

بهبود عملکرد گرمایی مبادله‌کن‌های زمینی با استفاده از آرایش مارپیچ سه‌گانه

امیر حمزه فرج‌الهی* استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران، a.farajollahi@sharif.edu

محسن رستمی استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران، cpt.rostami@gmail.com

بهراد عسگری دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، behrad.asgari@gmail.com

چکیده

یکی از کارآمدترین سامانه‌های تهویه مطبوع، پمپ‌های گرمایی زمینی می‌باشند. از مشکلات اساسی این نوع پمپ‌ها می‌توان به هزینه‌ی بالای نصب آن‌ها اشاره کرد. با انتخاب آرایش مناسب مبادله‌کن گرمایی زمینی مورد استفاده در این پمپ‌ها می‌توان با افزایش آهنگ انتقال گرما با زمین اطراف و کاهش تعداد چاه‌های حفر شده در هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد. در این مطالعه، عملکرد گرمایی مبادله‌کن زمینی با آرایش مارپیچ سه‌گانه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، به شبیه‌سازی سه بعدی و گذرای دینامیک سیالات محاسباتی مبادله‌کن گرمایی زمینی و زمین اطراف آن پرداخته شده است. ضمن مقایسه آرایش مارپیچ سه‌گانه با مبادله‌کن آرایش تک مارپیچ به مطالعه تاثیر پارامترهای گام و قطر حلقه‌های مارپیچ بر عملکرد این نوع مبادله‌کن پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد آرایش مارپیچ سه‌گانه تبادل گرما با زمین اطراف را حدود ۲۸٪ نسبت به آرایش تک مارپیچ افزایش می‌دهد. بررسی پارامترهای مورد مطالعه نشان داد گام حلقه‌های مارپیچ بیشترین تاثیر بر عملکرد سیستم را دارد و با کاهش آن، عملکرد سیستم بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مبادله‌کن گرمایی زمینی، پمپ گرمایی منبع زمینی، انرژی زمین گرمایی، مارپیچ سه‌گانه، عملکرد سیستم.

Improving the thermal performance of ground heat exchangers using triple helix arrangement

Amir Hamzeh Farajollahi

Department of Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran

Mohsen Rostami

Department of Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran

Behrad Asgari

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

One of the efficient air conditioning systems is ground source heat pumps. The main problem of this type of pumps is the high cost of their installation. By choosing the suitable arrangement of ground heat exchangers, the number of piles and cost can be reduced by increasing the rate of heat transfer to the surrounding. In this research, the thermal performance of the ground heat exchanger with triple helix arrangement is investigated. To this aim, a three-dimensional transient CFD model of the ground heat exchanger and the surrounding soil is developed. In order to evaluate the performance, the results of the triple helix arrangement with the single helix arrangement were compared. In addition, the effect of two involving parameters, including helix pitch and diameter on the performance of the system is examined. The results show, by using the triple helix arrangement, the heat exchange rate is increased about 28% more compared to the single helical arrangement. It was found that the helix pitch has the greatest impact on the system performance and by reducing it, the system performance is improved.

Keywords: Ground heat exchanger, Ground source heat pumps, Geothermal energy, triple helix, System performance.

پرداخته شود.

۱- مقدمه

انرژی زمین گرمایی نیز یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است. استفاده از انرژی زمین گرمایی، وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد و با بهره‌برداری صحیح، کمترین آسیب را به محیط‌زیست وارد می‌سازد. برخلاف سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی زمین گرمایی محدود به فصل، زمان و شرایط خاصی نبوده و بدون وقفه قابل بهره‌برداری است. یکی از کاربردهای مطرح انرژی زمین گرمایی، استفاده آن‌ها در پمپ‌های گرمایی تحت عنوان پمپ گرمایی زمین گرمایی است. با استفاده از پمپ گرمایی زمین گرمایی می‌توان از زمین به عنوان منبع سرد یا گرم برای ایجاد شرایطی مطبوع در مکان‌های سرپوشیده بهره جست. این پمپ‌ها، آب یا سیال دیگری را در

با افزایش روز به روز جمعیت جهان پیش‌بینی می‌گردد تا سال ۲۰۴۰، تقاضای جهانی انرژی به میزان ۳۰٪ افزایش یابد [۱]. بخش عمده‌ای از این افزایش مربوط به تامین انرژی لازم برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها می‌باشد. با توجه به فناوری‌های تهویه مطبوع موجود و سهم بالای سوخت‌های فسیلی برای تامین انرژی در آن‌ها، آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی افزایش یافته و سبب آسیب رساندن به محیط زیست می‌گردد. با افزایش آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی، توجه محققین به فاکتورهای زیست‌محیطی موجب گردیده است تا به منابع انرژی‌های تجدیدپذیر با جدیت بیشتری

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.farajollahi@sharif.edu

داخل لوله‌های غالباً افقی یا عمودی مدفون شده در زمین را به گردش در می‌آورند و گرما را از زمین به داخل ساختمان منتقل می‌کنند یا از ساختمان به زمین انتقال می‌دهند. دمای زمین در طول تابستان کمتر از دمای محیط و در طول زمستان بیش از دمای محیط است که در نتیجه آن ضریب عملکرد پمپ‌های گرمایی منبع زمینی به صورت قابل ملاحظه‌ای بالاتر از پمپ‌های گرمایی منبع هوایی است. از سوی دیگر، دمای زمین در طول سال تقریباً ثابت است که به پایداری شرایط عملکرد پمپ گرمایی منبع زمینی کمک می‌کند.

به مبادله‌کنی که وظیفه‌ی انتقال گرما با زمین را دارد مبادله‌کن گرمایی زمینی گفته می‌شود. یکی از انواع مبادله‌کن‌های گرمایی پیل‌های انرژی^۱ هستند. فناوری پیل‌های انرژی استفاده از منبع انرژی زمین گرمایی برای گرمایش و سرمایش بهینه ساختمان را ممکن می‌کند. در پیل انرژی چاهی با قطر حدود ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر و عمقی برابر ۱۰ تا ۶۰ متر ایجاد می‌شود و مبادله‌کن‌های زمینی داخل آن قرار داده می‌شود و چاه با ماده‌ای که ضریب انتقال گرمایی بالایی دارد پر می‌گردد. ایده‌ی این نوع فناوری برآمده از این حقیقت است که دمای زمین بعد از عمق ۸ الی ۱۰ متر در طول سال ثابت می‌ماند. بنابراین با استفاده از سیال در حال گردش در لوله‌های مبادله‌کن می‌توان گرمای ساختمان در تابستان را به زمین انتقال داد و در زمستان گرمای زمین را برای گرمایش ساختمان استخراج کرد.

تا به امروز تحقیقات بسیاری برای استفاده‌ی بهینه‌تر از فناوری پیل انرژی انجام شده است. یکی از تحقیقات با اهمیت بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد انرژی پیل است. نیکول [۲] به صورت عددی به بررسی نسبت ارتفاع به قطر پیل انرژی، بررسی قطر لوله، بررسی اضافه کردن دو نوع ضد یخ به سیال و بررسی دبی سیال بر انتقال گرما پرداخته است. فرانسس [۳] به بررسی تأثیر پارامترهایی مثل ضریب رسانش بتن، دبی، طول و ارتفاع پیل بر عملکرد پیل انرژی و پیدا کردن پارامتری که بیشترین تأثیر را دارد پرداخت. او نشان داد بیشترین تأثیر را تعداد لوله‌ها دارد.

بسیاری از پژوهشگران با استفاده از روش آزمایشگاهی و ساخت مبادله‌کن به بررسی عملکرد آن پرداختند. ویبو [۴] به بررسی آزمایشگاهی عملکرد گرمایی یک پیل انرژی با مبادله‌کن‌های گرمایی مارپیچ پرداخت. برای این کار یک سیستم آزمایشگاهی پیل انرژی ساخته شده است. در آزمایش‌های انجام شده تأثیر دمای آب ورودی، عملکرد متناوب پیل، گام مارپیچ و جنس پیل بر روی عملکرد گرمایی پیل مارپیچی و توزیع دمایی خاک اطراف آن دیده شده است. سیوک [۵] یک مطالعه عددی و تجربی را بر روی نتایج تست عملکرد گرمایی انجام شده ارائه کرده‌اند. این تست‌ها بر روی پیل‌های انرژی بتنی مقاومت بالا و پیش‌ساخته با مبادله‌کن‌های گرمایی مارپیچی و W شکل انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که نرخ انتقال گرما در مبادله‌کن مارپیچی دارای ۱۰ تا ۱۵ درصد بهره‌وری بالاتری نسبت به نوع W شکل بوده است. اما با در نظر گرفتن هزینه نصب و سایر هزینه‌ها، مبادله‌کن نوع W شکل ۲۰۰ تا ۲۵۰ درصد ارزان‌تر از مبادله‌کن مارپیچی است. همچنین لازم به ذکر است که تعداد مبادله‌

کن‌های مورد نیاز در نوع مارپیچی بسیار کمتر از نوع W شکل خواهد بود.

روش‌های تحلیل جهت کاهش هزینه محاسباتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. آنچلو [۶] به صورت تحلیلی به بررسی پیل انرژی با لوله مارپیچ و چند لوله U شکل کنار هم و بررسی تأثیر گام مارپیچ پرداخت. تاکاوا [۷] به صورت تحلیلی به محاسبه دمای زمین اطراف پیل انرژی به صورت تحلیلی و محاسبه سایر پارامترها مثل گرما خارج شده یا داده شده به لوله پرداخت. قسن [۸] به صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی به بررسی تأثیر رطوبت خاک بر عملکرد پیل انرژی پرداخت. در این تحقیق، یک بررسی تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی به منظور ارزیابی نرخ تبادل گرما پیل‌های انرژی که به صورت کامل یا نسبی داخل خاک غیر اشباع تعبیه شده‌اند انجام شده است. پینگ فنگ [۹] به صورت تحلیلی با استفاده از مدل چشمه خطی و مدل استوانه‌ای به شبیه‌سازی پیل انرژی پرداخت و نتایج را با حل سه بعدی مقایسه کرد و سپس با استفاده از این مدل، چیدمان لوله U شکل داخل زمین بررسی شد. در این پژوهش، یک مدل جدید کامپیوتری استوانه‌ای برای پیل‌های انرژی ارائه شده است. لی [۱۰] به صورت تحلیلی به ارائه یک مدل ساده تفاضل محدود برای یک پیل انرژی تک حلقه که در آن از مدل ظرفیت-مقاوتی نیز استفاده شده است، پرداخت. استفاده از این ساده‌سازی حجم محاسبات را در نرم‌افزارهای تجاری کاهش می‌دهد.

بررسی انواع آرایش مبادله‌کن‌ها نیز مورد توجه محققان قرار گرفته است. کیانگ [۱۱] به صورت عددی بررسی عملکرد سه شکل مبادله‌کن مارپیچی، U و W شکل پرداخت. جین [۱۲] به صورت عددی بررسی عملکرد و اقتصاد چهار نوع چیدمان لوله Triple U، Double U و Double W مارپیچ پرداخت. نتایج نشان داده است که U شکل دوتایی بدترین عملکرد را در عملکرد گرمایش و سرمایش داشته است که یعنی ۶۷ تا ۶۹ درصد از عملکرد گرمایی مبادله‌کن‌های مارپیچی و W شکل دوتایی را داشته‌اند. همچنین عملکرد مبادله‌کن‌های مارپیچی و W شکل دوتایی شبیه به هم بوده است. همچنین نشان داد که آرایش U شکل سه‌تایی بالاترین بهره‌وری گرمایی را در میان بقیه انواع داشته است. عباسعلی [۱۳] به صورت عددی به بررسی چیدمان انواع لوله و ارتفاع پیل انرژی و استفاده از پیل انرژی به صورت موازی و سری و بررسی تعداد حلقه‌های پیل انرژی پرداخت. در این پژوهش، نرخ انتقال گرما در هر یک از این سه نوع ساختار با استفاده از شبیه‌سازی انتقال گرما جابجایی و رسانش در لوله‌ها و پیل بتنی و خاک مشخص شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، ساختار W شکل پیوسته دارای بهینه‌ترین انتقال گرما در مقایسه با حالت‌های دیگر است.

بررسی شرایط آب و هوایی بر عملکرد مبادله‌کن توسط ملیس [۱۴] بررسی شد. وی به صورت عددی در سه شرایط آب و هوایی متفاوت به بررسی اینکه آیا پیل انرژی به تنهایی کافی است یا نیاز به سیستم کمکی دارد پرداخت که مشخص شد در مورد پیک مصرف فقط نیاز به سیستم کمکی است و همچنین به بررسی بازگشت‌ناپذیری دمای زمین پرداخت.

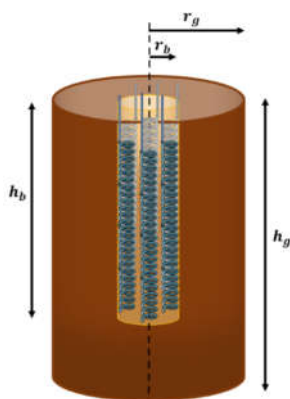
تلاش برای بهبود عملکرد مبادله‌کن نیز مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفت. یانگ [۱۵] به صورت عددی به مقایسه انتقال گرما

¹ Energy Piles

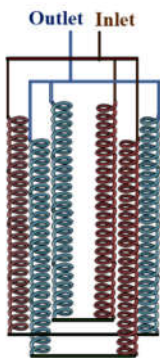
- زمین اطراف همگن و پیوسته فرض شده است.
- از تبخیر سطحی سطح زمین صرف نظر شده است.
- خصوصیات فیزیکی و گرمایی زمین ولوله‌ها ثابت و مستقل از دما، مکان و زمان فرض شده است.
- از تأثیر گرانش بر جریان سیال صرف نظر شده است.

فرض عملکرد سرمایشی سیستم در طول سال، سبب افزایش دمای زمین در طی زمان و در نهایت کاهش عملکرد سیستم در طول سالیانه متوالی می‌گردد. به همین دلیل لازم است همراه سیستم مورد بررسی در این پژوهش، از سیستم‌های بازایی دما جهت جلوگیری از کاهش عملکرد سیستم استفاده گردد. اما از آنجایی که هدف این پژوهش، بررسی عملکرد گرمایی آرایش ماریپچ سه‌گانه و میزان بهبودی است که این آرایش بر عملکرد پمپ گرمایی می‌گذارد، جهت بررسی صرفاً تأثیر این آرایش از سیستم‌های بازایی دما و تأثیر آن بر نتایج صرف نظر شده است. بدیهی است که استفاده از سیستم‌های بازایی دما در مکان‌هایی که پمپ گرمایی صرفاً برای گرمایش و یا سرمایش استفاده می‌شود ضروری است.

طرحواره مدل پیل انرژی در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل زمین اطراف پیل انرژی تا شعاع r_g می‌باشد. شعاع و ارتفاع پیل انرژی به ترتیب r_b و h_b می‌باشد. همچنین مبادله‌کن گرمایی شامل شش مبادله‌کن ماریپچی شکل است که از جنس لوله‌های پلی‌اتیلنی می‌باشد. نحوه‌ی اتصال این شش مبادله‌کن ماریپچی شکل که تحت عنوان مبادله‌کن ماریپچ سه‌گانه شناخته می‌شود در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره پیل انرژی ماریپچ سه‌گانه در زمین.



شکل ۲- نحوه‌ی اتصال مبادله‌کن ماریپچ سه‌گانه.

در مدل ماریپچ در پیل انرژی و مدل U شکل مبادله‌کن‌های قدیمی پرداخت. آن‌ها یافتند که اندازه شعاعی زیاد منبع گرمایی، طول زیاد لوله‌های مبادله‌کن گرمایی داخل یک سوراخ و دوباره پر شدن لوله‌ها با مواد دارای رسانایی گرمایی بالا می‌تواند به بهره‌وری مبادله‌کن‌های گرمایی منبع زمینی کمک کند. لینگ پنگ [۱۶] به صورت آزمایشگاهی تأثیر اضافه کردن گرافیت به بتن برای افزایش انتقال گرما در پیل انرژی را بررسی کرد. با انجام این کار، ضریب انتقال گرما بتن از ۱/۷۱ به ۲/۸۴ وات بر متر بر کلون افزایش یافت.

در تمامی مبادله‌کن‌های زمینی عمودی، مشکل اصلی هزینه نصب مبادله‌کن‌های زمینی با توجه هزینه‌ی بالای حفاری است. بدین ترتیب باید بتوان این هزینه‌ها را کاهش داد. یکی از راه‌های کاهش هزینه‌ها، استفاده بهینه از چاه‌های حفر شده است به گونه‌ای که از تمام توان چاه برای انتقال گرما مبادله‌کن با زمین استفاده شود. برای این منظور با چیدمان مناسب مبادله‌کن‌ها در چاه می‌توان به این هدف رسید. مرور ادبیات نشان داد که در حاضر پژوهش‌های بسیاری در زمینه بررسی عملکرد گرمایی انواع آرایش مبادله‌کن در پیل انرژی انجام شده است و همچنان تلاش برای ارائه آرایش‌هایی با عملکرد گرمایی بهتر ادامه دارد. یکی از مبادله‌کن‌های مناسب جهت این بهره‌برداری، مبادله‌کن گرمایی زمینی ماریپچ سه‌گانه است که با توجه به مرور ادبیات انجام شده مشخص است که تا کنون بررسی در این زمینه انجام نشده است. با استفاده از این مبادله‌کن‌ها می‌توان تبادل گرما بیشتری با زمین اطراف ایجاد کرد و به دنبال آن باعث کاهش تعداد چاه‌ها حفر شده برای استفاده از پمپ گرمایی زمینی و کاهش هزینه‌های اجرایی شد.

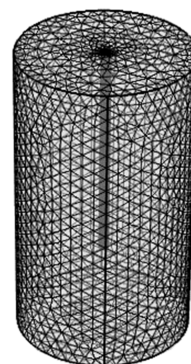
بدین ترتیب در این مقاله یک مدل سه‌بعدی عددی گذرا از پیل انرژی با مبادله‌کن ماریپچ سه‌گانه جهت بررسی تأثیر این آرایش بر بهبود عملکرد گرمایی پیل انرژی ایجاد شده است. بدین منظور پس از اعتبارسنجی و بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی و گام زمانی، به منظور بررسی عملکرد گرمایی پیل انرژی با مبادله‌کن زمینی ماریپچ سه‌گانه به مدل‌سازی یک ساله این پیل انرژی در شهر بندعباس پرداخته شده است. همچنین جهت بررسی میزان بهبود عملکرد پیل انرژی با استفاده از این آرایش، شبیه‌سازی مشابهی برای پیل انرژی با مبادله‌کن تک ماریپچ که یکی از مبادله‌کن‌های با عملکرد مناسب و پرکاربرد در پمپ‌های گرمایی زمینی می‌باشد، انجام شده است و میزان بهبود عملکرد گرمایی پیل انرژی با مبادله‌کن ماریپچ سه‌گانه در مقایسه با آرایش تک ماریپچ ارائه شده است. در نهایت به مطالعه پارامتری دو پارامتر مهم گام و قطر حلقه بر عملکرد سیستم پرداخته شده است.

۲- مدل عددی پیل انرژی

در این مطالعه یک مدل سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی گذرا برای پیل انرژی با مبادله‌کن زمینی ماریپچ سه‌گانه و زمین اطراف آن تحت شرایط محیطی شهر بندعباس، ساخته شده است. پیل انرژی از طریق دمای ورودی و خروجی چگالنده به پمپ گرمایی کوپل می‌شود. در این مدل عددی فرض‌های زیر انجام شده است:

- به دلیل گرم سیری بودن منطقه، سیستم در طول سال صرفاً برای سرمایش به کار رفته است.

مدل با استفاده از المان‌های چهاروجهی نامنظم شبکه بندی می‌شود که بزرگترین سائز المان ۱/۵ متر و کوچکترین سائز ۰/۰۴ متر می‌باشد. در نواحی که سیال در جریان است از شبکه‌بندی بسیار کوچک استفاده شده است و با افزایش فاصله از لوله‌ها و کاهش گرادیان دما شبکه‌بندی به تدریج بزرگ می‌شود. در شکل ۳ شبکه‌بندی ایجادشده در شبیه‌سازی عددی نمایش داده شده است.



شکل ۳- شبکه‌بندی ایجادشده در شبیه‌سازی عددی.

با بررسی استقلال از شبکه، با توجه به آنچه در جدول ۱ آورده شده است، خطای نسبی عملکرد سالانه COP_{annual}^1 کمتر از ۱٪ برای زمانی که تعداد المان‌ها بیشتر از ۱۶۵۲۵۳ می‌باشد، محاسبه شده‌است. خطای نسبی به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود.

$$Relative-Error\% = \left| \frac{X_{grid} - X_{coarser-grid}}{X_{grid}} \right| \quad (1)$$

که در آن x پارامترهای مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۱- تغییرات COP_{annual} برای شبکه‌بندی مختلف.

تعداد شبکه	COP_{annual}	خطای نسبی (درصد)
۱۶۵۲۵۳	۳/۵۸	-
۳۲۹۱۴۶	۳/۶۱	۰/۸
۵۲۸۳۲۰	۳/۶۱	۰

همچنین تغییرات این ضریب در سه گام زمانی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه نیز کمتر از ۱٪ محاسبه شده است. بدین ترتیب گام زمانی ۶۰ دقیقه برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی است که برای آب داخل لوله، لوله‌ها و زمین اطراف حل می‌گردند.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)) \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla (\rho C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

که در آن‌ها، $\vec{V}$ بردار سرعت، ρ چگالی سیال، P فشار و T دما، k ضریب انتقال گرما رسانش، C_p گرمای ویژه است. همچنین از ترم ادوکشن در بخش‌های جامد صرف نظر شده است. از آنجایی که چرخه مبادله‌کن گرمایی آبی یک چرخه بسته است، دمای آب ورودی مبادله‌کن گرمایی آبی به زمین را می‌توان با استفاده از بار گرمایی مبادله شده در چگالنده و دمای آب خروجی از مبادله‌کن گرمایی را با استفاده از رابطه (۵) محاسبه نمود.

$$T_{in,w} = T_{out,w} + \frac{Q_{cond}}{m_w C_{p,w}} \quad (5)$$

که در آن $T_{in,w}$ دمای آب ورودی به زمین در مبادله‌کن گرمایی زمینی، $T_{out,w}$ دمای آب خروجی از زمین در مبادله‌کن گرمایی زمینی، Q_{cond} مقدار گرما انتقال‌یافته از چگالنده به مبادله‌کن گرمایی زمینی، m_w دبی جرمی آب و $C_{p,w}$ ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آب می‌باشد. مقدار $T_{in,w}$ در هر گام زمانی شبیه‌سازی با قرار دادن مقادیر $T_{out,w}$ ، Q_{cond} و C_p در یک گام زمانی عقب‌تر در رابطه (۵) محاسبه می‌گردد. بار گرمایی چگالنده را می‌توان مستقیماً توسط بار گرمایی ساختمان و ضریب عملکرد پمپ گرمایی به‌صورت رابطه‌ی (۶) محاسبه نمود.

$$Q_{cond} = Q_{building} \left(1 + \frac{1}{COP} \right) \quad (6)$$

که در آن $Q_{building}$ بار گرمایی ساختمان و COP ضریب عملکرد سیستم است. در این پژوهش با در نظر گرفتن اجزا و کارکرد سیستم مورد بررسی همانند سیستم استافل و همکاران [۱۷] ضریب عملکرد سیستم در حالت سرمایش از طریق رابطه‌ی تجربی پیشنهادی آن‌ها به‌صورت رابطه‌ی (۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$COP = 7.77 - 0.15\Delta T + 0.000734\Delta T^2 \quad (7)$$

که در آن ΔT ، اختلاف دما بین آب خروجی از مبادله‌کن گرمایی زمینی و آب سرد وارد شده به ساختمان است. در این پژوهش دمای آب سرد وارد شده به ساختمان مقدار ثابت هفت درجه سلسیوس فرض شده است و دمای آب خروجی از مبادله‌کن گرمایی زمینی با شبیه‌سازی عددی به دست می‌آید.

ضریب عملکرد سالانه سیستم نسبت بار سالانه ساختمان به انرژی مصرفی سالانه سیستم طبق رابطه (۸) تعریف می‌شود [۱۸].

$$COP_{annual} = \frac{\sum Q_{building}}{\sum (W_{comp} + W_{pump})} \quad (8)$$

که در آن W_{pump} و W_{comp} به ترتیب کار کمپرسور و پمپ می‌باشد. کار کمپرسور با توجه به بار ساختمان و ضریب عملکرد سیستم محاسبه می‌شود [۱۹].

$$W_{comp} = \frac{Q_{building}}{COP} \quad (9)$$

انرژی مصرفی پمپ تابعی از η راندمان پمپ [۲۰]، $\dot{V}$ دبی حجمی سیال و ΔP افت فشار داخل لوله‌های مبادله‌کن گرمایی زمینی است

¹ Coefficient of performance

که به صورت رابطه‌ی (۱۰) تعریف می‌شود.

$$W_{\text{pump}} = \frac{\dot{V}\Delta P}{\eta} \quad (10)$$

هندسه‌ی شبیه‌سازی شده شامل چهار بخش خاک، بتن (که پیل انرژی با آن پر شده است)، لوله و آب می‌باشد. برای شرط مرزی سیال ورودی، از رابطه‌ی (۵) برای دمای سیال ورودی استفاده شده است. همچنین مقدار دبی سیال ورودی، مقداری ثابت است که نحوه محاسبه آن در ادامه ذکر خواهد شد. شعاع استوانه‌ای که با استفاده از آن زمین مدل می‌گردد به اندازه‌ی بزرگ در نظر گرفته می‌شود، که بتوان شرط مرزی عایق را در دیواره‌های این استوانه در نظر گرفت. از آنجایی که مرز بالا تحت تاثیر عوامل محیطی مطابق شکل ۴ می‌باشد، شرط شار مرزی گرمایی متغیر طبق رابطه‌ی (۱۱) و (۱۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{q}_{\text{net}} = \dot{q}_{\text{solar}} + \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{sky}} \quad (11)$$

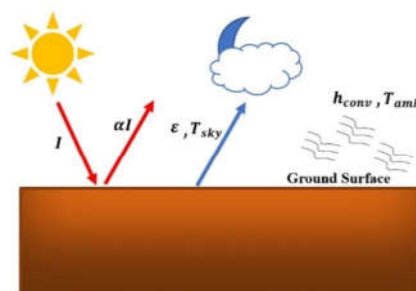
$$\dot{q}_{\text{net}} = (1 - \alpha)I + h_c(T_{\text{amb}} - T_{\text{surf}}) + \varepsilon\sigma(T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{surf}}^4) \quad (12)$$

که در رابطه‌ی (۱۲) α نشان دهنده ضریب بازتاب ($\alpha = 0.3$)، ε نشان‌دهنده ضریب انتشار خاک ($\varepsilon = 0.9$) و σ بیانگر ضریب استفان بولتزمن ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) می‌باشد. همچنین T_{surf} ، T_{amb} و T_{sky} به ترتیب دمای هوای محیط، سطح زمین و دمای آسمان است. ضریب انتقال گرما جابجایی با استفاده از رابطه‌ی تجربی جرج [۲۱] به صورت رابطه‌ی (۱۳) تخمین زده می‌شود.

$$h_c = 5.8 + 3.9V_{\text{wind}} \quad (13)$$

که در آن V_{wind} سرعت باد می‌باشد. و همچنین دمای آسمان به صورت رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود [۲۲].

$$T_{\text{sky}} = 0.0522T_{\text{amb}}^{1.5} \quad (14)$$



شکل ۴- مکانیزم‌های انتقال گرما در سطح زمین به عنوان شرط مرزی.

دمای اولیه زمین، پیل انرژی و سیال آب، دمای مختل نشده‌ی زمین (دمای زمین بدون مبادله‌کن) در اولین روز شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. برای مشخص کردن این دما، شبیه‌سازی برای هندسه‌ی متشکل از خاک بدون مبادله‌کن گرمایی با شرایط مرزی یاد شده، انجام شده است. معیار همگرایی شبیه‌سازی، اختلاف دمای دو سال پیاپی کمتر از ۰/۱ درصد در نظر گرفته شده است. دمای خاک در عمق ۲۵ متری به عنوان شرط مرزی پایینی هندسه مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

کاواناگ و رافرتی [۲۳] دو معیار به منظور طراحی بهینه برای مبادله-

کن‌های گرمایی زمینی ارائه کرده‌اند:

- بیشینه اختلاف دمای آب ورودی و خروجی از مبادله‌کن گرمایی بین ۵/۶ الی ۸/۴ درجه‌ی سلسیوس باشد.
- بیشینه‌ی اختلاف دمای آب خروجی از مبادله‌کن گرمایی زمینی و دمای مختل نشده خاک در عمق زمین بین ۱۱ الی ۱۷ درجه‌ی سلسیوس باشد.

در این مطالعه با انتخاب دو مقدار ۵/۶ و ۱۷ برای معیارهای ذکر شده، با استفاده از سعی و خطا برای مقادیر دبی سیال داخل مبادله‌کن و بیشینه بار تامین شده، بیشینه‌ی بار تامین شده توسط پیل انرژی به دست آمده است.

۴- اعتبارسنجی مدل

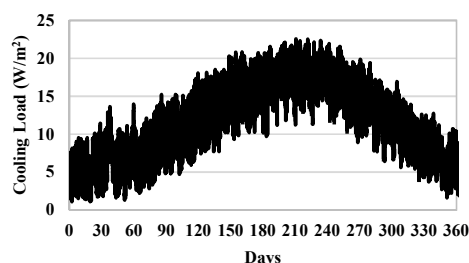
برای اعتبارسنجی پیل عمودی انرژی از نتایج تجربی ژاو [۲۴] استفاده شده است. وی به صورت تجربی پاسخ دمایی سیال آب را با تغییرات زمان در یک پیل عمودی با لوله‌های مبادله‌کن مارپیچ، تحت شار گرمایی ثابت ۳/۶ kW اندازه گرفت. مدت زمان این آزمایش ۱۶۰۰۰ ثانیه بود و سایر پارامترهای این آزمایش در جدول ۲ خلاصه شده است. شکل ۵ دمای آب خروجی به دست آمده با استفاده از مدل عددی حاضر در مقابل نتایج حاصل از مطالعه تجربی نشان می‌دهد. برای بررسی خطای مدل‌سازی عددی حاضر از روش خطای میانگین مطلق که به صورت زیر تعریف شده است استفاده می‌شود.

$$MES = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i - T_{\text{ref}}| \quad (15)$$

که در آن e_i و T_i به ترتیب بیانگر نتایج عددی و نتایج تجربی است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد خطای میانگین مطلق بین مطالعه حاضر با نتایج تجربی ژاو [۲۴] در حدود ۰/۱۱ می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که مدل عددی مورد استفاده از دقت کافی برخوردار می‌باشد.

جدول ۲- پارامترهای مطالعه تجربی ژاو [۲۴].

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
قطر پیل (m)	۱	ارتفاع پیل (m)	۲۵
قطر حلقه‌ی مارپیچ (m)	۰/۸	قطر لوله‌ی آب (m)	۰/۰۲۵
گام لوله‌ی مارپیچ (m)	۰/۲۵	ضخامت لوله (m)	۰/۰۲۳
رسانش گرمایی لوله (W/(m.K))	۰/۴۲	رسانش گرمایی سیمان (W/(m.K))	۱/۸
رسانش گرمایی آب (W/(m.K))	۰/۵۹۹	چگالی سیمان (kg/m³)	۲۳۰۰
چگالی آب (kg/m³)	۹۹۸	چگالی زمین (kg/m³)	۱۸۰۰
گرمایی ویژه سیمان (J/(kg.K))	۸۸۰	گرمایی ویژه زمین (J/(kg.K))	۱۲۰۰
گرمای ویژه آب (J/(kg.K))	۴۱۸۳	فاصله‌ی نسبی لوله‌های عمودی (m)	۰/۹



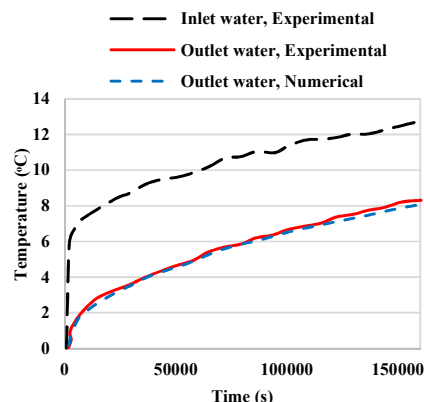
شکل ۶- بار سرمایشی لازم برای مطالعه موردی.

جدول ۳- خواص فیزیکی خاک.

چگالی kg / m ³	ظرفیت گرمایی ویژه J / (kg.K)	رسانش گرمایی W / (m.K)
۱۵۸۷/۳	۸۸۰	۱/۲۴

با توجه به این که هدف از طراحی سیستم پیل انرژی انتقال گرمای ساختمان از طریق سیال درحال گردش درون لوله‌ها به زمین می‌باشد و از طرفی با توجه به این که هر پیل انرژی با قطر و ارتفاع مشخص، به‌تنهایی توانی دفع گرمای کل ساختمان را ندارد، لازم است که با توجه به بار سرمایش ساختمان تعدادی از سیستم‌های پیل‌انرژی تعبیه شوند. با توجه به هزینه‌ی بسیار زیاد حفر چاه برای پیل‌های انرژی عمودی لازم است که طراحی هر پیل انرژی بهینه باشد به‌طوری که از حداکثر ظرفیت آن استفاده شود. به منظور رسیدن به این هدف لازم است که با انتخاب آرایش مناسب مبادله‌کن زمینی در پیل انرژی، بیشترین انتقال گرما با زمین اطراف انجام شود تا هر پیل انرژی بتواند نسبت بار بیشتری از ساختمان را تامین کرده و تعداد پیل‌های انرژی کاهش یابد. بدین ترتیب در این پژوهش به بررسی آرایش مارپیچ سه‌گانه پرداخته شده است.

در اولین گام لازم است دمای اولیه زمین در شهر بندرعباس محاسبه گردد و به عنوان شرط اولیه شبیه‌سازی استفاده گردد. برای این هدف، شبیه‌سازی بلند مدت هفتاد ساله برای زمین در شهر بندرعباس با شرایط واقعی آب و هوا و بدون قرار دادن مبادله‌کن زمینی انجام شده است. برای این منظور، زمین به صورت دو بعدی با عمق ۲۵ متر شبیه‌سازی شد و شرط مرزی شار گرمایی مطابق رابطه‌ی (۱۱) با شرایط واقعی آب و هوا شهر بندرعباس به سطح زمین و نیز شرط مرزی تغییرات دما صفر به عمق زمین اعمال شد. در طی هفتاد سال شبیه‌سازی، بیشینه اختلاف دمای روز اول سال هفتادم و شصت و نهم کمتر از ۰/۱ درصد محاسبه شده است. به همین دلیل هفتاد سال زمان مناسبی برای محاسبه دمای مختل نشده‌ی زمین است. از این شبیه‌سازی برای محاسبه دمای واقعی زمین در روز اول شبیه‌سازی اصلی که مبادله‌کن زمینی قرار دارد به عنوان شرط اولیه استفاده خواهد شد. در شکل ۷ پروفیل دمای زمین در روز اول سال در اعماق زمین برای شهر بندرعباس ترسیم شده است. از این پروفیل دما به عنوان شرط اولیه برای شبیه‌سازی یک‌ساله مبادله‌کن زمینی در شهر بندرعباس استفاده خواهد شد.



شکل ۵- دمای آب خروجی در مطالعه حاضر و مطالعه‌ی ژاو [۲۴].

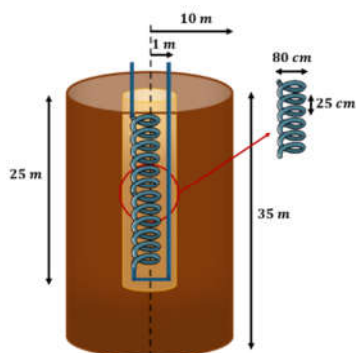
۵- نتایج و بحث

در این مطالعه به بررسی مدل عددی ایجاد شده برای پیل انرژی عمودی با لوله‌ی مارپیچ سه‌گانه با استفاده از نرم‌افزار کامسول^۱ نسخه ۵،۳ [۲۵] پرداخته شده است. جهت این بررسی، شهر گرمسیر بندرعباس انتخاب شده است. بدین ترتیب سیستم تنها در حالت سرمایش کار می‌کند. بدین منظور ابتدا اطلاعات اقلیمی این شهر از جمله تغییرات ساعتی دمای محیط، سرعت باد و مقدار تابش خورشید بر واحد سطح زمین از پایگاه داده‌ای آب و هوایی [۲۶] استخراج شده است. میانگین دمای سالیانه در بندرعباس ۲۷/۶۵ درجه سلسیوس و بیشینه دمای سالیانه آن ۴۱ درجه سلسیوس است. همچنین میانگین تغییرات دمای شبانه‌روز در تابستان ۹/۵ درجه سلسیوس و در زمستان ۱۰/۵ درجه سلسیوس است، و میانگین سالیانه سرعت باد در بندرعباس ۲/۸۲ متر بر ثانیه است.

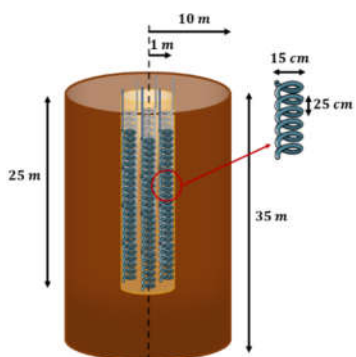
در این پژوهش، جهت بررسی عملکرد گرمایی پیل انرژی برای بار مشخصی از ساختمان، یک واحد مسکونی یک طبقه در شهر بندرعباس با مساحت ۱۰۰ مترمربع در نظر گرفته شده است. جهت ساختمان شمالی-جنوبی بوده و نسبت مساحت پنجره به مساحت کف ساختمان تقریباً ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای محاسبه بار ساعتی این ساختمان از نرم‌افزار کریر [۲۷] استفاده شده است. مقدار بار به دست آمده در شکل ۶ نشان داده شده است. بیشینه بار ساختمان بر واحد سطح و بار مجموع ساختمان بر واحد سطح در طول سال به ترتیب برابر با ۲۲۵ وات بر مترمربع و ۱۰۳۰ کیلووات بر مترمربع محاسبه شده است. مبدأ زمانی در مطالعه حاضر اولین روز میلادی لحاظ شده است. پارامترهای هندسی و نوع لوله‌های انتخاب شده در این پژوهش مانند مورد مطالعه شده در پژوهش تجربی ژاو [۲۴] می‌باشد و همچنین خواص آب متغیر با دما در نظر گرفته شده است. خواص فیزیکی خاک در جدول ۳ آورده شده است.

^۱ COMSOL 5.3

پیدا خواهد کرد. بنابراین، بیشتر بودن کار مصرفی کل در آرایش مارپیچ سه گانه، به دلیل کار بالای کمپرسور در این آرایش است.



شکل ۸- مشخصات پیل انرژی با آرایش تک مارپیچ.

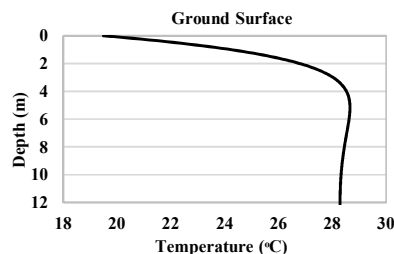


شکل ۹- مشخصات پیل انرژی با آرایش مارپیچ سه گانه.

جدول ۴- نتایج شبیه سازی پیل انرژی.

تعداد پیل مورد نیاز	افت فشار Pa	دبی سیال $m^3 / s \times 10^{-5}$	کار مصرفی کل kW	نسبت بار سرمایش به بار کل ساختمان	ضریب عملکرد	آرایش مبادله-کن
۱۵	۱۵۷۲۵	۷/۸۷۵	۲۰۱۴	۰/۰۷	۳/۵۸	مارپیچ ساده
۱۲	۱۰۷	۱۰/۱۲۵	۲۵۸۸	۰/۰۹	۳/۵۸	مارپیچ سه گانه

حال برای این آرایش مبادله کن زمینی به بررسی تاثیر دو پارامتر تاثیرگذار گام و قطر حلقه های مارپیچ بر عملکرد گرمایی مبادله کن پرداخته می شود. دامنه تغییرات این دو پارامتر در جدول ۵ گزارش شده است. در این بررسی قطر لوله های مبادله کن ۲۰/۴ میلی متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- دمای مختل نشده زمین در شهر بندرعباس در روز اول سال.

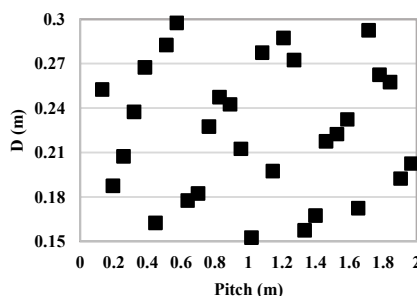
با محاسبه دمای اولیه زمین و اعمال شرایط مرزی ذکر شده در بخش های قبل، به شبیه سازی یک ساله پیل انرژی تک مارپیچ و مارپیچ سه گانه و مقایسه آن ها با هم برای شهر بندرعباس در ایران پرداخته شده است. لازم به ذکر است آرایش تک مارپیچ یکی از آرایش های پرکاربرد و با نرخ انتقال گرما بالا محسوب می گردد و مقایسه آرایش مارپیچ سه گانه با آن کاملاً عادلانه می باشد. برای این منظور پیل انرژی به قطر یک متر و ارتفاع ۲۵ متر در زمینی با قطر ۱۰ متر و ارتفاع ۳۵ در نظر گرفته شده است. شعاع استوانه ای که با استفاده از آن زمین مدل می گردد به اندازه ای بزرگ در نظر گرفته می شود، که بتوان شرط مرزی عایق را در دیواره های این استوانه در نظر گرفت. همچنین برای بررسی عادلانه این دو آرایش مبادله کن زمینی، فرض بر آن است که به منظور برابری سطح انتقال گرما، طول و قطر لوله ی مورد استفاده در پیل انرژی برای این دو آرایش یکسان باشد. بدین ترتیب برای پیل انرژی با مبادله کن مارپیچ ساده از حلقه هایی با قطر ۸۰ سانتی متر، گام حلقه ۲۵ سانتی متر و تعداد ۹۶ حلقه در نظر گرفته شده است (شکل ۸ مشاهده گردد). برای برقراری شرط برابری مساحت سطح تماس برای آرایش مارپیچ سه گانه از شش حلقه ی مارپیچی با قطر ۱۵ سانتی متر، گام حلقه ۲۵ سانتی متر و تعداد ۹۶ حلقه در نظر گرفته شده است (شکل ۹ مشاهده گردد). برای هر دو آرایش، قطر لوله های مبادله کن ۲۰/۴ میلی متر در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب شاهد سطح تماس برابر برای هر دو آرایش بوده و مقایسه این دو با یکدیگر عادلانه می باشد. از دو معیار ذکر شده توسط کاواناگ و رافرتی [۲۳] به منظور طراحی بهینه برای مبادله کن های گرمایی زمینی استفاده شده است.

نتایج شبیه سازی در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد با برابری تمام شرایط از جمله ابعاد چاه، طول لوله و سایر پارامترها، آرایش مارپیچ سه گانه می تواند بار بیشتری حدود ۲۸٪ نسبت به آرایش تک مارپیچ را ایجاد کند در نتیجه تعداد چاه های حفر شده که قیمت اصلی مبادله کن های زمینی را ایجاد می کند از تعداد ۱۵ به ۱۲ کاهش می دهد. بدین ترتیب هزینه ی اجرای پمپ های گرمایی زمینی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. همچنین مشاهده می گردد مقدار کار مصرفی کل در آرایش مارپیچ سه گانه افزایش می یابد. با توجه به افزایش همزمان بار تامین شده توسط پیل انرژی و کار مصرفی کل در آرایش مارپیچ سه گانه، مقدار ضریب عملکرد آن تقریباً با آرایش مارپیچ ساده یکسان به دست آمده است که این موضوع نتیجه استفاده از دو معیار کاواناگ و رافرتی [۲۳] است و مقایسه نتایج را عادلانه تر کرده است. همچنین مشاهده می گردد که افت فشار در آرایش مارپیچ سه گانه بسیار کمتر از آرایش تک مارپیچ است که با در نظر گرفتن دبی سیال مشاهده می گردد کار پمپ کاهش محسوسی

جدول ۵- دامنه تغییرات پارامترهای ورودی جهت مطالعه پارامتری.

گام مارپیچ	قطر مارپیچ
۰/۱ تا ۲ متر	۰/۱۵ تا ۰/۳۰ متر

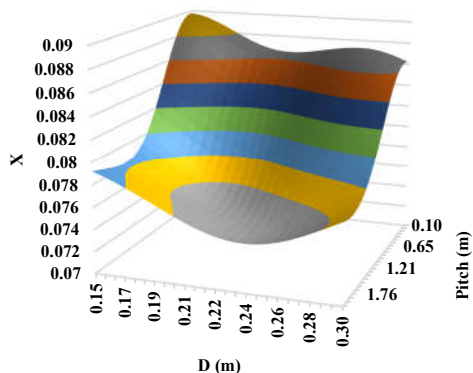
برای انجام دقیق فرآیند مطالعه پارامتری، نیاز به گسسته کردن محدوده تغییرات پارامترهای ورودی و انتخاب تعداد محدودی از این شرایط جهت شبیه‌سازی است. برای این منظور از روش طراحی بهینه پر کردن فضا^۱ [۲۸] جهت انتخاب موارد شبیه‌سازی استفاده شده تعداد نمونه‌های انتخاب شده جهت شبیه‌سازی برابر ۳۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ پراکندگی این داده‌ها برای گام و قطر مارپیچ مشاهده می‌کنید. همانطور که مشاهده می‌گردد پراکندگی داده‌ها به خوبی کل فضای مورد مطالعه را پوشش داده است.



شکل ۱۰- پراکندگی گام و قطر مارپیچ نمونه‌های انتخاب شده جهت شبیه‌سازی.

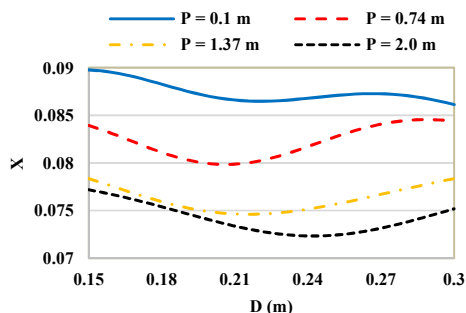
بدین ترتیب شبیه‌سازی موارد ذکر شده برای مدت یک سال انجام گردید و نسبت بار سرمایش به بار کل ساختمان (X) محاسبه شد. برای بررسی سایر شرایط آزمایش نشده‌ای که در محدوده تغییرات پارامترهای ورودی وجود دارند نیاز به تعمیم شرایط محدود انتخابی مورد آزمایش به شرایط آزمایش نشده است. برای این منظور نیاز به انتخاب مدلی برای سطح پاسخ^۲ است که در این پژوهش از مدل رگرسیون غیر پارامتری^۳ [۲۹-۳۰] استفاده شده است.

در شکل ۱۱ سطح پاسخ به دست آمده را در فضای سه‌بعدی مشاهده می‌کنید. جهت بررسی دقیق‌تر تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نتایج، در شکل ۱۲ تغییرات نسبت بار سرمایش به بار کل ساختمان را در فضای دو بعدی بر حسب قطر حلقه برای گام‌های مختلف را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۱- نتایج سطح پاسخ در فضای سه بعدی.

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد با افزایش گام مقدار X در تمامی قطرهای حلقه کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش سطح انتقال گرما می‌باشد. با کاهش سطح انتقال گرما، تبادل گرمایی با زمین اطراف کاسته شده و باری که مبادله‌کن تامین می‌کند کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد با افزایش قطر مارپیچ مقدار X کاهش می‌یابد که دلیل آن تداخل گرمایی بین لوله‌های مارپیچ است. با افزایش قطر مارپیچ، سطح انتقال گرما افزایش یافته و به دلیل نزدیکی حلقه‌ها به یکدیگر، سبب افزایش دمای زمین وسط مارپیچ می‌گردد و این تداخل گرمایی و افزایش دمای زمین باعث کاهش نرخ انتقال گرما بین سیال داخل لوله و زمین و کاهش مقدار X می‌گردد. بدین ترتیب تاثیر تداخل گرمایی بیش از افزایش سطح انتقال گرما می‌باشد. اما از جایی به بعد با افزایش قطر مارپیچ، مقدار X افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش قطر مارپیچ و کاهش تداخل گرمایی است. یعنی در این شرایط تاثیر افزایش سطح انتقال گرما بر تداخل گرمایی پیش گرفته و سبب افزایش X می‌گردد. اما در گام‌های پایین، مجدداً با افزایش مقدار قطر حلقه، مارپیچ‌های اطراف به یکدیگر نزدیک شده و این بار تداخل گرمایی بین مارپیچ‌های اطراف رخ می‌دهد که این امر خود را در کاهش مقدار X در انتهای نمودار نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- تغییرات X بر حسب قطر حلقه برای گام‌های مختلف.

¹ Optimal Space-Filling Design

² Response Surface

³ Non-Parametric Regression

of different types of ground heat exchangers in energy piles. *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 393-402, 2015.

- [6] Zarrella A., De Carli, M. and Galgaro, A., Thermal performance of two types of energy foundation pile: helical pipe and triple U-tube. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 61, no. 2, pp. 301-310, 2013.
- [7] Katsura T., Nagano K., Sakata Y. and Wakayama, H., A design and simulation tool for ground source heat pump system using energy piles with large diameter. *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, no. 4, pp. 1505-1520, 2019.
- [8] Akrouch G. A., Sánchez M. and Briaud J.-L., An experimental, analytical and numerical study on the thermal efficiency of energy piles in unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*, Vol. 71, pp. 207-220, 2016.
- [9] Hu P., Zha J., Lei F., Zhu N. and Wu, T., A composite cylindrical model and its application in analysis of thermal response and performance for energy pile. *Energy and buildings*, Vol. 84, pp. 324-332, 2014.
- [10] Lee C. and Lam H., A simplified model of energy pile for ground-source heat pump systems. *Energy*, Vol. 55, pp. 838-845, 2013.
- [11] Zhao Q., Chen B. and Liu F., Study on the thermal performance of several types of energy pile ground heat exchangers: U-shaped, W-shaped and spiral-shaped. *Energy and Buildings*, Vol. 133, pp. 335-344, 2016.
- [12] Luo J., Zhao H., Gui S., Xiang W., Rohn J. and Blum P., Thermo-economic analysis of four different types of ground heat exchangers in energy piles. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, pp. 11-19, 2016.
- [13] Mehrizi A. A., Porkhial S., Bezayan B. and Lotfzadeh H., Energy pile foundation simulation for different configurations of ground source heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 105-114, 2016.
- [14] Sutman M., Speranza G., Ferrari A., Larrey-Lassalle P. and Laloui L., Long-term performance and life cycle assessment of energy piles in three different climatic conditions. *Renewable Energy*, Vol. 146, pp. 1177-1191, 2020.
- [15] Zhao Q., Chen B., Tian M. and Liu F., Investigation on the thermal behavior of energy piles and borehole heat exchangers: A case study. *Energy*, Vol. 162, pp. 787-797, 2018.
- [16] Kong L.-p., Qiao L., Xiao Y.-y. and Li Q.-w., A study on heat transfer characteristics and pile group influence of enhanced heat transfer energy piles. *Journal of Building Engineering*, Vol. 24, pp. 100768, 2019.
- [17] Staffell I., Brett D., Brandon N. and Hawkes A., A review of domestic heat pumps. *Energy Environ Sci*, Vol. 5, pp. 9291-306, 2012.
- [18] Habibi M. and Hakkaki-Fard A., Long-term energy and exergy analysis of heat pumps with different types of ground and air heat exchangers. *Int J Refrig*, Vol. 100, pp. 414-33, 2019.

[۱۹] قاضی‌زاده احسانی ح.، بنی اسد عسکری ا. و عامری م.، بررسی ترموآکونومیک پمپ حرارتی منبع زمینی انبساط مستقیم دی‌اکسیدکربن با استفاده از منبسط‌کننده و مبادله‌کن حرارتی داخلی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۲، ص ۱۵۹-۱۶۸، ۱۴۰۰.

[۲۰] عالی ا.، پور محمود ن. و زارع و.، تحلیل آگزازی چرخه ی جدید پیشنهادی برای تولید توان از چاه های زمین گرمایی سیلان. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۱، ص ۲۵۱-۲۶۰، ۱۳۹۷.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی پیل انرژی عمودی با مبادله‌کن مارپیچ سه‌گانه، ابتدا یک مدل عددی سه‌بعدی گذرا ایجاد شده‌است. بعد از بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی و گام زمانی و همچنین اعتبارسنجی این مدل عددی، با در نظر گرفتن یک واحد مسکونی در شهر بندرعباس با مساحت ۱۰۰ مترمربع، تاثیر آرایش مبادله‌کن گرمایی مارپیچ سه‌گانه بر روی میزان گرمایی از کل بار سرمایش ساختمان، که پیل انرژی می‌تواند به زمین انتقال دهد، بررسی شده‌است. مشخص شد که با استفاده از آرایش مارپیچ سه‌گانه نسبت به آرایش متداول تک مارپیچ، در حالتی که مساحت انتقال گرما برای هر دو آرایش برابر در نظر گرفته شود، نسبت بار سرمایش پیل انرژی به بار کل ساختمان به میزان ۲۸٪ افزایش می‌یابد که در نتیجه آن تعداد پیل مورد نیاز برای بار سرمایش کل ساختمان کاهش می‌یابد. این امر موجب کاهش قابل توجه تعداد پیل‌های انرژی می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد افت فشار پمپ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین در این پژوهش تاثیر دو پارامتر تاثیرگذار گام و قطر حلقه‌های مارپیچ بر عملکرد سیستم بررسی شد. برای این منظور با تولید ۳۰ مورد شرایط شبیه‌سازی با استفاده از روش طراحی بهینه برگردن فضا به ترسیم سطح پاسخ با استفاده از روش رگرسیون غیرپارامتری پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش گام مقدار بار سرمایشی تامین شده توسط مبادله‌کن زمینی مارپیچ سه‌گانه به دلیل کاهش سطح انتقال گرما کاهش می‌یابد. از طرفی با تغییر قطر حلقه‌های مارپیچ، تاثیر پدیده تداخل گرمایی افزایش یافته و بر عملکرد سیستم تاثیر می‌گذارد. بدین ترتیب با افزایش قطر مارپیچ و افزایش سطح انتقال گرما، به دلیل نزدیکی حلقه‌ها به یکدیگر و افزایش دمای زمین وسط مارپیچ، تداخل گرمایی و افزایش دمای زمین باعث کاهش نرخ انتقال گرما بین سیال داخل لوله و زمین می‌گردد. بدین ترتیب تاثیر تداخل گرمایی بیش از افزایش سطح انتقال گرما می‌باشد. اما از جایی به بعد با افزایش قطر مارپیچ، به دلیل بازتر شدن حلقه‌ها و کاهش تداخل گرمایی، انتقال گرما افزایش می‌یابد. یعنی در این شرایط تاثیر افزایش سطح انتقال گرما بر تداخل گرمایی پیش گرفته و سبب افزایش بار سرمایشی تامین شده توسط مبادله‌کن زمینی می‌گردد. بدین ترتیب این دو پارامتر بر عملکرد گرمایی مبادله‌کن زمینی مارپیچ سه‌گانه تاثیر بالایی دارند.

۷- مراجع

- [1] International Energy Agency I. E. A., World Energy Outlook 2017. <https://doi.org/10.1787/weo-2017-en>, 2017.
- [2] Batini N., Loria A. F. R., Conti P., Testi D., Grassi W. and Laloui L., Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 86, pp. 199-213, 2015.
- [3] Cecinato F. and Loveridge F. A., Influences on the thermal efficiency of energy piles. *Energy*, Vol. 82, pp. 1021-1033, 2015.
- [4] Yang W., Lu P. and Chen Y., Laboratory investigations of the thermal performance of an energy pile with spiral coil ground heat exchanger. *Energy and Buildings*, Vol. 128, pp. 491-502, 2016.
- [5] Yoon S., Lee S.-R., Xue J., Zosseder K., Go G.-H. and Park H., Evaluation of the thermal efficiency and a cost analysis

- [21] Bottarelli M., A preliminary testing of a flat panel ground heat exchanger. *Int J Low- Carbon Technology*, Vol. 8, pp. 80–7, 2013.
- [22] You T., Shi W., Wang B., Wu W. and Li X., A new ground-coupled heat pump system integrated with a multi-mode air-source heat compensator to eliminate thermal imbalance in cold regions. *Energy Build*, Vol. 107, pp. 103–12, 2015.
- [23] Kavanaugh S. P. and Rafferty K. D., Geothermal heating and cooling: design of ground-source heat pump systems. *ASHRAE*, 2014.
- [24] Zhaoa Sh., Chenb B. and Liub F., Study on the thermal performance of several types of energy pile ground heat exchangers: U-shaped, W-shaped and spiral-shaped. *Energy and Buildings*, Vol. 133, pp. 335–344, 2016.
- [25] Comsol Release 5.3 Documentation, COMSOL Inc., 2017.
- [26] Energy plus, weather data. https://energyplus.net/weather-location/asia_wmo_region_2/IRN//IRN_Bandar.Abass.408750_ITMY, 2019.
- [27] Hourly Analysis Program (HAP), www.commercial.carrier.com, 2019.
- [28] Pronzato L. and Müller WG., Design of computer experiments: space filling and beyond. *Stat Comput*, Vol. 22, pp. 681–701, 2012.
- [29] Alirahmi, S.M., M. Rostami, and A.H. Farajollahi, Multi-criteria design optimization and thermodynamic analysis of a novel multi-generation energy system for hydrogen, cooling, heating, power, and freshwater. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, Issue 30, pp. 15047–15062, 2020.
- [30] Lin Y. and Zhang HH., Component selection and smoothing in multivariate nonparametric regression. *Ann Stat*, Vol. 34, pp. 2272–2297, 2006.