

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 سیستم های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

روش های شناسایی منابع انرژی زمین گرمایی بی نشان

جواد نورعلیانی^{۱*}، داور ابراهیمی^۲

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

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

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله: تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۱/۱۴ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۲/۱۴ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۳/۱۴	منابع انرژی زمین گرمایی غالباً دارای نشانه های سطحی هستند. با این وجود، برخی از آن ها فاقد نشانه سطحی بوده و برآوردها نشان می دهد ممکن است در برخی از نقاط کره زمین تعداد آن ها بیش از منابع شناسایی شده نیز باشد. این دسته از منابع انرژی زمین گرمایی را منابع بی نشان می نامند. عواملی که مانع از پیدایش نشانه های سطحی در اطراف منبع مورد بررسی می شوند شامل ضخامت بسیار زیاد رسوبات آبرفتی یا سنگ پوشش، میزان بارش های جوی فراوان در مناطق استوایی، ساختار تکتونیکی خاص منطقه مورد نظر، عمق بسیار زیاد سطح ایستایی و هدایت زیرزمینی سیال زمین گرمایی به دریاها یا اقیانوس ها می شوند. با توجه به نبود نشانه سطحی در اطراف منابع یاد شده، جهت شناسایی آن ها باید از روش های اکتشافی خاصی استفاده کرد. برای شناسایی منابع بی نشان باید مطالعات اکتشافی مقدماتی و تکمیلی را طراحی و اجرا کرد. در هر دو دسته از مطالعات یاد شده، از اطلاعات زمین شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی استفاده می شود. در مطالعات مقدماتی، ابعاد منطقه بسیار بزرگ است و با انجام آن ها محدوده منبع زمین گرمایی مورد نظر مشخص می شود. حال آنکه با اجرای مطالعات تکمیلی، مشخصات دقیق منبع زمین گرمایی مورد مطالعه، تعیین می شود. تا کنون با انجام پروژه های تحقیقاتی، تعداد قابل توجهی منبع زمین گرمایی بی نشان در غرب آمریکا (ایالت نوادا) شناسایی شده و مورد بهره برداری قرار گرفته اند.

مقدمه

انرژی زمین گرمایی، یکی از انواع انرژی تجدیدپذیر است که از سیال زمین گرمایی (بخار، آب داغ یا مخلوطی از بخار و آب داغ) که در اعماق زمین قرار دارد، به دست می آید. محدوده ای از یک منطقه که سیال یاد شده در آن محبوس شده است را سامانه^۱ زمین گرمایی می نامند. یک سامانه زمین گرمایی از اجزای مختلفی مانند سنگ مخزن^۲، منشأ حرارت^۳ و سنگ

پوشش^۴ تشکیل شده است. به منظور بهره برداری از آب داغ یا بخار ذخیره شده در زیر زمین، باید چاهی را در سامانه زمین گرمایی مورد نظر حفر کرد و آن را از لایه های عمیق منطقه به سطح زمین منتقل کرد.

سیال زمین گرمایی کاربردهای گوناگونی دارد. به کمک آن می توان هم در نیروگاه های زمین گرمایی برق تولید کرد و هم می توان از انرژی حرارتی آن به روش های مختلف استفاده کرد. به عنوان مثال، با استفاده از آب داغ می توان گرمایش منازل مسکونی و گلخانه ها را تأمین کرد. همچنین، می توان به کمک آب داغ به دست آمده از منبع انرژی

* نویسنده مسئول

Email: jnouraliee@nri.ac.ir

1. Geothermal system

2. Reservoir rock

3. Heat source

4. Cap rock

یک منبع انرژی زمین گرمایی در اعماق زمین پی برد. عوارض زمین ساختاری، نقش مهمی در پیدایش نشانه های سطحی دارند؛ به این معنا که نشانه های یادشده، زمانی به وجود می آیند که سیال زمین گرمایی از طریق گسل ها، درزه ها، شکاف ها و یا واحدهای سنگی نفوذپذیر به سطح زمین رسیده باشند [۴].

در برخی موارد، ممکن است که بخشی از سیال یک منبع انرژی زمین گرمایی به سیستم زهکشی طبیعی یک منطقه، وارد شود و تغییراتی را در سیال مربوطه به وجود آورد. در این حالت، با نمونه برداری از آب رودخانه ها و دریاچه های موجود در منطقه و تجزیه شیمیایی نمونه ها می توان به وجود یک منبع زمین گرمایی در اعماق منطقه اکتشافی پی برد [۵]. به دلیل اهمیت نشانه های سطحی، در مراحل ابتدایی مطالعات اکتشافی، متخصصان علوم زمین توجه ویژه ای به شواهد یادشده می کنند. نشانه های یادشده اطلاعات مفیدی را در خصوص مشخصات فیزیکی و شیمیایی منبع زمین گرمایی مربوطه خود در اختیار متخصصان حوزه اکتشاف قرار می دهند [۶ و ۷].

بر حسب دمای مخزن زمین گرمایی و میزان دبی سیال خروجی از آن، ممکن است نشانه های سطحی به صورت چشمه های آب گرم، گازفشان، سنگ های آتشفشانی جوان، سنگ های دگرسان شده، رسوبات سیلیسی و یا رسوبات تراورتنی باشند. البته، علاوه بر موارد یادشده می توان به زمین های گرم و داغ، پوشش گیاهی آسیب دیده، نواحی فاقد برف، گل فشان های داغ یا حوضچه های گل داغ و دریاچه های اسیدی آتشفشانی نیز اشاره کرد. در شکل ۱ تصاویری از متداول ترین نشانه های سطحی منابع انرژی زمین گرمایی نشان داده شده اند. به منظور آشنایی بیشتر در جدول ۱ نیز حالت فیزیکی هر یک از نشانه های سطحی یادشده ارائه شده است.

انواع منبع انرژی زمین گرمایی هیدروترمال

منابع انرژی زمین گرمایی هیدروترمال را می توان بر اساس معیارهای متفاوتی طبقه بندی کرد. متداول ترین معیارها شامل دمای منبع و نوع سیال موجود در منبع زمین گرمایی مربوطه می شوند. در ادامه، توضیح مختصری در خصوص هر یک از معیارهای یادشده ارائه می شود.

زمین گرمایی، آب استخرهای پرورش ماهی را نیز برای تولید بیشتر در فصول سرد سال گرم کرد و یا برف و یخ تشکیل شده روی پیاده روها و خیابان ها را ذوب کرد. در سال ۲۰۲۰، به کمک انرژی زمین گرمایی، 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 زمین گرمایی محسوب می شوند [۱]. کشورهای پیشرو در حوزه کاربرد مستقیم نیز کشورهای چین، امریکا، سوئد، آلمان و ترکیه هستند [۲].

منابع انرژی زمین گرمایی غالباً دارای یک یا چند نشانه سطحی^۱ هستند که با مشاهده و بررسی آن ها می توان از یک سو به وجود منابع یادشده در اعماق منطقه پی برد و از سوی دیگر، می توان تا حدودی خصوصیات سامانه زمین گرمایی مورد نظر را نیز شناسایی کرد. به عنوان مثال، چشمه های آب گرم یکی از نشانه های متداول سطحی منابع انرژی زمین گرمایی به شمار می روند. حال، چنانچه یک سامانه زمین گرمایی فاقد نشانه های سطحی باشد، آن را یک سامانه یا منبع انرژی زمین گرمایی بی نشان می نامند. تجربه مطالعات و تحقیقات اجراشده در کشورهای پیشرو نشان می دهد که احتمالاً تعداد منابع بی نشان در منطقه ای که دربردارنده یک منبع انرژی زمین گرمایی آشکار است، به مراتب بیشتر از منابع شناخته شده موجود است [۳]. به عنوان مثال، متخصصان پیش بینی کرده اند که فقط ۲۰ درصد منابع انرژی زمین گرمایی در منطقه گریت بیسین^۲ در ایالت نوادا (امریکا) شناسایی شده و مورد مورد بهره برداری قرار گرفته اند. بنابراین، با استفاده از روش های اکتشافی مختلف می توان منابع یادشده را شناسایی کرد. به این ترتیب، توسعه روش های اکتشاف و شناسایی منابع بی نشان می تواند منجر به شناسایی سامانه های زمین گرمایی بیشتری شود و در نتیجه، می توان با بهره برداری از منابع شناسایی شده، موجبات توسعه مناطق پیرامونی منابع یادشده را فراهم کرد.

نشانه های سطحی منابع انرژی زمین گرمایی

همان گونه که از نام آن ها برمی آید، نشانه های سطحی منابع انرژی زمین گرمایی، پدیده های طبیعی هستند که در سطح زمین به وجود می آیند و با مشاهده آن ها می توان به وجود

1. Surface manifestations
2. Great basin

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

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.



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	گاز
۱	چشمه آب گرم			
۲	گازفشان			
۳	آب‌فشان			
۴	زمین‌های بخارفشان			
۵	سنگ‌های آتشفشانی جوان			
۶	سنگ‌های دگرسان‌شده			
۷	رسوبات سیلیسی			
۸	رسوبات تراورتنی			
۹	زمین‌های گرم و داغ			
۱۰	پوشش گیاهی آسیب‌دیده			
۱۱	نواحی فاقد برف			
۱۲	گلفشان‌های داغ/حوضچه‌های گل داغ			
۱۳	دریاچه‌های اسیدی آتشفشانی			

جدول ۲. انواع دسته بندی منابع انرژی زمین گرمایی بر حسب دمای مخزن (°C)

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

جدول ۳. مقایسه مشخصات منابع انرژی زمین گرمایی هیدروترمال متعارف، پنهان و بی نشان [۱۷]

نوع منبع	نوع نشانه های سطحی
متعارف	دارای نشانه های سطحی حاوی سیال (بخار، گاز، آب داغ و آب گرم)
پنهان	دارای نشانه های سطحی فاقد سیال (رسوبات سیلیسی/تراورتنی و سنگ های دگرسان شده)
بی نشان	فاقد هر گونه نشانه سطحی

تقسیم بندی بر اساس نوع سیال زمین گرمایی

همان گونه که در تعریف انرژی زمین گرمایی مطرح شد، منبع یاد شده 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 زمین گرمایی به انواع حاوی آب داغ، بخار غالب و دوفازی تقسیم می شوند. مهم ترین عامل در این تقسیم بندی منابع انرژی زمین گرمایی، منشأ حرارت منبع مربوطه است. بنابراین، در منابع بخار غالب، منشأ حرارت، انرژی بسیار بیشتری را به سنگ مخزن و به طبع آب های جوی فرورونده منتقل می کند و سبب تشکیل بخار آب در مخزن زمین گرمایی مورد نظر می شود. البته، نکته شایان یادآوری آنکه در مقام مقایسه، منابع بخار غالب نسبت به سایر انواع منابع زمین گرمایی بسیار کمیاب و نادر هستند.

تقسیم بندی بر اساس نشانه های سطحی

با توسعه بهره برداری از منابع انرژی زمین گرمایی هیدروترمال و شناسایی منابع بیشتر، تقسیم بندی دیگری نیز برای منابع یاد شده در نظر گرفته شد. ملاک اصلی این تقسیم بندی، وجود نشانه های سطحی و چگونگی پیدایش آن ها در سطح زمین است. بر اساس این تقسیم بندی، منابع انرژی زمین گرمایی هیدروترمال به سه دسته اصلی منابع متعارف^۱، منابع پنهان^۲ و منابع بی نشان^۳ دسته بندی می شوند. در جدول ۳ تفاوت های منابع یاد شده ارائه شده است. [۱۷]

همان گونه که در جدول ۳ مشخص شده است، مهم ترین عامل برای تمایز منابع یاد شده از یکدیگر، وجود داشتن یا نداشتن سیال در بخش های فوقانی آن ها در سطح زمین است. بدیهی است که به ترتیب از منابع متعارف تا منابع بی نشان، شناسایی منبع مورد نظر با سختی بیشتری همراه خواهد بود.

دلایل عدم پیدایش نشانه های سطحی

همان گونه که در بخش های قبلی مقاله به آن اشاره شد، منابع انرژی زمین گرمایی متعارف دارای طیف گسترده ای از نشانه های سطحی هستند. بدیهی است که عوامل طبیعی موجب پیدایش نشانه های یاد شده در سطح زمین می شوند. با این وجود، در برخی موارد شرایط طبیعی حاکم بر منطقه در بر دارنده منبع انرژی زمین گرمایی به گونه ای است که مانع از تشکیل نشانه های یاد شده می شوند. عوامل متعددی باعث عدم پیدایش نشانه ها در سطح زمین می شوند. برخی از مهم ترین عوامل یاد شده به شرح زیر هستند:

(a) سنگ پوشش ضخیم

یکی از اجزای مهم یک سامانه زمین گرمایی، سنگ پوشش آن است. در واقع، سنگ پوشش مانع از خروج سیال زمین گرمایی از سامانه می شود. بنابراین، چنانچه سنگ پوشش سامانه زمین گرمایی بسیار ضخیم بوده و به ویژه حاوی سنگ های بسیار دانه ریز مانند شیل باشد، در آن صورت، سیال داخل مخزن، امکان خروج از آن و راهیابی به سطح زمین را نخواهد داشت.

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

روش های اکتشافی مقدماتی

هدف اصلی از برنامه ریزی و اجرای مطالعات اکتشافی مقدماتی، فقط شناسایی اولیه منابع انرژی زمین گرمایی بی نشان است. به بیان دیگر، با اجرای روش های اکتشافی در این مرحله از مطالعات می توان محدوده تقریبی منابع زمین گرمایی را مشخص کرد. بنابراین، بدیهی است که برای شناسایی مشخصات دقیق منبع مورد نظر باید مطالعات دقیق تری 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 روش ها، آن ها را می توان به سه دسته اصلی روش های زمین شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی تقسیم کرد. نکته بسیار مهم آنکه در برخی کشورها، در گذشته، مجموعه ای از مطالعات اکتشافی زمین شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی سیستماتیک انجام شده و یا در حال انجام است که از نتایج مطالعات یادشده می توان برای شناسایی منابع انرژی زمین گرمایی بی نشان نیز استفاده کرد.

همان گونه که از نام آن ها برمی آید در این بخش از مطالعات، خصوصیات زمین شناسی مناطق اکتشافی مورد بررسی دقیق قرار می گیرند. از آنجا که گسل ها نقش بسیار مهمی در شکل گیری منابع انرژی زمین گرمایی دارند، بررسی آن ها در مطالعات زمین شناسی اهمیت بسیار زیادی دارد. مهم ترین فعالیت هایی که در مطالعات زمین شناسی صورت می پذیرند، عبارت اند از [۳]:

- بررسی وضعیت عمومی زمین ساختاری منطقه
- بررسی سن فعالیت گسل ها
- بررسی نرخ لغزش گسل های کوتاهتری
- بررسی نرخ تنش های تکتونیکی در مقیاس منطقه ای
- بررسی میزان لغزش و بازشدگی^۱ در گسل های کوتاهتری
- بررسی پراکندگی کانون زمین لرزه ها
- بررسی سازندهای زمین شناسی نفوذناپذیر [۲۳].

مطالعات ژئوشیمیایی

از آنجا که منابع انرژی زمین گرمایی بی نشان، فاقد نشانه سطحی هستند، برای انجام مطالعات ژئوشیمیایی آن ها باید

از نمونه های تهیه شده از چشمه های آب سرد و چاه های آب استفاده کرد. به بیان دیگر، در این حالت، به جای نمونه برداری از چشمه های آب گرم، گازفشان ها و ... باید نمونه ها را از چاه های آب حفر شده در منطقه یا چشمه های آب سرد موجود در منطقه تهیه و آنالیز کرد.

هنگام اجرای مطالعات ژئوشیمیایی، کاتیون ها و آنیون های موجود در نمونه ها به دقت بررسی می شود و با انجام محاسبات زمین دماسنجی می توان دمای تقریبی منابع انرژی زمین گرمایی مرتبط با چشمه ها و چاه ها را محاسبه کرد. علاوه بر این، در برخی موارد با اطلاعات به دست آمده از چاه ها و چشمه ها می توان تا حدودی به وضعیت زمین ساختاری حاکم بر منبع انرژی زمین گرمایی مورد نظر نیز پی برد [۳]. به بیان دیگر، با بررسی ارتباط نتایج به دست آمده از مطالعات زمین دماسنجی و گسل ها و شکستگی های موجود در منطقه می توان به نقش وضعیت زمین ساختاری منطقه در پیدایش منبع زمین گرمایی مورد نظر پی برد.

مطالعات ژئوفیزیکی

در واقع، این روش ها مؤثرترین فعالیت هایی هستند که به منظور شناسایی منابع انرژی زمین گرمایی بی نشان صورت می پذیرند. نکته بسیار مهم آنکه چنانچه در گذشته مطالعات ژئوفیزیکی سیستماتیک در سطح کشور، یک استان و یا یک ایالت انجام شده باشد، می توان به آسانی از نتایج آن ها استفاده کرد. بدیهی است که این موضوع موجب صرفه جویی قابل ملاحظه در هزینه مطالعات اکتشافی می شود. 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 روش های زیر استفاده می شود [۳] و [۱۷].

- روش گرانی سنجی (ثقل سنجی)
- روش حرارت سنجی (اندازه گیری دما در عمق سه کیلومتری)
- مطالعات مگنتوتلوریک
- روش مغناطیس سنجی هوایی
- مطالعات دورسنجی (ویژه مناطق دارای پوشش گیاهی انبوه)

به منظور اثربخشی بیشتر مطالعات ژئوفیزیکی بهتر است که به طور همزمان 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

- 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

مطالعات اکتشافی تکمیلی. در مطالعات مقدماتی، هدف اصلی از اجرای مطالعات، شناسایی مناطق امیدبخش زمین گرمایی 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، نقشه ای کوچک مقیاس از منطقه مطالعاتی به دست می آید که در آن مناطق امیدبخش بر حسب اطلاعات هر منطقه، اولویت بندی شده اند. اما در مطالعات اکتشافی تکمیلی، ابعاد منطقه مطالعاتی نسبت به مطالعات مقدماتی، بسیار کوچک تر بوده و حدود ۲۰۰-۳۰۰ کیلومتر مربع است. در مطالعات تکمیلی با گردآوری داده های علمی مختلف، اطلاعات بسیار ارزشمندی در خصوص منطقه امیدبخش مورد نظر به دست می آید. چنانچه نتایج حاصل از مطالعات تکمیلی امیدوارکننده باشد، تعداد یک یا چند حلقه چاه اکتشافی در منطقه مطالعاتی حفر می شود. یادآور می شود که در هر یک از مطالعات اکتشافی، اطلاعات زمین شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی اهمیت بسیار زیادی دارند. شایان یادآوری است که مقدار ریسک مطالعات اکتشافی برای منابع زمین گرمایی بی نشان به مراتب بیشتر از منابع زمین گرمایی هیدروترمال متعارف است.

منابع

- [1].Huttrer, 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 حرارت سنجی
- با حفر گمانه های کم عمق (حدود ۱۰۰ متر)
- با اندازه گیری دمای زمین در عمق ۲ متری
- مطالعات لرزه نگاری
- مطالعات مگنتوتلوریک

تفسیر یکپارچه داده ها و تعیین محل حفر چاه های اکتشافی

با اجرای تمامی مطالعات یادشده اطلاعات بسیار ارزشمند و مفیدی در خصوص منطقه زمین گرمایی مورد نظر به دست می آید. در این مرحله از مطالعات اکتشافی با انتقال همه داده ها به محیط نرم افزاری GIS و تجزیه و تحلیل دقیق آنها می توان موارد زیر را مشخص کرد:

- گسترش جغرافیایی منبع انرژی زمین گرمایی مورد نظر در سطح زمین
- گسترش منبع در اعماق منطقه اکتشافی
- دمای تقریبی منبع
- ساختارهای زمین شناسی موجود در محدوده منبع
- تعیین موقعیت دقیق محل حفر چاه های اکتشافی
- بنابراین، با حفر چاه های اکتشافی و آزمایش چاه ها می توان به طور مستقیم خصوصیات مخزن زمین گرمایی مورد نظر را مشخص کرد.

نتیجه گیری

منابع انرژی زمین گرمایی بی نشان آن دسته از منابع زمین گرمایی هستند که فاقد نشانه سطحی هستند. منابع بی نشان غالباً به طور تصادفی و طی اکتشاف سایر منابع طبیعی مانند منابع نفت و گاز و مواد معدنی شناسایی شده اند. با توجه به نبود نشانه سطحی، شناسایی منابع بی نشان باید به طور غیرمستقیم صورت پذیرد. از آنجا که منابع یادشده به تازگی مورد توجه محققان قرار گرفته اند، همچنان روش شناسی خاصی برای اکتشاف آنها تهیه و تدوین نشده است. با این وجود، به تدریج که اهمیت آنها افزایش می یابد، کارشناسان و پژوهشگران بیشتری اقدام به شناسایی آنها می کنند. با توجه به بررسی مقالات، گزارش ها و سایر مستندات معتبر موجود، می توان روش های اکتشاف منابع انرژی زمین گرمایی بی نشان 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 CO ۲ 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-204*, 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.