



بررسی اثر جنس ملات اطراف لوله حرارتی در میزان استحصال انرژی زمین گرمایی

لیلا خان محمدی^۱، نغمه جمشیدی^{۲*}

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* صندوق پستی ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، N.jamshidi@pnu.ac.ir، تهران،

چکیده

کاهش منابع انرژی فسیلی و منابع محدود آن از یک طرف و میزان بالای آلاینده‌گی استفاده از این سوخت‌ها از سوی دیگر، سبب روی آوردن کشورهای مختلف به استفاده از انرژی‌های در دسترس و پاک مانند انرژی خورشیدی، زمین گرمایی، امواج و باد گردید. در این میان استفاده از انرژی زمین گرمایی با توجه به تجهیزات ساده بکارگیری آن مورد استقبال بوده و استفاده از آن در مناطق مشخصی بسیار مفید است. مبدل حرارتی زمین گرمایی از یک لوله که در اعماق زمین کار گذاشته شده، تشکیل می‌شود و در اطراف این لوله جهت ثابت نمودن و نیز افزایش عملکرد از ملات‌هایی استفاده می‌گردد. با توجه به موثر بودن نوع ملات در میزان دریافت انرژی مبدل، در این تحقیق به بررسی اثر استفاده از ترکیب‌های مختلف در ساختار ملات اطراف لوله پرداخته می‌شود. به این منظور، ابتدا ارزیابی حرارتی مبدل حرارتی زمین گرمایی لوله مستقیم در شهرهای مختلف ایران انجام و بر اساس نتایج بهترین عملکرد، شهر تبریز برای ادامه روند بررسی‌ها انتخاب شده است. نتایج مطالعات مربوط به تاثیر نوع ملات در مبدل حرارتی زمین گرمایی در شهر تبریز نشان داد که در صورت استفاده از ترکیب شن-بنتونیت میزان استحصال انرژی ۱۰٪ نسبت به خاک معمولی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش محتوای آب تا حد مشخصی به بهبود نتایج حرارتی کمک می‌نماید.

کلیدواژگان: انرژی زمین گرمایی، مبدل‌های حرارتی لوله مستقیم، نوع ملات، شبیه‌سازی عددی

Investigation of the Effect of Mixture Type around Heat Transfer Tube on Extracting Geo-Thermal Energy

Leila Khanmohammadi¹, Naghmeh Jamshidi^{2*}

1- Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

* P.O.B. 19395-4697 Tehran, Iran, N.jamshidi@pnu.ac.ir

Received: 3 May 2021 Accepted: 13 December 2021

Abstract

The depletion of fossil energy resources and their limited resources on the one hand and the amount of pollution on the use of these fuels on the other hand, led different countries to use available and clean energies such as solar, geothermal, waves and wind. In the meantime, the use of geothermal energy is welcomed due to its simple equipment and especially its use in certain areas is very useful. The geothermal heat exchanger consists of a tube that is installed deep in the ground and mortars are used around this pipe to fix and increase performance. Since the type of this mixture is effective on the amount of geothermal energy received by heat exchangers, in this study, the effect of using different compounds in the structure of mortar around pipe is investigated. The thermal analysis of straight tube heat exchanger was performed in different cities in Iran and according to the best thermal performance, Tabriz is selected for further study. Based on the results of different mixtures around tube in Tabriz it is revealed that if the sand-bentonite combination is used, the energy extraction rate will increase by 10% compared to native soil and increasing water content up to a point will result in more energy exchange.

Keywords: Geothermal energy, Straight tube heat exchanger, Mortars' properties, Numerical simulation



۱- مقدمه

همچنین با اضافه کردن ۵٪ و ۱۰٪ گرافیت به مخلوط شن/۵/بنتونیت هدایت حرارتی بتن به ترتیب ۹٪ و ۱۳٪ افزایش می‌یابد.

لیو و همکاران [۶] خواص ترمومکانیکی مخلوط ملات بتن شن کوارتز-بنتونیت-فیبرکربن را جهت بررسی پتانسیل آن در چاه‌های زمین‌گرمایی محاسبه نمودند. ایشان نشان دادند که با افزایش قطر ذرات شن هدایت حرارتی مخلوط افزایش یافته است. همچنین هدایت حرارتی مخلوط با افزایش محتوای رطوبت افزایش می‌یابد و این مخلوط را می‌توان به طور موثری در سیستم‌های زمین‌گرمایی استفاده نمود.

اگروال و همکاران [۷،۸] عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی زمین به هوای زمین‌گرمایی را برای جنس‌های مختلف بتن احاطه‌کننده لوله بررسی نمودند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد خواص حرارتی خاک اطراف لوله را می‌توان با استفاده از افزایش محتوای رطوبت خاک و یا استفاده از مواد با خواص حرارتی بالاتر ارتقا داد. این بررسی‌ها در حالت گذرا انجام شده و انتقال حرارت از لوله به خاک در حالت‌های مختلف نشان داده شده است.

زو و همکاران [۹] خواص حرارتی و هیدرولیکی مخلوط شن-بنتونیت GMZ01 شامل هدایت حرارتی و هیدرولیکی در درصد‌های مختلف محتوای رطوبت و محتوای شن مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد بهترین درصد میزان محتوای شن از لحاظ حرارتی کمتر از ۳۰٪ است و بنابراین نباید محتوای شن از ۳۰٪ بیشتر گردد.

جابمن و بانتبارت [۱۰] اثر افزودن گرافیت و کوارتز را بر خواص حرارتی بتن بررسی نمودند. ایشان هدایت حرارتی را به صورت تابعی از دما، محتوای آب در بازه دمایی ۳۵ تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد و فشار ۲ مگاپاسکال بدست آوردند و نهایتاً روابطی بر پایه داده‌های آزمایشگاهی خود ارائه دادند.

با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده می‌توان دریافت که با استفاده از انواع خاصی از ملات بتنی در اطراف لوله در داخل زمین می‌توان کارایی حرارتی مبدل حرارتی زمین‌گرمایی را به میزان قابل توجهی افزایش داد. بنابراین هدف از تحقیق حاضر، استفاده از ملات‌هایی با ترکیب‌های مختلف و به تبع آن هدایت حرارتی متفاوت، جهت بررسی دقیق‌تر کارایی حرارتی یک مبدل حرارتی زمین‌گرمایی لوله مستقیم است. در این راستا ابتدا مبدل حرارتی زمین‌گرمایی موردنظر در شهرهای مختلف شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در ادامه بر اساس بهترین عملکرد مبدل حرارتی زمین-گرمایی بدست آمده، یک شهر برای ادامه روند کار انتخاب می‌گردد. سپس تاثیر نوع ملات در عملکرد حرارتی مبدل حرارتی در آن شهر مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مدل فیزیکی مورد بررسی

شکل ۱ مبدل‌های حرارتی زمین‌گرمایی مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد. این مبدل حرارتی از نوع لوله عمودی و مستقیم، به قطر ۰/۱ متر، ضخامت ۰/۰۳ متر و طول کل ۶۰ متر است. بر اساس تحقیقات صورت گرفته و با توجه به هدف پژوهش، سیال عامل و جدار لوله و خاک ثابت فرض شده و هدایت حرارتی آنها در بررسی‌های مختلف ثابت در نظر گرفته می‌شود. تنها هدایت حرارتی ملات سیمانی تغییر داده می‌شود و در نتیجه آن دمای سیال خروجی از مبدل حرارتی و میزان استحصال انرژی در هر حالت بررسی و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و سازگار با طبیعت هستند و پایانی برای آنها وجود ندارد. ایران دارای منابع بسیاری از انرژی‌های فسیلی از قبیل نفت و گاز و نیز انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، انرژی بادی و انرژی زمین‌گرمایی است. با توجه به کاهش منابع آبی در کشور به جهت کاربرد در نیروگاه‌های آبی استفاده از منابع انرژی ارزان مانند خورشید و زمین می‌تواند در آینده راهگشا باشد. نیاز به استفاده از منابع انرژی رایگان در جهان به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است، نه تنها قیمت بالای سوخت‌های فسیلی و منابع محدود آن بلکه آسیب غیرقابل ترمیم به محیط زیست باعث روی آوردن به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. منابع مختلف انرژی‌های پاک، انرژی امواج، باد، خورشیدی و انرژی زمین‌گرمایی هستند. استفاده از پمپ‌های زمین‌گرمایی کمک بسیاری به استحصال انرژی ذخیره شده در اعماق زمین و استفاده از آن در گرمایش منازل مسکونی می‌نماید.

در این میان هدایت حرارتی سیال عامل در سیکل گرمایشی پمپ، هدایت حرارتی جدار لوله و ملات اطراف آن تاثیر بسیاری در میزان انرژی دریافتی از زمین توسط سیال عامل خواهد داشت. هر چقدر هدایت حرارتی سیال لوله و ملات بالاتر باشد، سرعت جذب انرژی زمین افزایش خواهد یافت. بنابراین تحقیقات بسیاری در زمینه جنس سیال عامل در سیکل حرارتی زمین‌گرمایی انجام شده است و تحقیقات نشان دادند در صورت استفاده از نانو سیالات استحصال انرژی به شدت افزایش می‌یابد.

در سال‌های اخیر پژوهشگران بسیاری در زمینه نوع ملات اطراف لوله و اندازه‌گیری هدایت حرارتی آن تحقیقاتی انجام دادند. از آن جمله می‌توان به تحقیق لی و همکاران [۲] اشاره نمود که در آن هفت نوع مختلف بتن را از لحاظ هدایت حرارتی و ویسکوزیته مقایسه نمودند. جهت افزایش خواص حرارتی به بتن سیلیکا و گرافیت اضافه نمودند و با افزایش این مواد هدایت حرارتی و ویسکوزیته آن را افزایش دادند. در کشور کره برای تولید مبدل حرارتی زمین‌گرمایی معمولاً ملات بتن ۱۵ تا ۲۵٪ وزنی با آب استفاده می‌شود. بنابراین مخلوط‌های ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی برای بررسی تاثیر هدایت حرارتی استفاده شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد با افزودن مقدار بسیار کمی فیلر مانند شن سیلیکا می‌توان هدایت حرارتی بتن را افزایش داد. همچنین افزایش هدایت حرارتی ناشی از پودر گرافیت بیشتر از سیلیکا است.

دلالتس و همکاران [۳] کامپوزیت بنتونیت-گرافیت را با استفاده از ذرات پوسته‌های گرافیت^۱، گرافیت طبیعی منبسط شده^۲ و گرافیت طبیعی منبسط فشرده شده با خاک^۳ بهبود دادند. ایشان نشان دادند که در صورت استفاده از ذرات گرافیت طبیعی منبسط فشرده شده با خاک در درصد‌های وزنی کمتر از گرافیت (۵٪ وزنی) می‌توان به هدایت حرارتی مطلوب ۵ W/m.K رسید. به علاوه با خشک شدن ملات بتن، هدایت حرارتی آن به شدت کاهش می‌یابد. به طور مثال برای محتوای ۱۰٪ وزنی آب، هدایت حرارتی بتن در حدود ۱ W/m.K کاهش می‌یابد.

لی و همکاران [۴،۵] تاثیر محتوای آب را در هدایت حرارتی مخلوط شن-بنتونیت در ملات بتن و نیز اثر افزودن گرافیت به این مخلوط را بررسی نمودند. تحقیقات ایشان نشان داد هدایت حرارتی مخلوط شن-بنتونیت در محتوای رطوبت ۲۰٪ در نسبت‌های مخلوط ۵٪ و ۲۰٪ به ترتیب ۲٪ و ۱۶٪ نسبت به شن کاهش پیدا می‌کند. اضافه کردن بنتونیت به ملات بتن، موجب افزایش ظرفیت نگهداری آب و در نتیجه افزایش نفوذپذیری حرارتی شن می‌گردد.

3. ground Compressed Expanded Natural Graphite (CENGg)

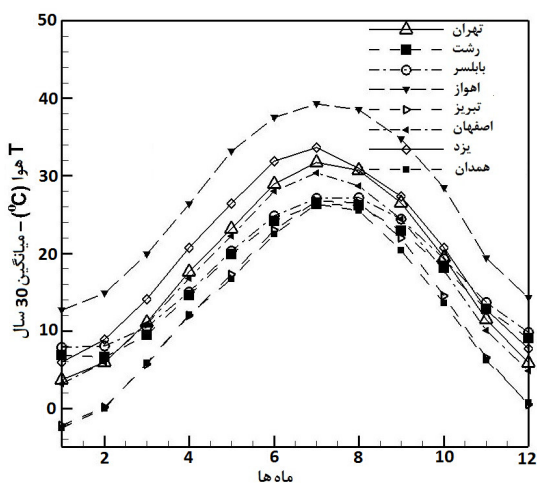
1. Graphite flakes
2. Expanded Natural Graphite (ENG)

نرخ انتقال حرارت بین سیال عامل و زمین وابسته به مقاومت حرارتی معادل از سیال داخل لوله تا زمین است. مقاومت حرارتی شامل مقاومت حرارتی انتقال حرارت جابجایی سیال عامل، مقاومت حرارتی رسانش جدار لوله، مقاومت حرارتی رسانش ملات و مقاومت حرارتی هدایت زمین است. در این میان از مقاومت حرارتی که بین لوله و ملات و نیز ملات و زمین وجود دارد می‌توان صرف نظر نمود. سیستم مقاومت حرارتی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل لایه‌های مختلف و مقاومت حرارتی هر کدام از لایه‌ها نشان داده شده است. این مقاومت حرارتی در سرتاسر لوله از ورودی تا خروجی وجود خواهد داشت.



شکل ۲ مدار مقاومت حرارتی هوای داخل لوله تا خاک

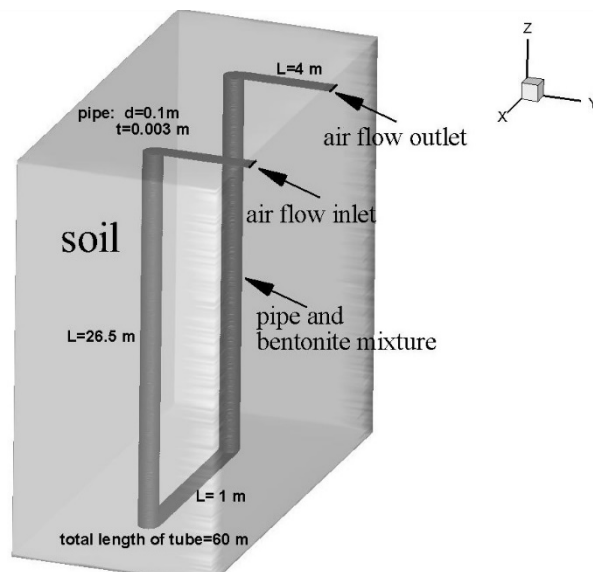
درجه حرارت زمین در اعماق مختلف خاک متفاوت است، بنابراین درجه حرارت زمین به صورت یک تابع برحسب عمق به نرم‌افزار داده خواهد شد. دمای زمین به درجه حرارت هوای اطراف آن بستگی دارد، بنابراین با تغییر دادن شهر مورد بررسی و استفاده از روابط مربوط به هوای آن شهر و تبدیل اطلاعات دمایی هوا به خاک بر اساس توابع تعریف شده می‌توان بررسی را در مناطق مختلف ایران انجام داد. در شکل ۳ دمای هوای شهرهای مختلف بر اساس متوسط ۳۰ ساله از داده‌های سازمان هواشناسی ایران رسم شده است.



شکل ۳ نمودار تغییرات دمای هوای شهرهای مختلف در طول سال [۱]

دمای زمین در اعماق بیشتر از سطح آن است و هر چقدر به اعماق زمین فرو می‌رویم دمای زمین افزایش می‌یابد. از طرفی دمای زمین به صورت تابع سینوسی در طول شبانه روز تغییر می‌نماید که در نتیجه تأثیرپذیری از هوای محیط است. هر چقدر از سطح زمین به سمت اعماق زمین حرکت می‌نماییم دامنه نوسان نمودار سیکنالی درجه حرارت خاک تغییرات کمتری پیدا کرده و تقریباً در عمق بالاتر از ۲۰ متر به صورت خط صاف در خواهد آمد. این بدین معناست که تغییرات درجه حرارت محیط دیگر تأثیری در دمای زمین نخواهد داشت و در طول شبانه روز خاک در دمای ثابتی قرار خواهد داشت و به همین

مبداً حرارتی در نرم‌افزار انسیس فلونتت مورد بررسی قرار گرفته است. لوله از جنس HDPE با دو لایه مختلف فرض شده است. لایه اول جداره اصلی لوله و لایه دوم ملات سیمانی اطراف لوله خواهد بود.



شکل ۱ مبداً حرارتی لوله مستقیم مورد بررسی

۳- معادلات حاکم و روش حل

با توجه به محدوده دبی جریان و عدد رینولدز، رژیم جریان در هم فرض می‌شود. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی انسیس فلونتت نسخه ۱۸ انجام می‌گیرد. معادلات حاکم بر سیال در روابط (۱) تا (۳) آمده است:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$\rho (\vec{V} \cdot \nabla) (c_p T_g) - \nabla \cdot (k \nabla T_g) = \Phi \quad (3)$$

که در آن Φ به اصطلاح منبع حرارت است، که به طور عمده از هدررفت اصطکاکی در تماس با قطعات ایجاد می‌شود. همچنین در این روابط ρ چگالی، V سرعت، p فشار استاتیکی، k ضریب هدایت حرارتی، c_p ظرفیت حرارتی ویژه و μ لزجت سینماتیکی هستند. جهت شبیه‌سازی جریان در هم از مدل در همی $k-\epsilon$ RNG استفاده شده است.

با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی CFD موجود و نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ، انتقال حرارت در مبداً حرارتی لوله مستقیم در شرایط آب و هوایی مختلف و با جنس ملات متفاوت انجام می‌گیرد. جهت گسسته‌سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم و جهت کوپلینگ معادلات فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. در صورتی حل همگراست که باقیمانده معادلات پیوستگی، ممنتم و انرژی از 10^{-5} کمتر گردد. فرض می‌شود تماس حرارتی مناسبی بین خاک و لوله برقرار است. سرعت هوای ورودی به مبداً حرارتی برابر با $6m/s$ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی خاک در دوردست، دمای ثابت بوده و شرط عدم لغزش بر روی دیوارها اعمال می‌گردد. دیوار لوله و خاک به یکدیگر کوپل شده‌اند تا انتقال حرارت در طول دیوار مشترک صورت پذیرد. با توجه به اینکه هوا سیالی قابل تراکم است، شرط مرزی خروجی، فشار خروجی، است.



جدول ۱ خواص خاک و لوله HDPE

چگالی	هدایت حرارتی	ظرفیت حرارتی	
۹۵۸	۰/۴۷۶	۲۰۹۳	خاک
۱۶۰۰	۰/۵۲	۵۶۸/۷۵	لوله HDPE

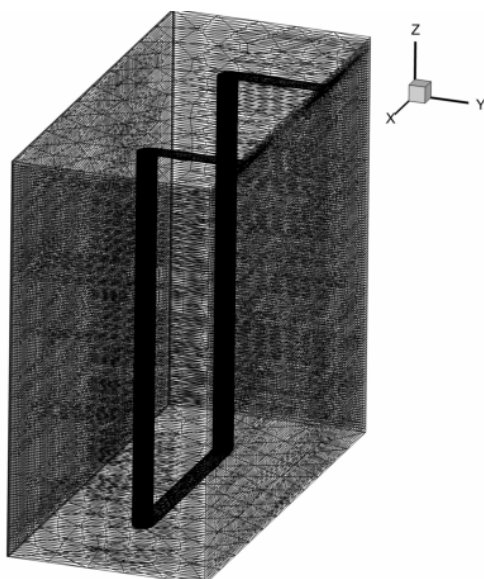
نمودارهای مشابهی را می‌توان برای دمای هوا و خاک در فصول گرم و سرد سال برای سایر شهرهای مورد بررسی نیز بدست آورد. میزان استحصال انرژی زمین‌گرمایی توسط مبدل مورد بررسی در هر حالت با استفاده از رابطه ساده (۵) بدست خواهد آمد و نتایج نهایتاً با یکدیگر مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

در این رابطه Q مقدار انرژی گرمایی مبدل حرارتی، \dot{m} نرخ جرمی جریان در لوله‌ها، c_p ظرفیت حرارتی هوا و T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای هوای ورودی و خروجی از مبدل حرارتی زمین‌گرمایی هستند.

۴- صحت سنجی و استقلال از شبکه

هندسه مدل مستقیم در سالدورک ساخته و شبکه در نرم‌افزار انسیس مشینگ تولید شده است. مدل فیزیکی مبدل‌های حرارتی با استفاده از شبکه-بندی سه‌بعدی (چندوجهی و هرمی) به اجزای کوچک تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ۵). جهت بررسی مستقل بودن نتایج حاصل از شبکه، سه شبکه بی-سازمان مختلف برای تکمیل شبیه‌سازی در نظر گرفته و متوسط دمای خروجی بعد از شبیه‌سازی انتقال حرارت در شبکه‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. شبکه‌های تولیدی به‌طور تقریبی شامل ۲ میلیون، ۳/۶ میلیون و ۵ میلیون شبکه هستند. در صورتی‌که مبدل حرارتی با تعداد المان‌های شبکه حدوداً ۳/۶ میلیون و ۵ میلیون شبیه‌سازی گردد، دمای خروجی به سمتی میل می‌نماید که تغییر چندانی نسبت به نتایج ماتر و همکاران [۱۱] مشاهده نمی‌شود و در شبکه با تعداد المان ۳/۶ میلیون استفاده گردید تا از زمان انجام شبیه‌سازی کاسته و از طرفی دقت مورد انتظار را بدست آورد.

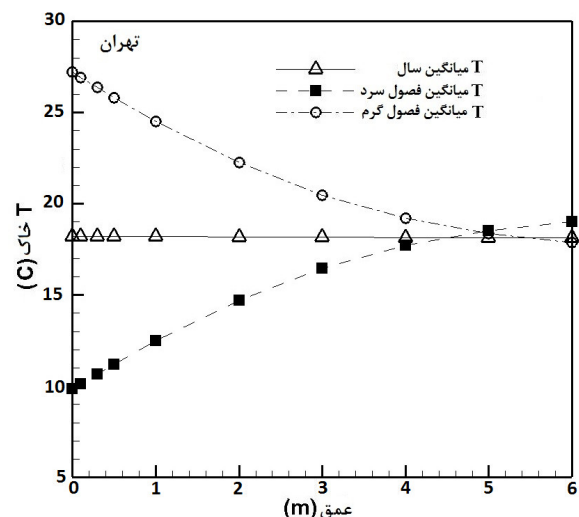
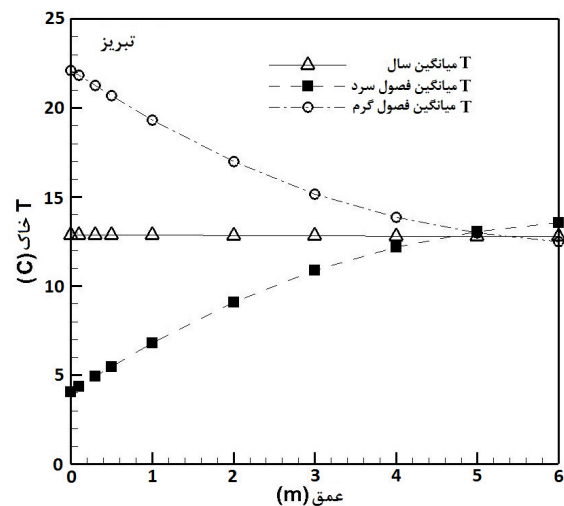


شکل ۵ شبکه‌بندی ناحیه حل شامل خاک، بدنه مبدل حرارتی و هوا

دلیل است که لوله‌های زمین‌گرمایی را در عمق‌های پایین زمین نصب می‌نمایند تا هم نوسان دمای کمتری را تجربه کند و هم دمای زمین بالاتر باشد. نحوه بدست آوردن تغییرات دمای هوای شهرها و خاک در اعماق مختلف در مرجع [۱۲] شرح داده شده است. با توجه به رابطه (۴)، دمای خاک به عمق خاک، زمان مورد بررسی و پخشندگی خاک وابسته است:

$$T(z, t) = T_{mean} + A \cos \left[\omega(t - t_0) - \frac{z}{d} \right] \times \exp \left(-\frac{z}{d} \right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، T_{mean} دمای میانگین سالانه هوا، t_0 زمان وقوع گرم‌ترین روز از اول ژانویه، A دامنه موج دمای هوا در طول ۵۰ سال، z ارتفاعی از خاک زیر سطح زمین (متر) و ω فرکانس موج دمای هوای سالانه است. مقادیر A و T_{mean} با استفاده از داده‌های موجود در سایت سازمان هواشناسی کشور ایران برای شهرهای مختلف بدست می‌آید. به عنوان نمونه، شکل ۴ مقدار دمای میانگین زمین در فصول گرم و سرد سال را برای شهرهای تبریز و تهران نشان می‌دهد.



شکل ۴ نمودار تغییرات دمای خاک شهرهای تبریز و تهران در فصول گرم و سرد

خواص حرارتی لوله و خاک بر روی کارایی حرارتی مبدل حرارتی زمین-گرمایی تأثیرگذار است. در جدول ۱ خواص خاک شهر تهران و لوله HDPE آورده شده است.

۵- نتایج عددی و بحث

روند کلی انجام تحقیق حاضر در قالب یک نمودار در شکل ۸ آمده است.

گام ۱:

- انتخاب شهرهای مورد مطالعه بر اساس مناطق مختلف جغرافیایی کشور
- بدست آوردن اطلاعات هواشناسی بر اساس پایگاه داده هوایی کشور
- استخراج متوسط دمای هوای شهرها در طول سال

گام ۲:

- تولید هندسه و اعمال شرایط مرزی بر اساس دمای هوا و دمای خاک در شهرهای مختلف
- بررسی شبیه‌سازی در حالت پایدار
- بدست آوردن دمای آب خروجی و میزان حرارت جذب‌شده توسط سیال عامل

گام ۳:

- استخراج خواص حرارتی ملات‌های مختلف از مقالات معتبر
- تغییرات شرایط مرزی مسئله با توجه به جنس ملات‌های مختلف
- بدست آوردن دمای سیال عامل خروجی از مبدل و حرارت مبادله‌شده در شرایط هندسی مختلف

گام ۴:

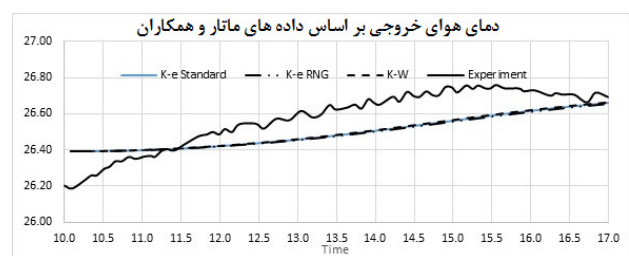
- بررسی حالت‌های مختلف و انتخاب بهترین حالت و ارزیابی عملکرد شهرهای مختلف

شکل ۸ مراحل گام به گام انجام تحقیق حاضر

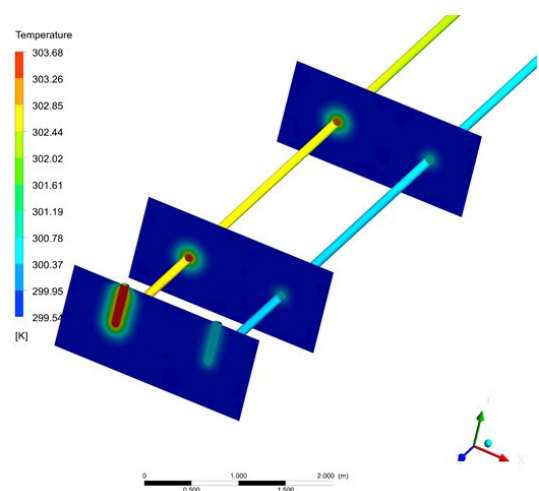
۵-۱- تاثیر آب و هوای محیط در استحصال انرژی زمین گرمایی

به منظور بررسی تاثیر نوع اقلیم منطقه در میزان استحصال انرژی از مبدل حرارتی زمین گرمایی لوله مستقیم، به صورت نمونه هشت شهر ایران در مناطق آب و هوایی متفاوت انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به شرایط آب و هوایی متنوع در ایران، شهرهای انتخاب‌شده نماینده شرایط مختلف آب و هوایی در سراسر کشور هستند و با استفاده از داده‌های هواشناسی کشور، تغییرات دما در این شهرها در طول سال قابل بررسی است. همانطور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، در این شهرها، دمای هوای ورودی و دمای خاک در عمق ۶ متری با هم متفاوت بوده و بنابراین در شبیه‌سازی‌ها، دماهای هوای ورودی و دمای خاک متفاوت لحاظ می‌گردد. تبریز و همدان دارای کمترین دمای هوای ورودی در فصول گرم سال و اهواز دارای بالاترین دمای هوا و خاک هستند. شکل ۱۱ میزان استحصال انرژی از مبدل حرارتی در شهرهای مختلف ایران در فصول سرد و گرم سال را نشان می‌دهد. نتایج عددی نمودار نشان داده شده در شکل ۱۱ برای فصول گرم سال در جدول ۲ آمده است. با توجه به این نتایج، بهترین نقطه از نظر میزان کارایی مبدل

اثر مدل‌های توربولانسی $k-\epsilon$ standard ، $k-\epsilon$ RNG و $k-\epsilon$ RNG بر توزیع دما بررسی شده است. جهت اعتبارسنجی روش حل، مدل‌سازی به صورت غیر دائم^۱ با گام زمانی ۵ دقیقه برای یک روز (شکل ۵- روز ۲۰۱۴/۳/۱۱) و بر اساس نتایج ماتر و همکاران [۱۱] دمای هوای ورودی به صورت متغیر انجام گرفته است. انطباق خوبی بین نتایج تجربی و نتایج مدل‌سازی وجود دارد بطوریکه حداکثر خطا حدود ۲ درصد است. از آنجاکه در این مسئله پدیده‌های پیچیده جریان از قبیل تشکیل گردابه، جدایش جریان و گذر جریان رخ نمی‌دهد، اثر مدل توربولانسی بر نتایج حاصل، بسیار ناچیز است که این مسئله در نمودارهای رسم شده در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج بیانگر تقریب مناسب حل عددی از شرایط آزمایشگاهی [۱۱] بوده و با حداکثر اختلاف ناچیز بین دمای شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در مبدل‌های حرارتی مستقیم از دقت مناسبی برخوردار است. با توجه به اعتبارسنجی انجام شده می‌توان از هندسه، شبکه و روش حل مورد استفاده برای شبیه‌سازی مبدل حرارتی در اقلیم شهرهای مختلف ایران استفاده نمود. شکل ۷ کانتور دما در مبدل حرارتی در صفحات عمود بر محور Z با استفاده از مدل $k-W$ در ساعت ۱۷ را نشان می‌دهد. صفحات برش‌خورده در شکل بیانگر توزیع حرارتی و دمایی اطراف لوله است. مطابق با شکل هوا با دمای کم وارد لوله شده در طی گذر از مبدل حرارتی زمین گرمایی با دریافت انرژی از خاک با افزایش دما از آن خارج می‌گردد.

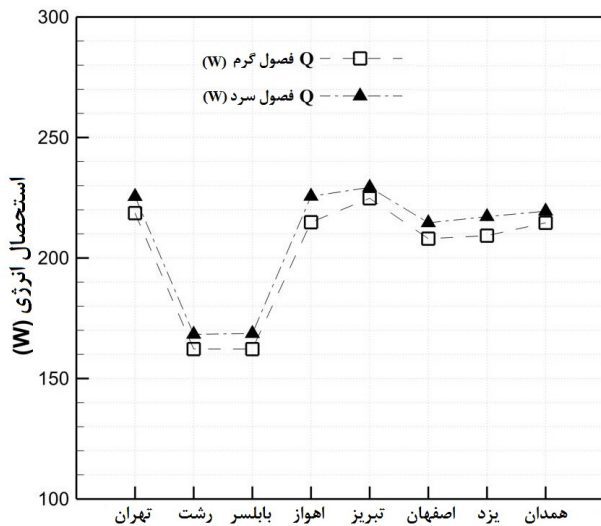


شکل ۶ تاثیر مدل‌های دره‌می و اعتبارسنجی حل



شکل ۷ کانتور دما در مبدل حرارتی در صفحات عمود بر محور Z

1. Unsteady



شکل ۱۱ استحصال انرژی از مبدل حرارتی در شهرهای مختلف ایران در فصول سرد و گرم سال

جدول ۲ تغییرات دمای هوا در مبدل حرارتی و میزان استحصال انرژی در شهرهای مختلف ایران در فصول گرم سال

شهر	دمای هوای ورودی (K)	دمای هوای خروجی (K)	حرارت جذب شده (W)
تهران	۲۹۹/۸۹	۲۹۵/۹۸	۲۱۸/۶۲۵
رشت	۲۹۶/۰۷۲	۲۹۳/۱۷۴	۱۶۲/۲۲۷
بابلسر	۲۹۷/۰۰۴	۲۹۴/۱۰۵۵	۱۶۲/۱۸۶
اهواز	۳۰۸/۴۳	۳۰۴/۵۹	۲۱۴/۸۶
تبریز	۲۹۴/۸	۲۹۰/۷۹	۲۲۴/۷۸
اصفهان	۲۹۸/۴۱	۲۹۴/۶۹	۲۰۸/۰۱۴
یزد	۳۰۱/۶۴	۲۹۷/۸۹	۲۰۹/۲۷
همدان	۲۹۳/۹۶	۲۹۰/۱۳	۲۱۴/۵۹

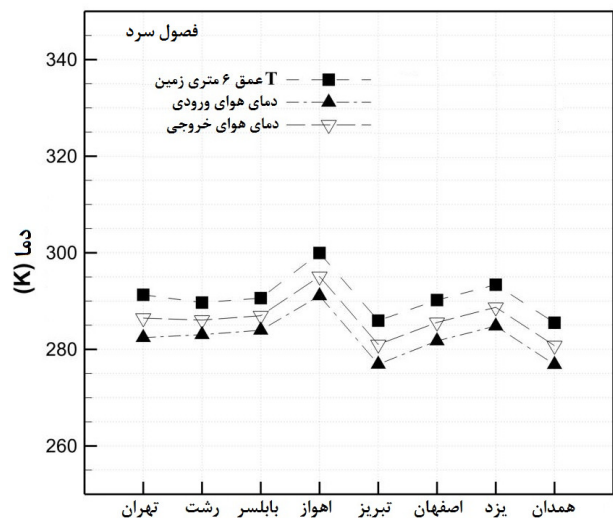
جدول ۳ تغییرات دمای هوا در مبدل حرارتی و میزان استحصال انرژی در شهرهای مختلف ایران در فصول سرد سال

شهر	دمای هوای ورودی (K)	دمای هوای خروجی (K)	حرارت جذب شده (W)
تهران	۲۸۲/۴۴	۲۸۶/۴۷	۲۲۵/۴۹
رشت	۲۸۳/۵۹	۲۸۶/۰۶۹	۱۶۸/۳۲
بابلسر	۲۸۳/۹۶	۲۸۶/۹۷	۱۶۸/۶۵۳
اهواز	۲۹۱/۰۸۹	۲۹۵/۰۹۸	۲۲۵/۶۰۵
تبریز	۲۷۶/۹۱	۱۸۱/۰۰۸	۲۲۹/۳
اصفهان	۲۸۱/۷۵	۲۸۵/۵۸	۲۱۴/۶۱
یزد	۲۸۴/۸۳	۲۸۸/۷۱	۲۱۷/۱۴
همدان	۲۷۶/۸۶	۲۸۰/۷۸	۲۱۹/۴۲

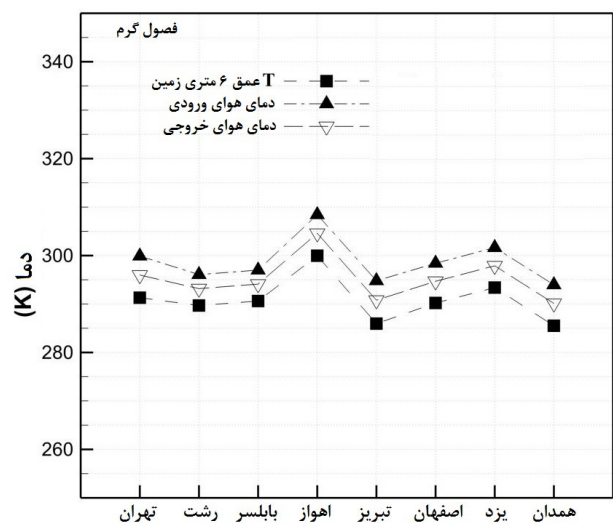
۵-۲- تاثیر نوع خاک اطراف لوله

با توجه به نتایج بخش ۵-۱، در تمامی شبیه‌سازی‌های این بخش دمای ورودی یکسان و برابر دمای هوای شهر تبریز در فصل سرد سال در نظر گرفته شده و فقط تاثیر نوع مواد در برگزیده لوله بر نتایج خروجی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور انجام این بررسی، لوله با لایه‌ای از ملات‌های مختلف با خواص

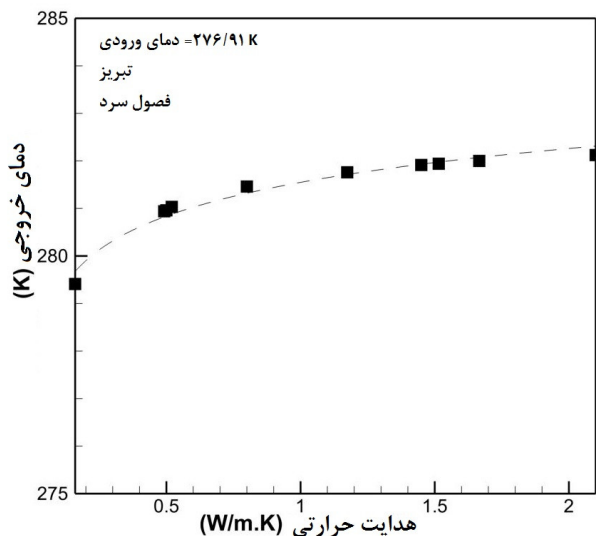
حرارتی زمین‌گرمایی شهر تبریز بوده و کمترین میزان استحصال انرژی مربوط به دو شهر رشت و بابلسر است. مقادیر عددی مربوط به فصول سرد سال نیز در جدول ۳ آمده است که نتایجی مشابه فصول گرم سال را نشان می‌دهد. در این تحقیق، تغییرات جنس خاک منطقه در بررسی‌ها مدنظر نبوده و تنها تابع مورد بررسی در مناطق مختلف جغرافیایی، تغییرات دمای هوای سالانه است. با توجه به اختلاف کمتر دمای هوای شهرهای بابلسر و رشت نسبت به دمای متوسط سالانه خاک در این مناطق، میزان استحصال انرژی نیز در این شهرها حداقل خواهد بود. از طرفی بیشترین میزان استحصال انرژی مربوط به شهر تبریز است. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده بر اساس میزان استحصال انرژی، شهر تبریز به عنوان شهر نمونه جهت ادامه بررسی‌ها انتخاب می‌گردد.



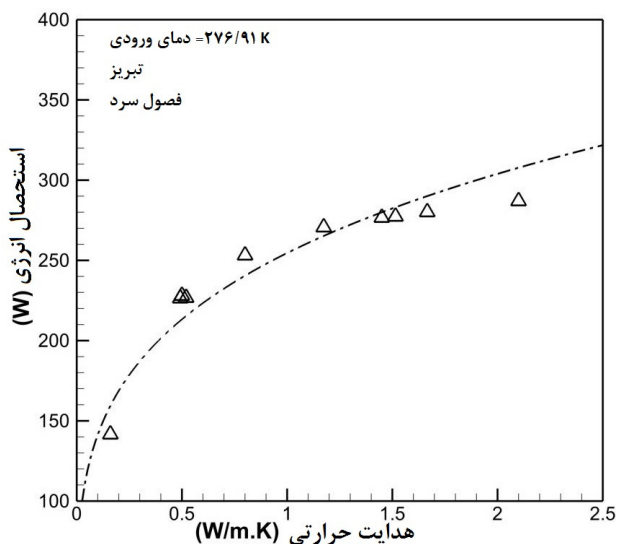
شکل ۹ تغییرات دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در شهرهای مختلف ایران در فصول سرد سال



شکل ۱۰ تغییرات دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در شهرهای مختلف ایران در فصول گرم سال



شکل ۱۲ تاثیر هدایت حرارتی لایه دربرگیرنده لوله در افزایش دمای هوای خروجی از مبذل در فصول سرد سال در شهر تبریز



شکل ۱۳ تاثیر هدایت حرارتی لایه دربرگیرنده لوله در افزایش استحصال انرژی از مبذل در فصول سرد سال در شهر تبریز

حرارتی مطابق جدول ۴ پوشانده شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تاثیر مقدار هدایت حرارتی ملات در برگزیده لوله را در افزایش دمای هوای خروجی و میزان استحصال انرژی از مبذل حرارتی در فصول سرد سال در شهر تبریز نشان می‌دهند. نتایج عددی این نمودارها در جدول ۴ آمده است.

با توجه به نتایج بدست آمده، مخلوط شن-بنتونیت هدایت حرارتی بیشتر و به تبع آن استحصال انرژی بالاتری نیز نسبت به شن و یا خاک معمولی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد آب موجود در مخلوط شن-بنتونیت هدایت حرارتی و میزان استحصال انرژی افزایش می‌یابد. شیب تغییرات در درصدهای آب پایین زیاد است و با بالا رفتن درصد رطوبت از ۲۰٪ شیب تغییرات افت پیدا می‌کند. دلیل این امر پر شدن محافظ خالی بین شن و بنتونیت در درصدهای متفاوت رطوبت است. در درصدهای پایین با افزایش رطوبت، فضای خالی بین ذرات شن و بنتونیت با آب که هدایت حرارتی بالاتری نسبت به هوا و به تبع آن مقاومت حرارتی کمتری دارد، پر می‌شود و میزان استحصال انرژی افزایش شدیدی دارد. با این وجود، با توجه به ظرفیت محدود پر شدن فضای حفره‌های هوایی با آب، ملات اشباع شده و با افزایش میزان رطوبت در ملات شن-بنتونیت، مقاومت حرارتی افزایش و هدایت حرارتی و میزان استحصال انرژی کاهش می‌یابد. در جدول ۴ اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی از مبذل حرارتی با لایه‌های مختلف نیز نشان داده شده است.

جدول ۴ تاثیر جنس خاک و ملات اطراف لوله

جنس ملات	هدایت حرارتی	اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی	میزان استحصال انرژی
native soil	۰/۵	۱/۴۶۲۵	۲۲۸/۰۵۸
Sand	۰/۸	۱/۶۴۳۱	۲۵۳/۱۹۹
sand-bentonite	۱/۴۵	۱/۸۰۷	۲۷۶/۶۷
sand-bentonite-0%w	۰/۴۹۲	۱/۴۵۵۳	۲۲۶/۴۱۷
sand-bentonite-10%w	۱/۱۷۴	۱/۷۵۱	۲۷۰/۷۰۳
sand-bentonite-20%w	۱/۵۱۵	۱/۸۱۶۴	۲۲۷/۳۶
sand-bentonite-30%w	۱/۶۶۶	۱/۸۳۷۷	۲۸۰/۱۵
slit	۰/۵۲	۱/۴۸۸۹	۲۲۶/۷۴۵
clay	۰/۱۶	۰/۹۰۸۷۲	۱۴۱/۶۳
sandy loam	۲/۱	۱/۸۲۲	۲۸۷/۰۲۶

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر نوع ملات اطراف لوله در میزان استحصال انرژی در یک مبذل زمین گرمایی مستقیم پرداخته شده است. در ابتدا بررسی در شرایط آب و هوایی مختلف در شهرهای تهران، رشت، بابل، اهواز، تبریز، اصفهان، یزد و همدان صورت گرفته است. با توجه به داده‌های هواشناسی، متوسط دمای هوای این شهرها در فصول سرد و گرم محاسبه و با استفاده از تابعی دمای خاک در این شهرها در اعماق مختلف استخراج گردید. بهترین شهر از نظر بیشترین میزان دریافت انرژی زمین گرمایی در مبذل لوله مستقیم شهر تبریز بدست آمد. بنابراین سایر محاسبات بر اساس دمای هوا و خاک شهر تبریز و تغییر ملات سیمانی اطراف لوله زمین گرمایی برای ملات‌هایی با محتوای آب متفاوت صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان دادند که مخلوط شن-



بنتونیت هدایت حرارتی بیشتر و به تبع آن استحصال انرژی بالاتری نیز نسبت به شن و یا خاک معمولی دارد. همچنین در صورت استفاده از ملاتی با محتوای آب بالاتر میزان استحصال انرژی در شرایط مورد بررسی تا حد مشخصی بالا می‌رود و بعد از آن رشد تغییرات بسیار کند خواهد بود.

۷- مراجع

- [1] N. Jamshidi and N. Sadafi, Investigation of the efficiency of the earth-air spiral heat exchanger in providing part of the heating and cooling loads of a building, *Journal of Renewable and New Energy (JRENEW)*, Vol. 5, No. 2, pp. 90-98, 2018 (in persian).
- [2] H. F. Li, M. Q. Chen, B. A. Fu and B. Liang, Evaluation on the thermal and moisture diffusion behavior of sand/bentonite, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 151, pp. 55-65, 2019.
- [3] F. Delaleux, X. Py, R. Olives and A. Dominguez, Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 33, pp. 92-99, 2012.
- [4] C. Lee, K. Lee, H. Choi and H.-P. Choi, Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea, *Science in China Series E: Technological Sciences*, Vol. 53, No. 1, pp. 123-128, 2010.
- [5] C. Lee, S. Park, D. Lee, I.-M. Lee and H. Choi, Viscosity and salinity effect on thermal performance of bentonite-based grouts for ground heat exchanger, *Applied Clay Science*, Vol. 101, pp. 455-460, 2014.
- [6] X. Liu, G. Cai, L. Liu, S. Liu and A. J. Puppala, Thermo-hydro-mechanical properties of bentonite-sand-graphite-polypropylene fiber mixtures as buffer materials for a high-level radioactive waste repository, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 141, pp. 981-994, 2019.
- [7] K. K. Agrawal, R. Misra and G. D. Agrawal, Thermal performance analysis of slinky-coil ground-air heat exchanger system with sand-bentonite as backfilling material, *Energy and Buildings*, Vol. 202, p. 109351, 2019.
- [8] K. K. Agrawal, R. Misra and G. D. Agrawal, Improving the thermal performance of ground air heat exchanger system using sand-bentonite (in dry and wet condition) as backfilling material, *Renewable Energy*, Vol. 146, pp. 2008-2023, 2020.
- [9] L. Xu, W. M. Ye, B. Chen, Y. G. Chen and Y. J. Cui, Experimental investigations on thermo-hydro-mechanical properties of compacted GMZ01 bentonite-sand mixture using as buffer materials, *Engineering Geology*, Vol. 213, pp. 46-54, 2016.
- [10] M. Jobmann and G. Buntebarth, Influence of graphite and quartz addition on the thermo-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste, *Applied Clay Science*, Vol. 44, No. 3-4, pp. 206-210, 2009.
- [11] A. Mathur, S. Mathur, G. Agrawal and J. Mathur, Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes, *Renewable Energy*, Vol. 108, pp. 474-487, 2017.
- [12] F. Fazlikhani, H. Goudarzi and E. Solgi, Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hotarid climates, *Energy Conversion and Management*, Vol. 148, pp. 78-89, 2017.

