌گیرند.

تجربه جهانی نشان داده است که این سامانه گرمایشی/سرمایشی امکان ذخیره‌سازی ۲ تا ۳ برابری هزینه‌های مرسوم گرمایش را داشته و علاوه بر این، سهم مؤثری در حفاظت از محیط‌زیست توسط انرژی پاک و تجدیدپذیر دارد. هیچ محدودیتی در عمق شمع یا دیوار دیافراگمی تا آنجا که به نصب و راه‌اندازی سامانه‌های جاذب انرژی مربوط می‌شود وجود ندارد. انرژی بالقوه با عمق افزایش می‌یابد، بنابراین پی‌های عمیق‌تر باصرفه‌تر هستند. از نظر اقتصادی کمترین عمق شمع حدود ۶ متر است.

خاک‌های اشباع با نفوذپذیری بالا بسیار مناسب هستند، اما سامانه در بالا یا پایین رس‌های تحکیم یافته اقتصادی‌تر عمل می‌کند. ماسه و شن خشک به شمع‌هایی با عمق بیشتر و همچنین مساحت بزرگتری از جاذب‌ها نیاز دارند. بسته به خصوصیات خاک و عمق نصب جاذب، برای تولید ۱ kW گرمایش سطحی بین ۲۰ متر مربع (در خاک اشباع) و ۵۰ مترمربع (در خاک ماسه خشک) سازه‌های بتنی در تماس با خاک یا آب زیرزمینی نیاز است {۳}. انرژی پتانسیل در دسترس زمین، به نحوی است که خانه‌ای با فقط ۱۰۰ متر مربع زیربنا، با داشتن یک شمع به طول ۱۲ متر و حجم خاک ۱۲۰۰ متر مکعب، زمانی که این جرم با فقط $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ در پایین سرد شود، انرژی زمین‌گرمایی بیشتر از ۱۰۰۰ kWh می‌توان به دست آورد {۳}.

۲- روش آنالیز ژئومکانیک برای شمع‌های مبدل حرارتی

با توسعه روزافزون این فناوری در دنیا، اما همچنان اطلاعات مستدلی از اثرات حرارتی بر رفتار پی‌ها وجود ندارد، به‌نحوی که هنوز روش طراحی خاصی که اندرکنش پیچیده بین ذخیره‌سازی

۱- تغییر مکان شمع به روش تفاضل محدود یک بعدی محاسبه می شود و تنها جابه جایی محوری در نظر گرفته، جابه جایی شعاعی و اثر متقابل مکانیکی با خاک نادیده گرفته شده است. از وزن شمع چشم پوشی می گردد.

۲- خواص شمع مثل مدول یانگ Epile و ضریب انبساط حرارتی α در طول شمع ثابت باقی می ماند و با دما تغییر نمی کند.

۳- روابط بین اصطکاک و تغییر مکان محوری، تنش و تغییر مکان سر شمع و تنش و تغییر مکان نوک شمع مشخص می باشند.

۴- خصوصیات خاک و اندرکنش شمع و خاک با دما تغییر نمی کند. تغییر مکان های رو به بالا مثبت و تغییر مکان رو به پایین منفی در نظر گرفته شده، تنش کششی مثبت می باشد.

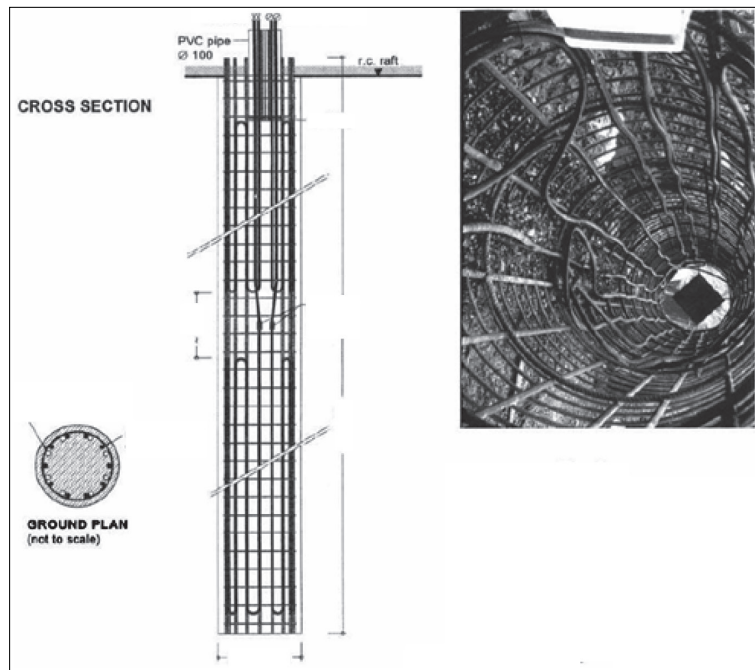
به منظور منظم کردن مطالب، در نمادگذاری حروف بزرگ برای نیروها و حروف کوچک برای تنش ها هستند. از حرف T برای نیروی خاک در طول شمع و به طرف پایه (نوک) شمع و اندیس m و c طرف به ترتیب نشان دهنده نیروهای عکس العمل مکانیکی و حرارتی می باشند. اندیس b پایه (نوک) شمع، اندیس h سر شمع و S برای محور شمع می باشند. مدل تفاضل محدود به کار رفته و اندیس گذاری فوق در شکل ۲ نشان داده شده است.

تغییر مکان شمع با استفاده از روش انتقال بار برای بار مکانیکی P محاسبه می شود. {۵} در این روش، شمع به عناصر مجزای صلب تقسیم و توسط فنر هایی که سختی شمع را نشان می دهند به یکدیگر متصل شده اند. هر یک از اعضای صلب، اندرکنش الاستوپلاستیک با خاکی که آن را احاطه نموده، دارد. عضو پایه (نوک) شمع با لایه خاک در نوک شمع برهم کنش به صورت الاستوپلاستیک دارد. در شکل (۲a) رابطه بین اصطکاک جداره و تغییر مکان شمع،

جدول ۱: تعداد شمع های انرژی ساخته شده در سال در بریتانیا

{1} (T. Amis, personal communication, January 2009)

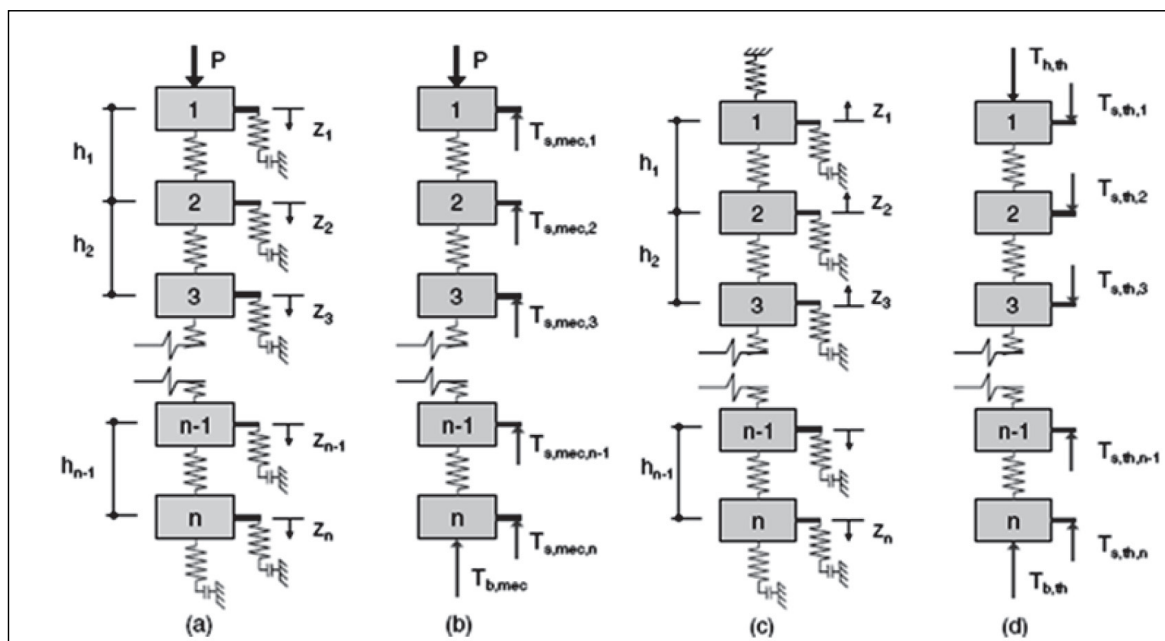
سال	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸
تعداد شمع انرژی در سال	۱۵۰	۴۴۰	۱۴۹۵	۱۵۹۶



شکل ۱: (سمت چپ) دتایل اجرایی شمع، (سمت راست) نمونه ای از قفس آرماتور بندی شمع انرژی با لوله های جاذب

حرارتی و رفتار مکانیکی سازه های ژئوتکنیکی را به طور کامل بررسی کند در دسترس نیست؛ بنابراین، ابعاد شمع مبدل حرارتی، براساس ملاحظات تجربی طراحی شده و برای افزایش امنیت سازه، ضریب اطمینانی که برای شمع های متعارف به کار می رود، افزایش یافته است {۴}. این روش ها متکی بر مفروضات ساده زیر هستند:





شکل ۲: مدل تفاضل محدود برای بار و تغییر مکان شمع مبدل حرارتی، (a) مدل برای بار مکانیکی، (b) بارهای خارجی بسیج شده با بارگذاری مکانیکی، (c) مدل بارگذاری حرارتی، (d) نیروهای خارجی بسیج شده با بارگذاری حرارتی {۱}

همراه با رابطه بین تنش‌های نرمال و تغییر مکان‌های شمع با توابع انتقال بار توضیح داده شده است. این گسستگی در سامانه اجازه می‌دهد تا بتوان لایه‌های مختلف خاک با خواص مجزا و تغییرات خواص خاک با عمق را در نظر گرفت.

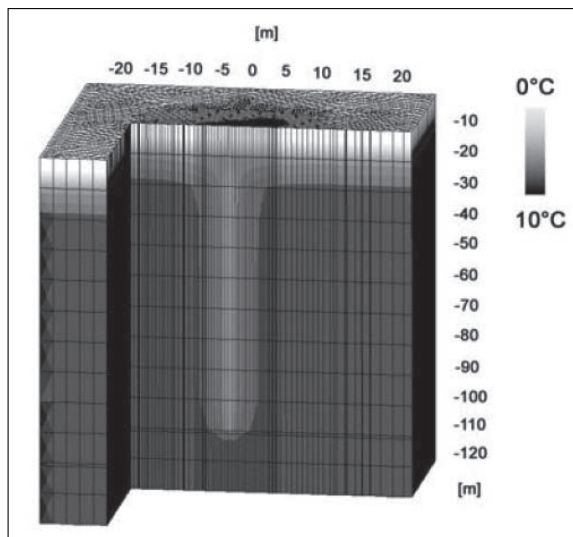
در مورد بارگذاری حرارتی، حرکت شمع مبدل حرارتی، در حالی که P وزن سازه و اثرات سازه بالایی را نشان می‌دهد؛ تنها زمانی که بارگذاری حرارتی انجام می‌شود، فتر اضافی در بالا در نظر گرفته می‌شود. (شکل ۲c) نیروهای خارجی بسیج شده $T_{s,i}$ و $T_{h,i}$ در شکل ۲ (b و d) نشان داده شده است. فنرهای بین دو جزء مجاور شمع، نشان‌دهنده سختی در شمع می‌باشند. رفتار شمع به صورت خطی و الاستیک مطرح می‌شود. بر اساس تعریف قبلی از برهم کنش شمع و خاک، محاسبات پاسخ ترمومکانیکی شمع مبدل حرارتی به شرح زیر می‌باشد. ابتدا، محاسبه تنش‌ها و تغییر مکان‌های شمع ناشی از بارگذاری مکانیکی صورت گرفته و موارد مشخص شده با مقادیر تخمین زده شده اولیه که اثرات ناشی از وزن سازه در آن لحاظ شده مطابقت داده می‌شود. پس از تخمین اولیه، واکنش شمع ناشی از بار حرارتی محاسبه می‌گردد (گرمایش و سرمایش در طول انتقال حرارت).

هنگامی که یک شمع تحت تأثیر گرمایش یا سرمایش قرار می‌گیرد، دچار انقباض و انقباض در نقطه خنثی حرارتی می‌شود. {۶} به طور مثال در شکل‌های (۲c و ۲d) این نقطه خاص بین عضوهای ۳ و $n-1$ قرار دارد. در واقع نقطه خنثی حرارتی که در عمق واقع شده است (Null Point+NP)، و مکانی است که مجموع اصطکاک بسیج شده در طول قسمت بالایی به علاوه عکس‌العمل سازه، برابر با مجموع اصطکاک بسیج شده در طول قسمت تحتانی به علاوه عکس‌العمل نوک شمع می‌باشد. با توجه به نمادگذاری در شکل ۲ می‌توان بدین صورت بیان کرد که:

$$\sum T_{th,NP} = \sum_{i=1}^{NP} T_{s,th,i} + T_{h,th} + \sum_{i=NP+1}^n T_{s,th,i} + T_{b,th} = 0 \quad (1)$$

۳- پارامترهای طراحی

انجام مدل‌سازی عددی و در نتیجه رسیدن به طراحی مناسب و اقتصادی به اطلاعات کافی به منظور شبیه‌سازی هرچه واقعی‌تر مسأله نیاز دارد. از جمله پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی خصوصیات ژئوتکنیکی، مانند میزان رطوبت، چگالی و نسبت تخلخل، نفوذپذیری، رفتار تورم-انقباضی، رفتار انجماد-یخ‌گشایی (اگر استخراج گرمای شدید لازم است)، پارامترهای برشی و رفتار تنش-کرنش (برای طراحی پی) می‌باشند. خصوصیات زمین‌گرمایی خاک، خصوصاً هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی در سطوح درجه حرارت معین، دمای زمین در سایت، گرادیان حرارتی در میزان بارگذاری ترمودینامیکی نقش به‌سزایی دارند. خصوصیات هیدروژئولوژی زمین از قبیل عمق



شکل ۳: مدل اجزای محدود گمانه مبدل حرارتی در طی عملکرد توزیع حرارتی {۲}

تأثیر قرار گرفته، بزرگتر می شود. پس از ۹۰ روز، در فاصله ۳/۵ متر اختلاف دما حدود ۰/۵ K است. مطالعات عددی انجام شده نشان داد، با توجه به شرایط مرزی بدون تغییر، بیشتر شدن میزان استخراج منجر به پایین آمدن درجه حرارت در داخل و مجاور گمانه مبدل حرارتی و در نتیجه گسترده تر شدن تأثیر حرارتی بر جسم خاک زیر سطحی می شود. هدایت حرارتی پایین تر خاک زیر سطحی، به شدت انرژی کمتری نسبت به فرو رفت حرارت منجر می شود. بنابراین، در منطقه نزدیک به مبدل حرارتی، دما به شدت کاهش می یابد {۲}.

تأثیر جریان آب های زیرزمینی افقی بر روی رفتار حرارتی خاک زیر سطحی نزدیک به یک گمانه مبدل حرارتی را می توان از توزیع درجه حرارت در شکل ۵ مشاهده نمود {۲}. برای مثال یک گمانه مبدل حرارتی با نرخ استخراج حرارتی ۲۰ W/m و

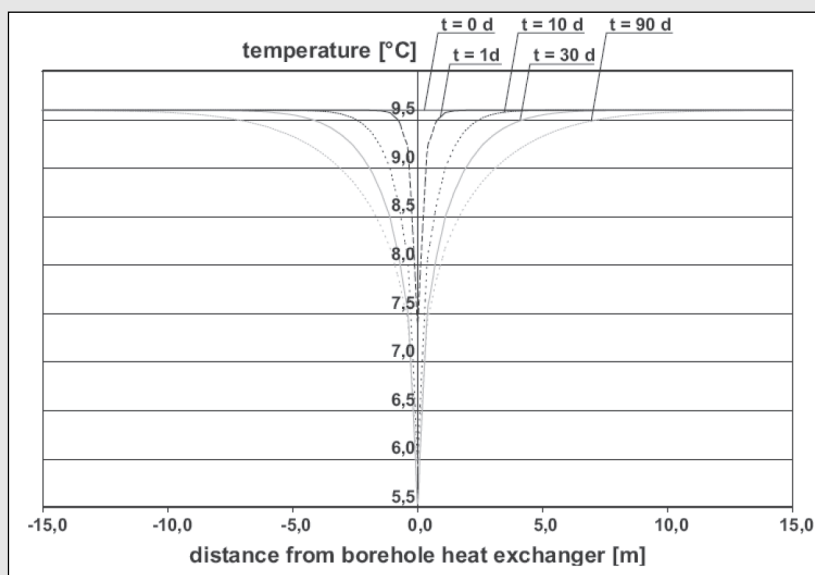
و جدول نوسانات فصلی آب زیرزمینی، جهت جریان و سرعت آب زیرزمینی در میزان انرژی استخراجی مؤثر هستند. خصوصیات کانی شناسی و ژئوشیمیایی خاک، سامانه، ابعاد، الگوی فاصله المان ها، روش نصب و راه اندازی و خواص بتن المان های پی نیز بایستی بررسی شوند. شرایط آب و هوایی، مقدار نیاز گرمایش/ سرمایش در ساختمان، شرایط درجه حرارت در چرخه انرژی اصلی و ثانویه، سرعت جریان چرخه (آب یا آب شور) در سامانه انرژی، فاصله گرمایش/ سرمایش و پلان اجرایی از جمله سایر پارامترهایی هستند که باید در مدل سازی به منظور طراحی هرچه بهتر لحاظ شوند.

۴- تحقیقات عددی

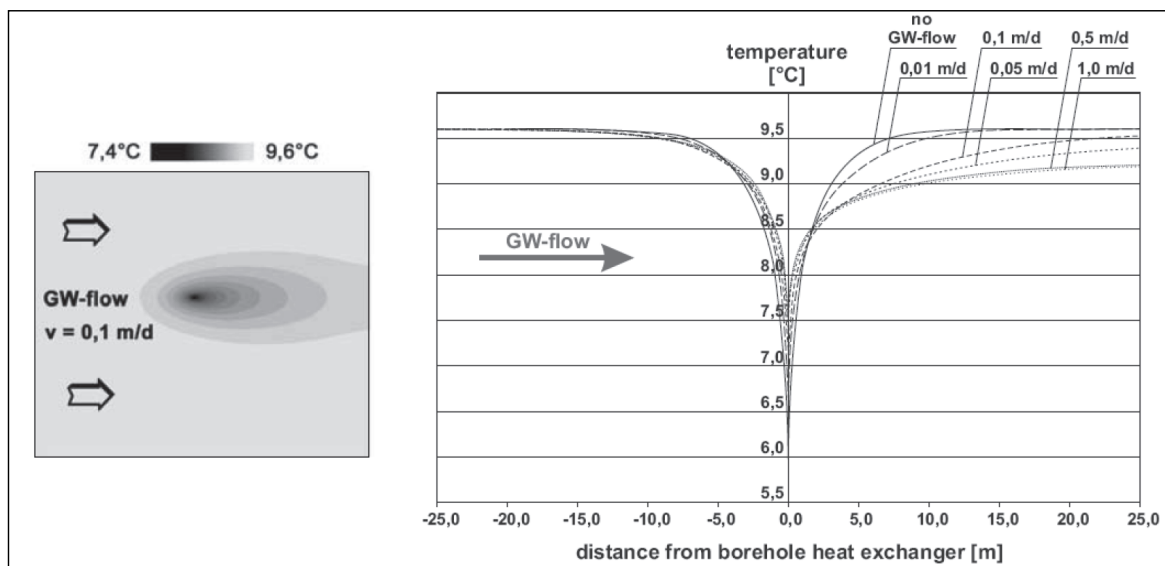
به منظور بررسی تأثیر شرایط مرزی مختلف بر روی عملکرد سامانه، مطالعات گسترده عددی با استفاده از روش اجزای محدود انجام شده است {۲}. به عنوان مثال، در یک گمانه مبدل حرارتی، تأثیر پارامترهای مختلف ساخت و ساز، شدت گرما در بین مبدل و خاک و توزیع دما در خاک زیر سطحی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳).

شکل ۴ توسعه موقتی میدان دما در اطراف یک گمانه مبدل حرارتی (BHE) در بخش های شعاعی که برای عملیات زمستان با نرخ خروج ثابت ۲۰ W/m شبیه سازی شده را نشان می دهد. کاتزن باخ و همکارانش (۲۰۰۸) برای خاک زیر سطحی این شرایط را در نظر گرفتند: $(\lambda=3W/(m.K), c=2MJ/(m^3.K))$ {۲}.

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که هیچ تأثیر حرارتی را نمی توان در فاصله ۱ متر پس از یک روز از عملیات شناسایی، مشاهده نمود. با گذشت زمان منطقه حرارتی به آهستگی تحت



شکل ۴: توزیع دما در خاک زیر سطحی {۲}



شکل ۵: تأثیر جریان آب زیرزمینی بر توزیع حرارت در خاک زیر سطحی {۲}

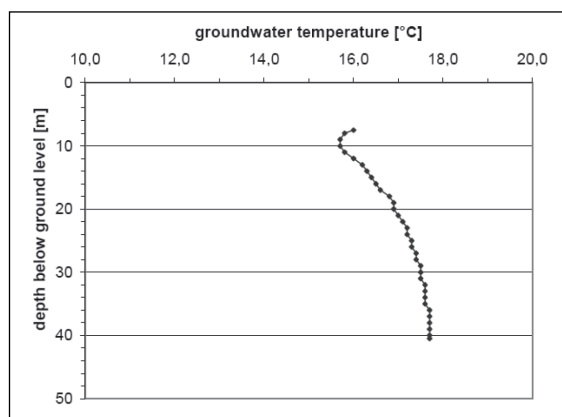
بهره‌برداری مستمر ۹۰ روزه در لایه آب زیرزمینی با تعریف تغییر سرعت جریان افقی آب زیرزمینی محاسبه شده است. تأثیر جریان آب زیرزمینی به صورت میزان انحراف قابل توجهی در منحنی هم دما در مسیر پایین دست قابل مشاهده است. با رشد سرعت جریان، توزیع متقارن حرارت و در جهت پایین دست توزیع منحرف شده، که منطقه تأثیر حرارتی بزرگتر می‌شود. برای نرخ استخراج حرارتی ثابت، جریان آب‌های زیرزمینی باعث کاهش افت دما در داخل و مجاور گمانه مبدل حرارتی می‌شوند. از این رو، دمای نزدیک منطقه از حدود ۶ درجه سانتی‌گراد بدون جریان آب زیرزمینی تا حدود ۷/۵ درجه سانتی‌گراد برای سرعت جریان ۱ M/d افزایش می‌یابد. با این حال، ذخیره‌سازی انرژی‌های فصلی در منطقه خاک زیر سطحی با چنین سرعت جریان آب زیرزمینی بالا بیش از این‌ها ممکن نخواهد بود، زیرا همرفت قوی انرژی وارد شده منطقه متأثر گمانه مبدل حرارتی، به جهت پایین دست انتقال خواهد یافت، که بیش از این‌ها نمی‌تواند بهبود یابد.

ون میورس (۱۹۸۶) با مطالعه رفتار پارامترها ثابت کرد که آب‌های زیرزمینی در مرز مشخصه، سرعت جریانی برابر با $V = 0.10 \text{ m/d}$ دارند {۷}. بر این اساس، قرار دادن یک سامانه ذخیره‌سازی حرارتی فصلی در درجه اول در چنین لایه آب زیرزمینی با سرعت جریان $V < 0.10 \text{ m/d}$ با تلفات حرارتی به میزان قابل توجهی محدود امکان‌پذیر است.

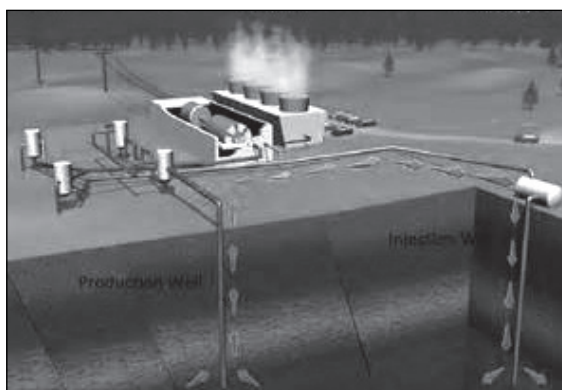
۵- توسعه سامانه شمع انرژی در مناطق شهری

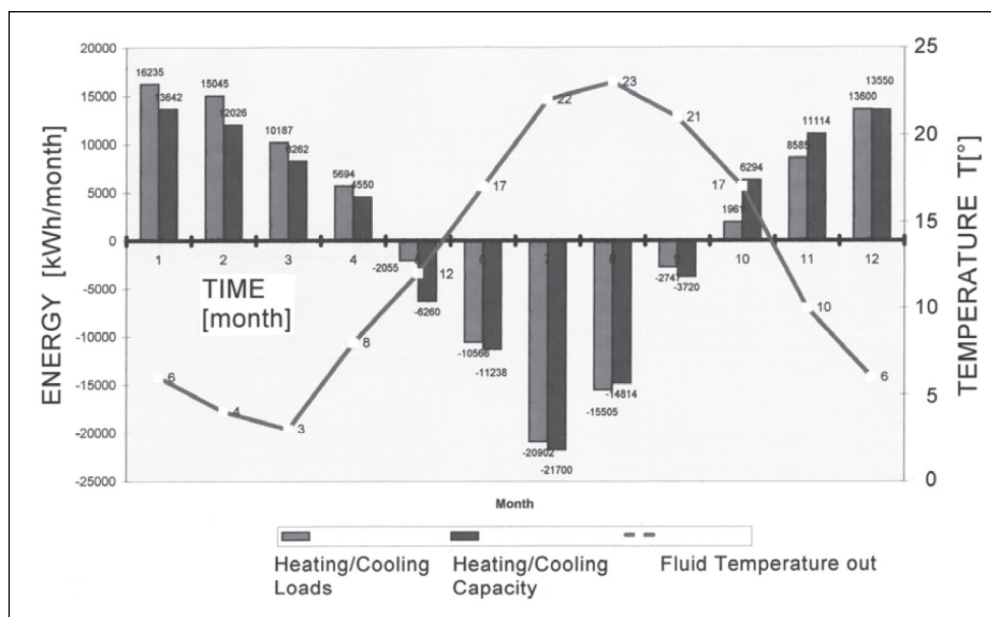
- پروژه آسمان خراش هوچویرفرانکفورت

در مرکز فرانکفورت، آلمان، پروژه آسمان خراش هوچویر فرانکفورت در سائیتی به مساحت ۱۷/۴۰۰ متر مربعی در حال حاضر در دست ساخت است. از مجموع ۳۰۲ شمع (قطر تا ۱/۸۶



شکل ۶: دیافراگم دمای آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در تاریخ ۲۰۰۴ {۸}





شکل ۷. نمودار پلهای انرژی- زمان و جریان فصلی دما در لوله های جاذب {۳}

زمین، تشخیص داده شد و در حالی که در اعماق بیشتر دما دوباره افزایش یافته است {۲}. در مناطق فاقد ساختمان انتظار می رود روند دمای طبیعی یافت شود.

نتایج محاسبات FEM نشان می دهد که بیشترین تأثیر حرارتی بر روی زمین در مناطقی که در آن مجموعه ای از شمع انرژی بسیار نزدیک به یکدیگر قرار دارند، بوده است. بیشترین گسترش میدان دما به سمت جریان آب زیرزمینی اتفاق می افتد. با توجه به نفوذپذیری بالاتر سنگ آهک و در نتیجه سرعت بالاتر جریان آب های زیرزمینی، نسبت به رس، گسترش منطقه های تحت تأثیر حرارتی بیشتر در بستر آهکی صورت می گیرد.

-کالچ کبل آکسفورد

اولین پروژه شمع انرژی در بریتانیا در ۲۰۰۱، براساس دانش و تکنولوژی اتریش احداث شد. ساختمان دانشکده کبل در آکسفورد متشکل از یک سالن سخنرانی و خوابگاه است. شمع های شالوده (۰/۷۵ m و $\phi=0/45$) و شمع (۰/۶ متر) متقاطع از دیوار حائل برای گودبرداری با لوله های جاذب پر شد. بار گرمایشی ساختمان ۸۵ کیلو وات و بار سرمایشی ۶۵ W است. هزینه های ماهانه برای گرمایش و سرمایش را می توان به طور کامل با این سامانه زمین گرمایی تحت پوشش قرار داد (شکل ۷).

-تونل انرژی

از کاربردهای خاص این سامانه می توان به تونل انرژی اشاره کرد. تا همین اواخر، انرژی زمین گرمایی تونل ها عمدتاً بدون پمپ گرما و تنها با جریان آب داغ مورد استفاده قرار گرفته است. اما پتانسیل حرارتی در طول یک تونل نیز می تواند با استفاده از

متر، طول تا ۲۷ متر) با عمق ۵۳/۲ متر تا ۷۰/۱ متر بالاتر از سطح دریا و ۵۴۳ شمع در دیوار های حائل (۱/۵ متر قطر، طول بیش از ۳۸ متر) در عمقی بین ۹۴/۱ متر و ۹۹/۶ متر بالاتر از سطح دریا و قرارگیری نوک این شمع ها نیز در عمق بین ۵۹/۸ متر و ۷۳/۴ متر بالاتر از سطح دریا که بخش بالایی شمع در خاک رس و بخش پایینی شمع در لایه های سنگی سنگ آهک قرار دارد. به طور کلی ۲۶۲ از شمع پی و ۱۳۰ شمع دیوار حائل به تجهیزات شمع های انرژی مجهز شد. از این رو، در مجموع از شمع های پی و دیوار حائل توان ۹۱۳ کیلووات از خاک زیر سطحی برای استفاده حرارتی ساختمان در دسترس است.

از شمع مبدل حرارتی نه تنها در این سازه، بلکه در حال حاضر به عنوان مبدل انرژی در آسمان خراش های فرانکفورت، از قبیل گالیلو، مین تاور و اسکایپر استفاده شده است.

مقدار انرژی منتقل شده از سامانه شمع انرژی تقریباً حدود ۲۳۵۰ MWh/a برای عملیات گرمایش و تقریباً در حدود ۲۴۱۰ MWh/a برای عملیات سرمایش برآورد شده است.

درجه حرارت آب زیرزمینی، در امتداد عمق (شکل ۶) اندازه گیری شده و دمای آب زیرزمینی در عمق ۸ متر زیر سطح از حدود ۱۵/۸ به ۱۷/۷ درجه سانتی گراد در عمق ۳۶ متری ادامه پیدا می کند. این درجه حرارت نسبتاً بالا، در واقع توسط تأثیرات انسانی از جمله سازه های زیرزمینی مانند گاراژ، مترو و تونل های زیرزمینی و تونل های فاضلاب ایجاد می شود. با آزمایش های صورت گرفته دما بین ۱۴/۵ و ۱۹ درجه سانتی گراد در عمق ۱۵ متری پایین سطح زمین تشخیص داده شد. در مناطق با ساختمان ها ابتدا کاهش درجه حرارت در عمق ۳۰ متر تا ۵۰ متر زیر سطح

عنوان مثال امکان دارد که تونل های مترو، درجه حرارتی بیش از ۲۰ درجه سانتی گراد، حتی در طول ماه های زمستان داشته باشند. استفاده از انرژی های پاک و تجدیدپذیر از تونل ها، سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه است. بنابراین تونل انرژی توانایی پذیرش عمومی و جذب حمایت سیاسی را دارد.

۶- توصیه هایی برای اجرای سامانه شمع مبدل حرارتی

تحقیقات تفصیلی برای بهینه سازی سامانه های جاذب استخراج انرژی حرارتی و ذخیره سازی آن ضروری است. این امر نه تنها شامل ویژگی های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژی، بلکه هدایت حرارتی زمین و ظرفیت گرمایی زمین در سطوح دمایی خاص می باشد. ترکیب مواد معدنی ذرات نیز مهم است و بر

پوشش مناسب برای تونل، به عنوان جاذب انرژی مورد استفاده قرار بگیرد. این امر با استفاده از انکرها، خاک میخ ها، پیچ سنگ ها، ژئوسنتتیک ها و پوشش بتنی می تواند انجام گیرد. با رسیدن انکرها و خاک میخ ها به عمق زمین اطراف، می توان توده نسبتاً بزرگی برای انرژی زمین گرمایی استفاده نمود. تونل انرژی به روش های مختلفی از جمله NATM یا روش حفاری روباز می تواند حفاری شود. از مزایای تونل، راه آهن وین می توان به تأمین انرژی حدود ۱۲۰۰ آپارتمان خصوصی با انرژی زمین گرمایی اشاره کرد. از آنجا که تونل ها سطوح مشترک زیادی بین زمین و سازه دارند، بنابراین مستعد استخراج و ذخیره سازی انرژی زمین گرمایی هستند. به طور معمول، تونل در عمقی واقع شده است، که در آن دمای فصلی زمین به طور گسترده ای ثابت است. تونل های طولانی، حرارت قابل توجهی عمده تاً به دلیل گرمای اضافی حمل و نقل، دارند. به



سامانه جاذب فقط با آب و یا آب شور مورد بهره برداری است، بایستی در هر حالت از انجماد اجتناب شود.

به طور معمول، اختلاف درجه حرارت در حدود $\Delta t = 2^{\circ}\text{C}$ بین مدخل و خروجی جاذب برای عملکرد اقتصادی سامانه انرژی کافی است. نوسانات درجه حرارت آب زیرزمینی بایستی کمتر از حد ممکن نگه داشته شود ($\Delta T \leq 5^{\circ}\text{C}$). پایین آوردن درجه حرارت آب های زیرزمینی باعث افزایش ویسکوزیته، از این رو کاهش هدایت هیدرولیکی می گردد. در مورد $\Delta T \leq 5^{\circ}\text{C}$ این نوسان قابل اغماض است.

سرمایش بیش از حد آب های زیرزمینی، باعث افزایش مقدار PH، کاهش حلالیت کلسیم، و افزایش حلالیت مواد گازی مانند CO_2 می گردد. از نتایج گرمایش شدید، کاهش نسبتاً زیاد در حلالیت اکسیژن که موجب نامناسب شدن آب های زیرزمینی برای شرب می گردد. علاوه بر این، درجه حرارت، یکی از مهم ترین عوامل زیست محیطی برای میکروارگانیسم ها در آب است. بسیاری از آن ها تنها می توانند در محدوده دمای بسیار محدود وجود داشته باشند. به خصوص فعالیت باکتری خورنده میکروارگانیسم ها به میزان قابل توجهی در دمای زیر ۱۰ درجه سانتی گراد افت می کند. به منظور افزایش ضریب امنیت شمع بایستی موارد زیر نیز تعیین گردند:

- فشار اضافی در شمع
- تنش کششی ممکن در شمع و
- تنش برشی بسیج شده و عکس العمل در نوک

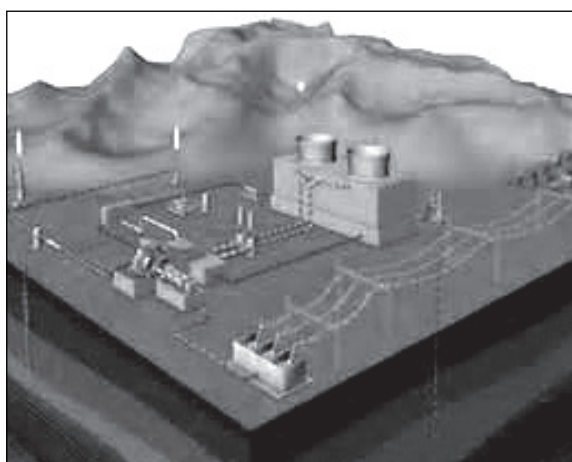
۷- نتیجه گیری

فناوری شمع مبدل حرارتی استفاده از انرژی های تجدیدپذیر پاک را امکان پذیر نموده و تقریباً با تمام شرایط زمین سازگار می باشد. این نوآوری، پیشرفت قابل توجهی نسبت به روش های مرسوم مانند چاه (گمانه) مبدل حرارتی (پمپ گرما) یا زهکش های زمین نموده است. بررسی سایت های مختلف، نشان داده است که دوره بازگشت سرمایه گذاری برای این سامانه جدید گرمایش/سرمایش با پمپ های حرارتی منبع زمینی تقریباً ۳ تا ۸ سال است. البته این مسئله بستگی به خصوصیات زمین، سامانه پی، خصوصیات ساختمان و قیمت انرژی دارد. از قرار گرفتن در معرض درجه حرارت زیر انجماد در جداره پی های عمیق بایستی اجتناب شود. خصوصاً وجود رس معدنی فعال (مانند مونت موریلونیت) در خاک های دانه ای می تواند بحران ساز باشد. پی های انرژی دوستدار محیط زیست، اقتصادی، موجب افزایش آسایش در محل و کاهش مصرف انرژی های فسیلی در ساختمان ها می شوند. به رغم وجود صدها گونه از این نوع تأسیسات، روش طراحی

رفتار خاک تحت نوسانات درجه حرارتی (انقباض، تورم، انجماد) تأثیر می گذارد. به علاوه، خواص شیمیایی و بیولوژیکی آب های زیرزمینی ممکن است جالب باشد.

معمولاً، نوسانات درجه حرارت ناشی از پی انرژی هیچ اثر مربوط، بر روی خاک اطراف با فرض دمای همچنان بالاتر از ۲ درجه سانتی گراد ندارد. با این حال، سرمایش زیر صفر درجه سانتی گراد، به عنوان یک نتیجه از عملکرد نادرست، باید اجتناب شود. این مسأله ممکن است باعث ایجاد اثرات فشار انجماد- یخ گشایی در خاک، در نتیجه بر رفتار ظرفیت باربری شمع ها، بارت ها، یا دیوارهای دیافراگمی مؤثر باشد. علاوه بر این، افزایش رسانایی حرارتی و ظرفیت ذخیره سازی گرمایی به ویژه در خاک های با سطح آب زیرزمینی بالا، با انجماد کاهش می یابد. در صورتی که





Davidson, C., and Payne, P. (2009). "Energy pile Test at Lambeth College, London: Geotechnical and Thermodynamic Aspects of Pile Response to Heat Cycles." *Géotechnique*, 59(3), 237–248.

7- Van Meurs, G. A. M. (1986). "Seasonal Heat Storage in the Soil." Thesis, Department of Applied Physics, University of Technology Delft.

8- Katzenbach, R., Waberseck, T., Vogler, M., Adamietz, U. (2007). "Hochleistungsenergiepfähle zur Nutzung der Geothermie im Hochhausbau." *Österreichische Geotechniktagung*, Wien, 18.-19.1.2007, 511-522.

خاصی که اندرکنش پیچیده بین ذخیره‌سازی حرارتی و رفتار مکانیکی از سازه‌های ژئوتکنیکی در نظر بگیرد، به طور دقیق در دسترس نیست. با این حال، المان‌بندی شمع به تعدادی از بخش‌ها ما را قادر به در نظر گرفتن لایه‌های مختلف خاک با خواص مشخص و تغییر خواص خاک با عمق می‌سازد. یک روش تکرار شونده اجازه می‌دهد تا کرنش‌های حرارتی و نیروهای اضافی، زمانی که شمع تحت اثر هر دو بارگذاری محوری مکانیکی و تغییرات دما باشد، اندازه‌گیری شود. این روش بر اساس اندازه‌گیری درمکان، بار و تغییر شکل تجربه شده توسط شمع مبدل حرارتی استوار می‌باشد. این روش بیشتر برای شرایط شاخص کاربرد دارد (شمع اصطکاکی، شمع نیمه اصطکاکی و شمع اتکایی). گرمایش، شمع را وادار به فشار اضافی در شمع و افزایش تنش برشی بسیج شده می‌نماید. سرمایش، شمع را می‌تواند وادار به آزادسازی تنش برشی بسیج شده، تحمیل برجسته علائم برگشت تنش برشی و توسعه تنش کششی در شمع نماید.

مقایسه صورت گرفته بین سامانه مرسوم گمانه‌های زمین‌گرمایی و سامانه شمع انرژی و پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با توجه به ظرفیت ذخیره‌سازی و هزینه‌های اولیه نشان می‌دهد که سامانه دوم قادر به فراهم کردن ظرفیت بیشتری در هزینه‌های اولیه پایین‌تر است. مطالعه دقیق سامانه ذخیره‌سازی سرمایش فصلی زمین مرجع خوبی برای بررسی جزئیات بیشتر استفاده از این فناوری در منطقه نیمه استوایی را فراهم می‌کند.

منابع

- 1- Knellwolf, C., Peron, H. and Laloui, L. (2011). "Geo-technical Analysis of Heat Exchanger Piles", American Society of Civil Engineers (ASCE), Switzerland.
- 2- Katzenbach, R., Clauss, F. and Waberseck, T. (2008). "Coupled Numerical Simulation of Geothermal Energy Systems", International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics(IACMAG), Goa, India 1-6 October, 2008.
- 3- Brandl, H., "Geothermal Heating and Cooling of Building", Vienna Technical University, Austria.
- 4- Boënnec, O. (2009). "Piling on the Energy." *Geodrilling Int.*, (150), 25–28.
- 5- Seed, H. B., and Reese, L. C. (1957). "The Action of Soft Clay along Friction Piles." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 122, 731–754.
- 6- Bourne-Webb, P. J., Amatya, K., Soga, K., Amis, T.,