مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۳، صص. ۱۳-۲۴، (پژوهشی)

Original Article

مطالعه‌ی عددی عوامل مؤثر در اندرکنش حرارتی شمع‌های انرژی در گروه شمع انرژی

محمدابراهیم دانش (دانشجوی کارشناسی ارشد)
محمدامیر کیانی فردوئی (دانشجوی دکتری)
محمد علیایی * (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

امروزه انرژی زمین‌گرمایی، که می‌توان آن را از طریق شمع‌های انرژی از توده‌ی خاک استحصال کرد، به عنوان یک منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها شناخته می‌شود. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی عوامل مؤثر در اندرکنش حرارتی بین گروه شمع انرژی و تأثیر آن در کاهش انرژی استحصالی از خاک است. با استفاده از روش المان محدود، پارامترهایی همچون: تخلخل خاک، سرعت سیال، قطر و طول شمع و همچنین نسبت فاصله‌ی میان شمع‌ها به قطرشان مطالعه شده است. براساس نتایج به دست آمده با کاهش اندرکنش حرارتی در گروه شمع انرژی، میزان انرژی استحصالی افزایش خواهد یافت. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تخلخل خاک و قطر شمع، میزان اندرکنش حرارتی کاهش و از این رو، میزان انرژی استحصالی افزایش یافته است. براساس نتایج به دست آمده، طول شمع و سرعت سیال در میزان اندرکنش حرارتی تأثیر اندکی داشته‌اند.

واژگان کلیدی: انرژی زمین‌گرمایی، گروه شمع انرژی، انرژی استحصالی، اندرکنش حرارتی، انتقال حرارت در خاک، کامسول مولتی فیزیک.

ibrahim.danish@modares.ac.ir
m_kianifordoei@modares.ac.ir
m.olyaei@modares.ac.ir

۱. مقدمه

انتشار گازهای گلخانه‌یی، که در اثر مصرف سوخت‌های فسیلی صورت می‌گیرد، باعث گرمایش روزافزون زمین شده و در نتیجه خطرهای زیست‌محیطی بسیاری را به وجود آورده است. تغییرات اقلیمی علاوه بر ضررهای اقتصادی، که بر دوش دولت‌ها و به تبع آن بر روی مردم می‌گذارد، باعث تلفات جانی نیز می‌شود. لذا در چهار دهه‌ی اخیر، به استفاده از انرژی‌های پاک، تجدیدپذیر و پایدار به عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی به صورت جدی ملاحظه و توجه شده است.[۱] انرژی زمین‌گرمایی سطحی، به عنوان یکی از جایگزین‌های مناسب علاوه بر پایداری و تجدیدپذیربودن، قابلیت استفاده در تمام محل‌ها، مستقل از موقعیت جغرافیایی و یا درجه‌ی حرارت محیط را دارد. می‌توان از شمع‌ها، پوشش تونل‌ها، دیوار پارکینگ‌ها، دیوارهای دیافراگمی و دال‌ها به عنوان سازه‌های مبادله‌گر انرژی زمین‌گرمایی استفاده کرد. دمای خاک از عمق ۵ تا حدود ۵۰ متر زیر زمین مستقل از شرایط جوی است و در طی سال با دمای ثابت باقی می‌ماند. لذا این مزیتی است که از آن برای گرم و سرد کردن ساختمان‌ها استفاده می‌شود.[۲و۳] شمع انرژی، یکی از مرسوم‌ترین سازه‌های زمین‌گرمایی است که در قالب گروه شمع علاوه بر نقشی که به عنوان المان سازه‌یی دارد، به عنوان المان مبدل حرارتی نیز استفاده می‌شود. شمع‌های انرژی، مبدل‌های حرارتی غیرمستقیمی هستند که در آن محیط، حامل گرما تماس مستقیم با خاک ندارد و از لوله‌های پلی‌اتیلن که داخل شمع‌های بتنی کارگذاری می‌شوند، برای برداشت و یا ذخیره‌ی انرژی حرارتی در زمین استفاده می‌شود و در نتیجه نیاز به تغییر در ساختار شمع‌ها نیست.[۲] گرم و سرد کردن ساختمان‌ها نیاز به یک مدار اولیه در داخل شمع حرارتی و یک مدار ثانویه در داخل سازه‌ی ساختمان دارد. مدار اولیه کاملاً در زیر زمین است، که شامل: لوله‌های حاوی سیال، سیال داخل لوله‌ها (آب)، شمع بتنی و خاک اطراف شمع‌ها می‌شوند. مدار ثانویه، که داخل ساختمان است، شامل لوله‌های حلقه‌ی بسته‌یی است که در کف اتاق‌ها، دیوارها و یا سقف جایگذاری شده است.[۱و۴] هر دو مدار توسط یک پمپ حرارتی زمین منبع (GSHP) [۱] به هم متصل و با مصرف انرژی کمی باعث می‌شوند تا درجه‌ی حرارت ساختمان با کم کردن و یا بالا بردن دمای سیال برای ساکنان مطبوع و مطلوب

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۲۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۱۷، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۱.

استناد به این مقاله:
دانش، محمدابراهیم، کیانی فردوئی، محمدامیر، و علیایی، محمد، ۱۴۰۲. مطالعه‌ی عددی عوامل مؤثر در اندرکنش حرارتی شمع‌های انرژی در گروه شمع انرژی. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۳)، صص. ۱۳-۲۴. DOI:10.24200/J30.2023.61069.3145

باشد.[۱و۴] در زمستان، پمپ حرارتی زمین منبع، گرما را از زمین جذب و به داخل ساختمان هدایت می‌کند و در تابستان با سیکل معکوس، گرمای داخل ساختمان را جذب و به داخل زمین هدایت می‌کند تا در زمستان بعدی استفاده‌ی مجدد شود. گروه شمع انرژی به دو دسته‌ی شمع‌ها با فاصله‌ی زیاد از هم و دیگری با فاصله‌ی نزدیک به هم تقسیم می‌شوند. درگروه‌های شمع با فاصله‌ی زیاد، شمع‌ها به اندازه‌یی دور از یکدیگر قرار دارند که آثار آنها را می‌توان مستقل و قابل مقایسه با تک‌شمع در نظر گرفت. درگروه‌های شمع با فاصله‌ی نزدیک، شمع‌ها به قدری به یکدیگر نزدیک هستند که تحت تأثیر حضور شمع‌های مجاور از نظر حرارتی قرار می‌گیرند و نسبت به تک‌شمع، رفتار متفاوتی را نشان می‌دهند. در این نوع از گروه شمع‌ها، اندرکنش شمع‌های مجاور بر یکدیگر نیاز به مطالعه دارد.[۵] مطالعات پیشین نشان داده است که اندرکنش شمع‌های موجود در یک گروه شمع انرژی، در عملکرد پمپ حرارتی تأثیر می‌گذارند.[۶و۷] مدنظر قرار دادن این نوع اندرکنش به خصوص در پروژه‌های با فاصله‌ی نزدیک شمع‌ها، شار حرارتی زیاد و مصرف نامتوازن فصلی از پمپ حرارتی حائز اهمیت شمرده می‌شود.[۸-۱۰] پارامترهای متفاوت، از جمله: پارامترهای خاک، مثل تخلخل و خواص حرارتی خاک؛ پارامترهای هندسی، مثل: قطر، طول و فاصله‌ی شمع‌ها و همچنین قطر و طول لوله‌های مبدل حرارتی درکنار پارامترهای عملیاتی، مثل: میزان شارحرارتی، سرعت سیال داخل لوله‌ها و زمان عملیات پمپ باید مطالعه شوند، تا از نظر کمّی و کیفی اندرکنش حرارتی بین شمع‌ها تعیین شود. علاوه بر این، باید میزان آثار اندرکنش حرارتی در عملکرد هر شمع نیز بررسی شود. برای کاهش آثار اندرکنش حرارتی در شمع‌های مبادله‌گر حرارتی (BHE)[۲]، می‌توان با تعیین یک فاصله‌ی بهینه این موضوع را حل کرد.[۱۱و۱۲] اما در مورد شمع‌های انرژی، که فاصله‌ی آنها براساس نیازهای رفتارهای مکانیکی مشخص می‌شود، تغییر در آن نمی‌تواند به عنوان یک گزینه‌ی منطقی مطرح شود. در نتیجه نمی‌توان با استفاده از یک سری محاسبات ساده این موضوع را حل کرد؛ لذا نیاز است تا در این زمینه بررسی بیشتری صورت گیرد. در نوشتار حاضر کوشش شده است تا با یک مطالعه‌ی پارامتریک از هر دو منظر کمّی و کیفی به این موضوع پرداخته شود و راه را برای مطالعه‌ی بیشتر هموار ساخت. تاکنون چندین حل تحلیلی و عددی در ادبیات فنی گزارش شده است، که در مورد طراحی حرارتی تک‌شمع انرژی است.[۱۳-۱۶] با وجود این، مطالعات در زمینه‌ی اندرکنش حرارتی بین شمع‌ها و تأثیرهایی که این پدیده در بازده و عملکرد مؤثرگروه شمع انرژی می‌گذارد، بسیار محدود است. چالش‌های مدل‌سازی و هزینه‌های محاسباتی مرتبط با مدل‌سازی عددی و تجزیه و تحلیل گروهی از شمع‌های انرژی، از دلایل اصلی اتخاذ محاسبات ساده و تخمینی درکمّی‌سازی اندرکنش حرارتی شمع و تأثیر آن در عملکرد سیستم‌های برداشت انرژی زمین‌گرمایی کم‌عمق هستند.[۱۷-۱۹] مطالعات ارائه شده در نوشتار حاضر دقیقاً پدیده‌ی تبادل حرارت شمع ـ خاک را از طریق مدل‌سازی اجزاء محدود و تجزیه و تحلیل رفتارگروه شمع انرژی به تصویر می‌کشد. مدل عددی که در پژوهش حاضر استفاده شده است، به صورت سه‌بُعدی، اندرکنش حرارتی بین شمع‌های انرژی متعدد را با رویکرد پارامتریک، که به عنوان بخشی از یک گروه شمع عمل می‌کنند، مطالعه کرده است.

۲. ادبیات فنی

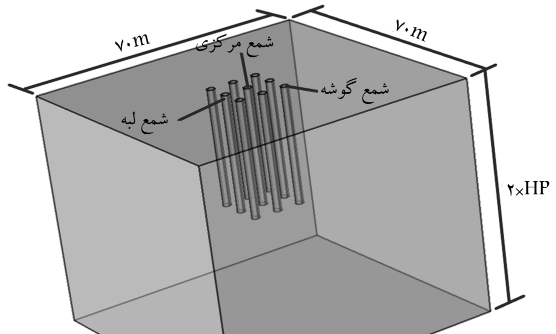
بسیاری از استانداردها از روش‌های تجربی برای محاسبه‌ی اندرکنش حرارتی بین شمع‌های مبادله‌گر حرارتی استفاده می‌کنند. استاندارد انجمن مهندسان آلمان[۳] در زمینه‌ی استفاده‌ی حرارتی از شمع برای استفاده از انرژی زمین‌گرمایی کم، پیشنهادهایی از قبیل تعیین کمترین فاصله بین دو شمع مبادله‌گر حرارتی به میزان ۱۰ متر ارائه کرده است.[۲۰] در ادامه، استاندارد اخیر، سیستم پمپ‌های حرارتی زمین منبع را به دوگروه مجزا برای ظرفیت حرارتی مختلف تقسیم می‌کند. گروه اول، شامل پمپ‌هایی با ظرفیت کمتر از ۳۰ کیلووات و گروه دوم، با ظرفیت بزرگ‌تر از ۳۰ کیلووات هستند.[۲۱] برای ظرفیت کمتر از ۳۰ کیلووات، کمترین فاصله برای شمع‌های مبادله‌گر حرارتی با طول ۴۰ تا ۵۰ متر، ۵ متر پیشنهاد شده است. اما در صورتی که طول شمع‌ها بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر باشد، فاصله‌ی مذکور ۶ متر پیشنهاد شده است. اما برای سیستم‌های با ظرفیت گرمایی بیش از ۳۰ کیلووات، استاندارد آلمان طراحی سیستم را با استفاده از روش‌های تحلیلی یا عددی پیشنهاد کرده است. علاوه بر پیشنهادهای برخی از استانداردهای بین‌المللی، روش‌های دیگری نیز برای بررسی اندرکنش حرارتی شامل روش‌های بهینه‌سازی[۲۲و۲۳] و تحلیل‌های عددی،[۱۱، ۱۲و۲۴] وجود دارد. براساس پاسخ حرارتی زمین، که از رفتار یک شمع فعال حرارتی به دست آمده است، لاوریج و پاوری (۲۰۱۳ و۲۰۱۴)[۴]،[۲۵ و ۲۶] عملکرد حرارتی یک شمع انرژی منفرد را از طریق تحلیل اجزاء محدود با استفاده از یک مدل منبع حرارتی استوانه‌یی با شار حرارتی ثابت در طول شمع، ارزیابی کرده‌اند. آنها از روش برهم نهی برای بررسی آثار نسبت ابعاد و فاصله در اندرکنش حرارتی بین چندین شمع مبادله‌گر حرارتی و همچنین استخراج توابع g[۵] (نمایش بی‌بُعد پاسخ دما در نزدیکی شمع مبادله‌گر حرارتی تحت اعمال نرخ ثابت توان)، استفاده کرده‌اند. آلبردی پاگولا[۶] و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۶] مطالعات لاوریج و پاوری،[۲۵و۲۷] را گسترش دادند و توابع g نیمه‌تجربی را برای شمع‌های متعدد با لوله‌های حاوی سیال W شکل ارائه دادند. توابع g پیشنهادی برای شمع‌های فعال حرارتی متعدد، تخمین‌های مناسبی از پاسخ حرارتی زمین ارائه می‌دهند. با وجود این، چنین توابعی نمی‌توانند مستقیماً اثر اندرکنش حرارتی را در راندمان برداشت انرژی شمع‌های انرژی که به طور هم‌زمان عمل می‌کنند، به صورت کمّی بیان کنند. مدل‌های تحلیلی و عددی که شار حرارتی ثابتی را در طول شمع فرض می‌کنند، برای ارزیابی عملکرد حرارتی گروهی از شمع‌های انرژی با لوله‌های مبدل حرارتی مارپیچی استفاده شدند.[۱۹و۲۸] خو[۷] و همکاران (۲۰۲۰)[۲۹] و سایلر[۸] و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۸] عوامل اصلاحی را برای استفاده در محاسبه‌ی شار حرارتی ثابت اعمال شده بر روی یک منبع حرارتی مسطح دوبُعدی پیوسته، که جایگزین خطی از مبدل‌های حرارتی زمین‌گرمایی عمودی می‌شود، را پیشنهاد کرده‌اند. چندین پژوهش نیز بر روی بررسی پارامتری پاسخ حرارتی گروهی از شمع‌های زمین‌گرمایی متمرکز شده و پارامتر وابستگی عملکرد حرارتی گروه را به پارامترهای مختلف نشان داده‌اند. بریتمن و آمیس[۹] (۲۰۱۱)، نتایج حاصل از آزمایش هدایت حرارتی را بر روی یک تک‌شمع انرژی و گروه شمع انرژی مقایسه کرده‌اند؛ با این حال، مطالعه‌ی ایشان به طور خاص در مورد اندرکنش حرارتی بین شمع‌های انرژی بحث نکرده است.[۳۰] کالک[۱۰] و همکاران (۲۰۱۶)، خواص حرارتی و تخلخل چندین لایه‌ی خاک (مانند شن، ماسه‌ی متراکم، ماسه‌سنگ و ماسه‌سنگ متراکم) را از طریق مقایسه داده‌های آزمایش میدانی با نتایج اجزاء محدود گروه شمع انرژی کالیبره کرده‌اند.[۳۱] این کالیبراسیون خواص حرارتی خاک در محل، مطالعه‌ی پارامتری را برای شناسایی آثار فاصله‌ی شمع‌ها و چینش المان‌های مبادله‌گر حرارتی در عملکرد حرارتی شمع تسهیل می‌کند. با استفاده از روش حجم محدود، کویی و ژو[۱۱] (۲۰۱۷ و ۲۰۱۸)،[۳۲و۳۳] یک مدل انتقال حرارت گذرای سه‌بُعدی را برای یک گروه شمع انرژی توسعه داده و آثار سرعت جریان سیال حامل گرما با فاصله بین محل ورود و خروج لوله‌ی مبادله‌گر حرارتی را در میزان دمای خروجی و نرخ انتقال حرارت بررسی کرده‌اند. شبیه‌سازی‌های عددی عملکرد حرارتی گروه‌های شمع

انرژی تحت بارهای گرمایشی و سرمایشی متعادل و نامتعادل نشان داد که یک بار حرارتی متعادل برای یک سیستم پمپ حرارتی زمین منبع مفید است.[۹ و ۱۰] با وجود این، چنین مطالعاتی تغییر بالقوه در اندرکنش حرارتی شمع به شمع را تحت شرایط بارگذاری حرارتی مختلف شناسایی و تشخیص نمی‌دهند. تعداد محدودی پژوهش به بررسی رفتار گروه شمع انرژی از نظر انواع و کاربردهای آن پرداخته‌اند.[۳۶-۳۹]

کُنگ[۱۲] و همکاران (۲۰۱۹)، به این نتیجه رسیدند که از دست دادن نرخ تبادل حرارتی، در مقایسه با شمع انرژی تکی، به موقعیت یک شمع در یک گروه بستگی دارد. ایشان با استفاده از گرافیت در طرح اختلاط بتن استفاده شده در شمع انرژی، میزان هدایت حرارتی بتن را افزایش داده و در نتیجه مشاهده کرده‌اند که افزایش هدایت حرارتی مواد شمع، باعث افزایش ضریب انتشار حرارتی و در نتیجه افزایش نرخ تبادل حرارتی می‌شود.[۳۴] لیو[۱۳] و همکاران (۲۰۲۰)، از طریق تجزیه و تحلیل گروهی از شمع‌های انرژی با لوله‌های حاوی سیال U شکلی، که تا عمق بیشتر از طول شمع گسترش می‌یابند، فاصله‌ی کمینه را در حدود ۷ برابر قطر شمع انرژی توصیه کرده‌اند، تا از تداخل حرارتی بین شمع‌ها جلوگیری شود.[۳۵] جدا از مطالعات بر روی اندرکنش حرارتی و کارایی، چندین پژوهش،[۳۶-۳۸] نیز رفتار مکانیکی گروه‌های شمع انرژی و روش‌های پیشنهادی (مانند روش ضریب اندرکنش و غیره) را برای محاسبه‌ی جابه‌جایی عمودی شمع انرژی، که به عنوان بخشی از یک گروه شمع عمل می‌کنند، تجزیه و تحلیل کرده‌اند. ادبیات موجود در این زمینه شواهد کافی از وجود اندرکنش حرارتی بین شمع‌های انرژی مختلف در یک گروه را نشان می‌دهد. با وجود این، در مطالعات اخیر اثر پارامترهای متفاوت مؤثر در رفتار گروه شمع و تحلیل سه‌بُعدی با رویکرد پارامتریک انجام نشده است. از این رو پژوهش حاضر قصد دارد اندرکنش حرارتی را با در نظرگرفتن پارامترهای مؤثر، مانند: تخلخل خاک، سرعت سیال، طول شمع، قطر شمع، موقعیت شمع و نسبت فاصله به قطر شمع، رفتار مذکور بررسی کند و نتایجی را به صورت کمّی و کیفی ارائه دهد تا بهینه‌ترین حالت ممکن مشخص شود.

۳. مدل‌سازی عددی

استفاده از روش‌های عددی، یک روش متداول برای یافتن راه‌حل‌هایی با شرایط انتقال حرارت پیچیده است. بنابراین، یک مدل عددی سه‌بُعدی برای مطالعه‌ی اندرکنش حرارتی گروه شمع انرژی ایجاد شده است. هندسه‌ی مدل عددی گروه شمع انرژی از اجزاء متعددی شامل لوله‌های مبدل حرارتی U شکل، شمع بتنی و خاک اطراف گروه شمع تشکیل شده است. مدل عددی ارائه شده، ۷۰ متر طول، ۷۰ متر عرض و عمق آن دو برابر طول شمع انرژی انتخاب شده است، به نحوی که بهینه‌ترین ابعاد برای جلوگیری از اثر شرایط مرزی در پاسخ به دست آید. در نوشتار حاضر، قطرهای شمع انرژی از ۰/۵ تا ۲ متر و طول‌های ۱۰ تا ۳۰ متر بررسی شده است. قطر داخلی لوله‌های حاوی سیال، ۳۲ میلی‌متر و ضخامت دیواره‌ی لوله، ۲/۵ میلی‌متر بوده است. جزئیات بیشتر در مورد هندسه‌ی مدل در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در اطراف شمع، یک لایه خاک ماسه‌یی همگن در نظرگرفته شده است. خواص حرارتی خاک در امتداد عمق، که شامل میزان آب موجود در واحد حجم خاک، هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه است، ثابت فرض شده است. مشخصات خاک، بتن، سیال در گردش و لوله‌ی حاوی سیال در جدول ۱ ارائه شده است. در پژوهش حاضر، رفتار گروه شمع برای یک دوره‌ی عملیات پمپ حرارتی در طی ۹۰ روز بررسی شده است. بعد از انجام آنالیز مش در اندازه‌های متفاوت و مقایسه‌ی نتایج آن مشخص شد که مش‌بندی بهینه‌ی کمینه شامل ۱۲۹۰۰۰ المان ۴ وجهی



شکل ۱. هندسه‌ی مدل سه‌بُعدی.

جدول ۱. مشخصات خاک، بتن، آب و لوله‌ها.

ماده	چگالی $(\mathbf{kg/m^3})$	هدایت حرارتی $(\mathbf{W/(m.^\circ C)})$	ظرفیت گرمایی ویژه $(\mathbf{J/kg.^\circ C})$
خاک	۱۹۲۲	۱/۸	۱۵۰۹
بتن	۲۴۰۰	۱/۷	۹۵۰
آب	۱۰۰۰	۰/۶	۴۱۸۴
لوله	---	۰/۴۸	---

تراهدرال[۱۴] است. لوله‌های حاوی سیال با اندازه‌ی مش خیلی ریز، شمع‌های انرژی با اندازه‌ی مش ریز و خاک اطراف شمع با اندازه‌ی مش متوسط مش‌گذاری و در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده است.

۱.۳. شرایط مرزی و اولیه

با توجه به مطالعه‌یی که در سال ۱۳۹۵ انجام شده است، دمای زمین در عمق ۱۰ متری در شهر تهران به طور متوسط حدود ۱۷ درجه‌ی سانتی‌گراد تعیین شده است.[۳۹] لذا، دمای اولیه‌ی کل مدل برابر با $17^\circ C$ در نظرگرفته شده است. دمای ورودی سیال، $32^\circ C$ فرض شده است. در مدل‌سازی انتقال حرارت، شرایط مرزی شار حرارتی ثابت[۱۵] بر روی مرزهای خاک اطراف در همه‌ی جهت‌ها اعمال شده‌اند.

۲.۳. فرضیات و روابط حاکم

فرضیات حاکم بر مسئله از این قرار است:

۱. خاک اطراف یک محیط متخلخل، اشباع است.
۲. تأثیر دمای سطح زمین بر دمای خاک، نادیده گرفته شده است.[۴۰]
۳. دمای اولیه‌ی خاک، گروه شمع انرژی، سیال و لوله‌ها یکسان است.
۴. تمام خواص ترموفیزیکی مواد در مدل در همه جهت ثابت خواهد بود.

برای انتقال حرارت رسانشی در شمع‌ها، معادله‌ی انتقال حرارت براساس قانون فوریه مطابق رابطه‌ی ۱ اتخاذ می‌شود:

$$\rho_s C_{p,s}\frac{\partial T_s}{\partial t} - k_s \nabla^2 T_s = Q \qquad (۱)$$

که درآن، ρ_s چگالی (kg/m^3)، $C_{p,s}$ ظرفیت‌گرمایی ویژه‌ی خاک $(J/(kg.^\circ C))$، T_s دمای خاک $(^\circ C)$، t زمان (روز)، k_s هدایت حرارتی خاک $(W/(m.^\circ C))$ و Q منبع انرژی در واحد حجم (W/m^3) هستند.

برای انتقال حرارت بین سیال و لوله‌ها، لوله‌ها و جریان داخل آن با یک المان خطی (به جای المان سه‌بُعدی) ساده‌سازی می‌شود، که مزیت زیادی از نظر راندمان محاسباتی و مش‌بندی دارد.[۱۹] معادله‌ی تعادل حرارتی سیال در لوله‌ها به صورت رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\rho_f A_{pipe} C_{p,f}\left(\frac{\partial T_p}{\partial t}+u\nabla T_p\right)-A_{pipe}k_f\nabla^{۲}T_p = \frac{۱}{۲}f_D\frac{\rho_f A_p}{d_h}\left|u\right|u^{۲}+Q_{wall} \qquad (۲)$$

که در آن، ρ_f چگالی سیال ($kg/m^{۳}$)، A_{pipe} سطح مقطع لوله ($m^{۲}$)، $C_{p,f}$ ظرفیت حرارتی ویژه‌ی سیال ($J/(kg/.^\circ C)$) و T_p دمای سیال در لوله‌ها ($^\circ C$) هستند. همچنین، u سرعت سیال در لوله‌ها (m/s)، k_f هدایت حرارتی سیال ($W/(m.^\circ C)$)، f_D ضریب اصطکاک دارسی و d_h قطر هیدرولیکی لوله هستند. Q_{wall} عبارت از منبع گرمایی از لوله‌های مبدل حرارتی است، که می‌توان آن را به صورت رابطه‌ی ۳ توصیف کرد:

$$Q_{wall}=(hZ)_{eff}\left(T_{ext}-T_p\right) \qquad (۳)$$

که در آن، $(hZ)_{eff}$ مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$(hZ)_{eff}=\frac{۲\pi}{\frac{۱}{r_{ip}h_{\mathrm{int}}}+\frac{\ln\left(r_{op}/r_{ip}\right)}{k_p}} \qquad (۴)$$

که در آن، $(hZ)_{eff}$ حاصل‌ضرب h ضریب انتقال حرارت همرفتی مؤثر ($W/(m.^\circ C)$) و $Z(m)$ محیط دیواره‌ی لوله و همچنین T_{ext} دمای خارجی لوله ($^\circ C$) هستند. h_{int} ضریب انتقال حرارت همرفت رابطه‌ی ۵، r_{op} و r_{ip} به ترتیب شعاع‌های خارجی و داخلی لوله‌ی حاوی سیال و k_p ($W/(m.^\circ C)$) هدایت حرارتی لوله هستند:

$$h_{\mathrm{int}}=N_u\frac{k_f}{d_h} \qquad (۵)$$

که در آن، Nu حاصل‌ضرب h عدد نوزلت[۱۶] است، که برای جریان آرام مساوی به ۳/۶۶ و برای جریان آشفته مطابق معادله‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$N_{u,turb}=\frac{\left(\frac{f_D}{۸}\right)\left(R_e-۱۰۰۰\right)P_r}{۱+۱۲/۷\left(\frac{f_D}{۸}\right)^{\frac{۱}{۲}}\left(P_r^{\frac{۲}{۳}}-۱\right)} \qquad (۶)$$

که در آن، P_r عدد پراندل[۱۷] و R_e عدد رینولدز[۱۸] هستند.

برای انتقال حرارت در خاک اطراف (محیط متخلخل)، معادله‌ی انتقال حرارت محیط متخلخل می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۷ بیان شود:

$$(\rho \mathrm{C_p})_{\mathrm{eff}}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}}-\mathrm{k_{eff}}\nabla^{۲}\mathrm{T}_s=Q \qquad (۷)$$

که در آن، T_s دمای خاک ($^\circ C$)، Q منبع انرژی در واحد حجم ($W/m^{۳}$)، (ρC_p) و k_{eff} به ترتیب ظرفیت گرمایی حجمی مؤثر ($W/(m^{۳}.^\circ C)$) و رسانایی گرمایی مؤثر ($W/(m.^\circ C)$) هستند، که می‌توان با استفاده از روابط ۸ و ۹ برای یک خاک متخلخل اشباع محاسبه کرد:

$$(\rho \mathrm{C_p})_{\mathrm{eff}}=\theta_{\mathrm{s}}\rho_{\mathrm{s}}\mathrm{C_{p,s}}+\left(۱-\theta_{\mathrm{s}}\right)\rho_{\mathrm{f}}\mathrm{C_{p,f}} \qquad (۸)$$

$$\mathrm{k_{eff}}=\theta_{\mathrm{s}}\mathrm{k_s}+\left(۱-\theta_{\mathrm{s}}\right)\mathrm{k_f} \qquad (۹)$$

که در آنها، θ_s درصد حجمی جامد و $(۱-\theta_s)$ درصد حجمی سیال در واحد حجم خاک هستند. برای لایه‌های خاک اشباع، $(۱-\theta_s)$ برابر تخلخل خاک است. با تقسیم دو طرف رابطه‌ی ۷ به $(\rho C_p)_{eff}$ با بازنویسی آن، رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t}-(\alpha)_{eff}\nabla^{۲}T_s = Q\big/(\rho \mathrm{C_p})_{\mathrm{eff}} \qquad (۱۰)$$

که در آن،$(\alpha)_{eff}$ ضریب انتشار حرارتی مؤثر، مطابق رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$(\alpha)_{eff}=\frac{k_{eff}}{(\rho C_p)_{eff}} \qquad (۱۱)$$

برای تعیین میزان کاهش انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی، ضریب اندرکنش حرارتی[۱۹] به صورت رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:

$$\Omega_{th}=P_i\big/P_S \qquad (۱۲)$$

که در آن، Ω_{th} ضریب اندرکنش حرارتی، P_i انرژی استحصالی از شمع مورد نظر درگروه شمع انرژی و P_S انرژی استحصالی از تک‌شمع انرژی هستند.

برای محاسبه‌ی میزان انژری استحصالی از شمع انرژی، از معادله‌ی ۱۳ استفاده می‌شود:

$$Q=\rho_f C_{p,f}v_{rf}A_p\left(T_{in}-T_{out}\right) \qquad (۱۳)$$

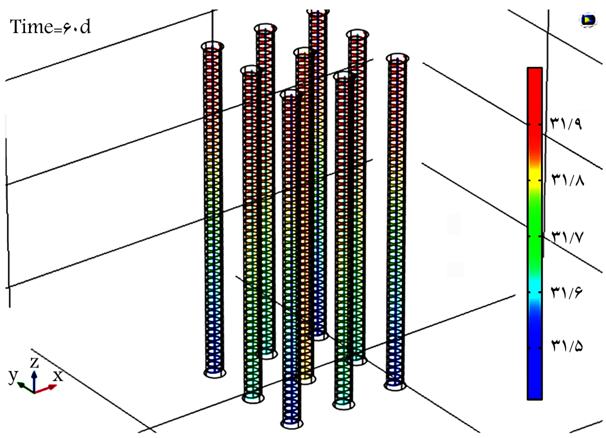
که در آن، Q میزان انرژی استحصالی، $C_{p,f}$ و ρ_f به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی سیال، v_{rf} سرعت سیال، A_p مساحت سطح مقطع لوله و T_{in} و T_{out} به ترتیب دماهای ورودی و خروجی سیال هستند.

۳.۳. راستی‌آزمایی مدل

راستی‌آزمایی مدل براساس نوشتار کونگ[۲۰] و همکاران (۲۰۱۹)،[۳۴] به این شرح انجام شده است:

شبیه‌سازی انتقال حرارت توسط نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک انجام شده است. مدل مذکور از شمع بتنی، خاک اطراف شمع و لوله‌های مبدل حرارتی تشکیل شده است. قطر شمع‌ها ۰/۸ متر و ارتفاع آنها ۱۵ متر بوده است. فاصله‌ی بین شمع‌ها سه برابر قطر شمع در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل سه‌بُعدی ۳۶ متر طول، ۳۶ متر عرض و ۲۱ متر عمق بوده است. لوله‌های مبدل حرارتی شکل مارپیچ با شعاع ۳۰ سانتی‌متر با گام بین حلقه‌ها برابر با ۳۰ سانتی‌متر دارند که از لوله‌یی با قطر داخلی لوله ۲ سانتی‌متر و ضخامت دیواره‌ی ۰/۲۵ سانتی‌متر ساخته شده‌اند. ورود آب از بالای شمع صورت گرفته و پس از ورود، آب ابتدا در امتداد لوله‌ی مارپیچ به پایین رسیده و سپس در انتهای شمع به وسیله‌ی یک لوله‌ی خطی به بالای شمع بالا رفته است (شکل ۲).

در پژوهش حاضر، اثر استفاده‌ی طولانی‌مدت از شمع انرژی در تابستان تجزیه و تحلیل شده است؛ به نحوی که زمان شبیه‌سازی ۶۰ روز و سرعت گردش آب به عنوان سیال مبادله‌گر حرارتی داخل لوله‌ها ۰/۸ متر بر ثانیه بوده است. دمای ورودی آب برابر ۳۲ درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای اولیه‌ی خاک، ۱۷ درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. به دلیل آن‌که ابعاد مدل به میزان کافی بزرگ فرض شده است، در اثر عملکرد پمپ حرارتی دمای خاک در مرزهای مدل تغییری نیافته و برابر ۱۷ درجه‌ی سانتی‌گراد باقی مانده است.



شکل ۲. نحوه‌ی چینش لوله‌ها و شمع انرژی در مدل راستی‌آزمایی.

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر با راستی‌آزمایی ـ شمع انرژی مرکزی.

زمان (روز)	شمع انرژی مرکزی — انرژی استحصالی: کونگ و همکاران (W/m)	راستی‌آزمایی (W/m)	خطا (٪)
۴	۱۱۱	۱۱۶	۴/۱
۱۰	۷۵	۷۸/۵۷	۴/۸
۲۰	۴۶/۵	۴۷/۷۶	۲/۹
۳۰	۳۰	۳۱/۰۶	۳/۵
۴۰	۲۰/۸	۲۱/۳۶	۲/۷
۵۰	۱۵	۱۵/۳۹	۲/۶
۶۰	۱۲	۱۲۰/۹	۰/۷
متوسط خطا			۳/۱

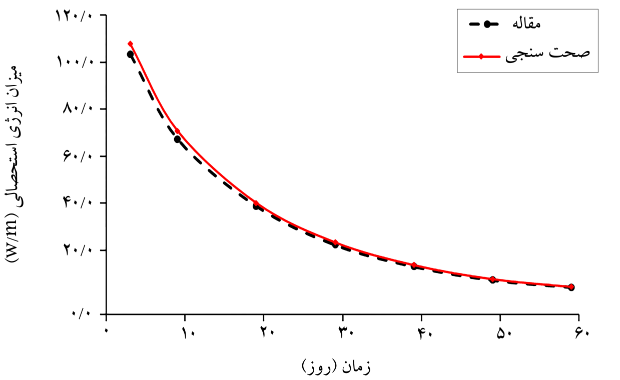
جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر با راستی‌آزمایی ـ شمع انرژی لبه.

زمان (روز)	شمع انرژی لبه — انرژی استحصالی: کونگ و همکاران (W/m)	راستی‌آزمایی (W/m)	خطا (٪)
۴	۱۱۱	۱۱۲/۴۵	۱/۳
۱۰	۷۹	۸۰/۲۳	۱/۶
۲۰	۵۵	۵۶/۲۲	۲/۲
۳۰	۴۲	۴۲/۹۹	۲/۱
۴۰	۳۳/۵	۳۴/۱۵	۱/۹
۵۰	۲۷	۲۸/۱۱	۴/۱
۶۰	۲۴/۵	۲۵/۲۳	۳/۰
متوسط خطا			۲/۳

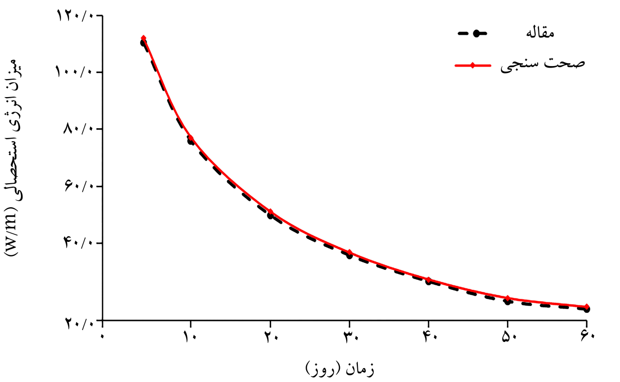
مقایسه‌ی نتایج مطالعه‌ی کونگ و همکاران (۲۰۱۹) و مدل راستی‌آزمایی ارائه شده در پژوهش حاضر در جدول‌های ۲ الی ۴ ارائه شده است. براساس نتایج اخیر، متوسط خطا برای شمع انرژی مرکزی، شمع انرژی لبه و شمع انرژی گوشه به ترتیب برابر ۳/۱، ۲/۳ و ۱/۶ درصد بوده است. همچنین در شکل‌های ۳ الی ۵، مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر و راستی‌آزمایی به ترتیب برای شمع انرژی مرکزی، لب و گوشه در طول ۶۰ روز مشاهده می‌شود.

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر با راستی‌آزمایی ـ شمع انرژی گوشه.

زمان (روز)	شمع انرژی گوشه — انرژی استحصالی: کونگ و همکاران (W/m)	راستی‌آزمایی (W/m)	خطا (٪)
۴	۱۱۱	۱۱۳	۱/۸
۱۰	۸۱	۸۱/۳	۰/۴
۲۰	۶۲	۶۳/۲۵	۲/۰
۳۰	۵۱	۵۲	۲/۰
۴۰	۴۴	۴۵	۲/۳
۵۰	۳۹/۵	۴۰	۱/۳
۶۰	۳۶	۳۶/۵	۱/۴
متوسط خطا			۱/۶



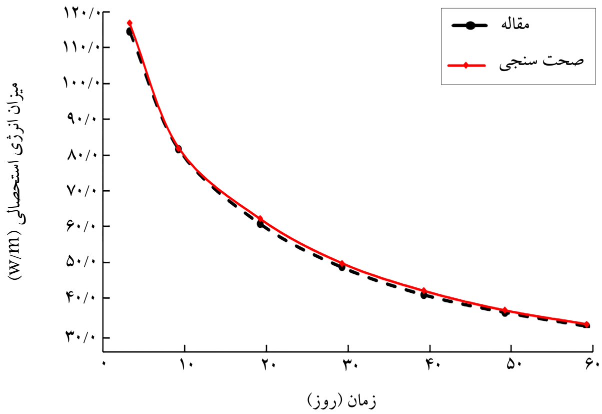
شکل ۳. نمودار مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر با راستی‌آزمایی ـ شمع انرژی مرکزی.



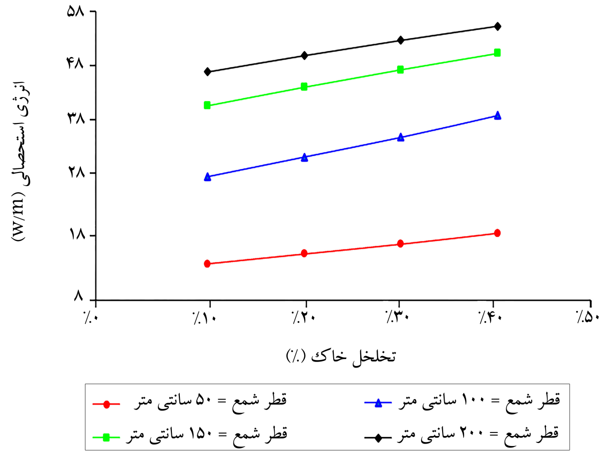
شکل ۴. نمودار مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر با راستی‌آزمایی ـ شمع انرژی لبه.

۴. مطالعه‌ی پارامتریک

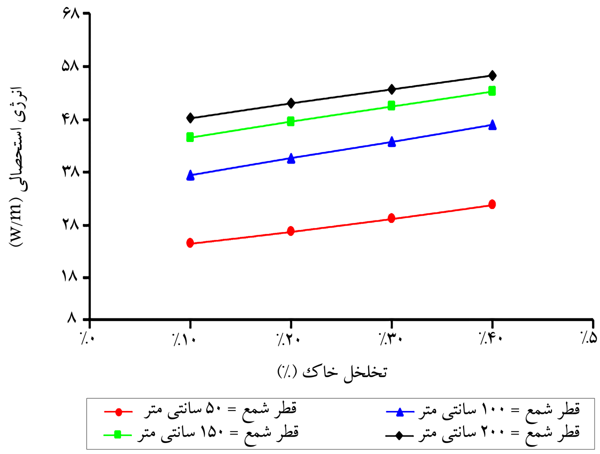
برای بررسی پارامترهای مؤثر در میزان اندرکنش حرارتی و اثر آن در تغییر انرژی استحصالی ازگروه شمع، پارامترهایی همچون تخلخل خاک اطراف گروه شمع انرژی، سرعت سیال داخل لوله‌ها، قطر شمع انرژی، طول شمع انرژی، فاصله‌ی شمع‌ها از هم و موقعیت شمع انرژی مطالعه شده است.



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ی نتایج نوشتار حاضر با راستی‌آزمایی ـ شمع انرژی گوشه.



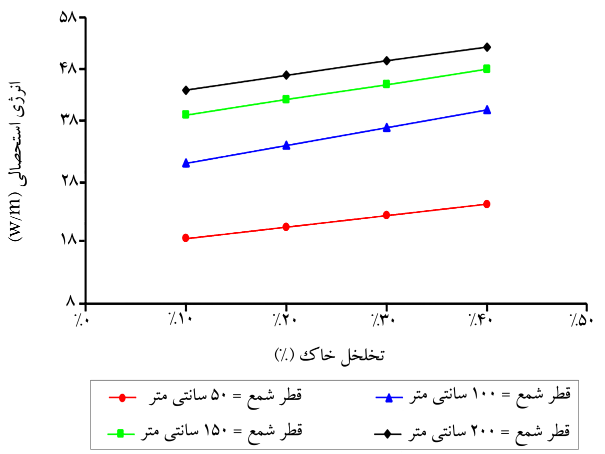
شکل ۶. انرژی استحصالی بر حسب تخلخل خاک، شمع مرکزی، طول شمع ۱۰ متر، سرعت سیال: ۰/۶ متر بر ثانیه.



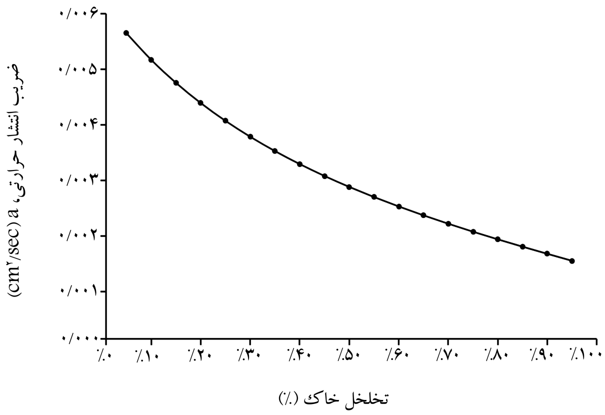
شکل ۷. انرژی استحصالی بر حسب تخلخل خاک، شمع گوشه، طول شمع ۱۰ متر، سرعت سیال: ۰/۶ متر بر ثانیه.

۱.۴. اثر تخلخل خاک در اندرکنش شمع‌ها

برای بررسی تأثیر تخلخل خاک، مقادیر تخلخل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد برای خاک اطراف گروه شمع در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۶ الی ۸، محور عمودی مقدار انرژی نرمالایز شده (یعنی میزان انرژی دریافتی تقسیم بر طول شمع در

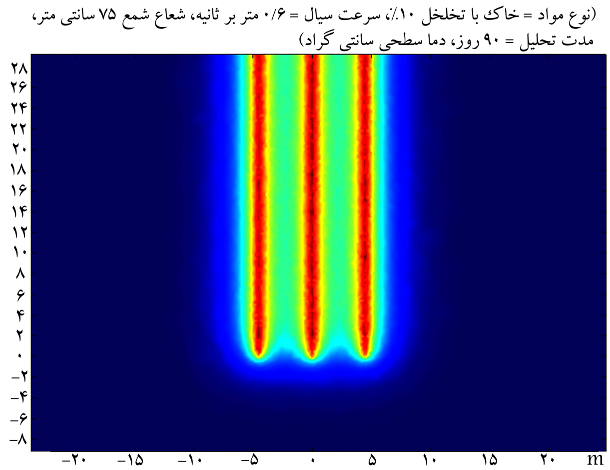


شکل ۸. انرژی استحصالی بر حسب تخلخل خاک، شمع لبه، طول شمع ۱۰ متر، سرعت سیال: ۰/۶ متر بر ثانیه.

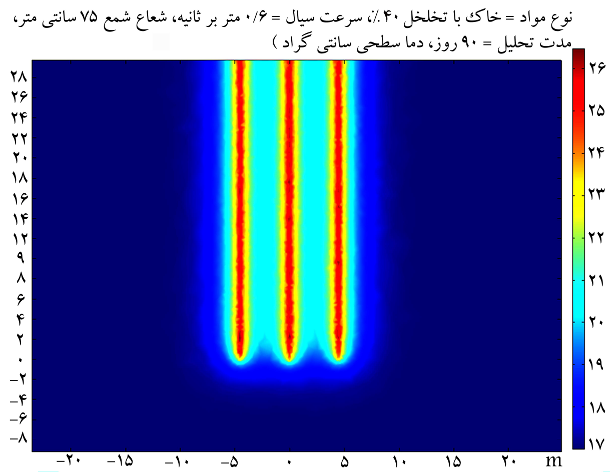


شکل ۹. ضریب انتشار حرارتی بر حسب تخلخل خاک.

واحد زمان) مشاهده می‌شود. رفتار حرارتی شمع انرژی در خاک‌هایی با تخلخل‌های متفاوت نشان می‌دهند که با افزایش تخلخل خاک، میزان انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی نیز افزایش پیدا کرده است. پدیده‌ی مذکور در هندسه‌های مختلف یک روند را نشان می‌دهد و با تغییر هندسه، روند و رفتار آن تغییر نمی‌یابد، اگر چه از نظر کمیت مقدار آن تغییر می‌یابد. تغییر در تخلخل خاک موجب تغییر سه پارامتر مؤثر در انتقال حرارت خاک، که عبارت‌اند از: رسانایی حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی خاک می‌شود. طبق تئوری مخلوط‌ها[۲۱] و روابط ۸ و ۹ (روابط محاسبه‌ی خصوصیات خاک متخلخل براساس میانگین‌گیری حجمی) با افزایش تخلخل و افزایش سهم آب در حجم واحد مخلوط خاک، رسانایی حرارتی کاهش و ظرفیت گرمایی حجمی افزایش می‌یابد. با بازنویسی رابطه‌ی انتقال حرارت در خاک رابطه‌ی ۷، رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید، که خواص خاک اشباع در آن لحاظ شده است؛ که در آن، $(\alpha)_{eff}$ پارامتر ضریب انتشار حرارتی مؤثر[۲۲] است. مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که برای خاک در نظرگرفته شده با افزایش تخلخل، مقدار ضریب انتشار حرارتی کاهش و در نتیجه، تداخل حرارتی کاهش و میزان انرژی استحصالی افزایش یافته است. همچنین مقایسه‌ی توسعه‌ی حرارت در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند که هر چه میزان تخلخل کمتر باشد، ضریب انتشار حرارتی بیشتر شده و در بلندمدت به علت تداخل حرارتی، ظرفیت استحصال انرژی از گروه شمع کاهش یافته است.



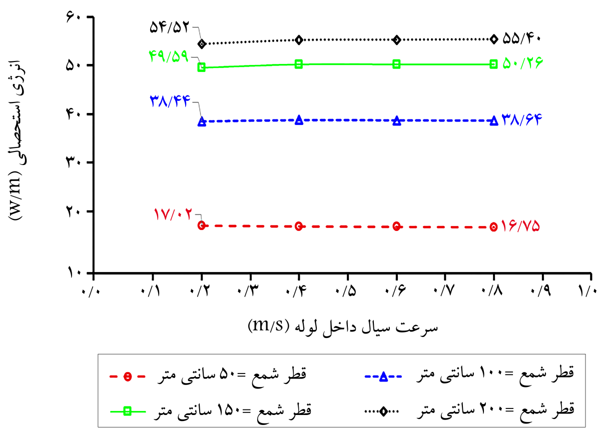
شکل ۱۰. تجمع حرارتی، تخلخل خاک ۱۰٪، قطرشمع ۱/۵ متر، طول شمع ۳۰ متر، سرعت سیال: ۰/۶ متر بر ثانیه.



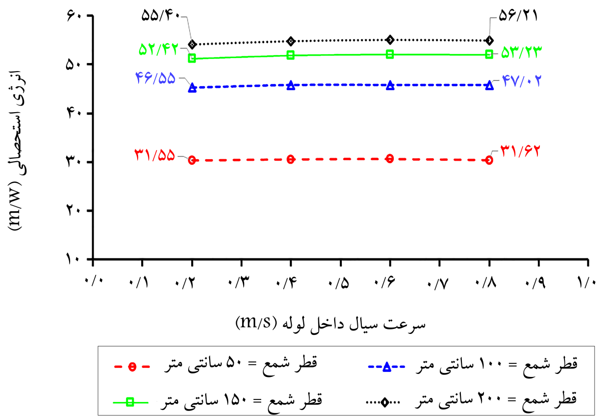
شکل ۱۱. تجمع حرارتی، تخلخل خاک ۴۰٪، قطر شمع ۱/۵ متر، طول شمع ۳۰ متر، سرعت سیال: ۰/۶ متر بر ثانیه.

۲.۴. اثر سرعت سیال در لوله‌ها در اندرکنش شمع‌ها

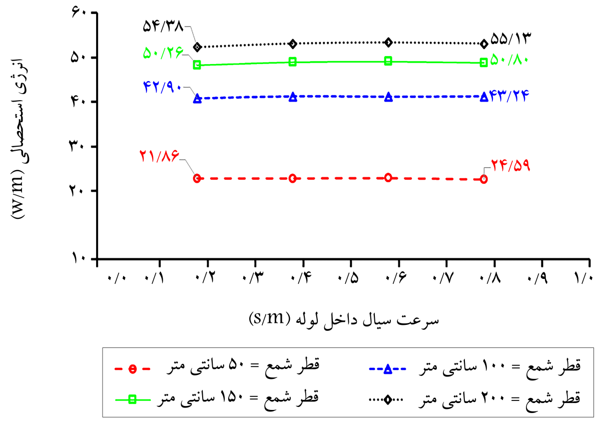
برای بررسی اثر سرعت سیال درگردش داخل لوله‌های مبدل حرارتی سرعت‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ متر بر ثانیه در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ مطالعه شده‌اند. با تحلیل نتایج بر مبنای نمودارهای شکل‌های ۱۲ و ۱۴، برای یک شمع با قطر ۵۰ سانتی‌متر در صورت افزایش سرعت سیال میزان انرژی استحصالی کاهش پیدا کرده و این به دلیل نزدیکی شمع‌ها به هم و اندرکنش حرارتی زیاد بین شمع‌ها بوده است. اما در صورتی که قطر شمع افزایش پیدا کند و از آن‌جایی که نسبت s/D ثابت است، فاصله‌ی بین شمع‌ها بیشتر شده و از میزان اندرکنش حرارتی کاسته و باعث شده است تا روند نمودارها حالت افزایشی داشته باشند. به استثناء زمانی که تخلخل خاک ۱۰٪ شکل ۱۵ است، که روند تقریباً ثابت را نشان می‌دهد. علت این مسئله را می‌توان مطابق شکل ۹ مرتبط با ضریب انتشار حرارتی در تخلخل ۱۰٪ دانست. مقدار زیاد ضریب انتشار حرارتی در این تخلخل باعث می‌شود تا خاک اطراف شمع در زمان کمتری به حالت اشباع حرارتی برسد. حالت اشباع حرارتی حالتی است که خاک به علت هم‌دمایی با دمای سیال داخل لوله‌ی دیگر، توان تبادل حرارتی ندارد و با آن نمی‌توان انرژی تبادل کرد. لذا اثر سرعت سیال به صفر میل می‌کند. مطابق



شکل ۱۲. نمودارهای انرژی استحصالی بر حسب سرعت سیال ـ شمع مرکزی، طول شمع ۱۰ متر، تخلخل ۴۰٪.



شکل ۱۳. نمودار های انرژی استحصالی بر حسب سرعت سیال ـ شمع گوشه، طول شمع ۱۰ متر، تخلخل ۴۰٪.

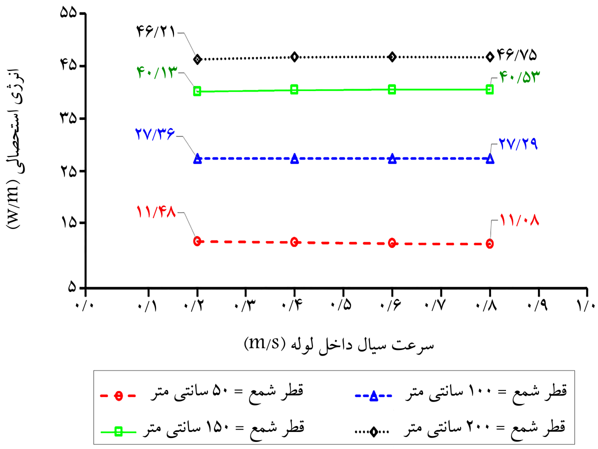


شکل ۱۴. نمودارهای انرژی استحصالی بر حسب سرعت سیال ـ شمع لبه، طول شمع ۱۰ متر، تخلخل ۴۰٪.

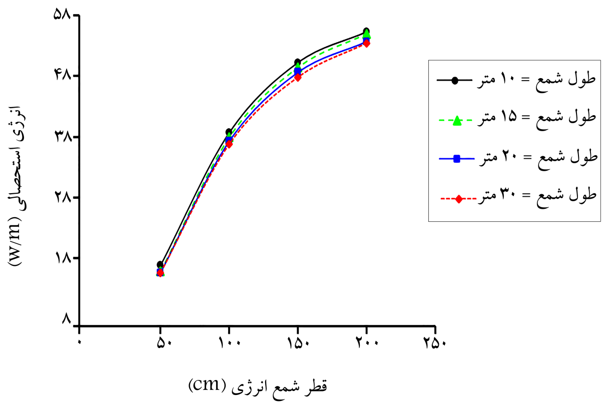
شکل ۱۳، که مربوط شمع گوشه است، مشاهده می‌شود که در همه‌ی قطرهای شمع، میزان انرژی استحصالی در تخلخل ۴۰٪ حالت افزایشی را نشان می‌دهد.

۳.۴. اثر قطر شمع انرژی در اندرکنش شمع‌ها

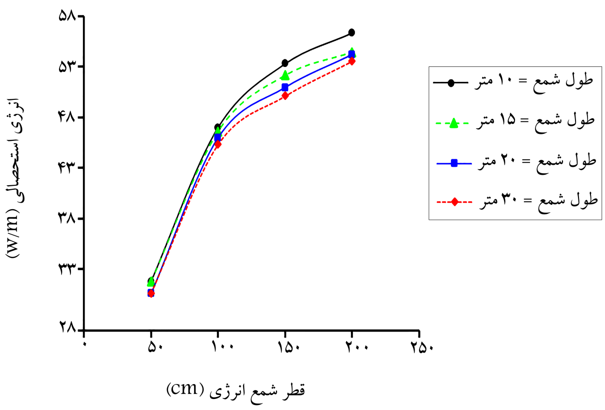
برای بررسی اثر قطر شمع انرژی، قطرهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر مطالعه



شکل ۱۵. نمودارهای انرژی استحصالی بر حسب سرعت ـ سیال شمع مرکزی، طول شمع ۱۰ متر، تخلخل ۱۰٪.

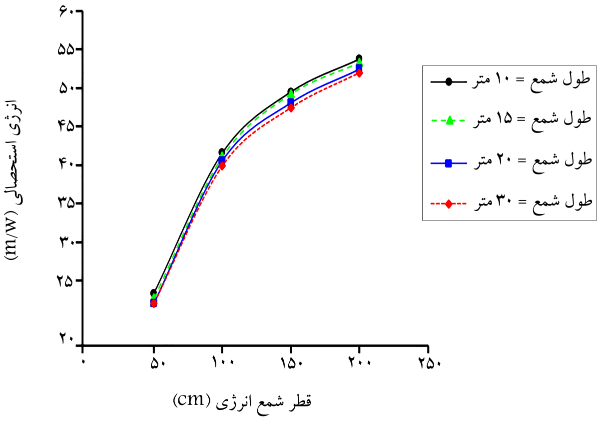


شکل ۱۶. نمودارهای انرژی استحصالی بر حسب قطر شمع ـ شمع مرکزی، سرعت سیال ۰/۶ متر بر ثانیه، تخلخل ۴۰٪.

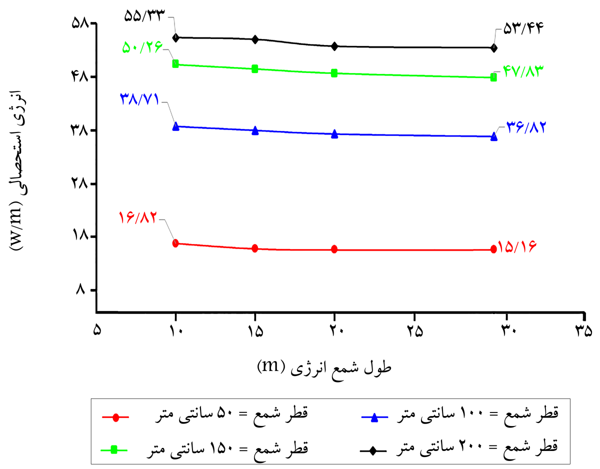


شکل ۱۷. نمودارهای انرژی استحصالی بر حسب قطر شمع ـ شمع گوشه، سرعت سیال ۰/۶ متر برثانیه، تخلخل ۴۰٪.

شده‌اند، که نتایج آن در شکل‌های ۱۶ الی ۱۸ ارائه شده است. براساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود در صورتی که نسبت s/D ثابت باشد، با افزایش قطر شمع، میزان انرژی استحصالی از شمع افزایش یافته و این پدیده مستقل از موقعیت شمع درگروه شمع بوده است. دلیل اصلی مشاهده‌های اخیر آن است که با افزایش قطر شمع، فاصله‌ی شمع‌ها افزایش پیدا کرده و در نتیجه دمای خاک دیرتر افزایش



شکل ۱۸. نمودار های انرژی استحصالی بر حسب قطر شمع ـ شمع لبه، سرعت سیال ۰/۶ متر برثانیه، تخلخل ۴۰٪.

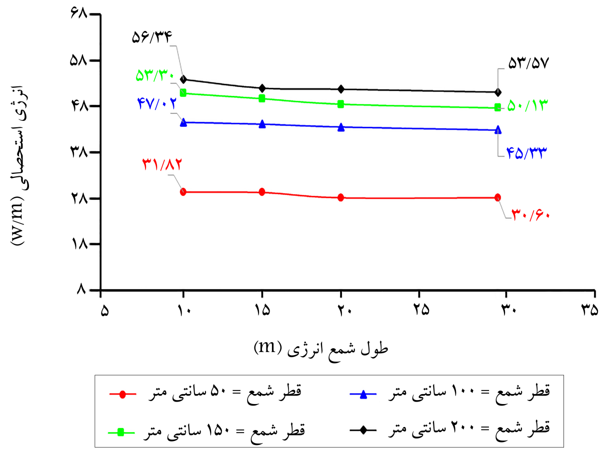


شکل ۱۹. نمودار های انرژی استحصالی بر حسب طول شمع ـ شمع مرکزی، سرعت سیال ۰/۶ متر بر ثانیه، تخلخل ۴۰٪.

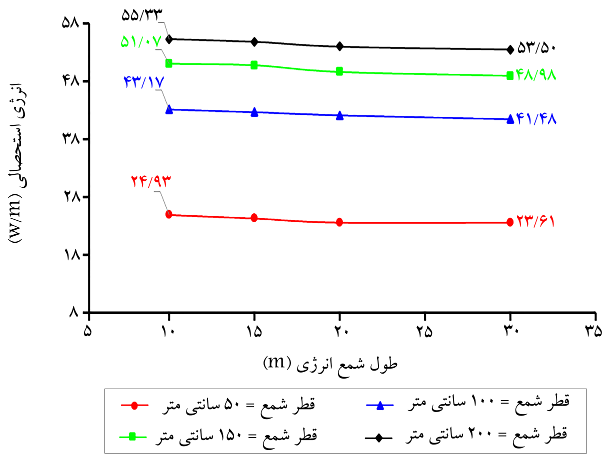
یافته است و سیال داخل لوله به ازاء اختلاف دما با خاک می‌تواند تبادل حرارتی بیشتری داشته باشد. این پدیده تا زمانی که اندرکنش حرارتی رخ دهد، در رفتار گروه شمع‌ها حاکم است. بنابراین، با افزایش قطر شمع و فاصله گرفتن شمع‌ها از هم، اندرکنش حرارتی میان شمع ها کاهش پیدا می‌کند و میزان انرژی استحصالی بیشتری از گروه شمع انرژی به دست خواهد آمد.

۴.۴. اثر طول شمع انرژی در اندرکنش شمع‌ها

از آن‌جا که طول شمع‌ها یکی از پارامترهای هندسی گروه شمع‌های حرارتی است، گروه شمع‌هایی به طول‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ متر مطالعه و نتایج آنها در شکل‌های ۱۹ الی ۲۱ مشاهده می‌شود. با افزایش طول شمع انرژی، طول لوله‌ی حاوی سیال افزایش پیدا کرده و در نتیجه، زمان تبادل حرارت سیال با محیط اطراف بیشتر شده است. در صورتی که میزان انرژی استحصالی نسبت به طول شمع محاسبه شود، با افزایش طول شمع میانگین انرژی استحصالی به ازاء هر متر شمع کاهش می‌یابد و به یک مقدار ثابت میل می‌کند. اگرچه در صورتی که مجموع انرژی استحصالی از گروه شمع نسبت به طول نرمالایز نشود، با افزایش طول شمع افزایش قابل ملاحظه‌یی در انرژی استحصالی مشاهده خواهد شد.



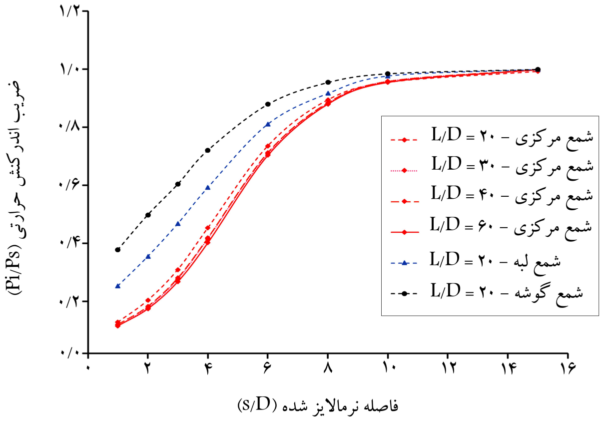
شکل ۲۰. نمودارهای انرژی استحصالی بر حسب طول شمع ـ شمع گوشه، سرعت سیال ۰/۶ متر بر ثانیه، تخلخل ۴۰٪.



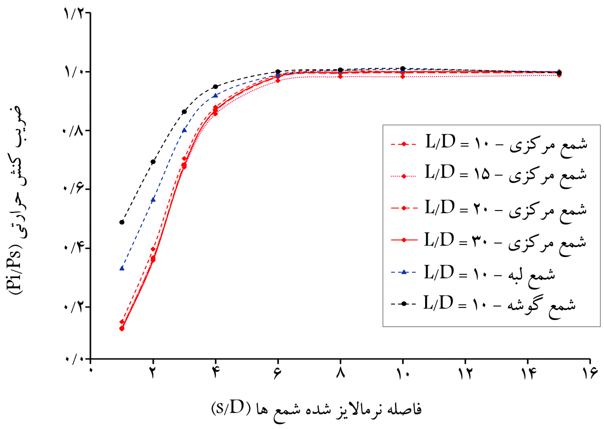
شکل ۲۱. نمودارهای انرژی استحصالی بر حسب طول شمع ـ شمع لبه، سرعت سیال ۰/۶ متر بر ثانیه، تخلخل ۴۰٪.

۵.۴. اثر فاصله و موقعیت شمع‌ها در اندرکنش حرارتی شمع‌ها

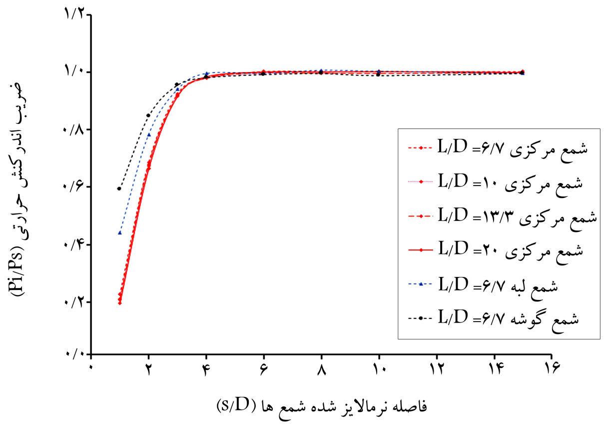
برای بررسی اثر فاصله‌ی شمع‌ها، نسبت‌های متفاوت فاصله‌ی شمع به قطر شمع (۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۵) مطالعه شده‌اند. ضریب اندرکنش حرارتی برابر نسبت انرژی استحصالی از شمع مورد نظر در گروه شمع انرژی (P_i) به انرژی استحصالی از تک‌شمع انرژی (P_s) با مشخصات مدل مشابه است. نتایج مذکور در شکل‌های ۲۲ الی ۲۵، که به ترتیب مربوط به قطرهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر هستند، مشاهده می‌شود. براساس نمودارهای ارائه شده، میزان کاهش انرژی استحصالی در گروه شمع انرژی با قطر یکسان مستقل از طول شمع بوده و در تمام طول‌های شمع‌ها وابسته به موقعیت مکانی در گروه شمع، رفتار یکسانی داشته‌اند. لذا، چون تغییرات نمودارهای مربوط به شمع‌های لبه و گوشه در نسبت‌های طول به قطر متفاوت همانند شمع مرکزی یکسان بوده است، از نمایش نمودارهای مربوط صرف‌نظر شده است. از آن‌جایی که فاصله‌ی شمع، تابعی از قطر شمع در نظر گرفته شده است، لذا با افزایش قطر شمع، فاصله‌ی شمع‌ها نیز افزایش پیدا کرده و در نتیجه خاک اطراف شمع فرصت زمانی بیشتری برای اشباع حرارتی داشته است. بنابراین، آثار اندرکنش حرارتی میان شمع‌ها کاهش و میزان انرژی استحصالی افزایش یافته است. همچنین طبق



شکل ۲۲. تأثیر فاصله‌ی شمع‌ها در کاهش میزان انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی ـ قطر ۵۰ سانتی‌متر.

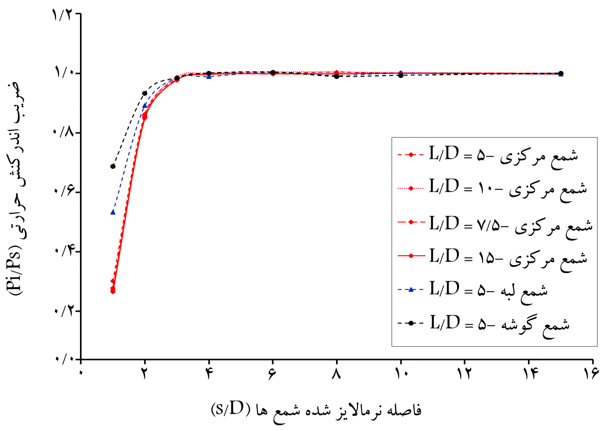


شکل ۲۳. تأثیر فاصله‌ی شمع‌ها در کاهش میزان انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی ـ قطر ۱۰۰ سانتی‌متر.



شکل ۲۴. تأثیر فاصله‌ی شمع‌ها در کاهش میزان انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی ـ قطر ۱۵۰ سانتی‌متر.

نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۲۲ الی ۲۵ می‌توان نتیجه گرفت که شمع انرژی مرکزی به علت تأثیرپذیری بیشتر از شمع‌های اطراف کمترین میزان بازدهی انرژی و شمع انرژی گوشه به علت تأثیرپذیری کمتر، بیشترین بازدهی انرژی را داشته است.



شکل ۲۵. تأثیر فاصله‌ی شمع‌ها در کاهش میزان انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی ـ قطر ۲۰۰ سانتی‌متر.

۵. نتیجه گیری

در نوشتار حاضر، آثار پارامترهای مختلف در اندرکنش حرارتی در گروه شمع انرژی به روش عددی و با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود کامسول مولتی‌فیزیک، راستی‌آزمایی، مطالعه و تحلیل شده است. پارامترهای مرتبط را می‌توان به سه دسته، اعم از: پارامترهای خاک اطراف شمع، همچون: تخلخل، پارامترهای مربوط به عملیات پمپ همانند سرعت سیال داخل لوله‌ها و مدت زمان عملیات و پارامترهای هندسی، همانند: قطر، طول و فاصله‌ی شمع‌ها و موقعیت شمع‌ها طبقه‌بندی کرد. بررسی عوامل مؤثر در اندرکنش حرارتی و در نتیجه علل کاهش و یا افزایش میزان انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی در اثر پارامترهای ذکر شده، هدف پژوهش حاضر بوده و این نتایج به دست آمده است:

۱. افزایش تخلخل خاک موجب کاهش اندرکنش حرارتی بین شمع‌های انرژی و نیز باعث افزایش میزان انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی شده است.

۲. با افزایش سرعت سیال در شمع‌های با قطرهای کم، اندرکنش حرارتی موجب کاهش انرژی استحصالی ازگروه شمع شده است. اما در قطرهای بزرگ‌تر، افزایش انرژی استحصالی به ازاء افزایش سرعت مشاهده می‌شود؛

۳. با افزایش قطر شمع، در صورتی که فاصله‌ی شمع تابعی از قطر شمع باشد، میزان انرژی استحصالی از شمع افزایش خواهد داشت و این پدیده مستقل از موقعیت شمع در گروه شمع است؛

۴. مقدار انرژی استحصالی میانگین با افزایش طول شمع انرژی کاهش اندکی داشته است، اگرچه با افزایش طول شمع، مقدار انرژی استحصالی کل از گروه شمع انرژی افزایش قابل ملاحظه‌یی داشته است؛

۵. میزان اندرکنش حرارتی شمع‌ها، رابطه‌ی معکوس با فاصله‌ی شمع‌ها داشته است، به این معنا که با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها، اندرکنش حرارتی کاهش قابل ملاحظه‌یی یافته و موجب افزایش انرژی استحصالی شده است؛

۶. در پژوهش حاضر مشخص شد که مستقل از پارامترهای مختلف خاک، زمان عملیات پمپ، سرعت سیال و هندسه‌ی مدل، شمع مرکزی کمترین و شمع گوشه، بیشترین بازدهی انرژی را داشته است؛

۷. اندرکنش حرارتی با کاهش میزان انرژی قابل مبادله میان شمع و خاک، موجب کاهش میزان انرژی استحصالی از شمع شده است. میزان اندرکنش حرارتی در بین گروه شمع انرژی وابسته به مدت زمانی است که پمپ کار می‌کند و شمع با خاک اطراف خود تبادل حرارتی دارد. این پدیده در صورتی که خاک با تخلخل کمتری اطراف گروه شمع انرژی را احاطه کرده باشد، سرعت سیال افزایش پیدا کند، قطر شمع کاهش پیدا کند و یا فاصله شمع‌ها به هم نزدیک باشد، در مدت زمان کمتری اتفاق خواهد افتاد. در نتیجه باعث می‌شود تا میزان انرژی استحصالی از گروه شمع انرژی کاهش پیدا کند؛

۸. از آن‌جا که میزان انرژی استحصالی از شمع‌ها تابع پارامترهای متفاوت است، کمترین میزان انرژی استحصالی در تخلخل خاک ۱۰٪ و قطر شمع ۵۰ سانتی‌متر و شمع مرکزی اتفاق افتاده است، که برابر با ۱۱ وات بر متر بوده و بیشترین میزان انرژی استحصالی در تخلخل خاک ۴۰٪ و قطر شمع ۲۰۰ سانتی‌متر و شمع گوشه اتفاق افتاده است، که برابر با ۵۶ وات بر متر بوده است.

پانوشت‌ها

1. Ground Source Heat Pump (GSHP)
2. Borehole Heat Exchanger (BHE)
3. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI 4640)
4. Loveridge & Powrie
5. g-functions
6. Alberdi-Pagola
7. Xu
8. Sailer
9. Brettmann & Amis
10. Caulk
11. Cui & Zhu
12. Kong
13. Lyu
14. Tetrahedral
15. Neumann Boundary Condition
16. Nusselt Number
17. Prantel Number
18. Reynolds Number
19. Heat Interaction Factor
20. Kong
21. Mixture Theory
22. Effective Thermal Diffusivity

منابع (References)

1. Li, Q., Yin, Y., Kong, L. and et al., 2021. Enhancing heat transfer in the heat exchange medium of energy piles. *J. Build. Engineering*, *40*, p.102375.

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102375.

2. Brandl, H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, *56*(2), pp.81-122. https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81.

3. Yasukawa, K., Uchida, Y., Tenma, N. and et al., 2009. Groundwater temperature survey for geothermal heat pump application in tropical Asia. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, *60*(9.10), pp.459-467. https://doi.org/10.9795/BULLGSJ.60.459.

4. Brandl, H., 2006. Ground source energy wells for heating and cooling of buildings. *ACTA Geotech Slov*, *1*, pp.5-27.

5. Rotta Loria, A.F. and Laloui, L., 2017. Thermally induced group effects among energy piles. *Géotechnique*, *67*(5), pp.374-393. https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.039.

6. Koohi-Fayegh, S. and Rosen, M.A., 2014. An analytical approach to evaluating the effect of thermal interaction of geothermal heat exchangers on ground heat pump efficiency. *Energy Convers. Manage*, *78*, pp.184-192. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.064.

7. Tiwari, A.K., Kumar, A. and Basu, P., 2021. The influence of thermal interaction on energy harvesting efficiency of geothermal piles in a group. *Applied Thermal Engineering*, *200*, p.117673. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117673.

8. You, S., Cheng, X., Guo, H. and et al., 2014. In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers. *Energy Build*, *79*, pp.23-31. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.021.

9. Abdelaziz, S.L., 2016. A sustainable perspective for the long-term behavior of energy pile groups. *In Geo-Chicago*, *2016*, pp.104-113. https://doi.org/10.1061/9780784480137.011.

10. Xu, B.o., Zhang, H. and Chen, Z., 2020. Study on heat transfer performance of geothermal pile foundation heat exchanger with 3-U pipe configuration. *Int. J. Heat Mass Transf*, *147*, p.119020. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119020.

11. Gultekin, A., Aydin, M. and Sisman, A., 2016. Thermal performance analysis of multiple borehole heat exchangers. *Energy Convers. Manage*, *122*, pp.544-551. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.086.

12. Koohi-Fayegh, S. and Rosen, M.A., 2012. Examination of thermal interaction of multiple vertical ground heat exchangers. *Appl. Energy*, *97*, pp.962-969. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.018.

13. Man, Y., Yang, H., Diao, N. and et al., 2010. A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers. *Int. J. Heat Mass Transf*, *53*(13.14), pp.2593-2601. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.001.

14. Zhang, W., Yang, H., Lu, L. and et al., 2013. The analysis on solid cylindrical heat source model of foundation pile ground heat exchangers with groundwater flow. *Energy*, **55**, pp.417-425. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.092.

15. Cecinato, F. and Loveridge, F.A., 2015. Influences on the thermal efficiency of energy piles. *Energy*, *82*, pp.1021-1033. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.001.

16. Ghasemi-Fare, O. and Basu, P., 2016. Predictive assessment of heat exchange performance of geothermal piles. *Renew. Energy*, *86*, pp.1178-1196. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.078.

17. Xu, B.O., Zhang, H. and Chen, Z., 2020. Study on heat transfer performance of geothermal pile foundation heat exchanger with 3-U pipe configuration. *Int. J. Heat Mass Transf*, *147*, p. 119020. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119020.

18. Sailer, E., Taborda, D.M.G. and Zdravkovi'c, L., 2018. A new approach to estimating temperature fields around a group of vertical ground heat exchangers in two dimensional analyses. *Renew. Energy*, *118*, pp.579-590. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.035.

19. You, T., Li, X., Cao, S. and et al., 2018. Soil thermal imbalance of ground source heat pump systems with spiral-coil energy pile groups under seepage conditions and various influential factors. *Energy Convers. Manage*, *178*, pp.123-136. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.027.

20. VDI 4640-Blatt 1., 2010. Thermal use of the underground, fundamentals, approvals, environmental aspects. https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/vdi-4640-blatt-1-thermal-use-of -the-underground-fundamentals-approvals-environmental-aspects.

21. VDI 4640-Blatt 2., 2001. Thermal use of the underground, ground source heat pump systems. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-2-thermal-use-of-the-under ground-ground-source-heat-pump-systems.

22. Bayer, P., de Paly, M. and Beck, M., 2014. Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal geothermal heating and cooling. *Appl. Energy*, *136*, pp.445-453. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.029.

23. Retkowski, W., Ziefle, G. and Thöming, J., 2015. Evaluation of different heat extraction strategies for shallow vertical ground-source heat pump systems. *Appl. Energy*, *149*, pp.259-271. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.004.

24. Dehghan, B., Sisman, A. and Aydin, M. 2016. Parametric investigation of helical ground heat exchangers for heat pump applications. *Energy Build*, *127*, pp.999-1007. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.064.

25. Loveridge, F. and Powrie, W., 2014. G-Functions for multiple interacting pile heat exchangers. *Energy*, *64*, pp.747-757. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.014.

26. Alberdi-Pagola, M., Poulsen, S.E., Jensen, R.L. and et al., 2019. Thermal design method for multiple precast energy piles. *Geothermics*, *78*, pp.201-210. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.007.

27. Loveridge, F. and Powrie, W., 2013. Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. *Energy*, *57*, pp.554-564. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.060.

28. You, T. and Yang, H., 2020. Influences of different factors on the three-dimensional heat trans-

fer of spiral-coil energy pile group with seepage. *Int. J. Low-Carbon Technol*, *15*(3), pp.458-470. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa006.

29. Xu, B.O., Zhang, H. and Chen, Z., 2020. Study on heat transfer performance of geothermal pile foundation heat exchanger with 3-U pipe configuration. *Int. J. Heat Mass Transf*, *147*, p.119020. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119020.

30. Brettmann, T. and Amis, T., 2011. Thermal conductivity evaluation of a pile group using geothermal energy piles. *In Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, pp.499-508.

31. Caulk, R., Ghazanfari, E. and McCartney, J.S., 2016. Parameterization of a calibrated geothermal energy pile model. *Geomech. Energy Environ*, *5*, pp.1-15. http://dx.doi.org/10.1016/j.gete.2015.11.001.

32. Cui, Y. and Zhu, J., 2017. 3D transient heat transfer numerical analysis of multiple energy piles. *Energy Build*, **134**, pp.129-142. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.032.

33. Cui, Y. and Zhu, J., 2018. Year-round performance assessment of a ground source heat pump with multiple energy piles. *Energy Build*, *158*, pp.509-524. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.033.

34. Kong, L.P., Qiao, L., Xiao, Y.Y. and et al., 2019. A study on heat transfer characteristics and pile group influence of enhanced heat transfer energy piles. *J. Build. Eng*, *24*, p.100768. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100768.

35. Lyu, W., Pu, H. and Chen, J., 2020. Thermal performance of an energy pile group with a deeply penetrating u-shaped heat exchanger. *Energies*, *13*(21), 5822. http://dx.doi.org/10.3390/en13215822.

36. Rotta Loria, A.F. and Laloui, L., 2016. The interaction factor method for energy pile groups. *Computers and Geotechnics*, *80*, pp.121-137. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.07.002.

37. Saggu, R. and Chakraborty, T., 2016. Thermomechanical response of geothermal energy pile groups in sand. *Int. J. Geomechanic*, *16*(4), p. 04015100. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000567.

38. Di Donna, A., Rotta Loria, A.F. and Laloui, L., 2016. Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads. *Computers and Geotechnics*, *72*, pp. 126-142. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.010.

39. Imani, F. and Heydari, Sh., 2017. Investigating the amount of energy consumption of an underground building compared to a similar model on the surface of the earth in the climates of Tehran, Yazd and Tarizb. *Two quarterly magazines of Iranian architecture*, *13*, pp.89-105 (spring and summer). [In Persian].

40. Bidarmaghz, A., Narsilio, G.A., Johnston, I.W. and et al., 2016. The importance of surface air temperature fluctuations on long-term performance of vertical ground heat exchangers. *Geomechanic Energy Environments*, *6*, pp.35-44. https://doi.org/10.1016/j.gete.2016.02.003.