



Thermal Surveying of Mahallat Geothermal Region by Using Gradient Wells

Davar Ebrahimi* 

Assistant Professor, Renewable Energy Department, Energy and Environment Research Center, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. Email: debrahimi@nri.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

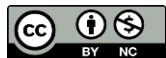
Article History:
Received 23 May 2024
Revised 24 June 2024
Accepted 28 August 2024
Published Online 04 October 2024

Keywords:
Gradient Well,
Thermal Surveying,
Mahallat Geothermal Region.

ABSTRACT

The main purpose of this study is to determine the thermal gradient and subsurface temperature distribution in the Mahallat low-temperature geothermal field in central of Iran. The study involves analyzing gradient well data and conducting Thermal surveys by drilling 7 gradient wells with depth ranging from 30 to 110 meters. Geological and geophysical studies, including gravity methods, were used to identify suitable drilling locations. Temperature measurements were taken along the drilled boreholes using special thermometers after drilling and stabilizing the wells. The geothermal gradient was calculated using the geothermal gradient method, and thermal maps for depths of 30 and 50 meters were prepared. In the Mahallat geothermal region, calculated thermal gradients range from 71 to 107.5 °C/km in different areas. The locations of thermal anomalies have been detected on the subsurface temperature distribution maps. The study reveals a correlation between geothermal surface manifestations and thermal anomalies in this geothermal prospect.

Cite this article: Ebrahimi, D. (2024). Thermal Surveying of Mahallat Geothermal Region by Using Gradient Wells. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 3 (4), 443-458. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.382548.1096>



© Davar Ebrahimi

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.382548.1096>

Introduction

In order to evaluate a geothermal prospect, the first step is initial exploration involves mapping surface manifestations. In some geothermal resources, there are no surface manifestations and it is hard to identify these underground resources. Thermal surveying through shallow exploratory boreholes is a method used for assessing deep geothermal resources. This method is used in both high and low temperature geothermal resources, but its main application is in low-temperature geothermal resources, which are formed by the activity of deep faults and do not have any geothermal surface manifestation [1]. In this method, the thermal gradient is calculated in the drilled boreholes, and thermal map can be prepared, which provide insights into subsurface heat distribution [2-4]. In this study, the Mahallat low-temperature geothermal prospect has been selected for the implementation of the project, because there are appropriate data and information available from this region.

Methodology

Various methods were employed for exploration of geothermal energy in the Mahallat low-temperature geothermal region. In the first step, based on the results obtained from detailed exploration studies, geological and geothermal maps have been prepared. Considering the

importance of geochemical studies, samples from all warm springs in the region were taken and analyzed. In order to carry out thermal surveying, 7 gradient wells have been drilled in the region and the temperature inside the boreholes has been measured at different depths. The drilling operations of these boreholes have been carried out within four months. Based on an integration appraisal of Mahallat geothermal prospect, subsurface heat distribution maps have been prepared.

Results

Detailed geological, geochemical and gravity studies of the Mahallat geothermal region reveal the present of a large geothermal reservoir with a temperature of approximately 100 °C. Geothermal activities in the region primarily manifest as warm springs, extensive travertine outcrops, and altered areas. Thermal surveying in geothermal regions offers valuable subsurface insights cost effectively. To enhance exploratory studies in this area, this method has been used by drilling gradient wells. Proper selection of drilling locations is crucial to establish the normal gradient of the area before determining the geothermal gradient within thermal anomalies. This method is particularly effective in fracture- controlled low-temperature fields, facilitating the preparation of subsurface thermal maps by integration obtained results. In the studied area mapping thermal anomalies has identified the upflow zone for geothermal fluids. By combining thermal gradient data with geological information, the faults that play a role in the transfer of geothermal fluid were identified. Furthermore, integration geothermometry results with thermal surveys has allowed for estimating depth of the geothermal reservoir.

Conclusion

Thermal surveying in the Mahallat geothermal region involved temperature measurements at various depth across seven drilled gradient wells with a borehole diameter of 90 mm and an intended depth of 100 meters, though not achieved in some cases. The total length of the drilled boreholes in the area amounted to 550 meters. Temperature data collected at different depth from each borehole facilitated the calculation of geothermal gradients. The amount of geothermal gradient in the boreholes number 1,3 and 7 were determined 71, 74 and 107.5 °C/km respectively. Thermal maps were generated at depth of 30 and 50 meters to investigate subsurface heat distribution, revealing a prominent anomaly associated with NE-SW trending fractures near borehole number 7, which exhibited the highest thermal gradient. The study underscores the significant role of faults in generating thermal anomalies within the region and suggests a local structural control on these anomalies. By integration thermal gradients with geothermometry data, an approximately 1190 meters was determined for the Mahallat geothermal reservoir. The upflow zone of geothermal fluids was identified in the area, which is crucial for selecting drilling locations and reducing exploration costs. The geothermal reservoir in Mahallat region is classified as low-temperature, making it suitable for direct use, particularly for heating the numerous greenhouses in this area.



مطالعات حرارت‌سنجی در منطقه زمین‌گرمایی محلات با استفاده از چاه‌های گرادیان

داور ابراهیمی*

عضو هیئت علمی گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، رایانامه: debrahimi@nri.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

کلیدواژه:

چاه گرادیان،

حرارت‌سنجی،

زمین‌گرمایی،

منطقه زمین‌گرمایی محلات.

هدف از انجام این مطالعه، تعیین شیب حرارتی و نحوه توزیع دما در بخش‌های زیرسطحی میدان زمین‌گرمایی حرارت پایین محلات، در نواحی مرکزی ایران است. به منظور انجام مطالعات حرارت‌سنجی، ۷ چاه گرادیان (گمانه اکتشافی) با اعماق مختلف (بین ۳۰ تا ۱۱۰ متر) در منطقه حفاری شده است. تعیین موقعیت مناسب برای نقاط حفاری گمانه‌ها، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی انجام‌شده در منطقه به دست آمده است. مطالعات حرارت‌سنجی، از طریق برداشت دما در اعماق مختلف ۷ گمانه حفار شده صورت گرفته است. مجموع طول گمانه‌های حفار شده ۵۵۰ متر است و امکان اندازه‌گیری حرارت با استفاده از دماسنج‌های مخصوصی در طول گمانه‌ها فراهم شده است. به منظور برداشت داده‌های واقعی، شرایط پایداری در گمانه‌ها پس از حفاری لحاظ شده و داده‌های برداشت‌شده دوباره راستی‌آزمایی شده‌اند. در این مطالعه میزان شیب حرارتی اندازه‌گیری‌شده در مناطق مختلف منطقه زمین‌گرمایی محلات از ۷۱ تا ۱۰۷/۵ درجه سانتی‌گراد به ازای هر کیلومتر محاسبه شده است. نقشه‌های حرارتی منطقه با استفاده از روش گرادیان زمین‌گرمایی برای تشخیص محل ناهنجاری حرارتی، در افق اعماق ۳۰ و ۵۰ متری تهیه شده و زون صعود سیال مشخص شده است. با تلفیق نتایج به‌دست‌آمده از حرارت‌سنجی منطقه و سایر اطلاعات موجود، نقش گسل‌های در انتقال سیال مشخص شده و عمق تقریبی مخزن نیز برآورد شده است.

استناد: ابراهیمی، داور (۱۴۰۳). مطالعات حرارت‌سنجی در منطقه زمین‌گرمایی محلات با استفاده از چاه‌های گرادیان. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۳ (۴) ۴۴۳-۴۵۸.

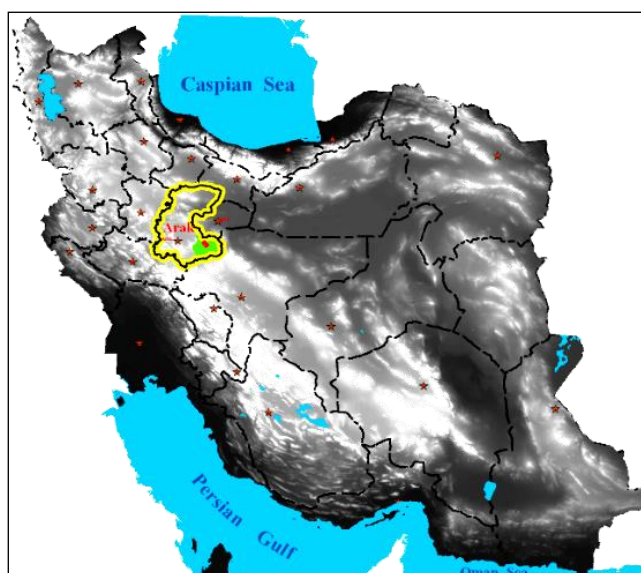
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.382548.1096>

© داور ابراهیمی ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.382548.1096>



۱. مقدمه

کشور ایران دارای منابع انرژی زمین‌گرمایی قابل توجهی است که در سالیان اخیر به‌خوبی مورد مطالعه قرار گرفته و معرفی شده‌اند [۱ - ۴]. منطقه زمین‌گرمایی محلات به عنوان یکی از منابع زمین‌گرمایی بزرگ ایران شناخته شده و مطالعات تکمیلی در این منطقه صورت گرفته است [۵]. اولین گام در بررسی و ارزیابی منابع زمین‌گرمایی در یک منطقه، مطالعات اکتشافی است که بر اساس شناسایی و نقشه‌برداری از نشانه‌های سطحی صورت می‌گیرد. در برخی منابع زمین‌گرمایی این نشانه‌ها در سطح زمین رخنمون پیدا نمی‌کنند و در نتیجه، شناسایی این منابع در اعماق زمین با مشکلاتی همراه می‌شود. یکی از روش‌هایی که می‌توان به کمک آن یک منبع عمیق زمین‌گرمایی را شناسایی و ارزیابی کرد، حرارت‌سنجی با استفاده از گمانه‌های اکتشافی کم‌عمق است. مطالعات حرارت‌سنجی با استفاده از گمانه‌های حفر شده در یک منطقه زمین‌گرمایی از جمله روش‌های اکتشاف منابع انرژی زمین‌گرمایی است که در هر دو دسته منابع حرارت بالا و حرارت پایین کاربرد دارد، اما کاربرد اصلی آن‌ها در منابع زمین‌گرمایی حرارت پایینی است که بر اثر فعالیت گسل‌های عمیق شکل گرفته‌اند و فاقد هرگونه نشانه سطحی انرژی زمین‌گرمایی هستند [۶ - ۷]. در این روش شیب حرارتی زمین‌گرمایی در هر یک از گمانه‌های حفر شده محاسبه می‌شود و با کمک آن می‌توان نقشه پراکندگی حرارت زیرسطحی را تهیه کرد که اطلاعات ارزشمندی را از شرایط توزیع حرارت در اعماق زمین در اختیار می‌گذارد [۶ - ۹]. نتایج مطالعات حرارت‌سنجی به شناسایی منطقه صعود سیال (Upflow zone) منبع زمین‌گرمایی منجر می‌شود که برای انتخاب نقاط مناسب حفاری بسیار مهم است. با توجه به اینکه این روش در مقایسه با سایر روش‌های اکتشافی هزینه بسیار کمتری دارد، و تا کنون در کشور توسط محققان داخلی انجام نگرفته است، اجرای آن می‌تواند تجربیات ارزشمندی در اختیار قرار دهد و دانش فنی استفاده از چاه‌های گرادیان در مطالعات زمین‌گرمایی نهادینه شود. در این مطالعه منطقه زمین‌گرمایی حرارت پایین محلات به عنوان یک محدوده مطالعاتی مناسب برای اجرای پروژه انتخاب شده است، دلیل این امر داده‌ها و اطلاعات مناسبی است که از این منطقه موجود است. این منطقه در استان مرکزی و در نزدیکی شهر محلات قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه زمین‌گرمایی محلات در مرکز ایران

۲. روش کار

در این مطالعه از روش‌های مختلف اکتشاف منابع انرژی زمین‌گرمایی در منطقه محلات استفاده شده است. در گام اول بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات اکتشاف تکمیلی، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس متناسب تهیه شده است. همچنین، نقشه زمین‌گرمایی منطقه مورد نظر، بر اساس نشانه‌های سطحی منابع انرژی زمین‌گرمایی و تصاویر ماهواره‌ای تهیه شده است. با توجه به اهمیت چشمه‌های آبگرم در مطالعات ژئوشیمیایی، از تمامی چشمه‌های آبگرم منطقه نمونه‌برداری شده و در آزمایشگاه‌های معتبر و مرجع

نمونه‌ها مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. در ادامه به منظور انجام مطالعات حرارت‌سنجی تعداد ۷ چاه گرادیان در منطقه حفاری شده و با استفاده از روش‌های مرسوم و تجهیزات ساخته‌شده، دمای داخل گمانه‌ها در عمق‌های مختلف برداشت شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تلفیق اطلاعات، نقشه پراکندگی زیرسطحی حرارت در منطقه زمین‌گرمایی محلات تهیه شده است.

۲-۱. روش‌های حرارت‌سنجی در اکتشاف منابع انرژی زمین‌گرمایی

از سطح زمین به سمت مرکز آن دما با نرخ‌های متفاوتی افزایش پیدا می‌کند. دلایل مختلفی برای توجیه دمای بالاتر مرکز زمین ارائه شده است، از جمله می‌توان به انرژی اولیه ذخیره‌شده در مرکز زمین، سنگی شدن هسته زمین و همچنین واپاشی عناصر رادیواکتیوی مانند اورانیوم، توریم و پتاسیم اشاره کرد [۹، ۱۳ و ۱۵]. حال، بدیهی است که جریان انرژی از سطوح بالاتر به پایین‌تر به انتقال حرارت از بخش‌های مرکزی زمین به سمت سطح آن منجر می‌شود، از این جریان دمایی تحت عنوان هدررفت دما^۱ نیز یاد می‌شود. این مسیر حرکت دمایی (از مرکز داغ به سمت سطح سرد) است که توزیع دما در کره زمین را کنترل می‌کند. در این مسیر، انتقال دما به سه روش صورت می‌گیرد: رسانایی^۲ (انرژی جنبشی از طریق برخورد بین مولکولی هدایت می‌شود)، همرفت^۳ (عامل گرما با حرکت و جابه‌جایی خود، دما را منتقل می‌کند) و تشعشع^۴ (حرارت منبع به واسطه تابش دما را افزایش می‌دهد). روش رسانایی نقش اصلی خود را در انتقال حرارت در محدوده پوسته زمین ایفا می‌کند، ولی در بخش‌های داخلی‌تر (گوشته و هسته) روش همرفت اهمیت بسیار بالاتری دارد. روش تشعشع نیز نقش بسیار کم‌رنگی در انتقال دما در بخش‌های داخلی‌تر زمین دارد، اما انتقال دمای سطح زمین، که به واسطه تابش و انتقال انرژی از سمت خورشید است را کنترل می‌کند [۱۵-۱۸].

مطالعات حرارت‌سنجی منابع انرژی زمین‌گرمایی به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد و انتخاب روش مناسب بستگی اهداف مطالعات و نوع منبع زمین‌گرمایی دارد. از جمله عوامل تأثیرگذار دیگر در حرارت‌سنجی به روش‌های مختلف دسترسی به تجهیزات لازم و تأمین هزینه‌ها هستند. مهم‌ترین روش‌های حرارت‌سنجی به شرح زیر هستند.

۲-۱-۱. اندازه‌گیری حرارت سطحی زمین

در این روش اندازه‌گیری مستقیم دمای در عمق حدود نیم متری سطح زمین با ایجاد یک شبکه منظم و با فواصل ۵ تا ۱۰ متری بین نقاط، اندازه‌گیری انجام می‌گیرد. این روش اندازه‌گیری حرارت مختص منابع حرارت بالا بوده و به‌خصوص در مواردی که ناهنجاری‌ها دما سطحی باشند (مجاورت چشمه‌های آب داغ و گاز فشان‌ها) بسیار مفید است، زیرا تصویری ساده از تغییرات حرارت در نزدیکی سطحی زمین را ارائه می‌دهد.

۲-۱-۲. عکس‌برداری از نواحی فاقد برف در مناطق سردسیر

این روش برای نمایان کردن نواحی سطحی با حرارت‌های نسبتاً بالا استفاده می‌شود. به این ترتیب که عکس‌های هوایی ناحیه مورد نظر در فواصل زمانی چند ساعت تا چند روز، پس از بارش برف (بارش کم تا متوسط) برداشت می‌شود تا نواحی دارای ناهنجاری حرارتی، به دلیل سرعت بیشتر ذوب برف نسبت به نواحی بدون ناهنجاری حرارتی، متمایز و شناسایی شوند. این روش حرارت‌سنجی سطحی زمین، روشی ارزان و سریع برای انجام مطالعات مقدماتی حرارتی در یک منطقه اکتشافی زمین‌گرمایی به شمار می‌رود.

۲-۱-۳. برداشت‌های هوایی مادون قرمز حرارتی

با به‌کارگیری اسکنرهای مادون قرمز که انرژی تشعشع‌یافته از سطح زمین را شناسایی و اندازه‌گیری می‌کنند، نواحی گرم زمین و حاوی چشمه‌های آب داغ نقشه‌برداری می‌شوند. با این روش نواحی دارای آنومالی حرارتی سطحی که قبلاً ناشناخته بوده، را می‌توان شناسایی کرد. سرعت اندازه‌گیری در این روش حرارت‌سنجی بالا و هزینه آن نیز نسبتاً بالا است.

1. Heat loss
2. Conduction
3. Convection
4. Radiation

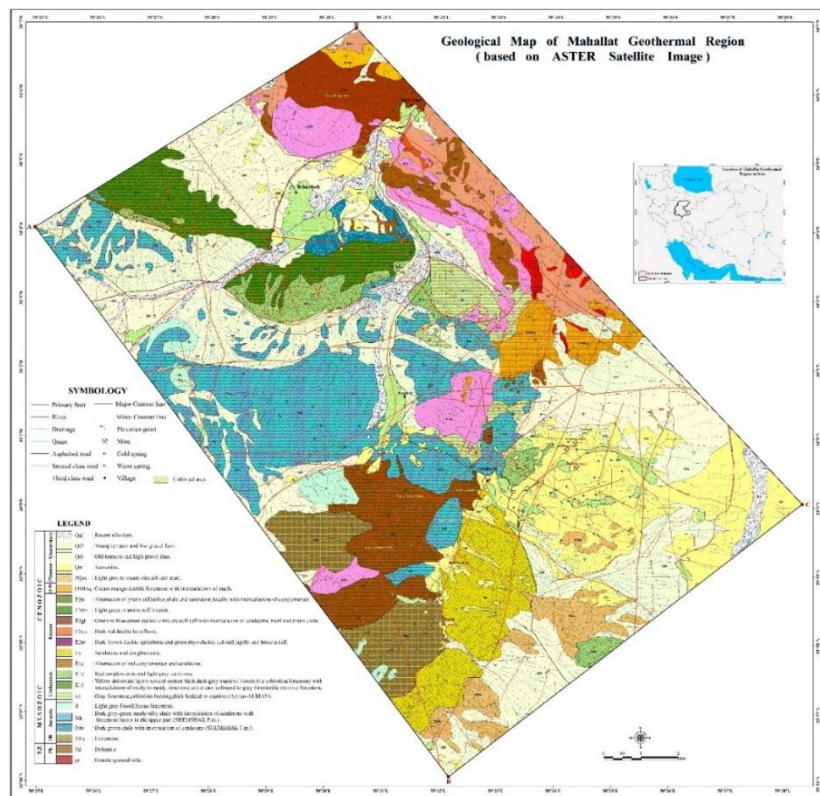
۲-۱-۴. حرارت‌سنجی با حفر چاه‌های گرادیان کم‌عمق (۲۰ تا ۲۰۰ متری)

درک شیب حرارتی زمین برای اکتشاف مخازن زمین‌گرمایی بسیار مهم است و برای به دست آوردن شیب زمین‌گرمایی حفاری چاه‌های گرادیان به عنوان یک روش کارآمد در نظر گرفته می‌شود [۶، ۷ و ۹]. شیب حرارتی معمول زمین به ازای هر صد متر افزایش عمق، ۳ درجه سانتی‌گراد است. حاصل ضرب شیب حرارتی در هدایت (قابلیت رسانایی) حرارتی لایه‌های زمین، جریان حرارتی یا میزان حرارتی است که از لایه‌های درونی زمین به لایه‌های بیرونی متصاعد می‌شود. پس در نواحی از زمین که میزان شیب حرارتی و جریان حرارتی بیشتر از حد معمول باشد، مؤید ناهنجاری حرارتی است که می‌تواند نشان‌دهنده وجود منابع زمین‌گرمایی در آن ناحیه از زمین باشد. در واقع کاربرد روش حرارت‌سنجی با حفر چاه‌های کم‌عمق، تعیین بیشترین شیب حرارتی و به تبع آن، بهترین و مناسب‌ترین محل برای حفاری چاه یا چاه‌های اکتشافی عمیق و پرهزینه است. در این روش حرارت‌سنجی، ابتدا تعدادی چاه گمانه‌ای در منطقه مورد اکتشاف حفر می‌کنند و پس از گذشت زمانی (معمولاً دو یا سه روز) تا رسیدن تعادل حرارتی سیال در چاه‌ها، میزان دما را در اعماق مختلف هر چاه به کمک یک دستگاه دماسنج حساس اندازه‌گیری می‌کنند و در نهایت میزان متوسط شیب حرارتی برای هر چاه و منحنی شیب حرارتی ناحیه‌ای محاسبه می‌شود. همچنین، محل صعود سیال از مخازن اصلی با استفاده از منحنی شیب حرارتی تعیین می‌شود. عمق چاه‌های گمانه‌ای که برای اندازه‌گیری شیب حرارتی زمین حفر می‌شوند، معمولاً بین ۲۰ تا ۲۰۰ متر است تا دمای چاه تحت تأثیر تغییرات دمایی روزانه یا فصلی قرار نگیرد. تعداد چاه‌هایی که در یک شبکه‌بندی مشخص و از پیش تعیین شده حفر می‌شوند، بستگی به وسعت منطقه مورد مطالعه و هزینه در نظر گرفته شده برای اکتشاف مربوطه دارد. به این ترتیب پس از لوله‌گذاری، چاه با گل حفاری مناسب پر شده و چند روزی به حال خود رها می‌شود تا یک تعادل حرارتی در این فاصله زمانی بین سیال داخل چاه و زمین اطراف برقرار شود، زیرا در غیر این صورت و بلافاصله پس از انجام حفاری، به دلیل گردش گل حفاری در چاه، قسمت‌های فوقانی چاه گرم‌تر و قسمت‌های تحتانی چاه سردتر از وضعیت حرارت تعادلی چاه خواهد بود. در این مرحله با ارسال یک دماسنج مناسب به داخل چاه، میزان دما در عمق‌های مختلف چاه (هر ۲ - ۵ متر) و با دقت بالا اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. گاهی حتی لازم است یک هفته تا چند ماه هم منتظر ماند تا در چاه‌های مورد نظر تعادل حرارتی برقرار شود و تکرار اندازه‌گیری حرارت درون چاه‌ها نتایج مشابهی را در بر داشته باشد [۱۸ - ۲۳]. در این مطالعه که در منطقه زمین‌گرمایی محلات صورت گرفته، از این روش استفاده شده است. در بسیاری از مناطق دنیا برای مطالعه منابع زمین‌گرمایی بی‌نشان نیز از این روش استفاده می‌شود [۲۴].

۳. زمین‌شناسی منطقه

محدوده مورد مطالعه دارای تنوع خاصی از انواع واحدهای سنگ چینه‌ای است. واحدهای ولکانیکی در منطقه، بیشتر در بخش‌های شمال شرقی و مرکزی آن رخنمون دارند و توده‌های نفوذی نیز تنها در بخش‌های محدودی از منطقه و در قسمت‌های شرقی، رخنمون دارند. به طور کلی با بررسی وضعیت لیتولوژیکی منطقه، می‌توان نتیجه‌گیری کرد این منطقه را واحدهای رسوبی متنوعی پوشش می‌دهند که شامل درصد قابل توجهی آهک و ماسه سنگ و با پوشش کمتر، شیل، کنگلومرا و مارن می‌شوند. واحدهای ولکانیکی منطقه ترکیب داسیتی تا ریوداسیتی دارند که ممکن است منشأ کانی‌سازی‌ها و آثار دگرسانی‌های موجود در منطقه نیز باشند. توده‌های نفوذی منطقه با ترکیب اسیدی گرانیت - گرانودیوریتی که در بخش‌های از منطقه برونزد دارند، دارای تماس مستقیم با واحدهای دگرسان شده توفی و ماسه سنگی هستند [۱۰ و ۱۱]. در مطالعات زمین‌شناسی منطقه‌ای، هر یک از واحدهای سنگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۰ - ۱۲]. واحدهای گسترش‌یافته در منطقه مربوط به دوران پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک هستند و قدیمی‌ترین سنگ‌هایی که در محدوده مورد مطالعه رخنمون دارند، منسوب به پرمین هستند. در این مطالعه نقشه زمین‌شناسی منطقه زمین‌گرمایی محلات، با ملاحظات مرتبط با منابع زمین‌گرمایی و مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده است (شکل ۲). از نظر توپوگرافی، بخش عمده‌ای از منطقه زمین‌گرمایی محلات شامل زمین‌های پست و کم‌ارتفاع است. دو نوار مرتفع که جهت‌های شمال شرقی - جنوب غربی (NE-SW) و شمال غربی - جنوب شرقی (NW-SE) دارند، به صورت متقاطع،

در منطقه نمایان هستند. از جمله مهم‌ترین گسل‌های منطقه می‌توان به گسل شمال محلات، گسل آبگرم، گسل سرباز، گسل نینه، گسل ورین، گسل خورهه و سامانه گسل‌های امتداد لغز منطقه اشاره کرد.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه زمین گرمایی محلات با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰

۴. بررسی نشانه‌های سطحی انرژی زمین گرمایی

طبق مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شد که در منطقه زمین گرمایی محلات، سه نوع نشانه سطحی انرژی زمین گرمایی وجود دارد. در ادامه، هر یک از آن‌ها با جزئیات بیشتری معرفی می‌شوند.

۴-۱. چشمه‌های آبگرم

از مهم‌ترین نشانه‌های وجود منابع زمین گرمایی در منطقه محلات، چشمه‌های آبگرم هستند که با توجه به جذابیت‌های گردشگری که در منطقه ایجاد شده است، به خوبی شناخته شده‌اند. در منطقه یادشده تعداد ۶ چشمه آبگرم وجود دارد که در جنوب منطقه مطالعاتی قرار دارند (شکل ۳). مشخصات کلی چشمه‌های آبگرم منطقه زمین گرمایی محلات در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات کلی چشمه‌های آبگرم منطقه زمین گرمایی محلات

نام چشمه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)	دما (C°)	دبی (l/s)	pH	EC (μs/Cm)
آب دنبه	۴۵۹۰۳۱	۳۷۶۳۴۵۳	۱۸۴۸	۴۶/۷	۱/۴۵	۶,۵۴	۹,۰۲
آب سلیمانیه	۴۵۹۲۰۱	۳۷۶۳۳۴۱	۱۸۲۶	۴۶/۳	۲/۲۵	۶,۵۵	۹,۸۰
آب سودا	۴۵۹۵۶۰	۳۷۶۲۹۵۳	۱۷۳۷	۴۵/۹	۲/۲۵	۶,۵۴	۱۰,۰۰۵
آب حکیم	۴۵۸۹۱۹	۳۷۶۲۲۸۹	۱۷۵۳	۳۴/۸	۲/۲۵	۶,۸۷	۱۰,۱۴
سرباز	۴۵۸۲۶۱	۳۷۶۲۹۵۷	۱۸۷۵	۴۲/۴	۴	۶,۸	۱۰,۴,۴
شفا	۴۵۸۳۴۴	۳۷۶۲۹۲۱	۱۸۷۰	۴۷/۱	۲/۲۵	۶,۶۱	۹,۸۵

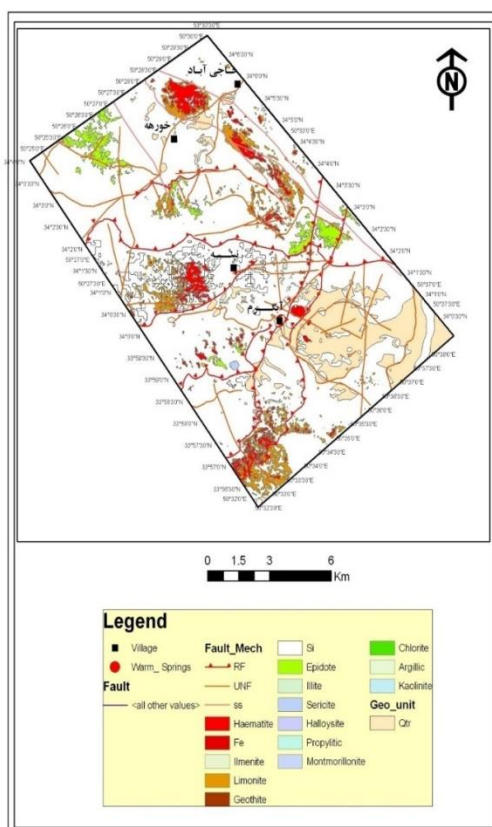
در این منطقه ارتباط نزدیکی بین چشمه‌ها و گسل‌های منطقه وجود دارد، به این ترتیب که چشمه‌های شفا و سرباز در مجاورت یک گسل راندگی قرار دارند و چشمه‌های آب دنبه و آب سلیمانیه بین دو گسل راندگی واقع شده‌اند. چشمه آب سودا دقیقاً روی یک گسل قرار دارد که دارای امتداد شمال غربی - جنوب شرقی (NW-SE) است. چشمه آب حکیم نیز در مسیر گسلی واقع شده که احتمالاً ادامه آن توسط رسوبات آبرفتی پوشیده شده است.

۲-۴. رخنمون تراورتن‌ها

رسوبات تراورتنی معمولاً بر اثر فعالیت چشمه‌های آبگرم به وجود می‌آیند. در منطقه زمین‌گرمایی محلات نیز حجم قابل توجهی از رسوبات یادشده وجود دارد. تراورتن‌ها به طور گسترده در شرق و جنوب روستای آبگرم، در جنوب نینه و در اطراف روستای خوره و به‌ویژه در شمال شرق آن رخنمون دارد (شکل ۳). همانند چشمه‌های آبگرم، رسوبات تراورتنی نیز در مجاورت گسل‌ها تشکیل شده‌اند. تراورتن‌ها به دلیل جوان بودن، در سطح فوقانی تمامی سازندهای منطقه رسوب کرده‌اند. ضخامت آن‌ها متغیر بوده و تا حدود ۴۰ متر نیز می‌رسد. به دلیل گستردگی رسوبات تراورتنی، فعالیت معدن کاری به نحو گسترده‌ای در منطقه رونق یافته است.

۳-۴. نواحی دگرسانی

نواحی دگرسان‌شده منطقه محلات به صورت پنج نوار دگرسانی تشکیل شده‌اند. کانی‌های دگرسانی موجود در نوارهای مختلف، متفاوت هستند. در چهار کیلومتری جنوب روستای آبگرم، دو کیلومتری غرب و چهار کیلومتری شرق روستای نینه و همچنین، در ۲/۵ کیلومتری شمال شرق این روستا آثار دگرسانی به چشم می‌خورد. مجموعه کانی‌های تشکیل‌دهنده نواحی دگرسان‌شده نشان‌دهنده دگرسانی‌های فریک، کلریتی، کلسیتی و سیلیسی هستند. از بین تیپ‌های دگرسانی یادشده، انواع اکسید آهنی و کلریتی، دگرسانی‌های غالب در منطقه زمین‌گرمایی محلات هستند. در این منطقه ارتباط بسیار نزدیکی بین نواحی دگرسان‌شده، گسل‌های منطقه و رخنمون تراورتن‌ها وجود دارد (شکل ۳).



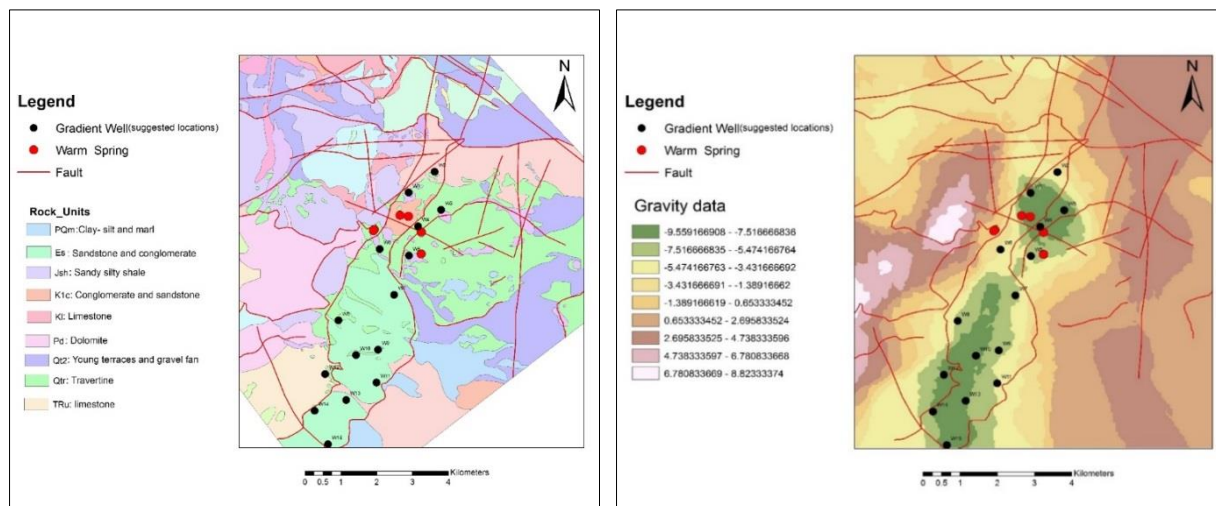
شکل ۳. نقشه پراکندگی نشانه‌های سطحی انرژی زمین‌گرمایی و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر در منطقه زمین‌گرمایی محلات

۵. مطالعات حرارت‌سنجی در منطقه زمین‌گرمایی محلات

در این مطالعه از روش حرارت‌سنجی حفر چاه‌های گرادیان کم‌عمق (۲۰ تا ۲۰۰ متری) استفاده شده است. بر اساس نتایج مطالعات پیشین، نخست موقعیت گمانه‌ها در منطقه اکتشافی مشخص شد. در مرحله بعد، گمانه‌های حرارت‌سنجی با عمق تقریبی ۱۰۰ متر در منطقه مورد نظر حفر شد. سپس، به کمک دماسنج‌های مخصوص، دما در اعماق مختلف گمانه‌ها به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده است.

۵-۱. تعیین محل حفر گمانه‌های اکتشافی

با بررسی مطالعات زمین‌شناسی انجام‌شده در منطقه و همچنین، استفاده از تمامی اطلاعات موجود و تأثیرگذار بر موقعیت چاه‌های گرادیان از جمله موقعیت چشمه‌های آبگرم، توپوگرافی منطقه و وضعیت تکتونیکی منطقه، تعداد ۱۵ موقعیت مکانی برای حفر گمانه‌های اکتشافی پیشنهاد شده است که از بین آن‌ها ۷ نقطه برای حفاری گمانه‌ها انتخاب شد. موقعیت این نقاط روی نقشه زمین‌شناسی و نقشه آنومالی ثقل‌سنجی منطقه زمین‌گرمایی محلات مشخص است (شکل ۴). منطقه‌ای که بر اساس مطالعات ثقل‌سنجی برای مخزن زمین‌گرمایی محلات معرفی شده است، به عنوان محدوده هدف است که حدود ۴۵ کیلومتر مربع است. در این محدوده نیز با توجه به وضعیت گسل‌ها، واحدهای سنگی و توپوگرافی منطقه، موقعیت گمانه‌های حرارت‌سنجی تعیین شده است. یادآور می‌شود به منظور تأیید نهایی موقعیت دقیق این نقاط و کاهش هزینه‌های حفاری، طی مکاتباتی با اساتید متخصص دارای تجربه در این حوزه، مشورت و تبادل نظر صورت گرفته است. در نهایت، موقعیت این نقاط برای پیمانکار حفاری پروژه ارسال شد تا از بین آن‌ها، بر اساس شرایط موجود در منطقه، ۷ نقطه به منظور حفاری گمانه‌های حرارت‌سنجی انتخاب شود.



شکل ۴. نقاط پیشنهادی برای حفر چاه‌های گرادیان روی نقشه‌های زمین‌شناسی (سمت چپ) و ناهنجاری ثقلی (سمت راست)

۵-۲. عملیات حفاری

عملیات حفاری ۷ گمانه حرارت‌سنجی در منطقه زمین‌گرمایی محلات، طی ۴ ماه صورت گرفته و برداشت داده‌های حرارتی از گمانه‌ها، ۴۸ ساعت پس از اتمام حفاری هر گمانه و خارج کردن لوله‌های حفاری صورت گرفته است. این امر به منظور به تعادل رسیدن دمای چاه پس از حفاری بوده است. در این مطالعه سعی شد که هر یک از گمانه‌ها حدود ۱۰۰ متر عمق داشته باشند، همچنین قطر همه گمانه‌ها ۹۰ میلی‌متر است. عملیات حفاری و اندازه‌گیری دما در گمانه‌های حفرشده ۴ ماه به طول انجامیده است. ویژگی‌های هر یک از گمانه‌های حفاری‌شده در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. با توجه به اینکه مطالعات حرارت‌سنجی برای اولین بار در کشور توسط محققان داخلی انجام می‌گرفت، لذا مشکلات پیش‌بینی‌نشده‌ای هنگام انجام عملیات حفاری به وجود آمد. به عنوان نمونه، در برخی از گمانه‌ها علی‌رغم اینکه حفاری تا عمق ۱۰۰ متری انجام شده بود، به دلیل ریزش و یا

وجود حفره‌های زیرزمینی، گمانه به‌خوبی حفظ نشده و لذا امکان اندازه‌گیری حرارت تا کف گمانه فراهم نبوده است. شکل ۵ تصویری از دستگاه حفاری مورد استفاده برای حفر گمانه‌های حرارت‌سنجی در منطقه زمین‌گرایی محلات را نشان می‌دهد. مهم‌ترین ویژگی‌های مرتبط با ۷ گمانه حفر شده در منطقه زمین‌گرایی محلات در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۵. نمای از دستگاه حفاری مورد استفاده برای حفر گمانه‌های حرارت‌سنجی در منطقه محلات

جدول ۲. خصوصیات گمانه‌های ۱ تا ۴ حفاری شده در محدوده زمین‌گرایی محلات

BH # 4	BH # 3	BH # 2	BH # 1	نام گمانه
۳۳° ۵۸' ۰۶"	۳۴° ۰۰' ۱۴"	۳۴° ۰۱' ۴۳"	۳۴° ۰۰' ۳۰"	عرض موقعیت جغرافیایی
۵۰° ۳۲' ۰۸"	۵۰° ۳۳' ۲۲"	۵۰° ۳۵' ۱۱"	۵۰° ۳۳' ۰۱"	طول جغرافیایی
۵۰	۱۰۲	۹۰	۱۰۰	عمق گمانه (متر)
۱۳۹۶/۸/۱۵	۱۳۹۶/۸/۱	۱۳۹۶/۷/۱۶	۱۳۹۶/۷/۱	تاریخ شروع حفاری
۱۳۹۶/۹/۷	۱۳۹۶/۸/۱۵	۱۳۹۶/۸/۱	۱۳۹۶/۷/۱۵	تاریخ خاتمه حفاری
۱۷۵۸	۱۷۷۳	۱۵۸۳	۱۸۶۵	ارتفاع از سطح دریا (متر)
کنگومرا و ماسه سنگ	تراورتن	آبرفت	تراورتن	نام سازند
۸	۱۵	۲۰	۲	عمق سطح آب زیرزمینی (متر)

جدول ۳. خصوصیات گمانه‌های ۵ تا ۷ حفاری شده در محدوده زمین‌گرایی محلات

BH # 7	BH # 6	BH # 5	نام گمانه
۳۴° ۰۰' ۱۳"	۳۳° ۵۹' ۰۵"	۳۳° ۵۹' ۱۹"	عرض جغرافیایی موقعیت
۵۰° ۳۲' ۴۵"	۵۰° ۳۲' ۵۱"	۵۰° ۳۲' ۰۰"	طول جغرافیایی
۱۰۰	۵۰	۵۰	عمق گمانه (متر)
۱۳۹۶/۱۰/۹	۱۳۹۶/۹/۲۸	۱۳۹۶/۹/۹	تاریخ شروع حفاری
۱۳۹۶/۱۰/۳۰	۱۳۹۶/۱۰/۸	۱۳۹۶/۹/۲۷	تاریخ خاتمه حفاری
۱۸۶۸	۱۷۱۹	۱۸۴۵	ارتفاع از سطح دریا (متر)
تراورتن	کنگومرا و ماسه سنگ	کنگومرا و ماسه سنگ	نام سازند
۳۳	۳۴	۲	عمق سطح آب زیرزمینی (متر)

۵-۳. برداشت داده‌ها و محاسبه شیب زمین‌گرایی

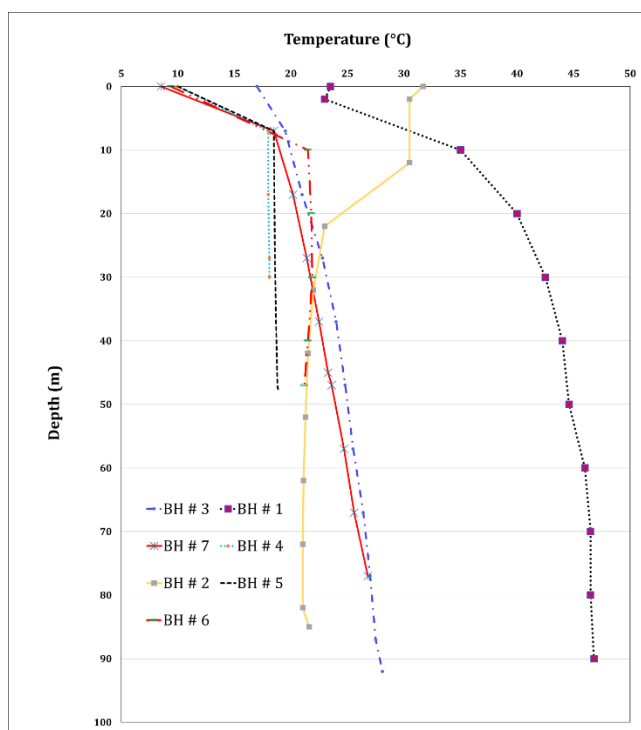
در این مطالعه از حرارت‌سنج مخصوصی برای اندازه‌گیری دما در گمانه‌های حفر شده استفاده شده است. این دستگاه دارای یک دماسنج، بدنه عایق حاوی دماسنج، بیش از صد متر کابل، قرقره نگهدارنده کابل، خروجی USB و یک باتری است. طراحی و ساخت این دماسنج‌ها توسط کارشناسان پژوهشگاه نیرو و شرکت مشاور صورت گرفته است. شکل ۶ تصویر یکی از این

حرارت‌سنج‌های ساخته‌شده را نشان می‌دهد. یک نرم‌افزار مخصوص نیز برای ثبت داده‌های اندازه‌گیری‌شده و انتقالی از عمق تهیه شد. درخور یادآوری است که کابل مورد استفاده دماسنج، مدرج است و می‌توان با هدایت کابل یادشده به میزان مد نظر در چاه، دمای عمق متناظر را روی صفحه نمایش رایانه قابل حمل مشاهده کرد.



شکل ۶. تصویری از برداشت دما توسط حرارت‌سنج‌های طراحی‌شده در صحرا

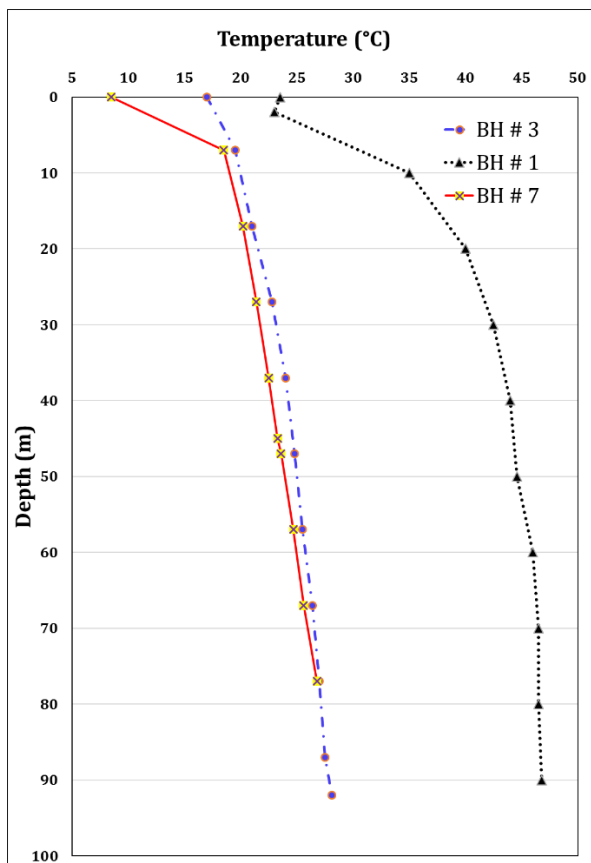
پس از برداشت داده‌های حرارتی در هر یک از گمانه‌ها، نمودار دما در مقابل عمق برای آن‌ها ترسیم شد که در شکل ۷ تغییرات دما در مقابل عمق برای هر یک از گمانه‌های حفرشده در منطقه مشخص است.



شکل ۷. پروفایل دمایی برای ۷ گمانه حرارت‌سنجی حفرشده در منطقه زمین‌گرمایی محلات

همان‌طور که شکل مشخص است، فقط در گمانه‌های ۱، ۳ و ۷ آنومالی حرارتی دیده شده است، یا به بیان دیگر فقط در این گمانه‌ها، با افزایش عمق، دما نیز افزایش یافته است. در سایر گمانه‌های حفرشده تغییرات محسوسی در دمای زیرسطحی دیده نمی‌شود. به بیانی در این گمانه‌ها گرادیان زمین‌گرمایی منطقه قابل بررسی نیست و بر این اساس امکان برآورد شیب حرارتی فقط در گمانه‌های ۱، ۳ و ۷ میسر است. در شکل ۸ نمودار دما در مقابل عمق برای این سه گمانه ارائه شده است. از آنجا که داده‌های برداشت‌شده در اعماق کمتر معمولاً با خطا همراه هستند، بهتر است شیب حرارتی زمین‌گرمایی بر اساس نتایج داده‌هایی

باشد که در اعماق بیشتر از ۳۰ متری سطح زمین برداشت شده‌اند. به منظور به دست آوردن شیب حرارتی زمین گرمایی در این گمانه‌ها از فرمول گرادیان استفاده شده است، سپس شیب زمین گرمایی در هر گمانه بر اساس درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر ارائه شده است.



شکل ۸. پروفایل دمایی گمانه‌های ۱، ۳ و ۷ که از آن‌ها برای تعیین شیب زمین گرمایی استفاده شده است

شیب حرارتی به روش معادله گرادیان (۱) محاسبه شده است و بر اساس نتایج ارائه شده شیب حرارتی منطقه در محل گمانه ۱ (معادله ۲) معادل ۷۱ درجه سانتی‌گراد به ازای هر کیلومتر است.

$$GT = \frac{T_{depth} - T_{Surface}}{depth} \quad (1)$$

$$GT = \frac{46.8 - 42.5}{90 - 30} \quad (2)$$

$$GT = 0.0716 \times 1000 = 71^\circ\text{C} / \text{km}$$

در مورد گمانه ۳ نیز آنومالی حرارتی مشاهده می‌شود و شیب زمین گرمایی منطقه برای این گمانه بر اساس معادله ۳ برابر ۷۴ درجه سانتی‌گراد به ازای هر کیلومتر است.

$$GT = \frac{28.1 - 24}{92 - 37} \quad (3)$$

$$GT = 0.0745 \times 1000 = 74^\circ\text{C} / \text{km}$$

همچنین بر اساس معادله ۴، شیب زمین گرمایی منطقه در گمانه ۷ معادل ۱۰۷/۵ درجه سانتی‌گراد به ازای هر کیلومتر است.

$$GT = \frac{26.8 - 22.5}{77 - 37} \quad (4)$$

$$GT = 0.1075 \times 1000 = 107.5^\circ\text{C} / \text{km}$$

در مناطق زمین‌گرمایی حرارت پایین، آنومالی‌های حرارتی که به وسیله مطالعات حرارت‌سنجی تشخیص داده می‌شوند، در ارتباط با حرکت سیال به بخش‌های سطحی زمین هستند، در نتیجه با انجام این مطالعات می‌توان به منطقه صعود سیال زمین‌گرمایی (Upflow Zone) پی برد. بر اساس این مطالعات مناطقی که دارای آنومالی‌های حرارتی باشند، شناسایی می‌شوند و شیب حرارتی آن‌ها محاسبه می‌شود. با داشتن شیب حرارتی هر یک از نقاط و تلفیق آن با مطالعات زمین‌شناسی می‌توان گسل‌هایی را که در انتقال سیال زمین‌گرمایی به بخش‌های بالایی نقش دارند را نیز شناسایی کرد. همچنین، با تلفیق نتایج مطالعات حرارت‌سنجی با مطالعات ژئوشیمیایی و زمین‌دماسنجی می‌توان برآورد مناسبی از عمق مخزن داشت. به عنوان مثال، براساس مطالعات زمین‌دماسنجی صورت‌گرفته در منطقه زمین‌گرمایی محلات، دمای مخزن حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است. چنانچه شیب حرارتی میانگین منطقه را ۸۴ درجه سانتی‌گراد به ازای هر کیلومتر در نظر بگیریم (میانگین سه گمانه ۱، ۳ و ۷)، عمق مخزن زمین‌گرمایی محلات برای دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۱۱۹۰ متر است. در این مطالعه برای گمانه‌های ۲، ۴، ۵ و ۶ با افزایش عمق، دما افزایش پیدا نمی‌کند و هیچ‌گونه نشانه‌ای از وجود یک آنومالی حرارتی زمین‌گرمایی دیده نمی‌شود. در گمانه ۲ دما حتی کاهش نیز پیدا کرده است (شکل ۷) که این امر ناشی از تأثیر جریان آب‌های سرد زیرزمینی است (این مسئله در مورد گمانه ۶ نیز تا حدودی مشهود است). در نتیجه، می‌توان گفت که در محدوده این گمانه‌ها نشانه‌ای از صعود سیال زمین‌گرمایی دیده نمی‌شود و این نقاط برای حفر چاه‌های زمین‌گرمایی مناسب نیستند.

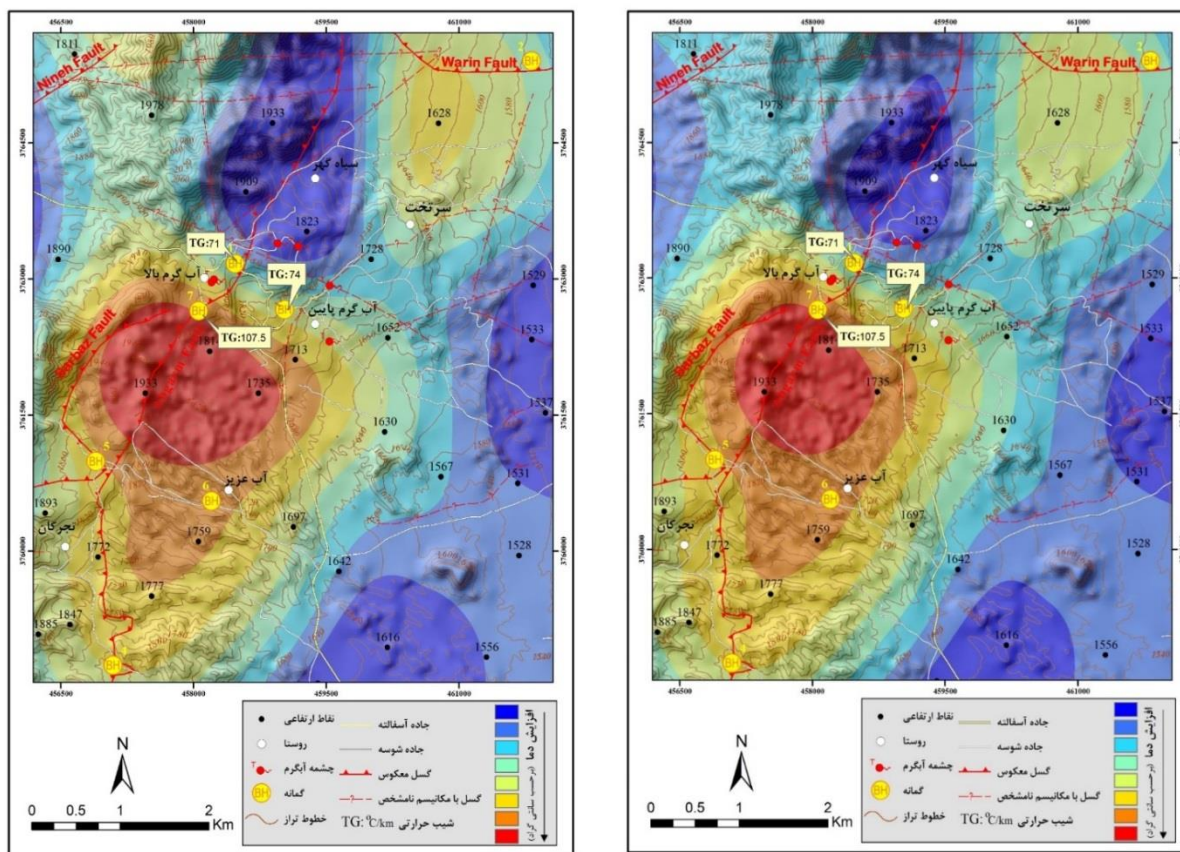
۵-۴. الگوی حرارتی منطقه زمین‌گرمایی محلات

به منظور بررسی الگوی حرارتی در یک منطقه زمین‌گرمایی حرارت پایین، نقشه حرارتی منطقه در اعماق مختلف گمانه‌های حفر شده ترسیم می‌شود. به این منظور، ابتدا شیب زمین‌گرمایی ناحیه‌ای^۱ در منطقه مورد مطالعه به عنوان یک نقشه پایه حرارتی برای تشخیص آنومالی‌های دمایی محاسبه شود [۱۹]. سپس الگوی حرارتی بر اساس داده‌های برداشت‌شده در اعماق مختلف گمانه‌ها به دست می‌آید و نتایج به صورت نقشه‌های حرارتی نمایش داده می‌شوند. در این مطالعه با استفاده از روش درون‌یابی در محیط نرم‌افزار GIS الگوی حرارتی زیرسطحی ترسیم شده و نقشه حرارتی برای اعماق ۳۰ متری و ۵۰ متری در منطقه زمین‌گرمایی محلات تهیه شده است که در شکل ۹ نقشه‌های یادشده نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در نقشه‌های حرارتی ملاحظه می‌شود، ارتباط محسوسی بین نشانه‌های سطحی زمین‌گرمایی، گسل‌های اصلی و بزرگ منطقه و همچنین، ناهنجاری‌های حرارتی زیرسطحی دیده می‌شود. بر اساس نتایج ارائه‌شده می‌توان بهترین نقاط را برای حفاری چاه‌های زمین‌گرمایی در منطقه زمین‌گرمایی محلات تعیین کرد که در نزدیکی گمانه ۷ است.

محاسبات پیش‌بینی دما با استفاده از گرادیان زمین‌گرمایی برای اعماق مختلف منطقه زمین‌گرمایی محلات در جدول ۴ ارائه شده است. این محاسبات بر اساس میانگین شیب حرارتی محاسبه‌شده از چاه‌های گرادیان و تعمیم آن به اعماق زمین به دست آمده است. بدیهی است دمای واقعی که بر اساس اندازه‌گیری مستقیم در چاه‌های عمیق به دست می‌آید، ممکن است اختلاف اندکی با این روش داشته باشد که ناشی از اختلاط آب‌های زیرزمینی با سیال زمین‌گرمایی خواهد بود. در منطقه زمین‌گرمایی حرارت بالای سبلان در شمال غربی ایران مطالعاتی در ارتباط با انتقال حرارت در مخزن زمین‌گرمایی صورت گرفته است [۲۵ و ۲۶]، اما در مخازن حرارت پایین کشور، مطالعات حرارت‌سنجی به این روش تا کنون صورت نگرفته است.

جدول ۴. پیش‌بینی دما در اعماق منطقه محلات بر اساس روش گرادیان

ردیف	عمق (متر)	دما (C°)
۱	۵۰۰	۴۲
۲	۱۰۰۰	۸۴
۳	۲۰۰۰	۱۶۸



شکل ۹. نقشه حرارتی در عمق ۳۰ متری (سمت راست) و ۵۰ متری (سمت چپ) گمانه‌های گرادیان

۶. نتیجه‌گیری

مطالعات حرارت‌سنجی در منطقه زمین‌گرایی محلات از طریق اندازه‌گیری دما در چاه‌های گرادیان حفر شده در این منطقه انجام شده است. پس از انتخاب نقاط مناسب برای حفاری چاه‌های گرادیان، عملیات حفاری طی چهار ماه انجام گرفته است. قطر تمامی گمانه‌ها ۹۰ میلی‌متر بوده و عمقی که برای حفاری آن‌ها در نظر گرفته شده، حدود ۱۰۰ متر بوده است، گرچه در برخی گمانه‌ها امکان حفاری تا این عمق میسر نشده است. مجموع طول گمانه‌های حفر شده در منطقه ۵۵۰ متر بوده و امکان اندازه‌گیری حرارت در ۴۵۰ متر از آن میسر بوده است. برای هر یک از گمانه‌ها، دما در اعماق مختلف برداشت شده و تغییرات شیب زمین‌گرایی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز داده‌های برداشت‌شده، از بین ۷ گمانه موجود، فقط در سه گمانه ۱، ۳ و ۷ امکان برآورد شیب زمین‌گرایی وجود داشته و بیشترین شیب حرارتی محاسبه‌شده مربوط به گمانه ۷ و به مقدار ۱۰۷/۵ درجه سانتی‌گراد به ازای هر کیلومتر است. به منظور بررسی نحوه پراکندگی حرارت در منطقه زمین‌گرایی محلات، نقشه حرارتی منطقه تهیه شده و محدوده آنومالی حرارتی منطقه مشخص شده است. این آنومالی حرارتی در نزدیکی گمانه ۷ قرار گرفته که دارای بیشترین شیب حرارتی نیز هست. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد گسل آبگرم که سبب رانده شدن واحدهای کربناته تریاس روی واحد کنگلومرایی ماسه سنگی ائوسن در منطقه شده است، نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری آنومالی حرارتی منطقه دارد. بر اساس تطبیق شیب حرارتی منطقه با نتایج مطالعات زمین‌دماسنجی مخزن زمین‌گرایی (Upflow zone) نیز با ترسیم نقشه حرارتی زیرسطحی در این منطقه مشخص شد، که شناسایی آن در انتخاب نقاط حفاری و کاهش هزینه‌های اکتشافی بسیار بااهمیت است. مخزن زمین‌گرایی محلات از نوع حرارت پایین است و برای کاربرد مستقیم، به‌ویژه گرمایش فضای گلخانه‌های پرورش گل فراوان در این منطقه مناسب است.

منابع

- [1] Yousefi H, Ehara S, Noorollahi Y. Geothermal potential site selection using GIS in Iran. In: Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering; 2007. SGP-TR-183.
- [2] Noorollahi Y, Jamaledini MR, Ghazban F. Geothermal Potential Areas in Iran. Tehran: Renewable Energy Organization of Iran (SUNA); 1998. 175 p.
- [3] Ebrahimi D, Nouraliee J, Dashti A. Inspecting geothermal prospects in an integrated approach within the West Azarbaijan Province of Iran. *Geothermics*. 2019;81:184-196. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.09.007>.
- [4] Ebrahimi D, Nouraliee J, Dashti A. Assessing the geothermal potential of the Shahin Dezh Region, based on the geological, geochemical and geophysical evidence. *J Afr Earth Sci*. 2019;156:55-65. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.02.005>.
- [5] Nouraliee J, Ebrahimi D, Dashti A, et al. Appraising Mahallat Geothermal Region using thermal surveying data accompanied by the geological, geochemical and gravity analyses. *Sci Rep*. 2021;11:12190. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90866-4>.
- [6] Saemundsson K. Geology and gradient wells. Presented at: Short Course II on Surface Exploration for Geothermal Resources; 2007; Lake Naivasha, Kenya.
- [7] Corrado G, Lorenzo SD, Mongelli F, Tramacere A, Zito G. Surface heat flow density at the Phlegrean Fields caldera (Southern Italy). *Geothermics*. 1998;27(4):497-510. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(98\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(98)00023-6).
- [8] Saemundsson K. Geology and gradient wells. Presented at: Short Course VIII on Exploration for Geothermal Resources; 2013; Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya.
- [9] Ebrahimi D. Structural mapping and subsurface geology compared with thermal gradient and the geothermal system in Mödruvellir, Hvalfjörður, SW Iceland. *Geothermal Training in Iceland, UNU-GTP*. 2015;(24):147-165.
- [10] Moghaddam MM, Mirzaei S, Nouraliee J, Porkhial S. Integrated magnetic and gravity surveys for geothermal exploration in Central Iran. *Arab J Geosci*. 2016;9:506.
- [11] Nouraliee J, Porkhial S, Mohammadzadeh-Moghaddam M, Mirzaei S, Ebrahimi D, Rahmani MR. Investigation of density contrasts and geologic structures of hot springs in the Markazi Province of Iran using the gravity method. *Russ Geol Geophys*. 2015;56(12):1791-1800.
- [12] Oskooi B, Darijani M. 2D inversion of the magnetotelluric data from Mahallat geothermal field in Iran using finite element approach. *Arab J Geosci*. 2014;7(7):2749-2759.
- [13] Forrest J, Marcucci E, Scott P. Geothermal gradients and subsurface temperature in the northern Gulf of Mexico. *GCAGS Trans*. 2007;55:233-248.
- [14] Henley RW, Ellis AJ. Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth Sci Rev*. 1983;19(1):1-50. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(83\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(83)90075-2).
- [15] Giggenbach WF. Chemical techniques in geothermal exploration. *Application of Geochemistry in Resources Development*. 1991:119-144.
- [16] Eley M, Nicholson K. Chemistry and adsorption-desorption properties of manganese oxides deposited in Forehill Water Treatment Plant, Grampian, Scotland. *Environ Geochem Health*. 1993;15(1):27-34. <https://doi.org/10.1007/BF02627826>.
- [17] Giggenbach WF. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim Cosmochim Acta*. 1988;52(12):2749-2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3).
- [18] Miller CA, Williams-Jones G. Internal structure and volcanic hazard potential of Mt Tongariro, New Zealand, from 3D gravity and magnetic models. *J Volcanol Geotherm Res*. 2016;324:163-178. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.03.012>.
- [19] Caratori Tontini F, et al. Interpretation of gravity and magnetic anomalies at Lake Rotomahana: Geological and hydrothermal implications. *J Volcanol Geotherm Res*. 2015;305:57-72. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.002>.
- [20] Allen PA, Allen JR. Basin Analysis. *Science (New York, N.Y.)*. 2013.
- [21] Jaupart C, Labrosse S, Mareschal JC. Temperatures, heat and energy in the mantle of the Earth. *Treatise on Geophysics*. 2007;7:253-303. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00114-0>.
- [22] Pollack HN, Hurter SJ, Johnson JR. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev Geophys*. 1993;31(3):267-280. <https://doi.org/10.1029/93RG01249>.

- [23] Sclater JG, Jaupart C, Galson D. The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth. *Rev Geophys.* 1980;18(1):269-311. <https://doi.org/10.1029/RG018i001p00269>.
- [24] Nouraliee J, Ebrahimi D. Exploration methods for recognizing blind geothermal resources. *Journal of Sustainable Energy Systems.* 2022;1(3):283-94. doi:10.22059/ses.2023.354016.1023.
- [25] Seyedrahimi-Niaraq M, Ardejani FD, Noorollahi Y, Nasrabadi SJ, Hekmatnejad A. An unsaturated three-dimensional model of fluid flow and heat transfer in NW Sabalan geothermal reservoir. *Geothermics.* 2021;77:1-19. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101966.
- [26] Seyedrahimi-Niaraq M, Bina SM, Itoi R. Numerical and thermodynamic modeling for estimating production capacity of NW Sabalan geothermal field, Iran. *Geothermics.* 2021;90:1-21. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101981.