



شبیه‌سازی عملکرد مبدل زمینی پمپ حرارتی زمین گرمایی تعبیه شده در شمع بتوتی ساختمان

محمد مزیدی شرف آبادی^{۱*}، امیر نصیری^۲، حسین قرایی^۳

- ۱- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
 ۲- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران
 ۳- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی دانشگاه تهران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 * تهران، صندوق پستی ۱۴۶۶۵-۱۳۷، mazidim@ripi.ir

چکیده

پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی از جمله فناوری‌های رو به رشدی هستند که در جهت استحصال انرژی برای مصارف مختلف به صورت گسترده استفاده می‌شوند. از جمله دلایل این کاربرد رو به رشد می‌تواند عواملی همچون بازدهی بالا، قابلیت چشمگیر در ذخیره انرژی و هزینه عملیاتی اندک باشد. در این مقاله، نوعی از پمپ حرارتی زمین گرمایی مطالعه خواهد شد که مبدل حرارتی زمینی آن در شمع بتونی ساختمان تعبیه شده است. استفاده از شمع‌های ساختمانی که به ستون انرژی نیز معروفند هزینه‌های حفاری چاه‌های گمانه متداول را کاهش می‌دهد. در این مطالعه برای ارزیابی و درک چگونگی عملکرد ستون‌های انرژی از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌شود و تأثیر پارامترهایی نظیر ضریب هدایت حرارتی ستون، قطر ستون، قطر لوله و تعداد حلقه‌های ستون با استفاده از آن بررسی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند افزایش در هر یک از این پارامترها منجر به افزایش بازدهی پمپ حرارتی زمین گرمایی می‌شود. علاوه بر این، افزایش تعداد حلقه‌های ستون می‌تواند بر افت فشار و همچنین مقدار مورد نیاز برای به جریان در آوردن سیال تأثیرگذار باشد. نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توانند برای طراحی یا بهینه‌سازی عملکرد پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی با مبدل حرارتی زمینی جاسازی شده در شمع‌های بتنی ساختمان، استفاده شوند.

کلیدواژه‌گان: پمپ حرارتی زمین گرمایی، شمع بتونی ساختمان، ستون انرژی، مبدل حرارتی زمینی.

The performance simulation of the borehole heat exchanger of a ground source heat pump embedded in the building concrete pile

Mohammad Mazidi^{1*}, Amir Nasiri², Hossein Gharaei³

1- Assistant Professor, Research Institute for Development and Optimization of Energy Technologies, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

2- MSc, Department of Mechanical Engineering, West Tehran Branch of Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- MSc, School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 14665-137 Tehran, Iran, mazidim@ripi.ir

Received: 9 April 2020 Accepted: 6 May 2021

Abstract

Ground Source Heat Pump (GSHP) systems are growing technologies that are widely used to collect energy for different uses. This widely usage can be due to their high efficiency, considerable energy storage potential, and low operating cost. In this paper, a ground source heat pump, which its ground heat exchanger is embedded in the building concrete pile, is going to be analyzed. Building piles, also known as energy piles, reduce the cost of drilling boreholes. In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to evaluate and understand how energy piles work and the effects of some parameters such as thermal conductivity coefficient of the pile, pile diameter, pipe diameter and pile loops are investigated by using it. The results show that the increase of each of these parameters results in rising GSHP efficiency. Furthermore, increasing the number of the pile loops can affect the pressure drop and the power needed for fluid flow. The results of this work can be used for designing or optimizing the performance of the GSHP systems with the ground heat exchanger embedded in the building concrete pile.

Keywords: ground source heat pump, building concrete pile, energy pile, ground heat exchanger.



۱- مقدمه

دما میان ورودی و خروجی لوله‌های U شکل و انتقال حرارت به ازای واحد عمق حفره ارزیابی شد. علاوه بر این، نه تنها توزیع دما خاک پیرامون لوله‌های مبدل حرارتی U شکل، بلکه مقاومت حرارتی کل حفره و خاک پیرامون آن نیز ارزیابی شد. اسن^۴ و همکاران [۱۱]، مبدل حرارتی نوع مخفی را برای یک سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی-خورشیدی ارزیابی کردند. مدل‌سازی سیستم با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش انجام شد. شبکه عصبی مصنوعی و سیستم تفسیر فازی-عصبی انطباقی در مدل‌سازی به کار گرفته شدند. لی^۵ [۱۲]، عملکرد دینامیک یک سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی در یک منطقه اداری در هنگ‌کنگ را در یک دوره زمانی ده ساله بررسی کرد و رفتار کوتاه مدت و بلند مدت حفره‌ها را در این دوره ارزیابی و مقایسه نمود. مارماراس^۶ و همکاران [۱۳]، روشی کنترلی برای بهینه‌سازی یک سیستم حلقه‌ای پمپ حرارتی زمین گرمایی ترکیبی ثانویه-اولیه با استفاده از داده‌های مرکز آزمون را ارائه کردند. الگوریتم کنترلی ارائه شده، عملکرد سیستم را با بهینه‌سازی جریان پمپ حلقه ابتدایی آب چاه در حلقه دوم، برای فرستادن آب با دما مطلوب‌تر به پمپ‌های حرارتی پایین دست بهبود می‌بخشد. کنگ^۷ و همکاران [۱۴]، عملکرد حرارتی مبدل حرارتی زمینی متشکل از مجموعه‌ای از لوله‌های U شکل را با استفاده از مطالعات تجربی و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، بررسی کردند. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و با به‌کارگیری مدل آشفستگی $k-\epsilon$ RNGk حل عددی برای لوله U شکل نرم انجام شد که نتایج حاصل از آن سازگاری مناسبی را با نتایج حاصل از آزمایش نشان دادند. وانگ^۸ و همکاران [۱۵]، عواملی که باعث کاهش بازدهی در سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی می‌شوند را بررسی کردند. آن‌ها مدل‌سازی جدیدی برای پیش‌بینی رسانش حرارتی خاک در دماهای مختلف انجام دادند و مدل انتقال رطوبت و حرارت در خاک غیراشباع برای مبدل حرارتی زمینی را ارائه کردند. علاوه بر این، مدل با مقایسه نتایج آن با نتایج دیگر پژوهشگران ارزیابی گردید و در پایان نیز، تأثیرات پارامترهای مختلفی همچون نوع خاک و تخلخل آن بر ویژگی‌های مبدل حرارتی زمینی مطالعه شد. چی^۹ و همکاران [۱۶]، با توجه به این که مبدل حرارتی زمینی بخش مهمی از سیستم‌های پمپ حرارتی زمین گرمایی است و مواد مورد استفاده برای پر کردن حفره‌ها نیز تأثیر چشمگیری بر عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی زمینی دارند، مواد تغییر فاز دهنده را به‌عنوان جایگزینی برای مواد معمول جهت پر کردن حفره‌ها معرفی کردند تا بتوان عملکرد سیستم‌های پمپ حرارتی زمین گرمایی را ارتقا داد. همچنین، در مطالعه‌های دیگر پولسن و همکاران [۱۷]، میزان بازدهی یک سیستم مبدل حرارتی شمع ساختمانی که به‌منظور سرمایه‌گذاری بهره‌بردار شده بود را به‌صورت تجربی بررسی و بازده آن را بین ۲۴ تا ۳۶ درصد تخمین زدند.

در مقاله پیش رو، عملکرد مبدل گرمایی زمینی پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی خواهد شد. مدل شبیه‌سازی شده در شمع بتنی ساختمان به‌عنوان ستون انرژی تعبیه شده است. مزیت شبیه‌سازی ستون انرژی زمین گرمایی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در این است که لزوم شبکه‌بندی دامنه محاسباتی سیال، تحلیل انتقال حرارت در ستون را بهبود می‌بخشد و نسبت

نیاز رو به رشد بشر به انرژی و در پی آن استفاده از سوخت‌های فسیلی مشکلات بسیاری را به دنبال داشته است که از جمله آن‌ها می‌توان به مسائل زیست محیطی ناشی از به‌کارگیری سوخت‌های فسیلی و همین‌طور پایان‌پذیر بودن این منابع اشاره کرد. چنین مشکلاتی زمینه به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر همچون انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی و انرژی بازیافتی را بیش از پیش توسعه داده است [۱]. فشار فزاینده برای بهره‌وری انرژی و سیستم‌هایی با انرژی پایدار منجر به افزایش استفاده از پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی شده است. پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی یک تکنولوژی جایگزین پایدار برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها و خانه‌ها در اکثر شرایط جوی می‌باشند [۲]. یک پمپ حرارتی زمین گرمایی، از انرژی گرمایی ذخیره شده در زمین به‌منظور انتقال حرارت برای گرمایش یا سرمایش در ساختمان‌ها استفاده می‌کند. پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی در دهه ۱۹۷۰ میلادی به‌صورت گسترده و در تعداد زیاد در آمریکای شمالی و اروپا استفاده شدند و از آن پس کاربرد آن‌ها رو به رشد بوده است [۳]. به‌گونه‌ای که در دهه گذشته، جهان با رشد سالانه ۱۶/۶ درصدی در ظرفیت استفاده از این سیستم‌ها روبرو بوده است [۴]. پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی می‌توانند به‌صورت مؤثر در بسیاری از شرایط جوی به‌منظور فراهم کردن گرمایش یا سرمایش فضا و آب گرم خانگی استفاده شوند [۵]. استفاده از پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی نه تنها بهینه است، بلکه این پمپ‌ها نیازمند هزینه اندکی برای تعمیرات و نگهداری هستند و می‌توان انتظار داشت که به‌صورت کارآمد تا ۲۰ سال استفاده شوند [۶]. کریمی و همکاران نظر به‌ضرورت شناخت هر چه بهتر فناوری‌های روز دنیا و در راستای به‌کارگیری آن‌ها به معرفی تکنولوژی استفاده از شمع‌های بتونی به‌عنوان مبدل انرژی پرداختند و نحوه عملکرد و برخی از ملاحظات طراحی آن‌ها را به‌صورت جزئی بررسی کردند [۷].

در طول سال‌های گذشته مطالعات بسیاری در زمینه به‌کارگیری این سیستم و بررسی چگونگی عملکرد آن انجام شده است. کاروتونو^۱ و همکاران [۸]، مدل عددی مؤثری را بر اساس روش پیچیده یک بعدی-سه بعدی برای تحلیل فرآیند انتقال حرارت در یک سیستم ترکیبی ارائه دادند. این مدل‌سازی عددی برای بررسی انتقال حرارت در پیکره‌بندی‌های مختلف از ستون‌های انرژی انجام شد و تأثیر پارامترهای طراحی و اجرایی، از قبیل قطر ستون، خواص مواد به کار گرفته شده، نرخ جریان و پیکره‌بندی‌های ستون (لوله U شکل، لوله‌های U شکل دوتایی، لوله‌های U شکل سه‌تایی، سیم‌پیچ فنی شکل) ارزیابی شد. آنجلو زارلا^۲ و همکاران [۹]، سیستم‌های پمپ حرارتی زمین گرمایی را شبیه‌سازی کردند و چگونگی تأثیرگذاری جریان متغیر سیال حامل حرارت در حلقه زمینی بر روی بازدهی انرژی کل سیستم را بررسی نمودند. مدل‌سازی آن‌ها شامل مبدل‌های حرارتی حفره‌ای، پمپ حرارتی، بار ساختمان و استراتژی‌های کنترلی می‌شود. تحلیل برای یک لوله واحد U شکل، لوله دوتایی U شکل و مبدل‌های حرارتی با لوله هم محور انجام شد. کاو^۳ و همکاران [۱۰]، عملکرد حرارتی نوع جدیدی از مبدل حرارتی زمینی با موادی از فولاد با رسانش حرارتی بالاتر را با استفاده از دو روش کاملاً تجربی (دفن لوله‌ها در زمین در عمق ۱۰۰ متر) و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. عملکرد حرارتی بر اساس اختلاف

4. Esen
5. Lee
6. Marmaras
7. Kong
8. Wang
9. Qi

1. Carotenuto
2. Zarrella
3. Cao





شکل ۲ واحد سیار مورد استفاده برای بررسی پاسخ حرارتی در سایت آزمون [۱۶]

آزمایش‌های مربوط به بررسی پاسخ حرارتی با تجهیزات نشان داده در شکل ۲ انجام می‌شوند. این مجموعه آزمایشی برای گرم کردن سیال با نرخ حرارتی ثابت استفاده می‌شود. شار حرارتی ثبت شده از این واحد به اندازه $\pm 5\%$ نوسان دارد. این واحد سیار برای به حداقل رساندن اثرات محیطی بر نتایج آزمایش عایق‌بندی شده است. درون واحد سیار عایق‌بندی شده، یک گرمکن برقی، یک واحد کنترلی، یک پمپ و سنسورهای دمایی برای اندازه‌گیری دمای جریان ورودی و خروجی وجود دارند.

۳- هندسه مدل

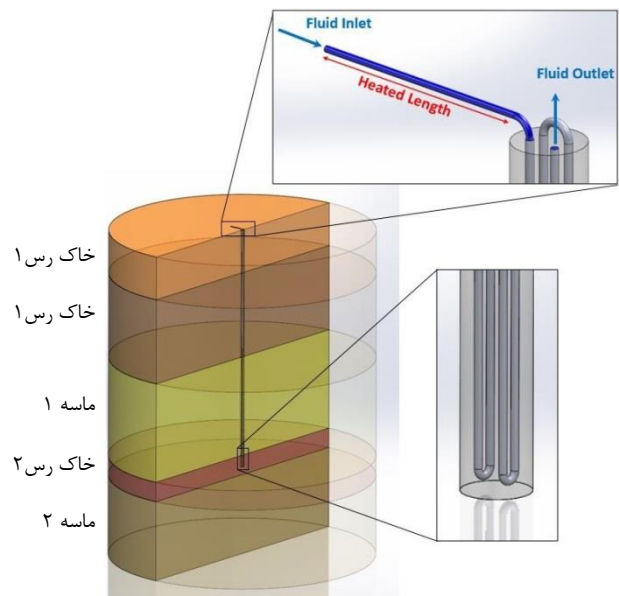
برای مدل‌سازی هندسی محدوده خاک، به شکل سیلندری با قطر بزرگ در نظر گرفته می‌شود که پیرامون شمع به قطر ۳۰ سانتی‌متر را پوشش می‌دهد. ارتفاع کلی محدوده خاک ۲۵ متر و قطر این دامنه نیز در حدود ۲۰ متر است. عمق شمع ۱۸/۳ متر است و حلقه‌های مرکزی تا انتهای شمع امتداد می‌یابند. قطر خارجی لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا برابر ۳/۳۴ سانتی‌متر و ضخامت آن‌ها نیز ۳ میلی‌متر است. قطر دامنه سیال نیز ۲/۷۳ سانتی‌متر است که با قطر داخلی لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا برابر است. طول آغازین گرم شده ۱ متر است که سیال با عبور از آن در اثر اعمال شار حرارتی توسط گرمکن گرم می‌شود و سپس به سمت لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا جریان می‌یابد. در شبیه‌سازی طول آغازین گرم شده، شار حرارتی مستقیماً به دامنه سیال به جای لوله اعمال می‌شود.

مدل از هشت دامنه شامل دامنه سیال، لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا، شمع ۳۰ سانتی‌متری و پنج لایه خاک تشکیل شده است. ویژگی‌های هر دامنه در جدول ۱ نشان داده شده و لایه‌های خاک بر اساس عمق آن‌ها مرتب شده‌اند. خواص فیزیکی ارائه شده در این جدول با نمونه‌برداری از لایه‌های خاک و همچنین دوغاب بتونی شمع و آزمایش آن‌ها مطابق با استاندارد ASTM D5334 به دست آمده‌اند.

به مدل‌های ساده‌سازی شده دیگر و حتی آزمایش انجام شده، جزئیات بیشتری از جریان سیال و انتقال حرارت در ستون را ارائه می‌دهد.

۲- مطالعه تجربی [۱۸]

سایت آزمون در ایالت تگزاس آمریکا واقع شده و از سه شمع بتونی به‌عنوان ستون انرژی تشکیل شده است که می‌توانند به‌صورت مجزا و به‌صورت گروهی آزمایش شوند. هر یک از سه ستون از حلقه‌هایی با قطر لوله ۱ اینچ (۲۵ میلی‌متر) که تا عمق ستون کشیده شده‌اند، تشکیل می‌شوند. دو ستون با مخلوط بتن پر شده‌اند که یکی از آن‌ها ۳۰ سانتی‌متر و دیگری ۴۵ سانتی‌متر قطر دارد. ستون سوم، ستونی با قطر ۳۰ سانتی‌متری است که میدل حرارتی زمینی در آن قرار دارد و با دوغاب حرارتی از جنس بنتونیت-سیلیس^۱ پر شده است. نتایج حفاری خاک، لایه‌های خاک رس و شن را نشان می‌دهد. اولین لایه، خاک رس است که تا عمق ۱۰ متر را می‌پوشاند. سفره آب زمینی در اولین لایه خاک رس و در عمق ۳/۳ متری یافت می‌شود. لایه بعدی را ماسه تشکیل می‌دهد که در عمق ۱۷-۱۰ متری قرار می‌گیرد. سومین لایه، لایه نسبتاً نازکی از خاک رس به ضخامت ۱/۵ متر است و چهارمین لایه، ماسه است که تا عمق نهایی حفاری یعنی ۲۱ متر ادامه دارد. ستون از دو حلقه سری تشکیل شده است که در بالا به یکدیگر متصل می‌شوند. ورودی مدل در سطحی بالاتر از سطح خاک قرار گرفته است و سیال به‌سرعت وارد طول آغازین گرم شده می‌گردد که نرخ حرارت برای گرم کردن سیال در این قسمت، پیش از ورود به اولین حلقه در ستون، به‌عنوان ورودی شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. سپس سیال در دو حلقه‌ای که به‌صورت سری به‌وسیله یک اتصال U شکل در سطح بالایی ستون به یکدیگر متصل شده‌اند، جریان می‌یابد و سپس به خارج ستون هدایت می‌شود. جزئیات شمع ۳۰ سانتی‌متری به همراه لایه بندی خاک اطراف آن در شکل ۱ نشان داده است. در این شکل جهت ارائه بهتر ورودی، خروجی، طول آغازین گرم شده و اتصال U شکل حلقه‌ها، قسمت فوقانی و تحتانی شمع در مقیاس بزرگتری نمایش داده شده است.



شکل ۱ طرح‌واره شمع ۳۰ سانتی‌متری با جزئیات [۱۶]

2. High density polyethylene (HDPE) pipe

1. bentonite-silica grout

۵- معادلات حاکم

در این مقاله از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS 13.0 CFX برای شبیه سازی عددی استفاده شده است [۱۹]. معادلات حاکم به معادله پیوستگی، معادله بقای مومنتوم و معادله بقای انرژی تجزیه می شوند. این معادلات در مجموعه نرم افزاری ANSYS حل می شوند [۱۹]. معادله پیوستگی که بر بقای جرم دلالت دارد، به صورت زیر است [۲۰]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای مومنتوم نیز به صورت زیر نمایش داده می شود [۱۸]:

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

تانسور تنش، τ ، موجود در رابطه (۲) را می توان به صورت زیر به نرخ کرنش مرتبط ساخت [۱۸]:

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right) \quad (3)$$

معادله بقای انرژی، معادله (۴)، برای سیالاتی که می توان از تأثیرات چگالی متغیر در آن ها صرف نظر کرد، مناسب است. اثرات تغییر چگالی آب در این تحلیل نادیده گرفته شده است و خواص آب ثابت فرض می شود [۱۸]:

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U e) = \nabla \cdot (k \nabla T) - p \nabla U + \tau : \nabla U + S_E \quad (4)$$

عدد رینولدز جریان مطابق با داده های تجربی برابر ۲۶۰۰۰ است. زمانی که عدد رینولدز به مقدار ۲۳۰۰ می رسد، جریان مغشوش در یک لوله مدور توسعه می یابد [۲۰]. بنابراین عدد رینولدز محاسبه شده تأیید می کند که جریان در لوله های پلی اتیلن با چگالی بالا مغشوش است. معمولاً مدل مغشوشی به کار گرفته می شود که تعادل مناسبی میان هزینه حل عددی و دقت محاسباتی فراهم کند و زمانی که در کنار دیگر مدل های مغشوش ارزیابی می شود، نتایجی با همگرایی مناسب و زمان محاسباتی نسبتاً سریع فراهم آورد. در این مطالعه، از مدل مغشوش $k-\epsilon$ استفاده می شود که یک مدل مغشوش دو معادله ای است.

۶- شرایط اولیه و مرزی

مدل دینامیک سیالات محاسباتی با شرایط اولیه و شرایط مرزی مطابق با شرایط آزمایش توصیف شده در بخش (۲) تنظیم شده است. دمای اولیه برای تمام دامنه های جامد ۲۲ درجه سلسیوس و برای سیال ۲۵/۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. دامنه های سیال و جامد، دمای اولیه متفاوتی دارند، زیرا در ابتدا آزمایش و قبل از شروع جریان در لوله، سیال نسبت به زمین دما بالاتری دارد. سیال در ستون به مدت ۲۰ دقیقه جریان می یابد تا این که دمای متوسط سیال به کمتر از ۲۵/۵ درجه سلسیوس برسد. سپس گرمکن روشن و آزمایش شروع می شود.

از آنجا که هدف از این مطالعه شبیه سازی اثرات دمای محیط یا اثرات تشعشع خورشید نیست، بنابراین سطوح تمامی دامنه های جامد در سطح زمین و بخش هایی از لوله که بالای سطح زمین قرار دارند، آدیاباتیک در نظر گرفته شده اند. شرایط مرزی دیواره های بیرونی مدل به صورت دما ثابت و برابر با دمای زمین در نظر گرفته شده است. زمین به عنوان یک چاه بینهایت شبیه سازی شده است. دمای این دیواره ها ۲۲ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده اند که فرض می شود در طول دوره شبیه سازی ثابت باقی می ماند.

شرایط واقعی جریان در داخل ستون به منظور شبیه سازی انتقال حرارت و بررسی رفتار حرارتی سیال تا حد ممکن اعمال شده است. دبی جریان ورودی، ثابت و برابر ۳۳/۷ لیتر در دقیقه و سرعت سیال داخل لوله ۰/۹۶ متر بر ثانیه، با توجه به داده های گزارش شده از آزمایش در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ مشخصات دامنه های محاسباتی [۱۶]

دامنه های موجود	عمق، z(m)	چگالی، ρ (kg/m ³)	رسانش حرارتی، k(W/mK)	ظرفیت حرارتی، C_p (J/kgK)
خاک رس	۰ - ۳/۳	۱۷۵۰	۱/۷	۹۵۰
بالای سفره آب				
خاک رس	۳/۳ - ۹/۸	۲۰۹۵	۲/۲۲	۱۰۱۹
پایین سفره آب				
ماسه ۱	۹/۸ - ۱۷/۴	۱۹۸۴	۴/۰۵	۸۹۸
خاک رس ۲	۱۷/۴ - ۱۸/۹	۱۹۷۱	۲/۰۹	۱۱۱۰
ماسه ۲	۱۸/۹ - ۲۵	۱۹۸۴	۴/۰۵	۸۹۸
شمع ۳۰	۰ - ۱۸/۳	۲۰۴۹	۱/۳۵	۹۰۹
سانتی متری				
لوله پلی اتیلن	۰ - ۱۸/۳	۹۵۰	۰/۴۵	۲۲۵۰
با چگالی بالا				
آب	۰ - ۱۸/۳	۹۹۷	۰/۶۰۶۹	۴۱۸۱/۷

۴- شبکه بندی دامنه های محاسباتی

در این مطالعه، شبکه بندی برای لایه های خاک، شمع و جداره لوله توسط نرم افزار ANSYS Meshing و برای سیال توسط نرم افزار ICEM CFD تولید شده است [۱۹]. از مش شش وجهی برای دامنه های خاک و شمع ۳۰ سانتی متری به منظور کاهش تعداد المان ها استفاده شده است. دامنه خاک به اندازه ای بزرگ است که می توان از اثرات انتقال حرارت بر روی دیواره های آن صرف نظر نمود [۱۸]. حداکثر اندازه المان های موجود در دامنه شمع، ۳ سانتی متر در نظر گرفته شده است تا از دقت نتایج عددی اطمینان حاصل گردد.

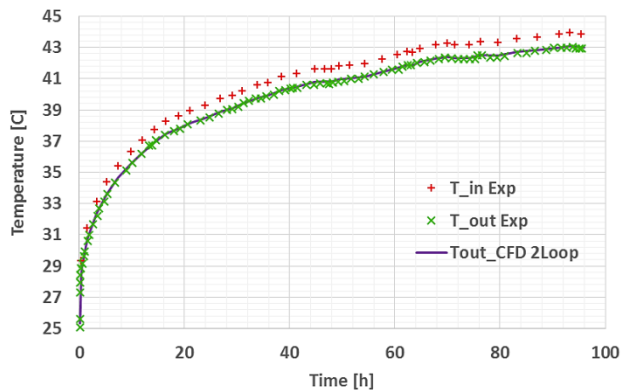
بر روی دیواره های دامنه سیال المان های لایه مرزی ایجاد شده است تا ناحیه لایه مرزی نیز تحلیل شود. جداسازی این ناحیه از کل دامنه سیال اطلاعات زیادی درباره انتقال حرارت در این دامنه فراهم می کند. در این دامنه به منظور کاهش تعداد المان ها و در نتیجه کاهش زمان محاسبات و همچنین جهت بالا بردن کیفیت مش، از مش سازمان یافته استفاده شده است. با این وجود، از ده لایه که ضخامت لایه اول آن ها ۱۰ میکرون است، برای لایه مرزی استفاده شده است.

اندازه المان ها در این مدل به دلیل تفاوت در ابعاد دامنه های محاسباتی به صورت قابل ملاحظه ای متفاوت می باشند، به طوری که قطر دامنه خاک ۲۰ متر و ضخامت دامنه لوله تنها ۳ میلی متر است. همین تفاوت در ابعاد، چالشی برای کم نگه داشتن تعداد المان ها ایجاد می کند. تعداد المان های شبکه بندی مدل در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ تعداد المان ها در هر دامنه از شبکه بندی مدل

دامنه ها	تعداد المان ها
خاک رس بالای سفره آب زیرزمینی	۳۵۰۰
خاک رس پایین سفره آب زیرزمینی	۵۹۰۰
ماسه ۱	۷۰۰۰
خاک رس ۲	۱۲۰۰
ماسه ۲	۲۰۰۰
شمع ۳۰ سانتی متری	۵۷۰۰۰
لوله پلی اتیلن با چگالی بالا	۵۴۰۰۰
آب	۲۱۳۰۰۰





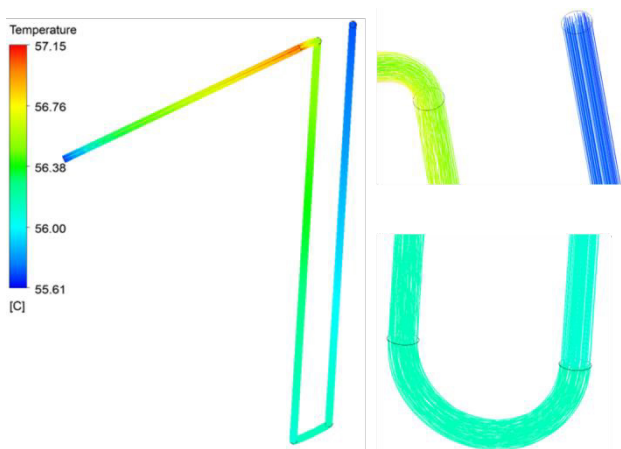
شکل ۴ مقایسه دمای خروجی به دست آمده از حل عددی با نتایج تجربی برای ستون دو حلقه‌ای

برای شبیه‌سازی گذار، گام زمانی برای ۷ و ۴ دقیقه آزمایش و شبیه‌سازی برای بازه زمانی ۹۶ ساعت انجام شد که تفاوت چشمگیری در مقادیر دما با استفاده از این دو گام زمانی مشاهده نشد. از آنجا که کوچک کردن گام زمانی تأثیری در نتایج حل نداشت، ادامه شبیه‌سازی گذار با گام زمانی ۷ دقیقه انجام شد.

۸-۱- بررسی میدان جریان سیال

جداسازی دامنه سیال و تحلیل جریان، اطلاعات زیادی را درباره چگونگی عملکرد ستون انرژی ارائه می‌دهد. شکل ۵ خطوط جریان دامنه سیال را نشان می‌دهد. خطوط جریان برای گام زمان نهایی حل نشان داده شده‌اند. خطوط جریان نشان می‌دهند که چگونه بعد از خروج جریان از ناحیه حرارت داده شده آغازین و ورود آن به زمین، اختلاط رخ داده است. نمای بزرگ شده این قسمت، اختلاط را به‌وضوح نمایش می‌دهد.

دمای خطوط جریان بر اساس عمق ستون انرژی در شکل ۶ رسم شده است. در این شکل نقطه صفر، سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود اختلاط در محل ورود سیال به لوله اتفاق می‌افتد. توزیع دما در طول لوله، یک توزیع خطی در مدار لوله را نشان می‌دهد. توزیع خطی دما در طول مدار لوله توسط مارکیویچ ۱ تأیید شده است [۲۱]. مارکیویچ نشان داد که استفاده از دبی بالا با سرعتی برابر ۱ متر بر ثانیه منجر به ایجاد توزیع دما خطی در مدار گردش لوله می‌شود.



شکل ۵ خطوط جریان در دامنه سیال

1. Markiewicz

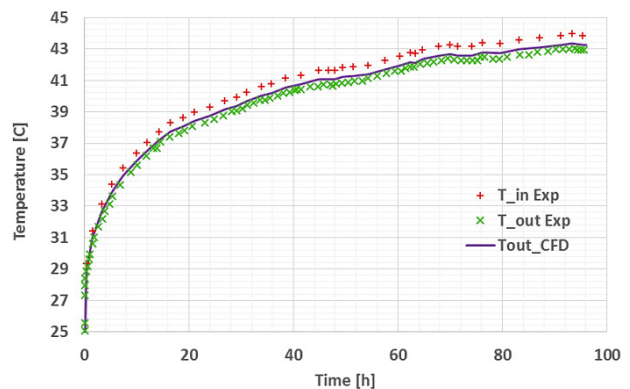
فشار استاتیک (نسبی) جریان خروجی برابر با صفر است. این قید فشار در خروجی جریان، حداکثر فشار جریان در ورودی لوله را ایجاد می‌کند که برابر با افت فشار کل در سیستم است. روی دیواره لوله شرط عدم لغزش اعمال شده و زبری سطح برابر با ۱/۵ میکرون در نظر گرفته شده است.

۷- صحه‌گذاری مدل

به‌منظور اعتبارسنجی مدل دینامیک سیالات محاسباتی، از دمای ورودی سیال در مطالعه تجربی به‌عنوان شرط مرزی دمایی در ورودی لوله استفاده می‌شود و بخشی از دامنه سیال که در ابتدای لوله به آن حرارت داده شده است، در نظر گرفته نمی‌شود. با حل عددی مدل، صحت و دقت آن اعتبارسنجی شد که مشخص گردید دمای خروجی مدل با دمای خروجی به دست آمده از آزمایش سازگاری خوبی دارد. دمای ورودی و خروجی به دست آمده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایش برای ستون تک حلقه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است. اعمال این شرط برای دمای ورودی به سیستم اجازه می‌دهد تا مدل دمای خروجی جریان در هر گام زمانی را محاسبه کند. با توجه به شکل ۳، دمای خروجی به دست آمده از حل عددی، اندکی متفاوت از دمای حاصل از آزمایش است. این اختلاف به این دلیل است که آزمایش برای ستونی با دو حلقه انجام شده، در حالی که حل اولیه دینامیک سیالات محاسباتی برای ستونی با یک حلقه به دست آمده است. بنابراین، تحلیل عددی برای ستونی با دو حلقه نیز انجام شد که نتیجه آن با نتایج تجربی تطابق کامل داشت. این نتایج در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

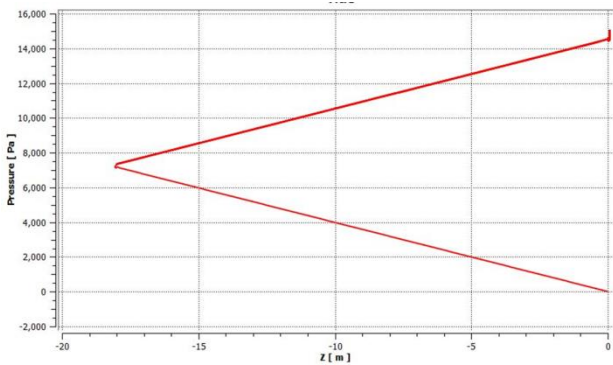
۸- نتایج و تفسیر آن‌ها

به‌منظور استخراج نتایج و مطالعه پارامتری، مدل بیشتر توسعه داده شده است. در آزمایش جریان سیال باید از داخل پمپ و گرمکن عبور کند؛ این امر باعث می‌شود که شرایط ورودی سیال به لوله متفاوت از مقدار خروجی از آن باشد. بنابراین، در عمل مشخصه‌های جریان در خروجی، نظیر سرعت، فشار و شدت توربولانسی را نمی‌توان دوباره به‌عنوان ورودی در گام زمانی بعدی در نظر گرفت. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، شار حرارتی ثابت در قسمت آغازین لوله به سیال اعمال می‌شود. شار حرارتی اعمال شده به این قسمت از سیال، برابر با مقدار ورودی نرخ حرارت در مطالعه تجربی، یعنی برابر با توان خروجی گرمکن در آزمایش است. تحلیل‌های عددی این مقاله برای ستونی با یک حلقه به‌عنوان مدل حالت پایه انجام شده است.

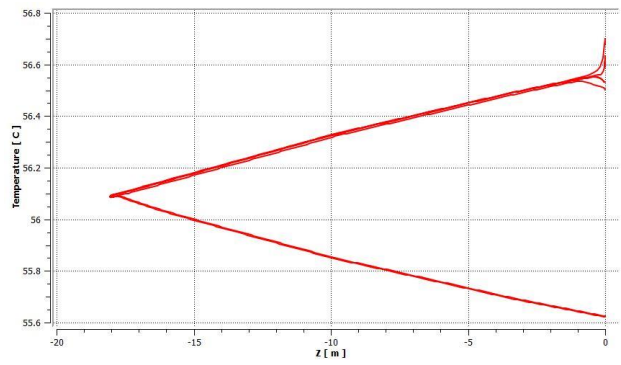


شکل ۳ مقایسه دمای خروجی حاصل از حل عددی با نتایج تجربی برای ستون تک حلقه‌ای

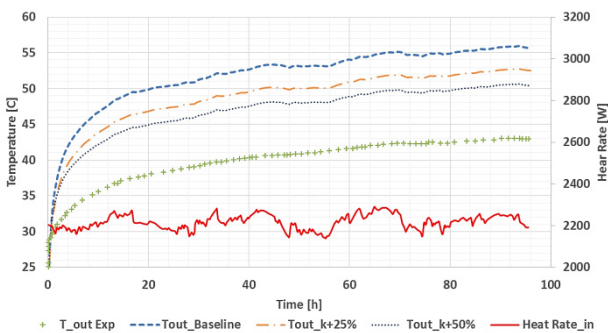




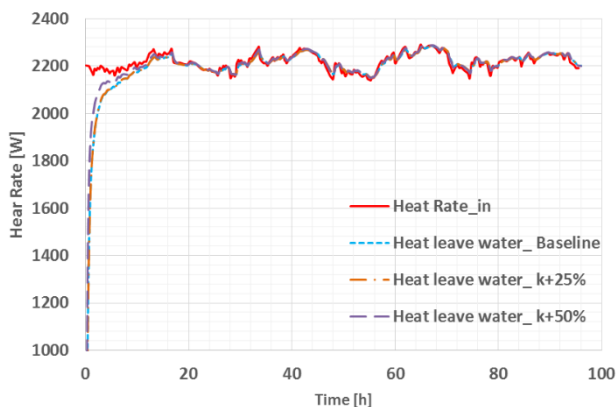
شکل ۸ افت شار در طول لوله بر حسب عمق ستون تک حلقه‌ای



شکل ۶ تغییرات دمای سیال داخل لوله بر حسب عمق ستون



شکل ۹ مقایسه تغییرات دمای خروجی سیال برای مقادیر مختلفی از ضریب هدایت حرارتی ستون



شکل ۱۰ مقایسه نرخ حرارت خروجی از سیال برای مقادیر مختلفی از ضریب هدایت حرارتی ستون

تغییرات شار حرارتی خروجی از طریق دیواره‌های شمع به خاک با گذشت زمان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. زمان زیادتری طول می‌کشد تا شار حرارتی خروجی از طریق دیواره‌های ستون به خاک در مقایسه با شار حرارتی خروجی از سیال توسعه یافته شود. شار حرارتی خروجی از شمع پس از ۳۰ ساعت با شار حرارتی ورودی منطبق می‌شود. انتظار می‌رود انتقال حرارت از سطوح شمع با تأخیر نسبت به نرخ حرارت ورودی انجام شود، زیرا برای شمع زمان بیشتری مورد نیاز است تا حرارت را از سیال جذب کند.

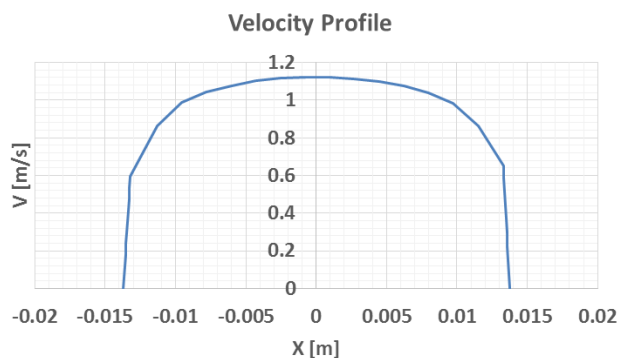
پروفیل سرعت در لوله در عمق ۱۰ متری در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته است و انتظار می‌رود حداکثر سرعت در محور لوله رخ دهد و با نزدیک شدن به دیواره‌ها سرعت کم شود و به دلیل شرط مرزی عدم لغزش، مقدار سرعت در دیواره‌ها به صفر برسد.

افت فشار کل در داخل لوله یک مؤلفه کلیدی در عملکرد ستون انرژی است که از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برابر ۱۵ کیلو پاسکال برای شمع ۳۰ سانتی‌متری با یک حلقه به دست می‌آید. شکل ۸ نمودار افت فشار بر حسب عمق ستون را نشان می‌دهد.

۲-۸- بررسی اثر ضریب هدایت حرارتی ستون

برای بررسی اثر ضریب هدایت حرارت ستون، شبیه‌سازی برای مقادیر افزایش یافته ضریب هدایت حرارتی انجام شده است. میانگین دمای ورودی و خروجی از زمین برای مقادیر مختلف ضریب هدایت حرارتی ستون در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب هدایت حرارتی نسبت به مقدار پایه، اثر آن روی پاسخ دمایی کمتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب هدایت حرارتی، دمای خروجی به دست آمده از تحلیل عددی به دمای خروجی آزمایش نزدیکتر می‌شود.

نرخ حرارت ورودی به سیال در طول آغازین لوله به همراه شار حرارتی کلی خروجی از سیال در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تقریباً ۱۰ ساعت طول می‌کشد تا شار حرارتی خروجی از سیال با شار حرارتی ورودی به آن برابر شود. نرخ حرارت خروجی از سیال به اندازه ۱۰ وات کمتر از متوسط نرخ حرارت ورودی است. انتظار می‌رود نرخ حرارت خروجی از سیال، کمی کمتر از نرخ حرارت ورودی باشد.



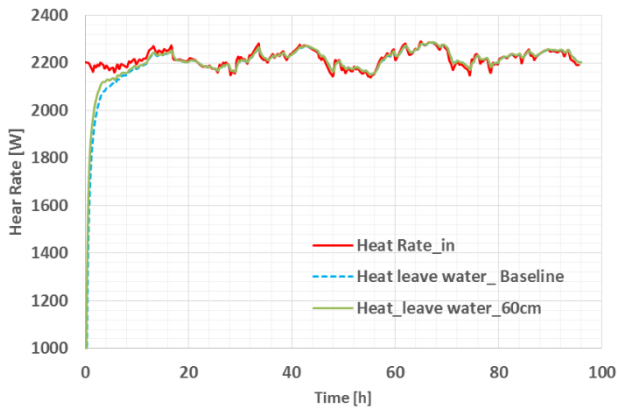
شکل ۷ پروفیل سرعت سیال در عمق ۱۰ متری لوله



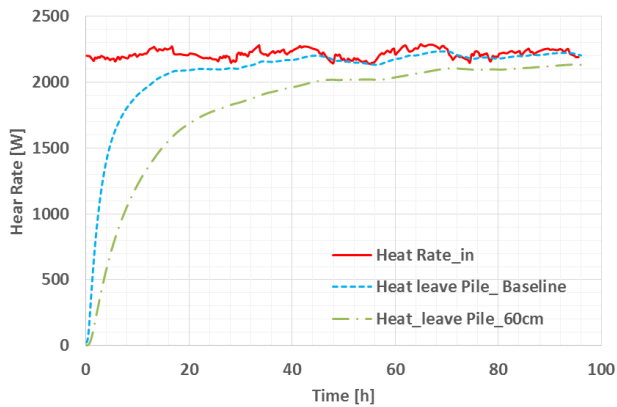
فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال هشتم ، شماره دوم پاییز و زمستان ۱۴۰۰

فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال هشتم ، شماره دوم پاییز و زمستان ۱۴۰۰

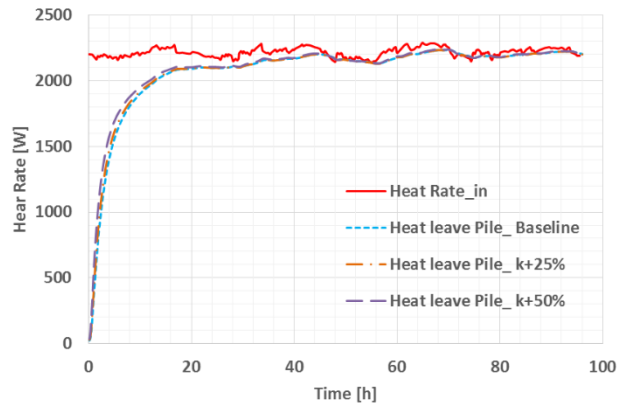




شکل ۱۳ مقایسه نرخ حرارت خروجی از سیال برای دو ستون با قطر متفاوت



شکل ۱۴ مقایسه حرارت منتقل شده از ستون‌ها با قطر متفاوت به خاک



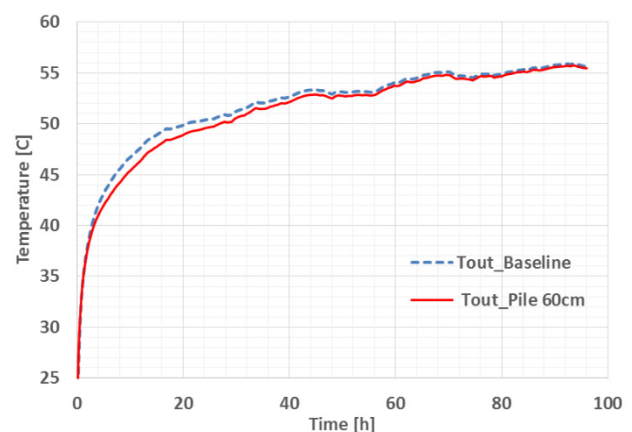
شکل ۱۱ مقایسه حرارت منتقل شده از شمع به خاک برای مقادیر مختلفی از ضریب هدایت حرارتی

۳-۸- بررسی اثر ایجاد تغییر در قطر ستون

در این بخش، قطر ستون دو برابر مدل حالت پایه در نظر گرفته می‌شود، به عبارت دیگر دو شمع به قطرهای ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. با تغییر قطر ستون، پاسخ زمانی ستون تغییر خواهد کرد. افزایش قطر باعث افزایش فاصله بین لوله‌ها می‌شود و در این صورت فضای کافی برای تبادل حرارت را خواهند داشت. طول لوله‌ها و فاصله بین آن‌ها، نقش اساسی در پاسخ حرارتی سیال دارند. با زیاد شدن قطر، جرم حرارتی شمع نیز بزرگتر می‌شود؛ بنابراین، توانایی آن برای جذب حرارت از آب و بازگرداندن حرارت به خاک نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، هرچه حجم ستون بیشتر شود، واکنش دمایی آن کندتر خواهد شد و زمان مورد نیاز برای ثابت شدن نرخ انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش دو برابری قطر، بتن مورد نیاز برای پر کردن شمع نیز افزایش می‌یابد.

نمودار دمای خروجی سیال از ستون بر حسب زمان برای هر دو ستون در شکل ۱۲ رسم شده است. با توجه به این شکل، دمای خروجی سیال از ستون‌ها پس از گذشت ۹۶ ساعت برابر می‌شود و اختلاف دمای بین آن‌ها در طول ۵۰ ساعت اولیه در حدود ۱ درجه سلسیوس می‌باشد که با گذشت زمان به صفر می‌رسد.

شکل ۱۳ نرخ حرارت خروجی از سیال برای شمع به قطر ۶۰ سانتی‌متری را در مقایسه با شار ورودی و خروجی به سیال برای ستون با قطر ۳۰ سانتی‌متر به تصویر می‌کشد. همان طور که در این شکل مشخص است اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین عملکرد ستون‌ها مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۲ مقایسه تغییرات دمای خروجی سیال برای دو ستون با قطر متفاوت

مقدار حرارت منتقل شده از ستون‌ها به خاک در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که حرارت خروجی و ورودی در هر لحظه، برای ستون با قطر بزرگتر کمتر از ستون با قطر کوچکتر است و حتی با گذشت ۹۶ ساعت نیز مقدار حرارت خارج شده با حرارت ورودی برابر نخواهد شد. با توجه به شکل، افزایش مقدار حرارت خارج شده از سطوح شمع کوچکتر، بیشتر است. زمانی که نرخ حرارت ورودی برای هر دو شمع یکسان باشد، انتقال حرارت شمع در ستون کوچکتر، سریعتر اتفاق می‌افتد و این مسأله ناشی از افزایش مقاومت حرارتی در اثر افزایش قطر ستون است.

۴-۸- بررسی اثر تغییر در قطر لوله

در این بخش قطر لوله به اندازه ۵۰٪ افزایش داده شده است. تغییرات دمای خروجی سیال برای دو ستون در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده در شرایطی که نرخ حرارت ورودی برای هر دو ستون یکسان باشد، دمای خروجی سیال از ستون با لوله‌های بزرگتر به اندازه ۵ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. افزایش قطر لوله باعث می‌شود سطح تماس سیال با ستون افزایش یابد و مقاومت حرارتی میان لوله و ستون نیز کمتر شود.

نرخ حرارت خروجی سیال در هر دو ستون، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در ستون با لوله‌های بزرگتر، مدت زمان بیشتری نیاز است تا نرخ حرارت خروجی با مقدار حرارت ورودی برابر شود.

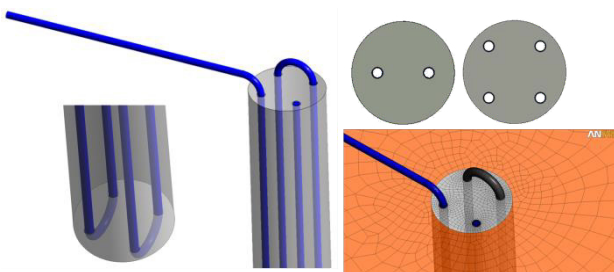


۵-۸- بررسی اثر افزایش تعداد حلقه‌ها

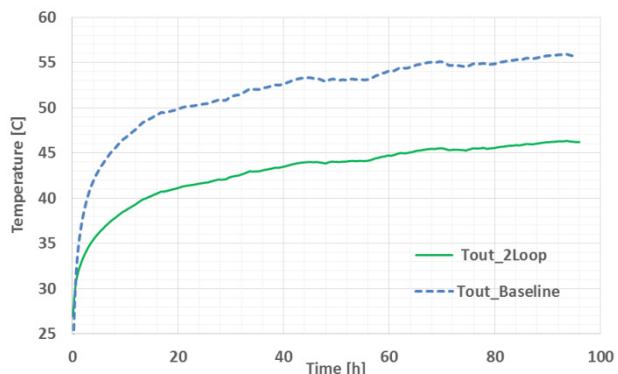
آرایش حلقه‌های داخل شمع می‌تواند عملکرد ستون را به‌طور کلی تحت تأثیر قرار دهد. در این بخش، ستونی با قطر ۳۰ سانتی‌متر و با دو حلقه شبیه‌سازی شده که پیکربندی آن در شکل ۱۸ نشان داده شده است. با افزایش هر حلقه، دو عدد لوله به شمع اضافه می‌شود.

تغییرات دمای خروجی سیال برای ستون تک حلقه‌ای و دو حلقه‌ای در شکل ۱۹ نشان داده شده است. پاسخ دمایی برای هر دو ستون روند یکسانی دارد ولی دمای نهایی آن‌ها با یکدیگر اختلاف دارند. از آنجا که سطح انتقال حرارت در داخل ستون دو حلقه‌ای افزایش یافته است، دمای نهایی آن نیز کمتر است. سیال با شارژ حرارتی اعمالی یکسانی به شمع با دو حلقه وارد می‌شود و طول بیشتری را در داخل زمین طی می‌کند و حرارتش را از دست می‌دهد. بنابراین می‌توان با بیشتر کردن تعداد حلقه‌ها و در واقع طولانی کردن مدار گردش آب، بازدهی پمپ حرارتی را افزایش داد؛ به عبارت دیگر، پاسخ دمایی ستون با افزایش تعداد حلقه‌ها سریعتر و به دنبال آن انتقال حرارت به زمین نیز با سرعت بیشتری انجام خواهد شد. علاوه بر این، افزایش مساحت باعث دفع مؤثرتر حرارت به زمین می‌شود.

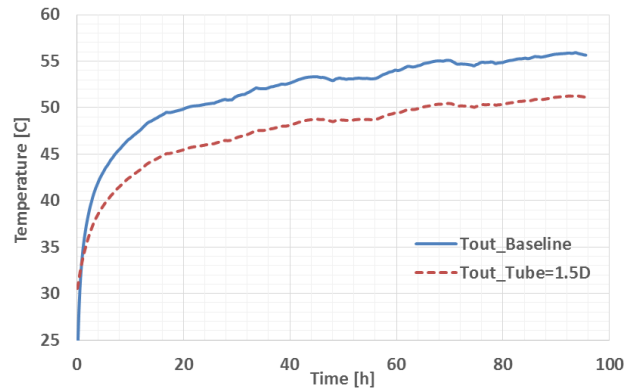
شار حرارتی خروجی سیال در هر دو ستون، در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، شار حرارتی خروجی سیال در هر دو ستون یکسان است. اگر چه مقادیر دما در دو ستون متفاوت هستند، اما اختلاف دمای بین سیال و لوله در هر دو ستون تقریباً ناچیز است. شار حرارتی خروجی از شمع‌ها در شکل ۲۱ نشان داده شده است. شار حرارتی خروجی از ستون در هر دو مدل مشابه است. این نمودار نشان می‌دهد که آرایش متفاوت حلقه‌ها، بر خلاف افزایش قطر، تأثیری در شار حرارتی خروجی کلی از ستون ندارد.



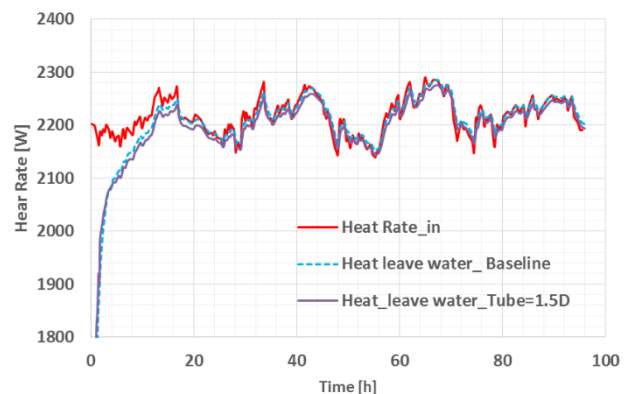
شکل ۱۸ پیکربندی ستون با قطر ۳۰ سانتی‌متر و با دو حلقه



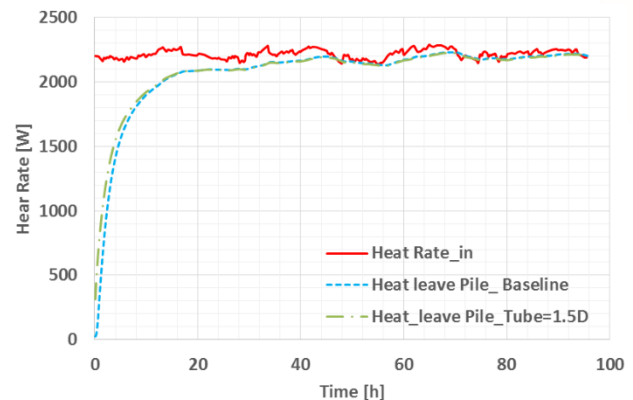
شکل ۱۹ تغییرات دمای خروجی سیال برای ستون تک حلقه‌ای و دو حلقه‌ای



شکل ۱۵ مقایسه تغییرات دمای خروجی سیال برای دو لوله با قطر متفاوت



شکل ۱۶ مقایسه نرخ حرارت خروجی از سیال برای دو لوله با قطر متفاوت

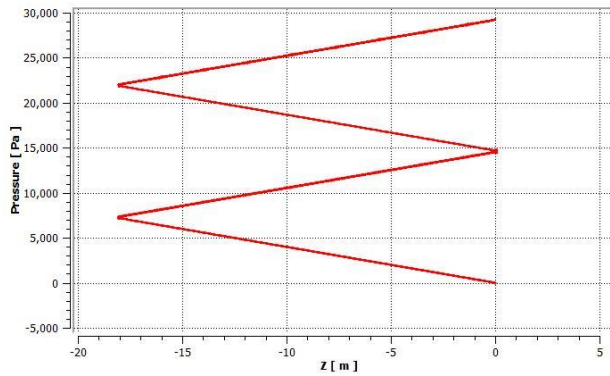


شکل ۱۷ مقایسه نرخ حرارت خروجی از شمع برای دو لوله با قطر متفاوت

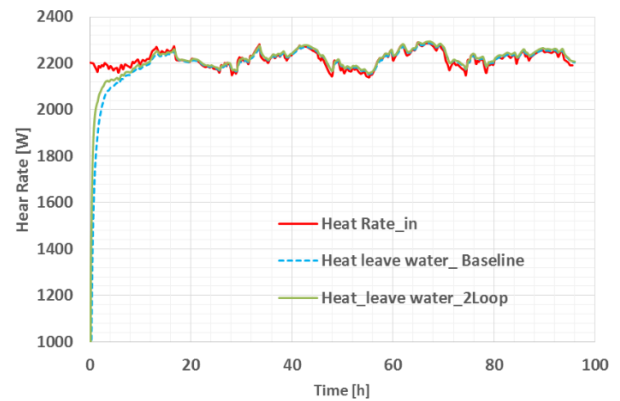
شکل ۱۷ نرخ حرارت خروجی از شمع به خاک را نمایش می‌دهد. روند افزایش حرارت خروجی و نیز مدت زمان مورد نیاز برای برابر شدن نرخ حرارت ورودی و خروجی در هر دو شمع برابر است؛ بنابراین، تنها علت کاهش دما خروجی می‌تواند افزایش مساحت انتقال حرارت و یا همان کاهش مقاومت حرارتی باشد که با افزایش قطر لوله ایجاد شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که بازدهی ستون با بزرگ شدن قطر لوله افزایش یافته است. البته افت فشار نیز باید بررسی شود که با توجه به ثابت بودن طول لوله، افت فشار تغییر چندانی نخواهد داشت.



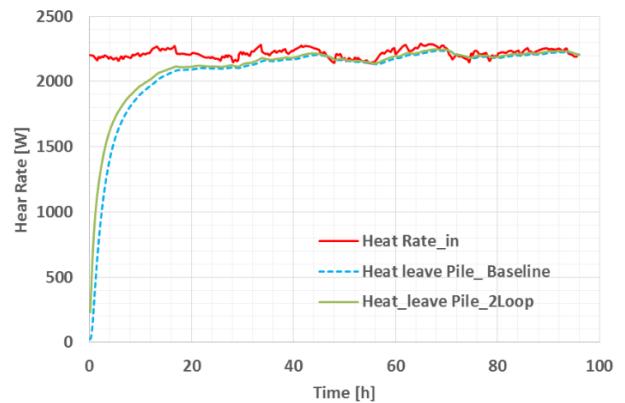
فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو



شکل ۲۳ تغییرات فشار با عمق در ستون دو حلقه‌ای



شکل ۲۰ مقایسه نرخ حرارت خروجی از سیال در دو ستون تک و دو حلقه‌ای



شکل ۲۱ مقایسه شار حرارتی خروجی به خاک از ستون‌های تک و دو حلقه‌ای

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد مدل حرارتی زمین گرمایی به روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شد و پس از صحت‌گذاری حل عددی، تأثیر پنج پارامتر مختلف شامل ضریب رسانش حرارتی ستون، قطر شمع، قطر لوله و همچنین تعداد حلقه‌های ستون بر روی عملکرد آن بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش ضریب رسانش حرارتی ستون باعث افزایش کارایی ستون و کاهش بیشتر دمای خروجی سیال نسبت به حالت اولیه می‌شود. از آنجائی که افزایش قطر ستون‌ها منجر به افزایش انتقال حرارت به زمین می‌شود، بنابراین عملکرد بهتری از ستون با قطر بزرگتر مشاهده شد. به‌علاوه، با افزایش قطر لوله سطح انتقال حرارت زیاد شد و در نتیجه بازدهی ستون انرژی نیز افزایش یافت. همچنین، بیشتر شدن تعداد حلقه‌ها، باعث افزایش مساحت مؤثر برای انتقال حرارت از سیستم به زمین اطراف شمع گردید و کارایی آن بهبود یافت. از طرف دیگر، افزایش تعداد حلقه‌ها باعث افزایش افت فشار در سیستم گردش آب می‌شود و توان مورد نیاز برای به جریان درآوردن آب در مدار لوله‌ها را افزایش می‌دهد. بنابراین در زمان بهینه‌سازی سیستم باید همه جوانب را در نظر گرفت.

۱۰- فهرست علائم

C_p ظرفیت حرارتی ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

e انرژی مخصوص (Jkg^{-1})

k رسانش حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

p فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

S ترم چشمه

t زمان (s)

T دما (K)

U بردار سرعت (ms^{-1})

x راستای شعاعی (m)

z عمق (m)

علائم یونانی

δ دلتای کرونکر

μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

ρ چگالی (kgm^{-3})

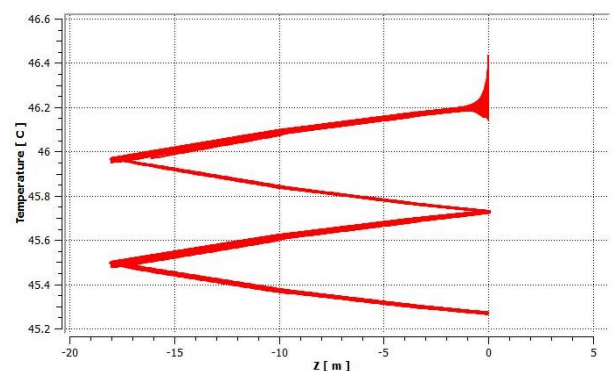
τ تانسور تنش ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

بالانویس‌ها

T ترانپاده ماتریس

شکل ۲۲ تغییرات دما با عمق در ستون دو حلقه‌ای در گام نهایی حل را نشان می‌دهد. مقایسه تغییرات دما از ورود تا خروج در دو ستون نشان می‌دهد که اختلاف دمای ورود و خروج در ستون دو حلقه‌ای ۱/۷۷ درجه سلسیوس است که بیشتر از اختلاف دما در ستون تک حلقه‌ای پایه با مقدار ۱/۵۴ درجه سلسیوس می‌باشد.

افت فشار در طول مدار گردش سیال در ستون، پارامتر تعیین کننده‌ای برای کارایی مدل حرارتی زمین گرمایی است. تغییرات فشار برای ستون دو حلقه‌ای در شکل ۲۳ در گام نهایی حل نشان داده می‌شود. از آنجا که با افزایش طول لوله، افت فشار نیز افزایش می‌یابد، ستون دو حلقه‌ای افت فشار بیشتری، در حدود ۲۹ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد؛ بنابراین، باید به این مسأله توجه کرد که اگر چه با افزایش حلقه‌ها کارایی پمپ از نظر حرارتی افزایش می‌یابد، اما توان مصرفی پمپ نیز رشد قابل توجهی خواهد داشت.



شکل ۲۲ تغییرات دما با عمق در ستون دو حلقه‌ای



زیر نویس ها

انرژی E

مومنتم M

۱۱- مراجع

- [18] T. Brettmann, T. Amis, Thermal conductivity evaluation of a pile group using geothermal energy piles, in *Proceeding of Geo-Frontiers Congress 2011*, Dallas, Texas, United States, pp. 499-508, 2011.
- [19] ANSYS, *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*, ANSYS CFX Release, 13.0, 2010.
- [20] J. D. Anderson, *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*, Frist Edition, McGrawhill Education, 1995.
- [21] R. Markiewicz, *Numerical and experimental investigations for utilization of geothermal energy using earth-coupled structures and new developments for tunnels*, PhD Thesis, Vienna University of Technology, 2004.
- [1] S. M. Monsef Rad, k. Javaherdeh, Comprehensive Exergy Analysis of a Geothermal Heat Pump Using Low Temperature Resources in Ramsar, *Journal of Energy Engineering & Management*, Vol. 2, No. 1, pp. 48-57, 2012. (in Persian)
- [2] B. Sanner, C. Karytsas, D. Mendrinou, L. Rybach, Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, *Geothermics*, Vol.32, No. 4-6, pp. 579-588, 2003.
- [3] H. Yang, P. Cui, Z. Fang, Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 1, pp. 16-27, 2010.
- [4] J. W. Lund, D. H. Freeston, T. L. Boyd, Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, *Geothermics*, Vol. 40, No. 3, pp. 159-180, 2011.
- [5] A. M. Omer, Ground-source heat pumps systems and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 2, pp. 344-371, 2008.
- [6] M. L. McDaniel, *Proposed design for a coupled ground-source heat pump/energy recovery ventilator system to reduce building energy demand*, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011.
- [7] A. Karimi, M. Sakhi factor, B. Ahmadpour, Investigating the Performance of Energy Converter Piles as a Building Heating and Cooling System, *2nd National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Qom University of Technology, Qom, Iran, October 2015. (in Persian)
- [8] A. Carotenuto, P. Marotta, N. Massarotti, A. Mauro, G. Normino, Energy piles for ground source heat pump applications: comparison of heat transfer performance for different design and operating parameters, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 124, pp. 1492-1504, 2017.
- [9] A. Zarrella, G. Emmi, M. A. De Carli, Simulation-based analysis of variable flow pumping in ground source heat pump systems with different types of borehole heat exchangers: A case study, *Energy Conversion and Management*, Vol. 131, pp. 135-150, 2017.
- [10] S. J. Cao, X. R. Kong, Y. Deng, W. Zhang, L. Yang, Z. P. Ye, Investigation on thermal performance of steel heat exchanger for ground source heat pump systems using full-scale experiments and numerical simulations, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 115, pp. 91-98, 2017.
- [11] H. Esen, M. Esen, O. Ozsolak, Modelling and experimental performance analysis of solar-assisted ground source heat pump system, *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-17, 2017.
- [12] C. K. Lee, Effect of borehole short-time-step performance on long-term dynamic simulation of ground-source heat pump system, *Energy and Buildings*, Vol. 129, pp. 238-246, 2016.
- [13] J. Marmaras, J. Burbank, D. B. Kosanovic, Primary-secondary decoupled ground source heat pump systems coefficient of performance optimization through entering water temperature control, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 96, pp. 107-116, 2016.
- [14] X. R. Kong, Y. Deng, L. Li, W. S. Gong, S. J. Cao, Experimental and numerical study on thermal performance of ground source heat pump with a set of designed buried pipes, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 114, pp. 110-117, 2017.
- [15] Z. Wang, F. Wang, Z. Ma, X. Wang, X. Wu, Research of heat and moisture transfer influence on the characteristics of the ground heat pump exchangers in unsaturated soil, *Energy and Buildings*, Vol. 130, pp. 140-149, 2016.
- [16] D. Qi, L. Pu, F. Sun, Y. Li, Numerical investigation on thermal performance of ground heat exchangers using phase change materials as grout for ground source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 106, pp. 1023-1032, 2016.
- [17] S.E. Poulsen, M. Alberdi-Pagola, D. Cerra, A. Magrini, An experimental and numerical case study of passive building cooling with foundation pile heat exchangers in Denmark, *Energies*, Vol. 12, No. 2697, pp. 1-18, 2019.

