سال چهارم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۶، ص ص ۱۹-۲۹
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
www.jrenew.ir
مقاله
تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۲۶
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۵

مکان‌یابی پمپ‌های زمین‌گرمایی حلقه بسته با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در مقیاس کل ایران

حسین عالم [۱]، محمود فلاحی [۲*]، صبا نحاس فرمانیه [۳]

۱- کارشناس ارشد زمین‌شناسی آبشناسی، زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز، شیراز
۲- کارشناس ارشد زمین‌شناسی آبشناسی، زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز، شیراز
۳- کارشناس ارشد ریاضی، ریاضی، دانشگاه شیراز، شیراز
* شیراز، mfallahi37@gmail.com

چکیده

منابع انرژی فسیلی پایان‌پذیر است و استفاده از آن‌ها باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی می‌گردد. لذا به منابع انرژی پاک و جایگزین نیاز است. پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته از این گونه انرژی‌ها محسوب می‌شوند، اما تاکنون مطالعه‌ی کاربردی در جهت استفاده از این سامانه در مقیاس کل ایران انجام نشده است. استفاده از روش‌های معمول در جهت کسب اطلاعات دقیق از شرایط محلی زمین برای نصب، نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های پرهزینه زمین-شناختی در مقیاس محلی است. در نتیجه، بهترین روش از نظر بهره‌وری اقتصادی در مقیاس کل ایران ، تلفیق لایه‌های اطلاعاتی پایه در سیستم اطلاعات جغرافیایی در یک فاز شناسایی مکانی، در قالب تهیه‌ی نقشه‌ی پایه‌ی پراکنش مکانی مناطق مستعد نصب پمپ‌های زمین‌گرمایی حلقه بسته می‌باشد. این نقشه در جهت تعیین و بررسی شرایط پایه، شامل سطوح هدایت گرمایی سنگ بستر، مهندسی خاک، مشخصه‌های اقلیمی و شرایط محیطی زمین نصب و کاربری زمین، و تلفیق آنها در سیستم اطلاعات جغرافیایی ایجاد شده است. این نقشه موجب مدیریت بهتر در مکان‌یابی مناطق مستعد، کاهش هزینه‌های طراحی و نصب اقتصادی پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته می‌گردد.

کلیدواژگان: پمپ حرارتی زمین‌گرمایی حلقه بسته، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مکان‌یابی

Site selection of closed loop geothermal pumps with Geographic Information System on the whole scale of Iran

Hossein Alem [1], Mahmoud Fallahi[2*], Saba Nahas Farmanieh[3]

1- Department of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.
2 -Department of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.
3- Department of Math Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

*** Shiraz, Iran, mfallahi37@gmail.com**

Abstract

Fossil energy sources are temporary and their use can cause many environmental pollutions, therefore, clean and alternative energy sources are needed. Geothermal pumps are closed loops of these energies but so far, an applied study on the use of this system has not been carried out on the whole scale of Iran. The use of routine methods for obtaining accurate information, from local ground conditions for installation, requires laboratory equipment and carrying out costly geological experiments on a local scale. As a result, the best method in terms of economic efficiency, on the whole scale of Iran, is the integration of the basic layers of information in the GIS in a spatial identification phase, to provide a basic distribution map for the installation of geothermal pumps. This map is designed to determine the baseline conditions, including the thermal conductivity of the bedrock, soil engineering, climatic and environmental conditions, land installation and land use, and their integration into the GIS. This map improves management in the following ways: site selection susceptible areas and reduce the cost of designing and installing geothermal pumps closed loops.

Keywords: Closed loop geothermal pumps, Geographic Information System, Site selection

۱- مقدمه

ضرورت پژوهش در راستای به کارگیری و گسترش منابع تجدیدپذیر انرژی مانند باد، نور خورشید، امواج دریا و انرژی زمین‌گرمایی چه از نوع دما بالا (زمین‌گرمایی[1]) و یا دمای پایین (پمپ‌های زمین‌گرمایی با منبع زمینی[2]) با توجه به محدودیت منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر و همچنین افزایش آلودگی های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه‌ی سوخت‌های فسیلی، امری اجتناب ناپذیر و قطعی است[۱]. در این میان پمپ های زمین‌گرمایی دمای پایین با توجه به کاهش قابل توجه در مصرف سوخت های فسیلی، به انتخاب رایجی برای سامانه‌های تهویه مطبوع تبدیل شده‌اند. استفاده از این انرژی بطور فزاینده‌ای در سراسر جهان در حال گسترش است، تا جایی که شمار استفاده از این سامانه تا سال ۲۰۱۰ به ده هزار واحد و تا سال ۲۰۱۵ به سی و پنج هزار واحد افزایش یافته است، و انتظار می رود تا سال ۲۰۲۰ به پنجاه و پنج هزار واحد افزایش یابد[۲]. این سامانه در قیاس با سامانه‌های پمپ زمین‌گرمایی دما بالا(ژئوترمال) به جای استفاده از گرمای مرکزی زمین به عنوان منبع تأمین گرما، از دمای ثابت زمین قشر سطحی خاک، نسبت به تغییر دمای فصلی، به عنوان منبع تعادل دمایی در تهویه مطبوع سازه های صنعتی و مسکونی بهره می‌برد، بنابراین بر خلاف سیستم‌های ژئوترمال، می‌توانند در هر مکانی نصب شوند[۳] (شکل ۱). اما عامل محدود کننده‌ی استفاده از این سامانه، هزینه های مطالعات اولیه تعیین مکان مناسب استفاده از سیستم می‌باشد. در عین حال عدم انجام چنین مطالعاتی در راستای شناسایی مکانی، منجر به کاهش بهره‌وری اقتصادی نسبت به هزینه‌های نصب اولیه و شرایط نگهداری خواهد شد. بنابراین، استفاده ی مناسب از این نوع سامانه، نیازمند تعیین شرایط بهینه ی اقتصادی زمین نصب می باشد[۴]. در نتیجه تعیین این مهم، می‌تواند معرف مکان مناسب جهت نصب و استفاده از این سامانه باشد[۵]. در راستای مطالعه-های اولیه‌ی فاز شناسایی مکانی، روش‌های متعددی ارائه شده است. مدل دی واریس، معادله انتشار گرما یک بعدی، مدل فی فلو[3] ، مدل عددی پکله و مدل های ترکیبی از جمله‌ی این روش‌ها هستند، که با تخمین عملکرد مبدل گرمایی برای انواع خاک و سنگ، کارایی بالایی نسبت به روش‌های دیگر دارند و می توانند شرایط لایه‌ای، آب‌شناختی، زمین‌شناختی و مهندسی ژئوتکنیکال خاک و تأثیر شرایط اقلیمی را در شبیه‌سازی در نظر بگیرند و با توجه به جریان جرم و انتقال گرمایشی خاک، می‌توانند ارائه‌دهنده‌ی مکان‌یابی مناسبی برای این سامانه باشند[۶]. اما از آنجا که پایه‌ی تحلیلی روش‌های مذکور، بر اساس اصول انتقال گرما و کسب اطلاعات دقیق از شرایط محلی زمین نصب می‌باشد، نیازمند استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های پرهزینه‌ی زمین شناختی در مقیاس محلی هستند، در نتیجه تکرار چنین اندازه‌گیری‌هایی در مقیاس بزرگ موجب افزایش هزینه‌های اولیه نصب، و غیر اقتصادی شدن پروژه می‌شود[۷].

در این زمینه، بهترین روش پیشنهادی با توجه به شرایط اقتصادی پروژه، برای ایالات متحده توسط رافرتی در سال۲۰۰۱ [۸] و برای انگلستان توسط دونینگ و گری در سال ۱۹۸۶[۹] رولین در سال ۱۹۹۵[۱۰] ، بارکر و همکاران در سال ۲۰۰۰[۱۱]، اندرکا برای آلمان در سال ۲۰۰۷ [۱۲] و باسبی در سال ۲۰۰۹ [۱۳]، ارائه شده است. این روش با بیانی تفضیلی به بررسی شرایط مؤثر در مکان یابی پمپ‌های زمین‌گرمایی می پردازد و با ایجاد الگویی پایه در قالب نقشه‌های پایه‌ی توزیع مکانی متغیرهای اصلی مؤثر در نصب، از تکرار آزمایش های پرهزینه در تعیین مکان مناسب جهت نصب جلوگیری می‌کند و امکان مکان‌یابی مناسب این مهم را فراهم کرده است.

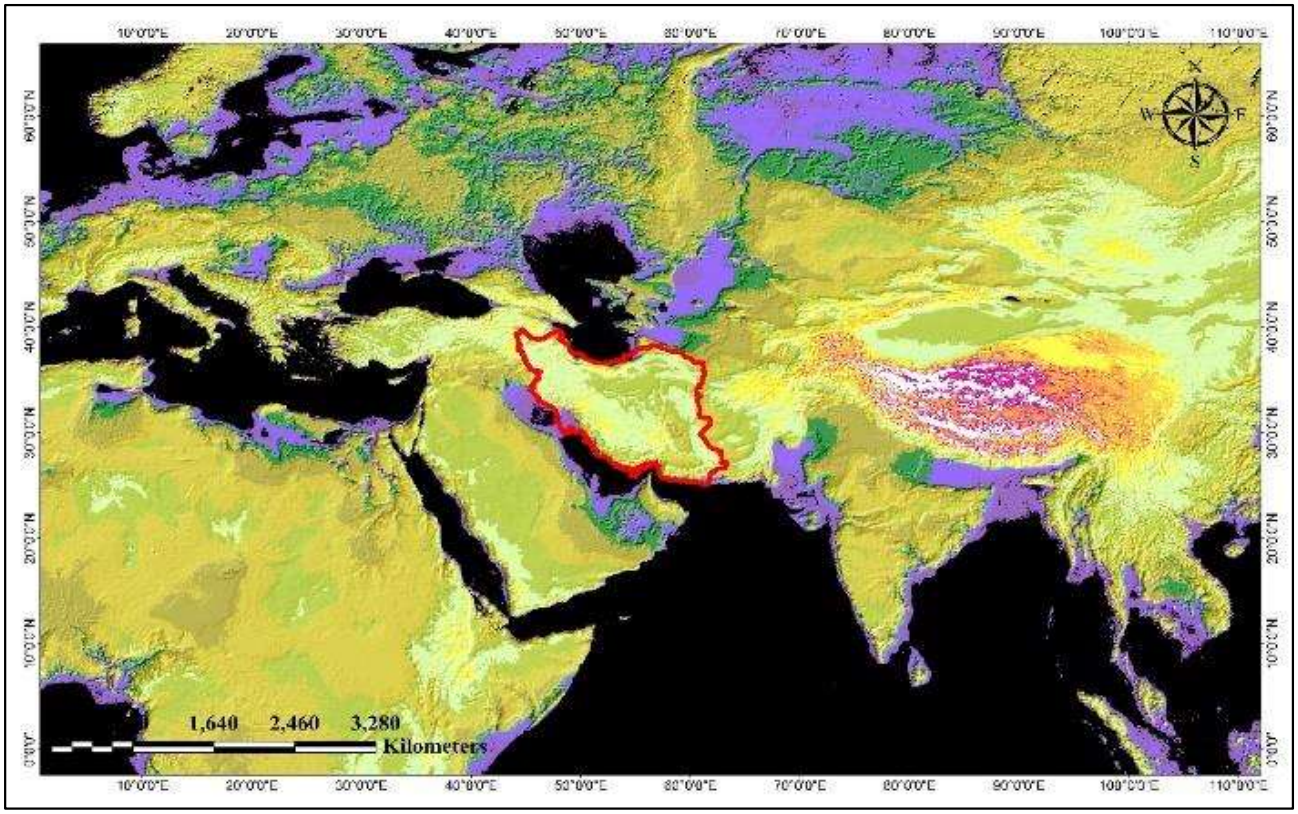
در پژوهش حاضر نیز، با بررسی شرایط مؤثر در نصب پمپ‌های زمین گرمایی در قالب نقشه‌های اطلاعاتی پایه و تلفیق آن‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی در قالب یک فاز شناسایی مکانی، با بیانی تحلیلی به پتانسیل سنجی مکانی مناطق مساعد استفاده از انرژی پمپ زمین‌گرمایی حلقه بسته[4] (با توجه به عدم وجود شرایط مناسب نصب سیستم های حلقه باز[5] در شرایط اقلیمی خشک ایران)پرداخته شده است[۱]. در روش محاسبه‌ی این مهم در این مقاله، معیارهای موردنظر با اهمیتی یکسان مورد بررسی قرار گرفته اند و این معیارها شامل معیارهای فنی زمین‌شناسی در قالب هدایت گرمایی، اقلیم شناسی، مهندسی خاک و پارامترهای محیطی و کاربری زمین می‌باشد. نتایج حاصل از این پروژه، پتانسیل سنجی مناطق مساعد جهت استفاده از انرژی زمین گرمایی برای سیستم های حلقه بسته با توجه به استانداردهای بین المللی، و معیارهای مورد بررسی با توجیه مناسب اقتصادی در قالب نقشه‌ی پایه در سیستم اطلاعات جغرافیایی قابل ارائه می‌باشد و امکان مدیریت و کاهش هزینه‌های نصب اولیه این سامانه را فراهم می کند.

۲- منطقه مورد مطالعه

با توجه به شکل ۲ منطقه‌ی مورد مطالعه کل کشور ایران با وسعت ۱۶۴۰۱۹۵ کیلومتر مربع است که در عرض جغرافیایی ۲۵ درجه و سه دقیقه شمالی تا ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی قرار دارد. حدود ۹۰ درصد از خاک کشور در محدوده فلات ایران واقع شده است. سرزمین ایران بطور کلی بیابانی تا کوهستانی و نیمه خشک بوده و میانگین ارتفاع آن بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریاست. بیش از نیمی از مساحت کشور را کوه‌ها و ارتفاعات، یک چهارم آن را دشت‌ها و کمتر از یک چهارم دیگر آن را نیز زمین‌های در دست کشت تشکیل می‌دهد. پست ترین نقطه داخلی با ارتفاع ۵۶ متر در چاله لوت و بلند ترین آن قله دماوند با ارتفاع ۵۶۱۰ متر در میان رشته کوه البرز قرار دارد، در کناره‌ی جنوبی دریای خزر ارتفاع زمین ۲۸ متر پایین تر از سطح دریای آزاد می‌باشد.

1 . Geothermal energy
2 . Ground source heat pump
3 . Fe flow
4 . closed-loop geothermal heat pumps
5 . open loop geothermal heat systems

شکل۱ پمپ زمین گرمایی حلقه بسته



شکل ۲ محدوده مورد مطالعه با نوار قرمز نشان داده شده است

۳- مواد و روش ها

همانطور که بیان شد، روش‌های متعددی برای مکان‌یابی سیستم‌های پمپ زمین گرمایی حلقه بسته وجود دارد، اما تعیین سیستماتیک هر یک از این عوامل به عنوان نقشه‌های پایه بصورت پیش فرض برای طراحی پمپ‌های زمین گرمایی سریع تر و کم هزینه‌تر خواهد بود. راه حل کلیدی برای تعیین همه‌ی عوامل مؤثر، تهیه الگوهای پایه تحت عنوان نقشه‌ی پایه با توجه به شرایط زمینی، اقلیم‌شناسی، خاک‌شناسی و محیطی و کاربری زمین است[۱۳].

به منظور برآورد مکانی مناسب نصب اقتصادی پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته و بررسی میزان توزیع و گسترش مکانی پارامترهای تعیین کننده‌ی این موضوع، از روش برهمنهشی لایه‌های اطلاعاتی پایه در محیط GIS استفاده شده است. در این روش، عبارت ریاضی مورد نیاز یک لایه ترکیبی یا انطباقی (برهمنهشی) در ارتباط با متغیرهای اصلی مکان‌یابی است، زیرا نصب اقتصادی پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته، نتیجه‌ی از مجموعه ویژگی‌های فیزیکی سنگ بستر، خاک و شرایط اقلیمی و محیطی است[۱۲]. این متغیرها وزن و اهمیت یکسانی در مکان‌یابی دارند. بنابراین، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر متغیر، مطابق سامانه رتبه‌بندی یکسان، ارزش گذاری شده است. با ترکیب متغیرهای ذاتی مکان نصب، یعنی هدایت گرمایی سنگ بستر، نوع خاک(ضخامت و دانه بندی)، شرایط اقلیمی(میزان رطوبت)، شرایط محیطی زمین نصب و اقتصادی زمین در دسترس، می توان مکان مناسب جهت نصب را ارزش گذاری و تعیین نمود و با وارد کردن لایه های اطلاعاتی مربوط به هر متغیر در محیط نرم افزار GIS، می توان مکان‌یابی مناسبی در جهت نصب اقتصادی پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته انجام داد[۸].

در نهایت نقشه ی پایه ی مکان‌یابی بصورت دسته داده‌های دیجیتالی[1] در سیستم اطلاعات جغرافیایی[2] ایجاد می‌شود. دسته داده‌های دیجیتالی با ارزیابی شرایط مکان نصب در هر منطقه می‌توانند شرایط مناسب برای نصب یک پمپ حرارتی حلقه بسته را پیش بینی کنند و هزینه‌های نصب را تا حدود زیادی کاهش دهند[۱۱].

۴- بحث و نتایج

تبدیل موضوع یا مسئله مورد بررسی به ساختاری سلسله مراتبی، مهم‌ترین قسمت فرآیند تحلیل سلسله مراتبی محسوب می‌شود. در مسئله مکانیابی پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته، هدف انتخاب محل مناسب برای نصب بهینه‌ی اقتصادی پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته از بین چند گزینه است. معیارها و زیرمعیارها، شامل عواملی هستند که باعث ایجاد تفاوت در گزینه‌ها می‌شود. هر معیاری دارای وزن خاصی است و اعتبار هر مکان برحسب معیارها سنجیده می‌شود.

در نتیجه برای مکان‌یابی در هر منطقه، مقادیر ارزش‌گذاری شده متغیر-های پایه شامل هدایت گرمایی سنگ بستر، شرایط اقلیمی(میزان رطوبت)، نوع خاک(ضخامت و دانه‌بندی) و شرایط محیطی زمین نصب و اقتصادی زمین در دسترس مربوط به هر یک از واحدهای فضایی در نقشه ی مکان‌یابی باید ایجاد شود. روش‌های مختلف چند ضابطه‌ای از جمله تجزیه و تحلیل رگرسیون (تناسب خطی با حداقل مربعات)، تجزیه و تحلیل نقطه ایده آل، و روش جمع خطی وزنی، برای مشخص کردن وزن هر متغیر به کار گرفته شد. بنابراین برای هر متغیر، ده رده و برای هر رده یک امتیاز از ۱ تا ۱۰، به صورت یک تصاعد حسابی در نظرگرفته می‌شود. در نهایت در نقشه‌ی تولید شده، امتیاز ۱ تا ۲۷، به ترتیب نشان‌دهنده ی نامساعدترین و مساعدترین مکان برای نصب پمپ زمین گرمایی حلقه بسته هستند. در ادامه، لایه های تولید شده در این روش شرح داده می شوند.

۴-۱- ارزش گذاری متغیرهای اطلاعاتی

۴-۱-۱- متغیر زمین شناسی سنگ بستر

زمین‌شناسی رفتار انرژی زمین‌گرمایی را تعریف می‌کند و شرایط مکان‌یابی و بازدهی اقتصادی پروژه وابسته به این مهم است. طراحی و نصب یک سیستم زمین‌گرمایی دمای پایین را نمی‌توان بدون تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به زمین‌شناسی انجام داد[۹]. طراحان نیاز به فهم مفاهیم اساسی انتقال حرارت در زمین و عوامل مختلف مؤثر بر تعیین هدایت گرمایی زمین نصب دارند. از این میان مهم‌ترین ویژگی حرارتی زمین، هدایت گرمایی می‌باشد.

روش های متعددی برای تعیین هدایت گرمایی وجود دارد، اما تعیین سیستماتیک هدایت گرمایی در انواع سنگ بصورت پیش فرض در طراحی پمپ‌های زمین گرمایی سریع‌تر وکم هزینه‌تر خواهد بود. نقشه‌های ناحیه‌ای سطحی و زیر سطحی با توجه به هدایت گرمایی سنگ و منطقه‌بندی لایه‌های سنگ‌شناسی و چینه شناسی می‌تواند هدایت گرمایی هر سازند را تا عمق واحد آن سازند تعیین کند. بسته به جنس و درصد نوع سنگ‌های تشکیل دهنده یک سازند زمین‌شناسی، گستره‌ای از هدایت گرمایی، برای هر سازند ارائه می-شود. کمینه، بیشینه و میانگین هدایت گرمایی اندازه گیری شده در نمونه‌های مختلف سنگ‌ها، با بهره گیری از تجربه و داده‌های طراحان حلقه‌های زمین گرمایی، همچنین داده‌های حاصل از حفاری گمانه‌های بررسی شده در مرکز داده‌های ملی علوم زمین[3] و داده‌های استاندارد پایه ژئوتکنیکی ملی[4] طی مطالعه‌های وسیع، جمع آوری و قابل استخراج است. با توجه به این مقادیر اندازه‌گیری شده و ضخامت نسبی و چگونگی قرارگیری لایه‌های سنگی نسبت به یکدیگر در یک سازند، امکان تعیین سیتماتیک هدایت گرمایی یک سازند در مقیاس محلی، فراهم شده است که در مقیاس وسیع قادر به تولید نقشه هدایت گرمایی پایه کلیه‌ی سازندهای زمین‌شناسی یک محدوده حتی در مقیاس یک کشور است. در این مقیاس نقشه پایه هدایت گرمایی بصورت دسته داده‌های زمین شناختی دیجیتالی در سیستم اطلاعات جغرافیایی نمایش داده می شود. دسته داده‌های زمین شناختی دیجیتالی با ارزیابی شرایط هدایت گرمایی زمین‌شناسی در هر منطقه می‌توانند شرایط زمینی برای نصب یک پمپ حرارتی با منبع زمینی را پیش بینی کنند و هزینه های نصب را تا حدود زیادی کاهش دهند.

مشخصات سنگ شناختی سطحی و سنگ بستر با استفاده از داده‌های نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ زمین شناسی کل ایران تهیه شده است. مدل نقشه پایه‌ی هدایت گرمایی کل ایران از سازندهای زمین‌شناسی بصورت زیر ایجاد شده است:

۴-۱-۱-۱- تعیین هدایت گرمایی تیپیک هر سنگ

هدایت گرمایی، ظرفیت یک ماده نسبت به رسانایی یا تسهیل انتقال گرما است که وابسته به انتشار گرما، ظرفیت گرمایی و چگالی است و به صورت معادله زیر بیان می‌شود :

1. Digital data (Digimap)
2. Geographic Information System (GIS)
3. National Geophysical Data Center (NGDC)
4. National Geotechnical Properties Database (NGBSD)

$$\alpha = \frac{\lambda}{Cp\ \rho} \quad (1)$$

که در این معادله α انتشار گرمایی بر حسب m^2s^{-1}، λ رسانایی گرمایی بر حسب $Wm^{-1}K^{-1}$، Cp ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب $Jkg^{-1}K^{-1}$ و ρ چگالی بر حسب $kg\ m^{-3}$است.

هدایت گرمایی برای بازه‌ای از سنگ‌های معمول رخنمون یافته در سطح، قابل بررسی است. نهشته‌های سطحی و سنگ‌ها همان کمپلکس‌های کانیایی مختلف هستند و بنابراین گستره وسیعی از مشخصه‌های گرمایی را نشان می-دهند. این گستره وسیع برای هر گونه طراحی سامانه منفرد با توجه به اطلاعات ویژه منطقه‌ای، از طریق بررسی‌های جامع آزمون پاسخ گرمایی قابل تخمین و بصورت داده برای انواع مختلف سنگ قابل تعمیم و ارائه است. این اطلاعات در مرکز داده‌های ملی علوم زمین و داده‌های استاندارد پایه ژئوتکنیکی جهانی و مقالات معتبر طی تحقیقات وسیع مطالعاتی در این مقاله فراهم آمده است، که قسمتی از آن در جدول زیر قابل مشاهده است(جدول ۱).

۴-۱-۱-۲- تعیین هدایت گرمایی تیپیک هر سازند

تعمیم هدایت گرمایی هر سنگ با توجه به شرایط زمینی شامل نوع و درصد تیپیک سنگ‌های تشکیل‌دهنده هر لایه، ضخامت لایه‌ها نسبت به یکدیگر، موقعیت نسبی لایه‌های سنگی در هر سازند و گستره‌ی جانبی آنها در هر مقطع زمین‌شناسی صورت گرفته است. بدین منظور، از نقشه‌ی زمین شناسی دیجیتال سازمان زمین شناسی و نقشه برداری ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ به عنوان نقشه‌ی پایه در نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، استفاده شده است. در این نقشه مشخصات پراکنش مکانی و همچنین مشخصات سنگ شناسی سازندها و واحدهای زمین‌شناسی کل ایران تشریح شده است. با توجه به داده‌های میانگین استاندارد هدایت گرمایی برای سنگ‌های مختلف موجود در جدول ۱ و بررسی‌های تکمیلی در خصوص نحوه ی پراکنش مکانی و ضخامت نسبی در مقیاس عمود بر سازند، میزان مشخصی از هدایت گرمایی (با واحد اندازه گیری W/MK)، محاسبه می‌شود. در نهایت، منجر به تعیین هدایت گرمایی گروه‌های سنگ‌شناسی و سازندهای زمین‌شناسی(در قالب ۴۱۹ گروه سنگ‌شناسی و ۲۵۰۰۰ برونزد سطحی) با رخنمون سطحی شده، نقشه هدایت گرمایی کل ایران برای اولین بار تنها در این مطالعه، ایجاد شده است(شکل ۳).

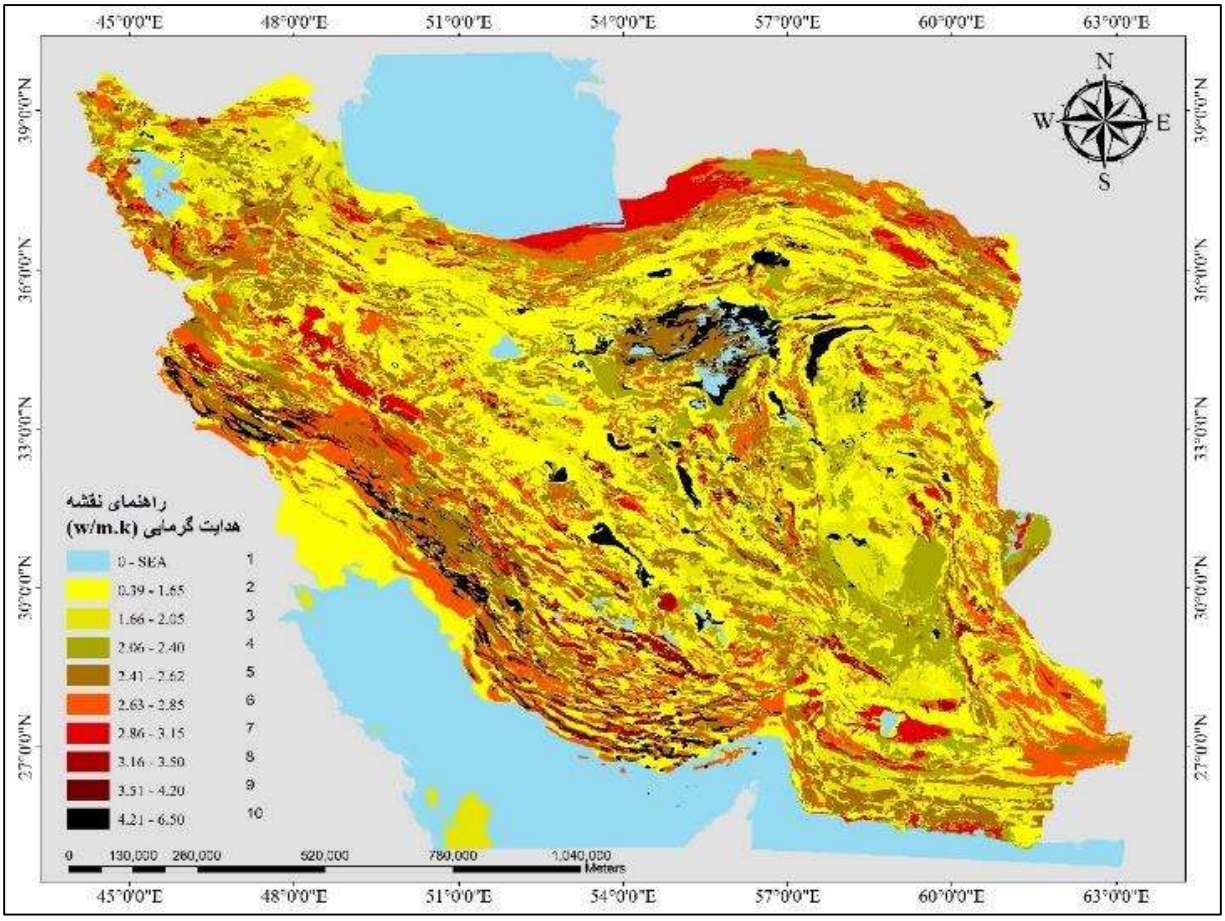
جدول۱ محدوده ی هدایت گرمایی استاندارد برای سنگ های مختلف[۱۰،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸]

لیتولوژی	هدایت گرمایی	منبع
ماسه سنگ	۲/۸±۴/۷	Barker1998
رس سنگ	۱/۸	Barker1998
گل سنگ	۰/۴±۱/۹	Barker1998
شیل	1.8±1.2	Barker1998
کائولینیت	1.8±0.3	Touloukian1970
گلئوکونیت	0.5±0.2	Touloukian1970
سیلتستون	2.7±0.2	Rollin1995
آهک	2.5±0.6	Barker1998
مارن	2.4±0.5	Barker1998
دولومیت	3.7±1.8	Barker1998
هالیت	5.9	Barker1998
چرت	1.4±0.5	Reiter1985
کوارتزیت	5.6±1.9	Barker1998
گرانیت	2.8±0.6	Barker1998
بازالت	2.8±0.6	Barker1998
توف	1.7±0.3	Raznjevic1976
کنگلومرا	2.1±1.0	Reiter1985
زغال سنگ	0.2±0.1	Reiter1985
لس	2.44±0.8	Raznjevic1976
رسوب معمولی	2.3±2.0	Beach1978

در نهایت این نقشه، به عنوان ورودی به نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی معرفی می‌شود. متغیر هدایت گرمایی در ده بازه بر اساس بیشترین بازدهی اقتصادی رده‌بندی شده است(جدول ۲)، و برای هر رده یک امتیاز از ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شد [۱۸]. لایه تولید شده برای این متغیر و امتیازهای مربوط به هر بازه از هدایت گرمایی بیانگر افزایش بازدهی اقتصادی، به ازای افزایش هدایت گرمایی و تعیین مکان مناسب‌تر جهت نصب سیستم‌های حلقه بسته است.

جدول۲ متغیر هدایت گرمایی و امتیازدهی به این متغیر

هدایت گرمایی	امتیاز	هدایت گرمایی	امتیاز
۰،۳۹-۰	۱	۲،۸۵-۲،۶۳	۶
۱،۶۵-۰،۳۹	۲	۳،۱۵-۲،۸۶	۷
۲،۰۵-۱،۶۶	۳	۳،۵-۳،۱۶	۸
۲،۴-۲،۰۶	۴	۴،۲-۳،۵۱	۹
۲،۶۲-۲،۴۱	۵	۶،۵-۴،۲۱	۱۰



شکل ۳ نقشه‌ی ارزش گذاری شده‌ی هدایت گرمایی سازندهای کل ایران

۴-۱-۲- متغیر شرایط اقلیمی

یکی از مهمترین پارامتر های مؤثر در مکان‌یابی اقتصادی پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته، اقلیمی با شرایط رطوبتی بالاتر است. این عامل خود را در افزایش هدایت گرمایی خاک(λ) محیط نصب نشان می‌دهد. دلیل وقوع این امر، ماهیت تغییرپذیر عوامل مؤثر بر هدایت گرمایی خاک نسبت به تغییرات رطوبت می‌باشد. افزایش رطوبت در خاک، موجب جایگزین شدن هوا توسط آب(که هادی قوی‌تری نسیت به هواست) و ارتباط بیشتر ذرات خاک با یکدیگر می‌شود، در نتیجه، موجب افزایش هدایت گرمایی خاک بصورت غیر خطی خواهد شد[۱۰]. بنابراین با در نظر گرفتن این مهم، نقشه‌ی تقسیم بندی شرایط اقلیمی کل ایران از لحاظ میزان رطوبت، به عنوان ورودی به نرم‌افزار معرفی می‌شود. این متغیر در هشت بازه بر اساس بیشترین بازدهی اقتصادی رده‌بندی شد(جدول ۳)، و برای هر رده یک امتیاز از ۱ تا ۸ در نظر گرفته شد [۱۸]. لایه تولید شده برای این متغیر و امتیازات مربوط به هر بازه، بیانگر افزایش بازدهی اقتصادی به ازای افزایش رطوبت و به تبع آن تعیین ارزش مکانی بالاتر نسبت به سایر نقاط، در سیستم مکان‌یابی است.

جدول ۳ متغیر شرایط اقلیمی و امتیازدهی به این متغیر

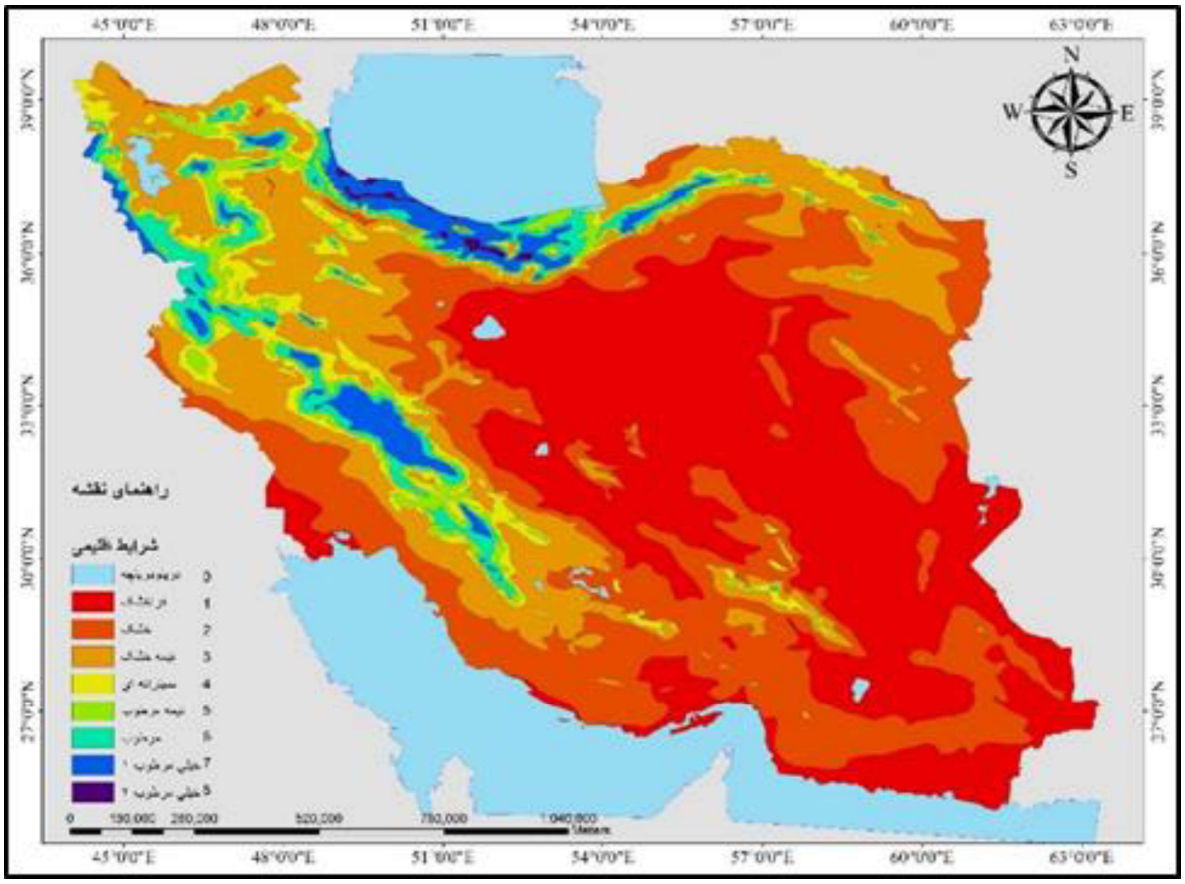
شرایط اقلیمی	امتیاز	شرایط اقلیمی	امتیاز
فرا خشک	۱	نیمه مرطوب	۵
خشک	۲	مرطوب	۶
نیمه خشک	۳	خیلی مرطوب	۷
مدیترانه ای	۴	فوق العاده مرطوب	۸

۴-۱-۳- شرایط زمین نصب

یکی دیگر از عوامل تعیین‌کننده در مکان‌یابی پمپ‌های زمین‌گرمایی حلقه بسته، در نظر گرفتن شرایط زمین نصب می‌باشد. این پارامتر، متغیرهای وسیعی از ویژگی‌های زمین نصب، شامل شرایط خاک‌شناسی(جنس، دانه‌بندی، ضخامت) و همچنین شرایط محیطی-کاربری زمین را در برمی‌گیرد. در ادامه به شرح هر عامل پرداخته شده است:

۴-۱-۳-۱- شرایط خاک‌شناسی

یکی از بارزترین خصوصیاتی که تعیین کننده ی قیمت نصب و در نظر گرفتن پارامتر اقتصادی در مکان‌یابی پمپ‌های زمین‌گرمایی حلقه بسته، بررسی شرایط خاک‌شناسی منطقه است. بررسی و ارزش‌گذاری مکانی این مهم به



شکل۴ نقشه ی ارزش گذاری شده ی شرایط اقلیمی کل ایران

سادگی ارزش گذاری هدایت‌گرمایی سنگ بستر نیست. چون علاوه بر در نظر گرفتن پارامتر جنس مرتبط با هدایت گرمایی، پارامتر بافت نیز تعیین کننده‌ی هدایت گرمایی خاک خواهد بود[۱۸]. علاوه بر این ضخامت خاک در تعیین شرایط بهینه‌ی اقتصادی حفاری نیز باید در نظر گرفته شود. در واقع ارزش-گذاری این مهم، با ترکیب متغیرهای مذکور قابل بررسی است. در ادامه به بررسی هر پارامتر پرداخته شده است.

۴-۱-۳-۱-۱- هدایت گرمایی خاک

هدایت گرمایی برای بازه‌ای از خاک‌های معمول رخنمون یافته در سطح، با توجه به مقادیر استاندارد جهانی در هر مکان قابل بررسی است. نهشته‌های سطحی و سنگ‌ها همان کمپلکس‌های کانیایی مختلف هستند و بنابراین مقادیر وسیعی از مشخصات گرمایی را نشان می‌دهند. این گستره‌ی وسیع برای هر گونه طراحی سامانه منفرد با توجه به اطلاعات ویژه منطقه‌ای، از طریق بررسی-های جامع آزمون پاسخ گرمایی قابل تخمین و بصورت داده برای انواع مختلف سنگ قابل تعمیم و ارائه است(جدول ۱).

۴-۱-۳-۱-۲-پارامتر بافت خاک

هر چه خاک دانه ریز تر باشد، هدایت گرمایی خاک نیز افزایش می یابد[۱۷]. بررسی کامل این پارامتر با بررسی تکامل خاک همراه است. در واقع هر چه خاک بیشتر به مرحله‌ی تکامل برسد، ذرات خاک دانه ریزتر خواهند شد و هدایت گرمایی نیز افزایش خواهد یافت.

۴-۱-۳-۱-۳-ضخامت خاک

از آنجایی که حفاری گمانه‌ها یا استقرار حلقه‌های زمینی، بیانگر سهم مهمی از قیمت‌های نصب می‌باشند، توجه به مهندسی خاک امری ضروری است. در واقع هزینه‌های حفاری یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در پتانسیل‌یابی پمپ زمین‌گرمایی دمای پایین می‌باشد. همانطور که مشخص است، قیمت حفاری و نصب در زمین‌های سخت و سازندهای سخت(سنگ بستر) بسیار بیشتر از حفاری در سازند های نرم و وجود ضخامت بالا از خاک می‌باشد. در واقع وجود ضخامت بالایی از خاک، تعیین‌کننده‌ی یکی از فاکتورهای اساسی در تعیین محل مکان‌های نصب می‌باشد[۱۹].

در نظر گرفتن سه متغیر مذکور در قالب یک عامل، موجب مدیریت بهتر و سریعتر در تعیین مکانی نصب می‌باشد. رده‌بندی خاک توسط سیستم ایالات متحده یکی از کامل‌ترین مباحثی است که این عوامل را به طور کامل در نظر گرفته است. این سیستم با در نظر گرفتن تکامل افق‌های قابل تشخیص خاک با توجه به شرایط اقلیمی مختلف، متغیرهای اساسی مذکور را در قالب جنس، اندازه ی ذرات و ضخامت خاک را مورد پوشش قرار داده است. در این رده‌بندی هر چه خاک به مرحله تکامل نزدیک شود، با در نظر گرفتن جنس، بافت و ضخامت خاک، شرایط منطقه‌ای برای نصب سیستم‌های پمپ زمین گرمایی حلقه بسته مناسب‌تر است، به تبع با افزایش درجه تکامل خاک با توجه به رده‌بندی سیستم ایالات متحده، ارزش مکانی نصب نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین با توجه به در نظر گرفتن عوامل مذکور، ارزش‌گذاری متناسب به این پارامتر تعلق گرفت(جدول ۴).

جدول۴ طبقه بندی تکامل خاک و امتیازدهی به این متغیر

رده بندی خاک	ارزش	رده بندی خاک	ارزش
Rocky outcrops	2	Inceptisols/ Vertisols	7
Entisols/ Inceptisols	3	Aridisols	8
Rocky outcrops/ Inceptisols	4	Mollisols	9
Entisols/ Aridisols	5	Alfisols	10
Inceptisols	6		

۴-۱-۳-۲- شرایط محیطی زمین نصب

شرایط کاربری و محیطی زمین نصب نیز سهمی قابل توجه در تعیین شرایط بهینه اقتصادی و به تبع تعیین مکان مناسب جهت نصب سامانه‌ی پمپ زمین-گرمایی بسته بعهده دارند. در واقع، بررسی این عامل، بعنوان یک عامل محدود کننده شناخته می‌شود. بدین معنی که با توجه به شرایط زمین نصب، امکان حفاری با توجه به شرایط محدودکننده ی محیطی و کاربری زمین باید بررسی شود. این شرایط محدود کننده، شامل وجود زمین‌های باتلاقی و مرداب‌ها و سنگلاخی(عدم امکان حفاری)، بسترهای سنگی(افزایش هزینه‌های حفاری در سنگ بستر بخاطر عدم وجود خاک)، سواحل ماسه‌ای (ناپایداری شرایط پوشش ماسه‌ای بخاطر اثر امواج و جذر و مد)، شن‌های روان (ناپایداری پوشش سنگ بستر)، صفحه‌ها و دشت‌های نمکی(افزایش هزینه‌های حفاری)، محدوده‌های شهری(عدم دسترسی به مساحت قابل نیاز برای نصب بخاطر گران بودن زمین)، دریاچه‌ها و محیط‌های آبی(عدم امکان نصب)، است. ارزش‌گذاری در این سیستم با توجه به عدم امکان نصب با پارامتر صفر، و شرایط محیطی نصب نامناسب با پارامتر ۱ (بیان‌کننده‌ی پایین‌ترین ارزش مکانی) بیان شده است. لازم به ذکر است که محیط‌های دریاچه ای خشک یا پلایا یک استثنا در این ارزش‌گذاری محسوب می‌شوند(جدول ۵).

جدول ۵ طبقه بندی شرایط محیطی و امتیازدهی به این متغیر

شرایط محیطی و کاربری	ارزش	شرایط محیطی و کاربری	ارزش
Marsh	۰	Bad lands	۱
Rocky lands	۰	coastal sand	۱
Salt flats	۰	Dune lands	۱
Plain salt	۰	Kalut	۱
Water body	۰	Playa	۶
Urban	۰		

۴-۲- تلفیق لایه های اطلاعاتی و محاسبه نرخ مکانی مناسب جهت نصب پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته

همان‌طور که گفته شد، به منظور برآورد مکانی مناسب نصب اقتصادی پمپ-های زمین‌گرمایی حلقه بسته و بررسی میزان توزیع و گسترش مکانی پارامتر-های تعیین کننده‌ی این موضوع، از روش برهم‌نشی نقشه‌های متغیرهای پایه مکان‌یابی سیستم‌های حلقه بسته در محیط نرم افزار GIS استفاده شده است. در این روش، عبارت ریاضی مورد نیاز باید یک لایه ترکیبی یا انطباقی (برهمنهشی) در ارتباط با متغیرهای اصلی مکان‌یابی باشد، مکان‌یابی در هر منطقه توسط مقادیر ارزش‌گذاری شده متغیرهای پایه شامل هدایت‌گرمایی سنگ بستر، شرایط اقلیمی(میزان رطوبت)، نوع خاک (جنس، ضخامت و دانه-بندی) و شرایط محیطی زمین نصب و اقتصادی زمین در دسترس مربوط به هر یک از واحدهای فضایی ارزش‌گذاری و نقشه‌های پایه نسبت به شرایط اقتصادی بهینه ایجاد شد. سپس با ترکیب متغیرهای ذاتی هر منطقه همان‌طور که بیان شد، می‌توان نرخ توزیع مکانی مناسب برای نصب سامانه پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته را محاسبه نمود. با وارد کردن لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر متغیر در محیط نرم افزار GIS، می‌توان با استفاده از معادله زیر مکان‌یابی مناسب برای این نوع سامانه‌ها را انجام داد:

$$R = C + G + S \qquad (۲)$$

در این معادله، R نقشه‌ی مکان‌یابی پمپ زمین گرمایی حلقه بسته، G هدایت‌گرمایی سنگ بستر، C شرایط اقلیمی و S خاک‌شناسی- شرایط محیطی و کاربری زمین نصب است. وزن هر یک از متغیرها در معادله برای نشان دادن اهمیت آن‌ها در تعیین مکان‌یابی مناسب برای پمپ زمین‌گرمایی حلقه بسته است. بنابراین، متغیرها تأثیرگذاری یکسانی در برابر یکدیگر برای مکان‌یابی دارند.

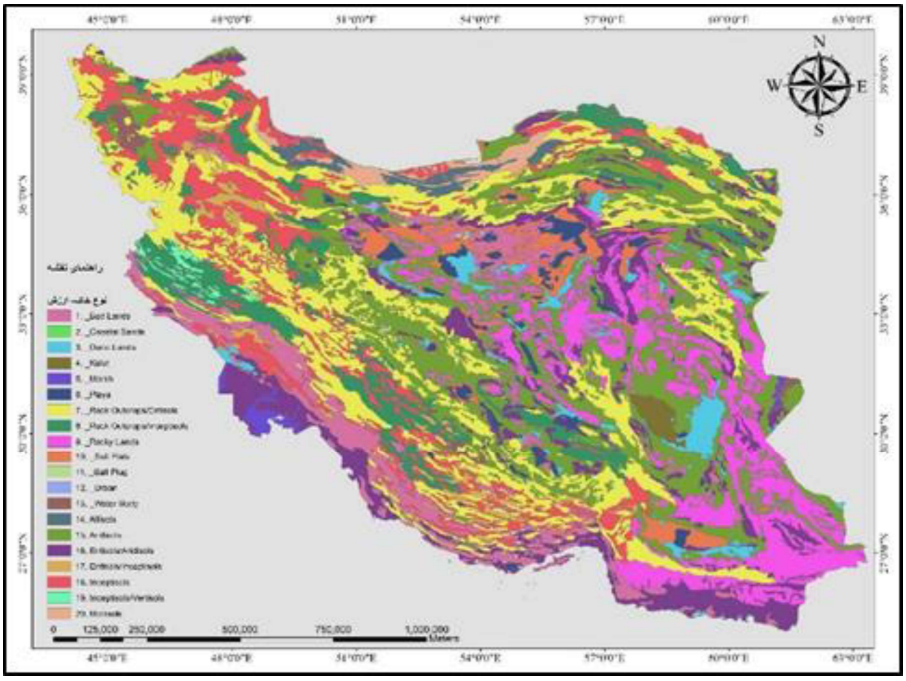
در نهایت به منظور برآورد نرخ متوسط توزیع مکانی مناسب پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته در منطقه مورد مطالعه، لایه‌های مختلف طبق معادله مذکور در محیط GIS با یکدیگر ترکیب شدند، و در نهایت نقشه‌ی مکان‌یابی پمپ‌های زمین‌گرمایی حلقه بسته ایجاد شد. به تبع با افزایش مقدار سهم ارزش مکانی حاصل شده، امکان نصب و استفاده از این سامانه افزایش می‌یابد(شکل ۶).

۵- نتیجه گیری

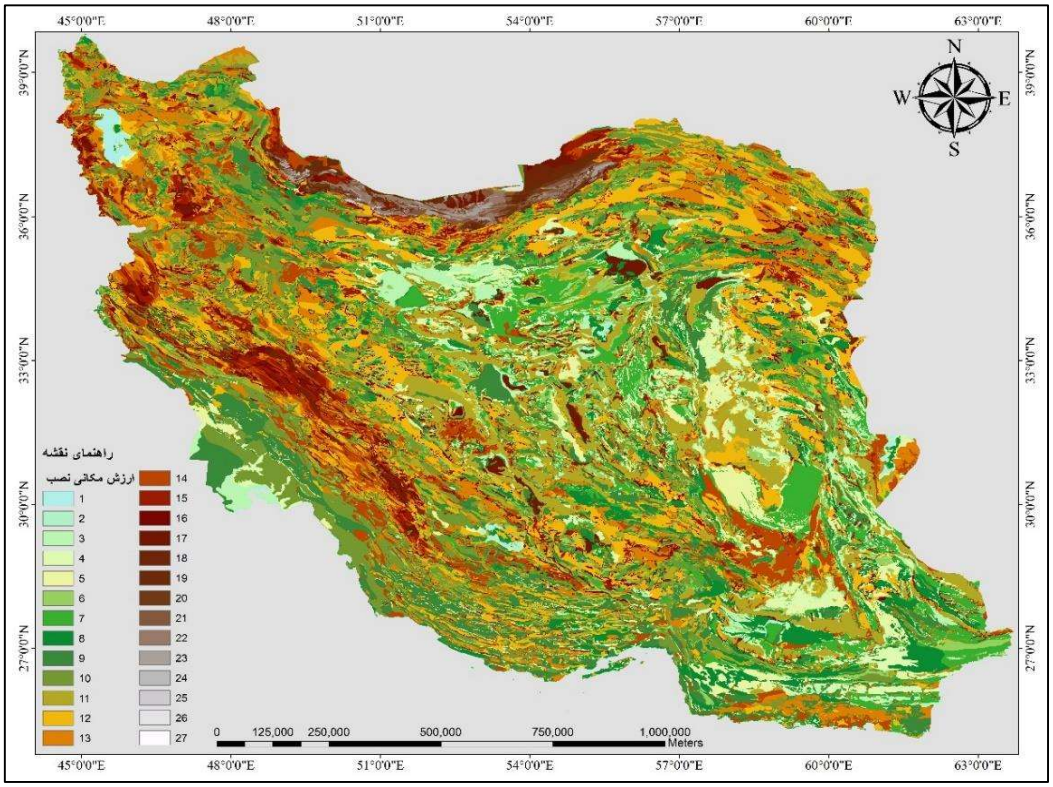
در این مطالعه، در جهت مکان‌یابی مناسب سیستم‌های پمپ زمین‌گرمایی حلقه بسته، مهم ترین فاکتورهایی که نصب و طراحی یک سامانه پمپ زمین گرمایی را متأثر می‌کند مورد بحث و بررسی قرار گرفت و در نهایت تحت عنوان داده‌های دیجیتال در نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی بصورت نقشه پایه‌ی مکان‌یابی مناطق مناسب ایران تهیه شد.

نتایج تحقیق فراهم کننده‌ی مناطق مستعد جهت مدیریت نصب و استفاده بهینه‌ی اقتصادی از پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته است. از نظر مکانی، بیشینه‌ی این ارزش در شمال ایران، و سپس در شمال‌غربی تا جنوب‌غربی ایران به موازات رشته کوه زاگرس، همچنین در شمال شرقی ایران، و کمینه‌ی آن در ناحیه مرکزی ایران در ناحیه ی دشت کویر و لوت، همچنین در ناحیه جنوب شرقی ایران قابل مشاهده می‌باشد.

مناطق مستعد نصب و با ارزش مکانی بالا در یک همبستگی بسیار خوب با مناطق با هدایت گرمایی بالاتر، شرایط اقلیمی مرطوب و تکامل بالاتر از خاک و شرایط محیطی مناسب زمین نصب هستند. چنین رابطه‌ای منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین، با در نظر گرفتن یک قانون رایج طراحی علمی و در نظر گرفتن عوامل مؤثر در نصب پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته از نظر اقتصادی با افزایش این ارزش مکانی، امکان استفاده از این نوع سیستم افزایش و با کاهش این میزان، کاهش می‌یابد. در نتیجه، نقشه پایه‌ی حاصل شده، توانایی مدیریت و مکان‌یابی سریع و اقتصادی بهره‌برداری از پمپ‌های زمینی حلقه بسته برای هر منطقه و در نتیجه برای کل ایران را فراهم می‌کند و منجر به پیشرفت سریع در توسعه ی استفاده از پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته با توجه به کاهش قابل ملاحظه‌ی در هزینه‌های طراحی اولیه می‌شود.



شکل ۵ نقشه ی ارزش گذاری شده ی شرایط خاک شناسی-محیطی کل ایران



شکل ۶ نقشه ی ارزش گذاری شده ی مکان یابی مناطق مستعد استفاده از پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته کل ایران

[1] V.A. Fry, Lessons from London: regulation of open-loop ground source heat pumps in central London, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.42(2009) pp 325-334.

[2] Banks, David, An introduction to 'thermogeology'and the exploitation of ground source heat, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* Vol. 42 (2009) pp 283-293.

[3] R. Curtis, J. Lund, B. Sanner, L. Rybach and G. Hellström, Ground source heat pumps–geothermal energy for anyone, anywhere: current worldwide activity, *In Proceedings World Geothermal Congress,* Antalya, Turkey, (2005) pp 24-29.

[4] Curtis, Robin, Earth Energy in the UK. *Geo-Heat Center Bulletin* Vol.22 (2001).

[5] K. Midttømme, D. Banks, R. Kalskin Ramstad, O. M. Sæther & H. Skarphagen, Ground-source heat pumps and underground thermal energy storage: energy for the future. *NGU Special Publication 11* (2008) pp 93-98.

[6] B. Sanner, C. Karytsas, D. Mendrinos and L. Rybach, Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, *Geothermics* Vol.32, (2003) pp.579-588.

[7] L. Rybach and B. Sanner, Ground source heat pump systems, the European experience, *GHC Bull*, Vol.21 (2000) pp.16-26.

[8] K. Rafferty, A guide to on-line geological information and publications for use in GSHP site characterization, *Geo-Heat Center Bulletin*, vol.22 (2001) pp.31-37.

[9] R.A. Downing, and D. A. Gray, Geothermal resources of the United Kingdom. *Journal of the Geological Society* Vol.143 (1986) pp 499-507.

[10] K.E. Rollin, A simple heat-flow quality function and appraisal of heat-flow measurements and heat-flow estimates from the UK Geothermal Catalogue." *Tectonophysics*, Vol.244 (1995) pp.185-196.

[11] J. A. Barker, et al., Hydro geothermal studies in the United Kingdom, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* Vol.31 (2000) pp 41-58.

[12] J. Ondreka, M.I. Rüsgen, I. Stober and K. Czurda, GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany—Possibilities and limitations, *Renewable Energy,* Vol. 32 (2007) pp. 2186-2200.

[13] HEEBPP (Housing Energy Efficiency Best Practice Programme). *Domestic Ground Source Heat Pumps: Design and installation of closed-loop systems*, Good Practice Guide 339 (2003).

[14] C. E. Barker, Y. Bone & M. D. Lewan, Fluid inclusion and vitrinite-reflectance geothermometry compared to heat-flow models of maximum paleotemperature next to dikes, western onshore Gippsland Basin, Australia, *International Journal of Coal Geology* Vol.37 (1998) pp 73-111.

[15] Y. S. Touloukian et al., Thermophysical Properties of Matter-The TPRC Data Series. Thermal Conductivity-Metallic Elements and Alloys, *THERMOPHYSICAL AND ELECTRONIC PROPERTIES INFORMATION ANALYSIS CENTER LAFAYETTE IN*, Vol.1 (1970).

[16] M. Reiter, and A.M. Jessop, Estimates of terrestrial heat flow in offshore eastern Canada", *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol .22(1985) pp.1503-1517.

[17] Raznjevic, Kuzman, *Handbook of thermodynamic tables and charts,* (1976).

[18] R.D.W. Beach, F.W. Jones and J.A. Majorowicz, Heat flow and heat generation estimates for the Churchill basement of the Western Canadian Basin in Alberta, Canada." *Geothermics*, Vol.16 (1987) pp 1-16.

[19] G.R. Beardsmore, *The thermal history of the Browse Basin and its implications for petroleum exploration*. Monash University(1996).