

بررسی عددی عوامل مؤثر در میزان توان دریافتی از شمع‌های مبادله‌گر حرارتی

سیدماکان فتاحیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد امیرکیانی فردویی (دانشجوی دکتری)

محمد علیایی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دربی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۳۹-۴۹

امروزه گرمایش کروی زمین به یک معضل جهانی تبدیل شده است، که عامل اصلی آن استفاده از سوخت‌های فسیلی است. از این رو به مسئله‌ی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار توجه شده است. انرژی زمین‌گرمایی، یکی از منابع گسترده و تجدیدپذیر انرژی است که از خاک برداشت می‌شود. انرژی زمین‌گرمایی می‌تواند از طریق شمع‌های حرارتی برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها از زمین استخراج شود. هدف از مطالعه‌ی حاضر، بررسی بازدهی انرژی شمع‌های حرارتی و میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف در انرژی دریافتی از سیستم‌های اشاره شده است. بدین منظور به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود کامسول، اثر پارامترهای: حرارتی خاک، تغییرات طول شمع‌ها، خصوصیات هندسی و نوع اجرای لوله‌ها در شمع در میزان انرژی دریافتی بررسی شده است. از نتایج پژوهش حاضر می‌توان به میزان انرژی دریافتی بر حسب هر متر طول شمع تحت تغییر پارامترهای مختلف اشاره کرد.

واژگان کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، انرژی زمین‌گرمایی، شمع حرارتی، توان خروجی حرارتی، انتقال حرارت در خاک.

۱. مقدمه

یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی زمین‌گرمایی کم عمق است، که با استفاده از پمپ حرارتی همراه با مبادله‌گر حرارتی قرار گرفته در زمین استفاده می‌شود. میزان انرژی تبادل شده با خاک با افزایش عمق قرارگیری مبادله‌گرهای حرارتی افزایش می‌یابد. بنابراین برای دستیابی به تبادل حرارتی بیشتر می‌توان از گمانه‌های مبادله‌گر حرارتی، که در آن لوله‌هایی حاوی سیال در گردش وجود دارد، استفاده کرد. از طرفی دیگر، به منظور تأمین پایداری ساختمان‌ها در شرایط خاص از المان‌هایی همچون شمع استفاده می‌شود. اگر شمع‌ها به لوله‌های مبادله‌گر حرارتی ذکر شده تجهیز شوند، به آن شمع مبادله‌گر حرارتی یا شمع انرژی گفته می‌شود.^[۱-۴] استفاده از انرژی زمین‌گرمایی در سراسر جهان بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ با رشد سالانه‌ی ۱۶٫۶٪ به میزان ۲٫۱۵ برابر افزایش یافته است.^[۵] از آنجایی که استفاده از منبع انرژی زمین‌گرمایی نقش به‌سزایی در پیشرفت برنامه‌های حفاظت از محیط زیست و تأمین انرژی داشته است، مجلس اروپا طی دستورالعملی در سال ۲۰۱۰ بر ترویج استفاده از آن بسیار تأکید کرده است.^[۶] شواهد موجود نشان می‌دهند که دست‌کم ۷۸ کشور در سراسر جهان از انرژی زمین‌گرمایی استفاده می‌کنند.^[۵] حدود ۳۰ سال پیش، اولین شمع‌های انرژی در کشور اتریش استفاده شد^[۷] و اکنون حدود ۱۰۰ هزار مبادله‌گر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۱۰/۱۳۹۸، اصلاحیه ۲۴/۶/۱۳۹۹، پذیرش ۲۵/۷/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55140.2704

f.seyyedmacan@modares.ac.ir
m.kianifordoei@modares.ac.ir
m.olyaei@modares.ac.ir

حرارتی در اتریش برای استفاده از انرژی زمین‌گرمایی نصب شده است.^[۸] یکی از معروف ترین و مهم‌ترین مکان‌هایی که از شمع‌های مبادله‌گر حرارتی برای گرمایش و سرمایش استفاده می‌کند، ترمینال E فرودگاه زوریخ در کشور سوئیس است.^[۹] دمای خاک در تمام فصول سال از عمقی به بعد به مقداری ثابت می‌رسد، که در نتیجه می‌توان از خاک به‌عنوان منبع تبادل حرارتی استفاده کرد. در واقع دمای خاک در زمستان از دمای محیط بیرون گرم‌تر و در تابستان از آن سردتر است. در نتیجه از انرژی حرارتی ذخیره شده در خاک می‌توان برای گرمایش و سرمایش ساختمان استفاده کرد.^[۱۰،۱۱] دستگاهی که وظیفه‌ی انجام و مدیریت تبادل حرارتی ساختمان با زمین را بر عهده دارد، پمپ حرارتی زمین منبع، یا به اختصار پمپ حرارتی نام دارد. پمپ‌های حرارتی ساختمان را به شمع‌های حرارتی اتصال می‌دهند و حرارت لازم جهت گرمایش را از زمین دریافت و یا گرمای اضافی ساختمان را برای سرمایش آن به زمین منتقل می‌کنند.^[۱] با توجه به آن‌که از شمع‌های حرارتی با کاربندی دوگانه برای تأمین پایداری سازه و گرمایش - سرمایش ساختمان استفاده می‌شود و نیاز به حفر گمانه‌های مبادله‌گر حرارتی دیگر نیست، بسیار مقرون به صرفه هستند.^[۱] بررسی علمی شمع‌های حرارتی به دو دسته‌ی کلی تحلیل باربری آن‌ها و مطالعه‌ی کارایی (میزان انرژی استخراجی‌شان) تقسیم‌بندی می‌شود.^[۱] هدف از نوشتار حاضر، بررسی توان خروجی شمع‌های مبادله‌گر حرارتی نسبت به طول شمع و تعیین عوامل مؤثر در میزان انرژی استخراجی آن‌هاست. به طوری که خواننده می‌تواند با مطالعه‌ی

دقیق پژوهش حاضر و بدون نیاز به انجام مدل‌سازی پیچیده متوجه شود که با توجه به امکانات موجود و با تقریب اولیه معقول، چه میزان انرژی به کمک مبادله‌گر حرارتی می‌تواند از زمین استخراج کند.

عواملی که در کارایی شمع‌های حرارتی تأثیر می‌گذارند، را می‌توان به دو دسته عوامل طبیعی و مهندسی تقسیم‌بندی کرد. در عوامل طبیعی، انسان و مهندسان تأثیری به جهت کنترل میزان انرژی استخراجی شمع‌های حرارتی ندارند. به‌عنوان مثال، می‌توان به آب و هوای منطقه، جنس و خصوصیات حرارتی و درجه‌ی اشباع خاک منطقه، حضور و یا عدم حضور جریان آب زیرزمینی و سرعت آن اشاره کرد. برای مثال، در یک مطالعه‌ی موردی خاص در کشور فنلاند تحت اثر جریان آب زیرزمینی، توان خروجی حرارتی شمع حرارتی به میزان ۲۰٪ نسبت به شرایط بدون جریان آب در خاک بهبود یافته است.^[۱۸] همچنین می‌توان گفت که با افزایش سرعت جریان آب زیرزمینی، میزان توان خروجی افزایش پیدا می‌کند.^[۱۹] شایان ذکر است که سیستم‌های پمپ حرارتی در صورت پایین بودن میزان تبادل حرارتی با زمین می‌توانند برای جبران کمبود گرمایش خود با آبگرمکن‌های خورشیدی ترکیب شوند، تا انرژی گرمایشی به دست آمده از آبگرمکن خورشیدی را به زمین منتقل و در زمان نیاز از زمین برداشت کنند.^[۲۰] البته در صورت وجود جریان آب زیرزمینی، استفاده از روش اخیر جهت جبران کمبود انرژی گرمایشی توصیه نمی‌شود.^[۱۸]

نگهداشت یا برداشت گرما از توده‌ی خاک به ترتیب در فصول تابستان یا زمستان، موجب تغییر دمای خاک تا یک دمای تعادل می‌شود، که وجود جریان آب زیرزمینی موجب می‌شود که انرژی ذخیره شده از دست برود و کارایی بلندمدت کاهش یابد.^[۱۳] از آن‌جا که خواص حرارتی واقعی خاک، رسانایی حرارتی و نحوه‌ی انتشار حرارت در خاک بسیار وابسته به نوع خاک و شرایط سایت است، از آزمون پاسخ حرارتی (TRT) ^۱ برای تعیین پارامترهای ذکر شده استفاده می‌شود.^[۲۱] البته در خاک اشباع فقط خواص حرارتی خاک برای انتقال حرارت مؤثر نیستند، بلکه وجود جریان همرفت آب در خاک نیز در انتقال حرارت در خاک نقش به‌سزایی دارد.^[۱۵] همچنین میزان رسانایی حرارتی مؤثر در خاک اشباع و خشک، در زمان فعالیت شمع حرارتی، به ترتیب برابر ۶۳ و ۵۰ درصد رسانایی حرارتی واقعی خاک است، که از آزمون پاسخ خاک به‌دست می‌آید.^[۱۵] در خاک غیرهمگن که خواص حرارتی خاک در هر لایه متفاوت است، با افزایش زمان، اختلاف دما بین لایه‌های مختلف خاک بیشتر می‌شود و دمای توزیع شده در هر لایه از خاک بکنواخت‌تر می‌شود.^[۱۶] شایان ذکر است که اختلاف دمای بین خاک و سیال ورودی به لوله، مهم‌ترین عامل در تعیین توان خروجی از شمع حرارتی است.^[۱۷] برای عوامل انسانی می‌توان به مواردی نظیر شکل اجرای لوله‌ها در شمع، ابعاد هندسی شمع و سرعت آب در لوله‌ها اشاره کرد.^[۱۴] البته عوامل دیگری، مثل جنس بتن شمع و خلوص آب استفاده شده در لوله‌ها نیز مؤثر هستند، که به علت کم بودن تغییرات آن‌ها نسبت به سایر پارامترها، اثر آن‌ها در نوشتار حاضر بررسی نمی‌شود.^[۱۵] باید توجه داشت که انتقال حرارت در شمع‌های حرارتی و در لوله‌ها بیشتر در جهت افقی صورت می‌پذیرد، به‌طوری که از انتقال حرارت در جهت طول شمع انرژی می‌توان صرف‌نظر کرد.^[۱۸] در انواع لوله‌هایی که در شمع‌های حرارتی استفاده می‌شوند، مدل اسپیرال، بیشترین انتقال حرارت را دارد، اما در طولانی مدت ممکن است برای استخراج انرژی، بهینه نباشد. بهینه شدن انرژی دریافتی از اجرای لوله به شکل اسپیرال به عوامل مختلفی، از قبیل دمای اولیه‌ی خاک بستگی دارد.^[۲۲] باید توجه داشت که شمع‌های حرارتی بیشتر در مناطق سردسیر برای استخراج انرژی از زمین استفاده می‌شوند و کاهش دمای خاک اطراف شمع حرارتی می‌تواند باعث یخ‌زدگی سطح تماس بین خاک و شمع شود. پس باید روش‌هایی برای جلوگیری از یخ‌زدن سطح مشترک بین

خاک و شمع اتخاذ شود.^[۱۸] خدایپرست و همکاران (۲۰۱۶)، نشان دادند که اعمال دما از شمع به خاک موجب تغییر میدان تنش در خاک اطراف شمع می‌شود.^[۲۰] البته باید توجه داشت که در سطح تماس بین خاک و شمع، تنش‌های حرارتی ایجاد می‌شود، که میزان آن به مقاومت و میزان گیرداری شمع در خاک، جنس و زبری خاک و بتن بستگی دارد. اثر خاک اطراف شمع را می‌توان به‌صورت فنر و به روش المان مجزا مدل کرد.^[۲۱] روش اخیر توسط علیایی و همکاران (۲۰۱۹)، به جهت در نظر گرفتن اثر بزرگی دمای عملی در ظرفیت باربری خاک اصلاح شد.^[۲۲] مقادیر تنش‌های حرارتی شعاعی در مقایسه با میزان تنش‌های حرارتی محوری که در شمع در همه‌ی اعماق ایجاد شده‌اند، ناچیز هستند که نشان می‌دهد انقباض/انبساط حرارتی شعاعی شمع، تأثیر عمده‌ی در اصطکاک پوستی ندارد.^[۲۳]

در پژوهش حاضر به جهت اهمیت میزان انرژی دریافتی از شمع و خاک، یک مطالعه‌ی عددی به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود کامسول صورت گرفته است، تا عوامل مؤثر در افزایش کارایی مشخص شوند. به‌طورکلی انرژی دریافتی از زمین، به سرعت جریان سیال در لوله و عدد رینولدز متناظر با آن و مدت زمانی که سیال با خاک و شمع تبادل حرارتی انجام می‌دهد، بستگی دارد.

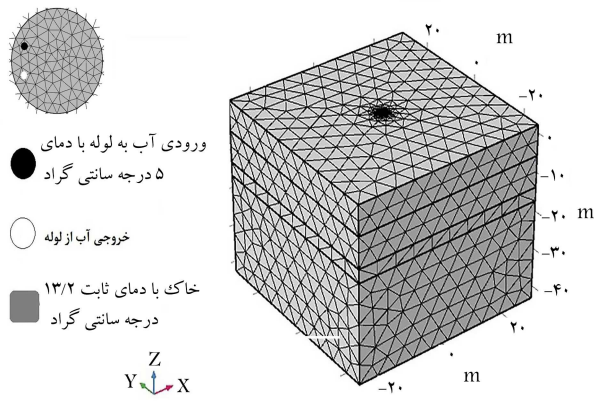
برای بررسی اثر سرعت جریان در لوله، می‌توان پارامترهای دبی جریان ورودی و قطر لوله را بررسی کرد. برای اثر مدت زمانی که سیال فرصت انتقال حرارت با محیط اطراف خود را دارد، سرعت سیال در لوله، شکل لوله و طول شمع بررسی شده است. خصوصیات حرارتی خاک، لوله و قطر شمع نیز حائز اهمیت هستند، به‌طوری که با بهبود خصوصیات حرارتی هر کدام و افزایش قطر شمع مشاهده می‌شود که میزان انرژی دریافتی بهبود پیدا کرده است. در پژوهش حاضر، ابتدا به بررسی مدل‌سازی سه‌بعدی یک شمع حرارتی پرداخته شده است، سپس روابط حاکم بر مسئله و شرایط مرزی بررسی شده‌اند. برای مدل‌سازی انتقال حرارت در خاک و لوله از قانون انتقال حرارت فوریه استفاده شده است. پس از آن صحت‌سنجی مدل‌سازی صورت گرفته بر اساس نوشتار باتینی و همکاران (۲۰۱۵)،^[۱] با نرم‌افزار کامسول صورت گرفته است. در آخرین بخش نیز با انجام مطالعه‌ی پارامتری، میزان و اثر پارامترهای مختلف در میزان انرژی دریافتی مشخص شده و نتایج به دست آمده بحث و بررسی شده‌اند.

۲. مدل‌سازی سه‌بعدی اجزاء محدود یک شمع حرارتی

در نوشتار حاضر، صحت‌سنجی بر اساس نوشتار باتینی^۲ و همکاران (۲۰۱۵) صورت گرفته است.^[۱] مدل‌سازی انجام شده به جهت ارزیابی انرژی دریافتی از شمع حرارتی در ساختمان تکنولوژی لوزان سوئیس صورت گرفته است. همانند نوشتار، مدل‌سازی به‌کمک نرم‌افزار کامسول انجام شده است. از مزایای روش به‌کاررفته در پژوهش حاضر می‌توان به توانایی در نظر گرفتن انتقال حرارت به دلیل جریان سیال در لوله و از آن به محیط متخاض اشاره کرد. همچنین روش مذکور قادر به در نظر گرفتن تغییرات انتقال حرارت در اثر تغییر نوع جریان از حالت آرام به آشفتگی نیز است.

۱.۲. فرضیات و روابط حاکم بر مسئله

خاک به‌صورت کاملاً اشباع، متشکل از دو فاز جامد و سیال، که توزیع خواص آن همسان‌گرد^۳ است، فرض شده است. خاک و سیال در شرایط هم‌دما در نظر گرفته شده‌اند و خاک زهکشی مناسبی دارد. برای انتقال حرارت و انرژی در خاک از



شکل ۱. مش بندی و شرایط مرزی در مدل صحت‌سنجی.

از عمق ۱۹٫۲ متر از سطح زمین تا انتهای مدل امتداد یافته است. شکل اجرای لوله‌ی استفاده شده در شمع به صورت U شکل است.

برای تحلیل‌های صورت گرفته در نوشتار حاضر، از نسخه‌ی ۵٫۴ نرم‌افزار المان محدود مولتی فیزیک کامسول^۹ استفاده شده است.^[۲۷] برای مش‌بندی، ابتدا لوله‌ها، سپس شمع و در آخر خاک مش زده شده است. برای لوله‌ها و شمع از اندازه‌ی مش بسیار ریز^{۱۰} و برای خاک از اندازه‌ی مش نرمال^{۱۱} استفاده شده است، تا دقت کافی در محاسبات به دست آید. بر اساس نوشتار باتینی و همکاران (۲۰۱۵)، اگر D قطر شمع و H طول شمع باشند، ابعاد کلی مدل باید به نسبت ابعاد شمع، به صورت $2H$ برای طول، $2H$ برای عرض و $5D$ برای عمق مدل در نظر گرفته شوند.^[۱] در تمام مواردی که بررسی شده است، فاصله‌ی مرکز لوله‌ها با جداره‌ی خارجی شمع 12.6 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱، شمایی از مش‌بندی، ابعاد هندسی و شرایط مرزی در مدل صحت‌سنجی مشاهده می‌شود.

۳.۲. شرایط اولیه و مرزی مدل‌سازی

شرایط اعمال شده در مرزهای خارجی مدل به نحوی است که در تمام مدت زمان مدل‌سازی و تغییرات دما در لوله و شمع، دما در مرزهای خارجی برابر با دمای اولیه‌ی کل مدل، به میزان 13.2 درجه‌ی سانتی‌گراد باقی بماند.^[۱] مدل‌سازی صورت گرفته در شرایط زمستان انجام شده است و بدین معناست که سرما از داخل ساختمان گرفته می‌شود و به شمع انتقال می‌یابد. در نتیجه از طریق لوله‌های مبادله‌گر حرارتی، شمع و خاک تحت سرمایش قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر می‌توان گفت در شرایط اشاره شده، انتقال انرژی حرارتی گرمایشی از خاک به شمع و از شمع به لوله و در انتها از طریق سیال درون لوله به پمپ حرارتی صورت می‌گیرد. در پژوهش حاضر، سیال در حال جریان در لوله با مشخصات حرارتی آب خالص مدل‌سازی شده است، که سرعت اسمی اولیه‌ی جریان آن در لوله به میزان 0.7 متر بر ثانیه است. قطر و ضخامت جداره‌ی لوله به ترتیب برابر 32 و 2.9 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.^[۲۸] دمای سیال ورودی به لوله (آب) برابر 5 درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

۴.۲. خصوصیات و مشخصات مواد استفاده شده

برای مدل صحت‌سنجی، مشخصات مصالح مطابق جدول ۱ برای خاک، شمع و لوله‌ها تعیین شده است، که بر اساس مطالعه‌ی ادبیات فنی و با توجه به گزارش‌های آزمایشگاهی پروژه‌ی مذکور در دانشگاه EPFL سوئیس به دست آمده‌اند.^[۲۸]

رابطه‌ی حاکم ۱ استفاده شده است:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (K \nabla T) = 0 \quad (1)$$

که در آن، پارامتر ρ چگالی خاک اشباع، c ظرفیت گرمایی ویژه، T دما، t زمان، K رسانایی حرارتی، $\nabla \cdot$ دیورژانس و ∇ گرادینان هستند.

برای انتقال حرارت در لوله‌ی حاوی سیال در حال جریان، می‌توان از رابطه‌ی ۲ استفاده کرد:

$$\rho_f c_f A_p \frac{\partial T_{bulk,f}}{\partial t} + \rho_f c_f A_p u_{f,i} \cdot \nabla (T_{bulk,f}) = \nabla \cdot [A_p K_f \nabla (T_{bulk,f})] + q_p \quad (2)$$

که در آن، K_f رسانایی حرارتی، $u_{f,i}$ بردار سرعت مماس بر مسیر جریان، c_f ظرفیت گرمایی ویژه، ρ_f چگالی و $T_{bulk,f}$ دمای سیال هستند. در رابطه‌ی ۲، A_p سطح مقطع و q_p نشان‌دهنده‌ی شار حرارتی مبادله شده در واحد طول لوله هستند. مقدار q_p از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$q_p = U P_p (T_{ext} - T_{bulk,f}) \quad (3)$$

که در آن، P_p محیط داخلی، T_{ext} دمای محیط اطراف U و مقدار مؤثر در ظرفیت گرمایی لوله هستند، که مقدار U از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{r_{int}}{K_p} \ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)} \quad (4)$$

که در آن، r_{int} و r_{ext} به ترتیب شعاع خارجی و داخلی لوله هستند. K_p نشان‌دهنده‌ی رسانایی حرارتی لوله و h_{int} ضریب انتقال حرارتی لوله است، که به صورت رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$h_{int} = \frac{N_u \cdot K_f}{d_h} \quad (5)$$

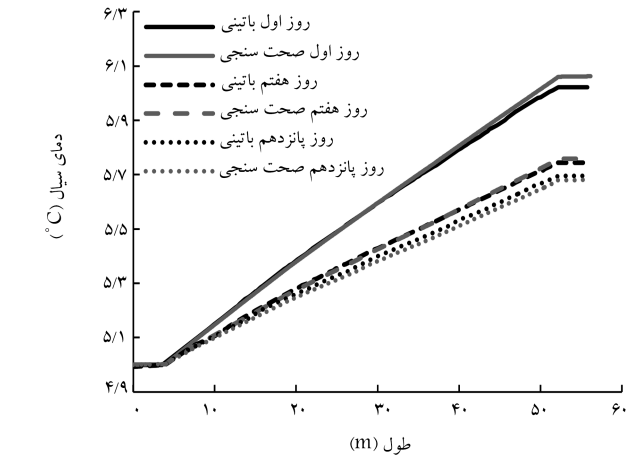
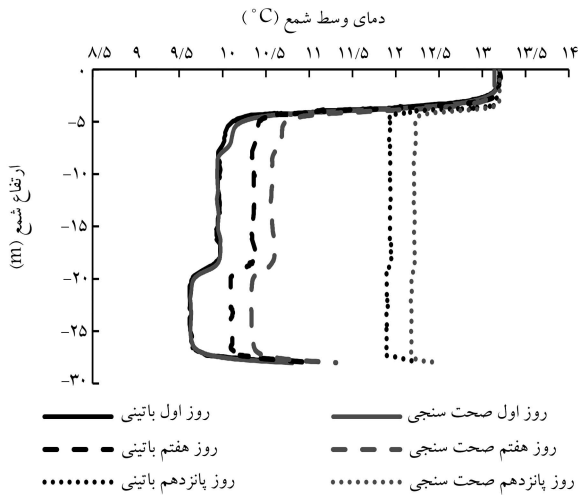
که در آن، d_h قطر هیدرولیکی لوله و N_u عدد بی‌بعد ناسلت^۴ است. عدد ناسلت با اعداد رینولدز^۵ و پراکتل^۶ رابطه‌ی مستقیم دارد و وابسته به سرعت جریان، آرام یا آشفتگی بودن سیال و شکل لوله از فرضیات خاصی استفاده می‌شود و مقدار ضریب انتقال حرارتی لوله متناظر با شرایط مختلف را محاسبه می‌کند.^[۲۵،۲۴] برای محاسبه‌ی ضریب اصطکاک^۷ در لوله با سیال و اثر آن در جریان سیال در لوله، از معادله‌ی هالند^۸ استفاده می‌شود، که برای جریان سیال در لوله با مقادیر زبری کم، کاربرد دارد.^[۲۶]

۲.۲. مشخصات مدل صحت‌سنجی (مطالعه‌ی موردی)

در مدل صحت‌سنجی شده‌ی یک شمع انرژی به طول 28 متر و قطر 0.9 متر مدل‌سازی شده است. به دلیل جلوگیری از اثر شرایط جوی سطح زمین در میزان انرژی دریافتی و با توجه به نحوه‌ی قرارگیری لوله‌ها در شمع، به ترتیب از تبادل حرارتی لوله با بتن اطراف در 4 متر ابتدایی و انتهایی لوله در شمع جلوگیری شده است و به همین منظور، اعماق مذکور به صورت عایق مدل‌سازی شدند. در محل سایت اشاره شده، 4 لایه‌ی خاک با مشخصات مختلف وجود دارد، که لایه‌ی اول از سطح زمین تا عمق 7.7 متر امتداد یافته است، لایه‌های دوم و سوم خاک به ترتیب در عمق‌هایی بین $7.7-15.7$ و $19.2-15.7$ قرار گرفته‌اند. لایه‌ی چهارم

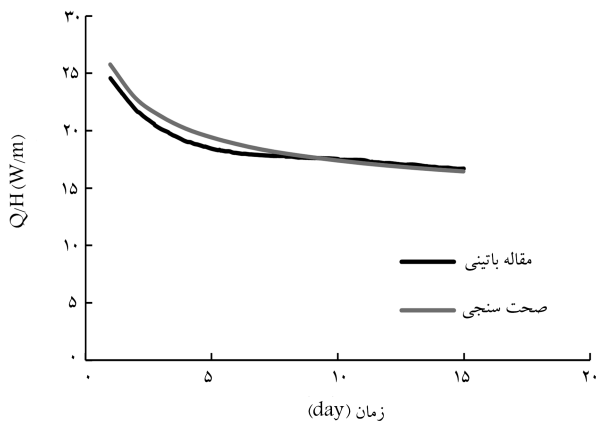
جدول ۱. مشخصات مصالح استفاده شده در صحت‌سنجی.

شماره‌ی لایه‌ی خاک	چگالی (ρ) [$\frac{kg}{m^3}$]	رسانایی حرارتی (K) [$\frac{W}{m.K}$]	ظرفیت گرمایی ویژه (C) [$\frac{J}{Kg.K}$]
اول	۲۷۶۹	۱٫۸	۸۸۰
دوم	۲۷۳۵	۱٫۸	۸۹۰
سوم	۲۷۴۰	۱٫۸	۸۹۰
چهارم	۲۱۶۷	۱٫۱۱	۹۲۳
شمع	۲۵۰۰	۱٫۶۲۸	۸۳۷
لوله	-	۰٫۴۲	-



شکل ۲. دمای آب خروجی از لوله در روزهای اول، هفتم و پانزدهم صحت‌سنجی.

شکل ۳. تغییر دما در وسط شمع در روزهای اول، هفتم و پانزدهم صحت‌سنجی.



شکل ۴. تغییر نسبت توان خروجی به طول شمع.

صحت‌سنجی صورت گرفته و نتایج گزارش شده در نوشتار باتینی و همکاران (۲۰۱۵) هستند.

در شکل ۳، تغییر دما در وسط شمع مشاهده می‌شود، که بیانگر انتقال حرارت از لوله به شمع است. با توجه به وجود لایه بندی در خاک و مشخصات حرارتی لایه‌های مختلف خاک مشاهده می‌شود که توزیع دما در اعماق مختلف شمع متفاوت است. همچنین در شکل ۳ مشاهده می‌شود که اختلاف دمای بین روزهای هفتم و پانزدهم به علت نزدیک شدن به تعادل حرارتی (در مجموعه‌ی خاک، شمع و لوله) رفته‌رفته کم شده است.

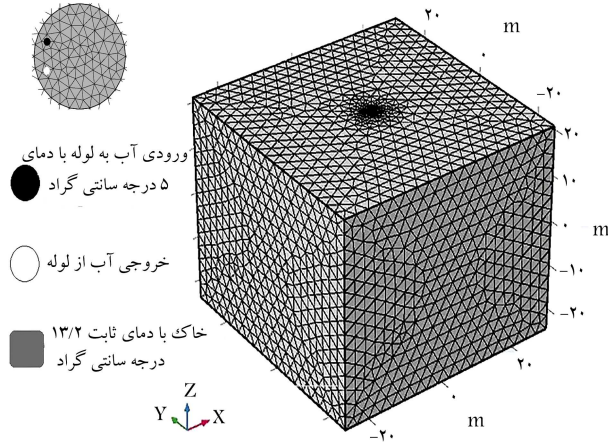
۵.۲. نتایج صحت‌سنجی

از آنجا که پژوهش حاضر به بررسی انتقال حرارتی در لوله و محیط متخلخل می‌پردازد، باید نشان داده شود که مدل‌سازی ارائه شده قادر به ارائه‌ی نتایج با دقت مناسب در هر کدام از موارد ذکر شده است. بنابراین، نتایج حاصل از مدل صحت‌سنجی با نتایج ارائه شده از سوی باتینی و همکاران (۲۰۱۵) مقایسه شده است، تا نشان داده شود که روش ارائه شده قادر به مدل‌سازی هر دو مورد اخیر است. مطابق شکل ۲، تغییرات دمای آب در طول لوله و در روزهای اول، هفتم و پانزدهم با نتایج ارائه شده از سوی باتینی و همکاران (۲۰۱۵) مقایسه شده است. با مقایسه‌ی نتایج روزهای هفتم و پانزدهم در شکل ۲ مشاهده می‌شود که میزان تغییرات دمای خروجی آب از لوله با گذشت زمان کاهش می‌یابد، که به علت کاهش دمای خاک و بتن اطراف لوله نسبت به دمای اولیه (۱۳/۲ درجه‌ی سانتی‌گراد)، با گذشت زمان و نزدیک شدن به دمای سیال سرد عبوری در لوله است. بنابراین با گذشت زمان، بتن و خاک اطراف لوله، انرژی گرمایی کمتری دارند تا با لوله مبادله کنند. نتایج ارائه شده در شکل ۲، نشان‌دهنده‌ی قابلیت مدل‌سازی انتقال حرارت و جریان سیال در لوله با دقت مناسب است.

از آنجا که باید روش ارائه شده برای مدل‌سازی انتقال حرارت در محیط متخلخل و میزان انرژی دریافتی از شمع حرارتی، دقت کافی داشته باشد؛ تغییرات دما در محور تقارن شمع حرارتی برای روزهای اول، هفتم و پانزدهم و توان خروجی بر حسب واحد طول شمع در مدت ۱۵ روز به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. در شکل‌های اخیر، خطوط خاکستری و مشکی‌رنگ به ترتیب مربوط به مدل

جدول ۲. خصوصیات و مشخصات مواد استفاده شده در مطالعه‌ی پارامتری.

مشخصات مقاطع	چگالی (ρ)	رسانایی حرارتی (K)	ظرفیت گرمایی ویژه (C)
خاک	۱۶۱۳	۲٫۷۵	۱۶۳۲
بتن	۲۵۰۰	۱٫۶۲۸	۸۳۷
لوله	-	۰٫۴۲	-



شکل ۵. مش بندی و شرایط مرزی مدل مطالعه‌ی پارامتری.

و خروج لوله از شمع بر روی قطر شمع قرار گیرد و فاصله‌ی آن‌ها از جدار خارجی شمع برابر ۷ سانتی‌متر بوده است. برای لوله‌ی W شکل، لوله‌ها به صورت متقارن و بر اساس خط تقارن قطر شمع حرارتی قرار داده شده‌اند. به طوری که فاصله‌ی هر لوله نسبت به لوله‌ی کناری خودش ۱۹ سانتی‌متر است. لازم به ذکر است دو لوله‌ی که در حالت W شکل در قسمت میانی شمع حرارتی قرار دارند، تا سرشمع حرارتی آورده نشده‌اند و انتهای بالایی آن‌ها از سرشمع حرارتی، فاصله‌ی ۴ متری دارند. دو سر ابتدایی و انتهایی لوله‌ی W شکل، نیز در کناره‌ها و با فاصله‌ی ۷ سانتی‌متری با جداره‌ی شمع حرارتی قرار گرفته و تا سرشمع حرارتی امتداد پیدا کرده‌اند. ورودی لوله‌ی اسپیرال با فاصله‌ی ۷ سانتی‌متر از جداره‌ی شمع حرارتی وارد شمع حرارتی شده و ۴ متر اولی‌ه‌ی آن به صورت صاف بوده است. مابقی لوله به صورت مارپیچ تا انتهای شمع حرارتی و با فاصله‌ی ۷ سانتی‌متری با جداره‌ی شمع امتداد پیدا کرده است. در نهایت، لوله‌ی خروجی به صورت صاف از وسط شمع حرارتی به سمت بالا حرکت کرده است. در ادامه، به بررسی نسبت انرژی دریافتی بر واحد زمان از هر متر طول شمع، $\frac{Q}{H}$ طی مدت ۱۸۰ روز (معادل ۶ ماه) برای یک دوره‌ی برداشت انرژی از خاک و انتقال آن به ساختمان پرداخته شده است. نمودارهای روزهای دوم (اولیه) و ۱۸۰ام (پایانی) در هر قسمت با هم مقایسه شده‌اند. در نتایج ارائه شده برای مطالعه‌ی پارامتری، محور عمودی نمودارها نسبت $\frac{Q}{H}$ و محور افقی مقادیر پارامترهای هدف بررسی شده را نشان می‌دهند. پارامترهای مؤثر در انرژی دریافتی از یک شمع حرارتی را می‌توان به سه دسته‌ی کلی عوامل حاصل از مشخصات هندسی، خواص حرارتی مصالح و نحوه‌ی عملکرد پمپ حرارتی تقسیم کرد. مشخصات هندسی و خواص حرارتی مربوط به اجزاء مختلف سیستم از قبیل: لوله، شمع و خاک هستند. اما نحوه‌ی عملکرد پمپ حرارتی در تغییر دمای سیال ورودی و سرعت جریان ورودی تأثیرگذار است. در زمینه‌ی مشخصات هندسی می‌توان به اثر قطر و طول برای هر کدام از ابعاد شمع و لوله‌های مبادله‌گر حرارتی اشاره کرد. یکی دیگر از پارامترهای هندسی مؤثر در میزان انرژی دریافتی از شمع‌ها، شکل اجرای لوله در شمع‌های

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میزان انرژی برداشت شده به ازاء هر متر طول شمع با کاهش دما در خاک به مرور کاهش می‌یابد و بعد از گذشت مدت زمانی به عدد ثابتی میل می‌کند. در این‌جا نسبت توان خروجی به طول شمع را به صورت $\frac{Q}{H}$ نمایش داده می‌شود و واحد آن وات بر متر است. در واقع در شکل ۴ بیان می‌شود که در هر ثانیه، چه میزان انرژی به‌طور متوسط از طول واحد شمع استخراج می‌شود، که از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\frac{Q}{H} = \frac{Q' \rho_w C_w (T_{out} - T_{in})}{H} \quad (6)$$

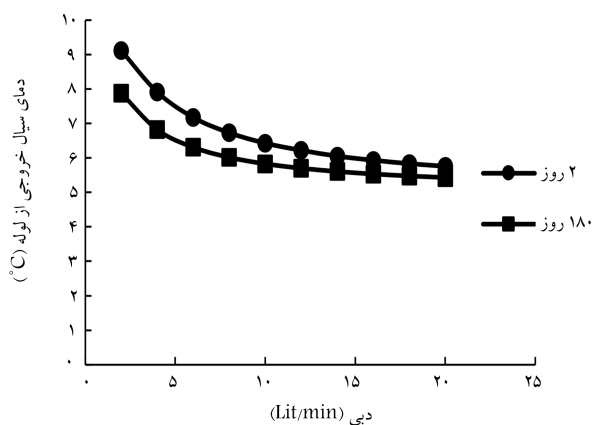
که در آن، Q' دبی حجمی آب ورودی، ρ_w چگالی آب، C_w ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آب، T_{in} دمای آب ورودی به لوله، T_{out} دمای آب خروجی از لوله و H طول شمع هستند.

تمامی نمودارهای اخیر، دقت کافی مدل‌سازی صورت گرفته را به وضوح برای پارامترهای مختلف و در مکان هندسی‌های مختلف مدل‌سازی نشان می‌دهند. برای جمع‌بندی می‌توان گفت که در تمام موارد بررسی شده، اختلاف بین نتایج باتینی و همکاران (۲۰۱۵) با نتایج مدل‌سازی صورت گرفته بسیار ناچیز و کمتر از ۵٪ است، که نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب روش ارائه شده است.

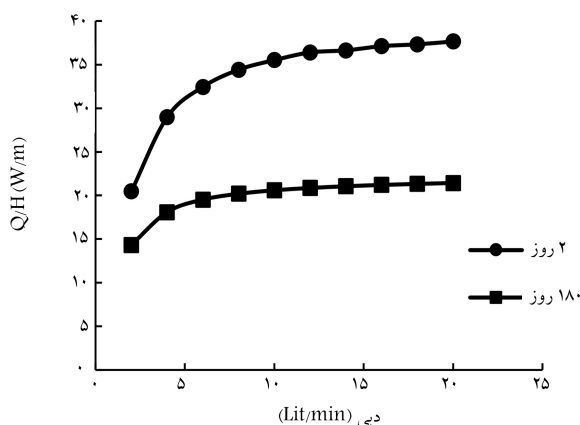
علت این اختلاف ۵ درصدی را می‌توان در تفاوت بین اندازه و تعداد مش‌های به‌کاررفته و تفاوت بین نسخه‌ی نرم‌افزار مولتی فیزیک کامسول استفاده شده دانست، چرا که در نوشتار باتینی و همکاران (۲۰۱۵) از نسخه‌ی ۴٫۴ در پژوهش حاضر از نسخه‌ی ۵٫۴ نرم‌افزار مذکور استفاده شده است.

۳. مطالعه‌ی پارامتری

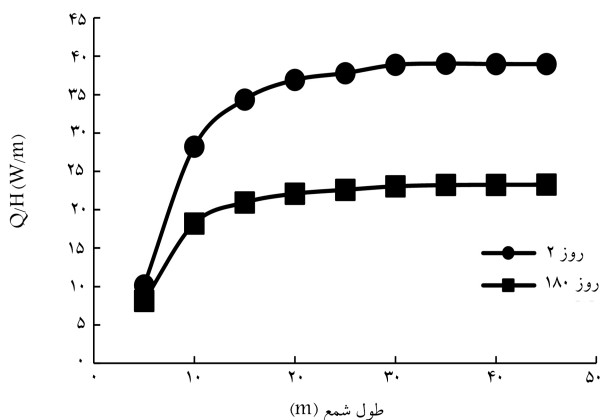
به منظور آن‌که عوامل مؤثر در میزان انرژی دریافتی از شمع‌های مبادله‌گر حرارتی مشخص شود، در پژوهش حاضر، اثر تغییر پارامترهای مختلف ورودی مدل در میزان انرژی دریافتی بررسی شده است. نتایج به دست آمده این امکان را فراهم می‌آورند که بتوان پیش از اجرای سیستم و صرف کردن هزینه‌های اجرا، مهندسان بتوانند یک برآورد اولیه از میزان سودمندی استفاده از روش اشاره شده در ساختمان خود داشته باشند. در مطالعه‌ی پارامتری صورت گرفته در پژوهش حاضر، به جز مشخصات خاک که در جدول ۲ به آن اشاره شده است و سرعت جریان ورودی به لوله به میزان ۰٫۲۹ متر بر ثانیه، تمامی پارامترها منطبق بر نوشتار باتینی و همکاران (۲۰۱۵) هستند. در شکل ۵، ابعاد مدل‌سازی در نرم‌افزار کامسول، مش بندی و شرایط مرزی مشاهده می‌شود. البته در بررسی هر پارامتر هدف، مقادیر متناسب با آنچه در شکل مرتبط آن نشان داده شده است، استفاده شده است. همانند مدل صحت‌سنجی، چهار متر اولیه و انتهایی لوله که در نزدیکی سطح زمین است، عایق فرض شده و رسانایی حرارتی آن صفر در نظر گرفته شده است، تا سیستم تحت تأثیر شرایط جوی متغیر در سطح زمین قرار نگیرد و بازدهی انرژی آن کاهش نیابد. نحوه‌ی قرارگیری لوله در شمع برای تمام حالت‌های لوله‌گذاری در شمع به نحوی بوده است که محل ورود



شکل ۶. تغییر دمای آب خروجی با توجه به افزایش دبی حجمی ورودی.



شکل ۷. تغییر نسبت توان خروجی به طول شمع با توجه به افزایش دبی حجمی ورودی.



شکل ۸. تغییر نسبت توان خروجی به طول شمع با افزایش طول شمع انرژی.

می‌تواند در میزان انرژی دریافت شده از شمع نیز مؤثر باشد. از همین رو اثر طول شمع حرارتی در میزان انرژی دریافتی بررسی شده است. در پژوهش حاضر، اثر طول شمع‌های مورد مطالعه در بازه‌ی ۵ تا ۴۵ متر، با نرخ رشد ۵ متر در هر مورد بررسی شده است، که نتایج آن‌ها در شکل ۸ مشاهده می‌شود، که مطابق آن به‌طور کلی با افزایش طول شمع، تغییرات انرژی خروجی، روندی صعودی دارد؛ اما در شمع‌های با طول حدود ۲۰ متر و بیشتر، نسبت $\frac{Q}{H}$ دیگر افزایش چندانی ندارد و به مرور با افزایش طول شمع، شیب نمودار ملایم‌تر شده و حتی می‌توان گفت که میزان شیب

حرارتی است، که می‌تواند به شکل‌هایی مانند U ، W و اسپیرال اجرا شود. شکل اجرای لوله در شمع تعیین می‌کند که به چه میزان می‌توان در یک شمع با هندسه‌ی مشخص، لوله‌ی مبادله‌گر حرارتی کارگذاری کرد. البته در مورد شکل اجرای اسپیرال، یک استثنا وجود دارد و آن این است که علاوه بر مشخصات هندسی شمع، فاصله‌ی هر حلقه با حلقه‌ی بعدی (گام) نیز تعیین‌کننده است. از این رو در پژوهش حاضر، اثر اندازه‌ی گام‌های مختلف در میزان انرژی دریافتی نیز بررسی شده است. همچنین به واسطه‌ی آنکه لوله، یک استوانه‌ی تو خالی است؛ ضخامت جدار آن نیز یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در میزان انرژی دریافتی است. از آن‌جا که تهیه‌ی مصالح لوله و شمع مطابق با استانداردهای خاصی صورت می‌گیرد، عموماً خواص انتقال حرارتی آن‌ها تغییرات اندکی دارد. لذا با توجه به گستردگی بازه‌ی خواص حرارتی خاک، در پژوهش حاضر خواص حرارتی خاک، از قبیل: ظرفیت گرمایی ویژه، رسانایی حرارتی، و چگالی بررسی شده‌اند.

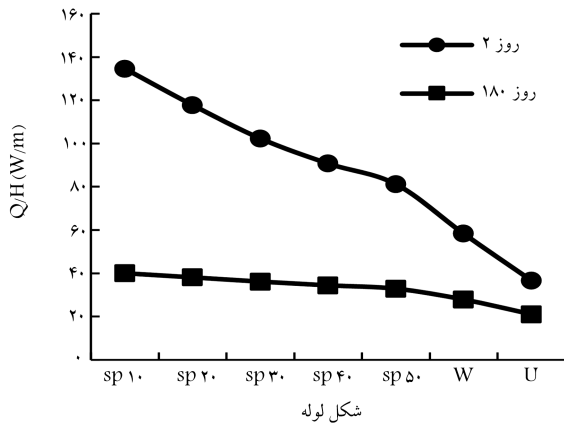
۱.۳. اثر دبی جریان

در بخش کنونی، اثر تغییر دبی حجمی ورودی سیال به درون لوله از میزان ۲ تا ۲۰ لیتر بر دقیقه با نرخ رشد تصاعدی ۲ لیتر بر دقیقه، در میزان توان انرژی خروجی از سیستم بررسی شده است. مطابق شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جریان، دمای خروجی از لوله‌ی مبادله‌گر حرارتی تغییرات کمتری نسبت به دمای ورودی آن (۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) می‌یابد. علت این مسئله آن است که با افزایش دبی سیال و ثابت ماندن قطر لوله، سرعت جریان سیال افزایش می‌یابد و در نتیجه سیال فرصت کمتری برای تبادل انرژی با محیط پیرامونی خود (با دمای ۱۳/۲ درجه‌ی سانتی‌گراد) دارد و در نتیجه افزایش دمای کمتری در سیال خروجی مشاهده می‌شود.

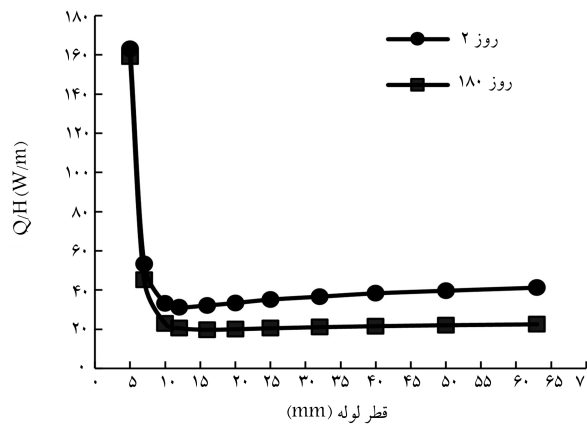
بنابراین مطابق شکل ۶ با افزایش دبی، روند تغییر دمای خروجی نزولی است و اختلاف دمای خروجی سیال بین روزهای اولیه و پایانی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به رابطه‌ی مستقیمی که توان خروجی از شمع با اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی دارد، در نگاه اول به نظر می‌رسد که مطابق شکل ۶، توان خروجی سیستم در اثر افزایش دبی کاهش یابد. اگر مطابق رابطه‌ی ۶، توان خروجی بر واحد طول شمع حرارتی برای تغییرات دبی ذکر شده رسم شود، مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، توان خروجی افزایش می‌یابد. علت این مسئله آن است که اگرچه در قسمت اختلاف دمای ورودی و خروجی رابطه‌ی ۶، کاهش مشاهده می‌شود، اما مقدار دبی ورودی (Q') به حدی افزایش یافته است که اثر کاهش مذکور را با افزایش حجم سیال تغییر دما یافته خنثی می‌کند و در نتیجه با افزایش دبی، انرژی بیشتری از شمع دریافت می‌شود. مطابق شکل ۷، روند تغییر توان خروجی با افزایش دبی برای روزهای اولیه و پایانی صعودی است و این افزایش در توان خروجی تا دبی ۵ لیتر بر دقیقه، شیب بیشتری دارد و پس از آن اختلاف نمودارهای اولیه و پایانی تقریباً ثابت باقی می‌ماند. همواره انرژی دریافت شده از شمع حرارتی در روزهای اولیه بسیار بیشتر از روزهای پایانی است. چرا که تحت تأثیر عملیات مستمر پمپ حرارتی در روزهای پایانی، اختلاف دمای کمتری در توده‌ی شمع و خاک اطراف با لوله‌ی مبادله‌گر حرارتی وجود دارد و در نتیجه انرژی کمتری بین آن‌ها تبادل می‌شود.

۲.۳. اثر طول شمع حرارتی

ابعاد هندسی شمع حرارتی علاوه بر تأثیری که در جنبه‌های اقتصادی مسئله دارد،



شکل ۱۰. تغییر نسبت توان خروجی به طول شمع در شکل‌های مختلف لوله.



شکل ۱۱. تغییرات نسبت توان خروجی به طول شمع با افزایش قطر لوله‌ی حاوی سیال.

بر اساس استاندارد بین‌المللی DIN ۸۰۷۴، اثر استفاده از لوله‌هایی با قطر ۵ میلی‌متر تا ۶۳ میلی‌متر در تغییر انرژی دریافتی مطابق شکل ۱۱ بررسی شده است.^[۲۹]

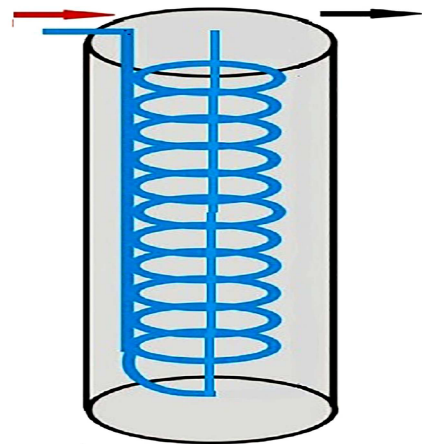
لازم به توضیح است که قطر لوله‌ی ۷ میلی‌متر در استاندارد DIN ۸۰۷۴ وجود ندارد. علت استفاده از آن، تغییر ناگهانی قطر لوله از ۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر است. برای درک بهتر تغییرات به وجود آمده در نتایج و همچنین رسم دقیق‌تر نمودار از قطر ۷ میلی‌متر استفاده شده است.

بر اساس نتایج شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در قطرهای بسیار کوچک، تا حدود ۱۲ میلی‌متر، نمودار با نرخ زیادی نزولی است. علت این موضوع آن است که در قطرهای بسیار کوچک مطابق شکل ۱۱، که از رابطه‌ی ۸ به دست آمده است، عدد رینولدز بسیار بزرگ است. عدد رینولدز در میزان عدد ناسلت تأثیرگذار خواهد بود و در نتیجه باعث تأثیر در روابط ۴ و ۵ و تغییر میزان تبادل حرارتی می‌شود.

$$R = \frac{4 \times \rho_w Q'}{d \pi \mu} \quad (7)$$

که در آن، ρ_w چگالی آب، Q' دبی حجمی ورودی، d قطر لوله و μ لزجت دینامیکی آب هستند.

با توجه به رابطه‌ی مستقیمی که عدد رینولدز با ضریب انتقال حرارت لوله دارد، در عددهای رینولدز بسیار بالا، انتقال حرارت به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد و در نتیجه توان خروجی به شدت افزایش پیدا می‌کند. در لوله‌های حاوی سیال با قطر



شکل ۹. نمونه‌یی از لوله‌ی اسپیرال در طول شمع حرارتی.

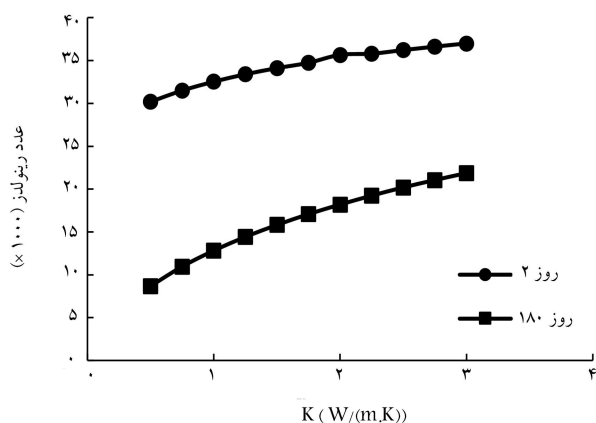
نمودار به سمت صفر میل کرده است. علت مشاهده‌ی این پدیده آن است که با افزایش طول شمع به علت آنکه سیال، زمان بیشتری برای انتقال حرارت دارد، توان خروجی به شدت افزایش می‌یابد. اما در شمع‌های با طول بیش از ۲۰ متر، میانگین انرژی دریافتی از هر متر طول شمع، ثابت می‌شود. یکی از دلایل آن، این است که توده‌ی خاک و شمع تا یک حد مشخص، که تابعی از ظرفیت گرمایی توده‌ی خاک و شمع و اختلاف دمای آن با لوله است، می‌تواند به سیال درون لوله، انرژی حرارتی انتقال دهد. از طرفی دیگر، اختلاف دمای سیال درون لوله‌ی مبادله‌گر حرارتی با توده‌ی شمع و خاک به علت آنکه سیال مدت زمان بیشتری برای انتقال حرارت با محیط پیرامونی خود دارد، کمتر شده است. به همین دلیل، توان خروجی به یک میزان مشخص به ازاء هر متر از شمع رسیده است. در این حالت افزایش طول شمع تأثیری در میانگین انرژی دریافتی نخواهد داشت و صرفه‌ی اقتصادی آن توجیه‌پذیر نیست.

۳.۳. اثر شکل اجرای لوله

از دیگر عوامل مؤثر در توان خروجی شمع‌های حرارتی، شکل اجرای لوله‌هاست، که به شکل‌هایی مانند U ، W و اسپیرال در پروژه‌های واقعی اجرا می‌شوند. برای شکل اسپیرال، اثر اندازه‌ی گام با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر که در شکل ۹ نمونه‌یی از یک شمع به همراه لوله‌ی اسپیرال مشاهده می‌شود. در شکل ۱۰، اثر شکل اجرای لوله بررسی شده است و بر اساس نتایج آن، شکل اجرای لوله به صورت اسپیرال بیشترین انرژی دریافتی از زمین را داشته و پس از آن، لوله‌ی W شکل، انرژی بیشتری نسبت به لوله‌ی U شکل دریافت کرده است. این نتایج نشان می‌دهند که هر چه طول لوله‌ی درون شمع بیشتر باشد، سیال فرصت بیشتری برای انتقال حرارت با محیط اطراف خود دارد، که باعث افزایش توان خروجی می‌شود. در نتیجه، هر چه فاصله‌ی بین حلقه‌های لوله‌های اسپیرال به هم نزدیک‌تر باشد، توان خروجی بیشتری نسبت به طول شمع دریافت می‌شود.

۴.۳. اثر قطر لوله

از آنجا که می‌توان از لوله‌هایی با مشخصات هندسی مختلفی به‌عنوان مبادله‌گر حرارتی استفاده کرد، یکی از دیگر عوامل مؤثر در میزان انرژی دریافتی می‌تواند قطر لوله‌ی به‌کار رفته باشد. برای یک دبی ثابت، با تغییر قطر لوله، عدد رینولدز دچار تغییر می‌شود.



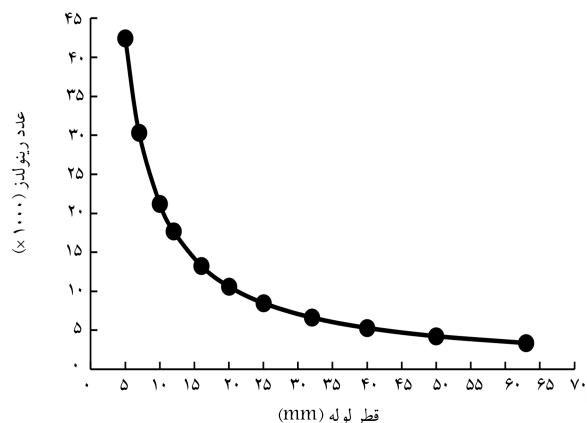
شکل ۱۴. تغییر نسبت توان خروجی به طول شمع ($\frac{Q}{H}$) با افزایش رسانایی حرارتی خاک.

۶.۳. اثر رسانایی حرارتی خاک

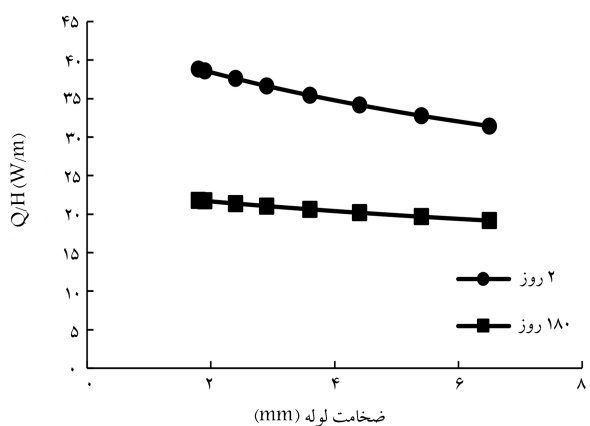
به علت آنکه میزان بازدهی انرژی شمع‌های مبادله‌گر حرارتی وابسته به رسانایی حرارتی اجزاء مختلف آن است و با توجه به آنکه خاک نقش مهمی بر این تبادل حرارتی دارد، اثر تغییر رسانایی حرارتی خاک از ۰/۵ تا ۳ وات بر متر درجه‌ی کلونین، در شکل ۱۴ با نرخ رشد تصاعدی ۰/۲۵ وات بر متر درجه‌ی کلونین مطالعه شده است. با افزایش رسانایی حرارتی خاک بر اساس شکل ۱۴، به علت سریع‌تر شدن تبادل انرژی حرارتی با توده‌ی خاک، نسبت انرژی دریافتی به ازاء واحد طول شمع ($\frac{Q}{H}$) در روزهای اولیه و پایانی افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن رسانایی حرارتی خاک به رسانایی حرارتی شمع، تأثیر تغییر پارامتر حرارتی خاک کاهش پیدا می‌کند. علت مشاهده‌ی این پدیده آن است که با توجه به رسانایی حرارتی ثابت شمع، امکان انتقال انرژی حرارتی بیشتری برای شمع موجود نیست که بخواهد آن را به خاک منتقل کند. پس برای آن دسته از ضریب‌های رسانایی حرارتی خاک، که بیش از رسانایی حرارتی شمع هستند، افزایش توان خروجی مشاهده نمی‌شود و به مقداری ثابت میل می‌کند. همچنین برای ضریب‌های رسانایی حرارتی بالا، اختلاف ($\frac{Q}{H}$) بین روزهای اولیه و پایانی کاهش یافته و شیب نمودار ملایم‌تر شده است. در نتیجه برای آن دسته از ضریب‌های رسانایی حرارتی خاک که بیش از رسانایی حرارتی شمع هستند، میزان انرژی دریافتی از شمع وابسته به رفتار بلندمدت سیستم نیست.

۷.۳. اثر ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک

از آنجایی که میزان انرژی موجود در یک توده‌ی ماده، وابسته به ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آن است، اثر ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ ژول بر کیلوگرم درجه‌ی کلونین، با نرخ رشد تصاعدی ۲۵۰ ژول بر کیلوگرم درجه‌ی کلونین در تغییر ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک، توان خروجی به صورت خطی افزایش پیدا کرده است، اما تأثیر پارامتر مذکور در میزان انرژی دریافتی ناچیز است. همچنین طبق شکل ۱۵، میزان اثر ظرفیت گرمایی ویژه در $\frac{Q}{H}$ در روزهای اولیه و پایانی با شیبی ملایم و یکسان افزایش پیدا کرده است، که نشان می‌دهد ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک در رفتار بلندمدت شمع‌های حرارتی تأثیر ناچیزی دارد. با توجه به آنکه رسانایی حرارتی خاک و بتن بسیار پایین است، انتقال حرارت اندکی بین سطح مشترک توده‌ی خاک و بتن اتفاق می‌افتد. اگر رسانایی حرارتی خاک و بتن بسیار زیاد بود، انرژی زیادی



شکل ۱۲. تغییر عدد رینولدز با توجه به متغیر بودن قطر لوله.



شکل ۱۳. تغییر نسبت توان خروجی به طول شمع با افزایش ضخامت جداره‌ی لوله.

بزرگ، با توجه به آنکه نمودار عدد رینولدز طبق رابطه‌ی ۸ و شکل ۱۲، یک تابع متقابل (معکوس) قطر لوله است، مشاهده می‌شود که تغییرات عدد رینولدز ناچیز می‌شود، که این موضوع باعث کاهش تأثیر عدد رینولدز در تبادل انرژی بین لوله‌ی حاوی سیال با محیط اطراف می‌شود. اما در قطرهای بزرگ، سطح تماس لوله‌ی حاوی سیال با توده‌ی شمع و خاک، عامل مؤثر در میزان توان خروجی شمع حرارتی نسبت به طول شمع است. افزایش قطر لوله باعث افزایش سطح تماس لوله با توده‌ی شمع شده است، که از قطر حدود ۱۲ میلی‌متر به بعد، توان خروجی نسبت به طول شمع به صورت خطی افزایش پیدا کرده است.

۵.۳. اثر ضخامت جداره‌ی لوله

شکل ۱۳، اثر تغییر ضخامت جداره‌ی لوله از ۱/۸ تا ۶/۵ میلی‌متر (بر اساس مشخصات هندسی لوله‌ها در استاندارد DIN ۸۰۷۴ آلمان، [۲۹]) در میزان توان خروجی حرارتی نسبت به طول شمع را نشان می‌دهد، که با افزایش ضخامت جداره‌ی لوله، توان خروجی نسبت به طول شمع کاهش می‌یابد. همچنین طبق شکل ۱۳، در ضخامت‌های بالا اختلاف انرژی مبادله شده در روزهای اولیه و پایانی کاهش می‌یابد و همان‌طور که با توجه به شیب تندتر نمودارهای اولیه مشاهده می‌شود، اثر افزایش ضخامت جداره‌ی لوله در کاهش $\frac{Q}{H}$ در روزهای اولیه بسیار بیشتر از روزهای پایانی بوده است. علت مشاهده‌ی این رفتار آن است که رسانایی حرارتی جداره‌ی لوله بسیار کمتر از شمع است و با افزایش ضخامت جداره‌ی لوله، انتقال حرارت سخت‌تر صورت می‌پذیرد و باعث کاهش انرژی دریافتی می‌شود.

امکان فراهم می‌آید که بازدهی و صرفه‌ی اقتصادی سیستم را با تغییر یک یا چند عامل مشخص بهبود داد. این مسئله زمانی اهمیت می‌یابد که طراحان علاوه بر مسائل پایداری و تأمین انرژی به ابعاد اقتصادی طرح نیز توجه کنند. بنابر نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، مهندسان می‌توانند یک برآورد اولیه از میزان بازدهی انرژی و صرفه‌ی اقتصادی استفاده از شمع‌های حرارتی داشته باشند و در صورت نیاز به تأمین انرژی بیشتر از شمع‌های حرارتی، با بهبود مشخصات یک یا چند عامل مؤثر اشاره شده در پژوهش حاضر، نیازمندی‌های پروژه را پاسخگو باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که روش ارائه شده، قابلیت مدل‌سازی کامل عملیات انتقال و برداشت انرژی از طریق شمع‌های حرارتی را دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود کامسول، رفتار یک شمع حرارتی از جنبه‌ی میزان انرژی حرارتی دریافتی از آن بررسی شده است. همچنین اثر پارامترهای مربوط به لوله، خاک و شمع در انرژی دریافتی بررسی و تأثیر هر کدام از پارامترهای مذکور در توان خروجی حرارتی نسبت به طول شمع ارائه شده است. از مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر می‌توان به این موارد اشاره کرد:

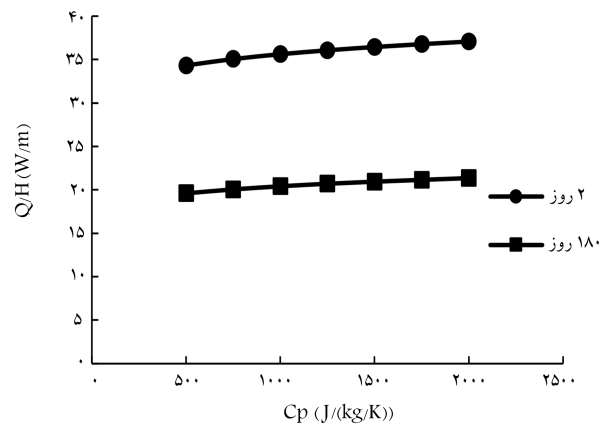
۱. افزایش دبی جریان در لوله، رابطه‌ی مستقیم با افزایش $\frac{Q}{H}$ دارند. اگرچه در اثر افزایش سرعت جریان، سیال فرصت کمتری برای تبادل حرارتی با محیط اطراف خود دارد، اما به علت افزایش حجم ورودی سیال به لوله، تبادل انرژی بیشتری با توده‌ی شمع و خاک صورت می‌گیرد و در نتیجه‌ی آن، توان خروجی نسبت به طول شمع افزایش می‌یابد؛

۲. در زمینه‌ی اثر قطر لوله در $\frac{Q}{H}$ ، دو رفتار متفاوت مشاهده شده است. در رفتار اول، که حاصل از نوع جریان در لوله است، آن زمان که قطر لوله بسیار کوچک باشد، جریان آشفته می‌شود. در حالت آشفته، تبادل حرارتی سیال و لوله با محیط اطراف افزایش قابل توجهی دارد. پس از افزایش قطر لوله، جریان از حالت آشفته به آرام تبدیل می‌شود. با تبدیل جریان به حالت آرام، رفتار دوم مشاهده می‌شود. این تغییر موجب آفت ناگهانی $\frac{Q}{H}$ می‌شود. اما از آنجایی که افزایش قطر لوله موجب افزایش سطح تماس لوله با شمع می‌شود، امکان تبادل حرارتی بیشتری برای لوله فراهم می‌شود. بنابراین با افزایش قطر لوله، روند تغییرات توان خروجی حرارتی نسبت به طول شمع صعودی می‌شود؛

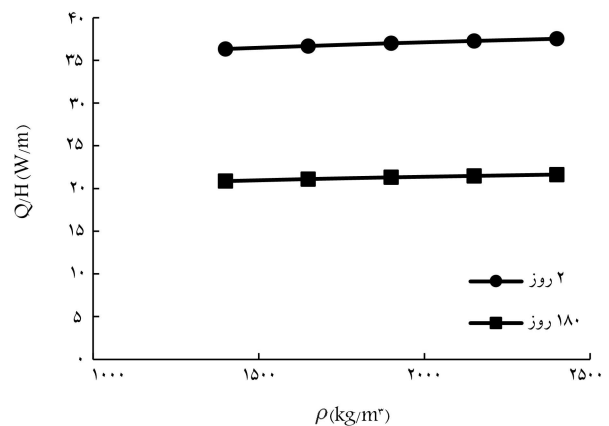
۳. نتایج به دست آمده از شکل اجرای لوله نشان می‌دهند که با افزایش طول لوله‌ی کارگذاری شده در شمع، به علت افزایش زمان و سطح تماس تبادل حرارتی لوله با توده‌ی شمع و خاک، نسبت $\frac{Q}{H}$ بهبود می‌یابد. از این رو با اجرای لوله به شکل اسپیرال می‌توان بیشترین میزان انرژی را با توده‌ی شمع و خاک تبادل کرد. همچنین افزایش ضخامت جداره‌ی لوله، به علت رسانایی حرارتی پایین آن باعث کاهش $\frac{Q}{H}$ می‌شود؛

۴. افزایش رسانایی حرارتی خاک باعث افزایش $\frac{Q}{H}$ می‌شود. اما اثر ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی خاک، موجب بهبود ناچیز توان خروجی نسبت به طول شمع می‌شود؛

۵. افزایش طول شمع تا طول ۲۰ متر باعث افزایش $\frac{Q}{H}$ می‌شود. از طول ۲۰ متر به بعد، تأثیر افزایش طول شمع کاهش پیدا می‌کند و می‌توان گفت که استفاده از طول شمع بیش از ۳۰ متر از جنبه‌ی برداشت انرژی، صرفه‌ی اقتصادی ندارد.



شکل ۱۵. تغییر نسبت توان خروجی به طول شمع با افزایش ظرفیت گرمایی ویژه.



شکل ۱۶. تغییر نسبت توان خروجی به طول شمع با افزایش چگالی خاک.

از توده‌ی خاک انتقال می‌یافت و موجب می‌شد با ایجاد اختلاف دما در توده‌ی خاک، اثر ظرفیت گرمایی ویژه فعال شود. در نتیجه پایین بودن رسانایی حرارتی خاک به صورت یک مقاومت برای انتقال انرژی از شمع به خاک و بالعکس عمل می‌کند و باعث می‌شود تغییرات دما در خاک ناچیز و ظرفیت گرمایی ویژه، تأثیر بسیار کمی در میزان انرژی انتقال یافته داشته باشد.

۸.۳. اثر چگالی خاک

در شکل ۱۶، اثر تغییرات چگالی خاک از ۱۴۰۰ تا ۲۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با نرخ رشد تصاعدی ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده می‌شود، که مطابق آن افزایش چگالی خاک باعث بهبود انتقال حرارت شده است. اما تأثیر آن بسیار ناچیز بوده و میزان تغییرات $\frac{Q}{H}$ در روزهای اولیه و پایانی به صورتی یکسان و با شیبی بسیار ملایم افزایش پیدا کرده است. با توجه به آنکه رسانایی حرارتی خاک و بتن بسیار پایین است، انتقال حرارت اندکی بین سطح مشترک توده‌ی خاک و بتن اتفاق می‌افتد. اگر رسانایی حرارتی خاک و بتن بسیار زیاد بود، انرژی زیادی از توده‌ی خاک انتقال می‌یافت و موجب می‌شد با ایجاد اختلاف دما در توده‌ی خاک، اثر چگالی فعال شود. در نتیجه، پایین بودن رسانایی حرارتی خاک به صورت یک مقاومت برای انتقال انرژی از شمع به خاک و بالعکس عمل می‌کند و باعث می‌شود تغییرات دما در خاک ناچیز و چگالی خاک تأثیر بسیار کمی در میزان انرژی انتقال یافته داشته باشد.

با مشخص شدن پارامترهای مؤثر و میزان تأثیر آن‌ها در انرژی دریافتی، این

شایانی به طراحان شمع‌های حرارتی جهت طراحی شمع‌های انرژی بهینه، برای دریافت بیشینه انرژی از زمین کند. این امر موجب می‌شود تا مهندسان بتوانند با دید بازتری شمع‌های حرارتی را، که جزء انرژی‌های پاک محسوب می‌شوند، طراحی کنند و در پروژه‌های ساختمانی به‌کار گیرند.

پیشنهاد می‌شود برای اقتصادی بودن استفاده از شمع‌های انرژی، در هر پروژه با توجه به خصوصیات حرارتی خاک، طول بهینه‌ی شمع تعیین شود، که با در نظر گرفتن خصوصیات مصالح مدل مورد مطالعه، پارامتر طول بهینه برای شمع انرژی حدود ۲۵ متر است. مطالب بیان شده در پژوهش حاضر، می‌تواند کمک

پانوشتها

1. thermal response test
2. Batini
3. isotropic
4. nusselt number
5. reynolds number
6. prandtl number
7. friction factor (f_D)
8. haaland equation
9. COMSOL multiphysics
10. extremely fine
11. normal

منابع (References)

1. Batini, N., Rotta Loria, A.F., Conti, P. and et al. "Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions", *Appl. Therm. Eng.*, **86**, pp. 199-213 (2015).
2. Fadejev, J., Simson, R., Kurnitski, J. and et al. "A review on energy piles design, sizing and modelling", *Energy [Internet]*, **122**, pp. 390-407 (March, 2017).
3. Gashti, E.H.N., Uotinen, V.M. and Kujala, K. "Numerical modelling of thermal regimes in steel energy pile foundations: a case study", *Energy and Building*, **69**, pp. 165-174 (2014).
4. Lee, K.S., *Underground Thermal Energy Storage*, Springer, pp. 15-26 (2013).
5. Lund, J.W. "Direct utilization of geothermal energy", *Energies*, **3**(8), pp. 1443-1471 (2010).
6. Eu. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, *Official J. Eur. Union*, pp. 13-35 (2010).
7. Brandl, H. "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Géotechnique*, **56**(2), pp. 81-122 (2006).
8. Brandl, H. "Thermo-active ground-source structures for heating and cooling", *Procedia Eng.*, **57**, pp. 9-18 (2013).
9. Pahud, D., Dock, D., Terminal, D. and et al. "In VZ. measured thermal performances of the dock midfield energy pile system at zürich airport", *Proc. 9th IEA Heat Pump Conf.*, pp. 1-11 (20-22 May, 2008).
10. Abdelaziz, S.L., Olgun, C.G. and Martin, II J.R. "Design and operational considerations of geothermal energy piles", *Geo-Frontiers Congress*, pp. 450-459 (2011).
11. Gashti, E.H.N., Malaska, M. and Kujala, K. "Analysis of thermo-active pile structures and their performance under groundwater flow conditions", *Energy and Buildings*, **105**, pp. 1-8 (2015).
12. You, S., Cheng, X., Yu, C. and et al. "Effects of groundwater flow on the heat transfer performance of energy piles: experimental and numerical analysis", *Energy Buildings [Internet]*, **155**, pp. 249-259 (Sept, 2017).
13. Delerablee, Y., Burlon, S., Reiffsteck, P. and et al. "Numerical assessment of thermal performance and heat storage capacity of thermoactive geostructures", *Springer Ser Geomech. Geoengin.*, **1**(217729), pp. 11-18 (2019).
14. Zhang, C., Guo, Z., Liu, Y. and et al. "A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**, pp. 851-867 (2014).
15. Ghasemi-Fare, O. and Basu, P. "Influences of ground saturation and thermal boundary condition on energy harvesting using geothermal piles", *Energy and Buildings [Internet]*, **165**, pp. 340-351 (2018).
16. Guo, Y., Zhang, G., Liu, S. and et al. "Numerical study on the long-term thermal performance and ground temperature variation of energy pile in multi-layered soil", *Springer Ser Geomech Geoengin.*, **1**(217729), pp. 90-96 (2019).
17. Park, S., Lee, S., Oh, K. and et al "Engineering chart for thermal performance of cast-in-place energy pile considering thermal resistance", *Applied Thermal Engineering*, **130**, pp. 899-921 (2018).
18. Lazzari, S., Priarone, A. and Zanchini, E. "Long-term performance of BHE (borehole heat exchanger) fields with negligible groundwater movement", *Energy*, **35**(12), pp. 4966-4974 (2010).
19. Saaly, M., Maghoul, P., Kavgic, M. and et al. "Performance analysis of a proposed geothermal pile system for heating and cooling energy demand for a building in cold regions", *Sustainable Cities and Society [Internet]*, **45**, pp. 669-682 (2019).
20. Khodaparast, M., Kiani, M.A. and Bayesteh, H. "Numerical study of bearing capacity and consolidation settlement of energy piles in fine-grained soils", *Energy pile: Geotechnical Design*, pp. 57-64 (Aug 2016).
21. Amatya, B.L., Soga, K., Bourne-Webb, P.J. and et al. "Thermo-mechanical behaviour of energy piles", *Géotechnique*, **62**(6), pp. 503-519 (2012).

22. Oliaei, M., Kiani, M.A. and Torkaman, M., *Advanced Finite Difference Method for Study Energy Piles Behavior in Temperature Dependent Soils*, In: Ferrari, A. and Laloui, L., editors, *Energy Geotechnics*, pp. 105-112 (2019).
23. Faizal, M., Bouazza, A., McCartney, J.S. and et al. "Effects of cyclic temperature variations on thermal response of an energy pile under a residential building", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, **145**(10), 04019066 (2019).
24. Holman, J.P. and Holman, J.P., *Heat Transfer*, 10th Edition, p. 758 (2010).
25. Bergman, Th.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. and et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, Inc. p. 1048 (2004).
26. Haaland, S.E. "Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow", *J. Fluids Eng.*, **105**(1), pp. 89-90 (2009).
27. Comsol. "COMSOL multiphysicsTM version 5.4", User's Guide and Reference Manual, COMSOL, Burlington, Massachusetts, United States (2018).
28. Mimouni, T. "Thermomechanical characterization of energy geostructures with emphasis on energy piles", Lausanne, EPFL, 10.5075/epfl-thesis-6452 (2014).
29. DIN 8074. "Pipes of high-density polyethylene (high-density PE)", Deutsches Institut für Normung, pp. 99-105 (2011).