

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

حسین عالم^۱، محمود فلاحی^{۲*}، صبا نحاس فرمانیه^۲

۱ و 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 زمین‌گرمایی 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 زمین‌شناختی 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 زمین‌گرمایی 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 Alem¹, Mahmoud Fallahi^{2*}, Saba Nahas Farmanieh²

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

3- Department of Math Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

* Shiraz, Iran, mfallahi37@gmail.com

Received: 5 July 2017

Accepted: 10 September 2017

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

بررسی شرایط مؤثر در مکان یابی پمپ‌های زمین‌گرمایی می‌پردازد و با ایجاد الگویی پایه در قالب نقشه‌های پایه‌ی توزیع مکانی متغیرهای اصلی مؤثر در نصب، از تکرار آزمایش‌های 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^۴ (با توجه به عدم وجود شرایط مناسب نصب سیستم های حلقه باز^۵ 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 می‌کند.

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.

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^۱) و یا دمای پایین (پمپ‌های زمین‌گرمایی با منبع زمینی^۲) با توجه به محدودیت منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر و همچنین افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه‌ی سوخت‌های فسیلی، امری اجتناب‌ناپذیر 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 می‌رود 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، هزینه‌های 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 می‌باشد [۴]. در نتیجه تعیین این مهم، می‌تواند معرف مکان مناسب جهت نصب و استفاده از این سامانه باشد [۵]. در راستای مطالعه‌های اولیه‌ی فاز شناسایی مکانی، روش‌های متعددی ارائه شده است. مدل دی واريس، معادله انتشار گرما یک بعدی، مدل فی فلو^۳، مدل عددی پکله و مدل‌های ترکیبی از جمله‌ی این روش‌ها هستند، که با تخمین عملکرد میدل گرمایی برای انواع خاک و سنگ، کارایی بالایی نسبت به روش‌های دیگر دارند و می‌توانند شرایط لایه‌ای، آب-شناختی، زمین‌شناختی و مهندسی ژئوتکنیکال خاک و تأثیر شرایط اقلیمی را در شبیه‌سازی در نظر بگیرند و با توجه به جریان جرم و انتقال گرمایی 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 زمین‌شناختی 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 سال ۲۰۰۱ [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 باسی در سال ۲۰۰۹ [۱۳]، ارائه شده است. این روش با بیانی تفصیلی به

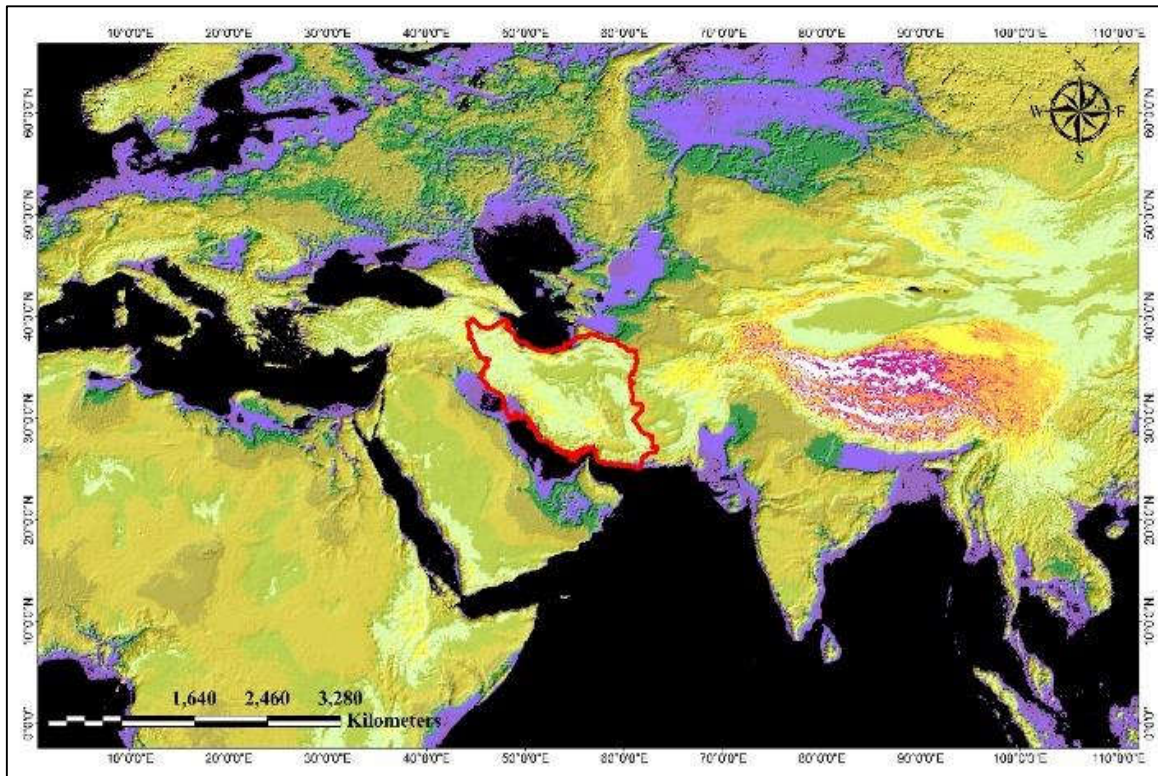
1. Geothermal energy
2. Ground source heat pump
3. Fe flow

4. closed-loop geothermal heat pumps
5. open loop geothermal heat systems





شکل ۱ پمپ زمین گرمایی حلقه بسته



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



فصلنامه علمی - تخصصی انرژی های تجدیدپذیر و نو - سال چهارم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۴

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 هزینه تر 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 کننده-ی این موضوع، از روش برهم‌نهی لایه‌های اطلاعاتی پایه در محیط GIS استفاده شده است. در این روش، عبارت ریاضی مورد نیاز یک لایه ترکیبی یا انطباقی (برهم‌نهی) 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، می‌توان مکان مناسب جهت نصب را ارزش گذاری و تعیین نمود و با وارد کردن لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر متغیر در محیط نرم افزار GIS، می‌توان مکان‌یابی مناسبی در جهت نصب اقتصادی پمپ‌های زمین گرمایی حلقه بسته انجام داد [۸].

در نهایت نقشه‌ی پایه‌ی مکان‌یابی بصورت دسته داده‌های دیجیتالی^۱ در سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ 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 نقشه‌ی 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 یک امتیاز از ۱ تا ۱۰، به صورت یک تصاعد حسابی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت در نقشه‌ی تولید شده، امتیاز ۱ تا ۲۷، به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نامساعدترین و مساعدترین مکان برای نصب پمپ زمین گرمایی حلقه بسته هستند. در ادامه، لایه‌های تولید شده در این روش شرح داده می‌شوند.

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.

روش‌های متعددی برای تعیین هدایت گرمایی وجود دارد، اما تعیین سیستماتیک هدایت گرمایی در انواع سنگ بصورت پیش فرض در طراحی پمپ‌های زمین گرمایی سریع‌تر و کم هزینه‌تر خواهد بود. نقشه‌های ناحیه‌ای سطحی و زیر سطحی با توجه به هدایت گرمایی سنگ و منطقه‌بندی لایه‌های سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی 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 می‌شود. کمینه، بیشینه و میانگین هدایت گرمایی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های مختلف سنگ‌ها، با بهره‌گیری از تجربه و داده‌های طراحان حلقه-های زمین گرمایی، همچنین داده‌های حاصل از حفاری گمانه‌های بررسی شده در مرکز داده‌های ملی علوم زمین^۳ و داده‌های استاندارد پایه ژئوتکنیکی ملی^۴ طی مطالعه‌های وسیع، جمع‌آوری 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 سیستماتیک هدایت گرمایی یک سازند در مقیاس محلی، فراهم شده است که در مقیاس وسیع قادر به تولید نقشه هدایت گرمایی پایه کلیدی سازندهای زمین‌شناسی یک محدوده حتی در مقیاس یک کشور است. در این مقیاس نقشه پایه هدایت گرمایی بصورت دسته داده‌های زمین‌شناختی دیجیتالی در سیستم اطلاعات جغرافیایی نمایش داده می‌شود. دسته داده‌های زمین‌شناختی 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 هزینه‌های نصب را تا حدود زیادی کاهش دهند.

مشخصات سنگ شناختی سطحی و سنگ بستر با استفاده از داده‌های نقشه ۱:۲۵۰۰۰ زمین‌شناسی 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:

3. National Geophysical Data Center (NGDC)

4. National Geotechnical Properties Database (NGBSD)

1. Digital data (Digimap)

2. Geographic Information System (GIS)



جدول ۱ محدوده ی هدایت گرمایی استاندارد برای سنگ های مختلف [۱۰،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸]

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

در نهایت این نقشه، به عنوان ورودی به نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی معرفی می شود. متغیر هدایت گرمایی در ده بازه بر اساس بیشترین بازدهی اقتصادی رده بندی 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 مناسب تر جهت نصب سیستم های حلقه بسته است.

جدول ۲ متغیر هدایت گرمایی و امتیازدهی به این متغیر

هدایت گرمایی	امتیاز	هدایت گرمایی	امتیاز
۰-۰.۳۹	۱	۲.۸۵-۲.۶۳	۶
۰.۳۹-۱.۶۵	۲	۳.۱۵-۲.۸۶	۷
۱.۶۶-۲.۰۵	۳	۳.۵-۳.۱۶	۸
۲.۰۶-۲.۴	۴	۴.۲-۳.۵۱	۹
۲.۴۱-۲.۶۲	۵	۴.۵-۴.۲۱	۱۰

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

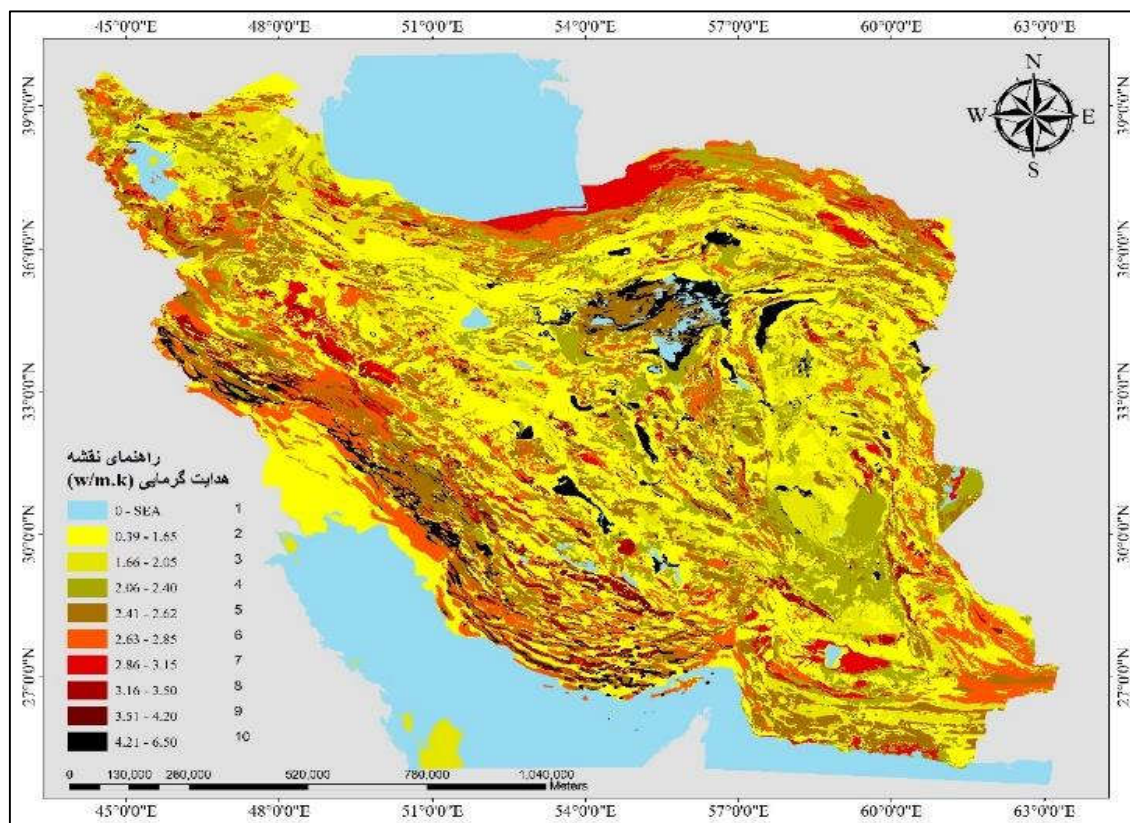
که در این معادله α انتشار گرمایی بر حسب m^2s^{-1} ، λ رسانایی گرمایی بر حسب $Wm^{-1}K^{-1}$ ، Cp ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب $Jkg^{-1}K^{-1}$ و ρ چگالی بر حسب $kg m^{-3}$ است.

هدایت گرمایی برای بازه های از سنگ های معمول رخنمون یافته در سطح، قابل بررسی است. نهشته های سطحی و سنگ ها همان کمپلکس های کانیاپی مختلف هستند و بنابراین گستره وسیعی از مشخصه های گرمایی را نشان می دهند. این گستره وسیع برای هر گونه طراحی سامانه منفرد با توجه به اطلاعات ویژه منطقه ای، از طریق بررسی های جامع آزمون پاسخ گرمایی قابل تخمین و بصورت داده برای انواع مختلف سنگ قابل تعمیم و ارائه است. این اطلاعات در مرکز داده های ملی علوم زمین و داده های 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 سنگ های تشکیل دهنده هر لایه، ضخامت لایه ها نسبت به یکدیگر، موقعیت نسبی لایه های سنگی در هر سازند و گستره ی جانبی آنها در هر مقطع زمین شناسی صورت گرفته است. بدین منظور، از نقشه ی زمین شناسی دیجیتال سازمان زمین شناسی و نقشه برداری ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ به عنوان نقشه ی پایه در نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، استفاده شده است. در این نقشه مشخصات پراکنش مکانی و همچنین مشخصات سنگ شناسی سازندها و واحدهای زمین شناسی کل ایران تشریح شده است. با توجه به داده های میانگین استاندارد هدایت گرمایی برای سنگ های مختلف موجود در جدول ۱ و بررسی های 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 می شود. در نهایت، منجر به تعیین هدایت گرمایی گروه های سنگ شناسی و سازندهای زمین شناسی (در قالب ۴۱۹ گروه سنگ شناسی 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).





شکل ۳ نقشه ارزش گذاری شده هدایت گرمایی سازندهای کل ایران

۲-۱-۴- متغیر شرایط اقلیمی

یکی از مهمترین پارامترهای 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 نسبت 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

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

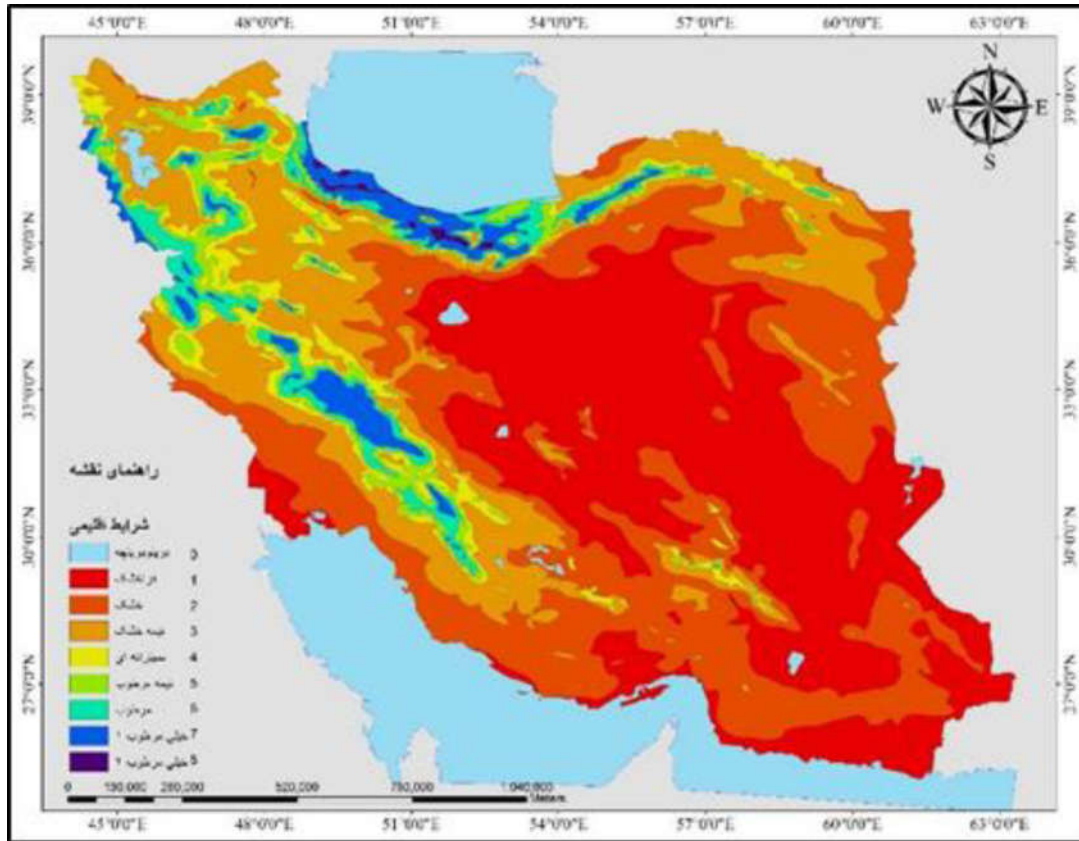
۳-۱-۴- شرایط زمین نصب

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

۱-۳-۱-۴- شرایط خاکشناسی

یکی از بارزترین خصوصیات که تعیین کننده ی قیمت نصب و در نظر گرفتن پارامتر اقتصادی در مکانیابی پمپهای زمین گرمایی حلقه بسته، بررسی شرایط خاکشناسی منطقه است. بررسی و ارزش گذاری مکانی این مهم به





شکل ۴ نقشه ی ارزش گذاری شده ی شرایط اقلیمی کل ایران

۴-۱-۳-۱-۳-۳-۳-۳ 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 پتانسیل یابی 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 زمین‌گرمایی 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، ارزش گذاری متناسب به این پارامتر تعلق گرفت (جدول ۴).

سادگی ارزش گذاری هدایت‌گرمایی سنگ بستر نیست. چون علاوه بر در نظر گرفتن پارامتر جنس مرتبط با هدایت گرمایی، پارامتر بافت نیز تعیین‌کننده ی 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.

۴-۱-۳-۱-۳-۱-۳-۳-۳ 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 گستره ی 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 (جدول ۱).

۴-۱-۳-۱-۳-۱-۳-۳-۳ پارامتر بافت خاک

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



ضخامت و دانه بندی) و شرایط محیطی زمین نصب و اقتصادی زمین در دسترس مربوط به هر یک از واحدهای فضایی ارزش گذاری و نقشه های پایه نسبت به شرایط اقتصادی بهینه ایجاد شد. سپس با ترکیب متغیرهای ذاتی هر منطقه همان طور که بیان شد، می توان نرخ توزیع مکانی مناسب برای نصب سامانه پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته را محاسبه نمود. با وارد کردن لایه های اطلاعاتی مربوط به هر متغیر در محیط نرم افزار GIS، می توان با استفاده از معادله زیر مکان یابی مناسب برای این نوع سامانه ها را انجام داد:

$$R = C + G + S \quad (2)$$

در این معادله، R نقشه ی مکان یابی پمپ زمین گرمایی حلقه بسته، G هدایت گرمایی سنگ بستر، C شرایط اقلیمی و S خاک شناسی - شرایط محیطی و کاربری زمین نصب است. وزن هر یک از متغیرها در معادله برای نشان دادن اهمیت آن ها در تعیین مکان یابی مناسب برای پمپ زمین گرمایی حلقه بسته است. بنابراین، متغیرها تأثیرگذاری یکسانی در برابر یکدیگر برای مکان یابی دارند.

در نهایت به منظور برآورد نرخ متوسط توزیع مکانی مناسب پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته در منطقه مورد مطالعه، لایه های مختلف طبق معادله مذکور در محیط GIS با یکدیگر ترکیب شدند، و در نهایت نقشه ی مکان یابی پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته ایجاد شد. به تبع با افزایش مقدار سهم ارزش مکانی حاصل شده، امکان نصب و استفاده از این سامانه افزایش می یابد (شکل ۶).

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، در جهت مکان یابی مناسب سیستم های پمپ زمین گرمایی حلقه بسته، مهم ترین فاکتورهایی که نصب و طراحی یک سامانه پمپ زمین گرمایی را متأثر می کند مورد بحث و بررسی قرار گرفت و در نهایت تحت عنوان داده های دیجیتال در نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی بصورت نقشه پایه ی مکان یابی مناطق مناسب ایران تهیه شد.

نتایج تحقیق فراهم کننده ی مناطق مستعد جهت مدیریت نصب و استفاده بهینه ی اقتصادی از پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته است. از نظر مکانی، بیشینه ی این ارزش در شمال ایران، و سپس در شمال غربی تا جنوب غربی ایران به موازات رشته کوه زاگرس، همچنین در شمال شرقی ایران، و کمینه ی آن در ناحیه مرکزی ایران در ناحیه ی دشت کویر و لوت، همچنین در ناحیه جنوب شرقی ایران قابل مشاهده می باشد.

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 رابطه ی منطقی به نظر می رسد. بنابراین، با در نظر گرفتن یک قانون رایج طراحی علمی و در نظر گرفتن عوامل مؤثر در نصب پمپ های 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 می یابد. در نتیجه، نقشه پایه ی حاصل شده، توانایی مدیریت و مکان یابی سریع و اقتصادی بهره برداری از پمپ های زمینی حلقه بسته برای هر منطقه و در نتیجه برای کل ایران را فراهم می کند و منجر به پیشرفت سریع در توسعه ی استفاده از پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته با توجه به کاهش قابل ملاحظه ی هزینه های طراحی اولیه می شود.

جدول ۴ طبقه بندی تکامل خاک و امتیازدهی به این متغیر

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

۴-۳-۲- 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 سامانه ی پمپ زمین گرمایی بسته بهنده دارند. در واقع، بررسی این عامل، بعنوان یک عامل محدود کننده شناخته می شود. بدین معنی که با توجه به شرایط زمین نصب، امکان حفاری با توجه به شرایط محدود کننده ی محیطی و کاربری زمین باید بررسی شود. این شرایط محدود کننده، شامل وجود زمین های باتلاقی و مرداب ها و سنگلاخی (عدم امکان حفاری)، بسترهای سنگی (افزایش هزینه های حفاری در سنگ بستر بخاطر عدم وجود خاک)، سواحل ماسه ای (ناپایداری شرایط پوشش ماسه ای بخاطر اثر امواج و جذر و مد)، شن های روان (ناپایداری پوشش سنگ بستر)، صفحه ها و دشت های نمکی (افزایش هزینه های حفاری)، محدوده های شهری (عدم دسترسی به مساحت قابل نیاز برای نصب بخاطر گران بودن زمین، دریاچه ها و محیط های آبی (عدم امکان نصب)، است. ارزش گذاری در این سیستم با توجه به عدم امکان نصب با پارامتر صفر، و شرایط محیطی نصب نامناسب با پارامتر ۱ (بیان کننده ی پایین ترین ارزش مکانی) بیان شده است. لازم به ذکر است که محیط های دریاچه ای خشک یا پلایا یک استثنا در این ارزش گذاری محسوب می شوند (جدول ۵).

جدول ۵ طبقه بندی شرایط محیطی و امتیازدهی به این متغیر

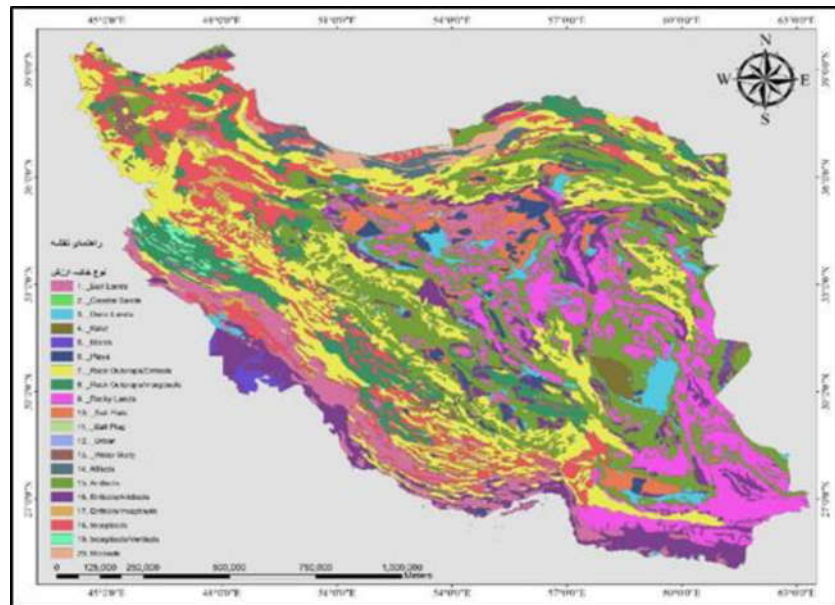
ارزش	شرایط محیطی و کاربری	ارزش	شرایط محیطی و کاربری
۱	Marsh	-	Bad lands
۱	Rocky lands	-	coastal sand
۱	Salt flats	-	Dune lands
۱	Plain salt	-	Kalut
۶	Water body	-	Playa
-	Urban	-	

۴-۲- تلفیق لایه های اطلاعاتی و محاسبه نرخ مکانی مناسب جهت نصب

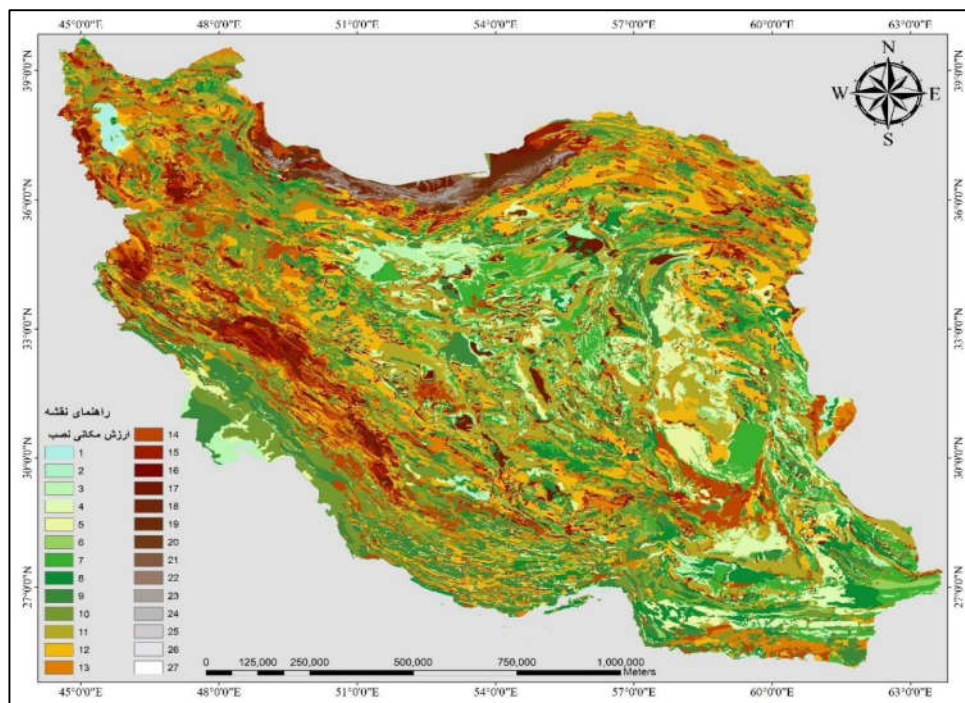
پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته

همان طور که گفته شد، به منظور برآورد مکانی مناسب نصب اقتصادی پمپ های زمین گرمایی حلقه بسته و بررسی میزان توزیع و گسترش مکانی پارامترهای تعیین کننده ی این موضوع، از روش برهم نشی نقشه های متغیر- های پایه مکان یابی سیستم های حلقه بسته در محیط نرم افزار GIS استفاده شده است. در این روش، عبارت ریاضی مورد نیاز باید یک لایه ترکیبی یا انطباقی (برهم نهشی) در ارتباط با متغیرهای اصلی مکان یابی باشد، مکان یابی در هر منطقه توسط مقادیر ارزش گذاری شده متغیرهای پایه شامل هدایت گرمایی سنگ بستر، شرایط اقلیمی (میزان رطوبت)، نوع خاک (جنس،





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



فصلنامه علمی - تخصصی انرژی های تجدیدپذیر و نو - سال چهارم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۸

۶- مراجع

- [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).
- [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. Mendrinis 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.

