DOR: 20.1001.1.24234931.1398.6.2.6.8

سال ششم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۸، ص ص ۴۲ - ۵۴

فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۳

انرژی زمین گرمایی بهبودیافته و جایگاه آن در جهان

مرتضی خشه چی[۱*]، حسین امجدی[۲]، سمانه ترابی[۲]، عارفه الطافی[۲]

۱. استادیار، مهندسی مکانیک، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، ۱۹۷۵۶۴۳۱۱۵ آدرس ایمیل نویسنده مسئول:m.khashehchi@ut.ac.ir

چکیده

انرژی زمین گرمایی به عنوان یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم قابل ملاحظه‌ای در تولید انرژی‌های جهان دارد. این انرژی به صورت استخراج انرژی حرارتی از لایه‌های زیرین سطح زمین تعریف می‌گردد و برخلاف سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، محدود به فصل، زمان و شرایط خاصی نبوده و بدون وقفه قابل بهره‌برداری می‌باشد. انتقال حرارت در این‌گونه سیستم‌ها توسط یک سیال داغ صورت می‌گیرد، که این سیال در مخازن زیرزمینی آب داغ موجود می‌باشد. یافته‌های محققان نشان داده است که مناطق حاوی آب‌های گرم زیرزمینی به صورت نادر وجود دارد و علاوه بر این، در بسیاری نقاط، آب کافی جهت بهره‌برداری از انرژی گرمایی آن در دسترس نمی‌باشد. این حرارت در نقاط کم آب در دل سنگ‌ها نفوذ کرده و باعث ایجاد سنگ‌هایی با دمای خیلی زیاد می‌شود. روش استحصال انرژی از سنگ‌های داغ در اینگونه نواحی، انرژی زمین گرمایی بهبود یافته نامیده می‌شود. این مقاله سعی دارد که یک جمع‌بندی در مورد انرژی زمین گرمایی بهبود یافته ، جایگاه این انرژی درجهان، مزایای استفاده از آن و در نهایت چند پروژه بسیار مهم در سطح جهان، از جمله پروژه ی لوس آلاموس به عنوان یکی از اولین پروژه‌ها در استفاده از انرژی زمین گرمایی بهبود یافته را مورد بررسی قرار دهد.

کلیدواژگان: انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی زمین گرمایی بهبودیافته[۱]EGS، سیال داغ، مخازن زیرزمینی،HDR[۲]

Enhanced geothermal energy and its position in the world

Morteza Khashehchi[1*], Hossein Amjadi[2], Samaneh Torabi[2], Arefeh Altafi[3]

1. Agro Technology Department, University of Tehran, Tehran, Iran

2, 3 Agro Technology Department, University of Tehran, Tehran, Iran

(amjadi.hosain@ut.ac.ir, samanetorabi735@ut.ac.ir, arefeh.altafi@ut.ac.ir)

* P.O.B. 1975643115 Tehran, Iran, m.khashehchi@ut.ac.ir

Received: 17 November 2018 Accepted: 02 February 2019

Abstract

Geothermal energy, as one of the renewable energies, has a significant contribution to global energy production. This energy is defined as the extraction of thermal energy from the underlying layers of the earth, and unlike other renewable energies, it is not limited to the season, time, and conditions, and can be exploited without interruption. Heat transfer in such systems is carried out by a hot fluid, which is available in underground hot water reservoirs. Researchers have found that areas containing warm underground water are rare and in many places water is not available to exploit its thermal energy. This heat penetrates into the rocks at low water points and causes very high temperatures. The method of extracting energy from hot stones in these areas is called improved geothermal energy. This paper tries to summarize the improved geothermal energy, the location of this energy in the world, its benefits and, ultimately, some of the world's most important projects, including the Los Alamos project as one of the first projects in the use of Examine the improved geothermal energy.

۱Enhanced Geothermal Energy

۲Hot Dry Rock

Keywords: Renewable Energies, Improved Geothermal Energy EGS, Hot Fluid, Underground Storage, HDR

۱- مقدمه

میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی و گرمایش جهانی ارتباط مستقیمی با هم دارند. گرمایش جهانی یک مشکل بسیار پیچیده است که هر حوزه از زندگی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، و اگر بدون کنترل بماند، می‌تواند تاثیری شدید بر زندگی بشر و اکوسیستم داشته باشد. فعالیت‌های انسانی باعث تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود که ازجمله این فعالیت ها می‌توان به استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی موردنیاز بشر که بزرگترین منبع انسانی انتشار دهنده گازهای گلخانه‌ای است اشاره کرد. همچنین رشد اقتصادی و افزایش استانداردهای زندگی منجر به افزایش چشمگیر تقاضای انرژی در دهه‌های گذشته شده و این افزایش تقاضا به نگرانی رو به رشد از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای تبدیل شده است. تقاضای روزافزون انرژی و نیاز به کاهش تاثیرات زیست محیطی کربن در جهان، باعث اهمیت یافتن الف) تصویب قوانینی جهت استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر و ب) صرفه جویی در مصرف انرژی شده است.

یکی از مهمترین روش‌های جایگزین کردن سوخت‌های فسیلی در تولید انرژی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. ارزان بودن، در دسترس بودن یا عدم نیاز به سیستم حمل و نقل منبع انرژی، پایدار بودن، و بی‌نهایت بودن این نوع منابع انرژی را می توان به عنوان ویژگی‌های منحصربفرد یاد کرد. بحث جایگزینی سوخت‌ها با انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های متداول فسیلی با توجه به کاهش چشمگیر قیمت تجهیزات موردنیاز ظرف ۳۰ سال گذشته افزایش قابل ملاحظه ای یافته است. بعلاوه سیاست‌های تشویقی سازمان ملل در قبال کاهش آلودگی محیط زیست و مباحث اقتصادی استفاده از سوخت‌های فسیلی، ضرورت استفاده از منابع انرژی پاک را افزایش داده است. در کنار تمام مزایای اشاره شده مزیت مهم سیستم های انرژی تجدیدپذیر این است که آن‌ها قابلیت استفاده در سیستم‌های کوچک و محلی را دارا می‌باشند. انرژی زیست توده، خورشید، باد و... از جمله منابع تجدیدپذیر می‌باشند، که در میان آن‌ها انرژی زمین گرمایی به عنوان یکی از منابع اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. این انرژی به صورت حرارت نهفته در لایه‌های زیرین سطح زمین تعریف می‌شود، که در کاربردهای مختلف جهت تولید توان و یا تبدیل به انرژی‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مطالعه ضمن معرفی انرژی زمین گرمایی و انواع آن، یکی از روش‌های جدید استفاده از این انرژی را در سطح جهان مورد بررسی قرار می‌دهد. استحصال انرژی از سنگ‌های داغ زیرزمینی که برخلاف انرژی زمین گرمایی که منظور از انرژی نهفته در مناطق حاوی آب‌های گرم زیرزمینی می‌باشد و سال‌های زیادی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد، یک روش بسیار جدید می‌باشد که به عنوان نوآوری کار مورد توجه و تحقیق قرار گرفته است. همچنین بخش بعد به بررسی انرژی زمین گرمایی و نحوه استفاده ازآن پرداخته است. در بخش سوم این مقاله انرژی زمین گرمایی بهبود یافته (EGS) ، اهمیت و سوابق بهره‌برداری از آن و در نهایت چند پروژه بسیار مهم در سطح جهان، از جمله پروژه ی لوس آلاموس به عنوان یکی از اولین پروژه‌ها در استفاده از انرژی زمین گرمایی بهبود یافته بیان می‌شود.

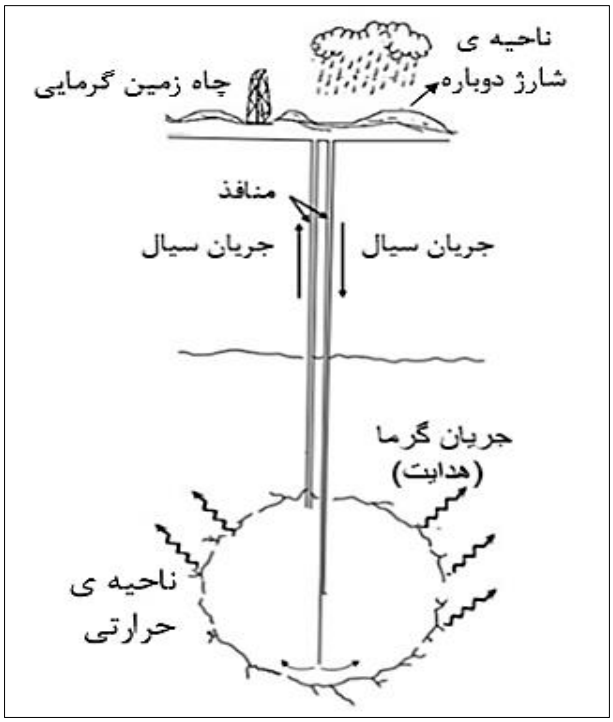
۲- انرژی زمین گرمایی

انرژی زمین گرمایی حرارت طبیعی نهفته در داخل زمین می‌باشد که ناشی از حرارت باقی‌مانده در هسته زمین در اثر اصطکاک صفحات قاره‌ای که زیر یکدیگر قرار گرفته‌اند، می‌باشد. همچنین این انرژی حاصل واپاشی عناصر رادیواکتیو است، که به‌طور طبیعی و در مقادیر کم در تمام صخره‌ها وجود دارد. این منبع انرژی در مقایسه با سایر منابع تجدیدپذیر دارای ویژگی‌هایی نظیر پایدار بودن، نامحدود بودن، در دسترس بودن، و قابلیت دسترسی محلی می باشد. برای هزاران سال، مردم از چشمه‌های آب گرم و منافذ بخار برای حمام کردن و پخت و پز و گرمایش بهره می‌بردند. امروزه این انرژی به‌صورت ۱) استخراج گرما توسط پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی ۲) استفاده از یک سیستم دوبل در یک حوزه گرمایی (هیدرو ترمال) جهت گرم کردن فضا ۳) تولید برق ۴) انرژی زمین گرمایی بهبود یافته، مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیقات انجام شده بر روی این انرژی نشان می‌دهد که پتانسیل آن را دارد که بخش اعظم انرژی مورد نیاز بشر را به صورت پایدار و بدون آلودگی‌های زیست محیطی تامین کند [۱].

تجربه نشان داده است با افزایش عمق زمین دما افزایش می‌یابد. تقریبا به ازای هر ۱۰۰ متر عمق حدود ۳ درجه سلسیوس به دمای زمین اضافه می‌شود، به‌طوری که درجه حرارت در لایه‌های پایینی پوسته زمین ۱۳۰۰ درجه سلسیوس و در هسته مرکزی زمین حدود ۵۰۰۰ درجه سلسیوس است. در برخی مناطق از پوسته زمین می توان به دماهای بالا دست یافت، و از این انرژی استفاده بهینه کرد. دانشمندان تخمین می‌زنند که فقط ۱ درصد از حرارت موجود در ۱۰ کیلومتری پوسته زمین، معادل ۵۰۰ برابر انرژی موجود در همه منابع نفت و گاز در زمین است. طبق برآوردهای انجام شده انرژی ذخیره شده در پوسته زمین تا عمق ۳۰۰۰ متر، حدود ۱۰۲۴×۴۳ ژول می‌باشد. ۸۵ درصد از این انرژی در دمای کمتر از ۱۰۰درجه سلسیوس است [۲].

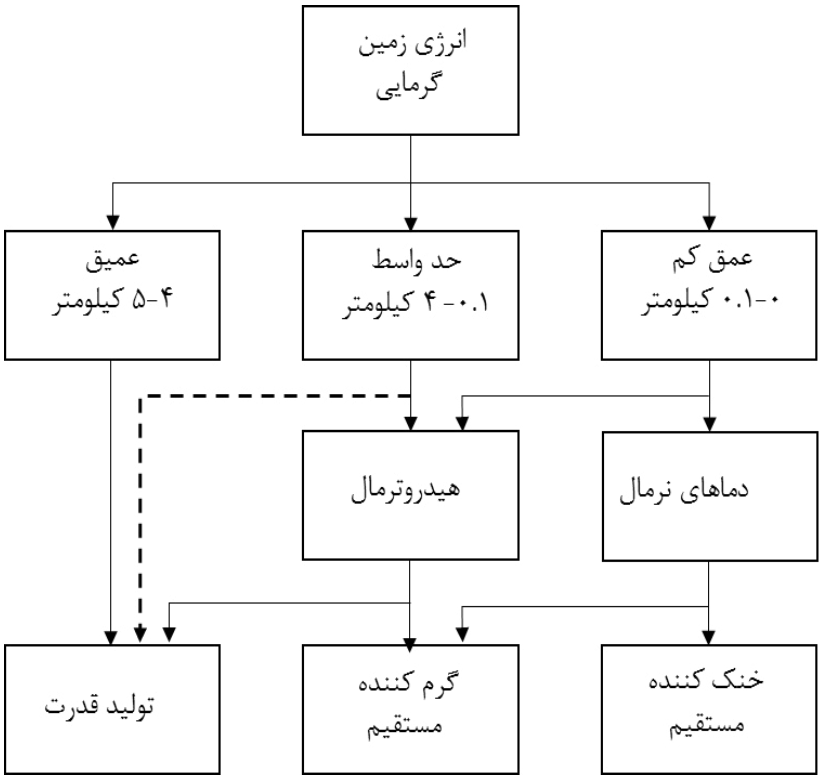
بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی به طور ساده در شکل ۱ نشان داده شده است. آب حاصل از بارندگی پس از نفوذ به سفره‌های زیرزمینی و جذب انرژی حرارتی زمین در مخازنی به نام بیسین[۱] ذخیره می‌گردند. گاهی اوقات به علت کاهش چگالی این آب پس از گرم شدن و افزایش فشار آن به صورت آب گرم یا بخار آب از منافذی که بر روی پوسته زمین وجود دارد، مسیر خود را به سطح زمین پیدا می‌کند. این‌ها همان چشمه‌های آب گرمی هستند که در مناطق خاصی از سطح زمین پیدا می‌شوند. در این مناطق می توان بخار آبی که دمای آن تا حدود ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس بالا رفته است را با حفر چاه‌هایی با عمق ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ متر، به صورت صنعتی ازداخل زمین بیرون کشید و از انرژی گرمایی آن استفاده کرد [۳].

[۱] Basin



شکل۱ طرحی ساده از یک سیستم زمین گرمایی ایده‌آل

شکل ۲ به تشریح فرم‌های مختلف از انرژی زمین گرمایی با اشاره به عمق منابع و استفاده نهایی از آن می پردازد. علامت خط‌چین، متوسط عمقی، که در آن هیچ منابع آبی و حرارت خاصی وجود ندارد را نشان می‌دهد، و دما معمولا به اندازه کافی برای تولید برق بالا نیست و توجیه اقتصادی ندارد.



شکل۲ طرح کلی روش‌های مختلف به‌دست آوردن انرژی زمین گرمایی بسته به عمق دسترسی به آن و اهدافی که برای آن ها استفاده می‌شود

جدول۱ به تشریح ظرفیت فعلی از نظر فروش و استفاده از این اشکال انرژی زمین گرمایی پرداخته است [۴]. ملاحظه می‌کنید که ظرفیت سالانه و استفاده از این سیستم به طور قابل ملاحظه‌ای کم تخمین زده شده است، که شاید به دلیل افزایش تعداد زیادی از کاربردهای کوچک (GSHP)[1] که به معنی عوامل مبهم کوچک هستند، باشد. انرژی زمین گرمایی به صورت مستقیم و غیر مستقیم استفاده می شود. از این انرژی به صورت مستقیم در استخرهای آب گرم، تاسیسات گلخانه‌ای، گرمایش منازل و.. استفاده می‌شود. برای مثال آب‌گرم خارج شده از زمین را در استخرها و مراکز جذب گردشگری مورد استفاده قرار می‌دهند. در حال حاضر نزدیک به ۶۵ کشور جهان از چشمه‌های آب گرم و تاسیسات تفریحی زمین گرمایی استفاده می‌کنند، به طور مثال ژاپنی‌ها با بهره‌گیری از بیش از ۲۲۰۰ کانون تفریحی مرتبط با چشمه‌های آب‌گرم سالانه نزدیک به ۱۰۰ میلیون مهمان و گردشگر را پذیرا هستند [۵]. هم‌چنین در سال‌های اخیر استفاده از روش گلخانه برای کشت محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. در استفاده از گلخانه ها محصولات کشاورزی از سرما در امان بوده، و با توجه به قابل کنترل بودن محیط کشاورزی، آفات گیاهی نیز کمتر به محصولات آسیب می رسانند. استفاده از سوخت های فسیلی در سیستم گرمایش گلخانه‌ها هزینه زیادی در بر دارد، همچنین ایجاد دمای پایدار در گلخانه به وسیله سیستم گرمایشی سنتی کار مشکلی می‌باشد. به همین دلیل، بسیاری به استفاده از انرژی زمین گرمایی روی آورده‌اند. استفاده از انرژی زمین گرمایی در سیستم گرمایش گلخانه‌ای علاوه بر کاهش دادن هزینه‌های استفاده از سوخت‌های فسیلی، دمای پایداری را نیز در گلخانه ایجاد می‌کند، همچنین از آلودگی‌های زیست‌محیطی که به خاطر استفاده این سوخت‌ها ایجاد می شود جلوگیری می‌کند. همچنین برای استفاده در منازل به کمک لوله کشی و انتقال آب‌های گرمی که از زمین بیرون می‌آیند، این آب های گرم را می توان به مناطق مسکونی منتقل کرد و مانند سیستم‌های شوفاژ موجود در منازل از حرارت این آب‌های گرم جهت گرم کردن محیط استفاده نمود. برای گرمایش منازل، آب‌های گرم زمینی باید حرارتی در حدود ۵۰ الی ۱۰۰ درجه سلسیوس داشته باشند. همان‌طور که گفته شد ۸۵ درصد انرژی گرمایی قابل استحصال نیز دمای کمتر از ۱۰۰ درجه را دارد و این موضوع اهمیت استفاده از این سیستم را پررنگ تر می‌کند [۶].

در استفاده غیرمستقیم، انرژی زمین گرمایی در نیروگاه تبدیل به انرژی الکتریسیته می‌شود و بعد انرژی تولید شده وارد شبکه سراسری برق شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشکل اصلی این است که تنها برای یک دوره محدود، تا زمانی که بیشتر سیال موجود در آن‌ها استخراج شود، قابل بهره‌برداری هستند. این ذخایر زمین گرمایی مشابه ذخایر نفت می‌باشند؛ در ابتدا باید موقعیت‌یابی شوند، و سپس برای تعیین این‌که حاوی سیال کافی برای بهره‌برداری هستند یا نه مورد بررسی قرار گیرند. سپس نیروگاه باید ساخته شده و منابع استخراج شود و در نهایت آن منابع تبدیل خواهند شد و این فرایند به پایان می‌رسد.

[1] Ground Source Heat Pump

جدول ۱ خلاصه‌ای از ظرفیت تجاری و استفاده سالانه از انرژی زمین گرمایی در سال ۲۰۱۰ و ارزیابی ظرفیت تولید الکتریسیته تولیدی از عملیات زمین گرمایی تا سال ۲۰۵۰.

کاربرد	نوع	ظرفیت تجاری (گیگاوات)	استفاده سالانه (گیگاوات ساعت)	ظرفیت ارزیابی شده (گیگاوات)
تولید الکتریسیته	مخازن هیدروترمال	۰	۰	۱۴۰
	EGS	۱۰/۷	۶۷/۲۵۰	۷۰
استفاده مستقیم	مخازن هیدروترمال	۳۵/۲	۵۹/۶۶۰	۸۰۰
	GSHP	۱۵/۳	۶۲/۳۰	-

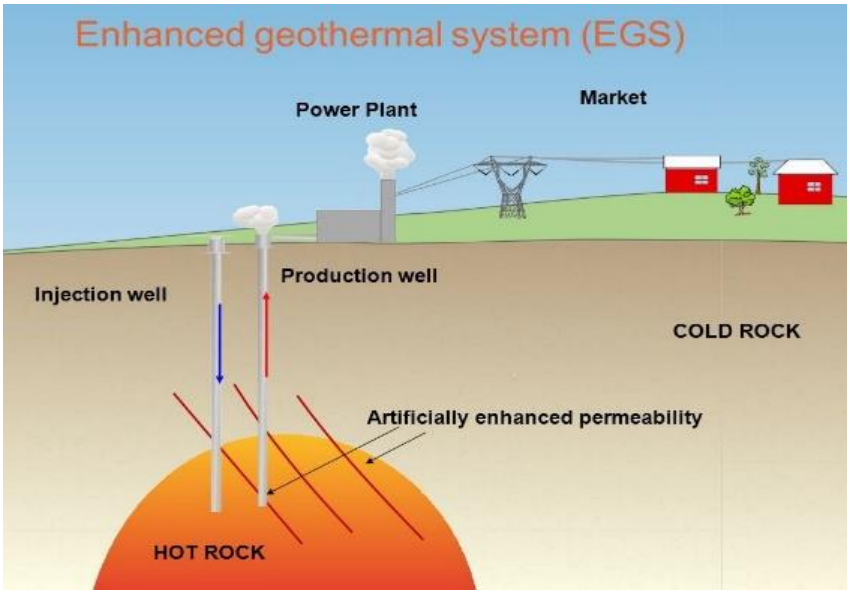
این منابع بستگی به مقدار گرما، مایع و سطح پایین نفوذپذیری در مخازن دارد، و باور بر این است که مناطق این چنینی بسیار نادر می‌باشند. این محدودیت‌ها دانشمندان را به جایگزین راه‌حل‌هایی برای به حداقل رساندن مشکلات و حفظ انرژی زمین گرمایی به عنوان یک منبع توان مناسب برای آینده مجبور کرده‌اند. برای کاهش وابستگی به مخازن طبیعی زمین گرمایی، ایجاد مخازن مصنوعی پیشنهاد می‌شود. این جایگزین به‌عنوان سیستم‌های زمین گرمایی بهبود یافته یا EGS است. مفهوم EGS، استخراج گرما از سنگ داغ می‌باشدکه به صورت طبیعی شکاف‌دار نیست [۷]، و در آن نفوذ پذیری به‌طور کلی کم است. تلاش‌ها به طور عمده در بهره‌برداری گرما از سنگ با استفاده از آب به عنوان یک سیال عامل متمرکز هستند، این آب از میان نواحی سنگ داغ به طوری پمپ می شود که حرارت رد و بدل شود. طبق پیش‌بینی‌های اخیر توسط دانشمندان، تولید انرژی از این منابع زمین گرمایی به طور چشم‌گیری در سراسر جهان افزایش خواهد یافت [۸].

۳- انرژی زمین گرمایی بهبودیافته

مفهوم EGS (سیستم‌های زمین گرمایی بهبود یافته) از مفهوم قدیمی HDR (صخره‌های گرم و خشک)، درآزمایشگاه ملی لوس آلاموس در ایالات متحده آمریکا سرچشمه گرفته است. صخره‌های گرم و خشک موجود در برخی نقاط در اعماق زمین به علت نداشتن آب یا بخار گرم، اصطلاحا منابع خشک نامیده می‌شوند. بدیهی است که استفاده از منابع خشک امکان‌پذیر است، بعلاوه رشد چشمگیر تکنولوژی در چند دهه گذشته دسترسی بشر را به بخش غیر قابل حصول انرژی نهفته در زمین میسر گردانیده است که به آن انرژی زمین گرمایی بهبود یافته می‌گویم. سیستم‌های زمین گرمایی بهبود یافته (EGS) نشان‌دهنده ذخایر عظیم انرژی‌های تجدیدپذیر است. هدف اصلی از مطالعات در این زمینه، ایجاد مسیرهای جریان میان سنگ‌های زیرزمینی برای تسهیل انتقال حرارت یا افزایش نفوذپذیری برای گردش حجم زیادی از آب (یا سایر سیال‌های عامل) و تزریق آب درون سنگ‌های گرم در اعماق زمین به‌منظور استفاده از پتانسیل گرمایی سنگ‌های داغ بوده است. می‌توان آب را به اعماق مورد نظر تزریق کرد تا پس از گرم شدن آن را به‌صورت بخار و یا آب گرم به سطح زمین هدایت کرده و مورد استفاده قرار داد. شکل۳ بیان‌کننده عملکرد سیستم زمین گرمایی بهبود یافته است.

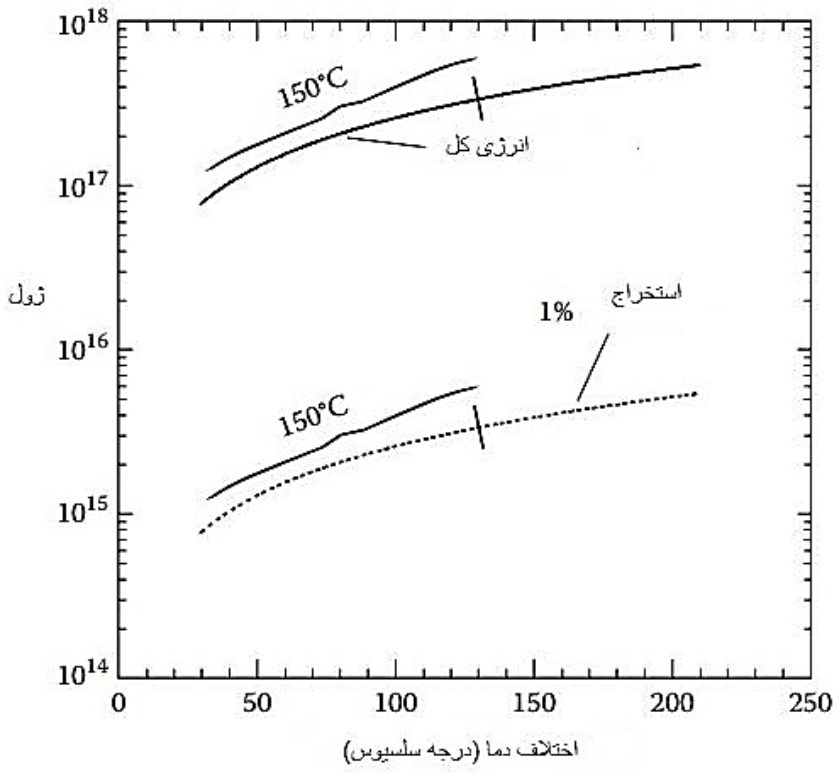
در یک گرادیان حرارتی به طور متوسط در هرکیلومتر از عمق افزایش بین ۲۵ درجه و ۳۰ درجه، به علت جریان گرمای درون زمین وجود دارد. با این حال در بسیاری از مناطق، گرادیان دمایی بیشتری موجود می‌باشد. در حالت کلی، همان‌طور که در بخش قبل هم بحث شد، ادعا بر این است که در هر نقطه از کره زمین با حفر یک چاه می‌توان به لایه‌ای از سنگ داغ رسید (دمای بیشتر از ۱۳۰ درجه سلسیوس) که حرارت موجود در سنگ قابلیت استحصال و تبدیل شدن به انواع دیگر انرژی را دارا می‌باشد. میزان انرژی ذخیره شده در این سنگ‌های داغ را می‌توان با فرض انرژی موجود در یک کیلومتر مربع از یک صخره در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس بدست آورد. میزان انرژی حرارتی که می‌تواند استخراج شود، Q_{ex} به صورت تابعی از ظرفیت حرارتی سنگ C_p با واحد محاسباتی $J/_{Kg-k}$ است، ، و گرادیان گرمایی ΔT، چگالی سنگ ρ، و حجم صخره، V بوده و از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد [۹].

$$Q_{ex} = V \times \rho \times C_p \times \Delta T \qquad (۱)$$



شکل ۳ طرحی از عملکرد سیستم EGS

برای یک صخره با حجم $1\ km^3$ و چگالی $2550\ Kg/m^3$ و ظرفیت حرارتی $1000\ J/Kg-k$ میزان حرارت قابل حصول به صورت تابعی از گرادیان حرارتی در شکل ۴ نمایش داده شده است. این شکل میزان حرارت قابل حصول را وقتی فقط ۱٪ از کل حجم در اختیار باشد را نشان می‌دهد.



شکل ۴ میزان حرارت قابل حصول به صورت تابعی از گرادیان حرارتی

محاسبه انرژی قابل حصول به عنوان تابعی از عمق کار بسیار پیچیده ای می‌باشد زیرا توزیع دما در لایه‌های مختلف زمین و در نقاط مختلف منظم نیست. به بیان دیگر مثلا در عمق ۱۰۰۰ متری از سطح زمین توزیع دما به‌صورت منظم انجام نگرفته است. به‌علاوه عدم وجود داده‌های تجربی در نقاط مختلف زمین عامل دیگری است که محاسبه انرژی قابل حصول را در عمق‌های مختلف دشوار می‌سازد. نتایج یک مطالعه در آمریکا نشان داده است

که در عمق ده کیلومتری زمین در قسمت غربی این کشور، انرژی معادل ۱۳ میلیون اگزاژول (هر اگزاژول معادل ۱۰۱۸ ژول) قابل حصول است. این میزان عظیم انرژی تنها در بخش غربی ایالات متحده ذخیره شده و منابع عظیم دیگری نیز در سرتاسر جهان از این دست موجود می‌باشد. شایان ذکر است که با استفاده از تکنولوژی‌های موجود و تکنولوژی‌های در حال توسعه فقط میتوان ۱,۵ درصد از این انرژی را استخراج کرد. اگرچه این میزان انرژی درصد کمی از کل انرژی موجود را شامل می‌گردد اما همین میزان انرژی بیش از ۲۰۰۰ برابر بیشتر از کل انرژی مصرفی امریکا در سال ۲۰۰۵ می‌باشد. در مورد سایر نقاط کره زمین هم، وضع به همین منوال است [۹].

طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده در جنوب استرالیا، در جایی دما ۲۷۳ درجه سلسیوس و درجایی دیگر۲۸۳ درجه سلسیوس یافت شده است، به این معناست که افزایش دما در هر کیلومتر از عمق بیش از ۵۰ درجه سلسیوس است که با توجه به محاسبات گرادیان زمین گرمایی انجام شده یکی از مکان‌های مناسب برای یک نیروگاه EGS می‌باشد. علاوه بر این، مناطقی با ویژگی‌های زمین شناسی مناسب برای استفاده از انرژی زمین گرمایی با گرادیان حرارتی بالا وجود دارد، به عنوان مثال، مناطق آلزاس(شرق فرانسه)[۱] و راینلاند-فالتز[۲](آلمان غربی)، که نیروگاه EGS سائولتز فارتز[۳] و لاندو[۴] در آن قرار دارد به ترتیب، به گرادیان حرارتی در ۱۰۰۰ متر عمق اول تا ۱۰۰درجه سلسیوس به ازای هرکیلومتر از عمق و یا مناطق آتشفشانی فعال واقع در مناطق فرورانش، می توان به گرادیان تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به ازای هرکیلومتر از عمق رسید [۱۰] با بررسی‌هایی که به عمل آمده معلوم شد که تمام سنگ هایی که بیش از ۱۶۰ درجه حرارت دارند و در عمقی کمتر از ۶ کیلومتر قرار دارند برای بدست آوردن انرژی مناسب هستند، بشرط آنکه دراین سنگ ها به اندازه کافی آب موجود باشد. چنانچه این سنگ ها فاقد آب باشند می‌توان این کار را به طرق مصنوعی انجام داد. روش کار نسبتا ساده است و بصورت زیر می‌باشد:

۱- ابتدا تا عمق مناسبی حفاری انجام می‌گیرد (عمقی که حرارت لازم را داشته باشد) تا به طبقات مورد نظر دست یافت. این طبقات باید خصوصیات زیر را داشته باشند:
- حتی‌الامکان بدون شکاف باشند.
- ثانیا این لایه آب‌دار دارای یک لایه سفت و نفوذناپذیر در زیر باشد، تا آبی که در طبقات هادی تزریق می‌شود به اعماق نفوذ نکند.

۲- این چاه تا مرکز لایه مورد نظر لوله‌گذاری می‌شود.

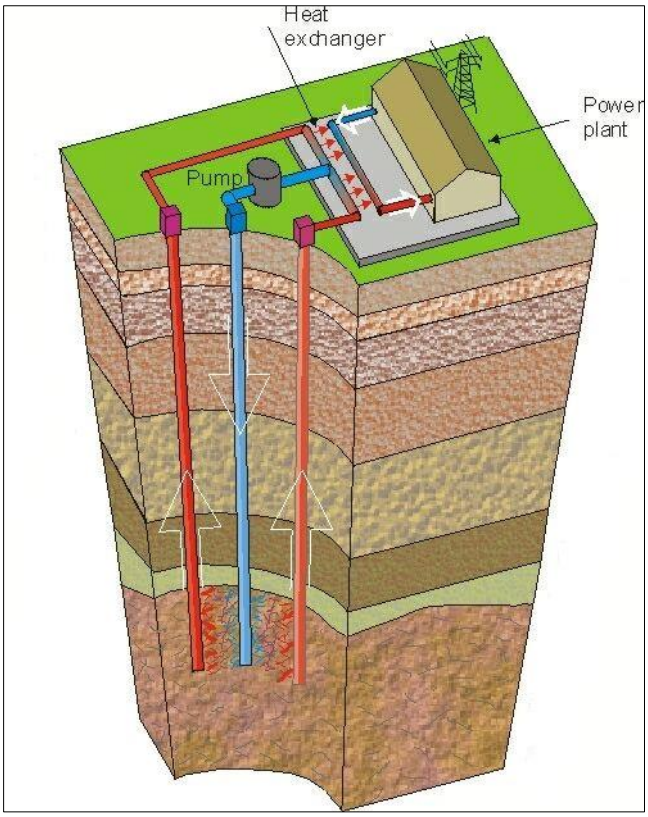
۳- پس از آن از روش خرد کردن هیدرولیکی استفاده می‌شود که در صنایع نفت کاربرد زیادی دارد. به این ترتیب که آب را بافشار زیاد به درون چاه تزریق می‌کنند تا اولین شکاف‌ها ایجاد شوند. بعد فشار را کاهش می‌دهند این عمل منجر به ایجاد شکاف‌های جدید می‌شود. در این موقع فشار را قطع می‌نمایند تا آب گرم به طرف بالا حرکت نموده و خارج شود. پس از این مرحله چاه دیگری در فاصله ۱۰۰ متری یا بیشتر حفر می‌گردد. این چاه تا عمق بسیار کمی درداخل طبقه خرد شده قرار می‌گیرد. سپس آب را مجددا در حفاری اول با فشار می‌رانند تا معلوم شود که آیا شکاف‌های موجود برای ایجاد جریان آب بین دو چاه کافیست یا نه. اگر شکاف‌های موجود به اندازه کافی نبودند عمل خرد کردن هیدرولیکی را مجددا در هردو چاه تا حصول نتیجه قطعی ادامه می‌دهند.

۴- پس از طی مرحله فوق چاه‌ها برای بهره‌برداری آماده می‌شوند. در این موقع یک مولد برق را بین دو چاه قرار می‌دهند (مولد برق تولید بخار) و باید یک مدار بسته ایجاد شود تا از یک سو از طریق چاه عمیق‌تر، آب به درون زمین وارد و ازسوی دیگر به وسیله چاه دوم آب (یا بخار) خارج شود،

هنگامی که سیال گرم به سطح آورده می‌شود آن را به توربین یک نیروگاه منتقل کرده و برای تولید برق استفاده می‌شود. در خروجی نیروگاه، سیال از طریق حلقه چاه به زیر زمین تزریق و دوباره گرم می‌شود، در نتیجه حلقه بسته شکل می‌گیرد. در نتیجه‌ی این عمل پس از تحصیل انرژی، حرارت آب تقلیل می‌یابد و خود به خود مجددا وارد چاه اول می‌شود و به این ترتیب یک جریان دائمی بی پایان ایجاد می‌گردد.

علاوه بر این اگر نیروگاه ازچرخه دوتایی حلقه بسته برای تولید برق استفاده کند، هیچ آلودگی به اتمسفر ساطع نمی‌شود در واقع نیروگاه گازهای گلخانه‌ای تولید نمی‌کند و تنها بخار آب خود را ازسیستم‌های خنک کننده ساطع می‌کند.

۱ Alsace
۲ Rhineland-palatinate
۳ Soultz-sous-Forêts
۴ Lando



شکل ۴ طرح عمومی از اهداف نیروگاه برق زمین گرمایی EGS [۱۱]

همان‌طورکه در شکل ۴ دیده می‌شود، یک نیروگاه EGS شامل مجموعه امکانات بالای سطح زمین و زیر زمین است.

۱-۳- توسعه نیروگاه برق زمین گرمایی

۱-۱-۳- پیدا کردن یک محل

اولین گام در ایجاد یک مخزن انرژی EGS پیدا کردن محل مناسب بوده، جایی که گرمای زمین باید برای کاربردها به اندازه کافی بالا باشد، اما هزینه بالای حفاری در این‌گونه چاه‌های عمیق نکته‌ای اساسی است که باید در ملاحظات اقتصادی لحاظ گردد. گام بعدی ایجاد چاه اکتشافی برای اندازه گیری ویا پیش‌بینی خواص مخزن می‌باشد.

۲-۱-۳- ایجاد مخزن

پس از ملاحظات اولیه گام بعدی توسعه چاه اکتشافی اولیه تا رسیدن به دمای مورد نیاز می‌باشد. برنامه‌ریزی عملیات حفاری نیازمند اطلاعات لازم درباره خواص زمین در منطقه موردنظر(از جمله دما، تنش، ساختار، و غیره) می‌باشد.

پس از حفاری چاه تزریق و چاه تولید، فاصله بین دوچاه توسط یک سیال با فشار بالا و نرخ جریان زیاد باید پر گردد. درمواردی که این فاصله دارای شیار برای عبور سیال نباشد با تکنیک‌های مختلفی چون جت هیدرولیکی و یا روش‌های شیمیایی وحرارتی این شیار ایجاد می‌گردد. سیال وقتی باعث شکستگی می‌شود که در فشار بالا و با نرخ جریان بالا پمپ شود. همچنین وجود سیستم کنترل لرزه‌ای با کیفیت بالا و قابل اعتماد در محل برای نظارت بر مرحله تحریک هیدرولیکی در همه زمان‌ها ضروری است. این مرحله (مرحله تحریک هیدرولیکی) برای ساخت مخزن EGS خیلی مهم می‌باشد، هدف اصلی از این فرایندهای تحریک، ایجاد گذرگاه‌های لازم برای سیال است، که بتواند به طور موثر از چاه‌های تزریق به چاه تولید جریان یابد. به‌منظور تسهیل عملیات و صرفه‌جویی در هزینه، این گذرگاه‌ها باید به سیال با کمترین فشار ممکن اجازه عبور بدهند [۱۲].

هنگامی که حجم (توده) اولیه از سنگ توسط ترک‌های بزرگ موجود و یا یک ترک جدید تحریک می‌شود در این حالت می‌توان یک چاه تولید برای شروع گردش سیال حفرکرد. برای این که چاه تولید در فاصله مناسبی از چاه تزریق حفر شود، نیاز به دانشی کامل از ناحیه ترک دارد. همچنین، برای جلوگیری از هدر رفتن سیال از طریق جریان میان ترک‌های صخره، باید مطمئن شد که گذرگاه‌های باز شده در صخره داغ به اندازه کافی نفوذناپذیر باشند. تعداد چاه‌های تولید و تزریق حفر شده به اندازه مخزن، میزان بهره‌وری از چاه‌ها، و طرح توسعه بستگی دارد.

هنگام عملیات حفر یک مخزن EGS، هدف اصلی، حفظ نسبت خروجی سیال داغ درتمام طول عمر مفید نیروگاهیست که طراحی شده است. برای این منظور، استخراج گرما باید بهینه شود، یک میزان تولید مناسب حفظ شود، از هدر رفت مایع (سیال) در کل مخزن جلوگیری شده و همچنین هدر

رفت در تولید برق را باید به حداقل رساند. مدیریت موفقیت آمیز یک مخزن EGS نیاز به نظارت دقیق بر همه این متغیرها دارد، حرارت از دست رفته در طول فرایند استخراج مایع از مخزن باید به حداقل برسد، رادیواکتیویته (پرتو افشانی) طبیعی نیز باید کنترل شود [۱۳] و همچنین بازده نیروگاه تولید برق نیز باید تحت نظارت قرار گیرد. کلید دوام مالی در تکنولوژی EGS در این است که قادر به تولید انرژی در دوره های طولانی بدون نیاز به تعمیرات با هزینه‌های بالا می‌باشد.

هنگامی که مخزن راه اندازی شد، روش‌های بهره‌برداری مختلفی می‌تواند انتخاب شود و باید مشخص شود کدام یک بیشترین راندمان را در نیروگاه EGS دارا می‌باشد. بنابراین، مخزن می‌تواند، به عنوان مثال، توسط سیستم دو یا چند چاهی مورد بهره برداری قرار بگیرد [۱۴] در حالی که سیستم دو چاهی ساده‌تر و ارزان‌تر است، اما دومی نتیجه انعطاف‌پذیرتری را فراهم می‌کند طوری که اجازه ایجاد یک شبکه از چندین چاه تزریق و تولید را می دهد و همچنین منجر به کاهش فشار شده و خطرات لرزه‌ای که ممکن است در طی فرایند بهره‌برداری ایجاد شود را به حداقل می‌رساند.

۲-۳- تکنیک‌های بهینه‌سازی عملکرد

۲-۳-۱- استفاده از دی اکسید کربن (CO_2) به عنوان سیال عامل

ایده استفاده از CO_2 به جای آب به عنوان سیال عامل در فشارهای بالا، یک مفهوم جدیدی را در بهره‌برداری از نیروگاه‌های EGS معرفی می‌کند. CO_2 دارای خواص شیمیایی و حرارتی/ فیزیکی می‌باشد، که آن را به یک گزینه جذاب به عنوان یک وسیله انتقال حرارت تبدیل کرده است. در نیروگاه‌های EGS که از آب به عنوان سیال عامل استفاده می‌کنند تلفات (هدر رفتن) آب خود مانعی برای عملیات تجاری محسوب می‌شود [۱۵] اما در مورد CO_2 علاوه‌بر داشتن پتانسیل بالا برای ذخیره در مخزن، مهم‌ترین فایده استفاده از آن به عنوان سیال عامل برای EGS این است که میزان جریان گرمای واقعی داده شده از یک مخزن می‌تواند تا پنج برابر بیشتر از میزان جریان حرارت دست‌یافتنی با استفاده از آب شور تشکیل شده به عنوان سیال عامل باشد. مزیت دیگر CO_2 به عنوان سیال عامل این است که در نیروگاه های زمین گرمایی که با آب کار می‌کنند انحلال مواد معدنی و واکنش‌های شیمیایی قوی بین صخره و سفره‌های آب در دمای بالا می‌تواند مشکلات عمده‌ای را به‌وجود بیاورد. اما CO_2 یک محصول انحلال یونی نیست، بنابراین مشکل قابل توجه انحلال / رسوب (ته نشینی) ایجاد نمی‌کند. جدول ۲ مقایسه بین CO_2 و آب به عنوان سیال عامل درنیروگاه های EGS را نشان می‌دهد [۱۶].

جدول۲ مقایسه آب و دی اکسید کربن به‌عنوان سیال عامل در نیروگاه‌های زمین گرمایی بهبود یافته

خواص سیال	CO_2	H_{20}
شیمیایی	یک محصول انحلال یونی نیست.انحلال معدنی نیست/مشکلات رسوب ندارد	یک محصول انحلال یونی است.مشکلات جدی ناشی از انحلال معدنی و رسوب داشتن
گردش سیال در چاه‌ها	تراکم پذیری و قابلیت انبساط بالا	تراکم‌پذیری کم و قابلیت انبساط متوسط
سهولت جریان در مخازن زمین گرمایی	ویسکوزیته وچگالی کم	ویسکوزیته وچگالی کم
انتقال گرما	سطح گرمای ویژه ی پایین	سطح گرمای ویژه ی بالا

۲-۳-۲- استفاده از مایعات متراکم برای تحریک هیدرولیکی

تحریک هیدرولیکی با هدف ایجاد یک مبدل حرارتی در زیر زمین استفاده می‌شود، با این عمل، مقاومت کمی در مقابل عبور مایع از میان سنگ داغ در مخزن EGS ایجاد می‌شود [۱۷]. بهبود نفوذپذیری در سنگ داغ به معنای افزایش تعداد گذرگاه‌های طبیعی تولید شده توسط شکستگی در سنگ با استفاده از یک فرآیند فشار بیش از حد (فوق فشار) هیدرولیکی است که باعث ایجاد چنین ترک‌هایی می‌شود. خطر شکستن این صخره‌ها و تنش‌های آزاد شده توسط فرایندها ممکن است منجر به لرزه‌های کوچکی در منطقه شود. با این حال، فرایند شکست هیدرولیکی، تزریق آب در فشار بالا برای ایجاد ترک، غالبا درسنگ‌های گرانیت استفاده می‌شود. در مقایسه با شکستن هیدرولیک با فشار تزریق بالا، برش هیدرولیک به راحتی می‌تواند سنگ‌ها را با فشار کم ترک داده و شکستگی را بدون نیاز به یک عامل نگهدارنده، باز نگه دارد. همچنین ثابت شده است تحریک شیمیایی که بیشتر در سنگ‌های کربناته قابل اجرا است همراه با تحریک حرارتی در برخی موارد موثر است. با این حال، اطلاعات نسبتا کمی در مورد استفاده از فن آوری شیمیایی و تحریک حرارتی در پروژه های EGS وجود دارد. سایر مسائل مرتبط با تحریک EGS با اثرات مخرب بر محیط اطراف در ارتباط است. با این حال، استدلال می‌کنند که پروژه‌های EGS به ندرت به مواد افزودنی و مواد شیمیایی در شکستگی مایعات نیازدارد. هنگامی که مواد افزودنی لازم است، اول مواد شیمیایی غیر سمی مدنظر هستند. باتوجه به این نکته که مخازن EGS در اعماق زمین دفن شده‌اند معمولا به سفره‌های آب زیرزمینی نزدیک به سطح در ارتباط نیستند، لذا احتمال آلوده کردن آب آشامیدنی کاهش می‌یابد. پرتو افشانی مشکل دیگری در حال ظهور از فعالیت‌های EGS است، که ازفعل و انفعال بین مایع زمین‌گرمایی و برخی از تشکلات حاوی عناصر رادیواکتیو ایجاد می‌شود. به طور کلی، مقدار پرتوزایی سنگ‌های ماگمایی اسیدی در مقایسه با سنگ های رسوبی بالاتر است. اورانیوم و توریم از رایج ترین عناصر رادیواکتیو موجود در سنگ گرانیت هستند. با این حال، تولید رادیواکتیویته در EGS در مقایسه با تولید انرژی از منابع متعارف دیگر (مثلا

نفت و گاز)، بسیار کمتر است. از قرار گرفتن کارگران در معرض تابش در حین کار با استفاده از تجهیزات مناسب حفاظت شخصی جلوگیری می‌شود. به طور کلی تابش اشعه در EGS کم است زیرا طول عمر عناصر پرتوزا زیاد است و در طول بهره‌برداری از یک نیروگاه زمین گرمایی که سیال زمین‌گرمایی دوباره به مخزن تزریق می‌شود، منتشر نمی‌گردد.

تقریبا در تمام پروژه های در حال اجرا EGS در فاز تولید برق، از نیروگاه دوتایی استفاده شده است. سیستم‌های دوتایی در حلقه اولیه از سیالات زمین گرمایی با دمای پایین برای تبخیر سیال عامل با نقطه جوش کم استفاده می‌کند، که در حلقه ثانویه برای فعال‌کردن دستگاه توربین ژنراتور استفاده می‌شود. در حال حاضر، دو نوع سیستم دوتایی در بازار وجود دارد: چرخه رانکین آلی (ORC)[1]که از سیال عامل آلی (به عنوان مثال پروپان یا ایزوبوتین) استفاده می‌کند و سیکل کالینا[2]که از مخلوط دو ماده به عنوان سیال عامل (به عنوان مثال آب و آمونیاک) استفاده می‌کند. مزیت سیکل کالینا بیشتر از ORC است، زیرا مخلوط مذکور در درجه حرارت متغیر به جوش می‌آید، که این خود، راندمان بالاتر در درجه حرارت ورودی معین ایجاد می‌کند، و بر خلاف مواد شیمیایی خالص است که در ORC استفاده می‌شود. از معایب سیستم کالینا می‌توان به تمایل مخلوط آب و آمونیاک به متراکم شدن در طی انبساط اشاره کرد. از این رو، بسیاری از پروژه‌های اجرایی EGS تا کنون تمایل به استفاده از نیروگاه‌های ORC دارند. نرخ جریان برگشتی از پروژه‌های EGS در تعیین موفقیت یک پروژه بسیار مهم بوده و برای دوام اقتصادی این نوع پروژه‌ها، تضمین بالایی لازم می‌باشد. با این حال اگر این نرخ، بسیار بالا باشد، ممکن است زمان ماندن جریان در مخزن برای استخراج گرمای کافی از سنگ کافی نباشد. بسته به نفوذپذیری مخزن، سطح شکستگی، فشار پمپاژ، و غیره، سرعت جریان به طور قابل توجهی از پروژه به پروژه دیگر متفاوت است [۱۸]. درادامه به بیان پروژه هایی ازاین قبیل پرداخته می‌شود.

اولین طرح پیشنهادی برای استفاده از انرژی زمین گرمایی تولید شده در اعماق زیاد (EGS)، توسط فیزیک‌دانان در آزمایشگاه علمی لوس آلاموس (LASL)[3] در سال ۱۹۷۰ مطرح شد. مرحله اولیه این پروژه در سال۱۹۷۳ با همکاری (در قالب بودجه و پرسنل) آلمان و ژاپن آغاز شد. محل برگزاری این پروژه در فنتون هیل[4]حدود ۴۰ کیلومتری غرب لوس آلاموس، واقع در غرب ریو گراند (نیومکزیکو)[5]بود. در سال ۱۹۸۶، تقریبا پس از دو دهه از آزمایش‌ها، ظرفیت حرارتی سیستم (EGS) حدود۱۰ مگاوات گزارش شد. موفقیت این پروژه، پتانسیل بسیار بالای EGS را تایید کرده است و همچنین منجر به شروع یک رقابت تحقیقاتی در سراسر دنیا شد. پس از این پروژه به‌عنوان اولین پروژه تحقیقاتی در زمینه EGS، بسیاری از کشورهای دیگر در این زمینه تحقیق کردند، که در میان پروژه‌های انجام شده دیگر EGS برخی از آن‌ها که معروف هستند [۱۹] در جدول ۳ ذکر شده است. بنابر اهمیت فراوان، یکی دیگر از این پروژه‌ها یعنی سائولتز سوز فارتز فرانسه در زیر شرح داده شده است.

[1] Organic Rankin Cycle
[2] Kalian Cycle
[3] Los Alamos Science Laboratory
[4] Fenton Hill
[5] New Mexico

جدول ۳ پروژه‌های EGS در جهان

کشور	پروژه	بیشترین عمق (km)	گرادیان (℃/km)	دما(℃)	نوع نیروگاه	ظرفیت (MW)
ایالات متحده	دیزرت پیک[1][۱۹]	۱/۱	۱۷۸	۱۹۶	باینری	۱۱-۵۰
فرانسه	سولتز[2]	۵	۱۰۰	۲۰۰	باینری	۱/۵
ژاپن	هیجیوری[3][۲۰]	۲/۲	۱۲۳	۲۷۰	باینری	۰/۱۳
استرالیا	کوپربیسین[4]	۴/۴	۵۷	۲۵۰	کالینا	۲۵
آلمان	گروس اسچوینبک[5][۲۱]	۴/۲	۳۵	۱۴۹	باینری	۰/۷۵

۱ Desert peak
۲ Soultz
۳ Hijiori
۴ Cooper basin
۵ Gross Schoenebeck

۳-۳-۳- پروژه HDR سائولتز سوز فارتز فرانسه

پروژه HDR سائولتز سوز فارتز فرانسه به عنوان یکی دیگر از پروژه‌های پایه در سال ۱۹۸۷ در اروپا پس از نتایجی که در آزمایشگاه علمی لوس آلاموس در ایالات متحده آمریکا گرفته شد شروع به کار کرد. این پروژه در سال ۲۰۰۱ پس از اثبات شکست سنگ گرانیتی زیرزمینی بالای رود راین که حاوی حجم زیادی از مایع شور داغ بود، به یک پروژه سیستم زمین گرمایی بهبود یافته (EGS) تغییر عنوان داد. چندین پروژه تحقیقاتی متحد HDR با هم در یک برنامه واحد اروپا، مستقر در سائولتز سوز فارتز، بهم پیوستند. شرکای این پروژه، فرانسه، آلمان، ایتالیا، سوئیس، و انگلستان هستند و هزینه آن توسط شرکا و همچنین توسط کمیسیون اروپایی پرداخت می‌شود. آوردن اروپا به‌طور کامل در این رقابت به خاطر توسعه ی EGS می‌باشد .[۲۰]

یکی از مشکلات اصلی در رابطه با سهم EGS، اندازه‌گیری (تعیین کمیت) تعادل انرژی آینده است. در می‌ماه[۱]سال ۲۰۱۳، نیروگاه ژئودینامیک هابانرو[۲](استرالیا) شروع به کار کرد [۱۴] این اولین نیروگاه خصوصی EGS تجاری برای تولید برق در مقیاس بزرگ است. قبل از راه‌اندازی آن فقط کارگاه‌های تحقیقاتی پراکنده در سراسر جهان وجود داشتند.

EGS از نظر استفاده برای تولید برق، از هر سیستم زمین گرمایی دیگری کارآمدتر است و همچنین می‌تواند بخش قابل توجهی از انرژی حرارتی دما پایین استفاده شده را ذخیره کند، چرا که در مقایسه با دیگر سیستم‌های زمین گرمایی تنها یک بخش کوچک که گسترده‌ترند و در سراسر دنیا پراکنده شده اند را شامل می‌شوند و ظرفیت آنها برای تولید برق بیشتر است [۲۱].

۴- نتیجه‌گیری

دراین مطالعه انرژی زمین گرمایی و انواع آن و همچنین به عنوان نوآوری این تحقیق یکی از روش‌های جدید استفاده از این انرژی در قالب EGS یا انرژی تولید شده حاصل از استخراج گرمای سنگ‌های منابع خشک توسط تزریق جریان آب به درون اعماق و دل سنگ‌های داغ بررسی شده است. این انرژی پس ازآمدن به سطح زمین به صورت مستقیم برای گرمایش یا به صورت غیر مستقیم پس از تبدیل‌سازی انرژی وارد شبکه سراسری برق شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عملکرد یک مخزنEGS ، موضوعی است که برای حفظ نرخ سیال گرم خروجی در یک سطح مناسب در سراسرطول عمر مفید نیروگاه اهمیت دارد. در فرایند ایجاد مخزن، ابتدا محل مناسب برای مخزن موقعیت یابی و سپس اقدامات مربوط به حفر چاه انجام گردیده، ضمن ایجاد مخزن، نکات ایمنی از جمله لرزه‌خیزی به علت تزریق سیال، احتمال فرونشست زمین به علت استخراج سیال، آلودگی صوتی، و سایر عوامل مورد توجه قرار گرفته است.

جهت بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه به بررسی عواملی همچون سیال عامل برای بهره‌برداری از انرژی گرمایی و همچنین شیوه‌های تحریک سنگ‌ها به منظور ایجاد شکاف پرداخته گردید. که طبق تحقیقات سیال عامل جایگزین CO_2 به علت خواص شیمیایی و فیزیکی آن و عدم انحلال با مواد شیمیایی درون زمین مورد توجه قرارگرفت. هم‌چنین منابع EGS به صورت طبیعی با رخ دادهای لرزه‌ای و یا به صورت مصنوعی با تحریک هیدرولیکی یا شیمیایی به منابعی نفوذپذیر تبدیل می‌شوند. به‌دلیل تزریق سیال شیمیایی به داخل شکاف صخره‌ها در روش تحریک شیمیایی و ایجاد تهدید برای منابع آب آشامیدنی، این روش به ندرت مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است. در تحریک هیدرولیکی، تزریق سیال با فشار بالا در منبع، باعث ایجاد شکست در جداره منبع و ایجاد درزهای کوچک در مسیر جریان می‌گردد. آگاهی از شکل، اندازه و نفوذپذیری ناحیه‌ای که توسط تحریک هیدرولیکی ایجاد می‌شود برای ارزیابی عملی بودن پروژه و تعیین بهترین محل چاه‌های تزریق و تولید اهمیت زیادی دارد. در ادامه، پروژه‌های عملی انجام شده در زمینه EGS مورد بررسی قرار گرفت. پروژه HDR فنتون هیل سمت غربی دهانه آتشفشان والس، ۴۰ کیلومتری غرب لوس آلاموس واقع شده است. این پروژه، نشان داد که منابع حرارتی ذخیره شده در سنگ گرم زیرزمین که حاوی هیچ سیالات گرمابی مادری و یا نفوذپذیری نیستند را می‌توان با گردش آب‌های سطحی سرد از طریق یک شبکه شکستگی در عمق، و سپس بازیافت آب گرم برای استفاده در تولید انرژی زمین گرمایی مورد استفاده قرار داد.

فهرست علائم

Q_{ex}	حرارت قابل حصول (J)
V	حجم صخره (m^3)
C_p	ظرفیت گرمای ویژه صخره ($J/kg-k$)
ΔT	گرادیان دما ($^\circ K$)

علائم یونانی

ρ	چگالی صخره (kg/m^3)

۱ May
۲ Habanero

مراجع

[1] S.K. Sanyal, *Sustainability and renewability of geothermal power capacity*. In: L.Y. Bronicki (Eds), *Geology and Hydrology of Geothermal Energy*. pp 47-60. Springer, New York, NY. 2018.

[2] S.K. Sanyal, J.W. Morrow, S.J. Butler and A. Robertson-Tait. Cost of electricity from enhanced geothermal systems. *Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* Stanford University, Stanford, California, January 22-2۴, ۲۰۰۷.

[3] P. Olasolo, M.C. Juárez, M.P. Morales, Sebastiano D´Amico, I.A. Liarte Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* Vol. 56,pp. 133–۱۴۴. ۲۰۱۶.

[4] J.W. Lund, D.H. Freeston, T.L. Boyd. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. Geothermics. Vol. ۴۰. □□. ۱۵۹–۱۸۰. ۲۰۱۱.

[5] R. Shortall, A. Kharrazi, Cultural factors of sustainable energy development: A case study of geothermal energy in Iceland and Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. ۷۹. □□. ۱۰۱-۱۰۹. ۲۰۱۷.

[6] D. Moya, C. Aldas, P. Kaparaju, Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 94, pp 889-901. 2018.

[7] S.Y. Pan, M. Gao, K.J.Shah, J. Zheng, S.L. Pei, P.C. Chiang, Establishment of enhanced geothermal energy utilization plans: Barriers and strategies. Renewable Energy. Vol. ۱۳۲, □□ ۱۹-۳۲. ۲۰۱۹.

[8] R. Bertani, Geothermal power generation in the world 2005–۲۰۱۰ □□□□□□ □□□□□□. □□□□□□□□□□□. □□□. ۴۱, □□. ۱-۲۹. ۲۰۱۲.

[9] W. E.Glassley, *energy and the environment series*. p. 267, 2010.

[10] B. Fritz, E. Jacquot,B. Jacquemont,A. Baldeyrou-Bailly, M. Rosener, Geo chemical modeling of fluid rock interactionsin the context of the Soultz- sous-Forêts geothermal system. *Comptes Rendus Geoscience*. Vol. 342, pp. 653-667. 2010.

[11] ph. Heidinger, Integral modeling and financial impact of the geothermal situation and power plant at Soultz-sous-Forêts. Comptes Rendus Geoscience. Vol. 342 , pp 626-635. 2010.

[12] J.T. Finger, *Drilling for geothermal resources*. In: L.Y. Bronicki (Eds), *Geology and Hydrology of Geothermal Energy*. pp 79-117. Springer, New York, NY. 2018.

[13] L. Eggeling, A. Genter, T. Kölbel, and W. Münch, *Geothermics Impact of natural radionuclides on geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben*, *Geothermics*, vol. 47, pp. 80–88, 2013.

[14] D. Chen and D. Wyborn, *Habanero Field Tests in the Cooper Basin, Australia: A Proof-of-Concept for EGS*. GRC Transactions, Vol. 33, 2009.

[15] F. Zhang, P. Jiang, and R. Xu, *System thermodynamic performance comparison of CO 2 -EGS and water-EGS systems, Applied Thermal Engineering*, vol. 61, no. 2, pp. ۲۳۶–۲۴۴, ۲۰۱۳.

[16] J. B. Randolph and M. O. Saar, *Combining geothermal energy capture with geologic carbon dioxide sequestration,* vol. 38, pp. 1–7, 2011.

[17] H. Hofmann, T. Babadagli, and G. Zimmermann, *Hot water generation for oil sands processing from enhanced geothermal systems : Process simulation for different hydraulic fracturing scenarios*, *Applied Energy*, vol. 113, pp. 524–۵۴۷, ۲۰۱۴.

[18] S. K. Sanyal and S. J. Butler, *An Analysis of Power Generation Prospects from Enhanced Geothermal Systems*, no. April, pp. 24–29, 2005.

[19] F. Hill, D. Duchane, and D. Brown, *hot dry rock (HDR) geothermal energy research and development* at, pp. 13–19, ۲۰۰۲.

[20] A. Gérard, A. Genter, Th. Kohl, Ph. Lutz, P. Rose, F. Rummel .*The deep EGS (Enhanced Geothermal System) project at Soultz-sous-Forets (Alsace, France)*.Energy and Geoscience institute .Vol. 35, No. 11. pp. 473-483. 2006.

[21] T. J.Reber, K. F. Beckers, J. W. Tester. The transformative potential of geothermal heating in the U.S. energy market: A regional study of New York and Pennsylvania. Energy Policy. Vol. 70, pp 30-44. 20