



## مقایسه توزیع دمای خاک در راستای محوری (عمق) و شعاعی در مبدل‌های حرارتی زمینی یوشکل و لوله‌های هم‌مرکز

سپهر صنایع\*، سیده فاطمه موسوی

آزمایشگاه بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱

### کلمات کلیدی:

مبدل حرارتی زمینی

مبدل حرارتی یوشکل

مبدل حرارتی لوله‌های هم‌مرکز

پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

توزیع دمای خاک

**خلاصه:** در مقاله‌ی حاضر تغییرات برحسب زمان دمای خاک، حول مبدل‌های حرارتی زمینی پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی در دو راستای محوری (عمق) و شعاعی بررسی شده‌است. تغییرات توزیع دمای خاک اطراف مبدل‌های حرارتی زمینی، نقش مهمی در عملکرد حرارتی، مصرف برق و ضریب عملکرد پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی دارد؛ بنابراین پژوهش حاضر به مدل‌سازی عددی و سه‌بعدی وابسته به زمان دو مبدل حرارتی یوشکل و لوله‌های هم‌مرکز با هدف بررسی تأثیر آن‌ها بر توزیع دمای خاک پرداخته‌است. شبیه‌سازی با نرم‌افزار آنسیس فلونت ۱۶ و بر مبنای روش حجم کنترل انجام شده‌است. عملکرد دو مبدل برای نرخ‌های جرمی مختلف سیال خنک‌کن کندانسور (در مصارف تابستانی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی)، با یکدیگر مقایسه گردیده‌است. طبق نتایج، میزان نرخ انتقال حرارت به زمین در مبدل لوله‌های هم‌مرکز، در مقایسه با مبدل یوشکل در نرخ‌های جرمی سیال خنک‌کننده کندانسور معادل با ۰/۸، ۱ و ۱/۲ کیلوگرم بر ثانیه، به ترتیب حدود ۵/۳۴، ۱۱/۹ و ۱۶/۵ درصد بیشتر است. با بررسی تأثیر دو مبدل بر توزیع دمای خاک بعد از ۹۳ روز، مشاهده می‌شود که تأثیر مبدل یوشکل بر توزیع دمای عمق‌های کمتر از ۳۶/۶ متر از زمین، بیشتر است در حالی که مبدل لوله‌های هم‌مرکز توزیع دمای خاک لایه‌های عمیق‌تر را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد.

### ۱- مقدمه

کرد [۴]. انرژی زمین‌گرمایی به دلیل داشتن دمای نسبتاً ثابت، در دسترس بودن، فراوانی، انتشار کربن کم و در نتیجه سازگاری با محیط زیست از منابع انرژی است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است [۵]. روش‌های مختلفی برای بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده‌ی مستقیم، سیستم زمین‌گرمایی پیشرفته<sup>۱</sup> و پمپ حرارتی زمین‌گرمایی<sup>۲</sup> اشاره کرد [۶]. پمپ حرارتی زمین‌گرمایی به دلیل داشتن محاسنی نظیر ضریب عملکرد بالا، عملکرد محیط زیستی مطلوب و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری کم، یکی از رایج‌ترین کاربردهای انرژی زمین‌گرمایی است [۷]. مبدل‌های حرارتی زمینی نقش مهمی در عملکرد پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی دارند و دارای دو ساختار افقی و عمودی هستند

مسئله‌ی انرژی یکی از دغدغه‌های کنونی جهان حاضر است [۱]. با وجود اینکه سوخت‌های فسیلی منابع مهمی در تأمین انرژی محسوب می‌شوند، اما مصرف بی‌رویه‌ی آن‌ها مشکلات متعددی نظیر کاهش منابع، گرمای جهانی ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست را ایجاد می‌کند؛ بنابراین استفاده از منابع انرژی جایگزین سوخت‌های فسیلی که دارای هزینه و اثرات زیست‌محیطی کمتر باشند از مواردی است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌است [۲]. یکی از موارد جایگزین سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر هستند [۳]. انواع مختلفی از انرژی‌های تجدیدپذیر در محیط وجود دارد که از آن جمله می‌توان به انرژی زمین‌گرمایی اشاره

1 Enhanced geothermal system

2 Geothermal heat pump

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sepehr@iust.ac.ir



بررسی قرارداداند و بیان کردند استفاده از جنس استیل سبب افزایش ۳۶ درصدی نرخ انتقال حرارت نسبت به جنس پلی اتیلن می شود. تانگ و نوآموز [۲۲] تأثیر استفاده از مواد مختلف برای دوغاب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان حاکی از عملکرد بهتر مبدل در شن و ماسه نسبت به خاک رس می باشد. جوادی و همکاران [۲۳] عملکرد مبدل حرارتی یوشکل و مبدل های حرارتی مارپیچ را مورد مقایسه قرار دادند. آنها بیان کردند که مبدل حرارتی مارپیچ سه گانه بهترین و مبدل حرارتی یوشکل ضعیف ترین عملکرد حرارتی را در مقایسه با سایر مبدل های حرارتی زمینی دارد، اما افت فشار در مبدل حرارتی یوشکل در مقایسه با سایر مبدل های حرارتی کمتر است. تعدادی از محققان نیز به بررسی عملکرد حرارتی مبدل یوشکل دوگانه پرداخته اند [۲۴، ۲۵].

استخراج انرژی زمین گرمایی با اهداف گرمایش و تولید برق با استفاده از مبدل حرارتی لوله های هم مرکز نیز از مواردی است که در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲۶، ۲۷]. جهت تزریق جریان سیال به مبدل لوله های هم مرکز از پارامترهای مهم در عملکرد آن می باشد. هلبگ و همکاران [۲۸] این موضوع را در مبدل هایی به عمق ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر بررسی کردند. آن ها نشان دادند که منظور داشتن عملکرد مناسب، بهتر است در فرآیند استخراج حرارت از زمین جهت تزریق سیال به مبدل از ناحیه ی حلقوی و در فرآیند دفع حرارت به زمین، جهت ورود آن از ناحیه ی لوله ی داخلی مبدل باشد. تانگ و همکاران [۲۹] سه نوع مدل سازی عددی، شبه عددی و تحلیلی را برای مبدل لوله های هم مرکز ارائه دادند. آنها دمای سیال خروجی از مبدل، توزیع فشار در آن و نرخ انتقال حرارت حاصل از سه روش را با یکدیگر مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که روش عددی تنها روش دقیق در زمان های آغازین حالت گذرا است و در حالت پایا هر سه روش از دقت خوبی برخوردار هستند. دانشپور و رفیعی [۳۰] تأثیر استفاده از نانو سیال های اکسید مس<sup>۳</sup> و آلومینیوم اکسید<sup>۴</sup> را در مبدل حرارتی زمینی لوله های هم مرکز به صورت حل عددی پایا مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان کردند که اکسید مس نسبت به آلومینیوم اکسید مقدار حرارت بیشتری از زمین استخراج می کند اما سبب ایجاد افت فشار و در نتیجه قدرت پمپاژ بیشتر می شود. ایری و رفیعی [۳۱] عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی مبدل

[۸]. ساختار عمودی مبدل های حرارتی زمینی در مقایسه با ساختار افقی دارای عملکرد بهتر و پایداری می باشد، این نوع از مبدل ها برای نصب به فضای کمتری نیاز دارند، همچنین تخریب کمتر در چشم انداز از دیگر ویژگی مطلوب آن ها است [۹، ۱۰]. رایج ترین نوع مبدل ها در ساختارهای عمودی، مبدل های یوشکل<sup>۱</sup> و لوله های هم مرکز<sup>۲</sup> می باشد [۱۱]. مبدل یوشکل اغلب شامل یک یا دو لوله ی یوشکل و مبدل لوله های هم مرکز شامل دو لوله ی هم مرکز با قطرهای مختلف می باشد که معمولاً در داخل چاه هایی به عمق ۵۰-۲۰۰ متر نصب می شوند [۱۲]. لوله هایی که برای این نوع مبدل ها انتخاب می شود معمولاً از جنس پلی اتیلن و در مواردی از جنس استیل یا مسی هستند [۱۳]. غالباً برای افزایش انتقال حرارت، فضای بین لوله ی خارجی مبدل و دیواره ی چاه با ماده ای با ضریب هدایت حرارت مناسب تحت عنوان دوغاب پر می شود تا تماس کافی بین لوله و زمین ایجاد شود و مقاومت حرارتی کاهش یابد [۱۴]. مخلوط بتن، خاک رس، آهک، شن و سیمان از موادی هستند که به عنوان دوغاب می توان از آن ها استفاده کرد [۱۵]. عموماً آب به دلیل سهولت دسترسی و هزینه ی کم، سیال کاری معمول در مبدل های حرارتی زمینی می باشد [۱۶] و در فصول سرد گاهی مخلوط آب و ضد یخ نظیر آب و اتیلن گلیکول به منظور جلوگیری از یخ زدن سیال مورد استفاده قرار می گیرد [۱۷]. سیال کاری از طریق پمپ وارد مبدل حرارتی زمینی می شود و با گردش در آن، با زمین مجاور تبادل حرارت می کند، بدین ترتیب در فصول سرد سیال با دریافت حرارت از زمین گرم می شود و در فصول گرم با دفع حرارت به آن خنک می گردد [۱۸].

در سال های اخیر عملکرد حرارتی ساختارهای متفاوتی از مبدل های حرارتی زمینی به ویژه مبدل حرارتی یوشکل مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۹]. قریبی و همکاران [۲۰] بر اساس داده های واقعی از چاه نفتی متروک در جنوب ایران به مدل سازی عددی سه بعدی پایا و ناپایای مبدل حرارتی یوشکل پرداختند و تأثیر پارامترهایی نظیر دمای سیال ورودی به مبدل و نرخ جرمی آن، قطر لوله و طول عایق برای لوله را بررسی کردند. کائو و همکاران [۲۱] عملکرد مبدل حرارتی یوشکل را تحت تأثیر استفاده از دو جنس مختلف استیل و پلی اتیلن برای لوله ی مبدل به دو روش تجربی و شبیه سازی مورد

3 CuO  
4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

1 U-tube  
2 Coaxial

تحلیلی و عددی می‌باشد. آن‌ها نشان دادند روش ارائه شده، زمان انجام محاسبات را به اندازه‌ی یک مرتبه در مقایسه با روش کاملاً عددی با استفاده از کد شمات کاهش می‌دهد، بنابراین برای مدل‌سازی مبدل‌های حرارتی زمینی در بلندمدت مناسب است.

توزیع دمای خاک مجاور مبدل نقش مهمی در عملکرد مبدل حرارتی زمینی و پمپ حرارتی زمین‌گرمایی ترکیب شده با آن دارد، زیرا با جریان یافتن سیال، داخل مبدل حرارتی زمینی و تبادل حرارت آن با زمین به تدریج توزیع دمای خاک مجاور مبدل تغییر می‌کند. در صورتیکه هدف استفاده از مبدل حرارتی زمینی، سرمایه‌ی سیال خنک‌کننده‌ی کندانسور باشد با دفع حرارت سیال به زمین دمای نواحی مجاور مبدل به تدریج افزایش می‌یابد که سبب اشباع تدریجی زمین و کاهش نرخ انتقال حرارت بین سیال و زمین و افزایش دمای سیال خروجی از مبدل می‌گردد و این عامل منجر به کاهش ضریب عملکرد پمپ حرارتی زمین‌گرمایی می‌شود؛ علاوه بر این، شعاعی از زمین که در انتقال حرارت بین سیال و زمین تحت تأثیر قرار می‌گیرد عامل مهمی در تعیین فاصله‌ی چاه‌های نصب مبدل از یکدیگر و نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها است؛ بنابراین بررسی و مطالعه‌ی توزیع دمای خاک اطراف مبدل‌های حرارتی زمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. تعدادی از مقالات توزیع دمای خاک اطراف مبدل حرارتی زمینی را در راستای شعاعی بررسی کرده‌اند [۳۶، ۳۷]. مقایسه‌ی توزیع دمای خاک اطراف دو مبدل یوشکل و لوله‌های هم‌مرکز از موضوعاتی است که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته‌است، بنابراین در مقاله‌ی حاضر، با در نظر گرفتن یک پروفیل دمایی اولیه‌ی مشخص برای زمین در تابستان، به بررسی و مقایسه‌ی تأثیرات دو مبدل حرارتی زمینی یوشکل و لوله‌های هم‌مرکز بر توزیع دمای خاک پرداخته شده‌است و پارامترهایی نظیر توزیع دمای خاک در دو راستای افقی و عمودی، عمق و شعاع تأثیرگذاری دو مبدل در خاک و تأثیر آن در فاصله‌ی قرارگیری چاه‌های نصب دو نوع مبدل از یکدیگر و نیز تغییرات دمای زمین بررسی شده‌است. نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی می‌تواند به عنوان منبع راهنمایی برای انتخاب درست مبدل حرارتی مورد استفاده قرار بگیرد.

## ۲- شبیه‌سازی جریان در مبدل‌های لوله‌های هم‌مرکز و یوشکل

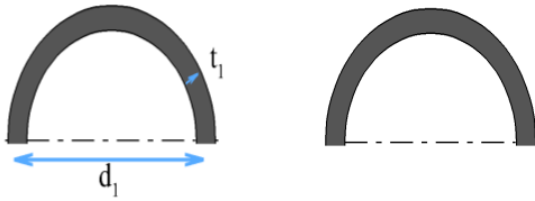
در این مقاله هدف، مقایسه‌ی دو مبدل حرارتی زمینی لوله‌های

حرارتی لوله‌های هم‌مرکز را در نسبت قطرهای متفاوت، در مدت دفع حرارت سیال به زمین مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که اختلاف دمای سیال ورودی به مبدل و خروجی از آن با کاهش نسبت قطر افزایش می‌یابد.

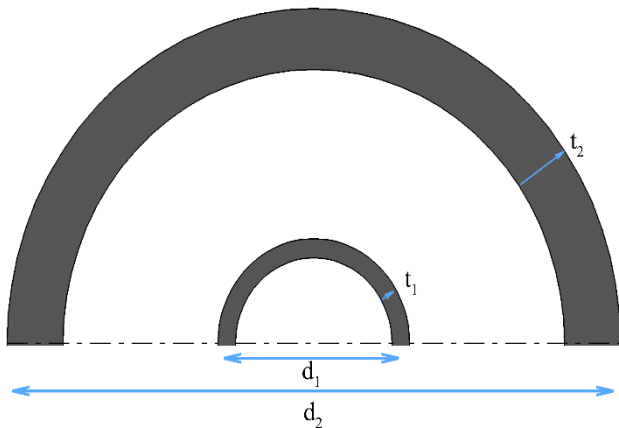
برخی منابع نیز به مقایسه‌ی عملکرد دو نوع مبدل حرارتی زمینی یوشکل و لوله‌های هم‌مرکز پرداخته‌اند. کوآژوتو و همکاران [۳۲] با استفاده از روش عددی مقاومت-ظرفیت به مقایسه‌ی عملکرد این دو مبدل در کوتاه‌مدت و بلندمدت پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها میزان نرخ انتقال حرارت در مبدل لوله‌های هم‌مرکز نسبت به مبدل یوشکل دوگانه در حالت گرمایش حدود  $2/9-5/5$  درصد و در حالت سرمایش  $0-1/6$  درصد بیشتر است. زارلا و همکاران [۳۳] با در نظر گرفتن ظرفیت حرارتی چاه (شامل ظرفیت حرارتی دوغاب و سیال کاری) در مدل عددی ظرفیت-مقاومت، این مدل را برای بررسی رفتار کوتاه‌مدت مبدل لوله‌های هم‌مرکز توسعه دادند، سپس با استفاده از مدل ارائه شده به مقایسه‌ی عملکرد حرارتی مبدل لوله‌های هم‌مرکز و یوشکل دوگانه پرداختند. آن‌ها نشان دادند در کوتاه‌مدت عملکرد حرارتی مبدل لوله‌های هم‌مرکز به دلیل داشتن ظرفیت حرارتی بالاتر سیال کاری، بهتر است. وود و همکاران [۳۴] عملکرد حرارتی و هیدرولیکی مبدل لوله‌های هم‌مرکز و مبدل یوشکل و تأثیر آن بر پمپ حرارتی زمین‌گرمایی را به صورت تجربی بررسی کردند. بدین منظور آن‌ها نرخ‌های جرمی مختلفی را در ورودی مبدل حرارتی زمینی در نظر گرفتند که در بازه‌ی نرخ جرمی در نظر گرفته شده، جریان سیال داخل مبدل یوشکل به صورت آشفته و در مبدل لوله‌های هم‌مرکز به صورت آرام بود. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که مقدار حرارت استخراج شده از زمین و ضریب عملکرد پمپ حرارتی زمین‌گرمایی ترکیب شده با مبدل یوشکل به ترتیب حداقل ۱۲ درصد و ۰/۰۸ بیشتر از مقدار متناظر در مبدل لوله‌های هم‌مرکز است که این نتایج متأثر از آشفته بودن جریان سیال داخل مبدل یوشکل می‌باشد. متقی و دیکشورن [۳۵] روش جدیدی را برای مدل‌سازی مبدل‌های لوله‌های هم‌مرکز و یوشکل عمیق با طول و قطر دلخواه ارائه دادند. روش ارائه شده که ترکیبی از روش اختلاف محدود<sup>۱</sup> و کد عمومی انتقال حرارت و انتقال جریان شمات<sup>۲</sup> است مابین مدل

1 Finite difference

2 SHEMAT



شکل ۱. مبذل یوشکل  
Fig. 1. U-tube BHE



شکل ۲. مبذل لوله های هم مرکز  
Fig. 2. Coaxial BHE

جدول ۱. ابعاد مبذل لوله های هم مرکز و یوشکل

Table 1. Dimensions of coaxial and U-tube BHEs

مقدار (mm)	پارامتر
۵۰	$d_1$
۴/۶	$t_1$
۱۶۰	$d_2$
۱۴/۶	$t_2$

### ۲-۲- معادلات حاکم

در پژوهش حاضر جریان سیال به صورت آشفته در نظر گرفته شده است، بنابراین معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات نویر استوکس به همراه معادلات مدل توربولانسی  $k-\varepsilon$  می باشند که در روابط (۱) تا (۵) بیان شده اند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

هم مرکز و یوشکل می باشد. بدین منظور لوله هایی از جنس پلی اتیلن چگال و از نوع نسبت ابعاد استاندارد ۱۱۱ [۳۸] برای دو مبذل انتخاب شده است که ابعاد آن ها بر اساس استاندارد ۸۰۷۴ از موسسه استاندارد سازی آلمان<sup>۲</sup> طبق شکل های ۱ و ۲ به شرح جدول ۱ است [۳۹]. لازم به ذکر است که این استاندارد قطر خارجی و ضخامت لوله های پلی اتیلن را در فشارهای کاری متفاوت ارائه می دهد.

سایر ابعاد در شبیه سازی شامل عمق و شعاع چاه، عمق و شعاع زمین، طول مبذل ها و شعاع انحنای مبذل یوشکل بر حسب پارامترهای شکل های ۳ و ۴ مطابق جدول ۲ می باشد.

لازم به ذکر است به منظور مقایسه ی صحیح دو مبذل حرارتی، ابعاد دو مبذل به نحوی انتخاب شده است که حجم اشغال شده توسط مبذل لوله های هم مرکز برابر با حجم اشغال شده توسط مبذل یوشکل باشد. بدین ترتیب سطح انتقال حرارت مبذل لوله های هم مرکز حدود ۱/۶ برابر سطح انتقال حرارت مبذل یوشکل است.

$$A_{Coaxial} = \pi d_2 L_1 + \frac{\pi}{4} d_2^2 = 50.29 m^2$$

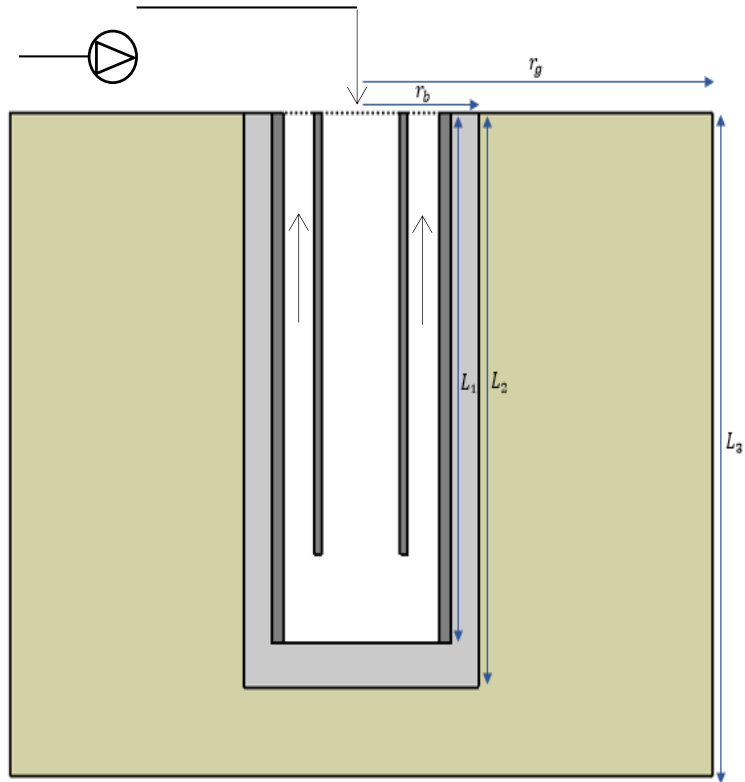
$$A_{Utube} = 2\pi d_1 (L_1 - R - \frac{d_1}{2}) + \pi d_1 \times \pi R = 31.43 m^2$$

$$\frac{A_{Coaxial}}{A_{Utube}} = 1.6$$

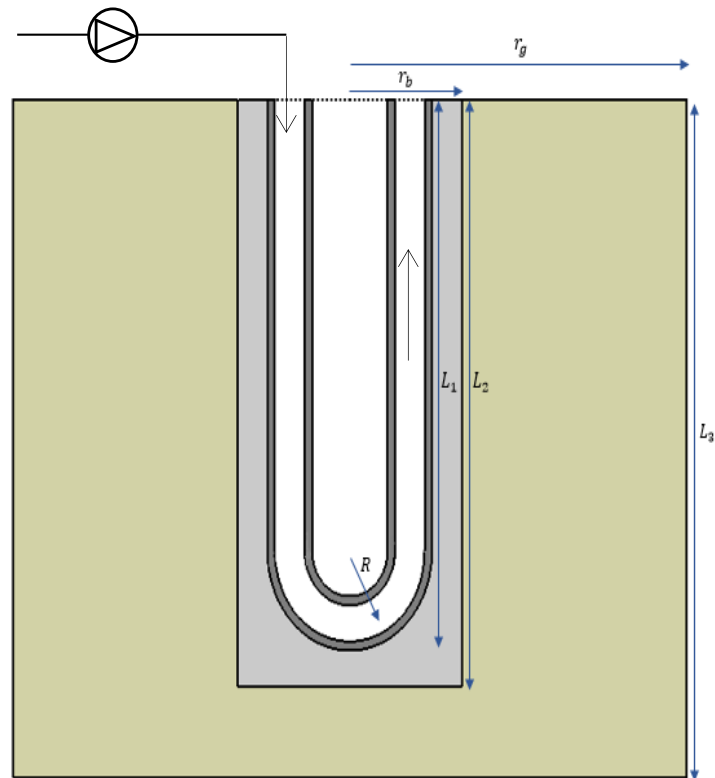
### ۱-۲- فرضیات

- فرضیات در نظر گرفته شده بدین شرح است [۲۱، ۴۰]:
- خواص حرارتی زمین، دوغاب و لوله ها ثابت در نظر گرفته شده است.
- از انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی سطح زمین با محیط پیرامون صرف نظر شده است.
- مکانیزم انتقال حرارت در زمین و دوغاب صرفاً انتقال حرارت هدایتی می باشد.
- در شبیه سازی، زمین یک جسم بی نهایت در نظر گرفته شده است که توزیع دمای آن به صورت تابعی از مکان در بی نهایت ثابت و بدون تغییر می باشد.

1 Standard dimension ratio (SDR)  
2 Deutsches Institut für Normung (DIN)



شکل ۳. پارامترهای هندسی مبذل لوله‌های هم‌مرکز در شبیه‌سازی  
Fig. 3. Geometric parameters of coaxial BHE in the simulation



شکل ۴. پارامترهای هندسی مبذل یوشکل در شبیه‌سازی  
Fig. 4. Geometric parameters of U-tube BHE in the simulation

جدول ۲. سایر ابعاد

Table 2. Other dimensions

پارامتر	مقدار (m)
$r_b$	۰/۰۹
$r_g$	۵۰
$L_1$	۱۰۰
$L_2$	۱۰۰/۱
$L_3$	۱۰۱
$R$	۰/۰۵۵

جدول ۳. شرایط مرزی جریان سیال

Table 3. Boundary conditions of fluid flow

مکان	نوع	مقدار
ورود سیال به مبدل حرارتی	نرخ جرمی ورودی	$\dot{m} = ۰/۸، ۱ و ۱/۲ (kg/s)$
	دما	$T = ۳۰۷/۲ (K)$
	شدت آشفته‌گی	$I = ٪۵$
خروج سیال از مبدل حرارتی	قطر هیدرولیکی	$d = ۰/۰۴۰۸ (m)$
	فشار خروجی	$P = ۰$

جدول ۴. شرط اولیه جریان سیال

Table 4. Initial condition of the fluid flow

نوع	مقدار
دما	$T = ۳۰۷/۲ (K)$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{\partial (\bar{u}_i' \bar{u}_j')}{\partial x_j} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \alpha \nabla^2 \bar{T} - \frac{\partial (\bar{u}_j' \bar{T}')}{\partial x_j} \quad (۳)$$

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (۵)$$

$$G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

انرژی جنبشی آشفته‌گی،  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  ترم چشمه و چاه،  $\sigma_k$  عدد پراختل آشفته،  $\sigma_\varepsilon$  عدد اشمیت آشفته و  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  ثابت‌های معادله هستند.

شرایط مرزی و اولیه در نظر گرفته شده برای جریان سیال به ترتیب مطابق جدول ۳ و ۴ است. شرایط مرزی ورودی برای جریان سیال و مدل توربولانسی به ترتیب جریان جرم ورودی، شدت آشفته‌گی و قطر هیدرولیکی می‌باشد و شرط مرزی خروجی جریان سیال نیز فشار خروجی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است.

معادله‌ی انرژی برای زمین، دوغاب و لوله‌ها نیز طبق معادله‌ی (۶) در نظر گرفته شده است.

در روابط فوق  $u$  سرعت سیال،  $t$  زمان،  $P$  فشار،  $\rho$  چگالی سیال،  $T$  دما،  $\alpha$  ضریب پخش حرارتی،  $k$  انرژی جنبشی آشفته‌گی،  $\mu$  ضریب ویسکوزیته‌ی سیال،  $\mu_t$  ضریب ویسکوزیته‌ی آشفته‌گی،  $\varepsilon$  نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته‌گی،  $G_k$  و  $G_b$  ترم تولید

1 - Pressure outlet

جدول ۵. شرایط مرزی زمین، چاه و لوله‌ها

Table 5. Boundary condition of Ground, well, and Pipes

مقدار	نوع	مکان
$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	گرادیان دما	سطح زمین، چاه و لوله‌ها
$T = Eq.(7) (K)$	دما تابعی از مکان	توزیع دمای خاک در شعاع $r_g$ و عمق $L_3$

جدول ۶. شرط اولیه‌ی زمین، چاه و لوله‌ها

Table 6. Initial condition of ground, well, and pipes

مقدار	نوع
$T = Eq.(7) (K)$	دما

جدول ۷. خواص حرارتی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی

Table 7. Thermal properties considered in the simulation

$\mu(Pa.s)$	$\lambda(W/(mK))$	$C_p(J/(kgK))$	$\rho(kg/m^3)$	خواص
۰/۰۰۱	۰/۶	۴۱۸۲	۹۹۸/۲	آب
-	۰/۴۴	۲۳۰۰	۹۵۰	لوله‌ی پلی‌اتیلن
-	۱/۶	۹۰۰	۲۰۰۰	دوغاب
-	۲/۸	۹۲۰	۲۶۵۰	زمین

اول بالادستی<sup>۶</sup> و مرتبه‌ی اول بالادستی می‌باشد. معیار همگرایی برای معادله‌ی انرژی  $10^{-6}$  و برای معادلات پیوستگی، مومنتوم، معادله‌ی  $k$  و  $\epsilon$ ،  $10^{-3}$  در نظر گرفته شده‌است. در نهایت معادلات بر مبنای روش حجم کنترل به صورت وابسته به زمان و ضمنی به مدت زمان ۹۳ روز حل شده‌اند.

خواص حرارتی مورد استفاده در شبیه‌سازی به شرح جدول ۷ است [۳۷].

### ۲-۳- پروفیل تغییر دما در عمق خاک

توزیع دمای زمین برحسب عمق آن ثابت نیست. در نواحی کم‌عمق، توزیع دما متأثر از تغییرات آب و هوایی و فصلی می‌باشد اما در نواحی عمیق نسبتاً ثابت است و اندکی با افزایش عمق افزایش می‌یابد. پروفیل دمایی زمین در فصل تابستان در شبیه‌سازی طبق معادله‌ی (۷) در نظر گرفته شده‌است [۴۱].

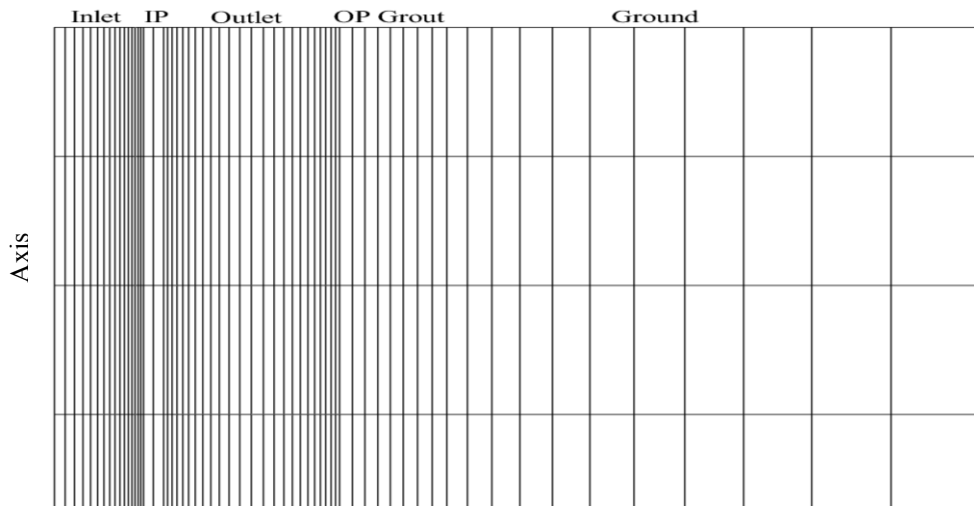
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (6)$$

شرایط مرزی و اولیه‌ی زمین، چاه و لوله‌ها به شرح جدول‌های ۵ و ۶ است. از انتقال حرارت سطح زمین، چاه و لوله‌ها با هوای محیط پیرامون صرف‌نظر شده‌است. همچنین توزیع دمای معادله‌ی (۷) به عنوان شرط مرزی دمای زمین در دوردست‌ها (محیط جانبی و عمق زمین) در نظر گرفته شده‌است.

در حل معادلات مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  [۲۳] از مدل ریلایزبل<sup>۱</sup> و توابع دیواره‌ی استاندارد<sup>۲</sup> استفاده شده‌است. کوپل میدان‌های سرعت و فشار، توسط طرح سیمپل<sup>۳</sup> انجام گرفته‌است. روش گسسته‌سازی معادلات فشار، مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ استهلاك آشفتگی به ترتیب مرتبه‌ی دوم<sup>۴</sup>، مرتبه‌ی دوم بالادستی<sup>۵</sup>، مرتبه‌ی

- 1 Realizable
- 2 Standard wall function
- 3 Simple
- 4 Second order
- 5 Second order upwind

6 First order upwind



شکل ۵. نمایی از شبکه‌بندی مبدل لوله‌های هم‌مرکز در زمین  
 Fig. 5. Schematic of coaxial BHE mesh in the ground

است، بنابراین شبیه‌سازی آن به صورت سه‌بعدی و متقارن<sup>۴</sup> انجام شده‌است و شبکه مورد استفاده در تمامی زیرناحیه‌های آن به صورت ساختاریافته و از نوع شش‌وجهی با مقطع چهارگوش می‌باشد، جز زیر ناحیه‌ای که قسمت انحنای یوشکل در آن قرار گرفته‌است. شبکه مورد استفاده در این زیر ناحیه به صورت ساختاریافته<sup>۵</sup> و از نوع هرمی و چهاروجهی می‌باشد. برای در نظر گرفتن تأثیر حضور دیواره‌ها بر جریان سیال، در کنار دیواره‌ها از شبکه لایه‌مرزی استفاده شده‌است. اولین نقطه از شبکه‌ی لایه‌ی مرزی در فاصله‌ی ۰/۵ میلی‌متر از دیواره قرار گرفته‌است و بدین ترتیب مقدار  $y^+$  در محدوده‌ی مجاز مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  یعنی کمتر از ۵ می‌باشد. هم‌چنین در مکان‌هایی که گرادیان و تغییرات پارامترها زیاد است از شبکه‌های کوچک‌تر استفاده شده‌است. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمایی از شبکه‌ی دو هندسه‌ی مبدل لوله‌های هم‌مرکز و یوشکل را نشان می‌دهند.

جدول ۸ و ۹ به ترتیب بیانگر نتایج حاصل از بررسی استقلال از شبکه‌ی دو مبدل لوله‌های هم‌مرکز و یوشکل هستند. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد شبکه از مقدار ۱۱۶۳۴۲، دمای سیال خروجی از مبدل لوله‌های هم‌مرکز تغییر محسوسی نمی‌کند؛ بنابراین این شبکه به عنوان شبکه‌ی نهایی این مبدل پذیرفته شده‌است.

به همین ترتیب تعداد شبکه‌ی ۸۲۵۲۵۳ به عنوان شبکه نهایی

$$z \leq 7 \quad T_g(z) = -0.0926 \times z^3 + 1.3604 \times z^2 - 6.3338 \times z + 31.51 + 273.2 \quad (7)$$

$$7 < z \leq 101 \quad T_g(z) = -0.000002 \times z^3 + 0.0006 \times z^2 - 0.0339 \times z + 22.3899 + 273.2$$

در معادله‌ی (۷)،  $T_g$  و  $z$  به ترتیب دمای زمین و عمق از سطح آن می‌باشد.

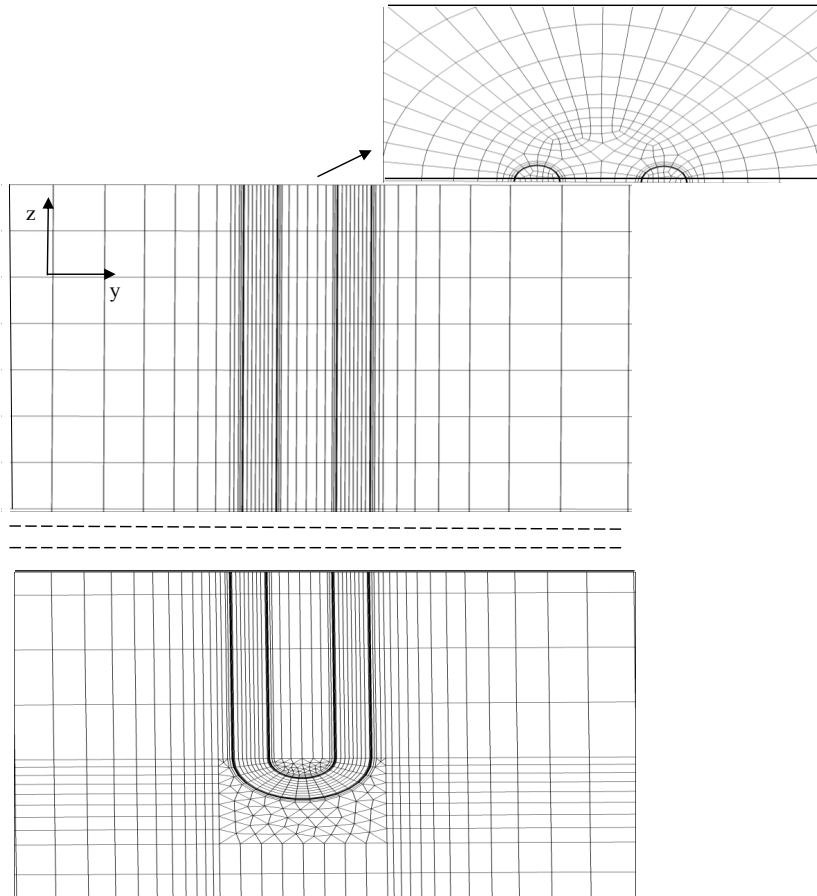
#### ۲-۴- شبکه‌بندی و بررسی استقلال نتایج از شبکه

شبکه‌بندی هندسه‌ی موردنظر با نرم‌افزار گمبیت<sup>۱</sup> انجام شده‌است. به منظور افزایش کیفیت شبکه، کاهش تعداد آن و استفاده از شبکه ساختاریافته<sup>۲</sup>، هرکدام از دو هندسه به زیرناحیه‌هایی تقسیم‌بندی شده‌اند. با توجه به تقارن هندسه و فیزیک مبدل لوله‌های هم‌مرکز نسبت به محور مرکزی، شبیه‌سازی آن به صورت دوبعدی و تقارن محوری<sup>۳</sup> انجام شده‌است و شبکه مورد استفاده در این هندسه، شبکه‌ی ساختاریافته و از نوع مربعی می‌باشد. هندسه و فیزیک مسئله‌ی مبدل یوشکل نیز نسبت به صفحه‌ی  $Y-Z$  متقارن

4 Symmetry  
 5 Unstructured

1 Gambit  
 2 Structure  
 3 Axisymmetric





شکل ۶. نمایی از شبکه بندی میدل یوشکل در زمین

Fig. 6. Schematic of U-tube BHE mesh in the ground

جدول ۷. بخواص حرارتی در نظر گرفته شده در شبیه سازی

Table 7. Thermal properties considered in the simulation

$\mu(\text{Pa.s})$	$\lambda(\text{W}/(\text{mK}))$	$C_p(\text{J}/(\text{kgK}))$	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	خواص
۰/۰۰۱	۰/۶	۴۱۸۲	۹۹۸/۲	آب
-	۰/۴۴	۲۳۰۰	۹۵۰	لوله ی پلی اتیلن
-	۱/۶	۹۰۰	۲۰۰۰	دوغاب
-	۲/۸	۹۲۰	۲۶۵۰	زمین

جدول ۸. بررسی استقلال از شبکه در میدل لوله های هم مرکز

Table 8. Mesh independency of coaxial BHE

تعداد شبکه	۲۵۸۱۹	۵۸۵۳۳	۱۱۶۳۴۲	۲۱۲۵۹۸
دمای سیال خروجی از میدل لوله های هم مرکز	۳۰۶/۲۲	۳۰۶/۰۵	۳۰۵/۹۶	۳۰۵/۹۳

جدول ۹. بررسی استقلال از شبکه در میدل یوشکل

Table 9. Mesh independency of U-tube BHE

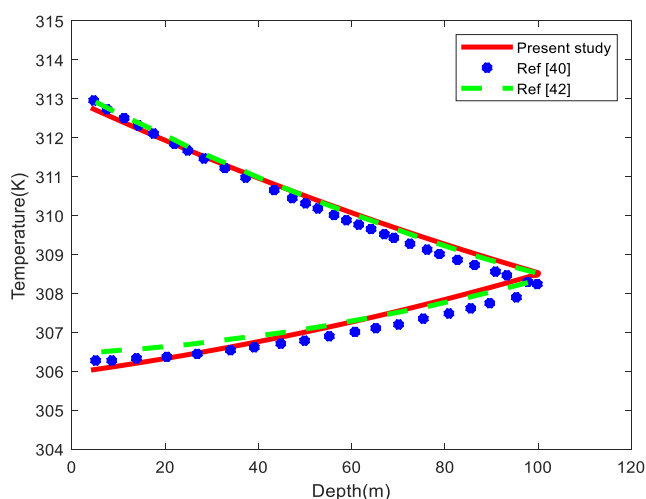
تعداد شبکه	۳۱۷۵۱۸	۵۶۸۰۹۳	۸۲۵۲۵۳	۱۵۹۲۳۱۲
دمای سیال خروجی از میدل یوشکل	۳۰۶/۲۴	۳۰۶/۱۱	۳۰۶/۰۳	۳۰۵/۹۸

جدول ۱۰. پارامترهای هندسی اعتبارسنجی [۴۲، ۴۰، ۳۱]  
Table 10. Geometric parameters of validation

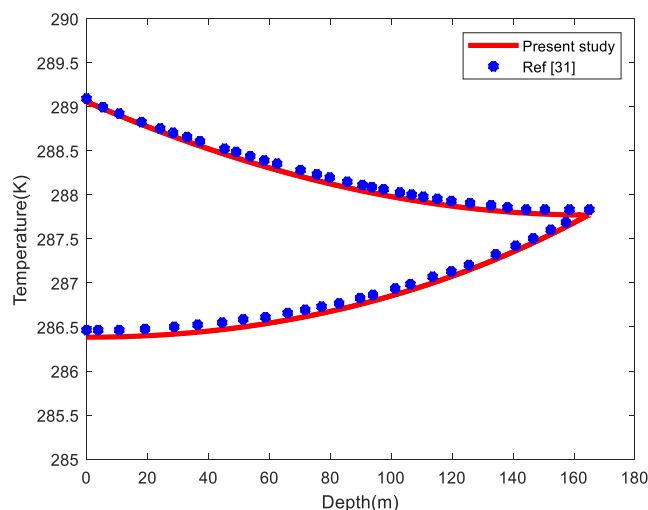
جنس لوله	طول مبذل (m)	شعاع انحنای لوله‌ی پوشکل (m)	قطر چاه (m)	قطر خارجی و ضخامت لوله (m)	نوع مبذل
پلی اتیلن	۱۶۵	-	۰/۱۱۵	۰/۰۴۰ - ۰/۰۰۲۴	مبذل لوله‌های هم‌مرکز
				۰/۱۱۴ - ۰/۰۰۰۴	
	۱۰۰	۰/۰۲۸	۰/۱	۰/۰۶۳۲ - ۰/۰۰۶۱	مبذل پوشکل

جدول ۱۱. شرایط فیزیکی اعتبارسنجی [۴۲، ۴۰، ۳۱]  
Table 11. Physical conditions of validation

زمان شبیه‌سازی (hr)	دمای زمین (C)	سرعت ورودی (m/s)	دمای ورودی (C)	نوع سیال	نوع مبذل
۶۳	۸	۰/۵۹۶	۱۶	آب	مبذل لوله‌های هم‌مرکز
۸۰۰	۱۰	۰/۱۲۶	۴۰	آب-اتیلن گلیکول	مبذل پوشکل



شکل ۸. اعتبارسنجی مبذل پوشکل  
Fig. 8. Validation of U-tube BHE



شکل ۷. اعتبارسنجی مبذل لوله‌های هم‌مرکز  
Fig. 7. Validation of coaxial BHE

مبذل پوشکل در نظر گرفته شده است. لوله‌های هم‌مرکز و پوشکل هستند. مقادیر ارائه شده برای بیشینه‌ی خطاهای نسبی و خطاهای مطلق در جدول ۱۲، حاکی از دقت کافی نتایج شبیه‌سازی حاضر است.

مبذل پوشکل در نظر گرفته شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اعتبارسنجی

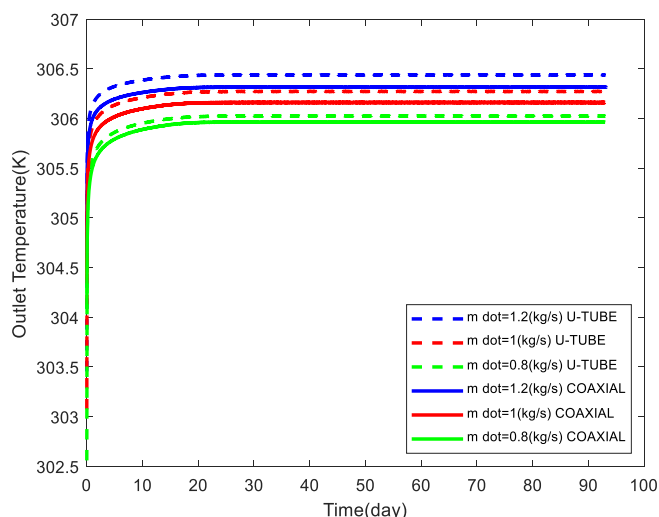
۳-۲- تغییرات دمای سیال خروجی از مبذل حرارتی زمینی شکل ۹ نمودار دمای سیال خروجی از دو مبذل پوشکل و لوله‌های هم‌مرکز به ازای سه نرخ جرمی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. دمای سیال ورودی به مبذل ۳۴ درجه‌ی سانتی‌گراد در

به منظور اطمینان از صحت نتایج، دو مبذل لوله‌های هم‌مرکز [۳۱] و پوشکل [۴۰، ۴۲] در حالت سرمایش، به ترتیب با شرایط هندسی و فیزیکی ذکر شده در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ اعتبارسنجی شده‌اند. نمودارهای شکل ۷ و ۸ به ترتیب بیانگر اعتبارسنجی مبذل

جدول ۱۲. بیشینه‌ی مقدار خطای نسبی و خطای مطلق بین مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر گزارش‌شده در مراجع

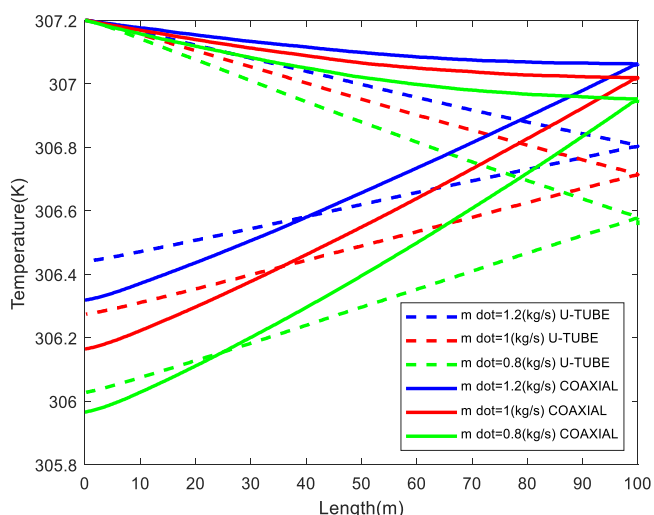
Table 12. Maximum relative and absolute error between the values obtained from the simulation and the values reported in the references

مبدل یوشکل [۴۰]	مبدل یوشکل [۴۲]	مبدل لوله‌های هم‌مرکز	
۱/۴۴	۱/۲۸	۰/۰۳	درصد خطای نسبی
۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۰۸	خطای مطلق (K)



شکل ۹. نمودار دمای سیال خروجی از مبدل‌ها در تابستان

Fig. 9. Outlet fluid temperature of BHEs in the summer



شکل ۱۰. توزیع دمای سیال داخل مبدل‌ها در تابستان

Fig. 10. Temperature distribution inside BHEs in the summer

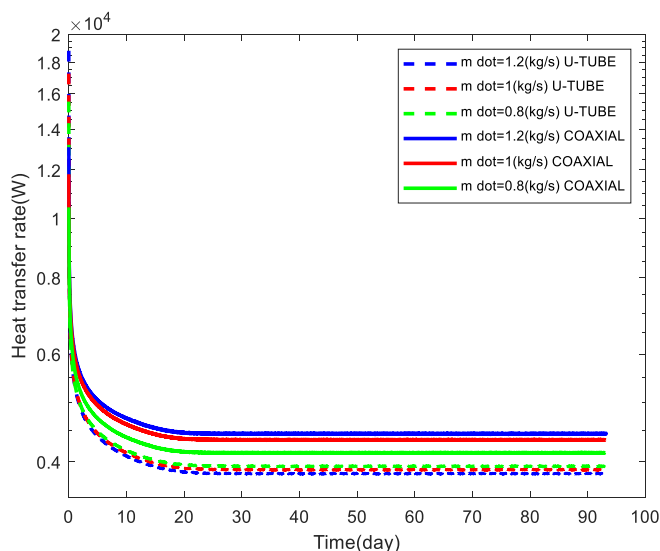
نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است به منظور عملکرد بهتر مبدل لوله‌های هم‌مرکز جهت ورود سیال به آن، در فرایند سرمایه‌گذاری، از لوله‌ی داخلی در نظر گرفته شده است [۲۸، ۴۳].

طبق نمودار کمترین دمای سیال خروجی در اولین بار خروج آن از مبدل اتفاق می‌افتد و با گذشت زمان به تدریج دمای خروجی افزایش می‌یابد، زیرا با برقراری جریان داخل مبدل و انتقال حرارت آن با زمین، به تدریج دمای سیال کاهش و دمای زمین مجاور افزایش می‌یابد و در نتیجه نرخ انتقال حرارت بین آن دو با گذشت زمان کمتر شده و دمای سیال خروجی به تدریج افزایش می‌یابد که سبب کاهش ضریب عملکرد پمپ حرارتی زمین‌گرمایی ترکیب شده با مبدل حرارتی زمینی می‌شود.

طبق شکل ۹ مبدل لوله‌های هم‌مرکز به دلیل داشتن دمای کمتر سیال خروجی در فرآیند خنک‌سازی، دارای عملکرد حرارتی بهتری است و این امر به دلیل سطح انتقال حرارت بزرگ‌تر این مبدل نسبت به مبدل یوشکل و در نتیجه دفع حرارت بیشتر آن می‌باشد. در یک مبدل حرارتی مشخص، با افزایش نرخ جرمی ورودی، دمای سیال خروجی از مبدل افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش نرخ جرمی ورودی، میزان نرخ انتقال حرارت بر واحد جرم کاهش می‌یابد و نیز سرعت سیال ورودی به مبدل افزایش می‌یابد که این عامل سبب کاهش زمان استقرار سیال، داخل مبدل و در نتیجه فرصت کمتر آن برای تبادل حرارت با زمین می‌شود و این دو عامل منجر به افزایش دمای سیال خروجی می‌شوند.

### ۳-۳- تغییرات دمای سیال داخل مبدل

شکل ۱۰ توزیع دمای سیال داخل مبدل‌ها را در نرخ‌های جرمی متفاوت بعد از ۹۳ روز اجرا نشان می‌دهد. طبق نمودار در مبدل حرارتی لوله‌های هم‌مرکز میزان تغییر دمای سیال در مسیر رفت



شکل ۱۱. نرخ انتقال حرارت سیال با محیط مجاور در تابستان  
**Fig. 11. Heat transfer rate of the fluid with the surrounding environment in the summer**

انتقال حرارت بیشتری دارد. در مبدل لوله‌های هم‌مرکز، با افزایش نرخ جرمی ورودی، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد، در حالیکه در مبدل یوشکل، کاهش اختلاف دما بر افزایش نرخ جرمی غلبه کرده و در نتیجه نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

### ۳-۵- کار مصرفی پمپ

کار مصرفی پمپ تابعی از افت فشار سیال داخل مبدل حرارتی است که ناشی از اصطکاک می‌باشد. روابط (۸) و (۹) به ترتیب کار مصرفی پمپ و افت فشار سیال داخل مبدل حرارتی را بیان می‌کنند.

$$W_{pump} = \frac{1}{\eta_{pump}} \frac{\dot{m}}{\rho} \Delta P \quad (8)$$

$$\Delta P = \frac{f l u^2}{2 g d} \quad (9)$$

در روابط فوق،  $W_{pump}$  کار مصرفی پمپ،  $\eta_{pump}$  راندمان پمپ،  $\Delta P$  افت فشار سیال داخل مبدل حرارتی،  $f$  ضریب اصطکاک و  $d$  قطر هیدرولیکی لوله می‌باشد. لازم به ذکر است در محاسبات راندمان پمپ برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۲ کار مصرفی پمپ برای دو مبدل را در نرخ‌های جرمی

نسبت به مسیر برگشت بسیار کم است، زیرا مسیر رفت سیال در فرآیند سرمایش از لوله‌ی داخلی است و در این مسیر سیال تنها از طریق دیواره‌ی لوله‌ی داخلی با ضریب هدایت حرارتی کم با سیال برگشتی از ناحیه‌ی حلقوی تبادل حرارت دارد در نتیجه با توجه به کم بودن نرخ انتقال حرارت در مسیر رفت انتظار می‌رود که مقدار اختلاف دما نیز کم باشد. همچنین سرعت بالای سیال در مسیر رفت به دلیل سطح مقطع ورودی کم، اجازه‌ی فرصت کافی برای تبادل حرارت را به سیال نمی‌دهد. در مسیر برگشت که سیال در ناحیه‌ی حلقوی جریان دارد، با زمین خنک تبادل حرارت می‌کند، همچنین به دلیل ثابت بودن نرخ جرمی و افزایش سطح مقطع در ناحیه‌ی حلقوی سرعت سیال در مسیر برگشت بسیار کمتر از مسیر رفت خواهد بود که سبب فراهم کردن فرصت کافی برای تبادل حرارت می‌شود و این دو عامل منجر به تغییر دمای بیشتر در مسیر برگشت می‌شوند.

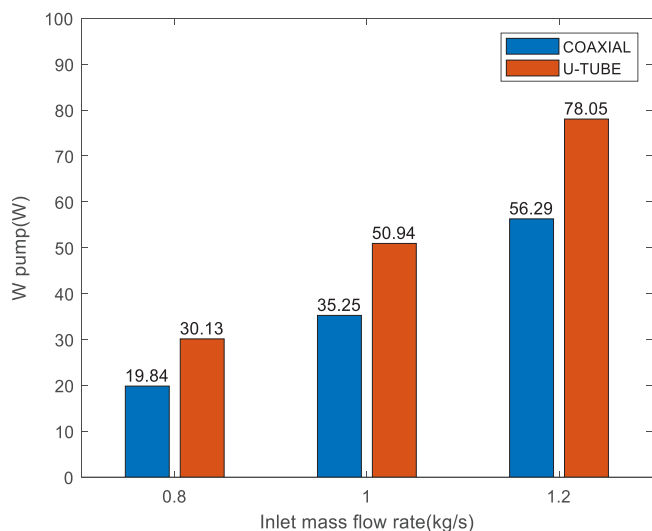
در مبدل حرارتی یوشکل میزان اختلاف دمای سیال در مسیر رفت و برگشت چندان تفاوتی ندارد، لیکن برخلاف مبدل حرارتی لوله‌های هم‌مرکز در مسیر رفت تغییر دمای سیال بیشتر از مسیر برگشت است؛ زیرا در مسیر رفت به دلیل اختلاف دمای بیشتر سیال و زمین میزان دفع حرارت سیال به زمین بیشتر است.

### ۳-۴- نرخ انتقال حرارت سیال درون مبدل با زمین مجاور

شکل ۱۱ نرخ انتقال حرارت سیال با محیط پیرامونش را نشان می‌دهد که طبق رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود.

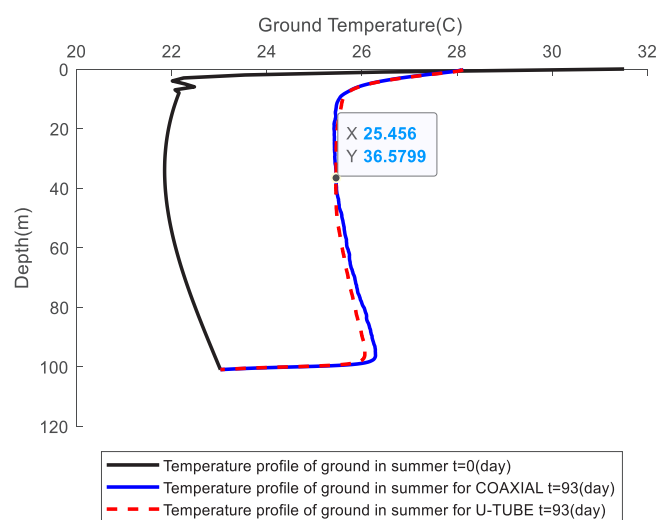
$$Q = \dot{m} C_p (T_{in} - T_{out}) \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸)،  $Q$  نرخ انتقال حرارت بین سیال داخل مبدل و زمین مجاور،  $\dot{m}$  نرخ جرمی سیال،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $T_{in}$  دمای سیال ورودی به مبدل و  $T_{out}$  دمای سیال خروجی از آن است. حرارت دفع شده به زمین تابعی از اختلاف دمای سیال ورودی به مبدل و خروجی از آن است. با توجه به اینکه دمای ورودی ثابت در نظر گرفته شده است و دمای سیال خروجی از مبدل به تدریج افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود که نرخ انتقال حرارت کاهش یابد و نمودار آن روند نزولی داشته باشد. مبدل لوله‌های هم‌مرکز به دلیل داشتن اختلاف دمای بیشتر سیال نسبت به مبدل یوشکل میزان نرخ



شکل ۱۲. کار مصرفی پمپ

Fig. 12. Power consumption of pump



شکل ۱۳. توزیع دمای خاک از سطح تا عمق ۱۰۰ متری در تابستان

Fig. 13. Temperature distribution of soil from surface to 100 m depth in the summer

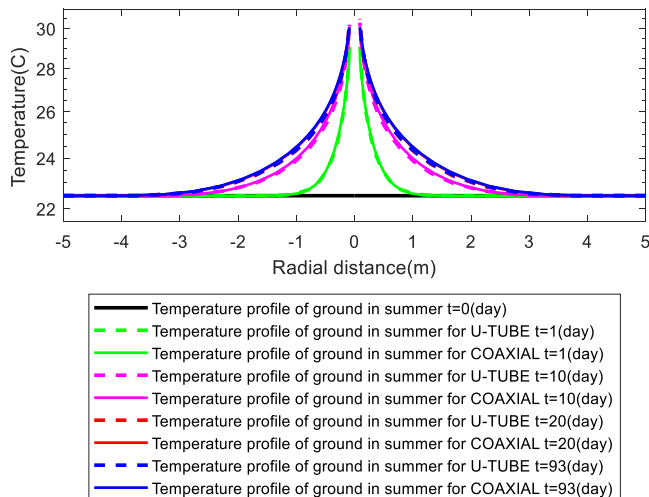
۳-۷- تغییرات دمای زمین در عمق ۲۰ متر از سطح آن و در راستای شعاعی

شکل ۱۴ بیانگر توزیع دمای خاک در عمق ۲۰ متری از سطح زمین برای دو مبدل در زمان اولیه و زمان‌های مختلف می‌باشد. به منظور وضوح نمودارها، علی‌رغم اینکه شعاع زمین در شبیه‌سازی برابر با ۵۰ متر در نظر گرفته شده‌است، نمودارها تا فاصله‌ی شعاعی ۵ متر از مرکز مبدل‌ها نمایش داده شده‌اند. با دفع حرارت سیال به زمین،

مختلف نشان می‌دهد. طبق نمودار در یک مبدل مشخص با افزایش نرخ جرمی، مقدار اختلاف فشار افزایش یافته و در نتیجه کار مصرفی پمپ بیشتر می‌شود. همچنین در یک نرخ جرمی مشخص، کار مصرفی پمپ مبدل لوله‌های هم‌مرکز کمتر از کار مصرفی پمپ مبدل یوشکل می‌باشد، زیرا در مسیر برگشت جریان سیال، قطر هیدرولیکی ناحیه‌ی حلقوی مبدل لوله‌های هم‌مرکز بزرگ‌تر از قطر مبدل یوشکل است و در نتیجه افت فشار آن کمتر است.

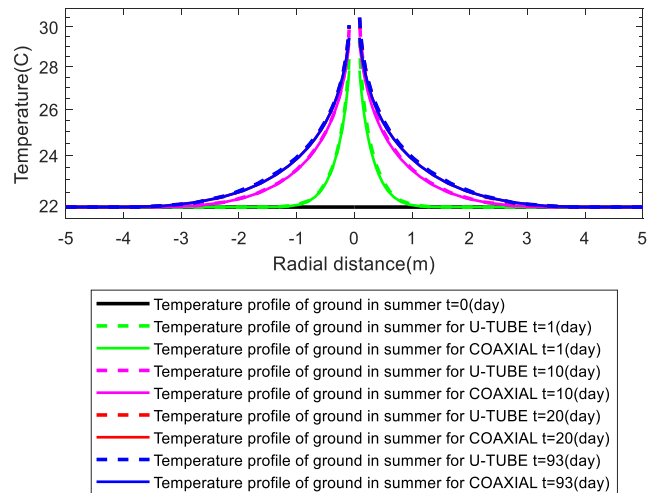
۳-۶- تغییرات دمای زمین از سطح تا عمق ۱۰۰ متری

شکل ۱۳ توزیع دمای خاک را در فاصله‌ی نیم‌متری از مرکز مبدل‌های زمینی، با در نظر گرفتن نرخ جرمی ۰/۸ کیلوگرم بر ثانیه نشان می‌دهد. این شکل بیانگر توزیع دمای خاک در زمان اولیه و ۹۳ روز است. لازم به ذکر است توزیع دمای حاصل بعد از ۹۳ روز اجرا، متأثر از انتقال حرارت سیال با محیط مجاور و انتقال حرارت بین لایه‌های مختلف زمین می‌باشد. با توجه به اینکه سیال گرم در تابستان وارد زمین می‌شود تا از طریق دفع حرارت به آن خنک شود، بنابراین انتظار می‌رود که دمای زمین در مجاورت مبدل بعد از ۹۳ روز دریافت حرارت افزایش یافته‌باشد. در برخی نواحی از فاصله‌ی شعاعی در نظر گرفته شده، افزایش دمای زمین، حتی به بیش از چهار درجه نیز رسیده‌است. در مقایسه‌ی تأثیر دو مبدل بر توزیع دمای خاک مشاهده می‌شود که مبدل حرارتی لوله‌های هم‌مرکز نسبت به مبدل یوشکل تأثیر بیشتری در افزایش دمای زمین به‌ویژه در مناطق عمیق داشته‌است که خود متأثر از جهت تزریق سیال به مبدل می‌باشد، زیرا زمانی که سیال از ناحیه‌ی لوله‌ی داخلی وارد مبدل می‌شود عملاً در مسیر رفت انتقال حرارت چندانی ندارد و بخش عمده‌ی انتقال حرارت آن در قسمت‌های عمیق ناحیه‌ی لوله‌ی خارجی که در تماس با زمین می‌باشد رخ می‌دهد اما در عمق‌های کمتر از ۳۶/۶ متر تأثیر مبدل یوشکل بیشتر است. با توجه به اینکه مبدل لوله‌های هم‌مرکز، توزیع دمای خاک عمق‌های بیشتری از زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مدت زمان بازیابی دمای زمین و رسیدن آن به مقدار اولیه که پارامتر مهمی در استفاده‌ی مجدد از مبدل‌ها است در مبدل لوله‌های هم‌مرکز بیشتر از مبدل یوشکل می‌باشد.



شکل ۱۵. توزیع دمای خاک در عمق ۸۰ متر از سطح زمین در زمانهای مختلف در تابستان

Fig. 15. Temperature distribution of soil at depth 80 m at different times in the summer



شکل ۱۴. توزیع دمای خاک در عمق ۲۰ متر از سطح زمین در زمانهای مختلف در تابستان

Fig. 14. Temperature distribution of soil at depth 20 m at different times in the summer

در این نواحی در یک زمان مشخص توزیع دمای خاک مربوط به مبدل لوله‌های هم‌مرکز بالاتر از توزیع دمای خاک مربوط به مبدل یوشکل می‌باشد که در شکل ۱۵ نیز نمایش داده شده است.

طبق نمودارهای ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود شعاعی از زمین که در زمان‌های مختلف تحت تأثیر انتقال حرارت دو مبدل قرار می‌گیرد تقریباً یکسان است، بنابراین فاصله و نحوه قرارگیری چاه‌ها برای نصب این دو نوع مبدل با یکدیگر تفاوتی نخواهد داشت. همچنین نمودارها حاکی از آن است که عمده‌ی تغییرات توزیع دمای خاک و افزایش آن در فاصله‌ی زمانی ۲۰ روز نخست اتفاق می‌افتد و این عامل سبب کاهش بیشتر نرخ انتقال حرارت بین سیال و زمین و افزایش دمای سیال خروجی از مبدل در بازه‌ی زمانی مذکور می‌شود. با گذشت زمان بیشتر، تغییرات توزیع دمایی خاک کمتر می‌شود به‌گونه‌ای که توزیع دمای خاک حاصل بعد از گذشت مدت زمان ۹۳ روز تغییرات بسیار کمی با توزیع دمای خاک حاصل بعد از گذشت مدت زمان ۲۰ روز دارد و بدین ترتیب عملکرد مبدل حرارتی زمینی نیز نسبتاً پایدار می‌گردد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مقاله‌ی حاضر به مدلسازی عددی و سه‌بعدی دو مبدل حرارتی زمینی لوله‌های هم‌مرکز و یوشکل در حالت سرمایش پرداخته‌است

به تدریج توزیع دمای خاک تغییر کرده و نسبت به حالت اولیه‌ی خود بالاتر قرار می‌گیرد. طبق نمودارها، نواحی نزدیک به مبدل بیشتر تحت تأثیر انتقال حرارت می‌باشند، بنابراین دارای دمای بیشتری هستند. هرچه از مبدل دور می‌شویم تأثیر مبدل بر توزیع دمای خاک کمتر می‌شود. با گذشت زمان دمای نقاط نزدیک به دیواره‌ی چاه افزایش می‌یابد و تغییرات در توزیع دمای خاک به تدریج کمتر می‌شود اما شعاعی از زمین که تحت تأثیر انتقال حرارت قرار می‌گیرد به تدریج افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که شکل ۱۴ نتایج حاصل از شکل ۱۳ را نیز تأیید می‌نماید و مشاهده می‌شود که در یک زمان مشخص توزیع دمای خاک مربوط به مبدل یوشکل بالاتر از توزیع دمای خاک مربوط به مبدل لوله‌های هم‌مرکز است.

#### ۳-۸- تغییرات دمای زمین در عمق ۸۰ متر از سطح آن و در راستای شعاعی

شکل ۱۵ توزیع دمای خاک را در عمق هشتاد متری از سطح زمین در زمان اولیه و زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ذکر شد، با توجه به اینکه جهت ورود سیال به مبدل لوله‌های هم‌مرکز از لوله‌ی داخلی است، این مبدل توزیع دمایی نواحی عمیق زمین را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد، به همین دلیل

سیال درون مبدل لوله‌های هم‌مرکز و مبدل یوشکل با زمین قرار می‌گیرد تقریباً یکسان است، بنابراین فاصله و نحوه‌ی قرارگیری چاه‌ها برای نصب این دو نوع مبدل نیز تفاوتی نخواهد داشت.

- با بررسی توزیع دمای خاک در فاصله‌ی نیم متری از مرکز مبدل‌ها در راستای عمق مشاهده می‌شود که در عمق‌های کمتر از ۳۶/۶ متر تأثیر مبدل یوشکل بر توزیع دمای خاک بیشتر است، درحالی‌که در عمق‌های بیشتر تأثیر مبدل لوله‌های هم‌مرکز بارزتر است که این عامل خود متأثر از جهت تزریق سیال به مبدل لوله‌های هم‌مرکز می‌باشد.

- نرخ انتقال حرارت بیشتر سیال درون مبدل حرارتی لوله‌های هم‌مرکز و زمین و تأثیر آن بر عمق‌های بیشتری از زمین نشان از تأثیرات افزون‌تر این مبدل بر توزیع دمای خاک و تغییر دمای آن در مقایسه با مبدل یوشکل دارد. این عامل سبب می‌شود که مدت زمان لازم برای بازیابی دمای زمین و رسیدن آن به دمای اولیه برای استفاده‌ی مجدد مبدل، در مبدل لوله‌های هم‌مرکز بیشتر از مبدل یوشکل باشد.

### ۳- فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$A$	مساحت، $m^2$
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/(kgK)$
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	ضرایب ثابت در معادله‌ی $k - \varepsilon$
$d$	قطر لوله، $m$
$f$	ضریب اصطکاک
$G_{b,k}$	ترم تولید انرژی جنبشی آشفته، $kg/(ms^3)$
$k$	انرژی جنبشی آشفته‌گی، $m^2/s^2$
$L$	طول، $m$
$\dot{m}$	نرخ جرمی سیال، $kg/s$
$P$	فشار، $Pa$
$Q$	نرخ انتقال حرارت، $W$
$R$	شعاع، $m$
$S_{k,\varepsilon}$	ترم‌های چشمه و چاه در معادله‌ی $k - \varepsilon$ ، $kg/(ms^3)$

و عملکرد دو مبدل در موارد مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌است که نتایج به شرح زیر می‌باشد.

- تغییرات و افزایش محسوس‌تر دمای زمین مجاور مبدل در ۲۰ روز نخست سبب می‌شود که میزان کاهش دمای سیال خروجی از مبدل و نیز کاهش نرخ انتقال حرارت آن با زمین بیشتر باشد و این عامل سبب کاهش ضریب عملکرد پمپ حرارتی زمین‌گرمایی می‌شود. بعد از گذشت ۲۰ روز تغییرات توزیع دمای خاک کمتر می‌شود و سبب پایداری دمای سیال خروجی از مبدل و نرخ انتقال حرارت آن با زمین و عملکرد مبدل می‌گردد.

- در مقایسه‌ی دو مبدل در یک نرخ جرمی مشخص، مبدل لوله‌های هم‌مرکز به دلیل داشتن سطح انتقال حرارت بزرگ‌تر و در نتیجه نرخ انتقال حرارت بیشتر، دارای دمای کمتر سیال خروجی نسبت به مبدل یوشکل می‌باشد.

- در مبدل لوله‌های هم‌مرکز، با افزایش نرخ جرمی علی‌رغم افزایش دمای سیال خروجی از مبدل حرارتی زمینی، نرخ انتقال حرارت بین سیال درون مبدل و خاک بیشتر خواهد بود. میزان نرخ انتقال حرارت دفع شده‌ی سیال در مبدل لوله‌های هم‌مرکز در مقایسه با مبدل یوشکل در نرخ‌های جرمی  $0.1$ ،  $1$  و  $1/2$  کیلوگرم بر ثانیه به ترتیب حدود  $5/34$ ،  $11/9$  و  $16/5$  درصد بیشتر می‌باشد؛ بنابراین به منظور دستیابی به یک نرخ انتقال حرارت مشخص، طول کمتری از مبدل لوله‌های هم‌مرکز در مقایسه با مبدل یوشکل لازم است که سبب صرفه‌جویی در هزینه‌ی اولیه‌ی لوله می‌گردد.

- در یک نرخ جرمی مشخص، مقدار کار مصرفی پمپ در مبدل لوله‌های هم‌مرکز نسبت به مقدار کار متناظر در مبدل یوشکل کمتر است.

- با بررسی تأثیر دو مبدل بر توزیع دمای خاک در راستای شعاعی مشاهده می‌شود که نواحی نزدیک به مبدل بیشتر تحت تأثیر انتقال حرارت قرار دارند، بنابراین دارای دمای بیشتری هستند، اما با افزایش فاصله از مبدل تأثیر آن بر توزیع دمای خاک کمتر می‌شود. هم‌چنین با گذشت زمان دمای نقاط نزدیک به دیواره‌ی چاه افزایش می‌یابد و تغییرات در توزیع دمای خاک به تدریج کمتر می‌شود، ولیکن شعاعی از زمین که تحت تأثیر انتقال حرارت قرار می‌گیرد به تدریج افزایش می‌یابد.

- با توجه به اینکه شعاعی از زمین که تحت تأثیر انتقال حرارت

- building towards thermal energy efficiency and sustainable development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 713-692 (2016) 60.
- [3] M.B. Jebli, S.B. Youssef, Output, renewable and non-renewable energy consumption and international trade: Evidence from a panel of 69 countries, *Renewable Energy*, 808-799 (2015) 83.
- [4] P. Bayer, G. Attard, P. Blum, K. Menberg, The geothermal potential of cities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30-17 (2019) 106.
- [5] K. Wang, B. Yuan, G. Ji, X. Wu, A comprehensive review of geothermal energy extraction and utilization in oilfields, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (2018) 168 477-465.
- [6] P. Olasolo, M. Juárez, M. Morales, I. Liarte, Enhanced geothermal systems (EGS): A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144-133 (2016) 56.
- [7] Y. Noorollahi, R. Saeidi, M. Mohammadi, A. Amiri, M. Hosseinzadeh, The effects of ground heat exchanger parameters changes on geothermal heat pump performance—A review, *Applied Thermal Engineering*, 1658-1645 (2018) 129.
- [8] G. Florides, E. Theofanous, I. Iosif-Stylianou, S. Tassou, P. Christodoulides, Z. Zomeni, E. Tsiolakis, S. Kalogirou, V. Messaritidis, P. Pouloupatis, Modeling and assessment of the efficiency of horizontal and vertical ground heat exchangers, *Energy*, 663-655 (2013) 58.
- [9] M.A. Rosen, S. Koochi-Fayegh, *Geothermal energy: Sustainable heating and cooling using the ground*, John Wiley & Sons, 2017.
- [10] G. Florides, S. Kalogirou, Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications, *Renewable energy*, 2478-2461 (2007) (15)32.
- [11] L. Aresti, P. Christodoulides, G. Florides, A review of the design aspects of ground heat exchangers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 773-757 (2018) 92.
- [12] Y.-L. Nian, W.-L. Cheng, X.-Y. Yang, K. Xie, Simulation of a novel deep ground source heat pump system using abandoned oil wells with coaxial BHE, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 412-400 (2019) 137.

زمان،	$t$
دما،	$T$
سرعت،	$u$
کار مصرفی،	$W$
عمق از سطح زمین،	$z$

### علائم یونانی

ضریب پخش حرارتی،	$\alpha$
نرخ استهلاك آشفته‌گی،	$\varepsilon$
ضریب هدایت حرارتی،	$\lambda$
راندمان	$\eta$
ضریب ویسکوزیته‌ی سیال،	$\mu$
ضریب ویسکوزیته‌ی آشفته‌گی،	$\mu_t$
چگالی،	$\rho$
عدد پراانتل آشفته	$\sigma_k$
عدد اشمیت آشفته	$\sigma_\varepsilon$

### زیرنویس

واقعی	$act$
متوسط	$ave$
چاه	$b$
مبدل لوله‌های هم‌مرکز	$Coaxial$
زمین	$g$
ورودی	$in$
اولیه	$initial$
بیشینه	$max$
خروجی	$out$
پمپ	$pump$
مبدل یوشکل	$Utube$

### مراجع

- [1] L. Pu, D. Qi, K. Li, H. Tan, Y. Li, Simulation study on the thermal performance of vertical U-tube heat exchangers for ground source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, 213-202 (2015) 79.
- [2] S.A. Alkaff, S. Sim, M.E. Efzan, A review of underground



- with different configurations, *Applied Thermal Engineering*, 36-24 (2019) 154.
- [24] L. Zhu, S. Chen, Y. Yang, Y. Sun, Transient heat transfer performance of a vertical double U-tube borehole heat exchanger under different operation conditions, *Renewable Energy*, 505-494 (2019) 131.
- [25] E. Zanchini, A. Jahanbin, Correlations to determine the mean fluid temperature of double U-tube borehole heat exchangers with a typical geometry, *Applied energy*, 206 1415-1406 (2017).
- [26] H. Mokhtari, H. Hadiannasab, M. Mostafavi, A. Ahmadibeni, B. Shahriari, Determination of optimum geothermal Rankine cycle parameters utilizing coaxial heat exchanger, *Energy*, 275-260 (2016) 102.
- [27] X. Hu, J. Banks, L. Wu, W.V. Liu, Numerical modeling of a coaxial borehole heat exchanger to exploit geothermal energy from abandoned petroleum wells in Hinton, Alberta, *Renewable Energy*, 1123-1110 (2020) 148.
- [28] H. Holmberg, J. Acuña, E. Næss, O.K. Sønju, Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers, *Renewable Energy*, 76-65 (2016) 97.
- [29] H. Tang, B. Xu, A.R. Hasan, Z. Sun, J. Killough, Modeling wellbore heat exchangers: Fully numerical to fully analytical solutions, *Renewable energy*, -1124 (2019) 133 1135.
- [30] M. Daneshpour, R. Rafee, Nanofluids as the circuit fluids of the geothermal borehole heat exchangers, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (2017) 81 41-34.
- [31] S. Iry, R. Rafee, Transient numerical simulation of the coaxial borehole heat exchanger with the different diameters ratio, *Geothermics*, 165-158 (2019) 77.
- [32] D. Quaggiotto, A. Zarrella, G. Emmi, M. De Carli, L. Pockelé, J. Vercruyse, M. Psyk, D. Righini, A. Galgaro, D. Mendrinis, Simulation-based comparison between the thermal behavior of coaxial and double U-tube borehole heat exchangers, *Energies*, 2321 (2019) (12)12.
- [33] A. Zarrella, M. Scarpa, M.D. Carli, Short time-step performances of coaxial and double U-tube borehole heat exchangers: Modeling and measurements, *HVAC&R*
- [13] H. Javadi, S.S.M. Ajarostaghi, M.A. Rosen, M. Pourfallah, Performance of ground heat exchangers: A comprehensive review of recent advances, *Energy*, (2019).
- [14] Q. Zhao, B. Chen, M. Tian, F. Liu, Investigation on the thermal behavior of energy piles and borehole heat exchangers: A case study, *Energy*, 797-787 (2018) 162.
- [15] W. Zhang, H. Yang, L. Lu, Z. Fang, Investigation on influential factors of engineering design of geothermal heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, (2015) 84 319-310.
- [16] E. Zanchini, A. Jahanbin, Effects of the temperature distribution on the thermal resistance of double u-tube borehole heat exchangers, *Geothermics*, 54-46 (2018) 71.
- [17] X.-Y. Li, T.-Y. Li, D.-Q. Qu, J.-W. Yu, A new solution for thermal interference of vertical U-tube ground heat exchanger for cold area in China, *Geothermics*, (2017) 65 80-72.
- [18] X. Zhai, X. Cheng, R. Wang, Heating and cooling performance of a minitype ground source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, -1366 (2017) 111 1370.
- [19] A.A. Serageldin, Y. Sakata, T. Katsura, K. Nagano, Thermo-hydraulic performance of the U-tube borehole heat exchanger with a novel oval cross-section: Numerical approach, *Energy conversion and management*, 177 415-406 (2018).
- [20] S. Gharibi, E. Mortezaazadeh, S.J.H.A. Bodi, A. Vatani, Feasibility study of geothermal heat extraction from abandoned oil wells using a U-tube heat exchanger, *Energy*, 567-554 (2018) 153.
- [21] 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*, 98-91 (2017) 115.
- [22] F. Tang, H. Nowamooz, Factors influencing the performance of shallow Borehole Heat Exchanger, *Energy conversion and management*, 583-571 (2019) 181.
- [23] H. Javadi, S.S.M. Ajarostaghi, M. Pourfallah, M. Zaboli, Performance analysis of helical ground heat exchangers

- systems: Theory and practice, John Wiley & Sons, 2016.
- [39] DIN, Polyethylene (PE)-Pipes PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD-Dimensions, (1999).
- [40] E.D. Kerme, A.S. Fung, Heat transfer simulation, analysis and performance study of single U-tube borehole heat exchanger, *Renewable Energy*, 1448-1430 (2020) 145.
- [41] I.I. Stylianou, S. Tassou, P. Christodoulides, L. Aresti, G. Florides, Modeling of vertical ground heat exchangers in the presence of groundwater flow and underground temperature gradient, *Energy and Buildings*, (2019) 192 30-15.
- [42] L. Lamarche, S. Kajl, B. Beauchamp, A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems, *Geothermics*, 200-187 (2010) (2)39.
- [43] K. Bär, W. Rühaak, B. Welsch, D. Schulte, S. Homuth, I. Sass, Seasonal high temperature heat storage with medium deep borehole heat exchangers, *Energy Procedia*, 360-351 (2015) 76.
- Research, 976-959 (2011) (6)17.
- [34] C.J. Wood, H. Liu, S.B. Riffat, Comparative performance of 'U-tube'and 'coaxial'loop designs for use with a ground source heat pump, *Applied Thermal Engineering*, 37 195-190 (2012).
- [35] D. Mottaghy, L. Dijkshoorn, Implementing an effective finite difference formulation for borehole heat exchangers into a heat and mass transport code, *Renewable energy*, 45 71-59 (2012).
- [36] X. Song, Y. Shi, G. Li, Z. Shen, X. Hu, Z. Lyu, R. Zheng, G. Wang, Numerical analysis of the heat production performance of a closed loop geothermal system, *Renewable Energy*, 378-365 (2018) 120.
- [37] X. Song, G. Wang, Y. Shi, R. Li, Z. Xu, R. Zheng, Y. Wang, J. Li, Numerical analysis of heat extraction performance of a deep coaxial borehole heat exchanger geothermal system, *Energy*, 1310-1298 (2018) 164.
- [38] A.D. Chiasson, Geothermal heat pump and heat engine

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Sanaye, S.F. Mousavi, Comparison of axial and radial soil temperature distribution in U-tube and coaxial borehole heat exchangers, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(7) (2021) 4361-4378.

DOI: [10.22060/mej.2020.18276.6799](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18276.6799)

