



مرور جنبه های فنی و اقتصادی استخراج انرژی زمین گرمایی با استفاده از چاه‌های متروکه نفت و گاز

حامد اوجاجی¹، متین شاهین¹، محمد سیم‌جو^{2*}، محمد چهاردولی²

1- کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

2- دانشیار مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

*تبریز، simjoo@sut.ac.ir

چکیده

بهبود سازی چاه‌های متروکه نفت و گاز برای استخراج انرژی زمین گرمایی به عنوان یکی از گزینه‌های امیدوارکننده برای افزایش عمر اقتصادی چاه‌های نفت و گاز و ایجاد یک منبع انرژی تجدید پذیر و پاک در نظر گرفته می‌شود. انرژی زمین گرمایی به عنوان یک انرژی دوستدار محیط زیست می‌تواند در قالب یک روش تامین گرمایش مستقیم و یا با تولید برق از چاه‌های متروکه نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد. تبدیل چاه‌های متروکه به چاه‌های انرژی زمین گرمایی می‌تواند هزینه رهاسازی چاه‌های نفت و گاز را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. رها سازی نادرست چاه‌های نفت و گاز از نظر زیست محیطی مخاطرات جدی را ایجاد می‌کند. از نقطه نظر فنی، عوامل عملیاتی مانند قطر فضای چاه‌های متروکه، اتلاف حرارت در طول چاه، پایین بودن گرادیان زمین گرمایی در چاه‌های متروکه، هزینه تأسیسات حرارتی و ورود سیالات نفت و گاز به چاه، از جمله چالش‌های مهم در تبدیل چاه‌های نفت و گاز به منابع زمین گرمایی هستند. با این حال، حفاری چاه‌های انجام شده و وجود اطلاعات و داده‌های حرارتی در چاه‌های متروکه نفت و گاز، زمینه برآورد مناسبی از میزان انرژی زمین گرمایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی را فراهم می‌نماید که مزیت مهمی نسبت به حفر چاه‌های جدید زمین گرمایی است. همچنین، برای غلبه بر اتلاف انرژی در چاه‌های متروکه نفت/گاز و متعاقباً تولید سیال زمین گرمایی با دمای بالا روش‌هایی مختلفی از جمله اکسیداسیون سیالات هیدروکربنی برای افزایش دمای مخزن به صورت احتراق درجا و با هدف افزایش دمای ته چاهی، افزایش سطح تماس سیال با سنگ مخزن با استفاده از چاه‌های افقی و افزایش عمق چاه‌های متروکه پیشنهاد می‌شود. در این مقاله، به مرور جنبه‌های فنی و اقتصادی استخراج انرژی زمین گرمایی از چاه‌های متروکه نفت و گاز پرداخته شده و سعی شده است تا با تلفیق موارد فوق الذکر، افق کاربردی مناسبی برای طرح مزایا، چالش‌ها و روش‌های مناسب برای تبدیل چاه های نفت/گاز متروکه به منابع زمین گرمایی مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

کلید واژگان: چاه‌های متروکه نفت و گاز، انرژی زمین گرمایی، انرژی تجدید پذیر، استخراج گرما

Review of the technical and economic aspects of extracting geothermal energy using abandoned oil and gas wells

Hamed Ojaghi¹, Matin Shahin¹, Mohammad Simjoo^{2*}, Mohammad Chahardowli²

1- Master of Petroleum Engineering, Faculty of Petroleum and Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

* Tabriz, Iran, simjoo@sut.ac.ir

Received: 28 July 2024 Accepted: 14 February 2025

Abstract

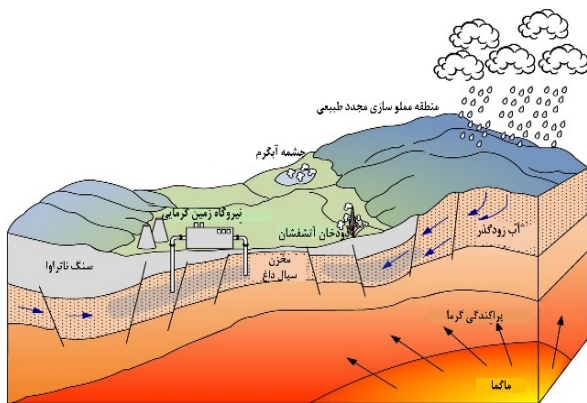
Abandoned oil and gas wells optimization for geothermal energy extraction is considered as one of the promising ways for increasing the economic lifespan of oil and gas wells and creating a source of renewable and clean energy. Geothermal energy can be used for direct heating or electricity generation by utilizing abandoned oil and gas wells as an energy source. Conversion of abandoned wells into geothermal wells can significantly reduce well abandonment costs. Improper well abandonment can create serious environmental hazards. From the technical point of view, operational factors such as abandoned well borehole diameter, heat loss during the well, low geothermal gradient in abandoned wells, thermal equipment cost, and entry of oil and gas fluids into the well are the main challenges for well conversion. However, drilling and obtaining thermal data from abandoned oil and gas wells provide significant advantages for energy and cost estimation compared to conventional geothermal wells. To overcome energy and heat loss in abandoned oil/gas wells and

produce high-temperature fluids, some practical methods such as hydrocarbon fluid oxidation for in-situ combustion to increase reservoir temperature, increase contact area of fluid with reservoir rock using horizontal wells, and increasing the depth of abandoned wells could be proposed for repurposing abandoned oil and gas wells for geothermal energy extraction. This article reviews the technical and economic aspects of extracting geothermal energy from abandoned oil and gas wells. It aims to integrate the aforementioned factors to establish a suitable practical framework for discussing the advantages, challenges, and appropriate methods for converting abandoned oil and gas wells into geothermal resources.

Keywords: geothermal energy, renewable energy, heat extraction, abandoned oil and gas wells.

1- مقدمه

گاز بالادست باید بررسی کند که آیا و چگونه می‌تواند با این منابع جدید انرژی وارد چالش شود تا سهم خود را از ترکیب انرژی زمین گرمایی و هیدروکربن حفظ کند [10]. بر اساس گزارش‌های موجود، حدود 35 درصد از چاه‌های حفر شده در ایران غیر فعال هستند که 40 درصد از چاه‌های غیر فعال در ایران متروکه شده است [11]. انرژی زمین گرمایی در همه جای کره زمین در دسترس است اما شیب زمین گرمایی متفاوتی از مکانی به مکان دیگر وجود دارد. پنج نوع منبع انرژی زمین گرمایی موجود است: منابع گرمایی² سنگ خشک داغ³، ژئوفشار⁴ (تحت تأثیر فشار طبقات پوسته زمین) و منابع ماگمایی⁵.



شکل 1 جزئیات یک میدان زمین گرمایی [12]

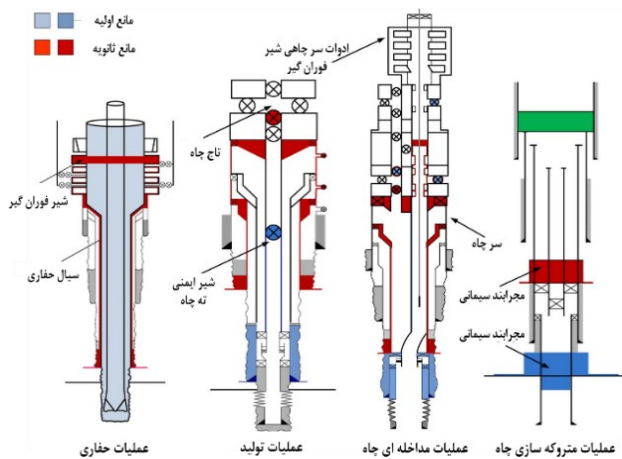
میدان زمین گرمایی به طور معمول به مخزن هیدروترمال یا زمین گرمایی گفته می‌شود که در آن گردش مداوم گرما و سیال به طور طبیعی اتفاق می‌افتد. میدان‌های زمین گرمایی تحت تسلط آب و یا بخار هستند و مناسب‌ترین انرژی استخراج شده از آن می‌تواند به صورت تولید برق و یا به صورت استفاده مستقیم به کار گرفته شود. پس از استفاده از انرژی حرارتی استخراج شده، سیال عامل از طریق چاه‌های تزریق دوباره به زیر زمین تزریق می‌شود تا سیال دوباره در مخزن گردش کند. شکل 1، جزئیات یک میدان زمین گرمایی را نشان می‌دهد [12]. چاه عمیق‌تر به طور کلی پتانسیل بیشتری برای استخراج انرژی زمین گرمایی دارد. بنابراین، انتخاب چاه نفت رها شده برای استخراج انرژی زمین گرمایی به شدت به گرادبان زمین گرمایی ثبت شده بستگی دارد. با افزایش اعماق (از 5 تا 10 کیلومتر)، پتانسیل منابع زمین گرمایی تقریباً در هر مکان از زمین افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که انتخاب چاه بهینه از

افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و وابستگی به سوخت‌های فسیلی مانع از تلاش‌ها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است [1]. با توجه به مضرات سوخت‌های فسیلی، انرژی زمین گرمایی می‌تواند یک منبع انرژی سازگار با محیط زیست باشد [2]. انرژی زمین گرمایی همچون انرژی باد و خورشید به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر و پاک در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند در روز و شب مورد استفاده قرار گیرد. بسیاری از کشورها از این انرژی برای تولید برق استفاده کرده‌اند و انتظار می‌رود که استفاده از انرژی زمین گرمایی ادامه یابد. این انرژی با پیش بینی تولید برق 800-1300 تراوات ساعت و مصرف حرارت مستقیم 3300-3800 تراوات ساعت در سال، تا سال 2050 رشد خواهد کرد [3]. همچنین پیش بینی می‌شود که تقاضای جهانی انرژی تا سال 2035 به دلیل افزایش جمعیت و رشد اقتصادی 30 درصد افزایش یابد [4]. علی‌رغم پتانسیل فوق العاده انرژی زمین گرمایی، پیشرفت در استفاده و پذیرش آن نسبتاً کند بوده و تنها در مکان‌های جغرافیایی خاص، یعنی مناطقی که فعالیت‌های آتشفشانی و حرارتی شدید دارند، متمرکز شده است. دلیل اصلی این پیشرفت کند، چالش برانگیزی، ریسک بالا و هزینه بالای حفاری چاه‌های زمین گرمایی است. یک راه حل بالقوه برای غلبه بر این مشکل استفاده از معادن عمیق زیرزمینی یا چاه‌های متروکه نفت/گاز است. چاه‌های گاز متروکه پتانسیل زیادی برای تبدیل شدن به چاه‌های زمین گرمایی دارند و معمولاً گزارشات و اطلاعات کاملی در طول دوره تولید خود دارند که امکان بررسی کامل عملکرد چاه، به حداقل رساندن ریسک و ارائه هزینه بهتر را برآورد می‌کند. علاوه بر این، تأسیسات چاه نفت موجود می‌توانند مستقیماً برای پشتیبانی از استخراج انرژی زمین گرمایی تبدیل شوند و به شکل قابل توجهی در هزینه‌ها در مقایسه با ساخت یک نیروگاه جدید زمین گرمایی و حفاری چاه صرفه‌جویی شود. میلیون‌ها چاه نفت و گاز در سرتاسر جهان رها شده‌اند که بسیاری از آن‌ها آلاینده‌ها را در هوا و آب منتشر می‌کنند [5,6]. ابزارهای موجود در صنعت نفت و گاز را می‌توان برای ارزیابی پتانسیل تولید انرژی زمین گرمایی از میادین نفتی بالغ با استفاده از گرمای موجود در سیالات تولید شده مورد استفاده قرار داد [7,8]. با ورود میدان نفتی به مراحل پایانی توسعه و تولید، دشواری‌های بهره‌برداری رو به افزایش است. اگر بتوان از چاه‌های نفت رها شده برای بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی استفاده کرد، خطرات ایمنی یا مشکلات نشت سیال ناشی از بستن¹ نادرست چاه در مرحله رها سازی چاه را می‌توان حل کرد و از هزینه‌های اضافی جلوگیری کرد [9]. صنعت نفت و

⁴ Geo-pressured
⁵ Magmatic sources

¹ plugging
² Hydrothermal
³ Hot dry rock

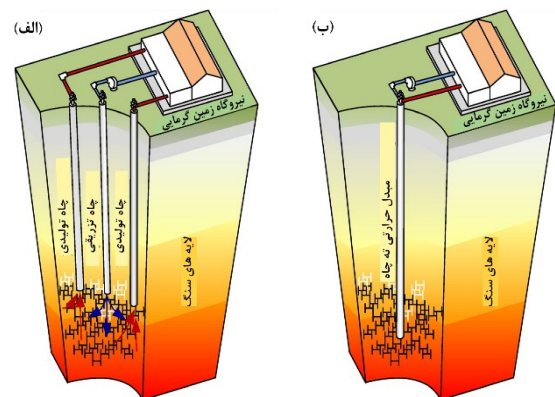
از آنجا که بسیاری از چاه‌های نفت و گاز به پایان دوره تولیدی و اقتصادی خود رسیده‌اند و متروکه می‌شوند [19]، رها سازی این چاه‌ها یک عملیات بسیار پیچیده است. خطرات ناشی از حذف تأسیسات، روش برنامه ریزی شده در رها سازی، تجزیه و تحلیل و بهره‌برداری در حین از کار انداختن، کنترل مواد زائد و نظارت از جمله فعالیت‌هایی هستند که باید هنگام تصمیم برای ترک چاه، انجام شود چرا که آماده سازی دقیق و کامل، عامل تعیین کننده در اجرای موفقیت آمیز تخلیه و رها سازی چاه است. رفع رها سازی نادرست نه تنها بسیار دشوار است، بلکه بسیار پرهزینه است. هنگامی که چاهی به چاه زمین گرمایی تبدیل شود، موانعی بوجود می‌آید. در مرحله حفاری موانع شامل سیال حفاری، لوله جداری، تأسیسات سر چاه و فوران گیر است. همچنین در طول دوره تولید موانع شامل؛ سیمان کاری لوله جداری، لوله جداری، پکر، لوله مغزی، شیر ایمنی ته چاه، آویزه آستری⁴ و تاج چاه است. این تجهیزات از چاه برداشته شده و در نهایت مکان‌هایی از چاه را که در لایه‌هایی قرار گرفته باشد که ورود سیالات به چاه را ممکن سازد باید پلاگ و سیمان کاری شوند.



شکل 3 شماتیک ساده شده موانع چاه برای رها سازی [20]

شکل 3 شماتیکی از موانع چاه برای رها سازی آن را نشان می‌دهد [21]. هنگامی که چاهی به طور ایمن و برای همیشه ترک شد، تأسیسات و سازه‌های پشتیبانی باید از رده خارج و حذف شوند تا سایت به حالت اولیه قبل از فعالیت استخراج نفت/گاز بازگردد. هنگامی که این مرحله تکمیل شد، ورود مجدد به چاه تقریباً غیرممکن است. از این رو، تبدیل این چاه به چاه زمین گرمایی سخت خواهد بود. در واقع، تصمیم‌گیری در مورد تبدیل یا مقاوم سازی چاه نفت و گاز به چاه زمین گرمایی باید از قبل یا در مرحله‌ای که مورد بهره‌برداری قرار نمی‌گیرد، گرفته شود. رها سازی چاه‌های نفت و گاز در دریا سخت‌تر از چاه‌های خشکی هستند چرا که برای چاه‌های خشکی، پارامترهای کلیدی برای از کار انداختن، عمق چاه و فشار چاه است. برای چاه دریایی، نوع تأسیسات و قابلیت سرویس دهی، عمق آب و فشار چاه باید در نظر گرفته شود. این عوامل نه تنها پیچیدگی فرآیند رها سازی چاه، بلکه هزینه‌های لازم برای تکمیل فرآیند را نیز تعیین می‌کنند. ثبت اطلاعات در حین عملیات‌های چاه‌های نفت و گاز،

نقطه نظر پتانسیل زمین گرمایی چاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سیستم زمین گرمایی بهبود یافته¹، مطابق شکل 2 انرژی زمین گرمایی را می‌توان با ساختارهای حلقه باز² یا حلقه بسته³ استخراج کرد. در برخی مناطق، گرادیان زمین گرمایی می‌تواند تا 150 درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر و در مناطق دیگر این شیب به 20 درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر برسد. بنابراین، استفاده از آن تاکنون محدود به مناطق نزدیک به مرز صفحات تکتونیکی بوده است که دارای گرادیان‌های زمین گرمایی بالا، به ویژه در منطقه نزدیک به مرز صفحات واگرا می‌باشد [13]. مخازن فسیلی معمولی معمولاً حاوی یک سفره آبی⁴ عمیق فشرده و با دمای بالا در زیر لایه‌های هیدروکربنی هستند که نفت و گاز را به سمت چاه‌های تولیدی هدایت می‌کند. با گذشت زمان، تولید مداوم منجر به تخلیه مخازن می‌شود و مقدار زیادی آب همراه با هیدروکربن تولید می‌شود. علاوه بر سفره‌های زیرزمینی، مخازن غیر متعارف مانند مخازن شیل یا زغال سنگ و سناریوهای تولید مانند سیلابزنی آب، تزریق بخار، شکاف هیدرولیکی و سایر روش‌ها می‌توانند بر حجم و کیفیت آب تولید شده در سطح تأثیر بگذارند [14]. شرکت‌های نفتی به دنبال بهبود فرآیندهای تولید هستند، در نهایت بازیابی گرمای هدر رفته از جریان تولید شده می‌تواند گزینه بسیار جالبی باشد [15]. همچنین سیستم‌های مناسب بهره‌برداری سطحی در افزایش بازدهی این جریان انرژی و بازیافت نفت، عامل اثر گذاری است [16].



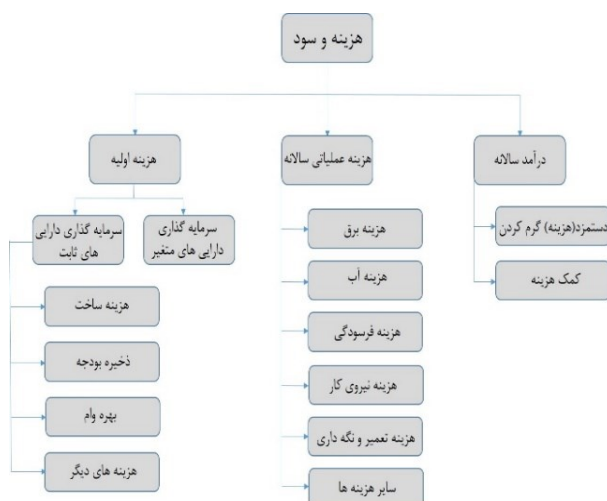
شکل 2 شماتیک ساده شده استخراج انرژی زمین گرمایی از (الف)؛ به صورت حفره باز و (ب)؛ حفره بسته [17]

این آب استحصالی از آنجا که مدیریت مخازن را با مشکل مواجه می‌کند، هزینه‌های عملیاتی را به طور جدی افزایش می‌دهد و در نهایت باعث رها شدن چاه‌ها یا حتی میادین می‌شود، که این مورد به عنوان هدررفت⁵ در صنایع نفت شناخته شده است. در فرآیند تولید هیدروکربن، چاه‌های متروکه زیادی وجود دارد که مقدار زیادی آب استخراج می‌کنند. علاوه بر این چاه‌های اکتشافی خشک می‌توانند رها شوند، در این صورت مانور بر روی این‌گونه چاه‌ها برای تبدیل به چاه زمین گرمایی می‌تواند صورت پذیرد [17]. تولید برق از چنین چاه‌های متروکه نفتی با استفاده از آب به عنوان سیال گردش در چاه، پتانسیل و استفاده بیشتری ارائه می‌دهد [18].

2- موانع تبدیل چاه‌های متروکه نفت/گاز به چاه‌های زمین گرمایی

⁴ Aquifer
⁵ Waste
⁶ liner hanger

¹ Enhanced Geothermal System (EGS)
² Open-loop
³ Close-loop



شکل 4 هزینه و سود در به کارگیری انرژی زمین گرمایی [17]

برای اینکه استخراج انرژی زمین گرمایی از چاه‌های نفتی متروکه جذاب‌تر و امکان‌پذیرتر شود، این فرآیند یادگیری باید از طریق تحقیقات و توسعه‌های بیشتر ادامه یابد. فن‌آوری‌های مربوطه مورد استفاده برای این استخراج انرژی باید برای به حداقل رساندن خطر و گسترش امکان انجام اکتشاف و توسعه به شیوه‌ای ایمن و سازگار با محیط‌زیست بیشتر پیشرفت کنند. با نگاهی به ملاحظات اقتصادی، یکی از جنبه‌های مهمی که امکان سنجی استخراج را تعیین می‌کند، مقدار انرژی زمین گرمایی استخراج شده است زیرا هزینه کلی و تولید انرژی از نیروگاه را تعیین می‌کند. قبل از شروع پروژه، پتانسیل منافع از نیروگاه‌های زمین گرمایی باید با هزینه کلی پروژه را که شامل هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های عملیاتی و سایر هزینه‌های مربوطه است، سنجیده شود. در شکل 4 هزینه از کار انداختن چاه نفت، توسعه چاه زمین گرمایی معمولی و مقاوم سازی چاه نفت رها شده در چاه زمین گرمایی ارائه و مورد بحث قرار گرفته است [17]. حفاری چاه با دمای بالا در کاربردهای زمین گرمایی تفاوت‌هایی را در مقایسه با حفاری در صنعت نفت و گاز ایجاد می‌کند. در نهایت چالش فنی بزرگی را در دهه‌های آینده با سطح متفاوتی از چالش حفاری با دمای بالا در جهان شاهد خواهیم بود.

به جز دما، تفاوت‌های کلیدی دیگری بین ایجاد چاه با هدف تولید نفت و گاز و چاه برای گرمای زمین گرمایی وجود دارد که باید در نظر گرفته شود:

- چاه‌های زمین گرمایی نیاز به حفاری سازندهای سخت‌تر و ساینده‌تر دارند: سازندهای رسوبی آتشفشانی و نفوذی یا صلب
- آب نمک‌های خورنده موجود در سیالات سازند هنگام حفاری چاه‌های گرمایی
- به طور معمول، بزرگتر کردن اندازه چاه‌ها به منظور به حداکثر رساندن جریان در هنگام تولید گرما [10].

از کار انداختن و رها کردن چاه اغلب از اکتشاف و راه اندازی اولیه چاه چالش برانگیزتر است. بر این اساس، هزینه مصرفی در این فرآیند می‌تواند بیشتر از هزینه مورد نیاز در مراحل اولیه عمر چاه باشد. از کار افتادن و رها شدن چاه‌های نفت و گاز چهار جنبه اصلی را در بر می‌گیرد. اولین مورد، توسعه

فرآیند تبدیل چاه‌های نفت و گاز به چاه زمین گرمایی را تسهیل می‌کند. با این حال، باید توجه داشت که اکثر این چاه‌ها در منطقه‌ای قرار ندارند که دارای پتانسیل بالایی از انرژی زمین گرمایی باشند. از این رو، این چاه‌ها معمولاً دارای دمای پایین تا متوسط هستند. علاوه بر این، بیشتر این چاه‌ها فاقد منابع طبیعی زیرزمینی هستند که نیاز به تزریق سیال به چاه‌ها است [22].

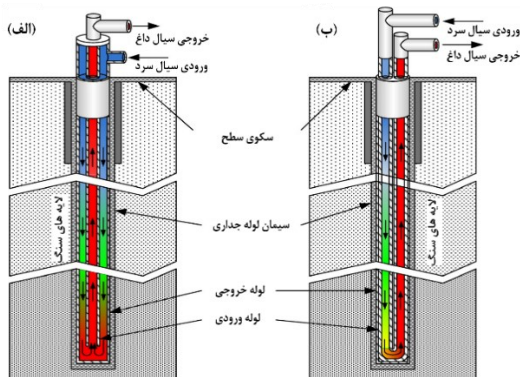
3- چالش‌های فنی و اقتصادی در تبدیل چاه‌های متروکه نفت/گاز به چاه‌های زمین گرمایی

از بزرگترین چالش‌ها در تبدیل چاه نفت متروکه به چاه زمین گرمایی، تعیین امکان سنجی چاه متروکه برای تبدیل به چاه زمین گرمایی است. چاه انتخاب شده باید دارای پتانسیل منابع زمین گرمایی (به عنوان مثال، عمق کافی، گرادیان زمین گرمایی مطلوب، خروجی دمای پایدار برای دوره معین) بوده و شرایط مناسب برای تزریق مجدد را داشته باشد. بو و همکاران در سال 2012 [23] امکان بهره برداری از انرژی زمین گرمایی از چاه‌های متروکه نفت و گاز را ارزیابی کردند. طبق این مطالعه چاه نفت رها شده مینی بر اینکه بتواند هم برای کاربرد مستقیم حرارت و هم برای تولید برق مورد استفاده قرار گیرد، مشخص شد که حداقل عمق چاه باید 2/4 کیلومتر با گرادیان حرارتی $45\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ باشد. بنابراین، زمانی که عمق چاه و یا گرادیان‌های زمین گرمایی کمتر از این مقدار باشد، استفاده از انرژی زمین گرمایی با چالش همراه خواهد بود. اختلاف دما بین چاه‌های 2 و 5 کیلومتری می‌تواند به بیش از 30 درجه سانتی‌گراد برسد، که تأثیر حیاتی اعماق چاه را بر کاربرد موفقیت‌آمیز چاه متروکه و واحد زمین گرمایی برجسته می‌کند. کربن دی‌اکسید به عنوان سیال مناسب در استخراج انرژی زمین گرمایی از چاه نفت رها شده به دلیل مزایای ذاتی آن، یعنی تغییر چگالی با افزایش دما و در نتیجه کاهش نیاز به توان پمپاژ بالا می‌تواند مؤثر واقع شود. دی‌اکسید کربن نسبت به آب از نظر نفوذ در سازند و تحرک پذیری عملکردی بهتر و بالاتری دارد. یک چالش اصلی در استخراج انرژی زمین گرمایی نرخ انتقال حرارت پایین است به این صورت که نرخ انتقال حرارت بالا، افت فشار بیشتری را می‌تواند ایجاد کند. سرعت جریان جرمی بالاتر، منبع گرمای ته چاه را تخلیه می‌کند و منجر به وقفه در استخراج انرژی زمین گرمایی می‌شود. به دلیل دمای خروجی پایین‌تر، کاربرد انرژی زمین گرمایی استخراج شده از چاه‌های نفت رها شده به اندازه چاه‌های زمین گرمایی متداول، گسترده نیست. برای کاربردهای مستقیم، مکان چاه‌ها باید در نزدیکی مکان مصرف کننده از این انرژی باشد تا از اتلاف حرارت در طول مسیر کاسته شود، در نتیجه انتقال سیال داغ از چاه‌ها به ناحیه مورد نظر برای استفاده از این انرژی، با توجه به اتلاف حرارتی لوله‌ها در حین توزیع، یک کار چالش برانگیز خواهد بود [24، 25].

برای طراحی یک سیستم استخراج انرژی زمین گرمایی حلقه بسته با جمع آوری اطلاعات در مورد منابع زمین گرمایی و شرایط آنها استفاده کرد. برای دستیابی به شرایط استخراج بهتر، می‌توان چاه نفت رها شده را بیشتر حفر کرد [5].

4- پارامترها و روش‌های مؤثر در بکارگیری چاه‌های متروکه به عنوان چاه‌های زمین گرمایی

پارامترهای اقتصادی، فنی و زمین شناسی به هم پیوسته بر توسعه انرژی زمین گرمایی و مقدار سودآوری آن تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که بیشتر چاه‌های نفت و گاز موجود در مناطقی با گرادیان دمای پایین وجود دارند، سیستم‌های تولید مشترک و حلقه باز، احتمالاً انتظارات فنی و اقتصادی را برآورده نکنند در همین جهت، چاه‌های با سیستم تولید حلقه بسته مناسب است [31]. یکی از روش‌های مناسب تولید انرژی زمین گرمایی از مخازن نفت و گاز متروکه، استفاده از مبدل‌های حرارتی است. مبدل‌های حرارتی ته چاه را می‌توان برای استخراج گرما استفاده کرد که باعث کاهش انتشار گاز به اتمسفر بدون تولید سیالات زمین گرمایی از سازند شده و از مشکلات خوردگی با توجه به تماس نداشتن سیال با سازند اجتناب می‌کند. نقطه ضعف این روش کاهش راندمان و توان الکتریکی در بازیابی حرارت نسبت به نیروگاه‌های زمین گرمایی معمولی است. در یک سیستم حلقه بسته، از مبدل‌های حرارتی می‌توان استفاده کرد که دو نوع مبدل حرارتی معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند، از جمله مبدل حرارتی لوله دوگانه (شکل 5 الف) و مبدل حرارتی یو شکل (شکل 5 ب)).



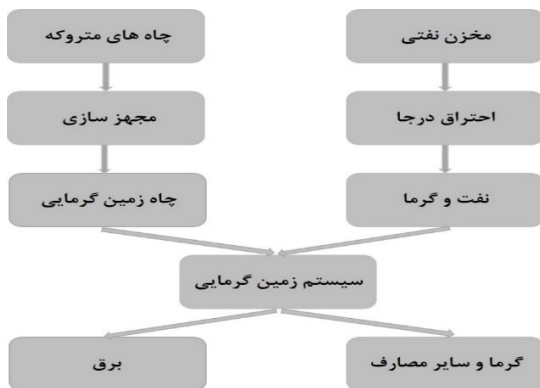
شکل 5 مبدل حرارتی (الف)؛ نوع یو شکل و (ب)؛ نوع لوله دوگانه [17]

مبدل حرارتی یو شکل معمولاً برای چاه‌های کم عمق، به‌ویژه برای کاربردهای گرمایشی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مبدل حرارتی لوله دوگانه در مقایسه با لوله یو شکل، دارای سطح انتقال حرارت بزرگ‌تری است و از این رو، از لحاظ نظری عملکرد بهتری در استخراج گرما دارد. برای یک چاه نفت رها شده، استفاده از مبدل حرارتی دو لوله در مقایسه با مبدل حرارتی یو شکل انتخاب بهتری است. دیگر مبدل حرارتی که می‌تواند اجرا شود، مبدل حرارتی لوله حلزونی/مارپیچی است. با این حال، اجرای واقعی این طرح با توجه به فضای محدود موجود در داخل چاه نفت متروکه ممکن است چالش برانگیز باشد. در شکل 6 قسمت بالا نمونه‌هایی از مبدل حرارتی شامل لوله‌های نازک یا دسته‌های لوله‌ای که در امتداد یک خط منفرد امتداد دارند، نشان داده شده است. در قسمت پایین نیز جزئیات ساختار چاه حلقه بسته را نشان می‌دهد که

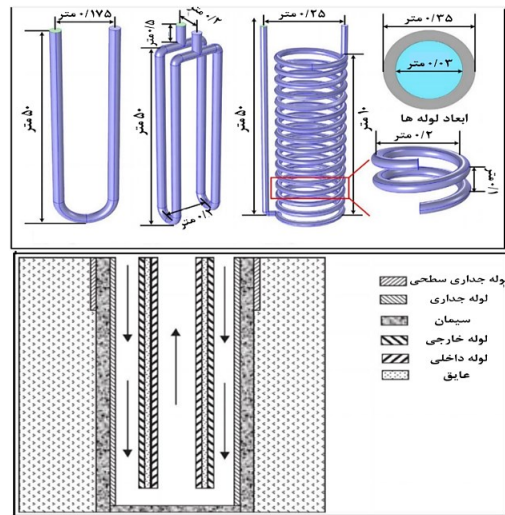
و ارزیابی جنبه‌های ایمنی و مهندسی در برنامه‌ریزی فرآیند رهاسازی چاه است. مورد دوم متوقف کردن استخراج فعلی نفت و گاز و سپس مسدود کردن چاه‌ها است. مورد بعدی حذف تمام سازه‌های بالا طبق مقررات و در آخر دور ریختن مواد بلا استفاده یا بازیافت مواد یا تجهیزات احتمالی است. هزینه فرآیند رهاسازی تا حد زیادی به عوامل مختلفی از جمله موقعیت مکانی (دریایی یا خشکی)، پیچیدگی و ویژگی چاه، ویژگی سایت، اندازه سازه و نوع ساختار آن، شرایط آب و هوایی، مقررات و شرایط پیش بینی نشده بستگی دارد [26]. چالش دیگر در چاه‌های متروکه‌ای که به صورت حلقه باز هستند، سیال تزریقی با سیال مخزن ارتباط دارد و مشکلات رسوب وجود خواهند داشت در این صورت تصمیم‌گیری برای تکمیل مناسب چاه باید اتخاذ شود [27]. بسته به عمق چاه و سناریوی آن (چاه حفره باز، دارای جداره و مشبک شده یا تکمیل شده)، هزینه‌ها بین 15897 تا 114539,95 دلار آمریکا متغیر است [28]. با اتخاذ بهینه‌سازی، هزینه‌های رهاسازی را می‌توان هر سال به حداقل رساند، که با توجه به گزارشات بین سال‌های 2015 و 2017 بین 52000 تا 76000 دلار متغیر است [29]. در سطح، این هزینه می‌تواند شامل ترک دکل حفاری، تمیز سازی سایت در هر چاه، حذف کابل‌ها و خط لوله و از نظر زیست محیطی، حذف خاک آلوده باشد. با توجه به هزینه‌های بالای رهاسازی چاه، اگر بتوان چاه را برای اهداف مفید دیگری مانند استخراج انرژی زمین گرمایی مقاوم سازی کرد، گزینه جالبی خواهد بود. این مورد نه تنها هزینه‌های متحمل شده توسط شرکت را به حداقل می‌رساند، بلکه عمر اقتصادی چاه را نیز افزایش می‌دهد. با این حال، این مقاوم سازی باید در طول آماده سازی اولیه برنامه ریزی شود. با توجه به چاه‌هایی که به طور دائم بسته شده‌اند، تبدیل آنها به طور قابل توجهی چالش برانگیز خواهد بود، به خصوص زمانی که عمق کافی نباشد و نیاز به حفاری اضافی باشد [17]. هزینه‌های اکتشاف و راه اندازی چاه زمین گرمایی را می‌توان به دو بخش عمده تقسیم کرد. اولین مورد سرمایه گذاری در تجهیزات سطحی و سیستم‌ها است. مورد دوم سرمایه گذاری زیرسطحی است که شامل حفاری چاه‌های زمین گرمایی می‌شود. چاه عمیق‌تر منجر به هزینه راه اندازی بالاتر می‌شود. گزارش شده است که استخراج و تزریق مجدد سیال عامل در مخزن زمین گرمایی تا 50 درصد از کل هزینه را شامل می‌شود که بین 500 تا 4000 دلار در هر کیلووات تولید شده است. ساخت نیروگاه حدود 40 درصد از هزینه کل (1500-1700 دلار به ازای هر کیلووات تولیدی) را شامل می‌شود که منجر به هزینه خالص حدود 2000-6000 دلار به ازای هر کیلووات می‌شود. از طرف دیگر عملیات و نگهداری حدود 10 تا 20 درصد هزینه خالص خواهد بود. هزینه کلی راه اندازی یک چاه زمین گرمایی جدید را می‌توان به دلیل حذف هزینه‌های حفاری و هزینه از کار انداختن و رهاسازی میدان نفتی حدود 50 درصد کاهش داد، در نهایت مقاوم سازی و بهینه سازی یک چاه نفت و گاز متروکه برای تبدیل به چاه زمین گرمایی به عنوان یکی از گزینه‌های عملی‌تر در مقایسه با از کار انداختن آن دیده می‌شود [30]. نکته کلیدی مقاوم سازی چاه نفت رها شده برای استخراج انرژی زمین گرمایی، در دسترس بودن داده‌های بزرگ ترموفیزیکی ثبت شده از چاه نفت موجود است. از این نوع داده‌ها می‌توان برای بررسی اینکه کدام چاه‌ها بالاترین دما را در ته چاه دارند و کدام چاه‌ها برای پاسخگویی به نیاز انرژی مناسب هستند استفاده کرد. داده‌های دما یکی از مهمترین معیارهای اندازه گیری این نوع چاه‌ها می‌باشد. علاوه بر این، از این داده‌های ترموفیزیکی می‌توان

استخراج گرمای خروجی ضروری است. دمای ته چاه به ترتیب در عمق 4423 و 3861 متری برابر با 159,8 و 138,7 درجه سانتیگراد و حداکثر توان برابر با 364 و 138 کیلووات بوده است. این می‌تواند مبنایی برای تخمین هزینه و مقدار انرژی تولیدی را برای اجرا فراهم کند [37]. در مخازن نفت و گاز که یکی از روش‌های بهبود بازده نفت¹ روش احتراق درجا با تزریق هوا و اکسیداسیون سیال مخزن است، می‌توان از افزایش دمای مخزن در اثر احتراق درجا و در نتیجه تبدیل این چاه‌های متروکه به چاه‌های زمین گرمایی استفاده کرد و امکان تولید برق از این نوع مخازن را با چاه‌های متروکه فراهم کنیم. معمولاً در بسیاری از مخازن نفتی متروکه اشباع باقی مانده نفت بیش از 30 درصد می‌باشد. بر اساس تحقیقات موجود، دمای مخازن نفت با تزریق هوا و احتراق درجا می‌تواند به بیش از 400 درجه سانتیگراد برای مخازن نفت سبک و بیش از 600 درجه سانتیگراد برای مخازن نفت سنگین برسد. مخازن نفتی تحت چنین شرایط دمایی ممکن است به مخازن زمین گرمایی پیشرفته استثنایی در مقایسه با سیستم‌های زمین گرمایی پیشرفته معمولی در سازندهای سنگ‌های خشک داغ تبدیل شوند.

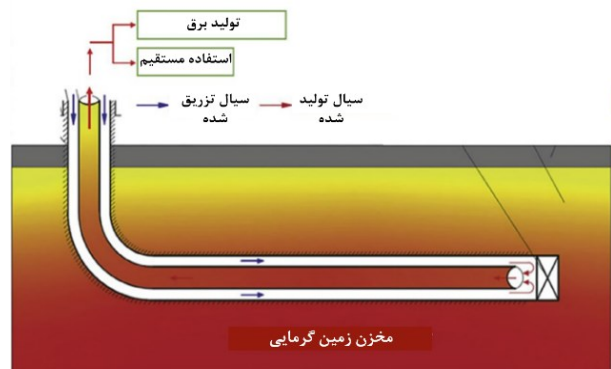
شکل 8 نمایانگر نحوه تولید انرژی زمین گرمایی با استفاده از چاه‌های متروکه نفتی و احتراق درجا است. برای تولید برق با استفاده از تزریق بخار و سپس تزریق آب می‌توان بخار با دمای بالا و فشار بالا به دست آورد. راندمان تولید برق با استفاده از سیالات مخازن احتراق درجا به دلیل دمای بالا، بسیار بیشتر از سیالات گرم تولیدی مشترک از مخازن نفت و گاز خواهد بود. مزیت دیگر، نفت خام تولید شده با تزریق هوا خواهد بود که باعث افزایش طول عمر مخزن می‌شود و صنعت نفت برای مدت طولانی‌تری رونق خواهند داشت [38,39]. یکی از بزرگترین چالش‌های فنی انتقال آب گرم تولید شده از چاه‌های زمین گرمایی به تأسیسات حرارتی روی سطح است. این بخار یا آب گرم معمولاً از طریق یک شبکه خط لوله منتقل می‌شود که در آن از دست دادن گرما اجتناب ناپذیر است. برخی از عواملی که در اتلاف حرارت نقش دارند عبارتند از: اختلاف دمای لوله آب گرم با محیط اطراف، قطر لوله، طول لوله، جنس لوله، وجود عایق، زمان انتقال و غیره. در طول فرآیند انتقال سیال، دمای آب گرم در حین تولید بر این اتلاف گرما تأثیر می‌گذارد. جدول 1 تخمین اتلاف گرما و انرژی را با توجه به قطر و طول لوله نشان می‌دهد. این چالش زمانی آشکارتر می‌شود که یک چاه نفت متروکه در دریا قرار گیرد. جریان بالای اقیانوس و دمای پایین بستر دریا عوامل اصلی اتلاف حرارت از خط لوله حمل و نقل هستند.



سیال از فضای آنالوس تزریق شده و از قسمت لوله تولیدی در مرکز به صورت حلقه بسته، به سمت سطح هدایت می‌شود [32,33]. برای جلوگیری از اتلاف حرارت کمتر سیال تولیدی در این مبدل‌ها، یکی از روش‌های پیشنهادی استفاده از حفاری جهت‌دار یا چاه‌های متروکه افقی است تا با زمین در دماهای بالا تماس بیشتری داشته باشند (شکل 7) [34].



شکل 6 سمت بالا؛ انواع مبدل‌های حرارتی. سمت پایین؛ ساختار چاه حلقه بسته [33]



شکل 7 گردش سیال برای استخراج گرما در چاه حلقه بسته افقی [35]

برای آنالیز دمای سیال در طول لوله می‌توان از رابطه (1) استفاده کرد:

$$\frac{T_{wall}-T}{T_{wall}-T_{in}} = \exp\left(\frac{-4h}{\rho u c_p D}\right) \quad (1)$$

که در آن T_{wall} دمای ثابت دیواره، T_{in} دمای سیال ورودی، T دمای سیال بدست آمده در طول لوله، h ضریب انتقال حرارت، D قطر ورودی لوله، ρ چگالی سیال، u سرعت سیال و c_p ظرفیت گرمایی ویژه است [36]. شبیه سازی چاه‌های متروکه نفت و گاز با استفاده از داده‌های این چاه‌ها می‌تواند مبنایی برای تخمین میزان تولید انرژی زمین گرمایی باشد. نتایج شبیه سازی استخراج حرارتی برای دو حلقه چاه نفت در جنوب ایران (اهواز) نشان می‌دهد که گرادیان حرارتی، دبی جرمی ورودی، هندسه دیواره لوله در چاه، اندازه لوله‌های تزریق و تولید بر سرعت

¹ Enhanced Oil Recovery (EOR)

شکل 8 نحوه تولید انرژی زمین گرمایی با استفاده از چاههای متروکه نفتی و احتراق درجا [38]

جدول 1 اتلاف گرما و انرژی با توجه به قطر و طول لوله [40]

ردیف	قطر لوله (میلی متر)	طول لوله (متر)	اتلاف گرما ($kJ \times 10^9$)	اتلاف انرژی ($kJ \times 10^9$)
1	250	3227	11,032	3,067
2	200	1870	5,825	1,619
3	150	984	2,701	0,751
4	125	2759	7,008	1,948
5	100	1495	3,457	0,961
6	80	1393	3,092	0,859
7	60	260	0,528	0,147
8	کل		33,643	9,352

زمین گرمایی در مقایسه با استخراج نفت و گاز معمولی مزایای بیشتری دارد. میزان گازهایی مانند دی اکسید کربن در چاههای متروکه نفت و گاز که به چاه-های انرژی زمین گرمایی حلقه بسته تبدیل شدند تقریباً صفر و برای چاههای حلقه باز ناچیز است [7.44].

6- بررسی مطالعات و پروژههای اقتصادی مرتبط با تبدیل چاههای متروکه نفت/گاز به چاههای زمین گرمایی

علی‌رغم برخی مطالعات گزارش شده در مورد جنبه اقتصادی مقاوم سازی یک چاه نفت رها شده به عنوان یک چاه زمین گرمایی، هنوز مطالعات محدودی وجود دارد که تأثیر کلی اقتصادی پروژه را تحلیل نماید. اما برخی مطالعات نشان می‌دهد که هزینه توسعه یک چاه نفتی جدید زمین گرمایی کمتر از هزینه از کار انداختن یک چاه نفت است. با این حال به نظر می‌رسد که عواملی که باعث تفاوت در نتایج می‌شوند، باید با جزئیات بیشتری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند تا زمینه بهتری برای توسعه بیشتر استخراج انرژی زمین گرمایی از چاههای نفتی متروکه حاصل شود [45,46]. یکی از تفاوت‌های اصلی بین چاههای زمین گرمایی و نفت، میزان تولید است. معمولاً میزان تولید در چاه-های نفت بسیار کمتر از چاههای زمین گرمایی است. بنابراین واضح است که استفاده از امکانات و زیرساخت‌های موجود در میادین نفتی می‌تواند هزینه‌های اولیه پروژه‌های زمین گرمایی را به میزان قابل توجهی کاهش داده و اقتصاد پروژه را ارتقا دهد [47]. مطابق مطالعه نیان و چنگ، کل هزینه سالانه گرمایش زمین گرمایی از یک چاه نفت رها شده را $1/72$ دلار در هر متر مربع تخمین زدند که بسیار کمتر از یک سیستم گرمایش زمین گرمایی معمولی است که هزینه آن $3/4$ دلار در هر متر مربع است [48]. رحمان و همکاران در مطالعه دیگری در مورد تبدیل چاههای نفت و گاز به چاههای حلقه بسته زمین گرمایی، نشان دادند که میزان تولید انرژی متناسب با توان و مدت زمان هر پروژه است. در این مطالعه بازده انرژی یا ضرایب عملکرد¹ از $3/73$ تا $9,609$ ، با میانگین 851 گزارش شد که راندمان حرارتی نیز بین $3/3$ تا $13/1$ درصد گزارش شد [49]. دن سو و همکاران نیز نشان دادند که با توجه به طراحی مجدد مکان چاههای نفت و شناخته شدن پارامترهای زمین‌شناسی، تحلیل تأثیر خواص ترموفیزیکی و انتقال سیال عامل، مشمر ثمر واقع می‌شود. آنها بیان کردند که افزایش ویسکوزیته و هدایت حرارتی، دمای خروجی و انرژی کل را افزایش می‌دهد. همچنین، ترکیب سیالات عامل حرارت و عایق نمودن رشته لوله‌های تولیدی نیز می‌تواند بر عملکرد دمای تولیدی چاه حلقه بسته تأثیر بگذارد [50]. در یکی از مطالعات میدانی مخازن نفت چین، برخی از جنبه‌های مهم تولید برق با استفاده از نفت گرم و آب تولیدی مشترک از مخزن LB واقع در میدان نفتی هوایی که متعلق به شرکت پترو چین² است، مورد بررسی قرار گرفت. دمای سازند و مایعات تولید شده به ترتیب حدود 120 درجه سانتی‌گراد و 110 درجه سانتی‌گراد گزارش شد. این مخزن از آوریل 2011 به مدت چندین ماه به بهره برداری رسیده است و تا پایان سال 2011، انرژی جمعی تولید شده حدود 1.4×31 کیلووات ساعت بدست آمد [51]. چند پروژه اجرا شده دیگر در سایر نقاط جهان با فناوری چرخه‌های رانکین آبی³ که در قالب تولید برق از آب تولیدی با دمای بالا از میادین نفتی است در جدول 2 توصیف شده است [52].

یک روش رایج برای جلوگیری از اتلاف حرارت از این خط لوله، نصب عایق حرارتی روی خط لوله است. با وجود فناوری به ظاهر ساده، عایق کاری شبکه خط لوله در بستر دریا یک کار چالش برانگیز و پرهزینه است. برای غلبه بر اتلاف حرارت در سطح هنگامی که دمای خروجی از چاه دمای مناسبی باشد، نصب نیروگاه زمین گرمایی در نزدیک محل تولید یعنی بر روی سکوی متروکه نفت و گاز و سپس انتقال انرژی زمین گرمایی به صورت برق یا ذخیره انرژی مناسب‌تر است [40]. با توجه به راندمان کمتر انرژی زمین گرمایی نسبت به انرژی فسیلی، نوراللهی و همکاران در سال 2017 پیشنهاد دادند که برای افزایش کارایی و کاهش هزینه سرمایه گذاری، می‌توان از ترکیب انرژی خورشیدی در کنار انرژی زمین گرمایی حاصل از چاههای متروکه نفت و گازی استفاده کرد که با استفاده از تولید برق می‌توان هزینه پمپ سیال را کاهش داد [41].

5- اثرات زیست محیطی در تبدیل چاههای متروکه نفت/گاز به چاههای زمین گرمایی

خطرات ناشی از چاه متروکه نفت و گاز می‌تواند تا 95 درصد اطراف چاه را از نظر زیست محیطی تحت تأثیر بگذارد [42]. از کار انداختن چاه و رها کردن آن باید با دقت انجام شود. دفع نامناسب چاههای نفت/گاز متروکه ممکن است منجر به خطرات ایمنی یا نشت و آسیب به محیط زیست شود [43]. چاهی که به درستی رها نشده باشد، مطمئناً خطراتی با عواقب فاجعه بار خواهد داشت. حتی برای چاههایی که به دقت مسدود شده‌اند، احتمال بروز مشکل وجود خواهد داشت. نشت سیال مایع و گاز از چاههای نفتی متروکه ممکن است آسیب جدی به محیط زیست و سلامت انسان وارد کند. چاههای نفتی متروکه می‌توانند مسیری برای ورود متان و سایر گازهای زیرزمینی به جو ایجاد کنند. علاوه بر این، این چاهها اغلب به عنوان چاههای آلوده کننده آب زیرزمینی محسوب می‌شوند. همچنین، عوامل مختلفی از جمله شرایط زمین‌شناسی، سن چاه، وجود گاز کم‌عمق و رعایت بهترین شیوه‌ها و مقررات بر نشت سیال در چاه متروکه تأثیر می‌گذارند. با توجه به اثرات زیست محیطی، پیشنهاد می‌شود که استفاده از انرژی

³ Organic Rankine Cycles

¹ Coefficients of Performance

² PetroChina

19,15 - 10,95	ميدان بينکز	آمریکا
11,0	ساحل وسيع	آمریکا
11,0 - 8,0	ساحل خليج	آمریکا

جدول 2 خلاصه‌ای از انواع مستقیم و غیرمستقیم بهره‌برداری از چاه‌های نفت برای اهداف زمین گرمایی [52]

نوع	ناحیه	انرژی
استفاده مستقیم	مخزن نفتی شنگلی ¹ ، چین	گرما: 10,3 گیگا ژول
استفاده مستقیم	مخزن نفتی هوایی، چین	گرما: 10 ⁹ × 7099 گیگا ژول
استفاده مستقیم	مخزن نفتی داجینگ لیاوه ² و ژونگ یوان ³	گرما: 10 ⁹ × 2905 گیگا ژول
استفاده غیر مستقیم	مخزن نفتی وایومینگ ⁴ ، آمریکا	برق: 180 کیلووات
استفاده غیر مستقیم	مخزن داکوتا ⁵ شمالی، آمریکا	برق: 250 کیلووات
استفاده غیر مستقیم	مخزن نفتی هوایی، چین	برق: 310 کیلووات

جدول 4، تجزیه و تحلیل دقیقی از هزینه‌های مرتبط برای بازسازی یک چاه متروکه براساس تجربیات اخیر جهانی را ارائه می‌دهد [55]. براساس مجموعه اطلاعات موجود، با توجه به تغییرات براساس عمق چاه و نوع سناریوی تکمیل چاه، هزینه‌های عملیاتی برای تبدیل چاه متروکه به یک چاه زمین گرمایی می‌تواند از 15897 تا 114539/95 دلار آمریکا متغیر باشد. پراستیا و همکاران سال 2018 هزینه راهسازی چاه‌ها در منطقه سوماترای جنوبی را بین 60000 دلار تا 1/5 میلیون دلار تخمین زده‌اند. این هزینه‌ها بسته به عمق چاه و وضعیت یکپارچگی آن (خوب، متوسط یا ضعیف) متفاوت است [29]. وستون و همکاران سال 2020، این مقدار را از 2 تا 7 میلیون دلار تخمین کردند [56]. برای بررسی دقیق‌تر پتانسیل تولید چاه‌های زمین گرمایی از چاه‌های متروکه طبق مطالعات انجام شده در جدول 5، دماهای تولیدی، نرخ تزریق و عمق تولید، عملکرد اقتصادی پروژه را برای تولید انرژی زمین گرمایی به شکل برق یا گرمایش مستقیم فراهم می‌کنند. نوع سیستم چاه نیز اهمیت بالایی دارد؛ به‌عنوان مثال، چاه‌های حلقه باز اغلب برای تولید برق در دماهای بالا مناسب هستند، در حالی که چاه‌های حلقه بسته در گرمایش مستقیم یا کاربردهای صنعتی بهره‌وری بیشتری دارند. با توجه به موارد ذکر شده، در نظر گرفتن بهره‌برداری اقتصادی، کاهش هزینه‌های انرژی، بهبود کارایی و کاهش اثرات زیست محیطی از مهمترین اهداف پروژه تبدیل چاه‌های متروکه است. در جدول 6، تکنولوژی‌های مختلف، اهداف و نتایج کلیدی برای هر میدان یا مدل شبیه‌سازی شده توضیح داده شده است.

جدول 4 هزینه‌های مرتبط برای تبدیل چاه متروکه به چاه زمین گرمایی [55]

عنوان	هزینه (\$)	توضیحات
مجوز چاه	500	اخذ مجوزهای قانونی
مهندسی حفاری	16000	به ازای 100 ساعت کار مهندسی
بازرسی تجهیزات	3500	لاگ بازرسی لوله جداري
پکر	12750	جهت آب بندی چاه
سر چاه	18000	جابجایی سر چاه قدیمی
برش و تعویض سر چاه	870	-
جوشکاری	1500	نرخ روزانه
دکل حفاری و خدمه	7750	انجام عملیات حفاری
حمل و نقل	2500	حمل تجهیزات
سایر خدمات	4500	کامیون مکش
سیالات تکمیل چاه	4500	آب + حمل و نقل

از دیگر پروژه‌های موفق می‌توان به اولین پروژه تجاری در داکوتای شمالی اشاره داشت که آب تولیدی موجود با دمای 98 درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان 30000 بشکه در روز منجر به تولید برق خالص معادل 250 کیلووات شد [53]. از نظر هزینه و قیمت‌های پروژه‌های انجام شده در سطح میدانی، خلاصه‌ای از قیمت‌های تولید انرژی ناشی از میادین نفت و گاز برای پروژه‌های زمین گرمایی در جدول 3 گزارش شده است [54]. با توجه به آمارهای موجود، حدود ۳۵ درصد چاه‌های حفر شده در ایران نیز غیرفعال هستند. این رقم در بیشتر کشورهای توسعه‌یافته با رقم تولید مشابه، حدود ۱۰ درصد بوده و در عربستان سعودی و کویت که مقدار میانگین تولید هر چاه آنها مشابه ایران است، کمتر از ۲۵ درصد است. همچنین ۴۰ درصد از مجموع چاه‌های غیرفعال کشور در دسته چاه‌های متروکه قرار گرفته‌اند [11]. براین اساس می‌توان دریافت که ایران پتانسیل قابل توجهی در تبدیل چاه‌های متروکه نفت و گاز به چاه‌های زمین گرمایی دارد که این امر لزوم مطالعات امکان‌سنجی دقیق را در این زمینه نشان می‌دهد.

جدول 3 ارزیابی محدوده قیمت انرژی زمین گرمایی در میادین هیدروکربنی در سراسر

جهان [54]

کشور	مکان میدان نفتی	انرژی هزینه سنت آمریکا/کیلووات ساعت
چین	-	9,3
قطر	-	5,6 >
ایتالیا	ویلا فور تونا-ترکاته ^۶	18,0

⁴ Wyoming

⁵ Dakota

⁶ Villafortuna-Treccate

¹ Shengli

² Daqing Liaohe

³ Zhongyuan

عملیات چاه پیمایی	4250	بررسی کیفیت سیمان کاری چاه	محیط زیست	1000	به ازای هر روز نظارت جهت
نظارت بر محل چاه	1400	به ازای هر روز نظارت بر محل	مجموع	80770	امورات محیط زیست

جدول 5 داده‌های کلیدی پتانسیل تولید انرژی زمین گرمایی از چاه‌های نفت و گاز متروکه

دمای تولید (°C)	دمای تزریق (°C)	تولید برق یا گرمایش مستقیم (کیلووات)	سیستم چاه	نرخ تزریق (متر مکعب/ساعت)	عمق چاه (متر)	قطر داخلی لوله (متر)	گرادبان زمین گرمایی (°C/Km)	زمان (سال)	منبع
182	30	7900	حلقه باز	180	4500	-	43	30	[57]
70	50	3500	حلقه باز	576	2000	0,1397	30	10	[58]
138	30	947	حلقه بسته	15	4000	0,05	45	0,16	[23]
59	50	627/9	حلقه بسته	10.8	3000	0,076	-	-	[59]
38	30	345	حلقه بسته	36	3500	0,0381	36	5	[60]

جدول 6 مطالعات و نتایج در خصوص تبدیل چاه‌های نفت و گاز متروکه به چاه زمین گرمایی

اهداف و نتایج	نام میدان	منبع
استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان حرارت و برق و تولید زیست‌گاز از پسماندهای آلی. نتیجه: کاهش انتشار کربن و بهره‌برداری از زیرساخت‌های نفت و گاز برای انرژی تجدیدپذیر.	میدان نفتی راگوسا (ایتالیا)	[61]
استفاده از سیستم‌های زمین گرمایی تقویت شده برای تولید برق از آب تولیدی میدان. نتیجه: ارزیابی موفقیت آمیز تولید برق از سیستم‌های تقویت شده	میدان نفتی داکینگ (چین)	[62]
استفاده از مبدل حرارتی با عایق حرارتی هم‌محور برای بهره‌برداری از چاه‌های نفت بازسازی شده. نتیجه: امکان‌سنجی بهره‌برداری از چاه‌های بازسازی شده برای تولید انرژی زمین گرمایی.	مدل شبیه‌سازی شده (چاه نفتی اهواز)	[37]
استفاده از سیستم چندمنظوره برای تولید انرژی و تبدیل واحدهای زمین گرمایی به واحدهای خودکفا و دوستدار محیط زیست. نتیجه: تولید بخار با فشار بالا و بهره‌وری انرژی چندمنظوره.	میدان گازی پیرکوه (پاکستان)	[63]
نصب ژنراتورهای ترموالکتریک در خارج از رشته تولید برای تبدیل حرارت به برق. نتیجه: تولید برق مستقیم از چاه‌های نفت و گاز و بهبود بازافت حرارتی.	مدل شبیه‌سازی شده	[64]

7- نتیجه گیری

در این مطالعه، اهمیت تبدیل چاه‌های نفت/گاز متروکه به چاه‌های انرژی زمین گرمایی مورد بحث قرار گرفت. براین اساس می‌توان بیان کرد که انرژی زمین گرمایی به عنوان یک انرژی تجدیدپذیر و پاک می‌تواند هزینه رها شدن چاه‌های نفت/گاز متروکه را کاهش دهد؛ از مخاطرات محیط زیستی و آلودگی لایه‌های زیرزمینی در هنگام خروج سیال از چاه جلوگیری نماید و نیز انتشار گاز دی اکسید کربن که یکی از مهمترین موارد زیست محیطی پیشرو ما است، را

کاهش دهد. لازم به ذکر است که عواملی مانند پایان عمر اقتصادی مخزن و نیز تولید آب مازاد همراه با تولید هیدروکربن‌ها می‌تواند از عوامل رها سازی چاه‌های نفت و گاز و متعاقباً پتانسیل بالقوه‌ای برای استفاده از آنها به عنوان منابع زمین گرمایی باشد. همچنین، وجود منابع اطلاعاتی مختلف در خصوص چاه‌های متروکه با توجه به داده‌های ثبت شده از آنها به همراه تاریخچه تولید آنها و نیز ویژگی‌های در دسترس مخزن می‌تواند زمینه مناسبی را در بکارگیری بهترین روش‌ها در استحصال انرژی زمین گرمایی به صورت مستقیم یا غیرمستقیم فراهم نماید. با این حال، ناسازگاری چاه در عمق مورد نظر برای استحصال گرما، کمبود تجهیزات و ابزار سرچاهی مناسب، چالش‌های عملیاتی تبدیل چاه‌های متروکه به منابع زمین گرمایی، هزینه‌های ایجاد نیروگاه زمین گرمایی و نیز عملکرد اقتصادی با توجه به پروژه‌های محدودی که در سطح دنیا و منطقه انجام شده است، از جمله چالش‌های مهم در مسیر تبدیل چاه‌های نفت/گاز متروکه به چاه‌های انرژی زمین گرمایی است. از سویی دیگر، آماده سازی و برنامه ریزی مناسب شرکت‌های نفت و گاز قبل از ترک چاه و تبدیل آن به چاه زمین گرمایی نیز حائز اهمیت است. در نهایت با توجه به مخاطرات زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از احتراق سوخت‌ها فسیلی و نیز مباحث مرتبط با ناترازی نفت و گاز در تامین انرژی پایدار در ساله‌های پیشرو، موضوع تبدیل چاه‌های متروکه نفت و گاز به منابع زمین گرمایی می‌تواند فرصت خوبی را برای استفاده و جانمایی این انرژی پاک و تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور فراهم نماید.

8- منابع

- [1] M. Shahin and M. Simjoo, Potential applications of innovative AI-based tools in hydrogen energy development: Leveraging large language model technologies, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 102, pp. 918–936, 2025.
- [2] H. Ojaghi, M. Shahin, and M. Simjoo, A review study on lithium extraction from geothermal brine reservoirs, in *Proceedings of the 1st Iran InterPore Conference*, Tehran, Iran, 2024. (in Persian)

- for geothermal energy utilization from double pipe heat exchanger in abandoned oil wells, *Adv. Geo-Energy Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 212–221, 2021.
- [20] J. Anders, B. Mofley, S. Nicol, N. Vo, T. Weiss, and T. Fjågesund, Implementation of well barrier schematic workflows, *SPE digital energy conference and exhibition*, 2015.
- [21] T. Vrålstad, A. Saasen, E. Fjær, T. Øia, J. D. Ytrehus, and M. Khalifeh, Plug & abandonment of offshore wells: Ensuring long-term well integrity and cost-efficiency, *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 173, pp. 478–491, 2019.
- [22] K. Breede, K. Dzebisashvili, X. Liu, and G. Falcone, A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future, *Geotherm. Energy*, vol. 1, pp. 1–27, 2013.
- [23] X. Bu, W. Ma, and H. Li, Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells, *Renew. energy*, vol. 41, pp. 80–85, 2012.
- [24] S. Gharibi, E. Mortezaadeh, S. J. H. A. Bodi, and A. Vatani, Feasibility study of geothermal heat extraction from abandoned oil wells using a U-tube heat exchanger, *Energy*, vol. 153, pp. 554–567, 2018.
- [25] R. A. Caulk and I. Tomac, Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy production, *Renew. energy*, vol. 112, pp. 388–397, 2017.
- [26] M. Khalifeh and A. Saasen, *Introduction to permanent plug and abandonment of wells*. Springer Nature, 2020.
- [27] F. Nitschke, S. Held, T. Himmelsbach, and T. Kohl, THC simulation of halite scaling in deep geothermal single well production, *Geothermics*, vol. 65, pp. 234–243, 2017.
- [28] A. E. Prasetya and S. A. Herputra, The optimization for cost-effective well plug and abandonment techniques, *SPE Symposium: Decommissioning and Abandonment*, 2018.
- [29] A. E. Prasetya, R. Rakhmahwidiaty, and R. D. Hutabarat, Plug and abandonment procedures for onshore wells and the utilization of reserved abandonment and site restoration asr funds, *SPE Symposium: Decommissioning and Abandonment*, 2018.
- [30] M. Arshad, M. Assad, T. Abid, A. Waqar, M. Waqas, and M. Khan, A Techno-Economic Concept of EGS Power Generation in Pakistan, *Proceedings, 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California*, 2019.
- [31] L. Santos, A. D. Taleghani, and D. Elsworth, Repurposing abandoned wells for geothermal energy: Current status and future prospects, *Renew. Energy*, 2022.
- [32] M. A. Kaplanoğlu, A. Baba, and G. Gokcen Akkurt, Use of abandoned oil wells in geothermal systems in Turkey, *Geomech. Geophys. Geo-Energy Geo-Resources*, vol. 6, pp. 1–10, 2020.
- [33] K. Wang, B. Yuan, G. Ji, and X. Wu, A comprehensive review of geothermal energy extraction and utilization in oilfields, *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 168, pp. 465–477, 2018.
- [34] D. Xiao, C. Cai, H. Tang, L. Li, Y. Hu, J. Liu, and R. Yang, Research on economic length of the horizontal section of downhole coaxial heat exchanger geothermal system based on net present value, *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, no. 5, pp. 6351–6369, 2022.
- [35] Cui, G., Ren, S., Zhang, L., Ezekiel, J., Enechukwu, C., Wang, Y., & Zhang, R. (2017). Geothermal exploitation from hot dry rocks via recycling heat transmission fluid in a horizontal well. *Energy*, 128, 366-377..
- [36] B. E. Harris, M. F. Lightstone, and S. Reitsma, A numerical investigation into the use of directionally drilled wells for the extraction of geothermal energy from abandoned oil and gas wells, *Geothermics*, vol. 90, p. 28
- [3] B. van der Zwaan and F. Dalla Longa, Integrated assessment projections for global geothermal energy use, *Geothermics*, vol. 82, pp. 203–211, 2019.
- [4] M. Soltani, F. Moradi Kashkooli, A. R. Dehghani-Sanij, A. Nokhosteen, A. Ahmadi-Joughi, K. Gharali, and M. B. Dusseault, A comprehensive review of geothermal energy evolution and development, *Int. J. Green Energy*, vol. 16, no. 13, pp. 971–1009, 2019.
- [5] J. Templeton, *Abandoned petroleum wells as sustainable/renewable sources of geothermal energy*, MSc Thesis, McGill University, Quebec, Canada, 2014.
- [6] S. Wang, J. Yan, F. Li, J. Hu, and K. Li, Exploitation and utilization of oilfield geothermal resources in China, *Energies*, vol. 9, no. 10, p. 798, 2016.
- [7] S. Davoodi, M. Al-Shargabi, D. A. Wood, S. Slivkin, G. Shishaev, and V. S. Rukavishnikov, Geothermal energy recovery from abandoned petroleum wells: A review of the challenges and opportunities, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 68, p. 103870, 2024.
- [8] A. Negre, K. Andjar, E. Muller-Shemetsky, M. Lantoine, E. Marfisi, G. Suzanne, and F. Medellin, Estimation of geothermal electric power production from mature oil fields, in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Oct. 2022, p. D041S133R001, SPE.
- [9] L. Yao, Y. Zhao, D. Zhao, R. Zhong, and J. Li, Impact of Abandoned Oil Well on Ecological Environment and Analysis of Geothermal Exploitation, in *Sustainable Development of Water and Environment: Proceedings of the ICSDWE2021*, Springer, 2021, pp. 77–84.
- [10] J. Clegg and S. Krase, New-Generation Geothermal Wells—How the Upstream Oil and Gas Industry Can Bring Its Experience to Bear, in *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition*, 2022.
- [11] H. Ojaghi, M. Simjoo, M. Shahin, and M. Chahardowli, Geothermal energy extraction using abandoned oil and gas wells: Techno-economic review, *Proceedings of the 12th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (ICChE 2023)*, Tehran, Iran, 2023.
- [12] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, Sustainability assessment of geothermal power generation, *Altern. Energy Shale Gas Encycl.*, pp. 301–309, 2016.
- [13] M. H. Dickson and M. Fanelli, What is geothermal energy?, *Renewable Energy*, Routledge, 2018, p. Vol1_302-Vol1_328.
- [14] M. Nasiri, I. Jafari, and B. Parniankhoy, Oil and gas produced water management: a review of treatment technologies, challenges, and opportunities, *Chem. Eng. Commun.*, vol. 204, no. 8, pp. 990–1005, 2017.
- [15] C. Alimonti and A. A. Gnoni, Harnessing the fluids heat to improve mature oil field: The Villafortuna–Trecate case study, *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 125, pp. 256–262, 2015.
- [16] T. Li, Y. Xu, J. Wang, X. Kong, and J. Zhu, Poly-generation energy system driven by associated geothermal water for oilfield in high water cut stage: A theoretical study, *Geothermics*, vol. 76, pp. 242–252, 2018.
- [17] J. C. Kurnia, M. S. Shatri, Z. A. Putra, J. Zaini, W. Caesarendra, and A. P. Sasmito, Geothermal energy extraction using abandoned oil and gas wells: Techno-economic and policy review, *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, no. 1, pp. 28–60, 2022.
- [18] N. M. Wight and N. S. Bennett, Geothermal energy from abandoned oil and gas wells using water in combination with a closed wellbore, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 89, pp. 908–915, 2015.
- [19] Z. Lin, K. Liu, J. Liu, D. Geng, K. Ren, and Z. Zheng, Numerical model

- temperature co-produced geothermal resources at Huabei oilfield, in *Proceedings, thirty-seventh workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, Stanford, SGP-TR-194, 2012.
- [52] Y. Noorollahi, M. N. Naseer, and M. M. Siddiqi, *Utilization of Thermal Potential of Abandoned Wells: Fundamentals, Applications and Research*. Academic Press, 2022.
- [53] W. Gosnold, *Electric Power Generation from Low to Intermediate Temperature Resources Executive*, Technical Report, 2017.
- [54] R. Duggal, R. Rayudu, J. Hinkley, J. Burnell, C. Wieland, and M. Keim, A comprehensive review of energy extraction from low-temperature geothermal resources in hydrocarbon fields, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 154, p. 111865, 2022.
- [55] D. Schiffner, J. Banks, A. Rabbani, L. Lefsrud, and W. Adamowicz, Techno-economic assessment for heating cattle feed water with low-temperature geothermal energy: A case study from central Alberta, Canada, *Renew. Energy*, vol. 198, pp. 1105–1120, 2022.
- [56] S. M. Watson, G. Falcone, and R. Westaway, Repurposing hydrocarbon wells for geothermal use in the UK: The onshore fields with the greatest potential, *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 3541, 2020.
- [57] A. Mehmood, J. Yao, D. Fan, K. Bongole, J. Liu, and X. Zhang, Potential for heat production by retrofitting abandoned gas wells into geothermal wells, *PLoS One*, vol. 14, no. 8, p. e0220128, 2019.
- [58] Xu, F., Song, X., Song, G., Ji, J., Song, Z., Shi, Y., & Lv, Z. (2023). Numerical studies on heat extraction evaluation and multi-objective optimization of abandoned oil well patterns in intermittent operation mode. *Energy*, 269, 126777.
- [59] M. Gizzi, G. Taddia, and S. Lo Russo, Reuse of decommissioned hydrocarbon wells in Italian oilfields by means of a closed-loop geothermal system, *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, p. 2411, 2021.
- [60] X. Hu, J. Banks, L. Wu, and W. V. Liu, Numerical modeling of a coaxial borehole heat exchanger to exploit geothermal energy from abandoned petroleum wells in Hinton, Alberta, *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 1110–1123, 2020.
- [61] C. Alimonti and D. Scrocca, A Sustainable Solution to Repurpose Oil Wells for Geothermal Use: A Case Study in Southeastern Sicily (Italy), Available SSRN 4561878.
- [62] Y.-J. Zhang, Z.-W. Li, L.-L. Guo, P. Gao, X.-P. Jin, and T.-F. Xu, Electricity generation from enhanced geothermal systems by oilfield produced water circulating through reservoir stimulated by staged fracturing technology for horizontal wells: A case study in Xujiaweizi area in Daqing Oilfield, China, *Energy*, vol. 78, pp. 788–805, 2014.
- [63] M. N. Naseer, Y. Noorollahi, A. A. Zaidi, Y. A. Wahab, M. R. Johan, and I. A. Badruddin, Abandoned wells multigeneration system: promising zero CO2 emission geothermal energy system, *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 1237–1246, 2022.
- [64] K. Wang, J. Liu, and X. Wu, Downhole geothermal power generation in oil and gas wells, *Geothermics*, vol. 76, pp. 141–148, 2018.
- 101994, 2021.
- [37] Y. Noorollahi, M. Pourarshad, S. Jalilinasrabad, and H. Yousefi, Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oil field in southern Iran, *Geothermics*, vol. 55, pp. 16–23, 2015.
- [38] Y. Zhu, K. Li, C. Liu, and M. B. Mggijimi, Geothermal power production from abandoned oil reservoirs using in situ combustion technology, *Energies*, vol. 12, no. 23, p. 4476, 2019.
- [39] L. Zhang, J. Yuan, H. Liang, and K. Li, Energy from abandoned oil and gas reservoirs, *SPE Asia Pacific oil and gas conference and exhibition*, 2008.
- [40] C. Li, Y. Guan, X. Wang, G. Li, C. Zhou, and Y. Xun, Experimental and numerical studies on heat transfer characteristics of vertical deep-buried U-bend pipe to supply heat in buildings with geothermal energy, *Energy*, vol. 142, pp. 689–701, 2018.
- [41] Y. Noorollahi, M. Pourarshad, and A. Veisi, Solar-assisted geothermal power generation hybrid system from abandoned oil/gas wells, *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 6, pp. 771–777, 2017.
- [42] H. H. T. Pham, H. P. Lohne, Ø. Arild, D. Schlenk, and D. M. Pampanin, Modeling of Environmental Fate and Effects of Oil Leakages from Abandoned Subsea Wells Using an Environmental Impact Factor Tool, *Integr. Environ. Assess. Manag.*, vol. 17, no. 3, pp. 626–638, 2021.
- [43] Z. Chen, Environmental Damage by deserted oil and gas wells and concerning legal Liability, *J. Southwest Pet. Univ*, vol. 13, pp. 1–9, 2011.
- [44] V. Alboiu and T. R. Walker, Pollution, management, and mitigation of idle and orphaned oil and gas wells in Alberta, Canada, *Environ. Monit. Assess.*, vol. 191, pp. 1–16, 2019.
- [45] C. Alimonti, F. Vitali, and D. Scrocca, Reuse of oil wells in geothermal district heating networks: a sustainable opportunity for cities of the future, *Energies*, vol. 17, no. 1, p. 169, 2023.
- [46] D. Westphal and R. Weijermars, Economic appraisal and scoping of geothermal energy extraction projects using depleted hydrocarbon wells, *Energy Strateg. Rev.*, vol. 22, pp. 348–364, 2018.
- [47] J. Nordquist and L. Johnson, Production of power from the co-produced water of oil wells, 3.5 years of operation, *Geothermal Resources Council Transactions, Geothermal Resources Council 2012 Annual Meeting*, 2012, pp. 207–210.
- [48] Y.-L. Nian and W.-L. Cheng, Evaluation of geothermal heating from abandoned oil wells, *Energy*, vol. 142, pp. 592–607, 2018.
- [49] R. Ashena, An Overview of Retrofitting Abandoned Petroleum Wells for Geothermal Energy Production, *ADIPEC*, 2022.
- [50] D. Sui, E. Wiktorski, M. Røksland, and T. A. Basmoen, Review and investigations on geothermal energy extraction from abandoned petroleum wells, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, vol. 9, pp. 1135–1147, 2019.
- [51] S. Xin, H. Liang, B. Hu, and K. Li, Electrical power generation from low