

شناسایی مخزن سامانه زمین‌گرمایی منطقه تکاب با استفاده از روش گرانی‌سنجی

محمد محمدزاده مقدم^(۱)، جواد نورعلی^(۲)، سهیل پرخیال^(۳)، داور ابراهیمی^(۴)، سعید میرزایی^(۵)

۱. دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، ایران

۲. استادیار پژوهشی گروه انرژی‌های نو، پژوهشگاه نیرو، ایران

۳. استادیار، دانشگاه آزاد کرج، ایران

۴. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی گروه انرژی‌های نو، پژوهشگاه نیرو، ایران

۵. استاد، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۲۳

چکیده

وجود چشمه‌های آبگرم، رخنمون وسیع رسوبات تراورتنی، محدوده‌های دگرسان شده گرمایی و همچنین تکتونیک فعال در شمال شرق شهر تکاب در استان آذربایجان غربی نشان‌دهنده وجود یک سامانه زمین‌گرمایی مهم در این منطقه می‌باشد. به‌منظور شناسایی مخزن سامانه زمین‌گرمایی و همچنین بررسی ساختارهای زمین‌شناسی مرتبط با سامانه زمین‌گرمایی در منطقه تکاب، عملیات گرانی‌سنجی در ۱۴۰ ایستگاه در محدوده‌ای به مساحت حدود ۶۰۰ کیلومترمربع انجام شد. پس از اعمال تصحیحات مربوط به داده‌ها شامل تصحیح گرانی نرمال، بوگه، توپوگرافی و هوای آزاد، نقشه بی‌هنجاری بوگه کامل به‌دست آمد. سپس با استفاده از برازش یک سطح منحنی درجه ۳ بر میدان بی‌هنجاری بوگه کامل، میدان گرانی ناحیه‌ای محاسبه گردید و نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده به‌دست آمد. نقشه گرانی بی‌هنجاری باقی‌مانده نشان‌دهنده وجود دو زون منفی گرانی است (زون A1 و A2). زون‌های منفی به‌عنوان نواحی احتمالی وجود مخزن در یک ناحیه زمین‌گرمایی مورد توجه هستند. قرارگیری منطقه مورد مطالعه بر روی کمر بند آتشفشانی ارومیه- دختر و همچنین حضور گسل‌های از پیش شناخته شده و گسل‌های جدید شناسایی شده توسط نقشه‌های گرادیان افقی و قائم میدان گرانی حاکی از وجود ساز و کار گسلی پیچیده در این منطقه می‌باشد. همچنین با استفاده از روش اویلر، تخمین عمق بی‌هنجاری‌ها انجام شد. نتایج این تخمین عمق، نشان می‌دهد که بی‌هنجاری A1 که به‌عنوان مستعدترین ناحیه برای بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی شناخته می‌شود، حداقل عمق آن در حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر می‌باشد. در نهایت به‌منظور مدل‌سازی مخزن زمین‌گرمایی واقع در اعماق منطقه، وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌ها با استفاده از الگوریتم غیرخطی لی و اولدنبرگ انجام شد. نتایج این مدل‌سازی نشان می‌دهد که فقط زون A1 دارای تباین چگالی منفی قابل توجهی بوده و مخزن زمین‌گرمایی تکاب در این زون و در عمق بین ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری منطقه قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: گرانی‌سنجی، زمین‌گرمایی، تکاب، مشتقات گرانی، وارون‌سازی سه‌بعدی، مخزن.

مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی پتانسیلی شامل مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی جزء مقرون به صرفه‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی به‌منظور به‌دست آوردن یک مدل اولیه و مناسب از ویژگی‌های ساختاری در یک منطقه زمین‌گرمایی به‌شمار می‌روند. استفاده از روش گرانی‌سنجی به‌منظور اکتشاف منابع انرژی زمین‌گرمایی در نقاط مختلف دنیا نتایج سودمندی را ارائه نموده است؛ به‌عنوان مثال، بررسی توپوگرافی سنگ بستر در یک میدان زمین‌گرمایی (Salem et al., 2005; Soengkono, 2011)، نفوذی و ماگمایی مربوط به منشأ حرارت سامانه زمین‌گرمایی (Represas et al., 2013) و گسل‌ها و زون‌های خردشده مرتبط با مخزن زمین‌گرمایی (Montesinos et al., 2003; Salem et al., 2005; Schiavone and Loddo, 2007; Abiye and Haile, 2008; Gottsmann et al., 2008; Represas et al., 2013; Nouraliee et al., 2015).

از سال ۱۳۷۷ تاکنون، مطالعات سراسری پتانسیل‌سنجی منابع انرژی زمین‌گرمایی در ایران توسط سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) انجام شده که در نتیجه آن چندین منطقه زمین‌گرمایی در کشور شناسایی شده است. یکی از این مناطق امیدبخش، منطقه زمین‌گرمایی تکاب است که به‌علت وجود چشمه‌های آبگرم متعدد،

تکتونیک فعال به‌دلیل قرارگیری در زون آتشفشانی ارومیه-دختر، نواحی دگرسان شده و رخنمون وسیع تراورتن، به عنوان یکی از مناطق زمین‌گرمایی مهم ایران به‌شمار می‌رود (Nouraliee et al., 2014). شکل ۱ موقعیت منطقه زمین‌گرمایی تکاب را نشان می‌دهد.

مطالعه گرانی‌سنجی ارائه شده در این تحقیق، در راستای مطالعات پتانسیل‌سنجی منابع انرژی زمین‌گرمایی کشور در استان آذربایجان غربی صورت گرفته است. در واقع، مطالعات ژئوفیزیکی صورت‌گرفته، نخستین مطالعاتی است که با هدف اکتشاف منابع زمین‌گرمایی در این منطقه اجرا شده است. در این بررسی، تعداد ۱۴۰ ایستگاه گرانی‌سنجی در محدوده‌ای به وسعت حدود ۶۰۰ کیلومتر مربع در شمال شرق تکاب برداشت شد. پس از برداشت داده‌های گرانی به‌همراه مختصات آن‌ها، پردازش داده‌ها شامل تصحیحات رانه دستگاه، بوگه، هوای آزاد و توپوگرافی بر روی داده‌ها، اعمال و تفسیر داده‌ها با استفاده از نقشه‌های مختلف میدان گرانی و همچنین برگردان سه‌بعدی داده‌ها با استفاده از مدل رایانه‌ای نوشته شده توسط Li and Oldenburg, (1998a) انجام شد. در این پژوهش، اهمیت بسیار زیاد انجام روش گرانی‌سنجی در شناخت و تحلیل ارتباط بین سیستم‌های زمین‌گرمایی و الگوی شکستگی‌ها و زمین‌شناسی مرتبط با آن آشکار شده است.

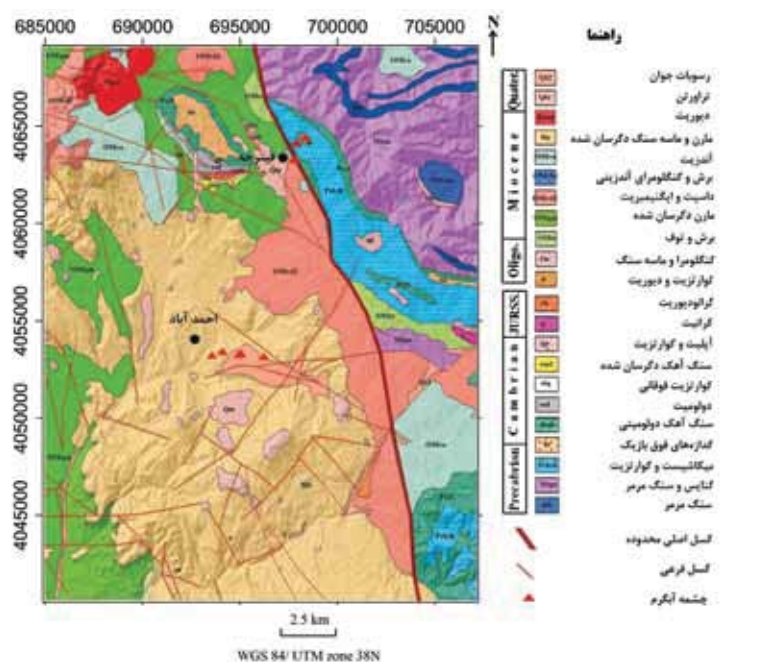


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد بررسی (مستطیل سبز رنگ) (اقتباس از نقشه راه‌های ایران).

زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

سنگ‌ها در چندین کیلومتری چشمه‌های آبگرم نشان‌دهنده قدمت بالای سامانه زمین‌گرمایی تکاب می‌باشد. از نظر ساختمانی، منطقه مورد بررسی در زون خوی-مه‌باد و محل برخورد زون‌های سنندج-سیرجان، البرز-آذربایجان و ایران مرکزی قرار می‌گیرد. قرار گرفتن سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین و پالئوزوئیک در زیر رسوبات و سنگ‌های آتشفشانی الیگومیوسن نشان‌دهنده وجود یک برجستگی قدیمی از زمان پرکامبرین و پالئوزوئیک زیرین تا الیگوسن و نبود رسوبگذاری یا وجود شرایط فرسایش شدید در فاصله زمانی مذکور در منطقه می‌باشد. این برجستگی به صورت یک فرازمین با راستای شمال-باختری-جنوب خاوری از جنوب تا شمال منطقه کشیده شده است و مرز باختری آن توسط گسل اصلی منطقه با حوضه فرورفته شیرمرد محدود شده است (شکل ۲). در واقع گسل اصلی منطقه، سنگ‌های دگرگونی در شرق را از حوضه شیرمرد در غرب جدا می‌کند. این گسل از نوع عمیق و پی‌سنگی با شیب حدود ۴۰ تا ۵۰ درجه به سمت شمال شرق با جابجاشدگی معکوس راستگرد می‌باشد که سبب بالآمدگی سنگ‌های دگرگونی در شرق و فرو افتادن سنگ‌های غربی و تشکیل حوضه شیرمرد گردیده است (نبوی، ۱۳۵۵).

منطقه اکتشافی مورد نظر، در شمال شرق شهر تکاب در استان آذربایجان غربی واقع شده است (شکل ۱). منطقه تکاب، بیشتر از سنگ‌های دگرگونی شیست، مرمر و گنایس تشکیل شده است که با روند شمال-باختری-جنوب خاوری در بخش‌های مختلفی از منطقه، به‌خصوص در امتداد گسل اصلی قرار گرفته‌اند. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود چشمه‌های آبگرم منطقه در دو محدوده مجزا یکی در حوالی شرقی روستای قینرجه و دیگری در جنوب شرق روستای احمدآباد به‌وجود آمده‌اند. مطالعات ژئوشیمیایی و ژئوترموتری چشمه‌های آبگرم که توسط Nouraliee et al. (2014) انجام شده، نشان می‌دهد که دمای مخزن حدود ۵۷ تا ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. وجود یون منیزیم محلول در آب چشمه‌ها نشان‌دهنده آمیختگی سیال زمین‌گرمایی با آب‌های سرد زیرزمینی است؛ بنابراین به‌نظر می‌رسد که دمای مخزن زمین‌گرمایی موجود در اعماق منطقه، حرارت بسیار بالاتری دارد. رخنمون وسیع رسوبات تراورتنی با ضخامت قابل توجه در اطراف چشمه‌ها و همچنین پراکندگی این

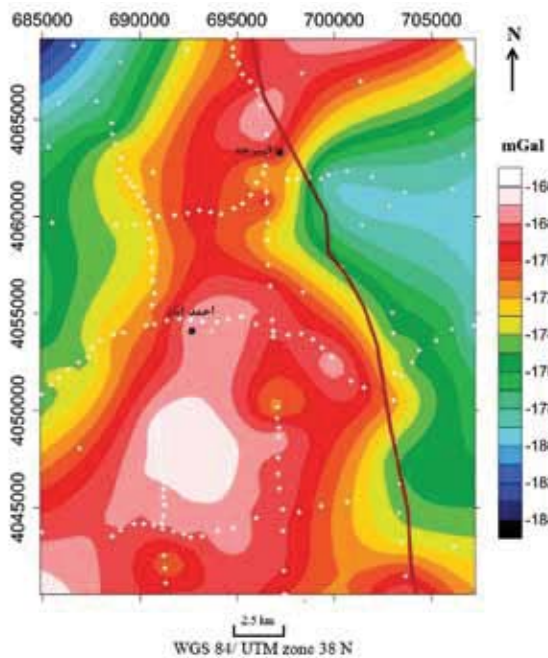


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه زمین‌گرمایی تکاب (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

گرانی‌سنجی

داده‌های گرانی‌سنجی

غرب محدوده دیده می‌شود که به علت دور شدن از شواهد زمین‌گرایی منطقه بخصوص چشمه‌های آبگرم، در این پژوهش از اهمیت کمی برخوردار است. این ناحیه از سنگ‌های داسیت، ایگنمبریت و مارن تشکیل شده است. ناحیه دارای بی‌هنجاری منفی دیگری در حاشیه شرقی نقشه شکل ۳ دیده می‌شود که در جنوب شرق چشمه‌های آبگرم روستای قینرجه و به‌طور آشکار در شرق گسل اصلی منطقه واقع شده است. این ناحیه با بی‌هنجاری گرانی منفی بر سنگ‌های دگرگونی منطقه منطبق است. به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد که سنگ‌های پرچگال در شمال و بخصوص در جنوب و مرکز منطقه مورد بررسی سبب ایجاد یک روند منفی گرانی به سمت حواشی غربی و شرقی منطقه شده‌اند.



شکل ۳. نقشه بی‌هنجاری بوگه کامل. موقعیت ایستگاه‌های برداشت داده با علامت مثبت سفید رنگ و گسل اصلی منطقه با خط قهوه‌ای پر رنگ بر روی نقشه نشان داده شده است.

جدایش بی‌هنجاری‌های گرانی ناحیه‌ای و محلی

بی‌هنجاری بوگه کامل، شامل بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی است. بی‌هنجاری ناحیه‌ای در نتیجه وجود ساختارهای بزرگ‌تر و عمیق‌تر و بی‌هنجاری محلی در نتیجه وجود ساختارهای کوچک‌تر و کم‌عمق‌تر است. در

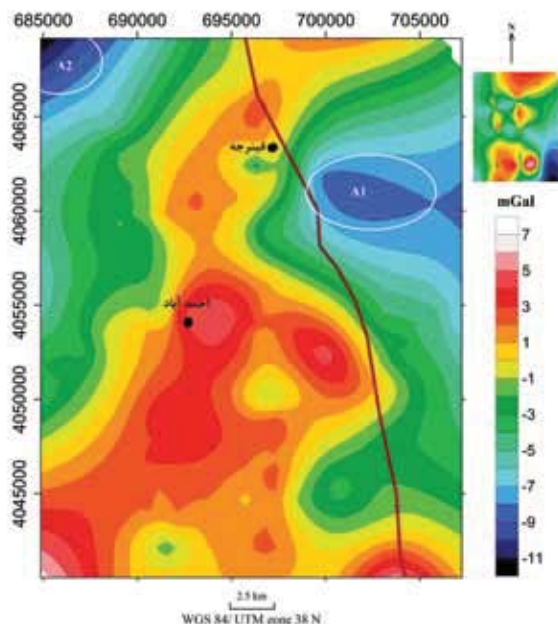
اندازه‌گیری‌های نسبی میدان گرانش زمین در محدوده اطراف چشمه‌های آبگرم روستاهای قینرجه و احمدآباد با فواصل ایستگاهی ۰/۵ تا ۲ کیلومتر و با توجه به وضعیت توپوگرافی منطقه و امکان دسترسی به نقاط ایستگاهی تعیین شده، انجام شد. در مجموع ۱۴۰ ایستگاه گرانی در محدوده‌ای به وسعت حدود ۶۰۰ کیلومترمربع برداشت شد. این عملیات در بهار سال ۱۳۹۲ توسط ستاد توسعه فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر در منطقه مورد بررسی انجام شد. اندازه‌گیری‌های نسبی میدان گرانش زمین در این منطقه با استفاده از دستگاه گرانی‌سنج CG5 ساخت شرکت سینترکس کانادا انجام گردید.

دقت این دستگاه در حد ۵ میکروگال است. به‌منظور تبدیل داده‌های گرانی نسبی به داده‌های گرانی مطلق از ایستگاه مبنای گرانی واقع در منطقه تکاب (سازمان نقشه‌برداری کشور) استفاده شد. اندازه‌گیری‌های ارتفاعی و مسطحاتی نقاط گرانی برداشت‌شده، توسط دستگاه GPS دو فرکانسه لایکا انجام و مقادیر ارتفاعی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه مقایسه و تأیید شد. با توجه به وسعت زیاد محدوده مورد مطالعه تصحیح گرانی نرمال به‌منظور حذف اثر تفاوت مقادیر گرانی نرمال زمین، انجام شد. تصحیح هوای آزاد با استفاده از فرمول انجمن بین‌المللی ژئودزی در سال ۱۹۶۷ و تصحیح بوگه با استفاده از مقدار چگالی میانگین پوسته ($2/67 \text{ g/cm}^3$) بر روی داده‌های گرانی برداشت‌شده انجام شد (Blakely, 1996). تصحیح توپوگرافی نیز به روش هامر^۱ با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه، محاسبه و انجام گردید.

شکل ۳ نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه کامل در منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. علامت‌های مثبت سفید رنگ بر روی این نقشه موقعیت ایستگاه‌های برداشت داده می‌باشند. همان‌طور که در این نقشه مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات شدت میدان گرانش در این محدوده حداقل به ۲۰ میلی‌گال می‌رسد که با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۲) مقدار بیشینه آن بر موقعیت سنگ‌های مارن و ماسه‌سنگی دگرسان‌شده در جنوب و مرکز محدوده منطبق است. مقدار کمینه میدان گرانش در گوشه شمال

1. Hammer

مارن واقع شده است. نبود دگرسانی‌های گرمایی، دوری از چشمه‌های آبگرم و نبود رخنمون رسوبات تراورتن در این زون، این ناحیه را از نظر وجود مخزن زمین‌گرمایی از اهمیت کمتری برخوردار می‌سازد.



شکل ۴. نقشه بی‌هنجاری گرانی محلی منطقه زمین‌گرمایی تکاب. نقشه میدان بی‌هنجاری ناحیه‌ای در گوشه بالا سمت راست شکل نشان داده شده است؛ با کسر کردن این میدان از میدان بوگه کامل، میدان بی‌هنجاری محلی به دست می‌آید. زون‌های A1 و A2، بی‌هنجاری‌های گرانی منفی می‌باشند که به عنوان مخازن احتمالی سامانه زمین‌گرمایی در منطقه تکاب مورد توجه هستند.

مشتقات جهتی میدان گرانی

استفاده از روش مشتقات گرانی در برآورد مرز ساختارهای زمین‌شناسی (گسل، دایک و مانند آن) از روی بی‌هنجاری‌های میدان گرانی بسیار سودمند است. در این روش، از تغییرات یک کمیت در سرتاسر یک نقشه و به خصوص در نواحی منشاء بی‌هنجاری استفاده می‌شود (Nabighian, 1972; Blakely and Simpson, 1986). در این زمینه مناسب‌ترین کمیت، محاسبه مشتقات داده‌های میدان گرانی شامل مشتق افقی و قائم است. با محاسبه مشتقات افقی داده‌ها، بیشینه و کمینه مقدار آن‌ها در بالای لبه‌های توده‌های مولد بی‌هنجاری قرار می‌گیرد و بدین صورت تباینی بین توده و دیگر قسمت‌های نقشه ایجاد می‌شود. مشتق افقی درجه اول میدان گرانی در یک جهت خاص،

این پژوهش، به منظور بارزتر کردن بی‌هنجاری‌های مرتبط با منشاء مورد نظر، جدایش بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای- محلی از بی‌هنجاری بوگه انجام شد. در صورتی که جدایش و یا حذف اثر میدان ناحیه‌ای از داده‌های گرانی مشاهده شده به درستی صورت گیرد، بی‌هنجاری مربوط به هدف مورد بررسی به طور مطلوب محاسبه خواهد شد. روش‌های متعددی برای انجام این جدایش وجود دارد (Li and Oldenburg, 1998b) که برخی عمدتاً براساس محاسبات عددی و برخی براساس شواهد تجربی و مقایسه نیم‌رخ داده‌ها قابل دست‌یابی هستند (Telford et al., 1990). در منطقه مورد بررسی، یک روند میدان گرانی ناحیه‌ای از سمت شرق و غرب به طرف محور شمالی- جنوبی منطقه وجود دارد. به منظور جدایش بی‌هنجاری محلی و منطقه‌ای از داده‌های گرانی منطقه تکاب، چندین روش گوناگون از جمله برازش چند جمله‌ای درجه یک و بالاتر و روش ادامه فراسو جهت محاسبه میدان ناحیه‌ای به کار گرفته شد؛ اما نتایج برخی از آن‌ها به گونه‌ای سبب تضعیف و یا تقویت برخی بی‌هنجاری‌ها می‌شد که براساس تجربه مفسر قابل قبول نبود. در نهایت از روش برازش یک سطح منحنی چند جمله‌ای درجه سوم به داده‌های گرانی مشاهده شده استفاده شد؛ به طوری که در این روش روند منطقه‌ای محاسبه شده سبب از بین رفتن و یا بهم‌ریختگی بی‌هنجاری‌های محلی نمی‌شد. سپس با کم کردن میدان گرانی ناحیه‌ای از میدان گرانی بوگه کامل، میدان بی‌هنجاری محلی محاسبه شد (شکل ۴).

دو ناحیه با بی‌هنجاری گرانی منفی (A1 و A2) در نقشه میدان گرانی باقیمانده در شکل ۴ مشخص شده است که زون A1 در امتداد گسل اصلی منطقه و در جنوب شرقی چشمه‌های آبگرم قینرجه و زون A2 در گوشه سمت راست شمال محدوده واقع شده است. بیشترین دگرسانی‌های ناشی از فعالیت‌های گرمایی در زون A1 قرار گرفته است، به همین دلیل به نظر می‌رسد زون‌های خردشده ناشی از فعالیت گسل اصلی و افزایش نفوذپذیری و متعاقب آن تشکیل مخزن زمین‌گرمایی منطقه، موجب پیدایش این بی‌هنجاری منفی گرانی شده است. زون A2 نیز در ناحیه‌ای با رخنمون سنگ‌های آذرین داسیت و ایگنمبریت و همچنین

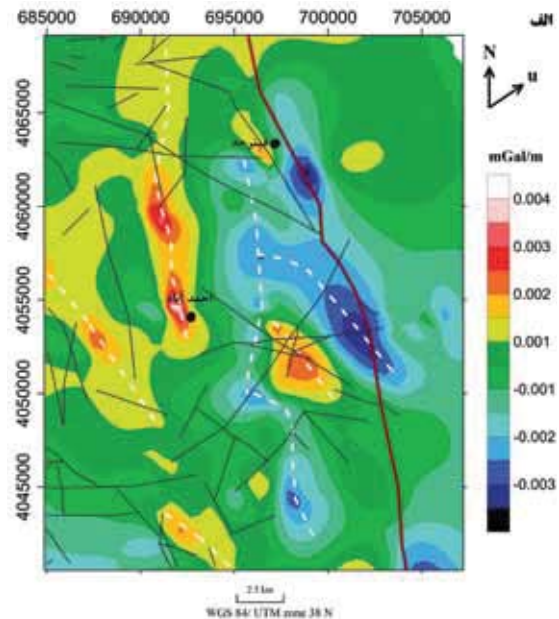
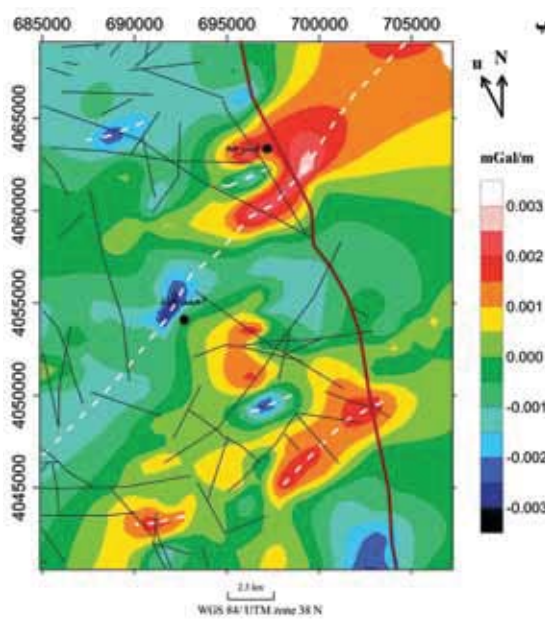
مقدار مشتق افقی در جهت N60E، بر روی گسل اصلی منطقه به کمینه خود می‌رسد و در واقع گسل اصلی منطقه با استفاده از نقشه مشتق افقی به‌خوبی قابل شناسایی است. در بخش غربی این گسل، چندین گسل مهم احتمالی با توجه به مقادیر کمینه یا بیشینه مشتق، شناسایی و موقعیت آن‌ها بر روی نقشه با خطوط سفیدرنگ بریده- بریده مشخص شده است. به‌نظر نمی‌رسد که این گسل‌ها با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی قابل شناسایی باشند اما تغییرات زیاد آن‌ها در نقشه مشتق افقی نشان‌دهنده حضور آن‌ها در اعماق بیشتر به علت پوشیده شدن آن‌ها توسط رسوبات جوان‌تر و یا وجود پوشش گیاهی می‌باشد.

در شکل ۵- ب نیز چند گسل پنهان در منطقه قابل شناسایی است به‌طوری‌که یکی از آن‌ها با طول بسیار زیاد از جنوب قینرجه و همچنین شمال احمدآباد عبور می‌کند. وجود این گسل پنهان در نقشه مشتق افقی در جهت N30W، می‌تواند توجیه‌کننده ارتباط بین چشمه‌های آبگرم قینرجه و احمدآباد باشد. به‌عبارتی دیگر حضور این گسل مهم نشان می‌دهد که احتمالاً مخزن زمین‌گرمایی هر دو گروه از چشمه‌های آبگرم قینرجه و احمدآباد یکسان است و این گسل نقش مهمی را در چرخش آب و سیالات هیدروترمال در منطقه ایفا می‌نماید.

سبب تقویت تغییرات جانبی در میدان گرانی و تضعیف روند منطقه‌ای در آن جهت می‌شود. در نواحی که تباین چگالی بیشتر است، مقدار مشتق به بیشینه یا کمینه خود می‌رسد؛ بنابراین بی‌هنجاری عمود بر جهت مشتق، بارزتر شده و لبه ساختارها آشکارتر می‌شود. با توجه به این‌که گسل اصلی منطقه زمین‌گرمایی تکاب دارای روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق است، دو نقشه مشتق جهتی افقی درجه اول محاسبه گردید؛ یکی در امتداد عمود بر روند گسل اصلی منطقه (شکل ۵- الف) به منظور مشخص کردن ساختارهای با روند تقریبی هم‌جهت با گسل اصلی و دیگری در امتداد گسل اصلی منطقه (شکل ۵- ب) به منظور مشخص کردن ساختارهای عمود بر این گسل.

نقشه‌های مشتق نشان داده شده در شکل ۵ به‌طور واضح اهمیت خطواره‌ها و گسل‌های اصلی در کنترل مخزن زمین‌گرمایی و تکامل چرخه سیالات هیدروترمال منطقه را نشان می‌دهد. در این شکل خطوط سیاه‌رنگ گسل‌های شناخته‌شده در نقشه زمین‌شناسی می‌باشد که بر روی این نقشه‌ها ترسیم شده و خطوط بریده- بریده سفیدرنگ خطواره‌های شناسایی شده با استفاده از نقشه‌های مشتق افقی میدان گرانی است.

همان‌طور‌که در نقشه شکل ۵- الف مشاهده می‌شود،



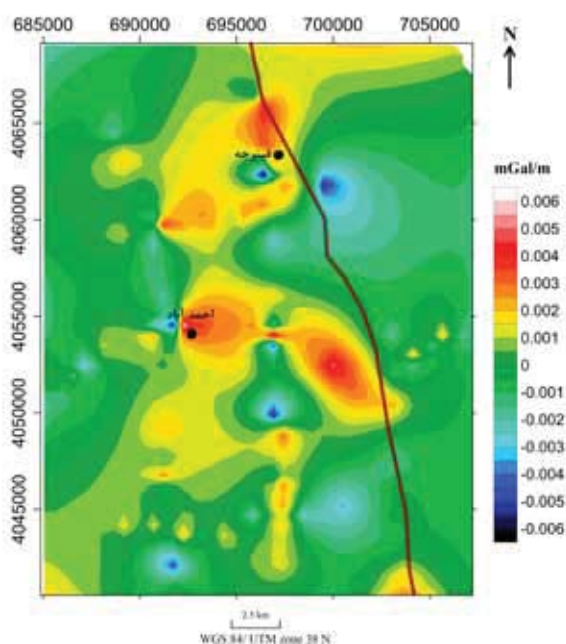
شکل ۵. الف) مشتقات جهتی افقی میدان گرانی بوگه در جهت N60E، ب) N30W. خطوط سیاه‌رنگ بر روی نقشه گسل‌های از پیش شناخته شده و خطوط بریده- بریده سفید رنگ گسل‌های شناسایی شده با استفاده از این نقشه‌ها را نشان می‌دهند.

تخمین عمق اوایلر

به منظور شناسایی دقیق تر موقعیت ساختارهای زمین شناسی منطقه زمین گرمایی تکاب، روش واهمامیخت اوایلر بر روی کل داده های گرانی منطقه اعمال گردید. روش اوایلر قادر است به صورت خودکار عمق و مکان افقی منشأ بی هنجاری ها را برآورد نماید. در این روش از میدان گرانی باقیمانده و گرادیان های افقی و قائم آن جهت برآورد مکان منشأ بی هنجاری استفاده می شود (Thompson, 1982). در شرایط مختلف زمین شناسی از نظر شکل و نوع منشأ بی هنجاری از معیاری به نام شاخص ساختاری^۲ استفاده می شود. این شاخص مهم معیاری از نحوه و شدت دورافت^۳ میدان با فاصله گرفتن از منشأ بی هنجاری است. در گرانی سنجی مقدار این شاخص ساختاری از صفر (سیل، دایک و یا ساختار پلکانی) تا ۲ (کره) تغییر می کند. در روش اوایلر، برآورد مقدار صحیح از شاخص ساختاری، گام بسیار مهم در به دست آوردن نتایج معتبر می باشد (Reid, 1995). برآورد مقدار صحیح شاخص ساختاری به سه صورت امکان پذیر است. براساس تجربه مفسر، آزمون و خطا و انتخاب یک شاخص ساختاری بهترین خوشه بندی را در جواب ها ارائه می دهد (Keating and Pilkington, 2004). منظور از بهترین خوشه بندی این است که پاسخ های نشان دهنده عمق یکسان، مجاور هم باشند و حل های عمقی متفاوت، تداخل زیادی با هم نداشته باشند.

در این پژوهش، به منظور اعمال روش اوایلر بر روی داده های منطقه مورد بررسی از نرم افزار ژئوسافت^۴ استفاده شد. پس از آماده سازی نقشه میدان باقیمانده، نقشه های مشتقات میدان گرانی در سه جهت (x, y, z) که تهیه آن لازمه اجرای فرایند واهمامیخت اوایلر است، تهیه شدند. از آنجاکه دید مناسبی از اعماق زمین منطقه مورد بررسی نداریم، برای رسیدن به شاخص ساختاری مناسب، اعداد مختلف مورد آزمون و خطا قرار گرفت. به طوری که چندین بار روش اوایلر اعمال شد و هر بار اعداد مختلفی از شاخص

استفاده از فیلتر مشتق قائم یکی دیگر از روش های برآورد مرز بی هنجاری های کم عمق و بارزتر کردن آن ها است. مشتق قائم عرض بی هنجاری ها را باریک تر و موقعیت آن ها را با دقت بیشتری مشخص می کند (Cooper and Cowan, 2004). در این روش بی هنجاری های با طول موج کوتاه تر مربوط به ساختارهای کم عمق تر، بارزتر و بی هنجاری های با طول موج بلندتر تضعیف می شوند (Nabighian, 1984). اگرچه تفسیر کیفی نقشه های مشتق قائم نسبت به نقشه های مشتق افقی مشکل تر به نظر می رسد اما استفاده از مشتق قائم در بارزتر کردن بی هنجاری های میدان های پتانسیلی بسیار سودمند است و به مفسر امکان شناسایی دقیق تر موقعیت افقی مراکز توده های بی هنجاری را می دهد (Saad, 2006). شکل ۶ نقشه مشتق قائم درجه اول از میدان گرانی بوگه منطقه مورد بررسی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، شدت تغییرات مشتق قائم میدان نسبت به نقش های مشتقات افقی کمتر است و نقشه نرم تر به نظر می رسد. با توجه به این شکل، شدت تغییرات در محل چشمه های آبگرم قینرجه و احمدآباد نسبت به قسمت های دیگر منطقه بیشتر است که این امر نشان دهنده تغییرات زیاد چگالی سنگ ها در اعماق کم به علت فعالیت چشمه های آبگرم در این دو ناحیه می باشد.



شکل ۶. نقشه مشتق قائم اول میدان گرانی بوگه.

1. Euler deconvolution
2. Structural index
3. Fall-off
4. Geosoft

وارون‌سازی داده‌های گرانی

مدل سه‌بعدی تباین چگالی مواد و سنگ‌ها در منطقه مورد بررسی با استفاده از الگوریتم (Li and Oldenburg, 1998a) در قالب نرم افزار UBC-GIF Grav3D انجام شد. استفاده از این الگوریتم جهت انجام مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی در مناطق مختلف دنیا نتایج بسیار ارزشمندی را ارائه می‌کند (به‌عنوان نمونه: Oldenburg and Pratt, 2007; Louro and Mantovani, 2013; Kalateh and Kahoo, 2015; Nouraliee et al., 2013). در رویکرد برگردان عرضه‌شده از سوی لی و اولدنبرگ که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، ابتدا در مورد متغیری که تفسیر براساس آن صورت خواهد گرفت، تصمیم‌گیری می‌شود که تابعی از چگالی مورد جستجو می‌باشد. سپس یک تابع هدف چند مؤلفه‌ای که دارای انعطاف‌پذیری کافی برای تولید انواع مدل باشد ساخته می‌شود. شکل این تابع هدف به‌گونه‌ای است که می‌تواند برای جنبه‌های ناخواسته ریاضی قابل قبول از قبیل تمرکز چگالی در نزدیکی سطح، ساختار بسیار بزرگ و یا وجود چگالی‌های متفاوت تصحیح شود. این تابع هدف، ناهمواری‌ها را در سه جهت فضایی جبران می‌کند و یک وزن‌دهی سه‌بعدی براساس توزیع چگالی با عمق دارد. تابع‌های کمکی وزن‌دهی سه‌بعدی در تابع هدف را می‌توان در ترکیب کردن اطلاعات بیشتر درباره مدل به‌کار برد. چنین اطلاعاتی ممکن است از کاوش‌های دیگر ژئوفیزیکی، داده‌های زمین‌شناسی و یا درک کمی و کیفی مفسر از ساختار زمین‌شناسی و ارتباط آن با چگالی سنگ‌ها باشد. راه‌حل عددی برای برگردان از راه تقسیم زمین به تعداد زیادی سلول، تحقق یافته است تا اجسام زمین‌شناسی پیچیده به‌طور نسبی ساخته شوند.

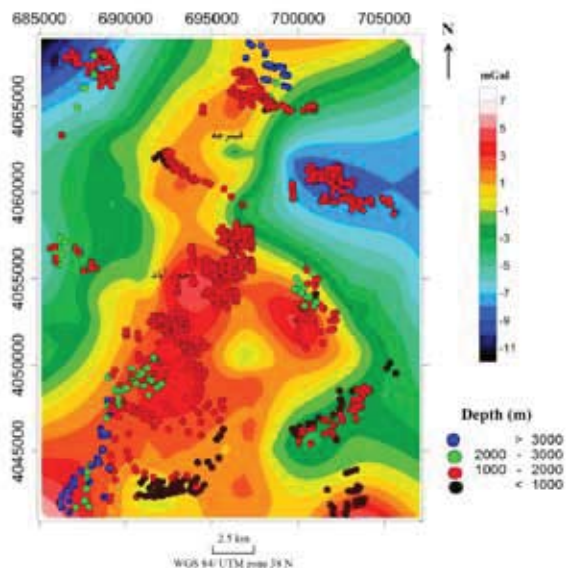
الگوریتم عرضه‌شده از سوی لی و اولدنبرگ از رابطه ۱ آغاز می‌شود:

$$d = G\rho \quad (1) \text{ رابطه (۱)}$$

در این رابطه d مربوط به داده‌های واقعی، G ماتریس حساسیت و ρ چگالی سنگ‌ها در یک بلوک متعادل و شبکه‌بندی شده به‌منظور انجام مدل‌سازی است. مسئله برگردان به منزله یک مسئله بهینه‌سازی، فرمول‌بندی

ساختاری انتخاب می‌شود؛ از عدد ۰/۵ کار آغاز و با گام ۰/۱ تا عدد ۲ ادامه داده شد. با توجه به مطالب مذکور بهترین شاخص ساختاری که برای بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه برآورد شد، دامنه عددی بین ۱/۴ تا ۱/۶ است که به‌طور میانگین شاخص ساختاری ۱/۵ را در نظر گرفته شده است. شکل ۷ نتایج حل اویلر با استفاده از نقشه گرانی محلی و با انتخاب شاخص ساختاری ۱/۵ را نمایش می‌دهد. برآوردهای عمقی در نقاط مختلف شبکه با دوایر رنگی توپر مشخص شده‌اند. با توجه به این شکل به‌نظر می‌رسد عمق بیشتر بی‌هنجاری‌های گرانی در منطقه در حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر قرار دارد (دوایر قرمز رنگ)، اما بی‌هنجاری با عمق‌های کمتر (دوایر سیاه‌رنگ) و با عمق‌های بیشتر (دوایر سبز و آبی‌رنگ) در نواحی مختلف منطقه دیده می‌شوند. با توجه به نمایش حل‌های اویلر در شکل ۷، روش اویلر بر روی بی‌هنجاری گرانی منفی (زون A1 و A2)، اعماق به‌نسبت مشابهی را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که عمق سقف این بی‌هنجاری‌ها در این دو زون تقریباً یکسان و در حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر برآورد می‌شود.

نتایج به‌دست آمده از اعمال روش اویلر می‌تواند به‌عنوان پارامترهای اولیه و اساسی در روش وارون‌سازی داده‌های منطقه مورد بررسی به‌کار رود.



شکل ۷. نمایش حل‌های اویلر در منطقه مورد بررسی. دوایر رنگی نشان‌دهنده عمق برآورد شده برای منشأ بی‌هنجاری گرانی و مرکز این دوایر موقعیت افقی منشأ را نشان می‌دهد.

شده توسط (Telford et al., 1990) و همچنین با توجه به مطالعات صورت گرفته در نواحی مشابه (به عنوان نمونه، Nouraliee et al., 2015; Represas et al., 2013)، تباین چگالی کمتر از ۱۵۰- کیلوگرم بر مترمکعب را به عنوان نواحی مستعد مخزن زمین گرمایی در نظر گرفته و بنابراین به منظور نمایش مناسب تر این نواحی، سنگ های با تباین چگالی کمتر از ۱۵۰- کیلوگرم بر مترمکعب در شکل ۸ نمایش داده شد. در این شکل، نتایج مدل سازی سه بعدی با استفاده از الگوریتم لی و اولدنبرگ از سه نمای جنوب شرق (الف)، جنوب (ب) و شرق (ج) نمایش داده شده است. در این وارون سازی حداکثر عمق مدل سازی ۸۰۰۰ متر می باشد. همان طور که مشاهده می شود، در این حالت فقط زون A1 از اعماق حدود ۱۸۰۰ تا ۵۰۰۰ متر از وضعیت مناسب تری نسبت به نواحی دیگر برخوردار است. البته همان طور که مشاهده می شود، ضخامت این زون از عمق حدود ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر افزایش می یابد و احتمالاً کیفیت سنگ مخزن نیز در این گستره عمقی بیشتر می شود. مختصات افقی این زون عبارتست از $X_1=699200$ تا $X_2=702000$ و $Y_1=4059000$ تا $Y_2=4062200$ (UTM Zone 38N). با توجه به این نتایج به نظر می رسد، گسل اصلی منطقه سبب ایجاد تباین چگالی منفی در بخش هایی از سنگ های منطقه شده است و همان طور که براساس نقشه های مختلف میدان گرانی انتظار می رود، زون A1 که در مجاورت این گسل قرار دارد، در نتایج وارون سازی سه بعدی (شکل ۸) نیز نشان دهنده محدوده با تباین چگالی منفی قابل توجهی است. در واقع فعالیت گسل اصلی منطقه و شاخه های فرعی آن سبب ایجاد شکستگی ها و درزه های زیادی در سنگ های این ناحیه شده و فضای مناسبی را برای چرخش سیالات به وجود آورده و در نتیجه سبب ایجاد یک مخزن زمین گرمایی شده است. شواهد زمین گرمایی در این ناحیه (زون A1) شامل وجود چشمه های آبگرم و دگرسانی های شدید ناشی از سیالات گرمایی این نتایج را تایید می کنند (Nouraliee et al., 2014).

می شود که یک تابع هدف از مدل، با توجه به محدودیت های معادله کمینه می شود تا داده ها، با یک خطای قابل قبول باز تولید شود. فرض کنید تابع هدف به صورت رابطه (۲) باشد:

$$\begin{aligned} \Phi_m = & \alpha_s \int_v w_s w_z(z) (\rho - \rho_0)^2 dv \\ & + \alpha_x \int_v w_x \{ [\partial w(z) / \partial x] (\rho - \rho_0) \}^2 dv \\ & + \alpha_y \int_v w_y \{ [\partial w(z) / \partial y] (\rho - \rho_0) \}^2 dv \\ & + \alpha_z \int_v w_z \{ [\partial w(z) / \partial z] (\rho - \rho_0) \}^2 dv \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن ρ مربوط به داده های واقعی، ρ_0 مربوط به داده های مدل و W_x ، W_y ، W_z و W_s توابع وزنی هستند. W_z تابع وزن دهی عمقی است. مقدار عدم برازش بین داده های مشاهده شده و داده های محاسبه شده با استفاده از رابطه (۳) به دست می آید:

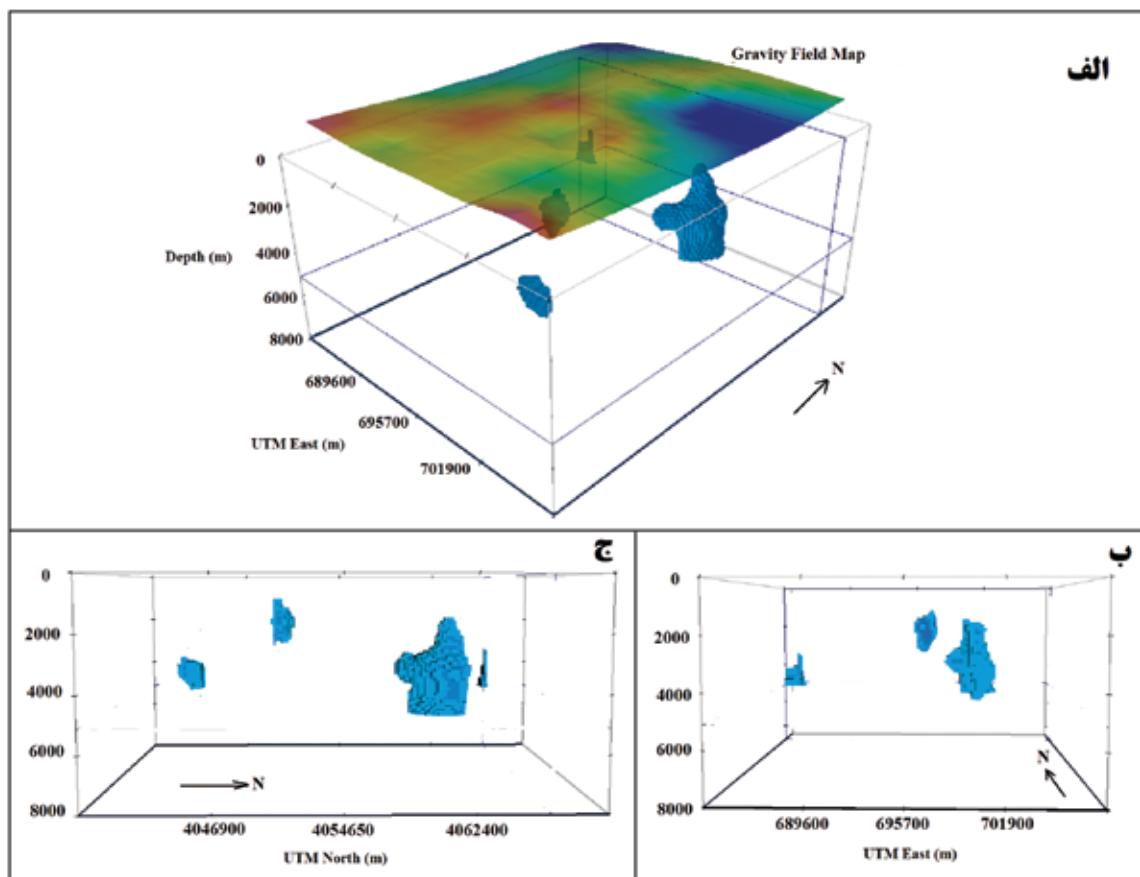
$$\Phi_d = \|W_d (d_{mod} - d_{oba})\|^2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن W_d به عنوان یک ماتریس قطری است که عنصر i ام آن، انحراف استاندارد i امین داده، d_{mod} چگالی محاسبه شده و d_{obs} چگالی برداشت شده است. هدف از این معادله وارون (رابطه ۳)، کمینه کردن اختلاف بین تابع هدف و خطای برازش داده ها است (رابطه ۴):

$$\Phi = \Phi_d + \mu \Phi_m \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن μ پارامتر تنظیم کننده است. جزئیات و توصیف های بیشتر در مقاله (Li and Oldenburg, 1998a) موجود است.

همان طور که بیان شد، زون های با بی هنجاری گرانی منفی به عنوان نواحی احتمالی مخزن سامانه زمین گرمایی مورد توجه هستند. در منطقه زمین گرمایی تکاب، با توجه به نقشه بی هنجاری گرانی باقیمانده در شکل ۴ دو زون منفی (A1 و A2) شناسایی شد. افزایش درز و شکاف، گسل خوردگی و حضور سیالات هیدروترمال در یک مخزن زمین گرمایی از عوامل اصلی ایجاد این تباین چگالی منفی می باشد. میزان این تباین چگالی به جنس سنگ های مخزن و سنگ های اطراف و همچنین کیفیت مخزن بستگی دارد. با توجه به جدول چگالی سنگ ها و کانی ها ارائه



شکل ۸. مدل سه بعدی سنگ‌های با تباین چگالی کمتر از ۱۵۰- کیلوگرم بر مترمکعب در منطقه زمین گرمایی تکاب با استفاده از الگوریتم لی و اولدنبرگ. الف) دید از جنوب شرق، ب) دید از جنوب، ج) دید از شرق.

نتیجه‌گیری

A1 دارای شرایط مناسب از نظر وجود مخزن زمین گرمایی در منطقه تکاب می‌باشد. با توجه به روند و شیب گسل اصلی منطقه، شکستگی‌ها و خردشدگی ناشی از فعالیت این گسل در این زون شرایط تشکیل مخزن زمین گرمایی به وجود آمده است. بنابراین مناسب‌ترین محدوده جهت بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی در این منطقه، در مختصات افقی از $X1=699200$ تا $X2=702000$ و $Y1=4059000$ تا $Y2=4062200$ و در عمق بین ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر از سطح زمین واقع شده است. نقشه‌های مشتقات میدان گرانی منطقه نیز نشان‌دهنده سازوکار گسلی پیچیده در منطقه به‌خصوص در بخش غربی گسل اصلی منطقه تکاب است. این گسل‌ها نقش مهمی در نفوذ آب‌های جوی به درون زمین، حرکت سیال زمین گرمایی در مخزن و همچنین حرکت سیال مذکور به سمت سطح زمین و در نتیجه

منطقه زمین گرمایی تکاب یکی از مناطق زمین گرمایی ایران است که در حال حاضر انجام مطالعات زمین شناسی و ژئوفیزیکی تکمیلی در آن در اولویت‌های سازمان انرژی‌های نو ایران قرار دارد. در این پژوهش نتایج حاصل از پردازش و تفسیر داده‌های گرانی برداشت شده در این منطقه زمین گرمایی ارائه شده است. هدف از این پژوهش، شناسایی ویژگی‌های ساختاری سامانه زمین گرمایی واقع در اعماق منطقه تکاب به منظور تعیین موقعیت حفر چاه‌های اکتشافی می‌باشد. با بررسی نقشه بی‌هنجاری‌های گرانی در منطقه یاد شده، مشخص گردید که دو زون دارای ناهنجاری گرانی منفی (A1 و A2) وجود دارد. نتایج تحلیل و تفسیر داده‌های گرانی با استفاده از روش اویلر و وارون‌سازی داده‌ها با استفاده از الگوریتم لی و اولدنبرگ، نشان می‌دهد که زون

gravity data: implications for its evolution and recent reactivation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168, 212–230.

- Kalateh A.N, and Kahoo, A.R., 2013. Estimation of 3D density distribution of chromite deposits using gravity data. *Journal of Mining and Environment*, 4, 97–104.

- Keating, P. and Pilkington, M., 2004. Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophysical Prospecting*, 52, 165–182.

- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1998a. 3D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63, 109–119.

- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1998b. Separation of regional and residual magnetic field data. *Geophysics*, 63, 431–439.

- Louro, V.H. and Mantovani, M.S., 2012. 3D inversion and modeling of magnetic and gravimetric data characterizing the geophysical anomaly source in Pratinha I in the southeast of Brazil. *Applied Geophysics*, 80, 110–120.

- Montesinos, F.G., Camacho, A.G., Nunes, J.C., Oliveira, C.S. and Vieira, R., 2003. A 3-D gravity model for a volcanic crater in Terceira Island (Azores), *Geophysical Journal International*, 154, 393–406.

- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, 37, 507–517.

- Nabighian, M.N., 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations, *Geophysics*, 49, 780–786.

- Nouraliee, J., Porkhial, S., Ebrahimi, D. and Rahmani, M., 2014. Chemical studies on warm springs of West Azarbaijan province in the north west of Iran, *Journal of Scientific Research*

پیدایش چشمه‌های آبگرم ایفا می‌کنند. حضور چشمه‌های آبگرم در شرق روستای قینرجه با مختصات افقی مخزن زمین‌گرمایی شناسایی شده انطباق زیادی دارد. این در حالی است که وجود چشمه‌های آبگرم در بخش شرقی روستای احمدآباد احتمالاً با گسل مهم شناسایی شده در نقشه مشتق میدان گرانی در جهت N30W قابل توجیه است. به عبارتی دیگر نتایج گرانی سنجی نشان می‌دهد که مخزن سامانه زمین‌گرمایی هر دو گروه از چشمه‌های آبگرم قینرجه و احمدآباد یکسان است و در مختصات مذکور (زون A1) قرار دارد.

سپاسگزاری

از ستاد توسعه فناوری‌های تجدیدپذیر وابسته به معاونت علمی- فناوری ریاست جمهوری و گروه انرژی‌های نو پژوهشگاه نیرو برای در اختیار قرار گذاشتن داده‌های گرانی سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۰۹.

- Abiye, T.A. and Haile T., 2008. Geophysical exploration of the Boku geothermal area, Central Ethiopian Rift. *Geothermics*, 37, 586–596.

- Blakely, R.J., 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. 464.

- Blakely, R.J. and Simpson, R.W., 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies, *Geophysics*, 51, 1494–1498.

- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2004. Filtering using variable order vertical derivatives. *Computer and Geosciences*, 30, 455–459.

- Gottsmann, J., Camacho, A., Martí, J., Wooller, L., Fernández, J., García, A. and Rymer, H., 2008. Shallow structure beneath the central volcanic complex of Tenerife from new

and Studies, 1, 65-72.

- Nouraliee, J., Porkhial, S., Mohammadzadeh-Moghaddam, M., Mirzaei, S., Ebrahimi, D. and Rahmani, M., 2015. Investigation on density contrasts and geological structures around hot springs in Mahallat geothermal region using gravity method, Russian Geology and Geophysics, 56, 1791-1800.

- Oldenburg, D.W. and Pratt, D.A. 2007. Geophysical inversion for mineral exploration - A decade of progress in theory and practice, in B. Milkereit, ed., Proceedings of Exploration 07, Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 61-95.

- Reid, A.B., 1995. Euler deconvolution: past, present and future - a review. 65th SEG Meeting, Houston, USA, Expanded Abstracts, 272-273.

- Represas, P., Santos, F.A. and Ribeiro, J., 2013. Interpretation of gravity data to delineate structural features connected to low-temperature geothermal resources at Northeastern Portugal, Applied Geophysics, 92, 30-38.

- Saad, A.H., 2006. Understanding grav-

ity gradients-a tutorial. The Leading Edge, 25, 942-949.

- Salem, A., Furuya, S., Aboud, E., Elawadi, E., Jotaki, H. and Ushijima, K., 2005. Subsurface structural mapping using gravity data of Hohi geothermal area, Central Kyushu, Japan. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.

- Schiavone, D. and Loddo, M., 2007. 3-D density model of Mt. Etna Volcano (Southern Italy), Journal of Volcanology and Geothermal Research, 164, 161-175.

- Soengkono, S., 2011. Deep interpretation of gravity and airborne magnetic data over the central Taupo volcanic zone. New Zealand Geothermal Workshop.

- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A., 1990. Applied Geophysics, 2nd edition. Cambridge University Press. 501.

- Thompson, D.T., 1982. EULDPTH - a technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. Geophysics, 47, 31-37.