

مدل سازی عددی سه بُعدی تونل های ژئوترمال و میزان انرژی دریافتی

سید رائف شیخ احمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمدامیر کیانی فردونی (دانشجوی دکتری)

محمد علیایی* (استادیار)

دانشکده ی هندی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (دوره ی ۲ - ۳۸، شماره ی ۲/۱، ص. ۳۱-۵۰، پژوهشی)

امروزه با گسترش تونل های قطار شهری، تأمین گرمایش و سرمایش ایستگاه ها، اهمیت بسیار زیادی دارد. انرژی زمین گرمایی کم عمق، به عنوان یک انرژی تجدیدپذیر توانسته است به مقدار قابل توجهی در کاهش انرژی مورد نیاز برای تأمین تهویه و گرمایش - سرمایش ایستگاه های قطار شهری کمک کند. میزان انرژی دریافتی از سیستم نوین ذکر شده در ارزیابی اقتصادی طرح اهمیت بسزایی دارد. از این رو، در پژوهش حاضر سعی شده است با ارائه ی یک مدل سازی المان محدود، میزان انرژی دریافتی در تونل های مجهز به سیستم مبادله گر حرارتی در ۱۶ روز بررسی شود. پس از صحت سنجی مدل سازی صورت گرفته، اثر پارامترهای مختلف مدل سازی در دو حالت عایق و غیرعایق بررسی شده است. در شرایط غیرعایق، میزان توان انرژی خروجی وابسته به شرایط حاکم بر فضای داخلی تونل است. براساس نتایج به دست آمده در هر دو شرایط عایق و غیرعایق، تحت تأثیر عملیات مستمر استخراج انرژی، توان انرژی خروجی با گذشت زمان کاهش یافته است.

sheikhahmadiraef@modares.ac.ir
m.kianifordoei@modares.ac.ir
m.olyaei@modares.ac.ir

واژگان کلیدی: تونل قطار شهری، انرژی زمین گرمایی کم عمق، مدل سازی المان محدود، سیستم مبادله گر حرارتی، بررسی پارامتریک.

۱. مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون صنایع در جهان و رشد جوامع بشری، تأمین انرژی یکی از مسائل مهم در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه است. در حال حاضر، یکی از منابع اصلی تأمین انرژی، سوخت های فسیلی هستند.^[۱] یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی زمین گرمایی^۱ است. بدین صورت که دمای زمین در عمقی برابر با ۱۰ تا ۱۵ متر از سطح زمین، مستقل از دمای سطح زمین می شود و از آنجا تا حدود ۵۰ متر، در تمام سال دمایی بین ۱۰ تا ۱۵ درجه ی سانتی گراد خواهد داشت. یک سیستم زمین گرمایی کم عمق از سه جزء اصلی سازه ی خاکی^۲، لوله ی مبادله گر حرارتی و پمپ حرارتی تشکیل می شود. سازه ی خاکی می تواند شامل: پی های سطحی، شمع های حفاری شده، دیوارهای دیاگرامی، پوشش های تونل^۳، مهارهای تونل های NATM و خطوط لوله ی انتقال فاضلاب باشد.^[۲]

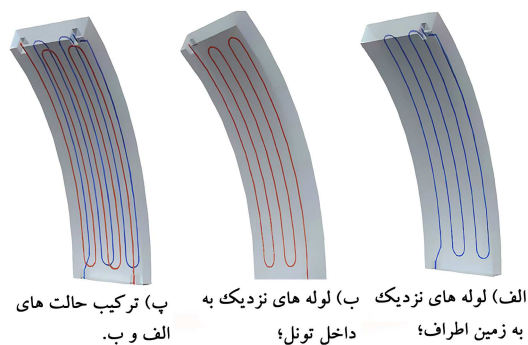
در دهه های اخیر، استفاده از پوشش تونل ها کاربرد گسترده تری یافته است. در مقایسه با سایر سازه های خاکی، تونل های انرژی دو تفاوت عمده دارند: اولاً، طول بسیار زیاد تونل ها در زمین باعث می شود که ارتباط خاک با سازه ی خاکی، مقادیر بسیار زیادی داشته باشد و بتوان انرژی زیادی از سطح تماس تونل و خاک به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۵/۳۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۱۹، پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۲۳

DOI:10.24200/J30.2022.58760.3001

سیوان^۵ و همکاران (۲۰۱۸)، براساس عملکردی که از پمپ های حرارتی زمین



شکل ۱. جایگیری مختلف چینش لوله‌ها.^[۹]

در شهر تورین ایتالیا، سه نوع جایگیری لوله‌ی متفاوت در داخل پوشش تونل، مطابق شکل ۱ ارائه دادند.

(الف) لوله‌ها به زمین اطراف نزدیک‌تر هستند و بیشتر تبادل گرمایی با زمین انجام می‌شود.

(ب) لوله‌ها به محیط داخلی تونل نزدیک‌تر هستند و بیشتر تبادل گرمایی با هوای داخل تونل انجام می‌شود.

(پ) چینش دوگانه‌ی لوله‌ها که می‌توان به طور همزمان از مزایای دو مورد اخیر استفاده کرد.

انتخاب کارآمدترین نوع جایگیری بستگی به هدف دارد. در مورد تونل‌های شهری، فضای سطح زمین، یک محیط شهری است. در نتیجه نیاز به استخراج، تریق و ذخیره‌ی گرما در زمین برای تهویه‌ی ساختمان‌ها، هدف اصلی است. پس مورد (الف) برای این منظور مناسب است؛ اما در برخی تونل‌ها مورد (الف) باعث محدود کردن انتقال طولانی‌مدت گرمای ناشی از حمل و نقل به زمین اطراف و در مواردی دیگر باعث افزایش دمای داخل تونل، به علت گرمای حاصل از اصطکاک رفت و آمد قطارها می‌شود. در نتیجه، آن دسته از تونل‌هایی که دمای هوای داخل آن‌ها باید کاهش یابد (مانند تونل‌های کوهستانی)، مورد (ب) مناسب‌تر است.^[۹] از منظر اقتصادی، هزینه‌ی فعال‌سازی سیستم تبادل گرمایی در یک تونل، تقریباً ۱ تا ۲ درصد هزینه‌ی ساخت آن است.^[۱۰] تونل‌های حرارتی در مقایسه با گمانه‌های انرژی، می‌توانند ۷۳٪ انرژی حرارتی بیشتری ذخیره کنند.^[۱۱] همچنین عمر عملکرد سیستم‌های سنتی، مانند گمانه‌ها یا تک‌شمع‌های انرژی، ۵ تا ۱۵ سال است، در حالی که مدت خدمت‌رسانی تونل‌های انرژی بسیار بیشتر است.^[۱۲]

۲. تونل‌های مبادله‌گر حرارتی

برای مدل عددی و صحت‌سنجی آن از مدل مطالعات کازین^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۹)، استفاده شده است.^[۱۳] از مدل‌سازی عددی برای بهسازی خطوط موجود و ساخت خطوط تونل جدید در پروژه‌ی Grand Paris Express در شهر پاریس فرانسه استفاده شده است. تونل مذکور در مجموع ۱۶۲ کیلومتر طول دارد که در شکل ۲، پروفیل خاک و عمق قرارگیری تونل مشخص شده است. مدل‌سازی صورت گرفته، یک تونل مبادله‌گر حرارتی سه‌بعدی است که توسط نرم‌افزار COMSOL v5/5 Multiphysics به روش المان محدود و با فرمولاسیون ترموهیدرولیک تحلیل شده است.

منبع (GSHP)^۶ مشاهده کردند، نشان دادند که بازدهی این پمپ‌ها تا مقدار زیادی وابسته به شکل اجرای مبادله‌گرهای حرارتی و خصوصیات سیال است.^[۵] در پژوهش بارالیس^۷ و همکاران (۲۰۲۰)، بازدهی حرارتی تونل دوقلوی مترو در ورشو لهستان برای مدت ۳ سال برداشت گرما از زمین در زمستان بررسی شده است.^[۶] برای این اساس مشخص شد که اثر چینه‌شناسی زمین در انرژی استخراج شده، وابسته به تغییرات فصلی است. اگرچه در حالت گرم‌کنندگی (فصل زمستان)، تأثیر چینه‌شناسی زمین ناچیز است؛ اما در تابستان و در حالت خنک‌کنندگی، افزایش قابل توجهی (۴۵٪) در انرژی استخراج شده در خاک ماسه‌یی نسبت به خاک رسی مشاهده می‌شود، به‌خصوص اگر جریان آب زیرزمینی وجود داشته باشد. فرانزیوس^۸ و همکاران (۲۰۱۱)، میزان انرژی دریافتی از پوشش تونل‌های مرحله‌یی^۹ را در سه حالت مختلف عملیات پمپ حرارتی به این شرح بررسی کرده‌اند:

(الف) پمپ حرارتی دائماً در حال کار باشد.

(ب) پمپ حرارتی در ساعاتی محدود در حال کار باشد و در ماه‌های جولای و آگوست (در محدوده‌ی فصل تابستان) خاموش باشد.

(پ) پمپ حرارتی به‌صورت ترکیبی با سیستم گرمایش - سرمایش اصلی سازه و فقط در ماه‌های جولای و آگوست کار کند.

در حالت (الف) و با ورود سیال با دمایی کمتر از دمای اولیه‌ی خاک به لوله‌ها و استخراج انرژی حرارتی به میزان ۱۰ وات بر مترمربع از خاک مشاهده شد که دمای خاک ناگهان به صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد. با توجه به اینکه جریان آب زیرزمینی وجود ندارد، گرمای موجود در خاک ظرف مدت ۳ ماه تخلیه می‌شود. در حالت (ب)، تقریباً در سال فقط ۱۵۰ ساعت از سیستم زمین‌گرمایی استفاده می‌شود و در نتیجه می‌توان مشاهده کرد که گرمای زمین با نرخ بسیار کمتری نسبت به حالت (الف) کاهش می‌یابد و هرگز دمای خاک به صفر درجه سانتی‌گراد نمی‌رسد. در حالت (پ)، با توجه به اینکه سیستم در ماه‌های مربوط به تابستان فعال است، گرمایی به میزان ۱۰ وات بر مترمربع به زمین تریق می‌شود (که نشان‌دهنده‌ی خنک کردن ساختمان است) و این گرما برای ماه‌های سرد سال ذخیره می‌شود. از مقایسه‌ی نتایج اخیر می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از تونل انرژی به صورت فصلی، بازدهی بهتری دارد.^[۷]

در پژوهش لی^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۲)، از نوع جدیدی از سیستم مبادله‌گر حرارتی در تونل‌ها با عنوان ژئوتکستایل انرژی^{۱۱} استفاده شد. ژئوتکستایل انرژی به مجموعه‌ی لوله‌های مبادله‌گر حرارتی، شاتکریت، و لایه‌ی زهکش گفته می‌شود. لوله‌های مبادله‌گر حرارتی در بین لایه‌های شاتکریت و زهکش تونل قرار می‌گیرند و سه نوع چینش مختلف را می‌توان برای لوله‌های مبادله‌گر حرارتی آن در نظر گرفت:

(الف) چینش عمود بر محور تونل با طول لوله‌ی ۶۰/۲ متر؛

(ب) چینش موازی با محور تونل با طول لوله‌ی ۶۱/۲ متر؛

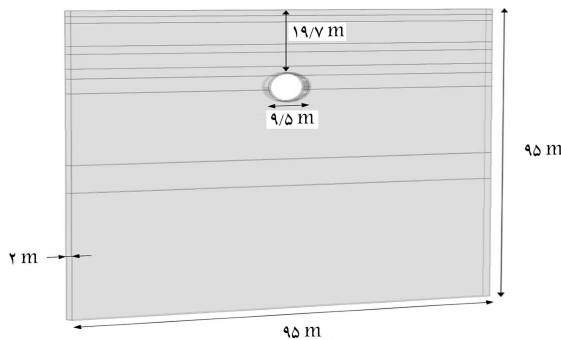
(پ) چینش مارپیچ لوله‌ها با طول ۱۷۳ متر.

لی و همکاران (۲۰۱۲)، نشان دادند که چینش عمود بر محور تونل به‌طور نسبی بازدهی حرارتی بیشتری نسبت به دو نوع دیگر چینش دارد. چینش مارپیچ، که تقریباً سه برابر چینش‌های دیگر طول لوله‌ی کارگذاری شده در پوشش را داشته است، کمترین توان به‌دست آمده را در واحد طول لوله‌ها نشان داده است. علت این بازدهی کم به دلیل سوء تأثیر نزدیکی لوله‌ها به همدیگر و تداخل مناطق نفوذ حرارتی آن‌ها با یکدیگر است.^[۸] بارالا^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸)، برای تونل اینزتون^{۱۳}

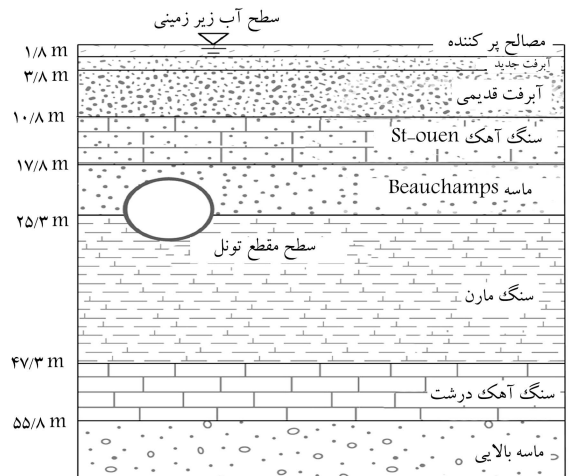
جدول ۱. مشخصات حرارتی پروفیل خاک، بتن و لوله. [۱۳]

ماده	ضریب رسانش حرارتی (λ) $W/m \cdot ^\circ C$	ظرفیت گرمایی ویژه (C_p) $J/kg \cdot ^\circ C$	جرم مخصوص (ρ) kg/m^3
مصالح پرکننده	۰/۶	۷۹۰	۱۹۰۰
آبرفت جدید	۱/۴	۱۲۱۰	۱۹۰۰
آبرفت قدیمی	۲/۳	۱۲۶۰	۱۹۰۰
سنگ آهک St-ouen	۲/۳	۱۳۳۳	۱۸۰۰
ماسه Beauchamps	۲/۳	۱۱۴۰	۲۱۰۰
سنگ مارن	۲/۱	۱۱۰۰	۲۰۰۰
سنگ آهک درشت	۲/۸	۱۰۵۰	۲۱۰۰
ماسه بالایی	۲/۳	۱۱۴۰	۲۱۰۰
بتن	۱/۸	۸۸۰	۲۳۰۰
آب	۰/۵۷	۴۲۰۰	۱۰۰۰
لوله پلی اتیلن چگالی بالا *	۰/۳۵	-	-

*High density polyethylene (HDPE)



شکل ۳. ابعاد هندسی مدل عددی.



شکل ۲. جنس و ضخامت لایه‌های مختلف خاک در مدل عددی.

۱.۲. مدل‌سازی سه‌بعدی تونل‌های مبادله‌گر حرارتی

با توجه به شکل ۳، ضخامت مدل، ۲ متر و ارتفاع و عرض آن هر کدام ۹۵ متر است. قطر خارجی تونل ۹/۵ متر با پوششی به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر است که در عمق ۱۹/۷ متری تا ۲۹/۲ متری از سطح زمین قرار گرفته است.

پوشش تونل از ۶ قطعه‌ی بتنی با ۴/۲ متر طول و ۱ قطعه‌ی اتصال بتنی با ۳/۴ متر طول تشکیل شده است. عرض و ارتفاع مدل نسبت به قطر تونل به نحوی انتخاب شده است که از سوء تأثیر مرزها در نتایج تحلیل عددی جلوگیری شود. لوله‌های مبادله‌گر حرارتی در داخل پوشش قرار گرفته و چینش آن‌ها به صورت عمود بر تونل بوده است. با فرض قرار گرفتن سطح آب زیرزمینی تا سطح زمین، تمام لایه‌های خاک اشباع فرض شده‌اند، اما اثر وجود جریان آب زیرزمینی صرف‌نظر شده است. دمای اولیه‌ی مدل برابر ۱۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. همچنین به مرزها، دمای ثابت ۱۳ درجه سانتی‌گراد اختصاص یافته و فرض شده است که مرزهای مدل، هیچ‌گونه تبادل حرارتی با

محیط خارجی ندارند. دمای آب ورودی به لوله‌ها ۲ درجه سانتی‌گراد و دمای محیط داخلی تونل ۱۸/۹۶ درجه سانتی‌گراد اعمال شده است. محیط داخلی تونل به صورت انتقال حرارت همرفتی با پوشش تونل تبادل حرارت دارد. مشخصات حرارتی لایه‌های خاک، لوله و بتن در جدول ۱ ارائه شده است. برای به دست آوردن تعداد المان‌های بهینه برای مدل‌سازی، از ۳۲۶۱۶ تا ۱۳۷۵۰۸ المان حجمی چهار وجهی استفاده شده است که تعداد المان بهینه برابر با ۶۴۳۸۴ المان به دست آمد. نوع المان‌بندی مدل و شرایط مرزی در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

مدل‌سازی در طول ۱۶ روز و با هدف رسیدن به شرایط پایدار که عبارت از رسیدن به شرایطی است که تفاوت توان خروجی با روز قبل کمتر از ۰/۵ باشد، انجام شده است.

۲.۲. قوانین حاکم

براساس اصل پایستگی انرژی، معادله‌ی انتقال حرارت در محیط متخلخل به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda \nabla^2 T = 0 \quad (1)$$

برای محیط داخلی تونل که با هوای درون تونل تبادل حرارتی دارد، مقدار جریان همرفتی حرارت از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$\dot{q}_{conv} = \bar{h}_c (T - T_a) \quad (8)$$

که در آن، T_a میانگین دمای هوای داخل تونل در زمستان و \bar{h}_c ضریب انتقال حرارت محیط داخل تونل (برابر با $15/13 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}^\circ$) است. توان به دست آمده از گردش آب داخل لوله مطابق رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$\dot{Q} = \rho_f q_{vf} c_f (T_{out} - T_{in}) \quad (9)$$

که در آن، T_{out} دمای آب خروجی، T_{in} دمای آب ورودی و q_{vf} دبی حجمی آب هستند.

بر اساس پژوهش لامارچ^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۰)، رابطه‌ی بین R'_{bt} مقاومت خاک، T_s دمای خاک، q'_b توان خروجی در واحد سطح تونل و T_f میانگین دمای آب ورودی و خروجی $\left(\left[\frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \right] \right)$ به صورت رابطه‌ی ۱۰ است:^[۱۴]

$$R'_{bt} = \left| \frac{T_s - T_f}{q'_b} \right| \quad (10)$$

همچنین هلستورم^{۱۷} (۱۹۹۱) را برای یک گمانه‌ی انرژی^{۱۸} به صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف کرده است:^[۱۵]

$$R'_{bt} = \frac{1}{4\pi k_g} \left[\ln \left(\frac{r_b}{r_p} \right) + \ln \left(\frac{r_b}{r_{xc}} \right) + \left(\frac{k_g - k_s}{k_g + k_s} \right) \ln \left(\frac{\left(\frac{r_b}{x_c} \right)^2}{\left(\frac{r_b}{x_c} \right)^2 - 1} \right) \right] \quad (11)$$

که در آن، k_g و k_s به ترتیب ضریب رسانش حرارتی بتن و خاک، r_b و r_p به ترتیب برابر با شعاع لوله‌ها و شعاع گمانه و x_c برابر فاصله‌ی بین ورودی و خروجی لوله‌ها هستند. بر اساس پیشنهاد کازین و همکاران (۲۰۱۹)، توان خروجی به دست آمده از آب در حال گردش نسبت به واحد سطح جانبی تونل، از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:^[۱۳]

$$\dot{q}_i = \frac{\dot{Q}}{w_{ring} \pi D_{in}} \quad (12)$$

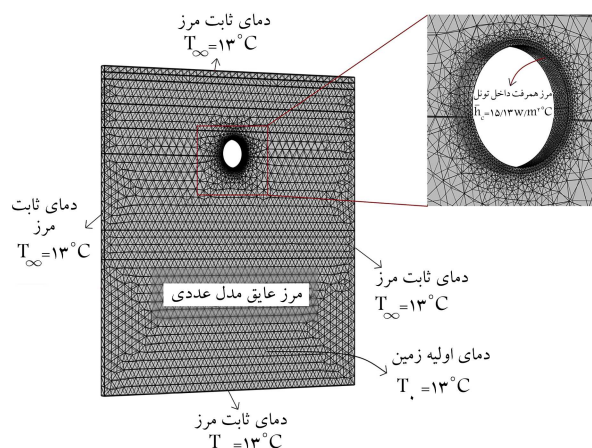
که در آن، w_{ring} برابر ضخامت تونل و D_{in} برابر قطر داخلی تونل هستند. در نهایت، با جایگذاری رابطه‌ی ۱۲ در رابطه‌ی ۱۰ و ساده کردن آن، رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$T_{fo} \left(R'_{bt} \dot{m} C_{p(w)} + \frac{1}{4} \right) - T_s = T_{fi} \left(R'_{bt} \dot{m} C_{p(w)} - \frac{1}{4} \right) \quad (13)$$

۳. صحت سنجی مدل

همان‌طور که پیشتر نیز ذکر شد، برای صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج پژوهش کازین و همکاران (۲۰۱۹) که در آن، تحلیل تونل انرژی با دو چپش مختلف لوله، عمود و موازی با محور تونل صورت گرفته است، استفاده شده است:

الف) ابتدا با توجه به شکل (۵الف)، تونل ژئوترمال در حالتی که چپش لوله‌ها عمود بر محور تونل است، صحت‌سنجی صورت می‌گیرد. در این حالت قطر لوله‌ها ۲۰ میلی‌متر، ضخامت جدار آن‌ها ۱/۹ میلی‌متر و فاصله‌ی بین آن‌ها



شکل ۴. نوع المان بندی و شرایط مرزی.

که در آن، t زمان، T دما، ρ چگالی، c ظرفیت گرمایی ویژه، λ رسانایی حرارتی، $\frac{\partial}{\partial t}$ مشتق نسبت به زمان و ∇^2 عملگر لاپلاس برای معادله‌ی انتقال حرارت در خاک اشباع هستند. برای تعیین مشخصات حرارتی محیط‌های متخلخل اشباع از روابط ۲ و ۳ بر مبنای روش میانگین‌گیری وزنی استفاده می‌شود:

$$\lambda_{av} = (1 - n)\lambda_s + n\lambda_w \quad (2)$$

$$C_{p(av)} = (1 - n)C_{p(s)} + nC_{p(w)} \quad (3)$$

در رابطه‌ی ۴، معادله‌ی انتقال حرارت به وسیله‌ی همرفت در لوله ارائه شده است:

$$\rho_f A_p c_f \frac{\partial \bar{T}_f}{\partial t} + \rho_f A_p c_f \bar{v}_{f,i} \nabla \bar{T}_f = \nabla (A_p \lambda_f \nabla \bar{T}_f) + f_D \frac{\rho_f A_p}{2 d_h} |\bar{v}_{f,i}| \bar{v}_{f,i} + \dot{Q}_{wall} \quad (4)$$

که در آن، ρ_f چگالی، f ظرفیت گرمایی ویژه، λ_f ضریب رسانش حرارتی سیال موجود در لوله، A_p سطح مقطع لوله، f_D ضریب اصطکاک دارسی، قطر d_h هیدرولیکی لوله، $\bar{v}_{f,i}$ میانگین سرعت آب داخل لوله، t زمان و \bar{T}_f دمای سیال ورودی به لوله هستند. همچنین \dot{Q}_{wall} شار حرارتی مبادله شده در واحد طول لوله است که نحوه‌ی محاسبه‌ی آن در رابطه‌ی ۵ بیان شده است:

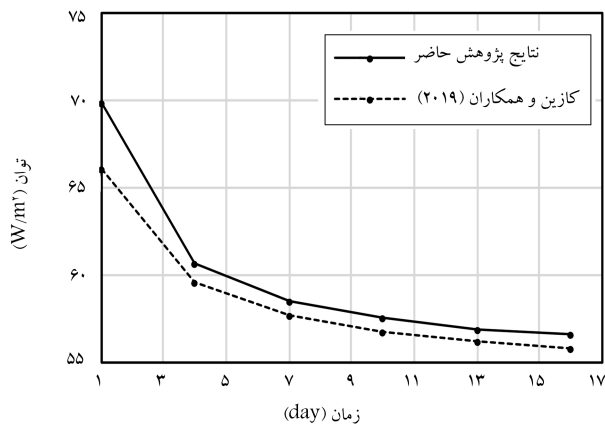
$$\dot{Q}_{wall} = UP_p (T_{ext} - \bar{T}_f) \quad (5)$$

که در آن، P_p محیط داخلی، T_{ext} دمای محیط اطراف لوله و U مقدار مؤثر در ظرفیت گرمایی ویژه لوله است و به قطر هیدرولیکی لوله و عدد ناسلت^{۱۵} Nu وابسته هستند. مقدار U در رابطه‌ی ۵ مطابق رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{r_{int}}{\lambda_p} \ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)} \quad (6)$$

که در آن، r_{int} و r_{ext} به ترتیب برابر با شعاع خارجی و داخلی لوله هستند، λ_p ضریب رسانش حرارتی لوله و h_{int} ضریب همرفت داخل لوله است که رابطه‌ی آن با عدد ناسلت به صورت رابطه‌ی ۷ است:

$$h_{int} = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{d_h} \quad (7)$$



شکل ۷. صحت‌سنجی توان خروجی در طول زمان در چپش موازی.

جدول ۳. مقایسه و صحت‌سنجی نتایج چپش موازی.

روز	نتایج پژوهش حاضر	کازین و همکاران (۲۰۱۹)	درصد خطا
۱	۶۹/۷۷	۶۶/۰۵	۵/۳
۴	۶۰/۶۱	۵۹/۵۳	۱/۸
۷	۵۸/۴۷	۶۱/۵۲	۱/۴
۱۰	۵۷/۵۲	۵۷/۶۸	۱/۵
۱۳	۵۶/۹۲	۵۶/۶۸	۱/۳
۱۶	۵۶/۵۷	۵۵/۸۴	۱/۳
		میانگین درصد خطا	۲/۱

جدول ۴. مشخصات حرارتی خاک اطراف تونل.

جرم مخصوص (ρ)	ظرفیت گرمایی ویژه (C_p)	ضریب رسانش حرارتی (λ)
1800 kg/m^3	$1000 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	$1.25 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

همچنین در شکل ۷، نتایج حاصل از مطالعات کازین و همکاران (۲۰۱۹) و نتایج مدل‌سازی پژوهش حاضر برای تغییرات توان خروجی در طول زمان مشاهده می‌شود. در جدول ۳، نیز نتایج دو تحلیل مقایسه و درصد خطای میانگین به دست آمده، گزارش شده است. مدل‌سازی ارائه شده، دقت قابل قبولی دارد و میانگین خطاها در چپش موازی حدود ۲/۱ است.

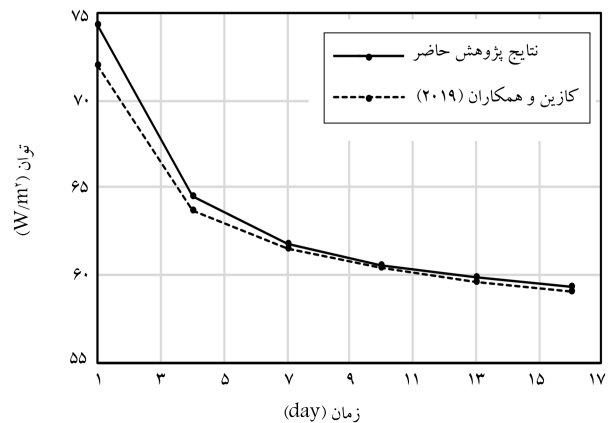
۴. تحلیل پارامتری^{۱۹} و تفسیر نتایج

در تحلیل پارامتری برای کاستن از پیچیدگی مسئله و امکان ارائه تفسیر برای هر پارامتر هدف، تونل در یک خاک ماسه‌بی همگن، با مشخصاتی برابر در تمامی فضای اطراف تونل مدل‌سازی شده است. به همین دلیل به آن «خاک جایگزین» می‌گویند. به همین منظور از مشخصات خاک ماسه‌ی لومی^{۲۰} استفاده می‌شود که چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آن از تحقیقات کدیسوا^{۲۱} و همکاران (۲۰۱۴)،^[۱۶] و ضریب رسانش حرارتی آن از تحقیقات ابوحمده و ریدر^{۲۲} (۲۰۰۰)،^[۱۷] به دست آمده است. در جدول ۴، مشخصات حرارتی خاک جایگزین ارائه شده است.

لازم به ذکر است در نمودارهای تحلیل پارامتری، عبارتهای NID۱۶، NID۱، ID۱ و ID۱۶ به ترتیب برابر با غیرعایق روز یکم، غیرعایق روز شانزدهم، عایق روز یکم و عایق روز شانزدهم هستند. در اینجا منظور از شرایط عایق، شرایطی است که



شکل ۵. چپش‌های مختلف لوله‌ها در تحلیل.



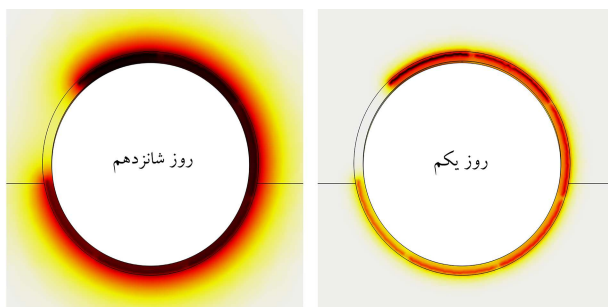
شکل ۶. صحت‌سنجی توان خروجی در طول زمان در چپش عمود.

جدول ۲. مقایسه و صحت‌سنجی نتایج چپش عمود.

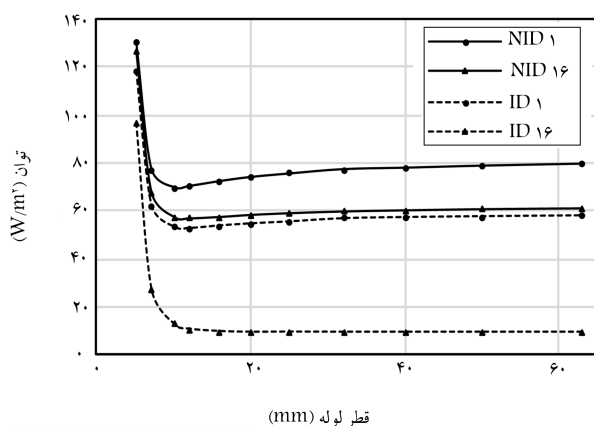
روز	نتایج پژوهش حاضر	کازین و همکاران (۲۰۱۹)	درصد خطا
۱	۷۴/۲	۷۲/۰۷	۳
۴	۶۴/۵۴	۶۳/۷	۱/۳
۷	۶۱/۸۱	۶۱/۵۲	۰/۵
۱۰	۶۰/۶۲	۶۰/۴	۰/۵
۱۳	۵۹/۹	۵۹/۶	۰/۵
۱۶	۵۹/۳۱	۵۹/۰۷	۰/۵
		میانگین درصد خطا	۱

۲۰۰ میلی‌متر است که در این صورت مجموع طول لوله‌ها به ۲۰۷ متر در چپش عمود می‌رسد. سرعت آب در حال گردش برابر با ۰/۷۵ متر بر ثانیه و جایگیری لوله‌ها در فاصله‌ی ۲۵۰ میلی‌متری از سطح داخلی تونل بوده است. در شکل ۶، مقایسه‌ی نتایج مطالعات کازین و همکاران (۲۰۱۹) و نتایج مدل‌سازی پژوهش حاضر برای تغییرات توان خروجی در طول زمان مشاهده می‌شود. نتایج اخیر در روزهای ۱، ۴، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۶م ارائه شده‌اند. در جدول ۲، نیز نتایج دو تحلیل مقایسه و درصد خطای میانگین گزارش شده است که میانگین خطاها در چپش عمود در حدود ۱/۱ است.

(ب) در ادامه با توجه به شکل (۵) (ب)، تونل ژئوترمال در حالتی که چپش لوله‌ها موازی با محور تونل است، صحت‌سنجی شده است. مشخصات هندسی لوله‌ها به جز مجموع طول لوله‌ی کار گذاشته شده که برابر ۱۹۲ متر است، همانند مورد (الف) است.



شکل ۱۰. توزیع حرارتی خاک اطراف تونل (قسمت‌های تیره‌تر، دمای کمتری دارند).



شکل ۱۱. توان خروجی بر حسب قطر لوله.

کاهش یافته است. طبق رابطه‌ی ۱۳، در شرایط زمستانی ($T_{fo} > T_{fi}$)، با کاهش مقاومت حرارتی R'_{bt} ، T_{fo} افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه توان انرژی خروجی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که تحت تأثیر عملیات مستمر استخراج انرژی، در روزهای پایانی، اختلاف دمای کمتری بین خاک و بتن با لوله‌ی مبادله‌گر حرارتی وجود دارد. بنابراین لوله‌ها امکان تبادل انرژی کمتری با محیط اطراف خود دارند و همواره انرژی دریافت‌شده در روز اول از روز شانزدهم بیشتر است.

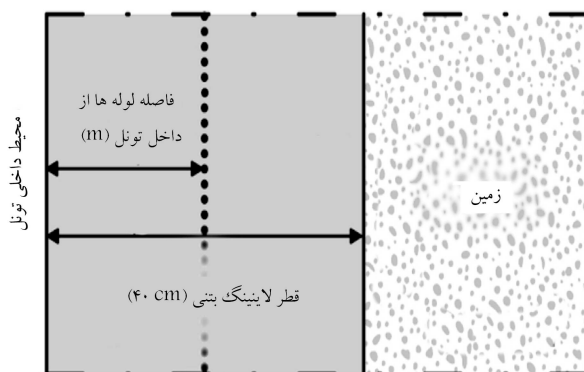
۲.۴. اثر قطر لوله‌ها

برای بررسی تأثیر قطر لوله‌ها در میزان توان خروجی، مدل عددی توسط لوله‌هایی با قطر از ۵ تا ۶۳ میلی‌متر مطابق با آیین‌نامه‌ی DIN ۸۰۷۴ و با دبی ورودی آب ثابت برابر با ۱۵۴/۵۹ سانتی‌مترمکعب بر ثانیه (با فرض قطر داخلی لوله برابر با ۱۶/۲ میلی‌متر و سرعت متوسط گردش آب برابر با ۰/۷۵ متر بر ثانیه)، تحلیل شده است، که نتایج در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.^[۱۸]

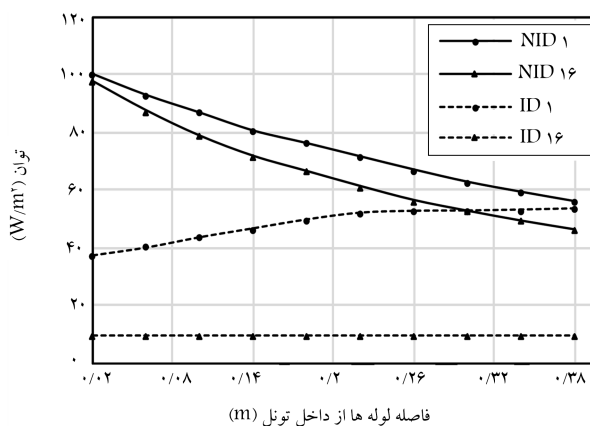
مطابق شکل ۱۱، شیب نمودار تا قطر ۱۲ میلی‌متر به شدت نزولی است، که دلیل مشاهدات آن است که با توجه به دبی ثابت، در قطرهای کوچک عدد رینولدز^{۲۳} که در رابطه‌ی ۱۴ ارائه شده است، مقادیر بزرگی خواهد داشت.

$$R = \frac{4 \times \rho_w Q'}{d_h \pi \mu} \quad (14)$$

که در آن، ρ_w چگالی آب، Q' دبی آب، d_h قطر هیدرولیکی لوله و μ لزجت دینامیکی آب برابر ۰/۰۱ پاسکال ثانیه است. در رژیم جریان آرام ($R \leq 2300$)، عدد ناسلت (Nu) ثابت است و تحت تأثیر آن، مقدار شار حرارتی در رابطه‌ی ۵ مقدار کمی تغییر می‌کند، اما در قطرهای کوچک که عدد رینولدز افزایش می‌یابد، رژیم جریان آشفتگی می‌شود. طبق رابطه‌ی ۱۵، عدد ناسلت به عدد رینولدز و



شکل ۸. نمای محل قرارگیری لوله‌ها در داخل پوشش.



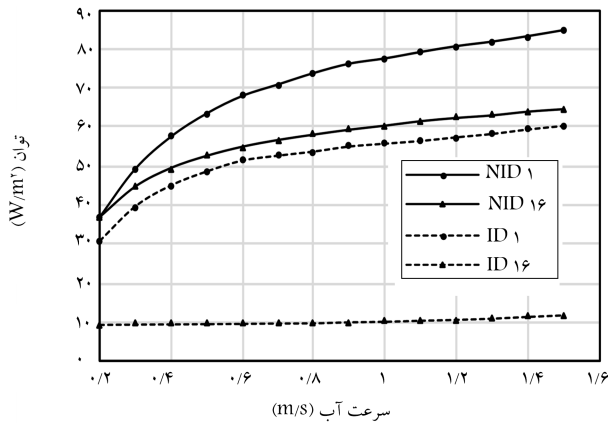
شکل ۹. توان خروجی بر حسب فاصله‌ی لوله‌ها از داخل تونل.

لوله‌های مبادله‌گر و بتن پوشش اطراف آن‌ها، هیچ‌گونه تبادل حرارتی با محیط داخل تونل نداشته باشند.

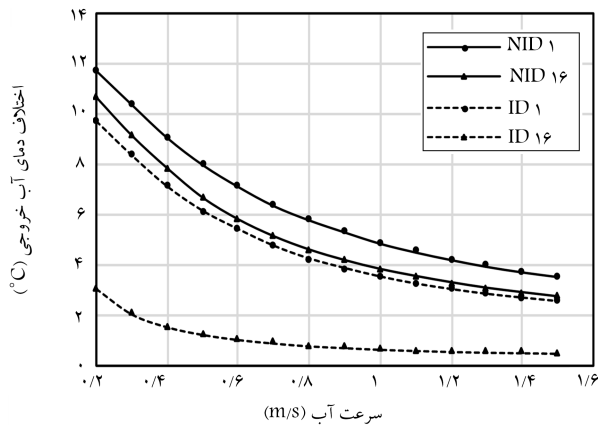
۱.۴. اثر جایگیری لوله‌ها داخل پوشش تونل

مطابق شکل ۸، لوله می‌تواند وابسته به ضخامت پوشش در فواصل مختلفی از داخل تونل قرار بگیرد. بنابراین با انجام یک مجموعه تحلیل به ازاء فواصل مختلف قرارگیری لوله، اثر آن در میزان انرژی استخراجی از تونل ارزیابی شده است. در مجموعه تحلیل‌های ذکر شده، فاصله‌ی لوله از داخل تونل بین بازه‌ی ۲ تا ۳۸ سانتی‌متر با نمونه‌های ۴ سانتی‌متری تغییر کرده و نتایج آن در شکل ۹ ارائه شده است.

مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که در شرایط غیرعادی، هر چقدر لوله‌ها از محیط داخلی تونل دورتر قرار گرفته‌اند و با توجه به اینکه مقدار بتن بین لوله و محیط داخلی با دمای ۱۸/۹۶ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرده است، مقاومت حرارتی R'_{bt} افزایش و توان به دست آمده کاهش یافته است. مقاومت حرارتی R'_{bt} طبق رابطه‌ی ۱۱، نسبت بین ضرایب رسانش حرارتی خاک و بتن، شعاع بتن و لوله و فاصله‌ی بین ورودی و خروجی لوله‌هاست که میزان سهولت تبادل گرمایی از نوع رسانشی را در یک مجموعه‌ی ژئوترمال تعیین می‌کند. در شرایط عادی، لوله‌ها فقط با خاک اطراف می‌توانند تبادل انرژی داشته باشند. بنابراین نسبت به شرایط غیرعادی که لوله‌ها هم با خاک اطراف و هم با محیط داخل تونل تبادل حرارت دارند، توان انرژی دریافتی کمتر است. در روز یکم، به دلیل فاصله گرفتن لوله‌ها از داخل تونل و با توجه به رابطه‌ی ۱۱، ضخامت (شعاع) بتن اطراف لوله‌ها کمتر شده و R'_{bt}



شکل ۱۳. توان خروجی بر حسب سرعت آب درون لوله‌ها.



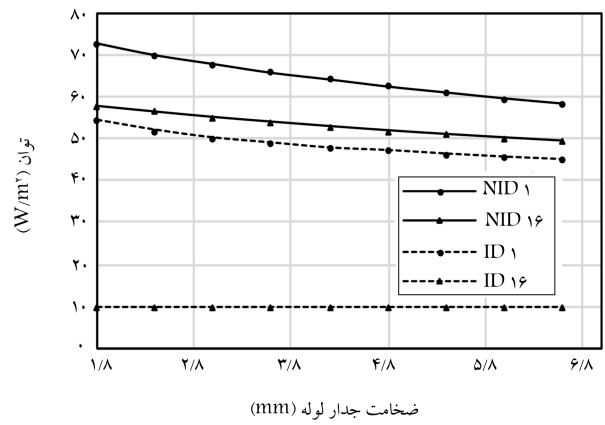
شکل ۱۴. اختلاف دمای آب خروجی بر حسب سرعت آب درون لوله‌ها.

شرایط غیرعایق روزهای یکم و شانزدهم و شرایط عایق روز یکم، تا سرعت ۷/۰ متر بر ثانیه با شیب غیرخطی افزایش یافته است. سپس شیب تغییرات توان خروجی برای سرعت‌های بالاتر، خطی شده است. علت مشاهده این رفتار آن است که با افزایش سرعت در لوله، دبی جریان افزایش یافته و موجب کاهش فرصت سیال برای تبادل حرارتی شده است. در نتیجه مطابق شکل ۱۴، اختلاف دمای خروجی از لوله کاهش یافته است. اما با توجه به رابطه ۹ که در آن پارامتر دبی تأثیر دارد، افزایش دبی جریان موجب افزایش توان خروجی از لوله به نحوی می‌شود که آثار کاهش دمای آب خروجی را جبران می‌کند. البته باید توجه کرد همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، تفاوت زیاد اختلاف دمای خروجی مورد عایق روز شانزدهم با سایر موارد، موجب داشتن توان انرژی خروجی بسیار کمتری نسبت به سایر موارد در شکل ۱۳ شده است. در مورد عایق روز شانزدهم، به دلیل اتمام توان خاک و بتن برای تبادل انرژی با لوله، شیب نمودار ثابت شده و افزایش اندکی را نشان داده است. در این مورد توان انرژی خروجی بسیار کمتر از موارد دیگر بوده است.

۵.۴. اثر ضریب رسانش حرارتی خاک

مطابق شکل ۱۵، تأثیر ضریب رسانش حرارتی خاک (λ) در میزان توان خروجی ارزیابی شده است. براساس مطالعات نیکفرووا^{۲۵} و همکاران (۲۰۱۳)، بازه تغییرات ضریب رسانش حرارتی خاک از مقدار ۵/۰ تا ۳ وات بر متر درجه‌ی کلون در نظر گرفته شده است.^[۲۰]

براساس نتایج به دست آمده، با افزایش ضریب رسانش حرارتی خاک، تبادل



شکل ۱۲. توان خروجی بر حسب ضخامت جداره‌ی لوله.

عدد ثابت پرانتل^{۲۴} وابسته است. افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت و در نتیجه، افزایش ناگهانی شار حرارتی مبادله شده در واحد طول لوله \dot{Q}_{wall} می‌شود. همچنین مطابق شکل ۱۱، افت ناگهانی توان خروجی در قطرهای کم به همین علت است.^[۱۹]

$$Nu = 0.723 R^{0.8} P_r^{-0.4} \quad (15)$$

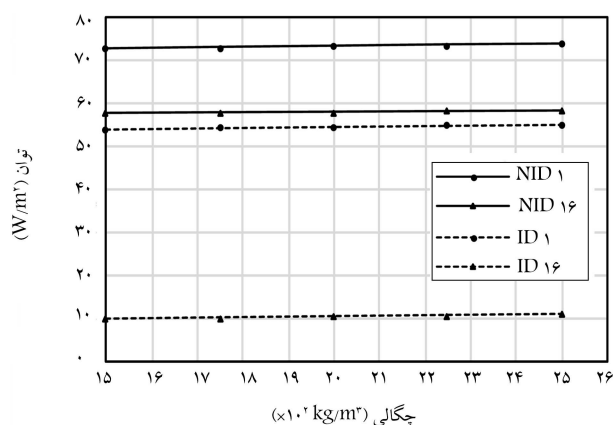
در ادامه و در قطرهای بزرگ‌تر (بزرگ‌تر از ۱۲ میلی‌متر)، افزایش سطح تماس لوله‌ها با توده‌ی خاک و پوشش بتنی در مقدار توان خروجی از لوله‌ها اثرگذار است و نمودار با شیب کمی به‌طور خطی افزایش می‌یابد. همواره انرژی دریافت شده در روز اول از روز شانزدهم بیشتر است.

۳.۴. اثر ضخامت جدار لوله‌ها

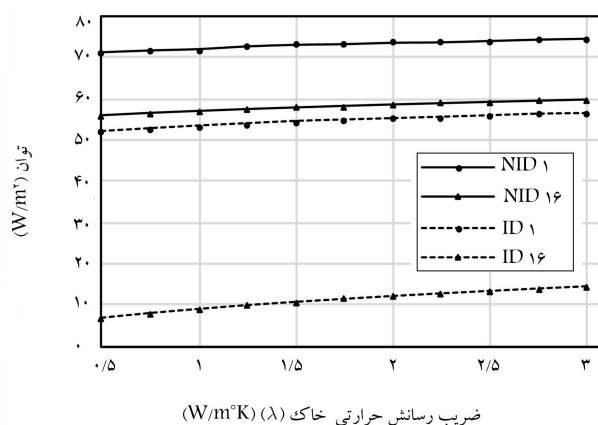
با توجه به شکل ۱۲، برای بررسی اثر ضخامت جدار لوله‌ها، مقادیر مختلفی از پارامتر مذکور در بازه ۱/۸ تا ۶/۶ میلی‌متر بررسی شده است. مشاهده می‌شود که توان خروجی از لوله با افزایش ضخامت جدار لوله، در شرایط غیرعایق در روزهای یکم و شانزدهم و همچنین شرایط عایق روز یکم کاهش یافته است. در روز شانزدهم شرایط عایق، تغییرات ناچیز بوده است، چرا که به دلیل هم‌دم شدن خاک و بتن اطراف با لوله، تبادل حرارتی صورت نگرفته و در نتیجه، شیب نمودار ثابت شده است. همچنین توان به دست آمده در این مورد، بسیار کمتر از موارد دیگر است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، موارد غیرعایق به دلیل امکان تبادل انرژی به‌صورت هم‌زمان با محیط داخلی تونل و خاک اطراف، توان خروجی بیشتری نسبت به موارد عایق دارند. از علل دیگر مشاهده‌ی نتایج ذکر شده آن است که در رابطه‌ی ۶، با افزایش ضخامت جدار لوله، مقدار $(\frac{T_{exit}}{T_{int}})$ افزایش و در نتیجه مقدار U کاهش می‌یابد. از این رو شار حرارتی مبادله شده در واحد طول لوله \dot{Q}_{wall} نیز کاهش می‌یابد که به کاهش توان انرژی خروجی از لوله منتج می‌شود.

۴.۴. اثر سرعت آب درون لوله‌ها

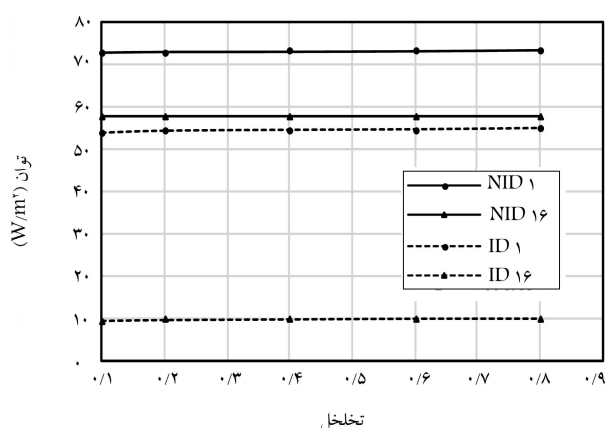
با توجه به آنکه سرعت آب درون لوله، میزان دبی خروجی و فرصت آب را برای تبادل حرارتی با محیط اطراف تعیین می‌کند، می‌تواند آثار چشمگیری در توان انرژی خروجی داشته باشد. از این رو مطابق شکل ۱۳، مقادیر مختلفی از بازه ۰/۲ تا ۱/۵ متر بر ثانیه برای سرعت جریان آب درون لوله‌ها با قطر لوله‌ی ۲۰ میلی‌متر ارزیابی شده است. توان خروجی از لوله‌ها با افزایش سرعت آب درون لوله، در



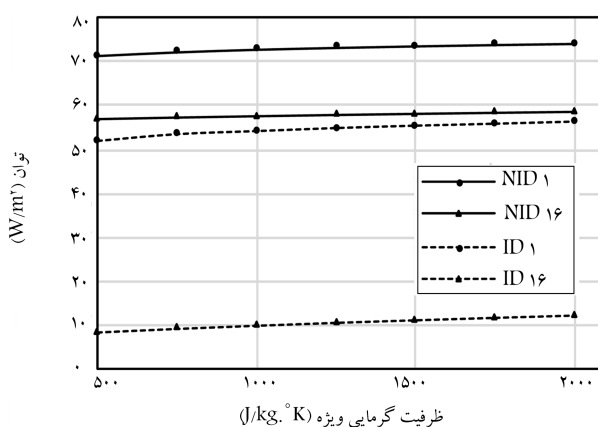
شکل ۱۷. توان خروجی بر حسب چگالی خاک.



شکل ۱۵. توان خروجی بر حسب ضریب رسانش حرارتی خاک.



شکل ۱۸. توان خروجی بر حسب تخلخل خاک.



شکل ۱۶. توان خروجی بر حسب ظرفیت گرمایی ویژه خاک.

فاصله‌ی بین ورودی و خروجی لوله‌ها تغییر نیافته است. در نتیجه، با افزایش ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک، نرخ تغییرات دمای خاک کاهش می‌یابد که موجب افزایش دمای خروجی از لوله (T_{fo}) می‌شود. البته باید توجه داشت که این مسئله موجب افزایش ناچیز توان به‌دست‌آمده می‌شود و در واقع ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک، اثر کمی در توان به‌دست آمده دارد.

۷.۴. اثر چگالی خاک

با توجه به شکل ۱۷، برای بررسی تأثیر چگالی خاک در میزان توان خروجی، بازه‌ی تغییرات چگالی خاک از مقدار ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که چگالی تأثیر چندانی در توان خروجی از لوله‌ها ندارند و در تمام موارد شکل ۱۷، شیب نمودار تقریباً صفر است.

۸.۴. اثر تخلخل خاک

برای بررسی اثر تغییر تخلخل خاک در توان به‌دست‌آمده از لوله‌ها، یک تونل قرار گرفته در خاک با تخلخل‌های مختلف از ۰/۱ تا ۰/۸ با گام‌های ۰/۲ مدل‌سازی شده است که نتایج آن در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که مطابق آن، با افزایش تخلخل، توان خروجی افزایش یافته است. تغییرات تخلخل در تحلیل‌هایی که در آثار دما بر خاک صورت می‌گیرد، علاوه بر اثر روی چگالی خاک، ضریب رسانایی حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک را مطابق با روابط ۲ و ۳، تحت تأثیر قرار می‌دهد. پس

حرارتی بین خاک، بتن و آب موجود در لوله‌های مبادله‌گر، افزایش یافته است. از آنجا که افزایش ضریب رسانش حرارتی خاک، مقاومت حرارتی بین لوله‌ها و محیط اطراف (R'_{bt}) را کاهش می‌دهد، در نتیجه انرژی و حرارت با سرعت بیشتری مبادله شده است. آنگاه دمای آب خروجی افزایش می‌یابد و توان انرژی قابل استحصال بیشتر می‌شود. مقدار انرژی دریافت شده در موارد غیرعایق به علت دریافت انرژی از محیط داخلی تونل، علاوه بر محیط اطراف (بتن و خاک)، بیشتر از موارد عایق است. انرژی دریافت شده در روز اول در هر دو مورد عایق و غیرعایق بیشتر از روز شانزدهم است، چرا که با گذشت زمان و مبادله‌ی حرارتی با پمپ حرارتی، انرژی کمتری در توده‌ی خاک و بتن باقی می‌ماند.

۹.۴. اثر ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک

بر اساس مطالعات حمدان و کلارک^{۲۶} (۲۰۱۰)، اثر ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک (C_p) در میزان توان خروجی، مقادیر مختلفی برای ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک از مقدار ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ ژول بر کیلوگرم درجه کلوین در نظر گرفته شده است.^[۲۱] مطابق با شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک، توان به‌دست‌آمده افزایش ناچیزی داشته است، که علت افزایش مذکور آن است که با افزایش ظرفیت گرمایی ویژه‌ی خاک، دمای خاک (T_s) دیرتر کاهش می‌یابد و خاک دمای خود را در مدت زمان بیشتری حفظ می‌کند. با توجه به رابطه‌ی ۱۳، چون مقاومت حرارتی محیط اطراف لوله (بتن و خاک - R'_{bt}) ثابت می‌ماند، ضرایب رسانش حرارتی خاک و بتن و همچنین شعاع لوله‌ها و ضخامت بتن پوشش و نیز

تبادل حرارتی خاک و بتن اطراف، بیش از روز شانزدهم است. اما شیب نمودار روز شانزدهم بیش از نمودار روز یکم است که نشان می‌دهد در بلندمدت، میزان توان خروجی بسیار وابسته به دمای هوای داخل تونل است و با افزایش دمای داخل تونل، میزان تأثیرگذاری ظرفیت تبادل حرارتی خاک و بتن اطراف نسبت به اثر دمای داخل تونل در میزان توان خروجی کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تونل انرژی موجود در پژوهش کازین و همکاران (۲۰۱۹) که مدل‌سازی عددی پروژه بهسازی و ساخت Grand Paris Express در شهر پاریس در فرانسه بوده است، شبیه‌سازی شده است. نرم‌افزار استفاده شده، نرم‌افزار COMSOL Multiphysics V5، ۵ بوده است، که به روش المان محدود در فضای سه‌بعدی و با فرمولاسیون ترموهیدرولیک همبسته، روشی برای بررسی میزان انرژی دریافتی از تونل‌های مبادله‌گر حرارتی ارائه شده است. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، اثر پارامترهای مختلف مدل، اعم از خصوصیات مصالح و ویژگی‌های هندسی مدل ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده را می‌توان در سه دسته‌ی کلی طبقه‌بندی کرد:

الف) تغییرات توان انرژی خروجی در تحلیل پارامترهایی که به مشخصات لوله‌ها مربوط می‌شوند، مانند: ضخامت جدار لوله، سرعت آب درون لوله و قطر لوله، به نسبت زیادی به مقادیر آن‌ها وابسته است. به عبارت دیگر، هر نوع تغییر در مشخصات لوله‌ها باعث تغییرات زیادی در توان انرژی خروجی می‌شود.

ب) در تحلیل پارامترهایی که به مشخصات خاک اطراف مربوط می‌شوند، مانند: ضریب رسانش حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی و تخلخل خاک مشاهده شد که توان انرژی خروجی از لوله‌ها به مقدار ناچیزی به پارامترهای مذکور وابسته است؛ و به عبارت دیگر، تغییرات ایجادشده در مشخصات خاک اطراف هر چند هم زیاد باشد، توان انرژی خروجی به مقدار ناچیزی تغییر می‌کند.

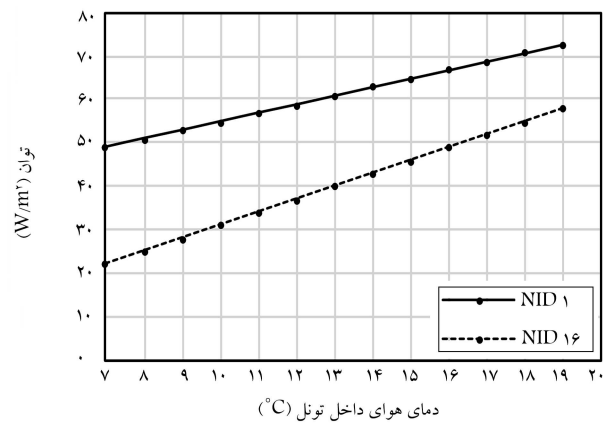
پ) در نهایت، تغییر پارامترهای مربوط به محیط داخلی تونل، مانند: دمای هوای داخل تونل و فاصله‌ی لوله‌ها از محیط داخل تونل بررسی و مشخص شد که در حالت غیرعایق، توان انرژی خروجی مانند دسته‌ی الف، بسیار وابسته به تغییر مشخصات مربوط به محیط داخلی تونل است، اما در حالت عایق شرایط محیط داخلی تونل در توان انرژی خروجی تأثیری ندارد.

براساس نتایج به دست آمده، دورتارکلی در تونل‌های مبادله‌گر حرارتی مشاهده شده است:

۱. تحت تأثیر عملیات مستمر استخراج انرژی، در روزهای پایانی، اختلاف دمای کمتری بین خاک و بتن با لوله‌ی مبادله‌گر حرارتی وجود داشته است. در نتیجه، همواره انرژی دریافت شده در روز اول، از روز شانزدهم بیشتر بوده است.
۲. با توجه به اینکه در موارد عایق، لوله‌ها فقط با خاک اطراف می‌توانند تبادل انرژی داشته باشند، توان انرژی خروجی نسبت به حالت غیرعایق، که لوله‌ها هم با خاک اطراف و هم با محیط داخل تونل تبادل حرارت دارند، کمتر بوده است.

پانویس‌ها

1. geothermal energy



شکل ۱۹. توان خروجی برحسب دمای هوای داخل تونل.

در بخش حاضر تلاش شده است که با در نظر گرفتن اثر تخلخل در هر سه پارامتر مذکور، برآیند اثر تخلخل در میزان انرژی قابل دریافت از تونل بررسی شود. با توجه به اینکه فرض شده است خاک در شرایط اشباع قرارگیرد، پس توده‌ی خاک متشکل از ذرات جامد خاک و آب بوده و از وجود هوا در آن صرف نظر شده است. با توجه به رابطه‌ی ۲، با افزایش تخلخل، مشارکت خاک در مقدار ضریب رسانشی میانگین توده‌ی خاک کاهش می‌یابد. از آنجایی که مقدار ضریب رسانش حرارتی خاک از آب ($1/25 W/m \cdot K$ در مقایسه با $0.57 W/m \cdot K$) بیشتر بوده است، این کاهش مشارکت خاک موجب کاهش مقدار ضریب رسانشی توده‌ی خاک شده است. بنابراین مطابق شکل ۱۵، انتظار می‌رود که کاهش رسانش حرارتی منجر به کاهش توان خروجی شود. براساس رابطه‌ی ۳، با افزایش تخلخل، سهم آب در توده‌ی خاک افزایش می‌یابد و از آنجایی که ظرفیت گرمایی ویژه آب بسیار بیشتر از خاک ($4200 J/kg \cdot K$ در برابر $1000 J/kg \cdot K$) است، با افزایش تخلخل، ظرفیت گرمایی ویژه توده‌ی خاک افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۶، افزایش ظرفیت گرمایی ویژه موجب افزایش توان خروجی شده است، بنابراین آثار کاهشی حاصل از کاهش ضریب رسانش حرارتی توده‌ی خاک در توان خروجی، با آثار افزایشی ظرفیت گرمایی ویژه آن جبران و حتی تقویت شده است. البته میزان افزایش مذکور اندک بوده است.

۹.۴. اثر دمای هوای داخل تونل

با توجه به شکل ۱۹، برای بررسی تأثیر دمای هوای داخل تونل در میزان توان خروجی، بازه‌ی تغییرات دمای محیط داخل تونل از مقدار ۷ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. با فرض غیرعایق بودن پوشش تونل نسبت به هوای داخل تونل، بین دو ناحیه‌ی مذکور، تبادل همرفتی مطابق با رابطه‌ی ۸ به صورت خطی رخ می‌دهد. این امکان تبادل همرفتی موجب افزایش توان خروجی در مقایسه با شرایط عایق می‌شود. این رفتار در تمامی تحلیل پارامترهای مختلف مشاهده شده است. از طرفی مطابق شکل ۱۹، میزان توان خروجی در روز یکم به ازاء دماهای مختلف هوای تونل، بیشتر از روز شانزدهم بوده است. چون در روز یکم، ظرفیت

2. geostructure
3. tunnel lining
4. Brandl

5. Siyuan
6. ground source heat pump (GSHP)
7. Baralis
8. Franzius
9. Segmental-Tunnels
10. Lee
11. Energy-Textile
12. Barla
13. Enertun
14. Cousin
15. Nusselt number
16. Lamarche
17. Hellstrom
18. Energy Borehole
19. Parametric study
20. Loamy sand
21. Kodesova
22. Abu-Hamdeh and Reeder
23. Reynolds number
24. Prandtl number
25. Nikiforova
26. Hamdhan & Clarke

منابع (References)

1. Kiani Fordouei, M.A. "Numerical investigation of temperature effect on bearing capacity and consolidation settlement of energy piles in saturated fine grained soils", M.s. Thesis, Faculty of Engineering, The University of Qom, Qom, 195 p., (In Persian) (Summer, 2016).
2. Adam, D. and Markiewicz, R. "Energy from earth-coupled structures, Foundations Tunnels and Sewers", *Geotechnique*, **59**(3), pp. 229-236 (2009).
3. Insana, A. and Barla, M. "Experimental and numerical investigations on the energy performance of an thermo-active tunnel", *Renewable Energy*, **152**, pp 781-792 (2020).
4. Brandl, H. "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, **56**(2), pp 81-122 (2006).
5. Wu, S., Dai, Y., Li, X. and et al. "A review of ground-source heat pump systems with heat pipes for energy efficiency in buildings", *Energy Procedia*, **152**, pp. 413-418 (2018).
6. Baralis, M., Barla, M., Bogusz, W. and Di, L. "Geothermal potential of the NE extension Warsaw (Poland) metro tunnels", *Environmental Geotechnics*, **7**(4), pp. 282-294 (2020).
7. Franzius, J.N. and Pralle, N. "Turning segmental tunnels into sources of renewable energy", *Civil Engineering*, **164**(1), pp. 35-40 (2011).
8. Lee, Ch., Park, S., Won, J. and Jeoung, J. "Evaluation of thermal performance of energy textile installed in Tunnel", *Renewable Energy*, **42**, pp. 11-22 (2012).
9. Barla, M. and Di Donna, A. "Energy tunnels: Concept and design aspects", *Underground Space*, **3**(4), pp. 268-276 (2018).
10. Geimer, C. "Metro tunnels enable geothermal-air conditioning", BINE information service, FIZ Karlsruhe-Leibniz Institute for Information Infrastructure, Germany (2013).
11. Tinti, F., Boldini, D., Ferrari, M. and et al. "Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **70**, pp. 182-203 (2017).
12. Moormann, C., Buhmann, P., Friedmann, W. and et al. "International experience with renewable energy concepts in tunnelling", *Tunnel Geothermics*, **9**(5), pp. 467-480 (2016).
13. Cousin, B., Rotta Loria, A.F., Bourget, A. and et al. "Energy performance and economic feasibility of energy segmental linings for subway tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **91**, 102997 (2019).
14. Lamarche, L., Kajl, S. and Beauchamp, B. "A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems", *Geothermics*, **39**(2), pp. 187-200 (2010).
15. Hellstrom, G. "Ground heat storage; Thermal analysis of duct storage systems", Doctoral Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Lund, Sweden, 310 p. (1991).
16. KODESoVA Radka, and et al. "Thermal Properties of Representative Soils of the Czech Republic", *Soil & Water Res*, **8**, pp. 141-150 (2013).
17. Abu-Hamdeh, N.H. and Reeder, R.C. "Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter", *Soil Sci. Soc. Am. J*, **64**(4), pp. 1285-1290 (2000).
18. DIN 8074, "Pipes of high-density polyethylene (High-Density PE)", Deutsches Institut für Normung, pp. 99-105 (2011).
19. Bergman, L.Th. and et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition, John Wiley & Sons (2011).
20. Nikiforova, T., Savytskyi, M., Limam, K. and et al. "Methods and results of experimental researches of thermal conductivity of soils", *Energy Procedia*, **42**, pp. 775-783 (2013).
21. Indra Noer, H. and Clarke, B. "Determination of thermal conductivity of coarse and fine sand soils", Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia (2010).