The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Online ISSN: 2980-8693

Economic and environmental evaluation of utilization of geothermal energy resources

Mahshid Noorollahi[1] | Hossein Yousefi[2*]

1. Faculty of Economy, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: m.noorollahi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran, Iran. Email: hosseinyousefi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 21 October 2022
Revised 20 November 2022
Accepted 15 December 2022
Published Online 06 May 2024

Keywords:
Geothermal energy,
Renewable energy,
Direct use,
Green energy,
Low carbon development.

ABSTRACT

Low-temperature geothermal resources exist throughout entire Iran, and there is tremendous potential for new direct-use applications. Recent surveys identified many thermal springs and low- to moderate-temperature geothermal resource areas, and hundreds of potential direct-use sites. Direct utilizing geothermal energy in homes and commercial operations is much more costly than utilizing fossil fuels in Iran because of highly subsidized fossil fuels in an oil-reach country such as Iran. But geothermal energy is also very clean, producing only a small percentage (and in many cases none) of the air pollutants emitted by burning fossil fuels. Thus, governmental support for the development of these clean energy sources is required. Geothermal energy becomes immense potential to contribute to our clean energy future. In this paper, we described how the new Iranian legislation on green energy development can be changed to have effective support for the development of direct utilization of geothermal energy in the future. Government can help bring this cleaner energy future to reality by increasing funding for geothermal research, development, and demonstration; streamlining permitting; offering financial incentives to ease geothermal adoption into the marketplace.

Cite this article: Noorollahi, M. & Yousefi, H. (2023). Economic and environmental evaluation of utilization of geothermal energy resources. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 2 (3), 273-284. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.372886.1052

© Mahshid Noorollahi, Hossein Yousefi. **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.372886.1052

Introduction

Geothermal energy is one of the favorable renewable energy resources from which the heat is driven from the earth's core**.** If properly developed, it can offer a sustainable energy resource for any heat application**.** In countries such as Kenya, Iceland and New Zealand they used geothermal energy in three primary applications, including power generation, direct heat application, and geo-heat pumps. Direct use includes applications such as heating buildings or greenhouses and drying foods**.** The use of geothermal energy in Iran has made less progress in recent years compared to alternative sources of renewable energy**.**

The expansion of renewable energy meets the energy demand with less pollution. Fortunately, besides to being renewable, geothermal energy has less pollution compared to alternative sources of energy production and is considered one of the cleaner sources of energy. In recent years, there has been much research on geothermal energy use and the opportunities and challenges it faces in different countries

This paper provides a brief overview of geothermal activities in Iran and Its major obstacles and barriers to direct heat application including economic, policy, and technological barriers. This is divided into the following three main sections: Iran's geothermal resources, and heat energy demand

and supply, direct application major obstacles. In the following, we will discuss the future and obstacles to geothermal heat development in Iran.

Matherials and methods

The potential of geothermal energy in Iran is based on the studies conducted in more than 18 high-potential regions, these regions have been identified based on the number of tectonic activities, the number of hot water springs, the emergence of the earth's surface, and other geological evidence**.**

Geothermal energy can play a significant role in dropping carbon dioxide and other greenhouse gas emissions. This energy is available for power generation in 26 countries and 82 countries around the world in the form of direct utilization. Also, this energy source can play an important role in world energy policies. In addition to identifying the benefits of geothermal energy, this brief also identifies some of the major challenges such as transmission constraints and regulatory barriers. The ability of geothermal energy is to:

- Deliver reliable heat at a constant price;
- Help government to diversify the fuels mix for heat supply;
- Supply heat with minimum environmental affects and air emissions;
- Generate economic development opportunities, especially in rural areas; and
- Provide reliable heat for agricultural, industrial, and other heating applications

Coclousion

We can follow the development of geothermal heat in Iran in three areas: knowledge and technology, human resources, and financial support. In the field of science and knowledge development, goals such as the localization of design and transfer of heat plant technologies, as well as the development of non-technical knowledge, and the improvement of knowledge transfer between the main players in this field can be determined and pursued. Also, establishing policies for targeted financial support for commercial and non-commercial research, financing technology companies with venture capital, and granting loans and bank facilities to carry out pilot projects can be effective. In addition to the mentioned cases, measures such as providing tax incentives to private companies in the field of geothermal exploitation development, developing the necessary mechanism to support risky investments by the private sector in the field of geothermal exploration, and creating a reliable market through the government's purchase of quality products can accelerate the development of geothermal energy.

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار
سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰
انتشارات دانشگاه تهران

تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی بهره‌برداری از منابع انرژی زمین‌گرمایی

مهشید نوراللهی[۱] | حسین یوسفی[۲*]

۱. دانشجوی کارشناسی اقتصاد، دانشکدهٔ اقتصاد، دانشگاه تهران. رایانامه: m.noorollahi@ut.ac.ir
۲. نویسندهٔ مسئول، دانشیار دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار دانشگاه تهران. رایانامه: Hosseinyousefi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

کلیدواژه:
اقتصاد انرژی،
انرژی‌های تجدیدپذیر،
انرژی زمین‌گرمایی،
استفادهٔ مستقیم حرارتی،
ایران

چکیده

منابع انرژی زمین‌گرمایی با دمای پایین در ایران به طور فراوان در مناطق مختلف کشور یافت می‌شود، در نتیجه ایران پتانسیل بسیار بالایی در به‌کارگیری روش‌های جدید برای استفاده‌های مستقیم حرارتی از انرژی زمین‌گرمایی دارد. طبق بررسی‌های اخیر از چشمه‌های آب گرم ایران، مناطقی با منابع انرژی زمین‌گرمایی کم تا متوسط و همچنین مناطقی با پتانسیل زیاد برای استفاده از انرژی زمین‌گرمایی با تکنولوژی‌های جدید شناسایی شده است. استفاده‌های مستقیم حرارتی از انرژی زمین‌گرمایی برای مصارف خانگی و تجاری در ایران که دارای حجیم عظیمی از منابع تجدیدناپذیر است، بسیار پرهزینه‌تر از استفاده از سوخت‌های فسیلی است. اما در مقابل انرژی زمین‌گرمایی، انرژی پاک با درصد آلایندگی بسیار کم (در برخی موارد بدون هیچ‌گونه آلودگی) در مقابل سوخت‌های فسیلی است. بررسی‌ها نشان می‌دهند انرژی زمین‌گرمایی پتانسیل بسیار بالایی برای تبدیل شدن به یکی از منابع بزرگ انرژی‌های پاک در آینده را دارد. در این مقاله اشاره خواهیم کرد که چگونه تغییر قوانین ایران در حوزهٔ انرژی‌های پاک می‌تواند حمایت مؤثری برای توسعهٔ استفادهٔ مستقیم حرارتی از انرژی زمین‌گرمایی باشد. دولت ایران می‌تواند از طریق اختصاص بودجهٔ بیشتر برای تحقیق و توسعه، ساده‌سازی مجوزها و ارائهٔ مشوق‌های مالی برای سهولت پذیرش انرژی زمین‌گرمایی در بازار، کشور را به سمت استفاده از انرژی‌های پاک برای داشتن هوایی پاک و محیطی پاکیزه برای زندگی هدایت کند.

استناد: نوراللهی، مهشید و یوسفی، حسین (۱۴۰۲). تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی بهره‌برداری از منابع انرژی زمین‌گرمایی. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۲ (۳) ۲۷۳-۲۸۴ . DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.372886.1052

© مهشید نوراللهی، حسین یوسفی.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.372886.1052

۱. مقدمه

از انرژی زمین‌گرمایی که از گرمای اعماق زمین حاصل می‌شود، به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر محبوب یاد می‌شود [۱]. این منبع انرژی، پاک، فراوان و قابل اطمینان است. اگر منابع این انرژی به‌درستی توسعه یابد، می‌تواند یک منبع انرژی پایدار برای هر کاربرد حرارتی ارائه دهد. در سال ۲۰۱۷ تولید برق از طریق انرژی زمین‌گرمایی ۳/۱ درصد نسبت به سال قبل افزایش داشته است. به طور کلی سهم انرژی زمین‌گرمایی در تولید برق جهانی ۰/۳ درصد است، اما در برخی کشورها استفاده از این نوع انرژی در تولید برق نقش مهمی را ایفا می‌کند. به عنوان مثال در کشور کنیا ۴۰ درصد، ایسلند ۲۵ درصد و در نیوزیلند ۱۸ درصد از تولید برق از این طریق انجام می‌شود [۲]. انرژی زمین‌گرمایی در این کشورها سه کاربرد مختلف دارد که شامل تولید برق، کاربرد مستقیم حرارتی و پمپ‌های حرارتی است. برای استفاده‌های مستقیم می‌توان از کاربردهایی مانند گرم کردن ساختمان یا تأمین گرمایش گلخانه‌ها و خشک کردن مواد غذایی یاد کرد.

استفاده از انرژی زمین‌گرمایی در ایران در سال‌های اخیر در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر پیشرفت کمتری داشته است [۳]. اما در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت فناوری تبادل حرارت و حفاری، توسعه و استفاده از این انرژی افزایش داشته است [۴]. امروزه تولید انرژی از منابع سوخت‌های فسیلی با آلودگی قابل توجه زیست‌محیطی همراه است [۵]. از طرفی پیشرفت و گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر با آلودگی کمتر، توانایی برطرف کردن نیاز انرژی را دارد. خوشبختانه علاوه بر تجدیدپذیر بودن انرژی زمین‌گرمایی، این منبع آلودگی کمتری نسبت به منابع تولیدی انرژی دیگر دارد و از آن به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر پاک یاد می‌شود؛ البته نه به این معنا که انرژی زمین‌گرمایی هیچ‌گونه آلودگی تولید نمی‌کند، بلکه میزان آلایندگی آن در مقایسه با انرژی‌های فسیلی یا نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار کم است و با صرف هزینه‌های بسیار کمی به حداقل ممکن می‌رسد [۶]. شایان یادآوری است که برخی از نیروگاه‌های تولید برق از انرژی زمین‌گرمایی کاملاً عاری از آلودگی هستند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود [۷]. میزان آلودگی تأسیسات انرژی زمین‌گرمایی با دمای سیال زیر زمین رابطهٔ مستقیم دارد. بنابراین منابعی با گرمای بالا نسبت به منابعی با گرمای پایین‌تر آلودگی بیشتری تولید می‌کنند و نیروگاه‌های حرارتی زمین‌گرمایی نیز نسبت به نیروگاه‌های تولید برق زمین‌گرمایی کمتر به محیط زیست آسیب می‌رسانند.

انرژی زمین‌گرمایی پتانسیل بسیار بالایی در تولید برق و حرارت با هزینهٔ کمتر برای ساختمان‌ها و فرایندهای صنعتی دارد [۸]. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در مورد استفاده از انرژی زمین‌گرمایی و چالش‌های پیش روی آن در کشورهای مختلف دنیا انجام شده است. در سال ۲۰۱۵ بررسی منابع و کاربردهای انرژی زمین‌گرمایی در چین انجام شد. هدف این تحقیق شناخت منابع انرژی زمین‌گرمایی، بهره‌برداری از آن‌ها و تهیهٔ نقشهٔ راه برای توسعهٔ اقتصادی انرژی زمین‌گرمایی بود [۹].

آن‌ها تصمیم گرفتند برای دستیابی به توسعهٔ پایدار انرژی زمین‌گرمایی در چین، روی موضوعاتی مانند توسعهٔ فناوری انرژی زمین‌گرمایی، نیروگاه‌های کوچک و کم‌هزینه، سیستم‌های زمین‌گرمایی هیبریدی و استفادهٔ پایدار از منابع زمین‌گرمایی تمرکز کنند. شورتال و همکارانش [۹] انرژی زمین‌گرمایی را برای رسیدن به اهداف توسعهٔ پایدار مورد بررسی قرار دادند. هدف از پژوهش یادشده، بررسی رابطهٔ بین انرژی زمین‌گرمایی و توسعهٔ پایدار بود. آن‌ها تمام نتایج مثبت و منفی را تجزیه‌وتحلیل کردند و زمینه‌ای برای تحقیقات آینده به وجود آوردند.

این مقاله مروری اجمالی بر فعالیت‌های انرژی زمین‌گرمایی در ایران و موانع عمدهٔ آن برای کاربرد مستقیم حرارت زمین از جمله موانع اقتصادی، سیاسی و تکنولوژیکی است.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. عرضه و تقاضای انرژی حرارتی در ایران

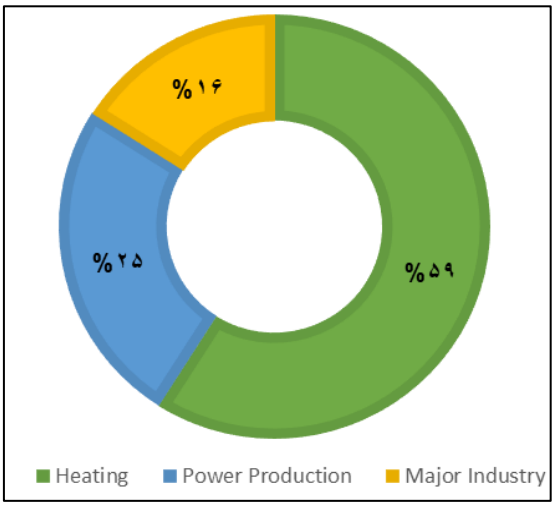
در سیاست‌های انرژی ایران تمرکز بر بخش‌های صنعتی بیشتر از بخش‌های مسکونی است. مطالعات موجود روی مصرف انرژی بسیار وسیع است و توجه به‌خصوصی در زمینهٔ توسعهٔ اقتصادی و صنعتی دارند. در این مطالعه شدت مصرف انرژی در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد بخش گرمایش ساختمان‌ها سهم عمده‌ای از مصرف گاز طبیعی کشور را به

خود اختصاص داده است. پیچیدگی تحلیل مسائل ناشی از مصرف انرژی و توسعهٔ پایدار، نیازمند بررسی جامع مصرف انرژی در بخش گرمایش ساختمان‌های ایران است.

بررسی داده‌های موجود نشان می‌دهد سهم بخش گرمایش ساختمان‌ها به کل تقاضای گاز طبیعی در ایران در سال ۱۴۰۰ معادل ۵۹ درصد بوده که در مقایسه با سایر بخش‌ها در شکل ۱، بالاترین سهم را به خود اختصاص داده است.

بخش گرمایش ساختمان‌ها با سهم ۵۹ درصدی در سال ۱۴۰۰ بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ گاز طبیعی در کشور است و پس از آن بخش برق (۲۵ درصد) و صنایع بزرگ (۱۶ درصد) بیشترین مصارف گاز طبیعی را به خود اختصاص می‌دهند. بررسی روند مصرف انرژی در بخش‌های مختلف نشان می‌دهد سهم گرمایش ساختمان‌ها در حال افزایش است، در حالی که سهم صنعت از مصرف گاز طبیعی ثابت مانده است. تولید گاز طبیعی ایران هم به دلایل زمین‌شناسی و هم به دلیل کمبود سرمایه‌گذاری و استفاده از فناوری‌های روز، روند کاهشی به خود گرفته است.

مصرف گاز طبیعی در ایران در بخش‌های مختلف بین سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ به میزان ۲/۷ درصد در سال رشد کرده و در سال ۱۴۰۰ به ۲۳۳ میلیارد مترمکعب رسیده است. پیش از این نیز بین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶، به میزان ۶ درصد در سال افزایش یافته بود. پیش‌بینی شده است که مصرف گاز طبیعی به ۳۳۷ میلیارد متر مکعب در سال ۱۴۰۲ برسد که این سناریو مبتنی بر ادامهٔ روند افزایشی فعلی است.



شکل ۱. سهم بخش گرمایش به کل تقاضای گاز در ایران در سال ۲۰۲۱

ایران دارندهٔ دومین ذخایر گازی جهان است، با این‌وجود به‌سختی قادر به برآوردن تقاضای داخلی مصرف گاز طبیعی است، زیرا عدم سرمایه‌گذاری کافی در صنعت نفت و گاز و همچنین تکنولوژی‌های قدیمی و به‌روزنشده باعث کاهش پیوستهٔ تولید شده است. دولت ادعا می‌کند برنامه‌ای برای قطع گاز خانوارها ندارد. در عوض میزان گاز مصرفی بخش صنعت را به دلیل عدم استخراج گاز کافی کاهش می‌دهد و به این‌صورت بسیاری از کارخانه‌های سیمان، فولاد و پتروشیمی که انرژی‌بر هستند، تولید خود را متوقف می‌کنند و ضربهٔ سختی را به اقتصاد و اشتغال کشور در کوتاه‌مدت و بلندمدت وارد می‌کنند.

انرژی زمین‌گرمایی به عنوان یک منبع انرژی پایه و پایدار می‌تواند برای تأمین بخشی از تقاضای برق و حرارت کشور برای بخشهای تقاضای گرمای مسکونی، تجاری و صنعتی نقش کمک‌کننده داشته باشد.

۲. ۲. توسعهٔ زمین‌گرمایی در ایران

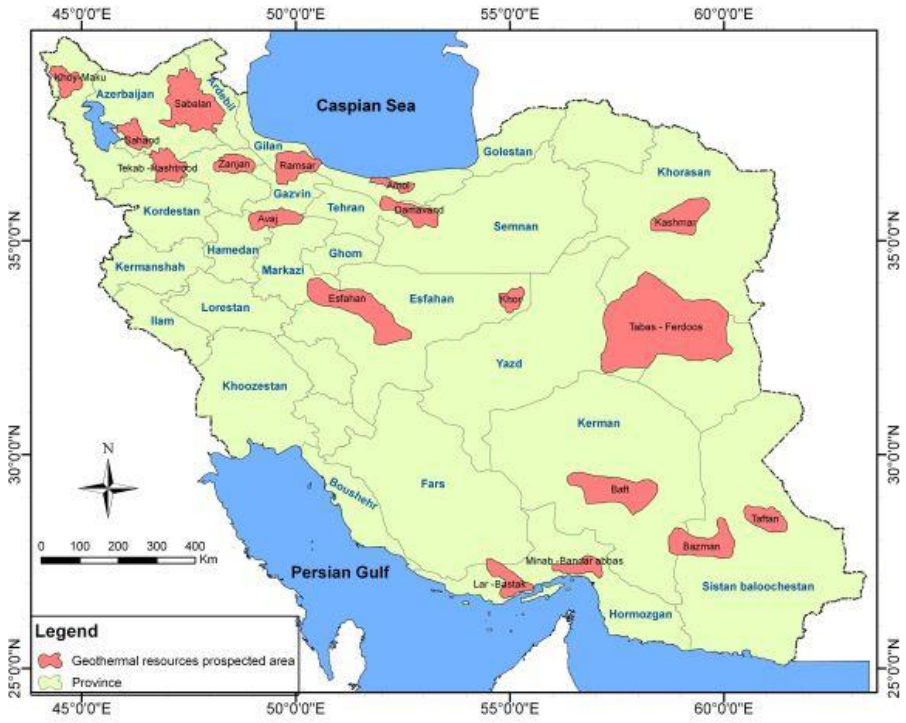
ایران روی کمربند انرژی زمین‌گرمایی جهان قرار دارد که یک پتانسیل برای توسعهٔ انرژی زمین‌گرمایی به حساب می‌آید. دمای برخی از چشمه‌های آب گرم در نواحی شمال غربی ایران به ۸۶ درجهٔ سانتی‌گراد در سطح زمین می‌رسد. برای اولین‌بار در ایران وزارت نیرو به همراه مشاوران خود پتانسیل انرژی زمین‌گرمایی را اندازه‌گیری کردند [۱۰]. طی قراردادی که بین وزارت نیرو،

شرکت برق دولتی ایتالیا (ENEL) و شرکت تهران برکلی ایران منعقد شد، مطالعهٔ سیستماتیک محدوده‌های زمین‌گرمایی ایران در سال ۱۹۷۵ آغاز شد [۳]. مطالعات در اواسط دههٔ ۱۳۶۰ شمسی به پایان رسید و چهار منطقهٔ پتانسیل‌دار عمده شامل سبلان، دماوند، سهند و خویـ ماکو معرفی شد.

اولین منطقه از مناطق پتانسیل‌دار انرژی زمین‌گرمایی، منطقهٔ سبلان بود که در سال‌های بعد برای انجام مطالعات دقیق‌تر و اکتشافات عمیق انتخاب شد. در این منطقه، پنج ناحیهٔ امیدبخش پتانسیل‌دار دیگر نیز از طریق اکتشافات سطحی و مطالعات *امکان‌سنجی* اولیه از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۰ شناسایی شدند [۱۱ و ۱۲]. در میان آن نواحی، میدان زمین‌گرمایی شمال غربی سبلان (مشکین‌شهر) برای بررسی و اکتشافات تکمیلی قطعی مشخص شد تا تحقیقات مهندسی مخزن و ارزیابی کیفیت و محدودیتهای مخزن را تکمیل کنند.

قرار گرفتن در کمربند آتش‌فشانی باعث شده است که ایران از نظر ساختار زمین‌شناسی و بهره‌مندی از پتانسیل بالای انرژی زمین‌گرمایی بسیار فعال باشد و وجود فعالیت‌های آتش‌فشانی فراوان و چشمه‌های آب گرم گواه این ادعاست [۱۳ و ۱۴]. پتانسیل انرژی زمین‌گرمایی در ایران بر اساس مطالعات انجام‌شده در سال‌های بعد نشان می‌دهد در بیش از ۱۸ منطقهٔ پتانسیل‌دار ایران، منابع عظیمی از انرژی زمین‌گرمایی وجود دارد که این مناطق بر اساس تعداد فعالیت‌های زمین‌ساختی، تعداد چشمه‌های آب گرم و سایر شواهد زمین‌شناسی شناسایی شده‌اند.

از انرژی زمین‌گرمایی به طور عمده به دو صورت اصلی می‌توان استفاده یا بهره‌برداری کرد که شامل تولید برق و استفادهٔ مستقیم حرارتی که در ادامه به بررسی این دو نوع استفاده پرداخته خواهد شد. شکل ۲ محدودهٔ مناطق پتانسیل‌دار انرژی زمین‌گرمایی ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۲. چهار منطقهٔ پتانسیل‌دار انرژی زمین‌گرمایی در شمال غرب ایران [۱۶]

۲. ۲. ۱. تولید برق

بر اساس طبقه‌بندی‌های جهانی، ایران در گروه کشورهایی قرار دارد که دارای ذخایر بالقوهٔ زیادی برای تولید برق از انرژی زمین‌گرمایی هستند. نتایج نشان می‌دهد ایران توانایی تولید برق با ظرفیت بیش از ۲۵۰ مگاوات برق فقط در ناحیهٔ زمین‌گرمایی

شمال غرب سبلان دارد. در این منطقه در حال حاضر یک نیروگاه ۵ مگاواتی در دست ساخت است که امید است در سال ۱۴۰۲ به بهره‌برداری برسد که اولین نیروگاه زمین‌گرمایی ایران خواهد بود [۳، ۱۵ و ۱۶].

در این نیروگاه دمای سیال در عمق زمین، بیش از ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد است که با رسیدن سیال از طریق چاه عمیق به سطح زمین با کاهش فشار، آب داغ در داخل سیال زمین‌گرمایی موجود در تجهیزات تفکیک‌کننده، به بخار و آب تفکیک می‌شود. بخار از تفکیک‌کننده به توربین‌های بخار هدایت شده و با به حرکت درآوردن توربین تولید برق را ممکن می‌سازد. این نیروگاه قرار است در فازهای بعدی توسعه یابد و بتواند بخشی از انرژی الکتریکی و حرارتی مورد نیاز استان اردبیل را تأمین کند. همچنین امید است غیرآلاینده بودن نیروگاه بتواند به حفظ محیط طبیعی و افزایش گردشگری در منطقهٔ توریستی سبلان کمک کند. ایران در درازمدت با استفاده از دانش به‌دست‌آمده از این نیروگاه قصد دارد تا ۱۲ نیروگاه زمین‌گرمایی دیگر را در کشور راه‌اندازی کند.

۲. ۲. ۲. استفاده‌های حرارتی مستقیم

ایران دارای مکان‌های مختلف با طیف وسیعی از چشمه‌های آب گرم با دمای سطحی از ۲۵ تا ۸۵ درجهٔ سانتی‌گراد است [۳ و ۱۷]. با این‌وجود بیشترین چشمه‌ها از نظر زمین‌شناسی در شمال غربی کشور در منطقه‌ای با زمستان‌های سرد واقع شده‌اند. هنوز ذهنیت خوبی از استفادهٔ مستقیم حرارتی از سیال داغ زمین‌گرمایی به دلیل منابع انرژی فسیلی (نفت، گاز و برق) به طور کامل ایجاد نشده است. اما کاربردهایی مانند اهداف ورزشی و آب‌درمانی از طریق شنا و استخرهای آب‌درمانی از سالیان گذشته به عنوان استفاده از گرمای مستقیم انرژی زمین‌گرمایی در منطقه وجود داشته است [۱۳ و ۱۵]. با این‌حال، از سال ۱۳۸۰ تلاش‌های زیادی صورت گرفته است تا ایدهٔ استفادهٔ مستقیم برای مصارف کشاورزی، پرورش ماهی و گلخانه به مقامات دولتی شناسانده شود. در منطقهٔ اردبیل ضمن تلاش برای ارزیابی وضعیت استفاده از آب با دمای بالا، این منطقه به عنوان شناخته‌شده‌ترین مکان برای بهره‌برداری ورزشی از آب‌های گرم در ایران انتخاب شده است. در شمال غربی ایران، استان اردبیل یکی از چشم‌اندازهای فعال زمین‌گرمایی در نزدیکی آتش‌فشان چینهٔ سبلان است [۱۷].

۲. ۲. ۳. پمپ حرارتی زمین‌گرمایی (GHP[1])

پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی به عنوان گزینه‌های نوینی برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها و تأمین آب گرم مصرفی در نظر گرفته می‌شوند. مصرف کم برق و هزینهٔ تعمیرات پایین باعث شده تا استفاده از پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی در سیستم‌های تهویهٔ مطبوع رایج شود. در میان انواع سیستم‌هایی که شامل پمپ‌های حرارتی می‌شوند، ترکیب پمپ‌های حرارتی و انرژی زمین‌گرمایی به دلیل پایداری دمای زمین، هزینه‌های نگهداری کمتر و عدم نیاز به تجهیزات گرمایی کمکی در محیط‌های بسیار سرد، از محبوبیت بیشتری برخوردار است [۱۸ و ۱۹]. اولین پروژهٔ پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در ایران در سال ۲۰۰۳ راه‌اندازی شد و سپس ۵ واحد ۰/۷۵ کیلوواتی در نقاط مختلف کشور نصب شد و در نهایت در سال ۲۰۲۱ ظرفیت کل پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی نصب‌شده به ۳۰۰ کیلووات رسید [۳].

۲. ۳. مزایای اقتصادی گرمایش ساختمان‌ها با انرژی زمین‌گرمایی

انرژی زمین‌گرمایی می‌تواند نقش مهمی در جایگزینی سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و دیگر گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. این انرژی در ۲۶ کشور برای تولید برق [۲۰] و تعداد ۸۲ کشور در سراسر جهان به صورت استفادهٔ مستقیم برای تأمین حرارت مورد نیاز ساختمان‌ها و فرایندهای صنعتی به کار گرفته می‌شود. همچنین این منبع انرژی می‌تواند نقش مهمی در سیاست‌های جهانی انرژی ایفا کند. علاوه بر شناسایی و تحلیل مزایای استفاده از انرژی زمین‌گرمایی، این بخش برخی از چالش‌های عمدهٔ بهره‌برداری از منابع انرژی زمین‌گرمایی برشمرده می‌شود. از مزایای اصلی بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

1. Geothermal Heat Pump

- تأمین انرژی حرارتی قابل اعتماد و همیشه دردسترس با قیمت ثابت
- کمک به دولت‌ها برای تنوع بخشیدن به سند انرژی برای تأمین حرارت و برق
- تأمین حرارت با حداقل اثرات زیست‌محیطی و آلاینده‌های هوا
- ایجاد فرصت‌های توسعهٔ اقتصادی به‌ویژه در مناطق روستایی
- تولید حرارت قابل اعتماد برای کاربردهای کشاورزی، صنعتی و سایر کاربردهای گرمایشی

۲. ۳. ۱. منبع انرژی قابل اعتماد

یکی از مزایای اصلی نیروگاه زمین‌گرمایی این است که انرژی بار پایه را می‌تواند تأمین کند. انرژی پایه یا برق پایه به معنای این است که تأمین انرژی محدود به زمان روز و شب و فصل و ماه خاصی از سال نیست و در همهٔ زمان‌ها طی سال انرژی از این منبع در دسترس است. انرژی زمین‌گرمایی به خلاف سایر منابع تجدیدپذیر که انرژی را به صورت متناوب تولید می‌کنند، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی می‌توانند نرخ ثابتی از حرارت را طی سال تولید کنند. بر همین اساس به طور متوسط، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی تقریباً در ۹۸ درصد مواقع طی سال در دسترس هستند. همچنین ضریب ظرفیتی این نیروگاه‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت‌های فسیلی و نیروگاه‌های هسته‌ای که بین ۷۵ تا ۹۰ درصد مواقع بسته به فناوری و عمر تجهیزات در دسترس هستند، بسیار کاراتر می‌کند [۲۱].

۲. ۳. ۲. تأمین حرارت با قیمت ثابت

استفاده از منابع زمین‌گرمایی برای تأمین انرژی مورد نیاز می‌تواند به مقابله در برابر قیمت‌های بی‌ثبات برق و سایر سوخت‌های فسیلی کمک کند. در هر نیروگاه، قیمت سوخت مورد استفاده برای تولید برق بر قیمت برق تولیدشده تأثیر می‌گذارد و اگر قیمت سوخت غیرقابل پیش‌بینی باشد، بی‌شک قیمت برق نیز غیرقابل پیش‌بینی خواهد بود. به خلاف نیروگاه‌های معمولی که نیاز به خرید سوخت دارند، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی منبع سوخت خود را قبل از شروع به کار نیروگاه‌ها تضمین می‌کنند. از آنجا که قیمت منابع زمین‌گرمایی تغییر نخواهد کرد و تابع شرایط جغرافیایی و تغییرات سیاسی نیست، لذا می‌توان گفت که قیمت برق تولیدشده در یک نیروگاه زمین‌گرمایی طی زمان ثابت خواهد بود.

۲. ۳. ۳. تنوع‌بخشی به سبد انرژی

تنوع‌بخشی به منابع انرژی از وظایف دولت ایران در اجرای برنامهٔ ششم توسعهٔ ملی است. در برنامهٔ ششم توسعه، بر اساس مادهٔ ۱۳ بند محیط زیست و انرژی‌های پاک، به منظور تنوع‌بخشی به منابع انرژی کشور، دولت موظف است بستر تولید برق از منابع تجدیدپذیر را فراهم کند. منابع انرژی تجدیدپذیر دیگر نیز مانند زمین‌گرمایی می‌توانند برای کشور در تنوع بخشیدن به ترکیب سوخت مفید باشند. کاهش مصرف داخلی سوخت‌های فسیلی می‌تواند با صادرات آن‌ها به قیمت جهانی به نفع دولت باشد و انرژی زمین‌گرمایی در میان سایر انرژی‌های تجدیدپذیر برای رسیدن به هدف مورد نظر بسیار کارآمد است.

نیروگاه‌های زمین‌گرمایی در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت فسیلی معمولی تنها به مقدار محدودی آلاینده‌های هوا تولید می‌کنند و مقادیر بسیار کمی نیز ذرات معلق منوکسید کربن و دی‌اکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد تولید می‌کنند و معمولاً هیچ اکسید نیتروژنی تولید نمی‌کنند.

میزان بسیار کمی از گازهای آلاینده از نیروگاه‌های زمین‌گرمایی طی مدت تولید برق به دلیل عدم احتراق منتشر می‌شود. انتشار برخی گازهای آلاینده جزئی از انتشار طبیعی همهٔ مخازن زمین‌گرمایی هستند. لذا این گازها اگر از طریق نیروگاه هم وارد محیط نشود در نهایت بدون توسعهٔ انرژی زمین‌گرمایی به اتمسفر ساطع می‌شوند، هرچند با سرعت بسیار پایین‌تری.

نیروگاه‌های بخار خشک و سیکل‌های نیروگاهی تبخیر آنی عمدتاً بخار آب را نیز وارد محیط می‌کنند. نیروگاه‌های سیکل باینری عملاً هیچ گازی منتشر نمی‌کنند، زیرا با استفاده از یک سیستم حلقه بسته کار می‌کنند. نیروگاه‌های زمین‌گرمایی بیشتر

دی‌اکسید کربن منتشر می‌کنند که یک آلایندهٔ اصلی نیست، بلکه یک گاز گلخانه‌ای است. با این‌حال نیروگاه‌های زمین‌گرمایی دی‌اکسید کربن بسیار کمتری نسبت به نیروگاه‌های سوخت فسیلی منتشر می‌کنند [۲۲].

۲. ۳. ۴. پتانسیل توسعهٔ اقتصادی

کشورهایی که منابع ارزشمند سوخت فسیلی دارند، اغلب از یک بیماری اقتصادی ناشی از وابستگی به خام‌فروشی سوخت‌های فسیلی رنج می‌برند. صادرکنندگان نفت اغلب در برنامه‌ریزی خود برای کاهش وابستگی به نفت شکست خورده‌اند. وابستگی بیش از حد اقتصاد این کشورها به صادرات نفت، روند توسعهٔ اقتصادی را مختل کرده است و از این‌رو با استفاده از راهکارهای مختلف سعی در کاهش این وابستگی دارند. ایران نیز به عنوان کشوری در حال توسعه و یکی از کشورهای غنی دارای منابع سوخت فسیلی مانند گاز طبیعی و نفت خام [۲۳] از این موضوع رنج می‌برد. از این‌رو سیاست‌هایی برای غلبه بر این مشکلات اقتصادی در این کشور از جمله توسعهٔ نیروگاه‌های زمین‌گرمایی برنامه‌ریزی شده است. استفاده از منابع انرژی زمین‌گرمایی می‌تواند فرصت‌های توسعهٔ اقتصادی و اجتماعی استان‌ها را در قالب اشتغال، توسعهٔ زیرساخت‌ها، آثار فرهنگی، کاربری اراضی و تجارت فراهم کند.

یکی از جنبه‌های اقتصادی بسیار مهم انرژی زمین‌گرمایی، تولید برق توسط منابع بومی و غیرقابل انتقال است. بنابراین، نتایج نصب و بهره‌برداری از ۵۵ مگاوات برق از نیروگاه زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان، باعث کاهش وابستگی کشور به سوخت‌های فسیلی، افزایش صادرات نفت و صرفه‌جویی در انرژی معادل ۲۲۰ هزار تن زغال سنگ یا ۸۲۵ هزار بشکه نفت و کاهش برخی از اثرات زیست‌محیطی در هر سال می‌شود.

۲. ۳. ۵. ایجاد شغل(اشتغال زایی)

منابع زمین‌گرمایی اغلب در مناطق دورافتاده واقع شده‌اند و نیروگاه‌های زمین‌گرمایی هم در همین مناطق دورافتادهٔ روستایی احداث می‌شوند که این مناطق به طور کلی دارای نرخ بیکاری مزمن بالایی هستند. ساخت یک نیروگاه زمین‌گرمایی ۱۰۰ مگاواتی ممکن است صدها شغل موقت (از دو تا سه سال) در زمان ساخت‌وساز و توسعه و بین ۸۰ تا ۱۵۰ شغل دائمی و تمام‌وقت با مهارت بالا در زمان بهره‌برداری در این تأسیسات ایجاد کند که بسیار بالاتر از حداقل دستمزد است. با توجه به اثر چند برابری اقتصادی، این نیروگاه باید حدود ۱۰۰ تا ۲۵۰ شغل تمام‌وقت جدید در جامعه ایجاد کند. از آنجا که نیروگاه‌های زمین‌گرمایی عمر کاری طولانی دارند، می‌توانند به بخش پایدار و قابل اعتمادی از پایگاه اقتصادی جامعه تبدیل شوند.

به عنوان مثال، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی در میدان زمین‌گرمایی گایزر[1] در کالیفرنیا می‌توانند تقریباً ۳ هزار مگاوات برق تولید کنند و سالها منبع درآمد و شغل افراد قابل توجهی بوده‌اند. این نیروگاه‌ها تقریباً ۴۲۵ نفر را به صورت تمام‌وقت به اضافه ۲۲۵ نفر نیروی کارقراردادی هم در اختیار دارند [۲۴].

۲. ۴. چالش‌های اقتصادی و غیراقتصادی برای استفاده از حرارت زمین‌گرمایی

امروزه تقریباً ۱۵ درصد از ذخایر گاز طبیعی جهان و ۹ درصد از منابع نفتی متعلق به ایران است که در نتیجه توسعهٔ منابع انرژی زمین‌گرمایی در شرایط رقابتی بسیار سختی قرار دارد [۲۵]. چالش‌های گوناگون اقتصادی و غیراقتصادی (مدیریتی، فنی و سیاستی) وجود دارد که مانع پیشرفت منظم پروژه‌های بهره‌برداری از انرژی حرارتی زمین‌گرمایی در جهان می‌شود و برخی نگرانیها در توسعهٔ اولین پروژه زمین‌گرمایی در کشورهایی مانند ایران بسیار جدی است.

برای پروژه‌های زمین‌گرمایی به طور کلی، فرایندهای اکتشاف، اجارهٔ زمین و انتخاب سایت یک دورهٔ طولانی طول می‌کشد و مملو از عدم قطعیت‌های زیادی است. اگرچه هزینهٔ تولید حرارت از منابع زمین‌گرمایی طی سه دههٔ گذشته کاهش یافته است، اما هنوز اکتشاف و حفاری چاه‌های عمیق پرهزینه است و ریسک زیادی دارد.

اساساً، شناسایی مخازن زمین‌گرمایی بالقوه مولد دشوار است، اما میزان موفقیت چاه‌ها پس از یافتن مخازن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، چالش‌های پیشگیرانه مختلفی در دههٔ اخیر در خصوص تحولات زمین‌گرمایی در ایران مطرح شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

1. Geysers

- هزینهٔ بسیار پایین گاز طبیعی برای تأمین گرمایش ساختمان‌ها
- فقدان قانون ملی و محلی در مورد بهره‌برداری و استفاده از حرارت منابع تجدیدپذیر
- ناتوانی در انتقال فناوری به‌روز دنیا در این حوزه
- نبود یا پایین بودن هزینه‌های انتشار گازهای آینده در ایران (هزینه‌های زیست‌محیطی)
- نبود انگیزه‌های مالی مناسب برای حرارت تجدیدپذیر

برخی از این چالش‌ها در ادامه شرح و تحلیل می‌شوند.

۲. ۴. ۱. قیمت پایین گاز طبیعی برای گرمایش ساختمان‌ها

با توجه به اینکه قیمت گاز طبیعی در ایران بسیار پایین است، تمام فرایند توسعهٔ منابع حرارتی تجدیدپذیر را در ایران متوقف کرده و یا با مشکل مواجه کرده است. قیمت گاز طبیعی در ایران حدود ۰/۰۰۱ دلار آمریکا بازای هر کیلووات ساعت برای مصارف خانگی و ۰/۰۰۰۱ دلار آمریکا در هر کیلووات ساعت برای مصارف صنعتی است. برای مقایسه، قیمت گاز طبیعی در جهان در آن در همان زمان ۰/۱۰۱ دلار آمریکا در هر کیلووات ساعت برای خانوارها و ۰/۰۸۶ دلار آمریکا در هرکیلووات ساعت برای صنایع است. این نرخ‌ها شامل کلیهٔ مالیات‌ها، هزینه‌ها و سایر اجزای قبض گاز می‌شود. با این قیمت پایین گازطبیعی برای گرمایش و فقدان هر گونه حمایت و تشویق یارانه‌ای یا مالیاتی برای حرارت انرژی‌های تجدیدپذیر، توسعهٔ آیندهٔ آن‌ها را تقریباً غیرممکن کرده است.

۲. ۴. ۲. فقدان قانون ملی و محلی در مورد حرارت تجدید پذیر

سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی برق ایران ساتبا که قبلاً سانا نام داشت، در سال ۱۳۷۴ به عنوان یک سازمان دولتی برای توسعهٔ منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران تأسیس شد. قبل از آن در سازمان‌های مختلف اقدامات بسیار کمی در زمینهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر انجام می‌شد و هیچ سیاست حمایتی برای توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر وجود نداشت. با تأسیس ساتبا، همهٔ فرایند توسعه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین انرژی زمین‌گرمایی باید در آنجا انجام می‌شد و این مقررات اولیه در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران بود. درنهایت در سال ۱۳۸۳ قانونی به تصویب رسید و تمامی برنامه‌ریزی‌ها، بودجهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر و متخصصان از سازمان‌های دیگر در ساتبا تجمیع شدند. امروزه ساتبا مسئول تمامی برنامه‌ریزی‌ها و توسعهٔ تولید برق از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است.

تولید گرما از منابع زمین‌گرمایی مشمول تولید برق نیست و SATBA مسئولیتی در قبال توسعهٔ برنامه‌ریزی آن ندارد. هیچ سازمان ملی و محلی دیگری نیز در ایران وجود ندارد که مسئولیت تولید گرما از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی زمین‌گرمایی و خورشیدی را به عهده بگیرد که این امر یکی از موانع مهم توسعهٔ فناوری‌های تجدیدپذیر است.

۲. ۴. ۳. ناتوانی در انتقال فناوری به‌روز دنیا در این حوزه

ناتوانی دولت در انتقال فناوری به‌روز دنیا در زمینهٔ تولید حرارت از منابع تجدیدپذیر نیز یکی دیگر از موانع مهم توسعهٔ این فناوری تجدیدپذیر است. دو رویکرد عمومی پذیرفته‌شده برای انتقال فناوری بین‌المللی وجود دارد که می‌تواند در انتقال فناوری انرژی زمین‌گرمایی در ایران اعمال شود.

۲. ۴. ۳. ۱. قراردادهای بین‌المللی تحقیق و توسعه

تحقیق و توسعهٔ مشترک بین ساتبا و دانشگاه‌ها یا مراکز تحقیقاتی بین‌المللی در کشورهای پیشرو، پیشرفت صنعت زمین‌گرمایی را تسهیل می‌کند. برنامهٔ خرید خارجی (توافقنامهٔ مدیریت پروژهٔ بین‌المللی) امکان خرید خدمات تحقیقاتی یا مهندسی از نهادهای دولتی و خصوصی را فراهم می‌کند.

۲. ۴. ۳. ۲. دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های تحقیقاتی ملی

دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های تحقیقاتی ملی نقش کلیدی در پیشبرد تحقیقات و آموزش انرژی‌های تجدیدپذیر (گرمایی) دارند. تمرکز دانشجویان و محققان روی چالش‌های جدید از جمله:

برنامه‌های درسی در تمام زمینه‌های مطالعاتی باید در رابطه با انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر و موضوعات توسعهٔ پایدار بازنگری و به‌روز شود.

در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری، برنامه‌هایی برای پرورش افراد خلاق در جهت طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر صورت پذیرد.

۲. ۴. ۴. فقدان هزینه‌های انتشار محیطی

ایران در سال ۲۰۱۵ هشتمین تولیدکنندهٔ گازهای گلخانه‌ای در جهان بود. این کشور دارای منابع غنی با ذخایر عظیم نفت و گاز و همچنین پتانسیل قابل توجه انرژی‌های تجدیدپذیر است. در حال حاضر انتشار آلاینده‌های هوا در ایران برای صنعت و نیروگاه‌ها هزینه‌ای ندارد؛ به این معنا که تولیدکنندگان عمده آلودگی مانند نیروگاه‌های سوخت فسیلی موظف به پرداخت هزینهٔ انتشار آلاینده نیستند. به دلیل نبود قانون خاصی برای انتشار، انگیزهٔ اقتصادی برای استفاده از گرمای تجدیدپذیر وجود ندارد.

توسعهٔ دستورهایی برای محاسبهٔ اقتصادی هزینه‌های خارجی یا هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌های زیست‌محیطی، می‌تواند به توسعهٔ بهره‌برداری از نیروگاه‌ها و استفادهٔ مستقیم حرارتی از منابع تجدیدپذیر بینجامد.

۲. ۴. ۵. فقدان مشوق‌های مالی مناسب برای حرارت تجدیدپذیر

در حال حاضر، یک سیستم تعرفهٔ خرید تضمینی برای خرید برق تجدیدپذیر در ایران وجود دارد که دولت موظف است برق تولیدشده توسط منابع انرژی تجدیدپذیر را با قیمت زیاد (تقریباً ۵ تا ۱۰ برابر) انرژی پایه سوخت فسیلی خریداری کند. این قانون توسعه‌دهندگان نیروگاه‌های تولید برق تجدیدپذیر را تشویق می‌کند تا به سرمایه‌گذاری در این زمینه ادامه دهند، اما در حال حاضر هیچ حمایتی از تولید انرژی زمین‌گرمایی وجود ندارد. این یکی از موانع اصلی پروژه‌های گرمایش تجدیدپذیر ژئوترمال است. با توجه به اینکه کشور در حال حاضر با کمبود شدید گاز در فصل زمستان مواجه است که اقتصاد کشور را با چالش مواجه کرده است، توسعهٔ بهره‌برداری از منابع عظیم حرارت تجدیدپذیرها مانند حرارت انرژی زمین‌گرمایی می‌تواند روشی مناسب برای مواجهه با این مشکل باشد.

۳. نتیجه‌گیری

توسعهٔ حرارت زمین‌گرمایی در ایران را می‌توانیم در سه حوزهٔ دانش و فناوری، نیروی انسانی و حمایت مالی (خرید تضمینی) دنبال کنیم. در حوزهٔ توسعه علم و دانش، اهدافی مانند بومی‌سازی فناوری‌های طراحی و انتقال نیروگاه‌های حرارتی و همچنین توسعهٔ دانش غیر فنی و ارتقای انتقال دانش بین بازیگران اصلی این حوزه قابل تعیین است. همچنین ایجاد سیاست‌هایی برای حمایت مالی هدفمند از تحقیقات تجاری و غیر تجاری، تأمین مالی شرکت‌های فناوری با سرمایه‌گذاری خطرپذیر و اعطای وام و تسهیلات بانکی برای اجرای طرح‌های آزمایشی می‌تواند مؤثر باشد. علاوه بر موارد یادشده، اقداماتی از قبیل اعطای مشوق‌های مالیاتی به شرکت‌های خصوصی در زمینهٔ توسعهٔ بهره‌برداری منابع زمین‌گرمایی، ایجاد سازوکار لازم برای حمایت از سرمایه‌گذاری‌های مخاطره‌آمیز بخش خصوصی در حوزهٔ اکتشاف زمین‌گرمایی و ایجاد بازار مطمئن از طریق خرید محصولات با کیفیت توسط دولت می‌تواند توسعهٔ انرژی زمین‌گرمایی را تسریع کند.

منابع

[1] Barbier E. Geothermal energy technology and current status: An overview. Renew Sustain Energy Rev 2002;6:3–65. https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3.

[2] Najafi G, Ghobadian B. Geothermal resources in Iran: The sustainable future. Renew Sustain Energy Rev 2011;15:3946–51. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.032.

[3] Noorollahi Y, Eslami S, Noorollahi D. Geothermal Direct Use in Iran : A Country Update. Proc. World Geotherm. Congr. 2020+1, Reykjavik, Iceland, April - October 2021: World Gothermal Congress 2020; 2021, p. 1–10.

[4] IREA. Renewable Power Generation Costs in 2020. 2020.

[5] Romanov D, Leiss B. Geothermal energy at different depths for district heating and cooling of existing and future building stock. Renew Sustain Energy Rev 2022;167:112727.

[6] Asmaryan H, Younes J, Ossetchkina E, Grubas S. The Techno-Economic Feasibility of a Geothermal District Heating System in Chateh , Alberta 2022:1–9.

[7] Nouri G, Noorollahi Y, Yousefi H. Solar assisted ground source heat pump systems – A review. Appl Therm Eng 2019;163:114351. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.114351.

[8] Mani M, Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. Renew Sustain Energy Rev 2010;14:3124–31. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065.

[9] Zhu J, Hu K, Lu X, Huang X, Liu K, Wu X. A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects. Energy 2015.

[10] Yousefi H, Noorollahi Y, Sohrab T. Environmental Impact Assessment of Meshkinshahr geothermal power plant. Proc. 4th Natl. Energy Congr. 2003, Tehran, Iran, 2003, p. 210–9.

[11] Noorollahi Y, Shabbir MS, Siddiqi AF, Ilyashenko LK, Ahmadi E. Review of two decade geothermal energy development in Iran, benefits, challenges, and future policy. Geothermics 2019;77. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.10.004.

[12] Noorollahi Y, Itoi R, Fujii H, Tanaka T. Geothermal Resources Exploration and Wellsite Selection With Environmental Consideration Using Gis in Sabalan Geothermal Area. Thirty-Second Work Geotherm Reserv Eng 2007.

[13] Seyedrahimi-Niaraq M, Doulati Ardejani F, Noorollahi Y, Porkhial S, Itoi R, Jalili Nasrabadi S. A three-dimensional numerical model to simulate Iranian NW Sabalan geothermal system. Geothermics 2019. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.08.009.

[14] Seyedrahimi-Niaraq M, Doulati Ardejani F, Noorollahi Y, Porkhial S. Development of an updated geothermal reservoir conceptual model for NW Sabalan geothermal field, Iran. Geotherm Energy 2017;5:14. https://doi.org/10.1186/s40517-017-0073-0.

[15] Yousefi H, Ármannsson H, Roumi S, Tabasi S, Mansoori H, Hosseinzadeh M. Feasibility study and economical evaluations of geothermal heat pumps in Iran. Geothermics 2018;72:64–73.

[16] Noorollahi Y, Yousefi H. Geothermal Energy Resources and Applications in Iran. Proceedings, 2010, p. 25–30.

[17] Saffarzadeh A, Noorollahi Y. Geothermal Development in Iran: A Country Update 2005:24–9.

[18] Golshanfard A, Noorollahi Y. Coordinated Operation and Planning of the Modern Heat and Electricity Incorporated Networks. Coord Oper Plan Mod Heat Electr Inc Networks 2022:177.

[19] Eslami S, Noorollahi Y, Marzband M, Anvari-Moghaddam A. District heating planning with focus on solar energy and heat pump using GIS and the supervised learning method: Case study of Gaziantep, Turkey. Energy Convers Manag 2022;269:116131.

[20] Lund JW, Boyd TL. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. 2015.

[21] Noorollahi Y, Shabbir MS, Siddiqi AF, Ilyashenko LK, Ahmadi E. Review of two decade geothermal energy development in Iran, benefits, challenges, and future policy. Geothermics 2019;77. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.10.004.

[22] World Nuclear Associations. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. 2011.

[23] Bahrami M, Abbaszadeh P. Development a scenario-based model for Iran′ s energy future. Renew Sustain Energy Rev 2016.

[24] Manijean L, Saffache P. Geothermal energy: the pool of jobs!! vol. 41. 2017.

[25] Najafi G, Ghobadian B. Geothermal resources in Iran: the sustainable future. Renew Sustain Energy Rev 2011.