

# مدلسازی عددی و بررسی تاثیر جریان آب زیرزمینی سطحی و همرفت طبیعی بر توان

## خروجی شمع انرژی

سید ماکان فتاحیان<sup>۱</sup>، محمدحسین صبحدم<sup>۲</sup>، محمدمهدی احمدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

### چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر بخصوص انرژی زمین گرمایی کم عمق برای گرمایش و سرمایش مکان‌های مختلف در فصل‌های گرم و سرد سال بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. از این رو بررسی عوامل طبیعی تاثیرگذار بر کارایی این سیستم، به ویژه جریان آب زیرزمینی دارای اهمیت خاصی است به نحوی که مشخص شده‌است وجود جریان آب زیرزمینی به طور قابل توجهی باعث بهبود عملکرد سیستم انرژی زمین گرمایی کم عمق می‌شود. اما بررسی عملکرد این سیستم تحت تاثیر جریان آب زیرزمینی همواره با خطاهایی روبرو بوده است که به آن کمتر پرداخته شده‌است. در این پژوهش، یک شمع انرژی با در نظر گرفتن جریان آب زیرزمینی سطحی و اثر همرفت طبیعی توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics و روش عددی اجزا محدود، در شرایطی که دمای سطح زمین و سیال ورودی به لوله ثابت است، در یک بازه ۹۰ روزه و با لوله گذاری U شکل مدلسازی شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که جریان آب زیرزمینی سطحی می‌تواند به علت اختلاف دمای قابل توجه بین سطح و عمق زمین باشد بطور کل تحت تاثیر جریان همرفت طبیعی قرار گیرد که باعث انتقال دمای سطح زمین به درون دامنه خاکی شود و این موضوع باعث کاهش قابل توجه توان خروجی سیستم در فصول سرد و گرم سال به ترتیب به میزان تقریبی ۲۷ و ۱۰ درصد می‌گردد. همچنین نحوه تغییرات دما در داخل توده خاکی تحت تاثیر جریان همرفت طبیعی در فصل گرم به صورت یکنواخت در عمق و فصل‌های سرد بصورت نامنظم می‌باشد.

### کلید واژه‌ها

انرژی زمین گرمایی، جریان آب زیرزمینی، شمع انرژی، همرفت طبیعی، مدلسازی عددی

انرژی عنصری حیاتی در جوامع مدرن امروزی است. در دهه‌های گذشته، افزایش جمعیت و نیاز به تولید بیشتر برای تامین نیازهای مردم باعث افزایش مصرف انرژی در جهان و در نتیجه آن انتشار روزافزون گاز CO<sub>2</sub> در محیط پیرامون گشته است. از این رو در سالیان اخیر استفاده و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار مورد توجه بوده است [۱]. انرژی زمین گرمایی کم عمق به یکی از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر مهم در سراسر دنیا تبدیل شده است. به طوری که این انرژی پایدار بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ رشد سالانه قابل توجه ۱۶/۶٪ را داشته است [۲]. یکی از علت‌های استقبال از این انرژی در سرتاسر جهان آن است که نه تنها استفاده از آن موجب کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، بلکه برای گرمایش و سرمایش خانه‌ها و ساختمان‌ها نیز قابل استفاده است. برای استخراج این انرژی از داخل زمین از مبدل‌های<sup>۱</sup> و پمپ‌های<sup>۲</sup> زمین گرمایی استفاده می‌شود که به مجموع آن‌ها ژئوسازهای انرژی اطلاق می‌گردد. از جمله این ژئوسازهای انرژی می‌توان به چاه‌های زمین گرمایی، دیوار انرژی، تونل انرژی، شمع و گروه شمع‌های انرژی اشاره کرد [۳ و ۴]. در بین موارد ذکر شده، شمع‌های انرژی به علت داشتن قابلیت انجام همزمان عملکرد سازه‌ای و تامین انرژی محبوبیت بیشتری دارند [۲]. با این وجود استاندارد جامعی که بتواند تعاملات پیچیده بین رفتارهای حرارتی و مکانیکی شمع‌های انرژی را در نظر بگیرد، در حال حاضر در دسترس نیست، از این رو طراحی شمع‌های انرژی بیشتر بر اساس معادلات تجربی انجام می‌شود [۱۰].

در سال ۲۰۰۱ اولین پروژه شمع انرژی در ساختمان ۶ طبقه‌ی دانشکده کبل<sup>۳</sup> دانشگاه آکسفورد اجرا شد [۵]. از دیگر نمونه‌های ساخته شده آن می‌توان به ترمینال E فرودگاه زوریخ [۶] و دانشگاه پلی تکنیک فدرال لوزان سوییس [۷] اشاره کرد. مطابق شکل ۱ اجزای یک شمع انرژی شامل: شمع بتنی، شبکه آرماتور و لوله‌های مبادله‌گر حرارتی می‌باشد. آرماتور شمع در کنار نقش سازه‌ای، جهت ثابت نگه داشتن لوله‌های مبادله‌گر حرارتی در حین بتن ریزی نیز استفاده می‌گردد [۸]. سیستم‌های زمین گرمایی، به دلیل ثابت بودن دمای زمین در ماه‌های مختلف، دارای ضریب عملکرد<sup>۴</sup> ۴ تا ۵ می‌باشند که از ضریب عملکرد سیستم‌های پمپ حرارتی منبع هوا<sup>۵</sup> بالاتر است [۹ و ۱۰]. لازم به ذکر است که بیشترین هزینه برای ساخت و اجرای شمع‌های انرژی مربوط به حفاری زمین می‌باشد [۵]. در فرودگاه زوریخ مشاهده شد که هزینه تمام شده برای هر کیلووات ساعت انرژی استخراج شده از سیستم زمین گرمایی ۶ سنت می‌باشد در حالی که سایر سیستم‌های گرمایشی-سرمایشی معمول بطور میانگین ۸ cents/kWh هزینه دارند که در نتیجه این موضوع بازگشت سرمایه اولیه پس از ۸ رخ داد [۶]. با این وجود در ایران به علت پایین بودن قیمت سوخت‌های فسیلی و عدم شناخت کافی نسبت به این انرژی پاک و تجدید پذیر، چندان مورد استقبال قرار نگرفته است [۱۰].

مطالعات تجربی، آزمایشگاهی و عددی مختلفی برای بررسی عملکرد و بازدهی شمع انرژی، با فرضیات مختلف در ادبیات فنی موجود است که در جدول ۱ به برخی از آن‌ها اشاره شده است. به عنوان مثال جهت مدلسازی یک شمع انرژی به روش تحلیلی، در ابتدا از روشی با نام خط منبع<sup>۶</sup> استفاده می‌شد که در آن لوله مبدل حرارتی به عنوان یک منبع حرارت خطی با نرخ خروجی حرارت ثابت در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. سپس روش خط منبع محدود<sup>۷</sup> مطرح شد که طول مدل حرارتی را ثابت در نظر می‌گرفت [۱۲]. در ادامه برای مدلسازی جریان آب زیرزمینی در یک زمین همگن و با کمک تابع گرین<sup>۸</sup>، مدل تحلیلی منبع خط محدود متحرک<sup>۹</sup> ابداع گردید [۱۳]. از طرف دیگر برای بدست آوردن خصوصیات حرارتی زمین از روش تجربی صحرائی<sup>۱۰</sup> آزمون پاسخ حرارتی<sup>۱۰</sup> استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup> Ground Heat Exchanger (GHE)

<sup>۲</sup> Ground Source Heat Pump (GSHP)

<sup>۳</sup> Keble college

<sup>۴</sup> The Coefficient of Performance (COP)

<sup>۵</sup> Air Source Heat Pump systems (ASHPs)

<sup>۶</sup> The Line Source (LS)

<sup>۷</sup> The Finite Line Source (FLS)

<sup>۸</sup> Green's Function

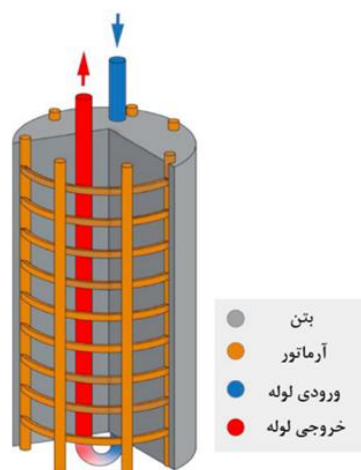
<sup>۹</sup> Moving Finite Line Source

(MFLS)

<sup>۱۰</sup> Thermal Response Test (TRT)



(ب)



(الف)

شکل ۱- الف) شکل شماتیک پیکربندی شمع انرژی [۱۰] ب) نصب لوله پلی اتیلن بر روی قفسه آرماتور شمع [۳۷]

Figure 1- a) Schematic of energy pile configuration [10] b) Installation of HDPE pipe on pile reinforcement [37]

بررسی فرایند انتقال حرارت در شمع‌های انرژی شامل بخش‌های مختلفی از جمله انتقال حرارت در سیال داخل لوله، تبادل حرارت بین شمع و لوله، خاک و شمع و انتقال حرارت داخل خاک می‌باشد. علاوه بر این انتقال حرارت توسط آب موجود بین منافذ خاک و پدیده تراوش آب در خاک با در نظر گرفتن خصوصیات ژئوتکنیکی و هیدرولوژی دامنه خاکی باید مورد توجه قرار گیرند زیرا نقش بسزایی در انتقال حرارت در محیط‌های خاکی دارند [۱۴]. در نظر نگرفتن تاثیرات جریان آب زیرزمینی در طراحی شمع‌های زمین گرمایی می‌تواند باعث خطاهای قابل توجه‌ای گردد به همین دلیل در طراحی یک پمپ حرارتی زمین گرمایی باید نرخ تغییرات سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی در نظر گرفته شود [۱۵]. به عنوان مثال، در یک کار تجربی در یک ساختمان ۳ طبقه در انگلستان که برای گرمایش و سرمایش از شمع انرژی استفاده شده بود، مشاهده شد که در طول فصل تابستان دمای سیال خروجی از لوله به طور قابل توجهی از دمای پیشبینی شده کمتر است که علت اصلی آن عدم توجه به جریان آب زیرزمینی داخل خاک بوده است [۱۶]. از دیگر مواردی که وجود جریان آب زیرزمینی منجر به ایجاد خطا در مدل‌سازی می‌شود، آزمون پاسخ حرارتی است به نحوی که با آزمون‌های معمول نمی‌توان نتایج دقیقی را برای خصوصیات حرارتی خاک محاسبه کرد. استفاده از روش‌های عددی مختلفی نیز برای بهبود و پیش بینی دقیق‌تر عملکرد آزمون پاسخ حرارتی پیشنهاد شده است اما آن‌ها نیز در سرعت‌های بالای جریان آب زیرزمینی خطا دارند [۱۷]. همچنین پیشرفت‌های نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی خواص حرارتی و هیدرولیکی خاک با بهره‌گیری از استنباط بیزی<sup>۱</sup> و روش‌های محاسباتی کارآمد انجام شده است. اما با این وجود ضروری است تحقیقات بیشتر برای کاهش خطاها انجام شود [۱۸]. از این رو بررسی جریان آب زیرزمینی در تعامل با شمع و دیگر سازه‌های زمین گرمایی بسیار مورد توجه محققان می‌باشد.

تراوش در خاک به سه صورت جریان همرفت طبیعی<sup>۲</sup>، همرفت اجباری<sup>۳</sup> و همرفت ترکیبی<sup>۴</sup> رخ می‌دهد. جریان همرفت طبیعی به علت تغییر دما در محیط خاکی و در نتیجه آن تغییر چگالی سیال درون خاک ایجاد می‌شود. جریان همرفت اجباری به علت تفاوت در هد کل بین نقاط مختلف زمین اتفاق می‌افتد و همرفت ترکیبی به رخ دادن همزمان هر دو مدل همرفت اطلاق میگردد [۱۹]. میرتیمزدوست و همکاران [۲۰] مطالعه‌ای را در مورد تأثیر جریان همرفت در خاک انجام دادند و رابطه‌ای را برای تعیین کمیت اثرات آن پیشنهاد کردند. همچنین اثرات جریان آب زیرزمینی را می‌توان با توجه به جهت، تراز ارتفاعی و سرعت آن مورد بررسی قرار داد. به

<sup>۱</sup> Bayesian Inference

<sup>۲</sup> Forced Convection

<sup>۳</sup> Natural Convection

<sup>۴</sup> Mixed Convection

عنوان مثال ژانگ و همکاران<sup>۱</sup> [۲۱] در یک مدل تحلیلی به کمک تابع گرین با مطالعه تراوش یک بعدی و دو بعدی اثر جهت گیری و سرعت آب زیرزمینی بر پاسخ دمایی شمع انرژی را بررسی کردند و اثر مثبت تراوش بر عملکرد حرارتی شمع انرژی را گزارش دادند. لو و همکاران<sup>۲</sup> [۲۲] با کمک آزمایش TRT نشان دادند که بالاتر بودن سطح تراز آب زیرزمینی موجب بهبود عملکرد تبادل حرارتی خاک می شود در مطالعه آن ها نشان داده شد که هدایت حرارتی موثر زمین هنگامی که سطح آب زیرزمینی در عمق ۱۰ متری است، حدوداً ۲۷/۵٪ بیشتر از حالتی است که سطح آب زیرزمینی در عمق ۳۵ متر قرار دارد. در پژوهشی دیگر یو و همکاران<sup>۳</sup> [۲۳] در یک مطالعه عددی آزمایشگاهی بیان داشتند که افزایش سرعت جریان آب زیر زمینی می تواند تاثیر مثبت قابل توجهی بر مبدل حرارتی گمانه ای<sup>۴</sup> داشته باشد. ژو و همکاران<sup>۵</sup> [۲۴] در یک مطالعه تحلیلی با استفاده از تابع گرین، اثرات جریان عمودی آب و همرفت سطحی را بر رفتار مبدل حرارتی گمانه ای بررسی کردند و دریافتند که انرژی حرارتی به دلیل وجود جریان آب عمودی به منطقه ای عمیق تر از انتهای گمانه منتقل می شود. همچنین با کاهش طول گمانه و افزایش سرعت آب زیرزمینی، همرفت سطحی تعیین کننده تر می شود

در یک مطالعه عددی سه بعدی با کمک نرم افزار COMSOL توسط گشتی و همکاران [۲۶]، با در نظر گرفتن اثر دمای سطح زمین مشخص شد که تاثیر مثبت جریان در طول زمستان بیشتر از تابستان است به طوری که توان خروجی در زمستان به میزان ۲۰٪ و در تابستان به میزان ۵٪ در مقایسه با شرایط نبود جریان آب زیر زمینی بهبود یافته است. لی و همکاران<sup>۶</sup> [۲۷] یک دستگاه آزمایشگاهی دولایه در مقیاس کوچک شامل ماسه و خاک رس که جریان آب زیرزمینی در قسمتی از خاک ماسه ای جریان داشت را طراحی کردند و نشان دادند که جریان آب زیرزمینی بار حرارتی را در داخل زمین توزیع می کند و بازیابی حرارتی بهتری را در زمین ایجاد می کند. تانگ و نوآموز<sup>۷</sup> [۲۹] در مطالعه عددی خود تاثیر عوامل مختلف را بر عملکرد مبدل های حرارتی کم عمق ارزیابی کردند. آن ها دریافتند که در سرعت بالای جریان آب زیرزمینی، ضریب عملکرد<sup>۸</sup> مبدل های حرارتی گمانه افزایش می یابد. ترکیب جریان همرفت اجباری و طبیعی مسئله مورد مطالعه سیجارتو و همکاران<sup>۹</sup> [۳۱] بود. آن ها با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مانند اختلاف دما بین کف و سطح مدل، شیب سطح آب، عمق مدل و ضریب ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی، اثر برهم کنش جریان آب همرفت طبیعی و اجباری را بر توزیع حرارت در حوضه های آب زیرزمینی مصنوعی توضیح دادند. همچنین مهرآیین و همکاران [۱۹] با مدل کردن یک منبع حرارتی عمودی در داخل خاک بیان کردند که جریان همرفت طبیعی در سرعت های پایین جریان همرفت اجباری، بر توزیع حرارت در اطراف مبدل حرارتی بسیار تاثیرگذار است و باعث کاهش دمای خاک در نزدیکی منبع گرما می شود.

نجفیان و همکاران<sup>۱۰</sup> [۳۲] تاثیر آب های زیرزمینی محصور نشده<sup>۱۱</sup> در هندسه شیب دار را بررسی کردند و نشان دادند که همرفت طبیعی در صورت وجود منبع حرارتی می تواند باعث افزایش دمای سطح زمین شود، که در شرایط محصور<sup>۱۲</sup> بارزتر است. لقواسمه و همکاران<sup>۱۳</sup> [۳۳] استدلال یافتند که حتی اگر بخش کوچکی از یک شمع انرژی در معرض جریان آب زیرزمینی قرار گیرد، تاثیر مثبت آن بر ضریب عملکرد شمع انرژی قابل توجه است. همچنین افزایش طول شمع غوطه ور باعث می شود که این ضریب عملکرد به طور قابل توجهی بهبود یابد. شایان ذکر است که نوسانات دما در دوره بهره برداری از شمع های انرژی می تواند رفتارهای مکانیکی جدیدی را در سطح مشترک بین شمع و خاک ایجاد کند و بر مقاومت نوک این شمع ها تاثیر بگذارد و موجب کاهش ظرفیت باربری گردد. این

<sup>۱</sup> Zhang

<sup>۲</sup> Luo

<sup>۳</sup> You

<sup>۴</sup> Borehole Heat Exchanger

<sup>۵</sup> Zhou

<sup>۶</sup> Li

<sup>۷</sup> Tang & Nowamooz

<sup>۸</sup> Coefficient of Performance (COP)

<sup>۹</sup> Szijártó

<sup>۱۰</sup> Najafian

<sup>۱۱</sup> Unconfined

<sup>۱۲</sup> Confined

<sup>۱۳</sup> Alqawasme

پدیده در گذشته و حال به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴ و ۳۵]. بر اساس این یافته‌ها، لو و همکاران<sup>۱</sup> [۳۶] توصیه کردند که جریان آب زیرزمینی هنگام طراحی شمعی‌های انرژی به دلیل نگرانی‌های ایمنی در نظر گرفته نشود. دلیل این موضوع آن است که جریان آب زیرزمینی به علت تخلیه حرارتی اطراف شمعی انرژی، می‌تواند باعث کاهش بارهای حرارتی-مکانیکی بر روی شمعی انرژی شود و ظرفیت باربری آن‌ها را افزایش دهد [۳۶ و ۳۷].

همانطور که مشاهده شد بررسی تاثیر جریان آب زیرزمینی بر روی رفتار شمعی‌های انرژی به علت نوظهور بودن آن همچنان مورد بحث و بررسی محققان می‌باشد تا بتوانند تحلیل‌های دقیق‌تری از این موضوع ارائه کنند. زمانی که جریان آب زیرزمینی در نزدیکی سطح زمین وجود دارد، در نظر گرفتن دمای سطح زمین و همرفت طبیعی بسیار حائز اهمیت می‌شود اما در اغلب مطالعات پیشین، یک یا هر دو مورد فوق در نظر گرفته نشده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی دقیق تاثیر جریان آب زیرزمینی سطحی بر رفتار و میزان انرژی استخراج شده از شمعی انرژی، با در نظر گرفتن هر دو عامل تاثیرگذار همرفت طبیعی و دمای سطح زمین با کمک روش عددی اجزا محدود<sup>۲</sup> است. شایان ذکر است که این مورد در مناطق نزدیک به سواحل رودخانه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها مشاهده شده و کاربرد دارد. همچنین جهت مدلسازی حرکت جریان آب زیرزمینی از معادله برینکمن<sup>۳</sup> استفاده شده است. در این پژوهش با توجه به در نظر گرفتن همزمان اثر همرفت طبیعی و دمای سطح زمین، نتایجی متفاوت از چیزی که از مطالعات پیشین انتظار می‌رفت حاصل شد. در ادامه پس از بیان تئوری و معادلات انتقال حرارت در یک سیستم شمعی انرژی، به بحث و بررسی موضوع فوق پرداخته خواهد شد.

**Table 1- Some recent studies about the effect of groundwater flow on the performance of energy geostructures**

جدول ۱- برخی از مطالعات اخیر انجام شده مرتبط با تاثیر جریان زیرزمینی بر عملکرد ژئوسازه‌های انرژی

نام محقق	سال	روش تحقیق	موضوع تحقیق
گشتی [۲۶]	۲۰۱۵	مدلسازی عددی	بررسی تاثیر جریان همرفت اجباری بر توان خروجی شمعی انرژی در تابستان و زمستان
ژانگ [۲۱]	۲۰۱۷	مدل تحلیلی	بررسی تراوش دو بعدی و اثر جهت‌گیری و سرعت جریان زیرزمینی بر عملکرد حرارتی شمعی انرژی
یو [۲۳]	۲۰۱۷	آزمایشگاهی	بررسی اثر جریان آب زیرزمینی بر عملکرد حرارتی شمعی انرژی
لو [۲۲]	۲۰۱۸	تجربی صحرایی	بررسی اثر تراز آب زیرزمینی بر نرخ تبادل حرارت مبدل حرارتی گمانه‌ای و آزمایش TRT در خاک لسی
تانگ [۲۹]	۲۰۱۹	مدلسازی عددی	بررسی اثر عوامل مختلف تاثیرگذار بر عملکرد مبدل حرارتی گمانه‌ای کم عمق
سیجارتو [۳۱]	۲۰۱۹	مدلسازی عددی	بررسی اثر برهم‌کنش جریان همرفت طبیعی و اجباری بر توزیع حرارتی بر حوضه آب زیرزمینی
لی [۲۷]	۲۰۲۰	آزمایشگاهی	بررسی نحوه توزیع بار حرارتی شمعی انرژی در اثر تراوش در خاک ماسه‌ای و رسی
میرتمیزدوست [۲۰]	۲۰۲۰	مدلسازی عددی	بررسی حرکت جرم و حرارت در محیط متخلخل شکل‌پذیر با استفاده از مدل حرارتی-هیدرولیکی-مکانیکی
ژو [۲۴]	۲۰۲۱	مدل تحلیلی	بررسی اثرات جریان عمودی آب و همرفت سطحی بر عملکرد مبدل حرارتی گمانه‌ای
دین [۲۸]	۲۰۲۱	مدلسازی عددی	بررسی اثر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی بر عملکرد مبدل حرارتی افقی در عمق کم زمین
مهرآیین [۱۹]	۲۰۲۲	مدلسازی عددی	بررسی اثر جریان همرفت طبیعی بر توزیع حرارت در اطراف شمعی انرژی در سرعت‌های کم همرفت اجباری
ژونگ [۳۰]	۲۰۲۳	مدلسازی عددی	بررسی عملکرد حرارتی دیوار انرژی و اثر تراوش و همرفت طبیعی بر مشخصات حرارتی-هیدرولیکی خاک
نجفیان [۳۲]	۲۰۲۴	مدلسازی عددی	بررسی اثر همرفت طبیعی بر تبادل حرارت در خاک‌های اشباع تحت جریان زیرزمینی محصور نشده
لقوامسه [۳۳]	۲۰۲۴	مدلسازی عددی	بررسی اثر لایه‌بندی خاک بر عملکرد حرارتی شمعی انرژی با سرعت و عمق‌های مختلف جریان آب زیرزمینی

## ۲- مباحث نظری و مدلسازی

۲-۱- روابط حاکم بر مسئله

<sup>۱</sup> Lou

<sup>۳</sup> Brinkman Equation

<sup>۲</sup> Finite Element Method

روابط حاکم در این بخش شامل روابط حرارتی-هیدرولیکی<sup>۱</sup> می‌باشد. جهت مدل‌سازی مسئله انتقال حرارت در نرم‌افزار، از فیزیک‌های انتقال حرارت در محیط متخلخل<sup>۲</sup> و جریان در لوله غیر هم‌دم<sup>۳</sup> استفاده شده‌است که معادلات آن‌ها بر اساس اصل بقای انرژی و اختلاف پتانسیل حرارتی می‌باشد. همچنین جهت مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، معادله برینکمن انتخاب شده‌است که این فیزیک بر اصل اختلاف پتانسیل هیدرولیکی در محیط متخلخل استوار است. در ادامه هر یک از این فیزیک‌های انتخابی شرح داده شده‌اند.

#### ۱-۲-۲- مدل‌سازی انتقال حرارت در لوله و محیط متخلخل

معادله حرکت و انتقال حرارت در لوله‌های مبدل گرما با فرض تراکم ناپذیر بودن سیال در گردش بر اساس قانون بقا انرژی و به صورت یک بعدی مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۳۹]:

$$\rho_f C_{p_f} A_p \frac{\partial T_{Bulk,f}}{\partial t} + \rho_f C_{p_f} A_p v_{t,f} \nabla(T_{Bulk,f}) = \nabla[A_p \lambda_f \nabla(T_{Bulk,f})] + q_p \quad (1)$$

در معادله  $\rho_f$  چگالی سیال داخل لوله ( $\text{kg/m}^3$ )،  $C_{p_f}$  ظرفیت گرمایی ویژه سیال ( $\text{J/(kg.K)}$ )،  $A_p$  سطح مقطع لوله ( $\text{m}^2$ )،  $T_{bulk,f}$  دمای توده سیال ( $\text{K}$ )،  $t$  زمان ( $\text{s}$ )،  $v_{t,f}$  بردار سرعت مماس بر مسیر جریان ( $\text{m/s}$ )،  $\lambda_f$  رسانایی حرارتی سیال درون لوله ( $\text{W/(m.K)}$ ) و  $q_p$  نشان دهنده شار حرارتی مبادله شده در واحد طول لوله ( $\text{W/m}$ ) می‌باشند. معادله انتقال حرارت برای محیط‌های متخلخل از ترکیب قانون انرژی‌های ظاهر شده در معادلات انتقال حرارت جامدات و سیالات مشتق شده‌است که مطابق رابطه (۲) به شرح زیر است [۴۰]:

$$(\rho C_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f v_f \nabla(T) - \nabla(\lambda_m \nabla T) = 0 \quad (2)$$

در معادله فوق  $T$  دمای محیط ( $\text{K}$ )،  $(\rho C_p)_f$  ظرفیت گرمایی حجمی موثر آب زیر زمینی در فشار ثابت ( $\text{J/(m}^3.\text{K)}$ )،  $v_f$  سرعت جریان آب زیرزمینی ( $\text{m/s}$ )،  $(\rho C_p)_m$  و  $\lambda_m$  نیز به ترتیب ظرفیت گرمایی حجمی موثر محیط متخلخل در فشار ثابت ( $\text{J/(m}^3.\text{K)}$ ) و رسانایی حرارتی محیط متخلخل ( $\text{W/(m.K)}$ ) هستند که مطابق رابطه (۳) و (۴) به روش زیر به دست می‌آیند [۴۱]:

$$(\rho C_p)_m = (\rho C_p)_f (n) + (\rho C_p)_s (1-n) \quad (3)$$

$$\lambda_m = \lambda_f (n) + \lambda_s (1-n) \quad (4)$$

در معادلات فوق  $n$  تخلخل خاک است و زیرنویس‌های  $f$  و  $s$  به ترتیب معرف سیال و خاک هستند.

#### ۱-۲-۲- مدل‌سازی حرکت آب در خاک

در این مطالعه، از معادله برینکمن که یکی از زیرمجموعه‌های فیزیک حرکت سیال در نرم‌افزار COMSOL است، جهت مدل‌سازی جریان آب در خاک استفاده شده‌است. معادله برینکمن جریان سیالات با سرعت بالا را در یک محیط متخلخل بر حسب پتانسیل جنبشی ناشی از سرعت، فشار و پتانسیل گرانشی سیال توصیف می‌کند. این معادله توسعه یافته قانون داریسی<sup>۴</sup> است که برای توصیف اتلاف انرژی ناشی از نیروی برشی توسط ویسکوزیته ایجاد شده‌است. در نتیجه، این معادله می‌تواند برای توصیف انتقال رژیم جریان از جریان با سرعت کم

<sup>۱</sup> Thermo-Hydraulic

<sup>۲</sup> Heat Transfer in Porous Media

<sup>۳</sup> Nonisothermal Pipe Flow

<sup>۴</sup> Darcy Law

در یک محیط متخلخل، همانطور که توسط قانون دارسی تعریف شده است، به یک جریان با سرعت بالا در کانال‌ها، همانطور که توسط معادله نایر-استوکس<sup>۱</sup> نشان داده شده است، اعمال شود. معادله برینکمن مطابق رابطه (۵) به صورت زیر بیان می‌شود [۴۲]:

$$\frac{\rho}{n} \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) \frac{v}{n} \right) = -\nabla P + \nabla \left[ \frac{1}{n} \{ \mu (\nabla v + (\nabla v)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla v) I \} \right] - (\kappa^{-1} \mu + \frac{Q_m}{n^2}) v + F \quad (5)$$

در معادله فوق  $P$  نماد فشار ( $\text{Pa}$ ) ماتریکس معکوس،  $I$  ماتریس یکه،  $\mu$  نفوذپذیری ذاتی خاک ( $\text{m}^2$ )،  $F$  برای محاسبه نیروی گرانش و سایر نیروهای حجمی ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$ ) استفاده می‌شود و  $Q_m$  منبع جرم در حجم و زمان معین ( $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ) است. جریان همرفت به علت وابسته بودن چگالی سیال به تغییرات دما و وجود جاذبه زمین اتفاق می‌افتد. از این رو از تقریب بوسینسک برای بررسی تغییرات چگالی سیال نسبت به دما استفاده می‌شود و می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر میزان توان خروجی یک شمع انرژی داشته باشد [۱۹ و ۴۳]. نرم افزارهای زیادی مانند Abaqus، Ansys، FLAC، Thermo-Pile، Lagamine و COMSOL با امکانات مختلفی جهت مدلسازی‌های عددی یک شمع انرژی در دسترس هستند. برای انتخاب نرم افزار، ملاک‌های مختلفی مانند دسترسی آن در ایران، دقت نرم افزار، محیط کاربری مناسب، توانایی مدلسازی جریان آب زیرزمینی و انتقال حرارت و همچنین ترکیب این فیزیک‌ها با یکدیگر مدنظر قرار گرفت. در این پژوهش جهت انجام مدلسازی سه بعدی شمع انرژی به منظور تحلیل عملکرد حرارتی مدل‌های مختلف این شمع، از نرم افزار COMSOL Multiphysics که مبتنی بر روش المان محدود است استفاده شده است [۳۸]. جهت شبیه‌سازی جریان همرفت طبیعی در جایی که خواص سیال به دما بستگی دارد، از ترکیب چند فیزیکی جریان غیر هم‌دما<sup>۲</sup> در نرم افزار COMSOL استفاده شده است. لازم به ذکر است تقریب بوسینسک<sup>۳</sup> در این حالت وابسته به دمای محیط و غیر خطی است [۳۸].

## ۲-۲- فرضیات و مدل رفتاری

در مدلسازی صورت گرفته، اگر  $D$  قطر شمع و  $L$  طول شمع باشد ابعاد مدل برای طول، عرض و ارتفاع آن به صورت  $2L \times 2L \times 50D$  در نظر گرفته شده است [۴۴]. در این مدل از لوله  $U$  شکل استفاده شده و تاثیر جریان آب زیرزمینی سطحی بر عملکرد شمع انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. فرضیات اولیه پژوهش حاضر به شرح زیر است:

- ۱) خاک کاملاً اشباع فرض می‌شود و آب داخل منافذ خاک تراکم ناپذیر است.
- ۲) دمای خاک و آب درون خاک برابر است.
- ۳) محیط هر یک از مصالح به صورت جداگانه همگن فرض شده است و خواص حرارتی و هیدرولیکی غیر قابل تغییر (همسانگرد) هستند.
- ۴) معادله برینکمن برای هر دو حالت همرفت طبیعی و اجباری معتبر است.
- ۵) دما در مرزهای مدل همواره برابر با دمای اولیه محیط و ایزوله است به جز سطح مدل که به علت در نظر گرفتن دمای سطح زمین متغیر است.

سه مدل مش‌بندی برای حالت لوله گذاری  $U$  شکل در نظر گرفته شده است. برای لوله  $U$  شکل، تعداد کل المان‌ها به ترتیب برابر ۸۴۵۹۹، ۱۷۵۶۵۲ و ۲۸۲۷۶۱ در نظر گرفته شد که تفاوت توان خروجی بین تعداد المان‌ها ۸۴۵۹۹ و ۱۹۱۰۲۴ تقریباً برابر ۱۲ درصد می‌باشد اما این تفاوت بین تعداد مش ۱۷۵۶۵۲ و ۲۸۲۷۶۱ کمتر از ۱ درصد نشان داده شد. از این رو تعداد المان‌ها ۱۷۵۶۶۲ انتخاب شد تا حجم و زمان مدلسازی کاهش یابد و نحوه مش‌بندی مدل در شکل ۲ قابل مشاهده است. مش‌بندی شمع و کل حجم مدل به صورت المان‌های چهار وجهی<sup>۴</sup> و به ترتیب بین اندازه‌های  $0.2\text{m}$  تا  $0.02\text{m}$  و  $4/6\text{m}$  الی  $0.2\text{m}$  پیش بینی شده است. همچنین برای

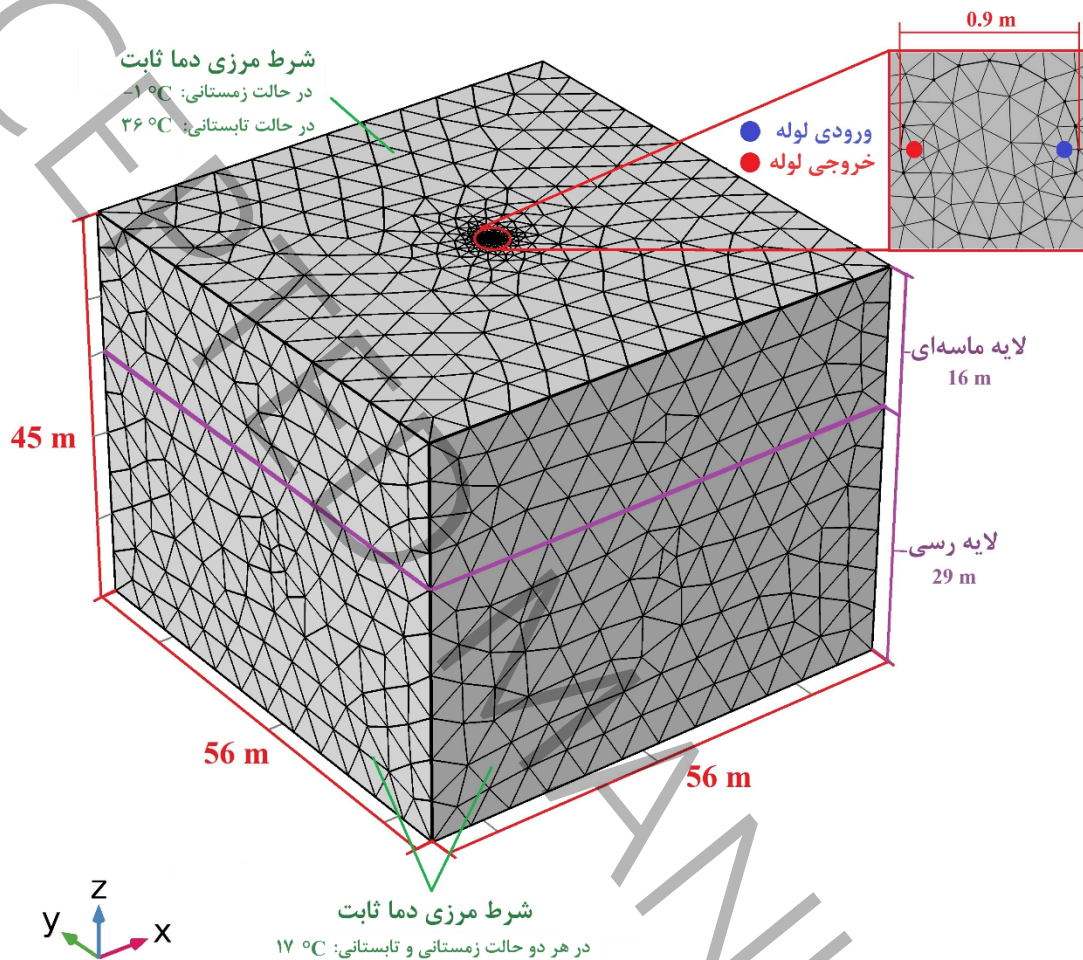
<sup>۱</sup> Navier-stokes equation

<sup>۲</sup> Boussinesq approximation

<sup>۳</sup> Nonisothermal Flow Multiphysics Coupling

<sup>۴</sup> Tetrahedral

مش بندی سطوح نیز از المان‌های مثلثی استفاده شده است زیرا در این حالت کیفیت مش بندی بالاتر و منظم تر است و تراکم مناسبی از المان‌ها دیده می شود. همچنین با استفاده از مش مثلثی، همگرایی بین نتایج در زمان کوتاه تری حاصل شده است. لازم به ذکر است تعداد المان‌های شمع انرژی، لایه ماسه‌ای و لایه رسی به ترتیب ۴۸۰۶۸، ۶۶۱۹۷، ۶۱۳۸۷ عدد می باشد.



شکل ۲- مشخصات هندسه، مش بندی و شرایط مرزی مدل

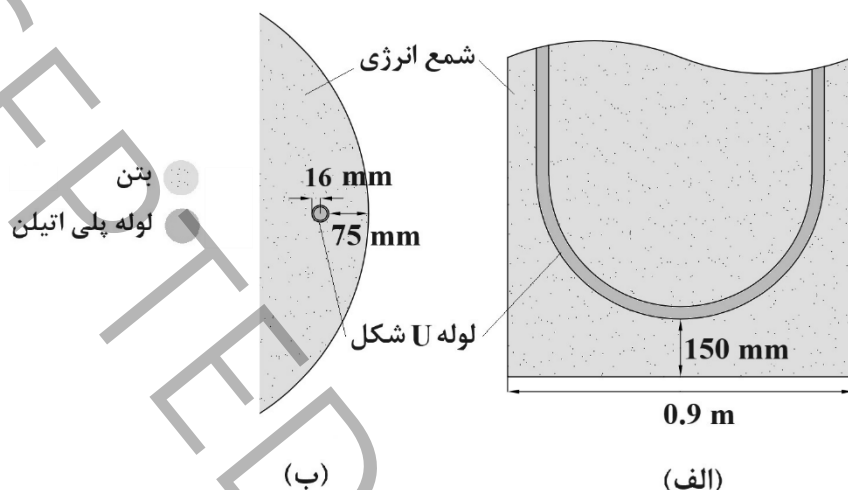
Figure 2- Model Geometry Specifications, Meshing and Boundary Conditions

پوشش بتن بر روی لوله برابر ۷۵mm و فاصله پایین ترین قسمت لوله تا انتهای شمع ۱۵۰mm در نظر گرفته شده است (شکل ۳). در مدلسازی شمع‌های انرژی معمولاً تا عمق ۴ متر از سطح زمین، لوله داخل شمع را عایق در نظر می گیرند تا تغییرات دما در سطح زمین کمترین اثر را بر روی سیستم بگذارد [۴۴]. در این مدلسازی نیز این نکته رعایت شده و ضریب گذردهی حرارتی لوله تا عمق ۴ متری برابر صفر در نظر گرفته شده است. مشخصات شمع، لوله و ابعاد مدل در جدول ۲ عنوان شده است. جهت مدلسازی جریان آب زیر زمینی سطحی، از دولایه خاک استفاده شده است که لایه فوقانی ماسه و لایه زیرین رس است. سرعت جریان آب زیرزمینی برابر ۱۰-۱۵/۵ می باشد و سایر مشخصات آن باتوجه به وابستگی به دما به صورت غیرخطی تغییر می کند و توسط نرم افزار COMSOL محاسبه می گردد.

جهت تعیین شرایط مرزی، از شرط مرزی دما ثابت برای جداره‌ها، کف و سطح مدل استفاده شده است و دمای ورودی سیال ثابت است. دمای سطح زمین و جریان آب ورودی به لوله برای فصول سرد به ترتیب ۱- و ۱ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است و برای



۹۰ روز گرم به ترتیب ۳۶ و ۳۱ درجه سانتی‌گراد منظور شده‌است. همچنین دمای درون زمین برای هر دو حالت برابر ۱۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لازم به ذکر است که ۱۶ متر اول زمین حاوی خاک ماسه‌ای و در عمق‌های بیشتر خاک از نوع رسی می‌باشد که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ بیان شده‌است. عملکرد حرارتی سیستم در یک از حالت‌های گرمایشی و سرمایشی به مدت ۹۰ روز مدلسازی شده‌است.



شکل ۳- تصویر شماتیک پوشش بتن بر روی لوله‌های مبادله‌گر حرارتی الف) مقطع طولی قسمت انتهایی شمع انرژی ب) مقطع عرضی شمع انرژی

Figure 3- Schematic illustration of the concrete cover on the heat exchanger pipes a) Longitudinal section of the end of the energy pile b) Cross section of the energy pile

Table 2 - Geometric, physical and operational characteristics of the model used in this study

جدول ۱- مشخصات هندسی، فیزیکی و عملکردی مدل ساخته شده در مطالعه حاضر

دامنه شمع انرژی		مشخصات هندسی	
۵۶×۵۶×۴۵	ابعاد دامنه خاکی (m)		
۲۸	طول شمع (m)		
۰/۹	قطر شمع (m)		
۳۲	قطر خارجی لوله (mm)		
۲/۹	ضخامت جدار لوله (mm)		
۷۵	پوشش بتن (mm)		
۰/۷۱۸	فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها (m)		
			مشخصات فیزیکی
بتن	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )		
۲۴۰۰			
لوله پلی اتیلن	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)		
-	۸۸۰		
	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)		
۰/۴۲	۱/۸		
			مشخصات عملکردی
	دبی ورودی سیال به داخل لوله (l/min)		
	۱۴		
	سرعت جریان آب زیرزمینی (m/s)		
	۵/۱۵× <sup>۷</sup> -۱۰		
	دمای ورودی سیال در زمستان (°C)		
	۱		

۱	دمای سطح زمین در زمستان (°C)
۳۱	دمای ورودی سیال در تابستان (°C)
۳۶	دمای سطح زمین در تابستان (°C)
۱۷	دمای دامنه خاکی (°C)

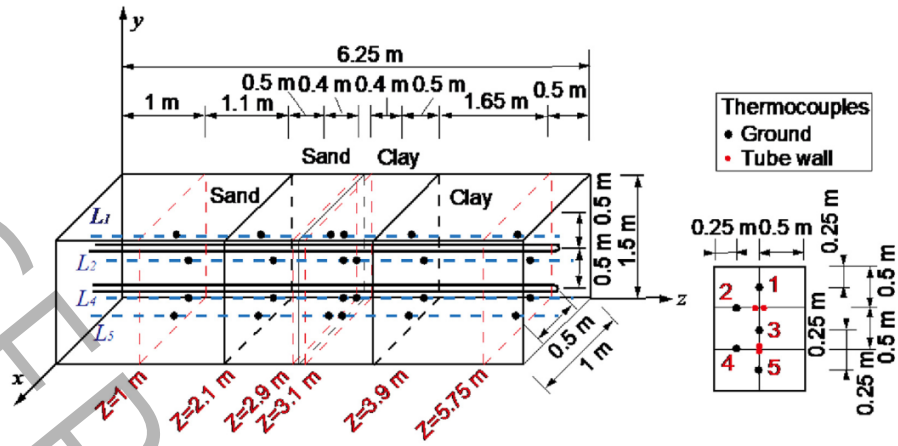
Table 3- Soil stratification characteristics in this model

جدول ۲- مشخصات لایه بندی خاک در مدل حاضر

خاک	عمق (m)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	هدایت حرارتی (W/m.K)	پوکی	نفوذپذیری مطلق (m <sup>2</sup> )
ماسه	۰ - ۱۶	۲۱۰۰	۱۴۹۲	۳/۵۲	۰/۴۵	۱/۱۵ × ۱۰ <sup>-۹</sup>
رس	۱۶ - ۴۸	۱۸۱۰	۲۳۹۶	۱/۷۲	۰/۵	۲/۲۵ × ۱۰ <sup>-۱۰</sup>

### ۲-۳- صحت سنجی

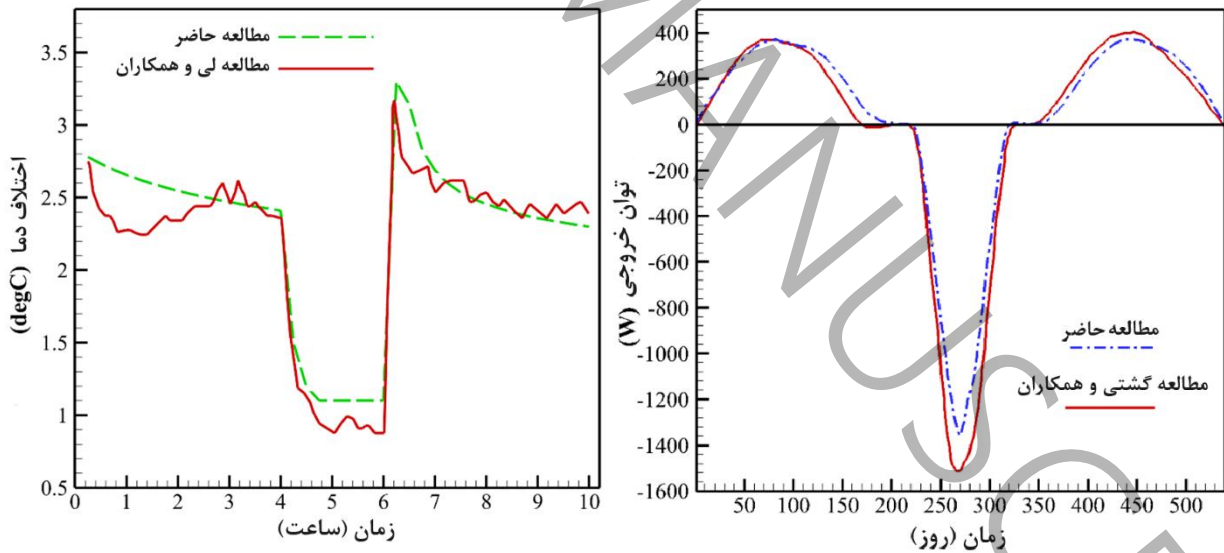
به منظور اعتبارسنجی مدل عددی و اطمینان از صحت فیزیک‌های حرارتی-هیدرولیکی مورد استفاده در این مطالعه، از یک مدل آزمایشگاهی و یک مطالعه عددی استفاده شده است. اختلاف بین نتایج حاصل در صحت‌سنجی این مطالعه با مطالعات معتبر انتخابی، در محدوده ۳ درصد است که نشان از دقت بالا و صحت محاسبات دارد. این درصد از اختلاف نیز می‌تواند ناشی از تفاوت در اندازه و نوع المان‌های استفاده شده در مش بندی بین این مطالعه و دو تحقیق انتخابی باشد. در صحت‌سنجی اول، از یک مدل آزمایشگاهی ساخته شده در کشور چین توسط لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ استفاده شده است [۲۷]. مطابق شکل ۴، این مدل شامل یک جعبه به ابعاد ۱m × ۱/۵m × ۶/۲۵m می‌باشد که در نقاط مختلف آن سنسور حرارتی قرار دارد و از دو لوله مسی جهت گردش آب به عنوان لوله‌های مبادله گر حرارتی بهره می‌برد. این جعبه به ترتیب با استفاده از خاک‌های ماسه نیمه‌اشباع، ماسه اشباع، رس اشباع و رس نیمه‌اشباع پر شده است. ماسه اشباع که جریان آب در آن حضور دارد از طول ۲/۱ تا ۳ متر قرار گرفته است. سرعت جریان آب زیرزمینی برابر ۱۰ m/s<sup>-۱</sup> است و دمای آن برابر ۲۵/۱°C می‌باشد. همچنین دمای کل خاک برابر ۲۴/۲°C است. در این مدل از دو لوله U شکل متفاوت استفاده شده که نسبت به محور Y یکی در نیمه بالایی (لوله شماره ۱) و دیگری در نیمه پایینی (لوله شماره ۲) قرار گرفته است. سنسورهایی که نسبت به محور Z در عمق ۲/۱ متر قرار داده شده‌اند، تغییرات دمای خاک را در مدت زمان ۳۴ ساعت اعلام می‌کنند. برای اندازه گیری دما، از ۶ صفحه عمود بر محور Z و در عمق‌های مختلف استفاده شده است که در هر صفحه ۵ سنسور حرارتی قرار دارد و جانمایی آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. سیستم در طول ۱۰ ساعت، در ۴ ساعت اول روشن است و سپس به مدت ۲ ساعت برای بررسی بازیابی سیستم خاموش می‌شود و در ادامه مجدد به مدت ۴ ساعت سیستم روشن می‌گردد و سپس مجدد خاموش می‌شود. در تمام طول این مدت جریان آب در خاک حضور دارد. لازم به ذکر است که منظور از روشن و خاموش بودن سیستم وجود جریان آب در لوله‌های مبادله گر حرارتی، در داخل دستگاه است.



شکل ۴- تصویر شماتیک مدل مطالعه لی و همکاران و محل قرارگیری سنسورهای حرارتی [۲۷]

Figure 4- The schematic of the Lee et al. study model and the location of the thermal sensors [27]

در صحت سنجی فوق، مقایسه نتایج لی و همکاران و مطالعه حاضر برای اختلاف دمای آب ورودی و خروجی برای لوله شماره ۲ در شکل ۵ نشان داده شده است که هماهنگی بسیار خوبی بین هر دو نمودار مشاهده می گردد، به طوری که میانگین اختلاف به کمتر از ۳ درصد می رسد. اختلاف مشاهده شده در ساعات ابتدایی بین مطالعه لی و همکاران و پژوهش حاضر می تواند ناشی از عوامل محیطی ناشناخته در مطالعه لی باشد چرا که فیزیک مسئله ایجاب می کند در ۴ ساعت ابتدایی آزمایش اختلاف دمای ورودی و خروجی لوله مبادله گر حرارتی به صورت روندی کاهشی باشد و در مرجع اشاره ای به دلیل افزایش اختلاف حرارت ورودی و خروجی در بین ۱ الی ۳ ساعت اولیه نشده است.



شکل ۶- مقایسه اختلاف توان خروجی شمع انرژی در مطالعه گشتی و همکاران با مطالعه حاضر

Figure 6- Comparison of the output power of the energy pile in the Gashti et al. study with the present study

شکل ۵- مقایسه اختلاف دمای آب ورودی و خروجی در لوله شماره ۲ در مطالعه لی و همکاران با مطالعه حاضر

Figure 5- Comparison of the temperature difference in pipe number 2 in the Lee et al. study with the present study

همچنین جهت تایید و اطمینان از صحت نتایج، صحت‌سنجی دیگری از مطالعه گشتی و همکاران<sup>۱</sup> [۲۶] که در دانشگاه اولو<sup>۲</sup> فنلاند صورت گرفته‌است، انجام پذیرفت. در این مطالعه گشتی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار COMSOL و مدلسازی یک شمع انرژی تحت جریان آب زیرزمینی با سرعت  $10\text{ m/s} \times 10^{-8}$  با کمک معادله برینکمن<sup>۳</sup> و دامنه‌ای خاکی، به ابعاد  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 30\text{ m}$  و شمعی به قطر  $0.06\text{ m}$  و طول  $20\text{ m}$ ، به بررسی طولانی مدت اثر جریان آب زیرزمینی بر توان خروجی یک شمع انرژی پرداخته‌اند.

گشتی و همکاران در این مطالعه اثر دمای سطح زمین در فصل‌های مختلف را نیز بر عملکرد حرارتی و مکانیکی شمع انرژی در نظر گرفتند. در این مطالعه نتایج برای مدت ۱۸ ماه و با توجه به شرایط آب و هوایی کشور فنلاند در ماه‌های مختلف سال گزارش شده‌است. در ۶ ماه نخست عملکرد زمستانی مورد بررسی قرار گرفته‌است و سپس سیستم به مدت ۲ ماه خاموش شده‌است. در ادامه به مدت ۲ ماه عملکرد تابستانی مدلسازی شده‌است و مجدداً به مدت ۲ ماه سیستم خاموش شده‌است و در نهایت به مدت ۶ ماه دیگر سیستم تحت شرایط زمستانی قرار گرفته‌است. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعه گشتی و همکاران در شکل ۶ نشان داده شده‌است که هماهنگی مناسبی بین این دو نتیجه وجود دارد و در اوج عملکرد تابستانی بیشترین اختلاف چیزی کمتر از ۹٪ می‌باشد و در دیگر نقاط این اختلاف به طور میانگین به حدود ۳ درصد می‌رسد.

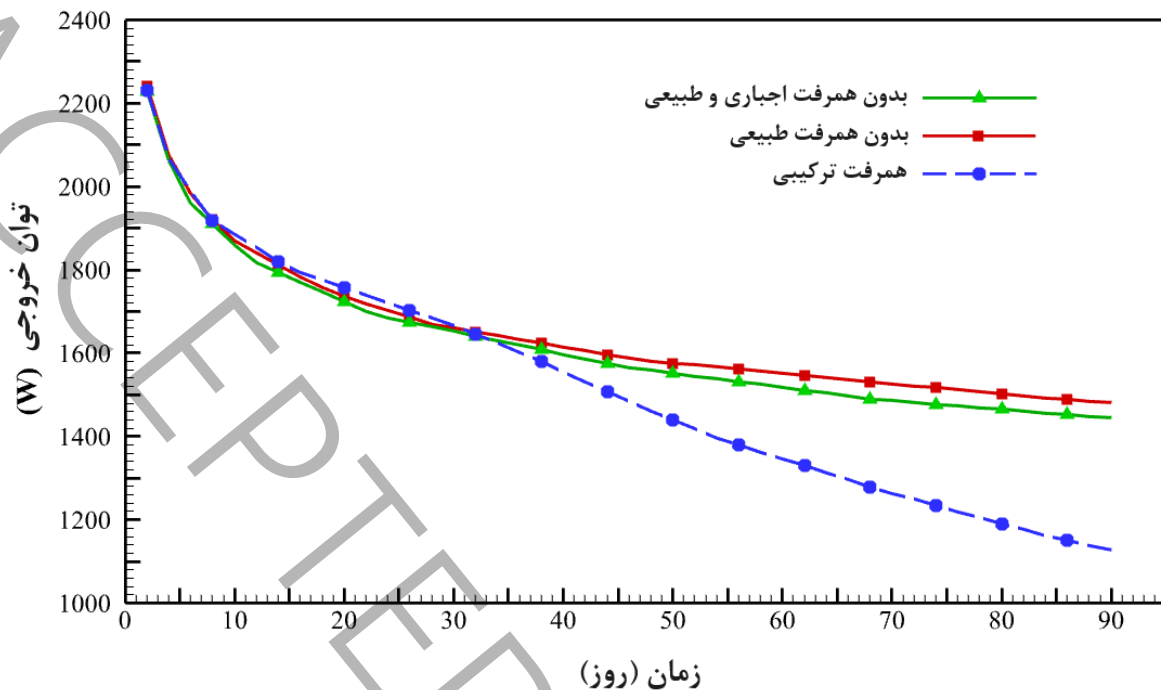
### ۳- بحث و تحلیل نتایج

در این مطالعه، تفاوت توان خروجی در سه حالت، با توجه به خصوصیات هیدرولیکی خاک، بایکدیگر مقایسه شده‌اند. در حالت اول هیچ‌گونه جریان آب زیرزمینی (همرفت اجباری) و همچنین همرفت طبیعی در مدل وجود ندارد. در حالت دوم جریان آب زیرزمینی وجود دارد اما از اثر جریان همرفت طبیعی صرف نظر شده‌است. در حالت سوم اثر همزمان جریان آب زیرزمینی و همرفت طبیعی در نظر گرفته شده‌است. مدلسازی با توجه به این سه حالت ذکر شده، در طی ۹۰ روز، برای گرمایش و سرمایش یک ساختمان بررسی شده‌است. در شکل ۷ نتایج توان خروجی بر حسب وات (W) برای یک شمع انرژی در ماه‌های سرد سال برای هر یک از این سه حالت نشان داده شده‌است.

<sup>۱</sup> Gashti

<sup>۳</sup> Brinkman Equation

<sup>۲</sup> University of Oulu

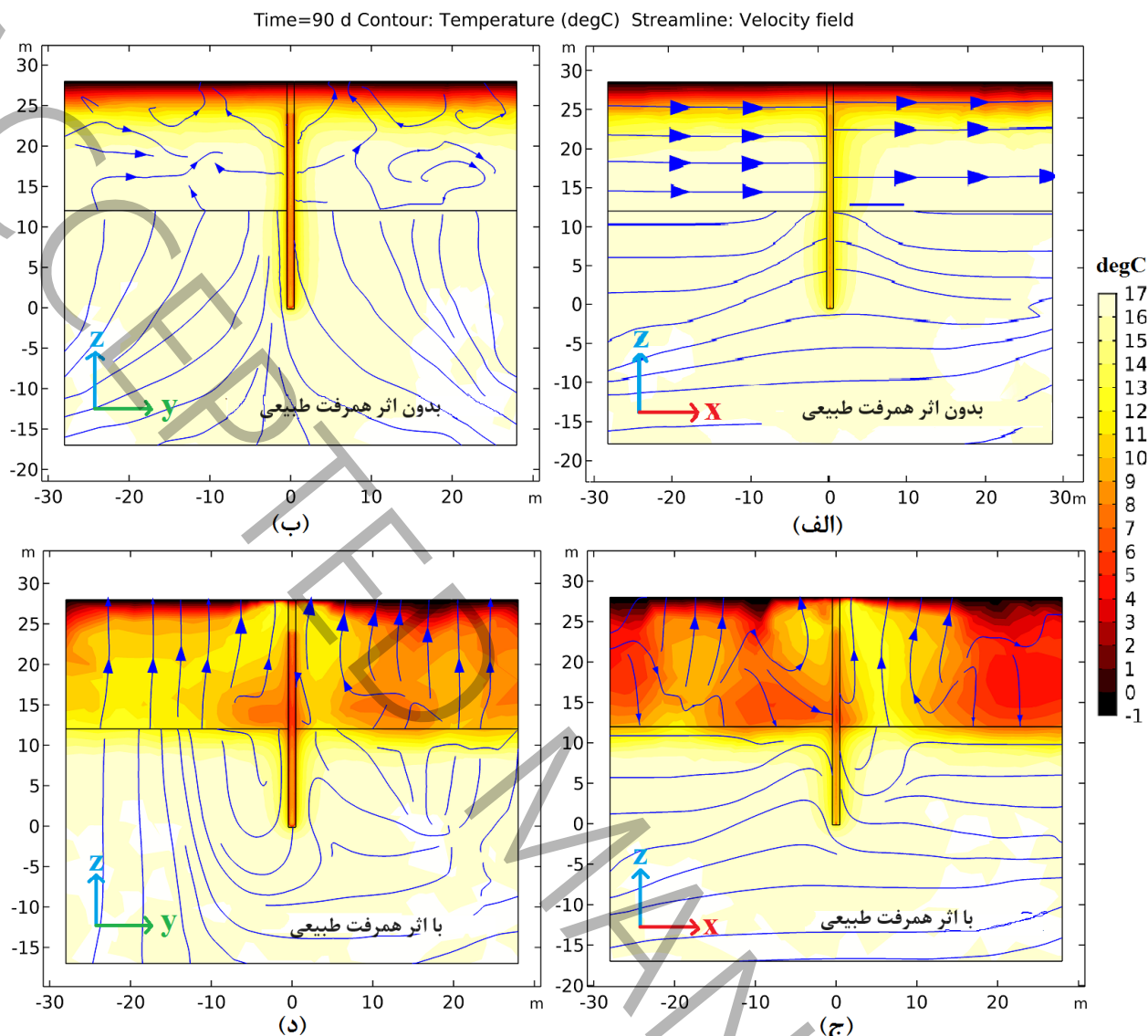


شکل ۷- میزان توان خروجی شمع انرژی در سه حالت مختلف در زمستان

Figure 7- The output power of the energy pile in three different scenarios in winter

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، زمانی که جریان آب زیرزمینی بدون در نظر گرفتن جریان همرفت طبیعی برقرار باشد، طبق انتظار میزان توان خروجی نسبت به حالتی که جریان آب زیرزمینی وجود ندارد بهبود پیدا می‌کند. این بهبود عملکرد و افزایش میزان تبادل حرارت در روز ۹۰ام به حدود ۲/۶٪ می‌رسد. اما زمانی که جریان همرفت طبیعی در نظر گرفته شود، برخلاف انتظار از روز ۳۰ام میزان توان خروجی به طرز چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در روز ۹۰ام برای لوله گذاری U شکل به بیش از ۲۷٪ می‌رسد. علت این افت توان خروجی را با کمک شکل ۸ بهتر می‌توان توضیح داد. شکل ۸، برش مقطع عرضی در وسط شمع انرژی، در دو صفحه‌ی X-Z (شکل ۸-الف و ۸-ج) و Y-Z (شکل ۸-ب و ۸-د) در روز ۹۰ام را نمایش می‌دهد. در شکل ۸، موارد الف و ب جریان آب زیرزمینی را بدون در نظر گرفتن اثر جریان همرفت طبیعی نشان می‌دهد، در حالی که در موارد ج و د این جریان در نظر گرفته شده‌است. لازم به ذکر است که جهت جریان آب زیرزمینی در راستای محور X می‌باشد که در شکل ۸ و ۱۰ خطوط جریان نمایش داده شده‌است.

در شکل ۸-الف و ۸-ب با توجه به عدم وجود همرفت طبیعی در داخل محیط خاکی، دمای سطح زمین تا حدود عمق ۶ متری، بطور یکنواخت نفوذ می‌کند و در عمق‌های بیشتر تغییر دمای زیادی ناشی از دمای سطح زمین در محیط خاکی دیده نمی‌شود. در شکل ۸-ج و ۸-د، در نظر گرفتن جریان همرفت طبیعی باعث می‌شود تا رژیم جریان آب زیرزمینی (همرفت اجباری) توسط جریان همرفت طبیعی بطور کامل تحت تاثیر قرار بگیرد و جریان رفت و برگشت عمودی ناشی از همرفت طبیعی در داخل خاک ایجاد گردد. گردش عمودی سیال موجب می‌شود دمای سطح زمین به درون عمق خاک انتقال پیدا کند و دمای محیط اطراف شمع انرژی تغییر یابد. بنابراین دمای خاک در قسمت فوقانی مدل که شامل خاک ماسه‌ای و به واسطه آن دارای تراوش است، کاهش می‌یابد. در نتیجه این پدیده، توان خروجی و کارایی سیستم به طور قابل توجهی دچار افت می‌گردد.



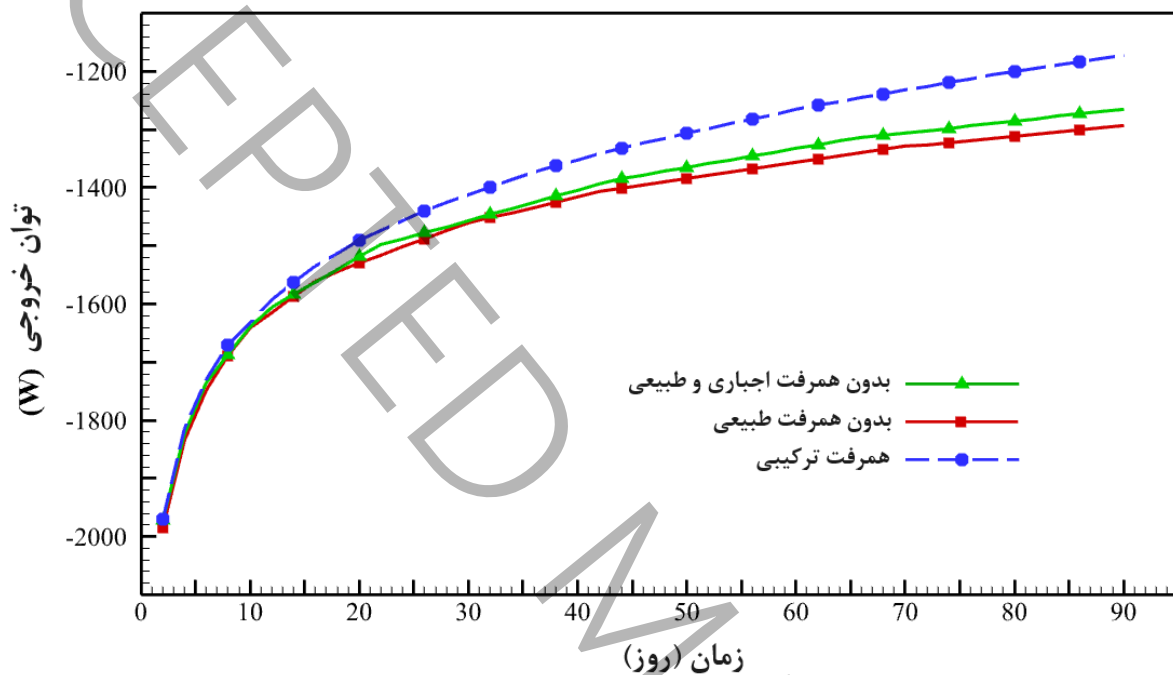
شکل ۸- تراوش در خاک برای وجود و عدم وجود جریان همرفت طبیعی در زمستان. الف) بدون همرفت طبیعی (در صفحه X-Z) ب) بدون همرفت طبیعی (در صفحه Y-Z) ج) وجود همرفت طبیعی (در صفحه X-Z) د) وجود همرفت طبیعی (در صفحه Y-Z)

**Figure 8- Seepage in the soil for the presence and absence of natural convection flow in winter. a) without natural convection (on the x-z plane) b) without natural convection (on the y-z plane) c) with natural convection (on the x-z plane) d) with natural convection (on the y-z plane)**

در شکل ۸-ج و ۸-د مشاهده می شود که جریان همرفت طبیعی تاثیر قابل توجهی بر لایه ماسه ای دارد اما در لایه رسی تاثیر چندانی مشاهده نمی شود. دلیل این امر، تفاوت در میزان نفوذپذیری و به طبع سرعت جریان آب زیرزمینی (همرفت اجباری) در لایه ی ماسه ای و رسی می باشد. در واقع در لایه رسی به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین، جریان همرفت طبیعی فرصتی برای تاثیرگذاری پیدا نمی کند. این به آن معنا است که به ازای داشتن سرعت های بیشتر جریان آب زیرزمینی، تاثیر جریان همرفت طبیعی بر سیستم تغییر می کند.

این موضوع برای ۹۰ روز فصل های گرم نیز صدق می کند. اثر منفی وجود تراوش سطحی در فصل های گرم سال نیز چشمگیر است و در نظر نگرفتن جریان همرفت طبیعی می تواند موجب تاثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی شمع انرژی شود. در شکل ۹ میزان توان خروجی یک شمع انرژی در طول زمان با عملکرد تابستانی نمایش داده شده است. در شکل ۹ مشاهده می شود که مشابه با عملکرد زمستانی، وجود جریان آب زیرزمینی بدون همرفت طبیعی موجب بهبود توان خروجی شمع انرژی نسبت به حالت بدون تراوش می

گردد. اما با در نظر گرفتن اثر جریان همرفت طبیعی، میزان توان خروجی مجدداً دچار افت می‌شود. میزان افت توان خروجی در روز ۱۰م نسبت به حالت بدون جریان آب زیرزمینی به ۱۰٪ می‌رسد. این موضوع با کمک شکل ۱۰ که توزیع حرارت و مسیر تراوش آب در خاک را در عملکرد تابستانی نشان می‌دهد بیشتر قابل درک است. با توجه به شکل ۱۰، همانند ماه‌های سرد سال، در ماه‌های گرم سال نیز به دلیل وجود همرفت طبیعی، جریان‌هایی عمودی در لایه ماسه‌ای ایجاد می‌گردد که به موجب آن دمای سطح زمین که دمای بیشتری نسبت به دامنه خاکی دارد، به درون خاک منتقل می‌شود و تاثیر منفی بر کارایی شمع انرژی می‌گذارد.

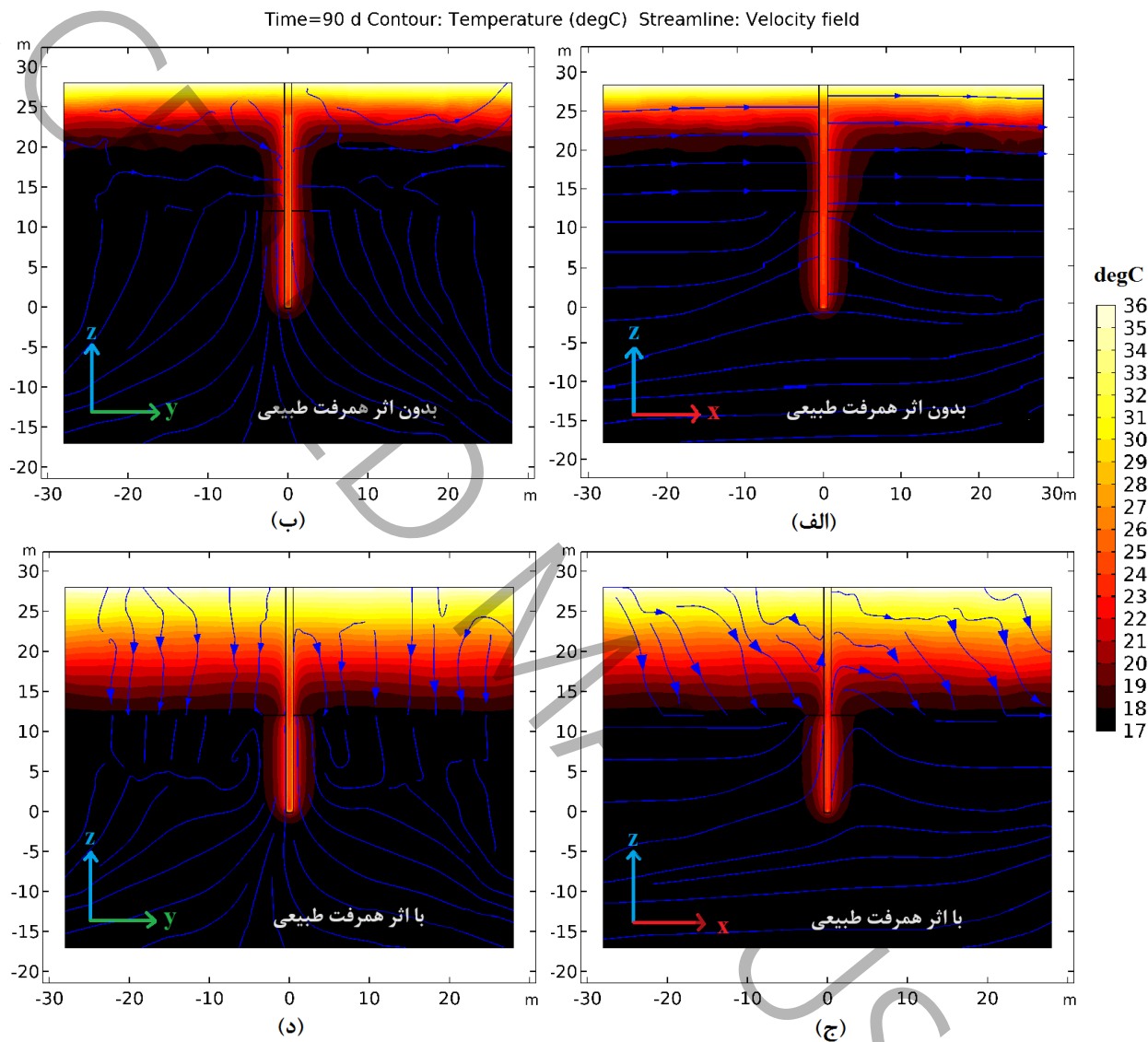


شکل ۹- میزان توان خروجی شمع انرژی در سه حالت مختلف در تابستان

Figure 9- The output power of the energy pile in three different scenarios in summer

با مقایسه عملکرد زمستانی با عملکرد تابستانی در حضور جریان همرفت طبیعی می‌توان نکات مختلفی را استخراج کرد. با دقت به شکل ۸-ج و ۸-د می‌توان متوجه شد که در عملکرد زمستانی، جریان همرفت طبیعی باعث ایجاد ناهمگنی دمایی در لایه ماسه‌ای می‌گردد و دمای این لایه را بطور نامنظم تغییر می‌کند. این درحالی است که در عملکرد تابستانی تغییرات دما در لایه ماسه‌ای ناشی از جریان همرفت طبیعی، تقریباً بصورت یکنواخت در عمق می‌باشد. در شکل ۱۱ تفاوت در نحوه تغییر دما در لایه ماسه‌ای در زمستان و تابستان را می‌توان مشاهده کرد. دلیل این اتفاق می‌تواند تفاوت در دامنه تغییرات چگالی آب در دماهای مختلف باشد. به این صورت که در دماهای پایین‌تر، چگالی آب مقدار بیشتری نسبت به دماهای بالاتر دارد. به این سبب در فصل زمستان، به دلیل پایین‌تر بودن دما در سطح زمین، آب در نزدیکی این منطقه چگالی بیشتری به نسبت لایه‌های زیرین خاک دارد، به همین دلیل جریان عمودی همرفت طبیعی با آزادی بیشتری گردش می‌کند و به موجب آن تغییر دما در لایه ماسه‌ای بطور نامنظم تغییر می‌کند. در فصل‌های گرم سال شرایط متفاوت است. به دلیل دمای بالای سطح زمین، چگالی آب زیرزمینی در نزدیکی این منطقه کمتر از لایه‌های زیرین واقع در اعماق خاک است و به این دلیل آزادی کمتری برای گردش و انتقال حرارت در محیط خاکی را دارد. در نتیجه در لایه ماسه‌ای تغییر دما بصورت یکنواخت در عمق خاک نفوذ می‌کند و نامنظمی کمتری در آن مشاهده می‌شود. به علاوه همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است، همرفت طبیعی ناشی از اختلاف دما بین سطح زمین و درون خاک تاثیر قابل توجهی بر لایه ماسه‌ای می‌گذارد به طوری که حتی بر همرفت طبیعی که به علت اختلاف حرارت بین شمع انرژی و محیط اطرافش می‌تواند اتفاق بیافتد غلبه می‌کند.

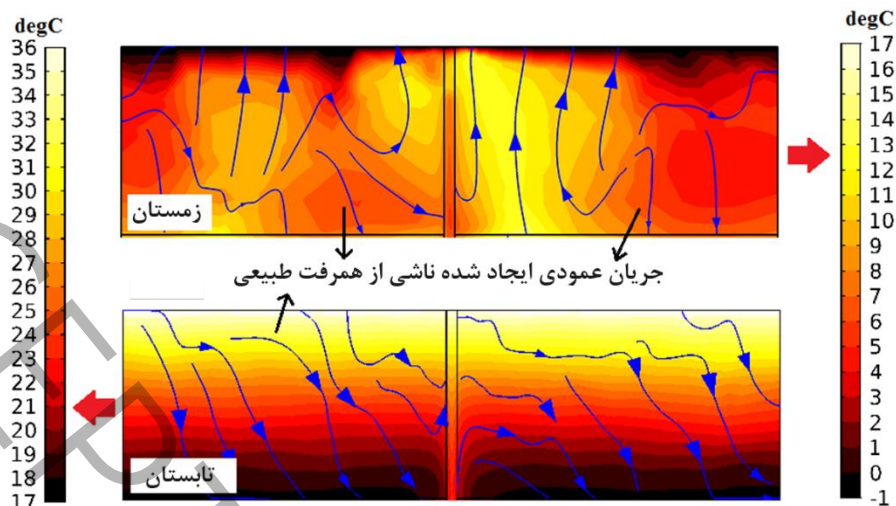
همچنین همانطور که مشاهده شد، در عملکرد زمستانی میزان افت توان خروجی شمع انرژی در اثر ایجاد جریان همرفت طبیعی در روز ۹۰م در حدود ۲۷٪ است در حالی که در عملکرد تابستانی میزان افت توان خروجی در روز ۹۰م به ۱۰٪ می‌رسد. این تفاوت در اختلاف توان خروجی در زمستان و تابستان نیز می‌تواند متأثر از تفاوت در نحوه توزیع حرارت در دامنه ماسه‌ای در عملکرد زمستانی و تابستانی باشد.



شکل ۱۰- تراوش در خاک برای وجود و عدم وجود جریان همرفت طبیعی در تابستان. الف) بدون همرفت طبیعی (در صفحه X-Z) ب) بدون همرفت طبیعی (در صفحه Y-Z) ج) وجود همرفت طبیعی (در صفحه X-Z) د) وجود همرفت طبیعی (در صفحه Y-Z)

**Figure 10- Seepage in the soil for the presence and absence of natural convection flow in summer. a) without natural convection (on the x-z plane) b) without natural convection (on the y-z plane) c) with natural convection (on the x-z plane) d) with natural convection (on the y-z plane)**





شکل ۱۱- نحوه توزیع و تغییر دما در لایه ماسه‌ای ناشی از جریان همرفت طبیعی در زمستان و تابستان (در روز ۹۰ام - در صفحه X-Z) (شاخص حرارتی برای حالت زمستانی در سمت راست و برای حالت تابستانی در سمت چپ نمایش داده شده‌است)

**Figure 11- Temperature distribution in the sand layer due to the natural convection flow in winter and summer (on the 90th day - on the x-z plane)**

(the thermal index for the winter mode is displayed on the right side and for the summer mode on the left side)

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی و نرم‌افزار COMSOL، به بررسی تاثیر جریان همرفت طبیعی و تراوش سطحی آب در خاک دولایه ماسه‌ای-رسی، در فصل‌ها و شرایط مختلف بر روی یک شمع انرژی به طول ۲۸ متر، لوله‌گذاری U شکل و در مدت ۹۰ روز پرداخته شد. مدل ساخته‌شده با مطالعات پیشین صحت‌سنجی گردید و جهت انجام آنالیزها مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه قسمتی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش عنوان شده‌است:

- در سرعت‌های کم جریان آب زیرزمینی معادل  $10^{-1} \times 15/5$  m/s، جریان همرفت طبیعی ناشی از دمای سطح زمین می‌تواند سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی را تغییر دهد. جریان همرفت طبیعی که بصورت جریانی عمودی است می‌تواند دمای سطح زمین را در داخل خاک منتقل کند. اثر این جریان در خاک‌هایی با نفوذپذیری بالا مثل خاک‌های ماسه‌ای که در این پژوهش نفوذپذیری مطلق آن معادل  $10^{-9} \times 15$  m<sup>2</sup> در نظر گرفته شده‌است بیشتر از خاک‌هایی با نفوذپذیری کم همانند خاک‌های رسی است. بصورتی که در خاک‌های رسی اشباع می‌توان از اثر جریان همرفت طبیعی صرف نظر کرد.
- اثر جریان همرفت طبیعی ناشی از دمای سطح زمین می‌تواند در عملکرد حرارتی و توان خروجی شمع انرژی اثر قابل توجهی بگذارد. در مدت ۹۰ روز از فصل‌های سرد سال، جریان همرفت طبیعی می‌تواند موجب کاهش توان خروجی شمع انرژی به میزان ۲۷٪ گردد. این افت توان خروجی در فصل‌های گرم سال به بیش از ۱۰٪ می‌رسد.
- نحوه توزیع حرارت ناشی از اثر جریان همرفت طبیعی در خاک در عملکرد تابستانی و زمستانی متفاوت است. این تفاوت ناشی از تفاوت چگالی آب در دماهای مختلف است. به این صورت که در فصل‌های سرد به این دلیل که آب در سطح زمین دارای چگالی بیشتری نسبت به آب در نقاط عمیق‌تر است، جریان همرفت طبیعی امکان حرکت آزادانه‌تری دارد و دما در لایه ماسه‌ای، بطور نامنظم تغییر می‌کند. اما در فصل‌های گرم به دلیل اینکه آب در نزدیکی سطح زمین چگالی کمتری نسبت به سایر نقاط دارد، امکان حرکت جریان همرفت طبیعی محدودتر است و دمای خاک به صورت یکنواخت در عمق تغییر می‌کند. همچنین همرفت طبیعی ناشی از اختلاف دما بین سطح زمین و درون خاک تاثیر قابل توجه‌ای بر لایه ماسه‌ای دارد به طوری که حتی بر همرفت طبیعی که به علت اختلاف حرارت بین شمع انرژی و محیط اطرافش می‌تواند اتفاق بیافتد غلبه می‌کند.

- [1] K. Amasyali, N.M. El-Gohary, A review of data-driven building energy consumption prediction studies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2018) 1192-1205.
- [2] J. Fadejev, R. Simson, J. Kurnitski, F. Haghghat, A review on energy piles design, sizing and modelling, *Energy*, 122 (2017) 390-407.
- [3] S. R. Sheikahmadi, M.A. Kiani Fordoei, M. Oliaei, 3D numerical modeling of geothermal tunnels and receivable energy, *Civil Engineering Sharif*. 38.2 (2022) 41–50. (In Persian)
- [4] S.M. Fattahian, M.A.Kiani Fordoei, M. Oliaei, Numerical investigation of the factors affecting the output power from heat exchanger piles, *Civil Engineering Sharif*. (2021). (In Persian)
- [5] H. Brandl, Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Géotechnique*. 56 (2006) 81–122.
- [6] D. Pahud, M. Hubbuch, Mesures et optimisation de l'installation avec pieux énergétiques du Dock Midfield de l'aéroport de Zürich, Rapport Final, Office Fédéral de l'énergie, Berne, Suisse. (2007).
- [7] T. Mimouni, Thermomechanical Characterization of Energy Geostructures with Emphasis on Energy Piles, 2014.
- [8] L. Laloui, A. Di Donna, Understanding the behaviour of energy geo-structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*. 164 (2011) 184–19.
- [9] Y. Tong, T. Kozai, N. Nishioka, K. Ohyama, Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP), *Biosystems Engineering*. 106 (2010) 405–411.
- [10] D.Y. Cherati, O. Ghasemi-Fare, Practical approaches for implementation of energy piles in Iran based on the lessons learned from the developed countries experiences, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 140 (2021).
- [11] Ingersoll L.R., Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, *ASHVE Journal Section, Heating, Piping and Air Conditioning* 20. (1948) 119–122.
- [12] N. Diao, Q. Li, Z. Fang, Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection, *International Journal of Thermal Sciences*. 43 (2004) 1203–1211.
- [13] N. Molina-Giraldo, P. Bayer, P. Blum, Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes from geothermal systems using analytical solutions, *International Journal of Thermal Sciences*. 50 (2011) 1223–1231.
- [14] O. Ghasemi-Fare, P. Basu, Influences of ground saturation and thermal boundary condition on energy harvesting using geothermal piles, *Energy and Buildings*. 165 (2018) 340–351.
- [15] G.S. Jia, Z.D. Ma, Z.H. Xia, J.W. Wang, Y.P. Zhang, L.W. Jin, Influence of groundwater flow on the ground heat exchanger performance and ground temperature distributions: A comprehensive review of analytical, numerical and experimental studies, *Geothermics*. 100 (2022).
- [16] H.J.L.L. Witte, Geothermal response tests with heat extraction and heat injection: examples of application in research and design of geothermal ground heat exchangers, *Europäischer Workshop Über Geothermische Response Tests 2001*. 31 (2001) 48–63.
- [17] S. Barbieri, M. Antelmi, S. Panday, M. Baratto, A. Angelotti, L. Alberti, Innovative numerical procedure for simulating borehole heat exchangers operation and interpreting thermal response test through MODFLOW-USG code, *Journal of Hydrology*. 614 (2022).
- [18] L. Jacques, P. Pasquier, Obtaining the hydraulic and thermal properties of the main hydrostratigraphic units surrounding a standing column well using a thermal response test, *Journal of Hydrology*. 623 (2023).
- [19] N. Mehraeen, M.M. Ahmadi, O. Ghasemi-Fare, Numerical modeling of mixed convection near a vertical heat source in saturated granular soils, *Geothermics*. 106 (2022) 102566.
- [20] M.M. Tamizdoust, O. Ghasemi-Fare, A fully coupled thermo-poro-mechanical finite element analysis to predict the thermal pressurization and thermally induced pore fluid flow in soil media, *Computers and Geotechnics*. 117 (2020).
- [21] W. Zhang, H. Yang, L. Lu, Z. Fang, Investigation on the heat transfer of energy piles with two-dimensional groundwater flow, *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 12 (2017) 43–50.

- [22] J. Luo, J. Tuo, W. Huang, Y.Q. Zhu, Y.Y. Jiao, W. Xiang, J. Rohn, Influence of groundwater levels on effective thermal conductivity of the ground and heat transfer rate of borehole heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*. 128 (2018) 508–516.
- [23] S. You, X. Cheng, C. Yu, Z. Dang, Effects of groundwater flow on the heat transfer performance of energy piles : Experimental and numerical analysis, *Energy & Buildings*. 155 (2017) 249–259.
- [24] Y. Zhou, Z. han Wu, K. Wang, An analytical model for heat transfer outside a single borehole heat exchanger considering convection at ground surface and advection of vertical water flow, *Renewable Energy*. 172 (2021) 1046–1062.
- [25] Y. Zhou, Z. xiang Zheng, G. si Zhao, Analytical models for heat transfer around a single ground heat exchanger in the presence of both horizontal and vertical groundwater flow considering a convective boundary condition, *Energy*. 245 (2022).
- [26] E.H.N. Gashti, M. Malaska, K. Kujala, Analysis of thermo-active pile structures and their performance under groundwater flow conditions, 105 (2015) 1–8.
- [27] W. Li, X. Li, Y. Peng, Y. Wang, J. Tu, Experimental and numerical studies on the thermal performance of ground heat exchangers in a layered subsurface with groundwater, *Renewable Energy*. 147 (2020) 620–629.
- [28] B.H. Dinh, G.H. Go, Y.S. Kim, Performance of a horizontal heat exchanger for ground heat pump system: Effects of groundwater level drop with soil–water thermal characteristics, *Applied Thermal Engineering*. 195 (2021).
- [29] F. Tang, H. Nowamooz, Factors influencing the performance of shallow Borehole Heat Exchanger, *Energy Conversion and Management*. 181 (2019) 571–583.
- [30] Y. Zhong, A. Bidarmaghz, G.A. Narsilio, N. Makasis, Thermo-hydraulic analysis in geothermal energy walls, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 132 (2023).
- [31] M. Szijártó, A. Galsa, Á. Tóth, J. Mádl-Szónyi, Numerical investigation of the combined effect of forced and free thermal convection in synthetic groundwater basins, *Journal of Hydrology*. 572 (2019) 364–379.
- [32] F. Najafian Jazi, O. Ghasemi-Fare, T.D. Rockaway, Natural convection effect on heat transfer in saturated soils under the influence of confined and unconfined subsurface flow, *Applied Thermal Engineering*. 237 (2024).
- [33] Q.I. Alqawasmeh, G.A. Narsilio, N. Makasis, M.J. Kreitmaier, The impact of soil layering and groundwater flow on energy pile thermal performance, *Geomechanics for Energy and the Environment*. 38 (2024).
- [34] W. Yang, C. Zhang, T. Sun, Y. Qiang, F. Wang, A. Liu, Experimental and numerical study on thermo-mechanical behaviour of energy pile under different constraints, *Applied Thermal Engineering*. 243 (2024).
- [35] B.L. Amatya, K. Soga, P.J. Bourne-Webb, T. Amis, L. Laloui, Thermo-mechanical behaviour of energy piles, *Géotechnique*. 62 (2012) 503–519.
- [36] Y. Lou, P. fei Fang, X. yu Xie, C.S.A. Chong, F. yuan Li, C. yang Liu, Z. jin Wang, D. yong Zhu, Numerical research on thermal response for geothermal energy pile groups under groundwater flow, *Geomechanics for Energy and the Environment*. 28 (2021).
- [37] S. Park, D. Lee, H.-J. Choi, K. Jung, H. Choi, Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete energy pile: Coil-type GHEX (ground heat exchanger), *Energy*, 81 (2015) 56-66.
- [38] Comsol, COMSOL Multiphysics™ Version 4/5: User's Guide and Reference Manual, (2018).
- [39] M.V. Lurie, Modeling of oil product and gas pipeline transportation, in: *Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation*, 2009, pp. 1-214.
- [40] J. Bear, Y. Bachmat, *Introduction to modeling of transport phenomena in porous media*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [41] A. Di Donna, Thermo-mechanical aspects of energy piles, *Ecole Polytechnique Federale De Lausanne*. 6145 (2014) 257.
- [42] 2018 COMSOL, *Subsurface Flow Module. User's Guide, Subsurface Flow Module*. (2018) 1–256.
- [43] D.J. Tritton, *Physical fluid dynamics*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [44] N. Batini, A.F. Rotta Loria, P. Conti, D. Testi, W. Grassi, L. Laloui, Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions, *Applied Thermal Engineering*. 86 (2015) 199–213.