

Research Paper

Exploration Methods for Recognizing Blind Geothermal Resources

Javad Nouraliee*, Davar Ebrahimi

Renewable Energy Department, Energy and Environment Research Center, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 03 April 2022

Revised 04 May 2022

Accepted 04 June 2022

Keywords:

Geothermal

Blind Geothermal resources

Exploration methods

Surface manifestations

ABSTRACT

Usually, geothermal resources have some surface manifestations. However, there are some resources without any surface evidences of geothermal activity. According to the recent studies, it is believed that in some parts of the earth this type of natural resources is more abundant than the known geothermal resources. These resources are called blind geothermal resources. The main reasons which prevent formation of surface manifestations are very thick cap rock, heavy rainfall in tropical regions, specific structural settings of the region, very deep water table and lateral underground flow of geothermal fluid to the ocean/sea. As blind resources have not any surface manifestations so some individual exploration methods are needed to find them. These methods are divided to two different levels, preliminary and detailed levels. Both of them include geological, geochemical and geophysical studies. In preliminary studies the size of the study area is very large (more than 10,000 km²) and the main target is to find geothermal prospects. In contrast, in detailed studies scientists search for precise characteristics of a given geothermal prospect. So far, the reasonable amount of blind geothermal resources has been determined in western part of the USA especially in Nevada State.

Introduction

Usually hydrothermal geothermal resources have some kind of surface manifestations. These manifestations are leakage of geothermal fluid to the earth's surface. Scientists use these signs to explore hydrothermal geothermal resources. The most common surface manifestations are warm springs. Also, there are some other manifestations such as geysers, fumaroles and sinter/travertine deposits. But other hydrothermal geothermal resources have not any evidences of geothermal activity at the surface. They are called blind geothermal resources. Most of them have been recognized accidentally. There are some natural phenomena to prevent the flow of geothermal fluid to the earth's surface. They are as follows: heavy rainfall in tropical regions, presence of very thick alluvial sediments, very deep hydrostatic water table, flowing geothermal fluid to the sea/ocean and structural setting of the region. Blind resources are found during the exploration of oil, gas and mineral resources. American scientists have precious experiences in the study of blind geothermal

resources in the western USA especially in Nevada State. Recent studies revealed that in some parts of the earth's crust number of blind geothermal systems is much higher than the number of conventional ones. American scientists have a numerous experiences in the exploration and application of blind geothermal systems especially in western parts of the country.

Materials and Methods

Since blind geothermal resources have been found accidentally during the exploration of other natural resources such as oil, gas and mineral resources so there has not been a systematic and individual exploration program for them. Due to the lack of surface manifestations finding these type of geothermal resources is not an easy job. They do have not any surface manifestations and should be determined indirectly. Therefore, scientists must apply some innovative methods and data to find them. The geological conditions of the study area have a vital role in the formation and determination of blind geothermal resources.

*Corresponding Author, Email: jnouraliee@nri.ac.ir

Discussion

Regarding the implementation of several exploration projects for the finding of blind geothermal resources it is cleared that exploration methods can be divided into two main categories, preliminary and detailed method. In preliminary or reconnaissance methods the main target is finding blind geothermal prospects in a very large area such as a country/province/state. Normally in this stage the study region is larger than 10,000 km². In some countries there are several types of nation-wide data such as geophysical and geochemical data which can be applied in preliminary studies. This task will

decrease exploration expenses by a considerable amount. In detailed studies scientists look for blind geothermal systems in a relatively small area which its area is usually less than 200 km². Both exploration stages include geological, geochemical and geophysical studies. Generally, geophysical methods are much more expensive than other methods. Based on the results of detailed studies drilling points would be determined. All preliminary and detailed studies have been summarized in Table 1. It should be noted that the exploration of a blind geothermal resource is a risky task.

Table 1. Summary of exploration methods for blind geothermal resources

Preliminary studies (Area > 10,000 km ²)	Geological Studies	Study on the main geological structures (quaternary faults) and the seismicity of the region
	Geochemical studies	Sampling and analyzing cold springs and water wells
	Geophysical studies	Gravity, thermal, MT and aeromagnetic surveying
Detailed studies (Area < 200 km ²)	Geological Studies	Generating detailed geological map and detailed map of quaternary faults and fractures
	Geochemical studies	Detailed sampling of cold springs and water wells, study on the concentration of soil gases
	Geophysical studies	Detailed gravity, thermal, MT and seismic surveying, LiDAR
	Exploration well drilling	Drilling of the first exploration well

Conclusions

In order to determine blind geothermal resources scientific studies should be implemented in two different levels, preliminary and detailed studies. In preliminary studies the following activities have been done:

- Preliminary studies include geological, geochemical and geophysical studies. Geological studies include generating the geological map and study on the quaternary faults and seismicity of the region. Geochemical studies comprise sampling and analyzing cold springs and water wells. Geophysical studies include gravity, thermal, MT and aeromagnetic surveying.
- Detailed Studies also include geological,

geochemical and geophysical studies and exploration drilling as well. In geological studies detailed (1: 25,000 or 1: 10,000) geological maps should be generated. Also, detailed study should be done on quaternary faults and fractures in the prospect area. In geochemical studies water samples from cold springs and water wells should be implemented carefully. Besides, soil gases (Rn, Th, He, H₂S, CH₄, CO₂, N₂, O₂, H₂ and Hg) should be studied precisely. Geophysical studies comprise detailed gravity, seismic, MT and thermal surveying (both in 100 m and 2 m depth). At the end of detailed studies, the first exploration well should be drilled at the determined point.

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

روش‌های شناسایی منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان

جواد نورعلیعی^{۱*}، داور ابراهیمی^۲

^۱ پژوهشگر ارشد گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو

^۲ عضو هیئت علمی گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۱/۱۴ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۲/۱۴ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۳/۱۴	منابع انرژی زمین‌گرمایی غالباً دارای نشانه‌های سطحی هستند. با این وجود، برخی از آن‌ها فاقد نشانه سطحی بوده و برآوردها نشان می‌دهد ممکن است در برخی از نقاط کره زمین تعداد آن‌ها بیش از منابع شناسایی شده نیز باشد. این دسته از منابع انرژی زمین‌گرمایی را منابع بی‌نشان می‌نامند. عواملی که مانع از پیدایش نشانه‌های سطحی در اطراف منبع مورد بررسی می‌شوند شامل ضخامت بسیار زیاد رسوبات آبرفتی یا سنگ پوشش، میزان بارش‌های جوی فراوان در مناطق استوایی، ساختار تکتونیکی خاص منطقه مورد نظر، عمق بسیار زیاد سطح ایستایی و هدایت زیرزمینی سیال زمین‌گرمایی به دریاها یا اقیانوس‌ها می‌شوند. با توجه به نبود نشانه سطحی در اطراف منابع یادشده، جهت شناسایی آن‌ها باید از روش‌های اکتشافی خاصی استفاده کرد. برای شناسایی منابع بی‌نشان باید مطالعات اکتشافی مقدماتی و تکمیلی را طراحی و اجرا کرد. در هر دو دسته از مطالعات یادشده، از اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی استفاده می‌شود. در مطالعات مقدماتی، ابعاد منطقه بسیار بزرگ است و با انجام آن‌ها محدوده منبع زمین‌گرمایی مورد نظر مشخص می‌شود. حال آنکه با اجرای مطالعات تکمیلی، مشخصات دقیق منبع زمین‌گرمایی مورد مطالعه، تعیین می‌شود. تا کنون با انجام پروژه‌های تحقیقاتی، تعداد قابل توجهی منبع زمین‌گرمایی بی‌نشان در غرب آمریکا (ایالت نوادا) شناسایی شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند.
کلیدواژه: انرژی زمین‌گرمایی اکتشاف روش‌های شناسایی منابع بی‌نشان نشانه‌های سطحی	

پوشش^۴ تشکیل شده است. به منظور بهره‌برداری از آب داغ یا بخار ذخیره‌شده در زیر زمین، باید چاهی را در سامانه زمین‌گرمایی مورد نظر حفر کرد و آن را از لایه‌های عمیق منطقه به سطح زمین منتقل کرد. سیال زمین‌گرمایی کاربردهای گوناگونی دارد. به کمک آن می‌توان هم در نیروگاه‌های زمین‌گرمایی برق تولید کرد و هم می‌توان از انرژی حرارتی آن به روش‌های مختلف استفاده کرد. به عنوان مثال، با استفاده از آب داغ می‌توان گرمایش منازل مسکونی و گلخانه‌ها را تأمین کرد. همچنین، می‌توان به کمک آب داغ به‌دست‌آمده از منبع انرژی

مقدمه
انرژی زمین‌گرمایی، یکی از انواع انرژی تجدیدپذیر است که از سیال زمین‌گرمایی (بخار، آب داغ یا مخلوطی از بخار و آب داغ) که در اعماق زمین قرار دارد، به دست می‌آید. محدوده‌ای از یک منطقه که سیال یادشده در آن محبوس شده است را سامانه^۱ زمین‌گرمایی می‌نامند. یک سامانه زمین‌گرمایی از اجزای مختلفی مانند سنگ مخزن^۲، منشأ حرارت^۳ و سنگ

* نویسنده مسئول

Email: jnouraliee@nri.ac.ir

1. Geothermal system

2. Reservoir rock

3. Heat source

4. Cap rock

یک منبع انرژی زمین‌گرمایی در اعماق زمین پی برد. عوارض زمین‌ساختاری، نقش مهمی در پیدایش نشانه‌های سطحی دارند؛ به این معنا که نشانه‌های یادشده، زمانی به وجود می‌آیند که سیال زمین‌گرمایی از طریق گسل‌ها، درزه‌ها، شکاف‌ها و یا واحدهای سنگی نفوذپذیر به سطح زمین رسیده باشند [۴].

در برخی موارد، ممکن است که بخشی از سیال یک منبع انرژی زمین‌گرمایی به سیستم زهکشی طبیعی یک منطقه، وارد شود و تغییراتی را در سیال مربوطه به وجود آورد. در این حالت، با نمونه‌برداری از آب رودخانه‌ها و دریاچه‌های موجود در منطقه و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها می‌توان به وجود یک منبع زمین‌گرمایی در اعماق منطقه اکتشافی پی برد [۵]. به دلیل اهمیت نشانه‌های سطحی، در مراحل ابتدایی مطالعات اکتشافی، متخصصان علوم زمین توجه ویژه‌ای به شواهد یادشده می‌کنند. نشانه‌های یادشده اطلاعات مفیدی را در خصوص مشخصات فیزیکی و شیمیایی منبع زمین‌گرمایی مربوطه خود در اختیار متخصصان حوزه اکتشاف قرار می‌دهند [۶ و ۷].

بر حسب دمای مخزن زمین‌گرمایی و میزان دبی سیال خروجی از آن، ممکن است نشانه‌های سطحی به صورت چشمه‌های آب گرم، گازفشان، سنگ‌های آتشفشانی جوان، سنگ‌های دگرسان‌شده، رسوبات سیلیسی و یا رسوبات تراورتنی باشند. البته، علاوه بر موارد یادشده می‌توان به زمین‌های گرم و داغ، پوشش گیاهی آسیب‌دیده، نواحی فاقد برف، گل‌فشان‌های داغ یا حوضچه‌های گل داغ و دریاچه‌های اسیدی آتشفشانی نیز اشاره کرد. در شکل ۱ تصاویری از متداول‌ترین نشانه‌های سطحی منابع انرژی زمین‌گرمایی نشان داده شده‌اند. به منظور آشنایی بیشتر در جدول ۱ نیز حالت فیزیکی هر یک از نشانه‌های سطحی یادشده ارائه شده است.

انواع منبع انرژی زمین‌گرمایی هیدروترمال

منابع انرژی زمین‌گرمایی هیدروترمال را می‌توان بر اساس معیارهای متفاوتی طبقه‌بندی کرد. متداول‌ترین معیارها شامل دمای منبع و نوع سیال موجود در منبع زمین‌گرمایی مربوطه می‌شوند. در ادامه، توضیح مختصری در خصوص هر یک از معیارهای یادشده ارائه می‌شود.

زمین‌گرمایی، آب استخرهای پرورش ماهی را نیز برای تولید بیشتر در فصول سرد سال گرم کرد و یا برف و یخ تشکیل شده روی پیاده‌روها و خیابان‌ها را ذوب کرد. در سال ۲۰۲۰، به کمک انرژی زمین‌گرمایی، ۱۵۹۵۰ مگاوات نیروگاه برق در سراسر جهان نصب شده است. کشورهای امریکا، اندونزی، فیلیپین، ترکیه و کنیا جزء کشورهای پیشرو در حوزه تولید برق از انرژی زمین‌گرمایی محسوب می‌شوند [۱]. کشورهای پیشرو در حوزه کاربرد مستقیم نیز کشورهای چین، امریکا، سوئد، آلمان و ترکیه هستند [۲].

منابع انرژی زمین‌گرمایی غالباً دارای یک یا چند نشانه سطحی^۱ هستند که با مشاهده و بررسی آن‌ها می‌توان از یک سو به وجود منابع یادشده در اعماق منطقه پی برد و از سوی دیگر، می‌توان تا حدودی خصوصیات سامانه زمین‌گرمایی مورد نظر را نیز شناسایی کرد. به عنوان مثال، چشمه‌های آب گرم یکی از نشانه‌های متداول سطحی منابع انرژی زمین‌گرمایی به شمار می‌روند. حال، چنانچه یک سامانه زمین‌گرمایی فاقد نشانه‌های سطحی باشد، آن را یک سامانه یا منبع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان می‌نامند. تجربه مطالعات و تحقیقات اجراشده در کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که احتمالاً تعداد منابع بی‌نشان در منطقه‌ای که دربردارنده یک منبع انرژی زمین‌گرمایی آشکار است، به مراتب بیشتر از منابع شناخته‌شده موجود است [۳]. به عنوان مثال، متخصصان پیش‌بینی کرده‌اند که فقط ۲۰ درصد منابع انرژی زمین‌گرمایی در منطقه گریت بیسین^۲ در ایالت نوادا (امریکا) شناسایی شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. بنابراین، با استفاده از روش‌های اکتشافی مختلف می‌توان منابع یادشده را شناسایی کرد. به این ترتیب، توسعه روش‌های اکتشاف و شناسایی منابع بی‌نشان می‌تواند منجر به شناسایی سامانه‌های زمین‌گرمایی بیشتری شود و در نتیجه، می‌توان با بهره‌برداری از منابع شناسایی شده، موجبات توسعه مناطق پیرامونی منابع یادشده را فراهم کرد.

نشانه‌های سطحی منابع انرژی زمین‌گرمایی

همان‌گونه که از نام آن‌ها برمی‌آید، نشانه‌های سطحی منابع انرژی زمین‌گرمایی، پدیده‌های طبیعی هستند که در سطح زمین به وجود می‌آیند و با مشاهده آن‌ها می‌توان به وجود

1. Surface manifestations
2. Great basin

نورعلیئی و ابراهیمی: روش‌های شناسایی منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان

حال حاضر، مبنای خاصی برای مرزبندی بین منابع یادشده وجود ندارد و محققان مختلف دماهای متفاوتی را در نظر می‌گیرند. در جدول ۲ انواع دسته‌بندی متداول منابع انرژی زمین‌گرمایی بر حسب دمای مخزن ارائه شده است.

تقسیم‌بندی بر اساس دمای سیال زمین‌گرمایی بر حسب دمای سیال زمین‌گرمایی، منابع یادشده را به سه دسته منابع حرارت بالا، حرارت متوسط و حرارت پایین تقسیم‌بندی می‌کنند. یادآوری این نکته ضروری است که در



شکل ۱. تصاویری از متداول‌ترین نشانه‌های سطحی منابع انرژی زمین‌گرمایی -الف) چشمه آب گرم، ب) گازفشان، ج) آب‌فشان، د) رسوبات تراورتنی [۸-۱۱]

جدول ۱. حالت فیزیکی نشانه‌های سطحی منابع انرژی زمین‌گرمایی

ردیف	نام نشانه سطحی	حالت فیزیکی	
		جامد	مایع
۱	چشمه آب گرم		گاز
۲	گازفشان		گاز
۳	آب‌فشان		گاز
۴	زمین‌های بخارفشان		گاز
۵	سنگ‌های آتشفشانی جوان		گاز
۶	سنگ‌های دگرسان شده		گاز
۷	رسوبات سیلیسی		گاز
۸	رسوبات تراورتنی		گاز
۹	زمین‌های گرم و داغ		گاز
۱۰	پوشش گیاهی آسیب‌دیده		گاز
۱۱	نواحی فاقد برف		گاز
۱۲	گلفشان‌های داغ/حوضچه‌های گل داغ		گاز
۱۳	دریاچه‌های اسیدی آتشفشانی		گاز

جدول ۲. انواع دسته‌بندی منابع انرژی زمین‌گرمایی بر حسب دمای مخزن [°C] [۶-۱۲]

Haenel (1988) Dickson (1990)	Benderitter & Cormy (1990)	Hochstein (1990)	Muffler & Cataldi (1978)	نوع منبع
>۱۵۰	>۲۰۰	>۲۲۵	>۱۵۰	حرارت بالا
---	۱۰۰-۲۰۰	۱۲۵-۲۲۵	۹۰-۱۵۰	حرارت متوسط
≥۱۵۰	<۱۰۰	<۱۲۵	<۹۰	حرارت پایین

جدول ۳. مقایسه مشخصات منابع انرژی زمین‌گرمایی هیدروترمال متعارف، پنهان و بی‌نشان [۱۷]

نوع منبع	نوع نشانه‌های سطحی
متعارف	دارای نشانه‌های سطحی حاوی سیال (بخار، گاز، آب داغ و آب گرم)
پنهان	دارای نشانه‌های سطحی فاقد سیال (رسوبات سیلیسی/تراورتنی و سنگ‌های دگرسان‌شده)
بی‌نشان	فاقد هر گونه نشانه سطحی

همان‌گونه که در جدول ۳ مشخص شده است، مهم‌ترین عامل برای تمایز منابع یادشده از یکدیگر، وجود داشتن یا نداشتن سیال در بخش‌های فوقانی آن‌ها در سطح زمین است. بدیهی است که به ترتیب از منابع متعارف تا منابع بی‌نشان، شناسایی منبع مورد نظر با سختی بیشتری همراه خواهد بود.

دلایل عدم پیدایش نشانه‌های سطحی

همان‌گونه که در بخش‌های قبلی مقاله به آن اشاره شد، منابع انرژی زمین‌گرمایی متعارف دارای طیف گسترده‌ای از نشانه‌های سطحی هستند. بدیهی است که عوامل طبیعی موجب پیدایش نشانه‌های یادشده در سطح زمین می‌شوند. با این وجود، در برخی موارد شرایط طبیعی حاکم بر منطقه در بردارنده منبع انرژی زمین‌گرمایی به گونه‌ای است که مانع از تشکیل نشانه‌های یادشده می‌شوند. عوامل متعددی باعث عدم پیدایش نشانه‌ها در سطح زمین می‌شوند. برخی از مهم‌ترین عوامل یادشده به شرح زیر هستند:

a) سنگ پوشش ضخیم

یکی از اجزای مهم یک سامانه زمین‌گرمایی، سنگ پوشش آن است. در واقع، سنگ پوشش مانع از خروج سیال زمین‌گرمایی از سامانه می‌شود. بنابراین، چنانچه سنگ پوشش سامانه زمین‌گرمایی بسیار ضخیم بوده و به‌ویژه حاوی سنگ‌های بسیار دانه‌ریز مانند شیل باشد، در آن صورت، سیال داخل مخزن، امکان خروج از آن و راهیابی به سطح زمین را نخواهد داشت.

تقسیم‌بندی بر اساس نوع سیال زمین‌گرمایی

همان‌گونه که در تعریف انرژی زمین‌گرمایی مطرح شد، منبع یادشده بر حسب شرایط طبیعی خود ممکن است حاوی آب داغ، بخار یا مخلوطی از هر دو باشد. به این ترتیب، بر حسب نوع سیال، منابع زمین‌گرمایی به انواع حاوی آب داغ، بخار غالب و دوفازی تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین عامل در این تقسیم‌بندی منابع انرژی زمین‌گرمایی، منشأ حرارت منبع مربوطه است. بنابراین، در منابع بخار غالب، منشأ حرارت، انرژی بسیار بیشتری را به سنگ مخزن و به‌طبع آب‌های جوی فرورونده منتقل می‌کند و سبب تشکیل بخار آب در مخزن زمین‌گرمایی مورد نظر می‌شود. البته، نکته شایان یادآوری آنکه در مقام مقایسه، منابع بخار غالب نسبت به سایر انواع منبع زمین‌گرمایی بسیار کمیاب و نادر هستند.

تقسیم‌بندی بر اساس نشانه‌های سطحی

با توسعه بهره‌برداری از منابع انرژی زمین‌گرمایی هیدروترمال و شناسایی منابع بیشتر، تقسیم‌بندی دیگری نیز برای منابع یادشده در نظر گرفته شد. ملاک اصلی این تقسیم‌بندی، وجود نشانه‌های سطحی و چگونگی پیدایش آن‌ها در سطح زمین است. بر اساس این تقسیم‌بندی، منابع انرژی زمین‌گرمایی هیدروترمال به سه دسته اصلی منابع متعارف^۱، منابع پنهان^۲ و منابع بی‌نشان^۳ دسته‌بندی می‌شوند. در جدول ۳ تفاوت‌های منابع یادشده ارائه شده است. [۱۷]

1. Conventional geothermal resources
2. Hidden geothermal resources
3. Blind geothermal resources

(b) ساختار تکتونیکی منطقه

گسل‌ها و شکستگی‌ها نقش مهمی در شکل‌گیری یک سامانه زمین‌گرمایی دارند. آن‌ها مجراهای مناسبی برای نفوذ آب‌های جوی به سامانه و همچنین، گردش آن در مخزن زمین‌گرمایی مربوطه هستند. با این وجود، گاهی اوقات شیوه پیدایش و ارتباط گسل‌ها در یک منطقه، مانع از خروج سیال زمین‌گرمایی از سامانه مورد نظر می‌شود. در این حالت، گسل‌ها همانند یک سد، از حرکت سیال به سمت سطح زمین جلوگیری می‌کنند. مشابه این حالت برای یکی از منابع زمین‌گرمایی حرارت پایین ایسلند رخ داده است. [۱۸]

(c) وجود بارش‌های جوی فراوان

ممکن است برخی از سامانه‌های زمین‌گرمایی واقع در مناطق استوایی فاقد نشانه‌های سطحی باشند. در این حالت، علت اصلی عدم پیدایش نشانه‌های سطحی، وجود بارش‌های جوی زیاد طی سال است. در حقیقت، آب حاصل از بارندگی‌ها به درون زمین، نفوذ می‌کند و در زیرزمین جریان می‌یابد. جریان‌های زیرزمینی یادشده، مانع حرکت سیال زمین‌گرمایی به سطح زمین می‌شوند.

(d) عمیق بودن سطح ایستابی

در مناطق کویری به دلیل کم بودن میزان بارندگی سالیانه، معمولاً سطح ایستابی در عمق زیادی قرار دارد. بنابراین، چنانچه در مناطق یادشده یک سامانه زمین‌گرمایی وجود داشته باشد، سیال موجود در سامانه یادشده پس از آمیخته شدن با سفره‌های آب زیرزمینی در اعماق بسیار زیاد قادر نیست که به سطح زمین راه یابد و در نتیجه، هیچ‌گونه نشانه سطحی نیز در سطح زمین به وجود نمی‌آید.

(e) هدایت سیال زمین‌گرمایی به دریا/اقیانوس

چنانچه سامانه‌های زمین‌گرمایی در فاصله کمی از دریاها/اقیانوس‌ها به وجود آمده باشند، در آن صورت ممکن است سیال زمین‌گرمایی پیش از آنکه به سطح زمین راه یابد به سمت دریا/اقیانوس هدایت شده و در اعماق زیاد وارد دریا/اقیانوس شود. نظیر این وضعیت در یکی از منابع انرژی زمین‌گرمایی ایسلند رخ داده است. [۱۸]

روش‌های شناسایی منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان منابع زمین‌گرمایی بی‌نشان در ابتدا به صورت تصادفی

شناسایی شدند. به عنوان نمونه، در منطقه امپریال ولی^۱ واقع در جنوب ایالت کالیفرنیا (امریکا) در حین اجرای مطالعات اکتشافی برای شناسایی منابع نفت، گاز و یا مواد معدنی، تعداد قابل توجهی منبع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان کشف شدند [۱۹]. در واقع، هنگام حفر چاه‌های اکتشافی به جای ورود چاه به منابع هیدروکربوری، بخار یا آب داغ با دمای ۲۶۰ یا ۳۱۶ درجه سانتی‌گراد از چاه مورد نظر خارج می‌شد [۲۰-۲۱]. بدون شک، مواجه شدن با این دسته از منابع انرژی زمین‌گرمایی بسیار هیجان‌انگیز بوده و سرمایه‌گذاران زیادی را به منظور بهره‌برداری از انرژی آن‌ها جلب کرد. پس از تولید برق با استفاده از منابع شناسایی شده، محققان به این فکر افتادند که روش‌شناسی خاصی را برای اکتشاف این دسته از منابع انرژی زمین‌گرمایی تهیه و تدوین کنند.

بررسی‌ها و مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند در برخی مناطق تعداد منابع بی‌نشان ممکن است بسیار زیاد باشند. به عنوان مثال، پژوهشگران بر اساس اطلاعات موجود برآورد کرده‌اند که تا کنون فقط ۲۰ درصد از منابع انرژی زمین‌گرمایی موجود در منطقه گریت بیسین واقع در ایالت نوادا (امریکا) شناسایی شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند [۲۲]. با بررسی مقالات پژوهشی موجود مشخص شد که پژوهشگران امریکایی در خصوص شناسایی منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان، پیشرو هستند و تا کنون پروژه‌های تحقیقاتی متعددی را در این خصوص و به‌ویژه در ایالات غربی امریکا اجرا کرده‌اند.

نکته مهم آنکه مراحل اکتشافی اولیه منابع بی‌نشان بسیار مهم هستند. معمولاً طی اجرای مطالعات یادشده، ابعاد منطقه اکتشافی بسیار بزرگ بوده و ممکن است ابعاد آن بیش از ده‌ها هزار کیلومتر مربع باشد. بدون شک، پس از شناسایی مناطق امیدبخش اولیه، باید مطالعات اکتشافی تکمیلی در هر یک از مناطق امیدبخش انجام شود. با توجه به توضیحات یادشده می‌توان روش‌های شناسایی منابع زمین‌گرمایی بی‌نشان را به دو دسته روش‌های اکتشافی مقدماتی (برای محدوده‌های بزرگ) و روش‌های اکتشافی تکمیلی (برای محدوده‌های کوچک) تقسیم کرد. در ادامه، توضیحات مفصل‌تری در خصوص روش‌های شناسایی یادشده ارائه می‌شود.

1. Imperial valley

روش‌های اکتشافی مقدماتی

هدف اصلی از برنامه‌ریزی و اجرای مطالعات اکتشافی مقدماتی، فقط شناسایی اولیه منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان است. به بیان دیگر، با اجرای روش‌های اکتشافی در این مرحله از مطالعات می‌توان محدوده تقریبی منابع زمین‌گرمایی را مشخص کرد. بنابراین، بدیهی است که برای شناسایی مشخصات دقیق منبع مورد نظر باید مطالعات دقیق‌تری را در منطقه اکتشافی انجام داد.

در این مرحله از مطالعات اکتشافی ابعاد منطقه مطالعاتی بسیار بزرگ بوده و ممکن است مساحت آن بیش از ده هزار کیلومتر مربع و در حد یک استان یا یک ایالت باشد [۳]. به منظور معرفی بهتر روش‌ها، آن‌ها را می‌توان به سه دسته اصلی روش‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی تقسیم کرد. نکته بسیار مهم آنکه در برخی کشورها، در گذشته، مجموعه‌ای از مطالعات اکتشافی زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی سیستماتیک انجام شده و یا در حال انجام است که از نتایج مطالعات یادشده می‌توان برای شناسایی منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان نیز استفاده کرد.

همان‌گونه که از نام آن‌ها برمی‌آید در این بخش از مطالعات، خصوصیات زمین‌شناسی مناطق اکتشافی مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرند. از آنجا که گسل‌ها نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری منابع انرژی زمین‌گرمایی دارند، بررسی آن‌ها در مطالعات زمین‌شناسی اهمیت بسیار زیادی دارد. مهم‌ترین فعالیت‌هایی که در مطالعات زمین‌شناسی صورت می‌پذیرند، عبارت‌اند از [۳]:

- بررسی وضعیت عمومی زمین‌ساختاری منطقه
- بررسی سن فعالیت گسل‌ها
- بررسی نرخ لغزش گسل‌های کوتاه‌تری
- بررسی نرخ تنش‌های تکتونیکی در مقیاس منطقه‌ای
- بررسی میزان لغزش و بازشدگی^۱ در گسل‌های کوتاه‌تری
- بررسی پراکندگی کانون زمین‌لرزه‌ها
- بررسی سازندهای زمین‌شناسی نفوذناپذیر [۲۳].

مطالعات ژئوشیمیایی

از آنجا که منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان، فاقد نشانه سطحی هستند، برای انجام مطالعات ژئوشیمیایی آن‌ها باید

از نمونه‌های تهیه‌شده از چشمه‌های آب سرد و چاه‌های آب استفاده کرد. به بیان دیگر، در این حالت، به جای نمونه‌برداری از چشمه‌های آب گرم، گازفشان‌ها و ... باید نمونه‌ها را از چاه‌های آب حفرشده در منطقه یا چشمه‌های آب سرد موجود در منطقه تهیه و آنالیز کرد.

هنگام اجرای مطالعات ژئوشیمیایی، کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در نمونه‌ها به دقت بررسی می‌شود و با انجام محاسبات زمین‌دماسنجی می‌توان دمای تقریبی منابع انرژی زمین‌گرمایی مرتبط با چشمه‌ها و چاه‌ها را محاسبه کرد. علاوه بر این، در برخی موارد با اطلاعات به‌دست‌آمده از چاه‌ها و چشمه‌ها می‌توان تا حدودی به وضعیت زمین‌ساختاری حاکم بر منبع انرژی زمین‌گرمایی مورد نظر نیز پی برد [۳]. به بیان دیگر، با بررسی ارتباط نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات زمین‌دماسنجی و گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه می‌توان به نقش وضعیت زمین‌ساختاری منطقه در پیدایش منبع زمین‌گرمایی مورد نظر پی برد.

مطالعات ژئوفیزیکی

در واقع، این روش‌ها مؤثرترین فعالیت‌هایی هستند که به منظور شناسایی منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان صورت می‌پذیرند. نکته بسیار مهم آنکه چنانچه در گذشته مطالعات ژئوفیزیکی سیستماتیک در سطح کشور، یک استان و یا یک ایالت انجام شده باشد، می‌توان به‌آسانی از نتایج آن‌ها استفاده کرد. بدیهی است که این موضوع موجب صرفه‌جویی قابل ملاحظه در هزینه مطالعات اکتشافی می‌شود. اما اگر مطالعات یادشده قبلاً انجام نشده باشد، باید مطالعات ژئوفیزیکی را در منطقه مورد نظر، طراحی و اجرا کرد. در مطالعات ژئوفیزیکی معمولاً از روش‌های زیر استفاده می‌شود [۳] و [۱۷].

- روش گرانی‌سنجی (ثقل‌سنجی)
- روش حرارت‌سنجی (اندازه‌گیری دما در عمق سه کیلومتری)
- مطالعات مگنتوتلوریک
- روش مغناطیس‌سنجی هوایی
- مطالعات دورسنجی (ویژه مناطق دارای پوشش گیاهی انبوه)

1. Dilation

- تهیه نقشه دقیق گسل های کواترنری و زون های شکستگی
- بررسی وضعیت نفوذپذیری سازندهای زمین شناسی منطقه و اطراف آن
- بررسی دقیق سنگ های دگرسان شده (در صورت وجود)
- بررسی دقیق رسوبات تراورتنی/سیلیسی (در صورت وجود)

مطالعات ژئوشیمیایی

- در مطالعات اکتشافی تکمیلی نیز به دلیل نبود نشانه های سطحی برای انجام مطالعات ژئوشیمیایی باید چشمه های آب سرد و چاه های آب موجود در منطقه را مورد بررسی قرار داد. در مطالعات ژئوشیمیایی تکمیلی فعالیت ها و اقدامات زیر صورت می پذیرند. [۲۴-۳۱]
- آنالیز شیمیایی نمونه های آب چشمه های آب سرد
 - آنالیز شیمیایی نمونه های آب چاه های آب - با مشاهده ناهنجاری های قابل مشاهده در چشمه های آب سرد و چاه های آب می توان ساختارهای انتقال دهنده سیال زمین گرمایی در اعماق منطقه اکتشافی را نیز شناسایی کرد .
 - اندازه گیری میزان غلظت گازهای موجود در خاک و بررسی میزان پراکندگی آن ها در منطقه اکتشافی شامل گازهای H_2 ، O_2 ، N_2 ، S ، Rn ، Th ، He ، H و Hg .
 - بررسی نسبت ایزوتوپی $^4He/^3He$ نمونه های آب به منظور شناسایی ارتباط نمونه ها با فعالیت های ماگمایی در منطقه

مطالعات ژئوفیزیکی

- این دسته از مطالعات اکتشافی نقش بسیار تعیین کننده ای در شناسایی منابع انرژی زمین گرمایی بی نشان دارند، زیرا به کمک آن ها می توان از یک سو محدوده منبع زمین گرمایی مورد نظر را با دقت مشخص کرد و از سوی دیگر، می توان با استفاده از سایر اطلاعات مفید) مانند اطلاعات زمین شناسی (موقعیت حفر چاه های زمین گرمایی را نیز در منطقه اکتشافی تعیین کرد. به منظور انجام مطالعات ژئوفیزیکی فعالیت ها و اقدامات زیر صورت می پذیرند [۳ و ۱۷]:
- مطالعات گرانی سنجی

به منظور اثربخشی بیشتر مطالعات ژئوفیزیکی بهتر است که به طور هم زمان از حداقل دو روش ژئوفیزیکی استفاده شود. دلیل اصلی این موضوع، مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعات ژئوفیزیکی است. به این ترتیب که اگر اطلاعات به دست آمده از روش های ژئوفیزیکی مختلف یکدیگر را تأیید کنند، احتمال وجود یک منبع انرژی زمین گرمایی در منطقه اکتشافی به شدت افزایش می یابد.

تفسیر یکپارچه کلیه نتایج به دست آمده

پس از انجام مطالعات اکتشافی یادشده، حجم قابل توجهی از داده ها و اطلاعات ارزشمند در خصوص منطقه اکتشافی به دست می آید که با انتقال نتایج یادشده به محیط نرم افزاری GIS، می توان تمامی داده ها را به طور یکپارچه مورد بررسی و تحلیل دقیق قرار داد. بدیهی است که پس از تحلیل و تفسیر یکپارچه اطلاعات، منطقه یا مناطق امیدبخش شناسایی خواهند شد. در این مرحله بر اساس اطلاعات مربوط به هر منطقه می توان مناطق شناسایی شده را بر حسب معیارهای گوناگون اولویت بندی کرد.

روش های اکتشافی تکمیلی

این روش ها شامل فعالیت هایی می شوند که پس از شناسایی مناطق امیدبخش انجام می شوند. در این مرحله از مطالعات اکتشافی وسعت مناطق کمتر از مرحله قبلی است. به دلیل نبود نشانه های سطحی، همانند مطالعات اکتشافی پیشین باید از روش های اکتشافی غیرمستقیم کمک گرفت. مطالعات تکمیلی را نیز می توان به سه دسته مطالعات زمین شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی تقسیم کرد. البته، بدیهی است که پس از پایان یافتن مطالعات تکمیلی، عملیات حفاری چاه های اکتشافی نیز در منطقه مورد نظر انجام خواهد شد. در ادامه، روش های اکتشافی با جزئیات بیشتری معرفی می شوند:

مطالعات زمین شناسی

پس از شناسایی محدوده منطقه امیدبخش زمین گرمایی، باید با طراحی و اجرای مطالعات دقیق، خصوصیات زمین شناسی منطقه یادشده را به طور کامل مورد بررسی قرار داد. در حین اجرای مطالعات زمین شناسی تکمیلی موارد زیر انجام می شوند:

- تهیه نقشه زمین شناسی دقیق منطقه به مقیاس یک ده هزارم یا یک بیست و پنج هزارم

مطالعات اکتشافی تکمیلی. در مطالعات مقدماتی، هدف اصلی از اجرای مطالعات، شناسایی مناطق امیدبخش زمین‌گرمایی در یک محدوده بسیار بزرگ است. در این حالت مساحت منطقه مطالعاتی ممکن است در ابعاد یک استان یا بخشی از یک کشور باشد. با اتمام مطالعات مقدماتی، نقشه‌ای کوچک‌مقیاس از منطقه مطالعاتی به دست می‌آید که در آن مناطق امیدبخش بر حسب اطلاعات هر منطقه، اولویت‌بندی شده‌اند. اما در مطالعات اکتشافی تکمیلی، ابعاد منطقه مطالعاتی نسبت به مطالعات مقدماتی، بسیار کوچک‌تر بوده و حدود ۲۰۰-۳۰۰ کیلومتر مربع است. در مطالعات تکمیلی با گردآوری داده‌های علمی مختلف، اطلاعات بسیار ارزشمندی در خصوص منطقه امیدبخش مورد نظر به دست می‌آید. چنانچه نتایج حاصل از مطالعات تکمیلی امیدوارکننده باشد، تعداد یک یا چند حلقه چاه اکتشافی در منطقه مطالعاتی حفر می‌شود. یادآور می‌شود که در هر یک از مطالعات اکتشافی، اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی اهمیت بسیار زیادی دارند. شایان یادآوری است که مقدار ریسک مطالعات اکتشافی برای منابع زمین‌گرمایی بی‌نشان به مراتب بیشتر از منابع زمین‌گرمایی هیدروترمال متعارف است.

منابع

- [1]. Hutterer, G.W., "Geothermal Power Generation in the world, 2015-2020, Update Report", Proceedings World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, 2020.
- [2]. Lund, J.W., and Toth, A.N., "Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review, Proceedings World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, 2021.
- [3]. Faulds, J.E., Hinz, N.H., Coolbaugh, M.F., Ramelli, A.R., Glen, J.M., Ayling, B.F., Wannamaker, Ph.E., Deoreo, S., Siler, D.L., and Craig, J.W., "Vectoring into Potential Blind Geothermal Systems in the Granite Springs Valley Area, Western Nevada: Application of the Play Fairway Analysis at Multiple Scales", PROCEEDINGS, 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2019.
- [4]. Wohletz, K. and Heiken, G, "Volcanology and Geothermal Energy", University of California Press, 1992, 450pp.

- مطالعات LiDAR
 - مطالعات حرارت‌سنجی
 - با حفر گمانه‌های کم‌عمق (حدود ۱۰۰ متر)
 - با اندازه‌گیری دمای زمین در عمق ۲ متری
 - مطالعات لرزه‌نگاری
 - مطالعات مگنتوتلوریک
- تفسیر یکپارچه داده‌ها و تعیین محل حفر چاه‌های اکتشافی**
- با اجرای تمامی مطالعات یادشده اطلاعات بسیار ارزشمند و مفیدی در خصوص منطقه زمین‌گرمایی مورد نظر به دست می‌آید. در این مرحله از مطالعات اکتشافی با انتقال همه داده‌ها به محیط نرم‌افزاری GIS و تجزیه و تحلیل دقیق آن‌ها می‌توان موارد زیر را مشخص کرد:
- گسترش جغرافیایی منبع انرژی زمین‌گرمایی مورد نظر در سطح زمین
 - گسترش منبع در اعماق منطقه اکتشافی
 - دمای تقریبی منبع
 - ساختارهای زمین‌شناسی موجود در محدوده منبع
 - تعیین موقعیت دقیق محل حفر چاه‌های اکتشافی
- بنابراین، با حفر چاه‌های اکتشافی و آزمایش چاه‌ها می‌توان به طور مستقیم خصوصیات مخزن زمین‌گرمایی مورد نظر را مشخص کرد.

نتیجه‌گیری

منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان آن دسته از منابع زمین‌گرمایی هستند که فاقد نشانه سطحی هستند. منابع بی‌نشان غالباً به طور تصادفی و طی اکتشاف سایر منابع طبیعی مانند منابع نفت و گاز و مواد معدنی شناسایی شده‌اند. با توجه به نبود نشانه سطحی، شناسایی منابع بی‌نشان باید به طور غیرمستقیم صورت پذیرد. از آنجا که منابع یادشده به‌تازگی مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند، همچنان روش‌شناسی خاصی برای اکتشاف آن‌ها تهیه و تدوین نشده است. با این‌وجود، به تدریج که اهمیت آن‌ها افزایش می‌یابد، کارشناسان و پژوهشگران بیشتری اقدام به شناسایی آن‌ها می‌کنند. با توجه به بررسی مقالات، گزارش‌ها و سایر مستندات معتبر موجود، می‌توان روش‌های اکتشاف منابع انرژی زمین‌گرمایی بی‌نشان را به دو دسته عمده تقسیم کرد: مطالعات اکتشافی مقدماتی و

- [5].Nicholson, K., "Geothermal Fluids, chemistry and Exploration techniques", springer publishing co., 1993, 263 pp.
- [6].Lienau , P.J.and Lunis , B.c., " Geothermal Direct Use Engineering and Design Guide book ", Oregon Institute of Technology (OIT), 1998,445 pp.
- [7].Watson, A.,” Geothermal Engineering, Fundamentals and Applications”, Springer Publishing Co., 2013, 346pp.
- [8].www.britannica.com/Sciences/hot-spring
- [9].Yardley, B.W.D., and Bodnar, R.S., “Fluids in the continental Crust, Geochemical perspective”, vol.3, No.1, April 2014.
- [10].Witt, M.L.I, Fischer, T.P., Pyle, D.M., Yang,T.F. and Zellmer, G.f., ”Fumarole compositions and mercury Emissions from the Tatun volcanic field , Taiwan: Results from multi –components gas Analyzer , portable mercury spectrometer and Direct sampling Techniques “ Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008,178pp.
- [11]. Nouraliee, J., Ebrahimi, D., Porkhial, S., Rahmani, M.R., and Sheikholeslami, F., “Geothermal Resource Assessment in Derik Region, (NW-Iran).” Journal of Tethys, Vol. 4, 1, 2016.
- [12]. Muffler, L.J.P. and Cataldi, R. “Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources. Geothermics, 7, 1978.
- [13]. Hochstein, M.P., in book: Small Geothermal resources - A guide to Development and Utilization Edition: Chapter: 2. Classification and assessment of Geothermal Resources Publisher: UNITAR/UNDP Centre on small Energy Sources - Rome Italy, 1990.
- [14]. Benderitter, Y. and Cormy, G. “Possible approach to geothermal research and relative cost estimate.” In: Dickson MH and Fanelli M (editors), Small geothermal resources, UNITARRJNDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy, 1990.
- [15]. Haenel, R. “Definition and assessment of resources. In: Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria, Switzerland (Ed. by Haenel, R. and Staraste, E.) Verlag Th. Schaefer, Hannover, 1988.
- [16]. Dickson, M.H. and Fanelli, M., “Small geothermal resources: a guide to development and utilization”, Rome: UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, 1990.
- [17]. Forson, C., Faulds, J.E., and Wannamaker, Ph., “Prospecting for a Blind Geothermal System Utilizing Geologic and Geophysical Data, Seven Troughs Range, Northwestern Nevada”, Geothermal Resource Transactions, Vol. 38, 2014.
- [18].Axelsson, G., Björnsson, G., Egilson, Th., Flóvenz, O.G., Gautason, B., Hauksdóttir, S., Ólafsson, M., Smáráson, O.B., and Sæmundsson, K., “Nature and Properties of Recently Discovered Hidden Low-Temperature Geothermal Reservoirs in Iceland”, Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005.
- [19]. Garg, S.K., J.W. Pritchett, and J. Combs. “Exploring for hidden geothermal systems.” Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.
- [20]. Koenig, J.B.: Geothermal exploration in the western United States, Geothermics, Special Issue 2, 1970.
- [21]. Rex, R.W., Babcock, E.A., Biehler, S., Combs, J., Coplen, T.B., Elders, W.A., Furgerson, R.B., Garfunkel, Z., Meidav, T., and Robinson, P.T.: Cooperative geological-geophysical-geochemical investigations of geothermal resources in the Imperial Valley area of California. Final Report (FY-1971), Contract No. 2194, Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, 1971.
- [22]. Brook, C. A., Mariner, R. H., Mabey, D. R., Swanson, J. R., Guffanti, M., and Muffler, L. J. P., “Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures > 90 degrees C, in Muffler, L. J. P., ed., Assessment of Geothermal Resources of the United States-۱۹۷۸” U.S. Geological Survey Circular 790, 1979, 163 p.
- [23].Nouraliee, J., and Ebrahimi, D., “Study on the Role of Shemshak Formation in Creation of some Geothermal Resources in Iran”, Proceedings World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, 2021.
- [24].Richards, M., and Blackwell, D., “A difficult search: why Basin and Range systems are hard to find”, Geothermal Resources Council Bulletin, v. 31, 2002.
- [25].Klusman, R.W., J.N. Moore, and M.P. LeRoy, “Potential for surface gas flux measurements in exploration and surface evaluation of geothermal resources.” Geothermics, v. 29, 2000.
- [26].Lewicki, J.L., and C.M. Oldenburg, “Near-surface CO₂ monitoring and analysis to detect hidden geothermal systems.” Proceedings, 30th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, SGP-TR-176, 2005.

- [27]. Hanson, M.C., C. Oze, and T.W. Horton, "Identifying blind geothermal systems with soil CO₂ surveys." *Applied Geochemistry*, v. 50, 2014.
- [28]. Voltattorni, N., A. Sciarra, and F. Quattrocchi, "The application of soil-gas technique to geothermal exploration: Study of hidden potential geothermal systems." *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*, 2010.
- [29]. Lechler, P.J., and M. Coolbaugh, "Gaseous emissions from Steamboat Springs, Brady's Hot Springs, and Desert Peak geothermal systems, Nevada." *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 31, 2007.
- [30]. Dobson, P.F., B.M. Kennedy, M.E. Conrad, T. McLing, E. Mattson, T. Wood, C. Cannon, R. Spackman, M. van Soest and M. Robertson, "He Isotopic Evidence for Undiscovered Geothermal Systems in the Snake River Plain." *Proceedings, 40th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, SGP-TR-۲۰۴*, 2015.
- [31]. Conrad, M.E., Dobson, P.F., E.L. Sonnenthal, B.M. Kennedy, C. Cannon, W. Worthing, T. Wood, G. Neupane, E. Mattson, and T. McLing, "Application of isotopic approaches for identifying hidden geothermal systems in southern Idaho. *Proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, SGP-TR-209*, 2016.