



## وارون سازی و تفسیر داده های گرانی منطقه زمین گرمایی محلات

سهیل پرفیال<sup>۱</sup>، محمد محمدزاده مقدم<sup>۲</sup>، جواد نورعلینی<sup>۳</sup>، داور ابراهیمی<sup>۳</sup>، سعید میرزائی<sup>۲</sup>

### نسیم میدریان دهکردی<sup>۲</sup>

(۱) دانشگاه آزاد اسلامی - واحد کرج، کرج، ایران

(۲) پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی دانشگاه شهید بهشتی

(۳) گروه انرژی های نو، پژوهشگاه نیرو، وزارت نیرو، تهران، ایران

دریافت: ۹۳/۷/۹؛ دریافت اصلاح شده: ۹۳/۱۱/۲۸؛ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۲؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۴/۹/۱۵

### چکیده

به منظور بررسی ساختارهای زمین شناسی و شناسایی منطقه زمین گرمایی محلات، عملیات گرانی سنجی در ۳۸۰ ایستگاه در محدوده ای به وسعت حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع اطراف چشمه های آبگرم محلات در پاییز و زمستان ۱۳۹۱ انجام شد. پس از انجام تصحیحات مربوط به داده های گرانی شامل بوگه، توپوگرافی و هوای آزاد، نقشه بی هنجاری بوگه کامل به دست آمد. نقشه بی هنجاری باقی مانده نیز با استفاده از برازش یک سطح منحنی درجه دوم محاسبه گردید. بررسی این دو نقشه وجود ۴ زون بی هنجاری منفی (A1 تا A4) را آشکار نمود. زون های منفی به عنوان نواحی احتمالی وجود مخزن در یک سامانه زمین گرمایی مورد توجه هستند. همچنین نقشه گرادیان های افقی و قائم میدان گرانی حاکی از وجود ساز و کار گسلی پیچیده در منطقه است. در نهایت وارون سازی سه بعدی داده ها با استفاده از الگوریتم غیر خطی لی-اولدنبگ انجام شد. نتایج این مدل سازی نشان می دهد که فقط زون A1 دارای تباین چگالی منفی قابل توجهی بوده و به نظر می رسد مخزن زمین گرمایی محلات در این زون و در عمق بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متری قرار دارد.

**واژه های کلیدی:** گرانی سنجی، بی هنجاری بوگه، مشتقات گرانی، وارون سازی سه بعدی، سامانه زمین گرمایی، محلات

### ۱- مقدمه

بسیار مناسبی برای شناسایی و اکتشاف منابع زمین گرمایی در مناطق مستعد است، استفاده از این روش در نقاط مختلف دنیا نتایج سودمندی را عرضه کرده است؛ به عنوان مثال: بررسی توپوگرافی سنگ بستر (سالم و همکاران ۲۰۰۵؛ سوانگونو ۲۰۱۱)، توده های نفوذی و ماگمایی مربوط به منشأ گرمای سامانه زمین گرمایی (ریپرسز و

به منظور شناسایی و اکتشاف منابع انرژی زمین گرمایی، شناسایی ساختارهای زمین شناسی با چگالی های متفاوت که با عملیات گرانی سنجی قابل شناسایی است، از اهمیت زیادی برخوردار است. در واقع اساس روش گرانی سنجی تب این چگالی است. گرانی سنجی روش

همکاران (۲۰۱۳) و گسل ها و زون های خرد شده مرتبط با مخزن سامانه زمین گرمایی (مونت سینز و همکاران ۲۰۰۳؛ سالم و همکاران ۲۰۰۵؛ اسپچیان و لودو ۲۰۰۷؛ آی بی و هایل ۲۰۰۸؛ گوتسمن و همکاران ۲۰۰۸؛ رپرسز و همکاران ۲۰۱۳). عملیات گرانی سنجی و مغناطیس سنجی از لحاظ اقتصادی جز مقرون به صرفه ترین روش های ژئوفیزیکی برای به دست آوردن مدل اولیه و مناسب از ویژگی های ساختاری یک سیستم زمین گرمایی هستند.

مطالعات سراسری پتانسیل سنجی منابع انرژی زمین گرمایی انجام شده توسط سازمان انرژی های نو ایران (سانا) از سال ۱۳۷۷ تاکنون، ۱۴ منطقه زمین گرمایی مهم را در ایران معرفی می کند. تصویر ۱ نحوه پراکندگی این مناطق را نشان می دهد. منطقه زمین گرمایی محلات به علت وجود چشمه های آبگرم متعدد، تکتونیک فعال، نواحی دگرسان شده و رخنمون وسیع تراورتن به عنوان یکی از مهم ترین مناطق زمین گرمایی در ایران به شمار می رود. در سال های اخیر فعالیت های اکتشافی زیادی توسط سانا و دیگر گروه های تحقیقاتی در این منطقه صورت گرفته است. پرخيال و همکاران (۲۰۱۳)، زمین شناسی و ژئوشیمی منطقه را به طور کامل بررسی و نشان دادند که فعالیت های هیدروترمال در منطقه محلات عمدتاً توسط

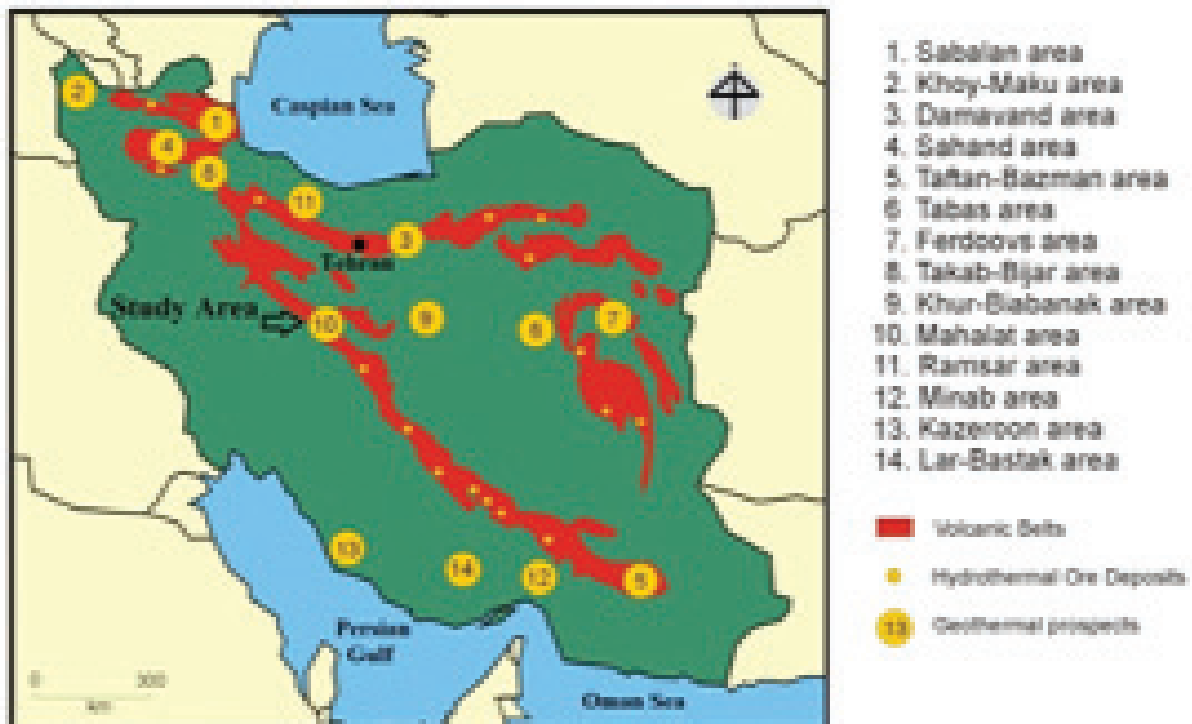
گسل های فعال شمالی - جنوبی کنترل می شود. میرزایی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مطالعات مغناطیس سنجی زمینی، یک توده آذرین نفوذی و داغ را در عمق بیشتر از یک کیلومتری منطقه، واقع در شرق چشمه های آبگرم محلات شناسایی نمودند که این توده می تواند نقش منشأ حرارت منبع زمین گرمایی محلات را ایفا نماید. همچنین آن ها نشان دادند که گسل های عمیق و فعال منطقه سبب گردش آب های جوی از سطح به عمق شده و پس از عبور آب از میان سنگ های داغ دوباره به سمت بالا حرکت نموده و به صورت چشمه های آبگرم در سطح زمین نمایان می شود. اسکویی و همکاران (۲۰۱۳) و اسکویی و دریجانی (۲۰۱۳) با استفاده از یک نیم رخ ۷ کیلومتری شرقی - غربی شامل ۱۲ ایستگاه مگنتوتلوری کنشان دادند که ساختار سامانه زمین گرمایی محلات شامل سنگ پوش (از عمق ۱۰۰ تا ۶۰۰ متر)، مخزن (از عمق ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر) و منبع (از عمق ۱۰۰۰ متر تا بیشترین عمق قابل بررسی) می باشد؛ اما از آنجایی که بررسی و تفسیر آنها دو بعدی بود، نتایج بدست آمده قادر به توصیف مناسبی در مورد نحوه گسترش جانبی سامانه زمین گرمایی محلات نبودند.

مطالعه گرانی سنجی ارائه شده در این تحقیق اکثر محدوده های اکتشافی گذشته با هدف اکتشاف منابع زمین گرمایی در این منطقه را

همکاران (۲۰۱۳) و گسل ها و زون های خرد شده مرتبط با مخزن سامانه زمین گرمایی (مونت سینز و همکاران ۲۰۰۳؛ سالم و همکاران ۲۰۰۵؛ اسپچیان و لودو ۲۰۰۷؛ آی بی و هایل ۲۰۰۸؛ گوتسمن و همکاران ۲۰۰۸؛ رپرسز و همکاران ۲۰۱۳). عملیات گرانی سنجی و مغناطیس سنجی از لحاظ اقتصادی جز مقرون به صرفه ترین روش های ژئوفیزیکی برای به دست آوردن مدل اولیه و مناسب از ویژگی های ساختاری یک سیستم زمین گرمایی هستند.

مطالعات سراسری پتانسیل سنجی منابع انرژی زمین گرمایی انجام شده توسط سازمان انرژی های نو ایران (سانا) از سال ۱۳۷۷ تاکنون، ۱۴ منطقه زمین گرمایی مهم را در ایران معرفی می کند. تصویر ۱ نحوه پراکندگی این مناطق را نشان می دهد. منطقه زمین گرمایی محلات به علت وجود چشمه های آبگرم متعدد، تکتونیک فعال، نواحی دگرسان شده و رخنمون وسیع تراورتن به عنوان یکی از مهم ترین مناطق زمین گرمایی در ایران به شمار می رود. در سال های اخیر فعالیت های اکتشافی زیادی توسط سانا و دیگر گروه های تحقیقاتی در این منطقه صورت گرفته است. پرخيال و همکاران (۲۰۱۳)، زمین شناسی و ژئوشیمی منطقه را به طور کامل بررسی و نشان دادند که فعالیت های هیدروترمال در منطقه محلات عمدتاً توسط

## Geothermal Prospects of Iran



تصویر ۱- نقشه توزیع نواحی دارای پتانسیل منابع انرژی زمین گرمایی در ایران (سازمان انرژی های نو ایران، سانا).

محسوب می کنند و بعضی دیگر بلوک لوت راقطعه مجزایی از آن می دانند.

چشمه های آبگرم محلات که در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال شرقی شهر محلات در میان ارتفاعات بلند منطقه قرار گرفته اند و از جمله مهم ترین منابع آبگرم استان مرکزی محسوب می شوند. منطقه آبگرم محلات بخش کوچکی از پهنه ایران مرکزی است که روی کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر قرار دارد. تصویر ۲ وضعیت زمین شناسی منطقه مورد بررسی را نشان می دهد (نورعلیئی و شاه حسینی ۱۳۹۱).

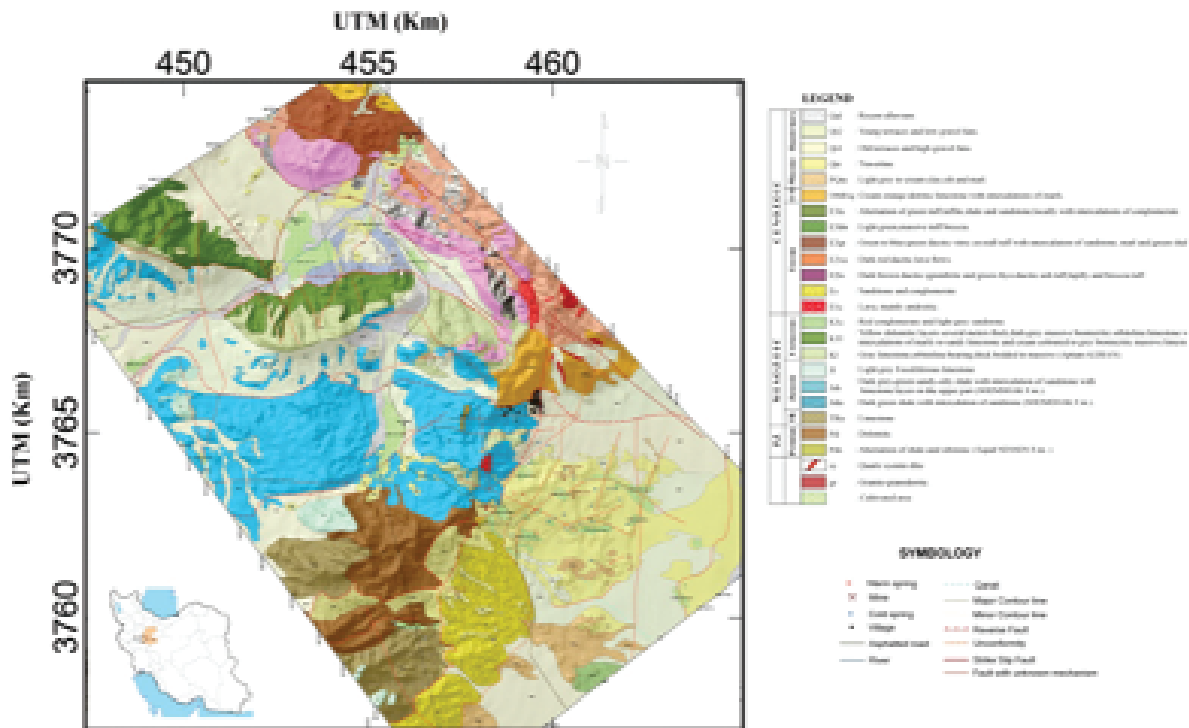
سازندهای رخنمون یافته در منطقه مورد بررسی عبارت اند از: سازند شمشک با لیتولوژی شیل و ماسه سنگ، واحد آهک اوربیتولین دار کرتاسه، واحد آهک مارنی سازند قم و در مجاورت این سنگ های رسوبی، سنگ های آذرین شامل گرانودیوریت، توف و گدازه در منطقه رخنمون دارند. چشمه های آبگرم محلات از رسوبات تراورتنی و آبرفتی خارج می شوند.

رسوبات تراورتنی که به مرور زمان در اثر ته نشست رسوبات چشمه ها به وجود آمده اند، همه آن ها در مجاورت گسل های ناحیه تشکیل شده اند و ضخامت قابل توجهی دارند. در گزارش نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گلیایگان (سازمان زمین شناسی کشور)، ضخامت آنها حتی تا ۵۰۰ متر نیز قید شده است. گسل ها و

با وضوح مناسب پوشش می دهد. در این بررسی تعداد ۳۸۰ ایستگاه گرانی در محدوده ای به وسعت حدود ۲۰۰ کیلومترمربع در شمال شرق محلات برداشت شد. پس از برداشت داده های گرانی به همراه مختصات آنها، پردازش داده ها شامل تصحیح رانه دستگاه، بوگه، هوای آزاد و توپوگرافی بر روی داده ها اعمال و تفسیر داده ها با استفاده از نقشه های مختلف میدان گرانی و همچنین برگردان سه بعدی داده ها باکد نوشته شده توسط لی اولدنبرگ در قالب برنامه رایانه ای Grav3D انجام شد.

## ۲- زمین شناسی منطقه مورد بررسی

در تقسیم بندی زمین ساختی ایران، منطقه محلات در زون آتشفشانی ایران مرکزی واقع شده است. این زون یکی از زون های فعال و پرتکاپو در طی دوران های متفاوت زمین شناسی بوده که به شکل مثلث در مرکز ایران قرار گرفته است. مرز غربی زون پیش گفته به زون دگرگونی سنندج- سیرجان محدود می شود و مرز آن در استان مرکزی با گسل های تلخاب و تبرته مشخص می شود. زون ایران مرکزی از سمت شمال به زون البرز و از سمت جنوب به زون مکران محدود می شود. حد شرقی زون ایران مرکزی چندان مشخص نیست زیرا بعضی از زمین شناسان، بلوک لوت را جزئی از ایران مرکزی

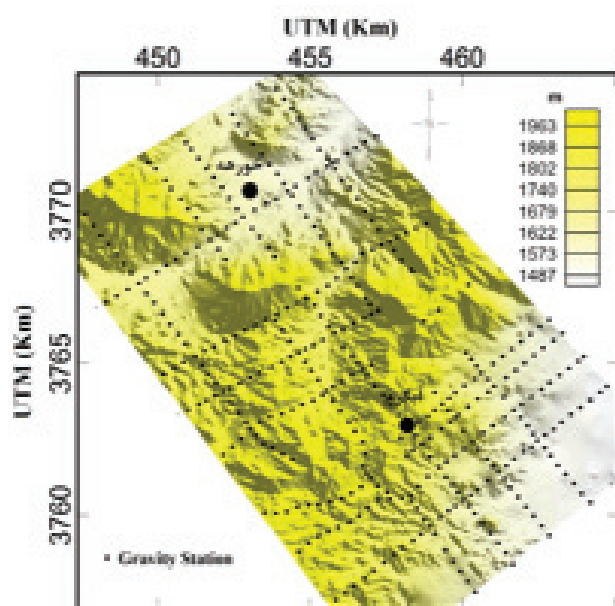


تصویر ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد بررسی (برگرفته از تصاویر ماهواره ای استر) (نورعلیئی و شاه حسینی ۱۳۹۱).

روی این نقشه نشان داده شده است. همان طور که در این نقشه مشاهده می شود، در قسمت شمال یک بی هنجاری مثبت (۱۱۰- تا ۱۰۲- میلی گال) (منطبق بر سنگ های آندزیت و داسیت (ADa) دیده می شود. همچنین در شرق و جنوب شرق نقشه، یک بی هنجاری مثبت وسیع تری وجود دارد که بر تراورتن ها و رسوبات آبرفتی (Q) منطبق شده است؛ اما از آن جایی که این رسوبات نمی توانند سبب بی هنجاری مذکور شوند، به نظر می رسد که توده های آذرین نفوذی در اعماق منطقه سبب ایجاد این بی هنجاری مثبت شده اند (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲). بی هنجاری مثبت ضعیف تری (۱۱۵- تا ۱۰۸- میلی گال) که در جنوب غرب نقشه قرار دارد و به سمت شمال شرق امتداد دارد، تا حد زیادی با دولومیت های منطقه (D) منطبق است. دولومیت در بین سنگ های رسوبی از چگالی بیشتری برخوردار است.

در قسمت جنوب نقشه یک بی هنجاری منفی (۱۲۹- تا ۱۳۴- میلی گال) منطبق بر ماسه سنگ و کنگلومرا (SC) دیده می شود. ضخامت به نسب زیاد کنگلومرا (اسکویی و دریجانی ۲۰۱۳) سبب ایجاد این بی هنجاری منفی شده است. بی هنجاری منفی دیگری در شمال غرب نقشه قرار دارد که بر دولومیت و ماسه سنگ های منطقه (DS) منطبق است.

به طور کلی به نظر می رسد که سنگ های آذرین در شمال و بخصوص در شرق و جنوب شرق منطقه سبب ایجاد یک روند (Trend) منفی گرانی به سمت شمال غرب و غرب منطقه شده است.



تصویر ۳- موقعیت ایستگاه های برداشت داده های گرانی بر روی نقشه ارتفاعی منطقه زمین گرمایی محلات.

شکستگی های فراوانی که در این منطقه به چشم می خورد، در گردش آب از سطح به عمق و برعکس، نقش مهمی دارند. نکته حائز اهمیت دیگر، محدوده های دگرسانی شده فراوان در منطقه است. اغلب دگرسانی های منطقه از نوع آرزیلیکی - سیریسیتی - فریک است ولی دگرسانی از نوع کائولینیتی - آلونیتی نیز در منطقه زیاد به چشم می خورد. این نوع از دگرسانی ها، به خصوص نوع اول آن ارتباط تنگاتنگی با فعالیت شاره های گرمایی (هیدروترمال) دارد. به عبارتی این نوع از دگرسانی عمدتاً در دمای زیاد اتفاق می افتد.

### ۳-۳- گرانی سنجی

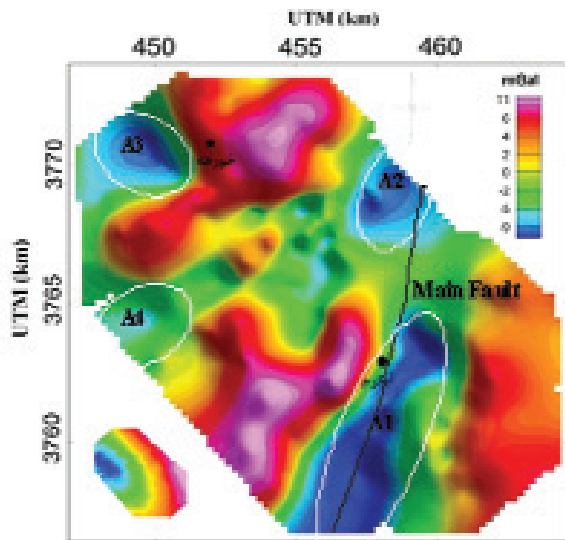
#### ۳-۱- برداشت داده و اعمال تصمیمات

عملیات گرانی سنجی در پاییز و زمستان سال ۱۳۹۱ توسط ستاد فناوری انرژی های تجدید پذیر در منطقه مورد بررسی انجام شد. اندازه گیری های نسبی میدان گرانش زمین در این منطقه با استفاده از گرانی سنج CG5 ساخت شرکت سینترکس کانادا انجام گردید. دقت این دستگاه در حد ۵ میکروگال است. در این پروژه در مجموع ۳۸۰ ایستگاه گرانی در محدوده ای به وسعت حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع برداشت شد. تصویر ۳ موقعیت ایستگاه ها را بر روی نقشه توپوگرانی منطقه نشان می دهد. فاصله بین ایستگاه ها با توجه به وضعیت توپوگرافی منطقه و امکان دسترسی به نقاط تعیین شده، بین ۲۰۰ تا ۴۵۰ متر است. به منظور تبدیل داده های گرانی نسبی به داده های گرانی مطلق از ایستگاه مبنای گرانی واقع در منطقه محلات (سازمان نقشه برداری کشور) استفاده شد. اندازه گیری های ارتفاعی و مسطحاتی نقاط گرانی برداشت شده، توسط دستگاه جی پی اس دو فرکانسه لایکا انجام و مقادیر ارتفاعی با استفاده از نقشه های توپوگرافی منطقه تأیید شد. مقدار خطایی که برای این مقادیر برآورد شده در حد  $\pm 5$  سانتیمتر است.

تصحیح هوای آزاد با استفاده از فرمول انجمن بین المللی ژئودزی در سال ۱۹۶۷ و تصحیح بوگه با استفاده از مقدار چگالی میانگین پوسته  $(2/67 \text{ g/cm}^3)$  بر روی داده های گرانی برداشت شده انجام شد. تصحیح توپوگرافی نیز به روش هامر (Hammer) با استفاده از نقشه های توپوگرافی ۷۲۵۰۰۰ منطقه، محاسبه و انجام گردید.

در تصویر ۴ نقشه بی هنجاری بوگه کامل نشان داده شده است. به منظور تعبیر و تفسیر راحت تر، مرز واحدهای سنگ شناسی اصلی بر

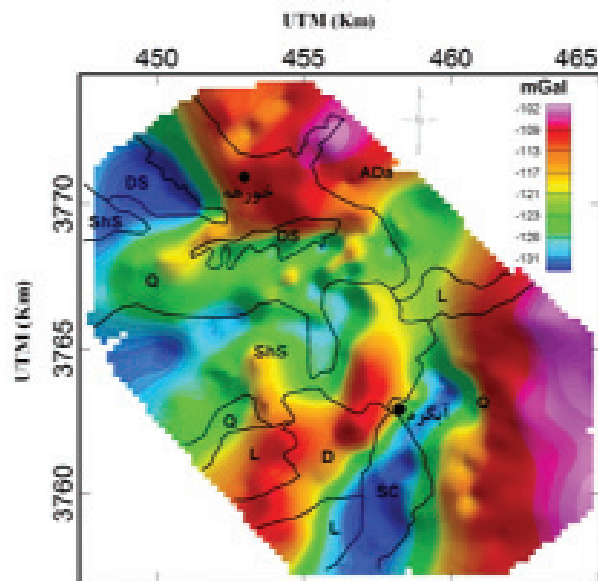
و يا بهم ريختگى بى هنجارى هاى محلى نمى شد. سپس با كم كردن ميدان گراني منطقه اى از ميدان گراني بوگه كامل، بى هنجارى محلى محاسبه شد. در تصوير ۵ نقشه ميدان هاى منطقه اى و محلى نشان داده شده است.



تصوير ۵- نقشه بى هنجارى گراني باقى مانده. زون هاى A1 تا A4،

بى هنجارى هاى گراني منفى مى باشند كه به عنوان مخازن احتمالى سامانه زمين گرامى در منطقه محلات مورد توجه هستند.

چهار ناحيه با بى هنجارى منفى (A1 تا A4) در نقشه ميدان گراني باقى مانده در تصوير ۵ مشخص شده است كه دو زون آن (A2 و A1) در امتداد گسل اصلى شناخته شده در منطقه هستند. روند اين گسل معكوس (نورعليئي و شاه حسيني ۱۳۹۱) تقريباً شمالى جنوبى است. موقعيت آن در تصوير ۵ با خط مشكى مشخص شده است. با توجه به نقشه زمين شناسى، بى هنجارى A1 با محل چشمه هاى آبگرم و همچنين با رخنمون هاى وسيع تراورتن ها در منطقه منطبق است. همچنين بيشترين دگرسانى هاى ناشى از فعاليت هاى گرمابى در اين زون قرار گرفته است (پرخيال و همكاران ۲۰۱۳)؛ به همين دليل به نظر مى رسد زون هاى خرد شده ناشى از فعاليت گسل اصلى و افزايش نفوذپذيرى و متعاقب آن تشكيل مخزن زمين گرامى منطقه، موجب پيدايش اين بى هنجارى منفى گراني شده است. زون A2 نيز در ناحيه اى با رخنمون سنگ هاى آذرين فلسيك واقع شده است و فعاليت گسل مذكور در اين زون سبب خرد شدگى قابل توجهى در سنگ هاى اين ناحيه شده است. عدم وجود دگرسانى هاى گرمابى، چشمه هاى آبگرم و رخنمون تراورتن در اين زون، اين ناحيه را از نظر



تصوير ۴- نقشه بى هنجارى بوگه كامل به همراه نمايش خطوط مرز واحدهاى سنگ شناسى اصلى. SC: ماسه سنگ و كنگلومرا، D: دولوميت، L: سنگ آهك، Q: رسوبات آبرفتى، ShS: شيل و ماسه سنگ، ML: سنگ آهك توده اى، DS: دولوميت و ماسه سنگ، ADA: آندزيت و داسيت.

### ۳-۲- جدایش بى هنجارى محلى و منطقه اى

بى هنجارى بوگه به علت حضور ساختارهاى بزرگ و عميق دارى يك روند منطقه اى است. اثر اين ساختارها به صورت بى هنجارى هاى با طول موج بلند در ميدان گراني ظاهر شده و سبب مى شود كه اثر بى هنجارى هاى كوچكتر و سطحى تر به خوبى دیده نشود. بنا بر اين به منظور بارزتر كردن بى هنجارى هاى مرتبط با منشا مورد مطالعه در منطقه محلات، جدایش بى هنجارى محلى و منطقه اى از بى هنجارى بوگه انجام شد. روش هاى متعددى براى انجام اين جدایش وجود دارد؛ به طورى كه برخى از آن ها بيشتر حالت تجربى و برخى بيشتر حالت تحليلى دارند (به عنوان مثال: تلفورد و همكاران ۱۹۹۰). به منظور جدایش بى هنجارى محلى و منطقه اى از داده هاى گراني منطقه محلات، چندين روش گوناگون از جمله برازش چند جمله اى درجه يك و بالاتر و روش ادامه فراسو جهت محاسبه ميدان منطقه اى بكار گرفته شد؛ اما نتايج برخى از آن ها به گونه اى سبب تضعيف و يا تقويت برخى بى هنجارى ها مى شد كه بر اساس تجربه مفسر قابل قبول نبود. بنا بر اين از روش برازش يك سطح چند جمله اى درجه دوم به داده هاى گراني مشاهده شده استفاده شد؛ به طورى كه در اين روش روند منطقه اى محاسبه شده سبب از بين رفتن

به این که گسل اصلی منطقه محلات از محل چشمه ها می گذرد و روند تقریباً شمالی- جنوبی دارد، دو نقشه مشتق جهت افقی درجه اول محاسبه گردید؛ یکی در امتداد روند گسل اصلی (تصویر ۶ الف) به منظور مشخص کردن ساختارهای عمود بر این گسل و دیگری عمود بر جهت مشتق قبلی (تصویر ۶ ب) به منظور مشخص کردن ساختارهای با روند تقریبی هم جهت با گسل اصلی.

نقشه های مشتق نشان داده شده در تصویر ۶ به طور واضح اهمیت خطواره ها و گسل های اصلی در کنترل مخزن زمین گرمایی و تکامل چرخه سیالات هیدروترمال منطقه را نشان می دهد. در این شکل خطوط سیاه رنگ گسل های شناخته شده در نقشه زمین شناسی می باشد که بر روی این نقشه ها ترسیم شده و خطوط بریده-بریده سفید رنگ خطواره های شناسایی شده با استفاده از نقشه های مشتق افقی میدان گرانی است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، مهم ترین گسل های شناسایی شده (خطوط بریده-بریده سفیدرنگ) در منطقه عمدتاً دارای روند تقریباً شمالی-جنوبی و هم جهت با گسل اصلی شناخته شده هستند.

### ۳-۳-۲- مشتق قائم

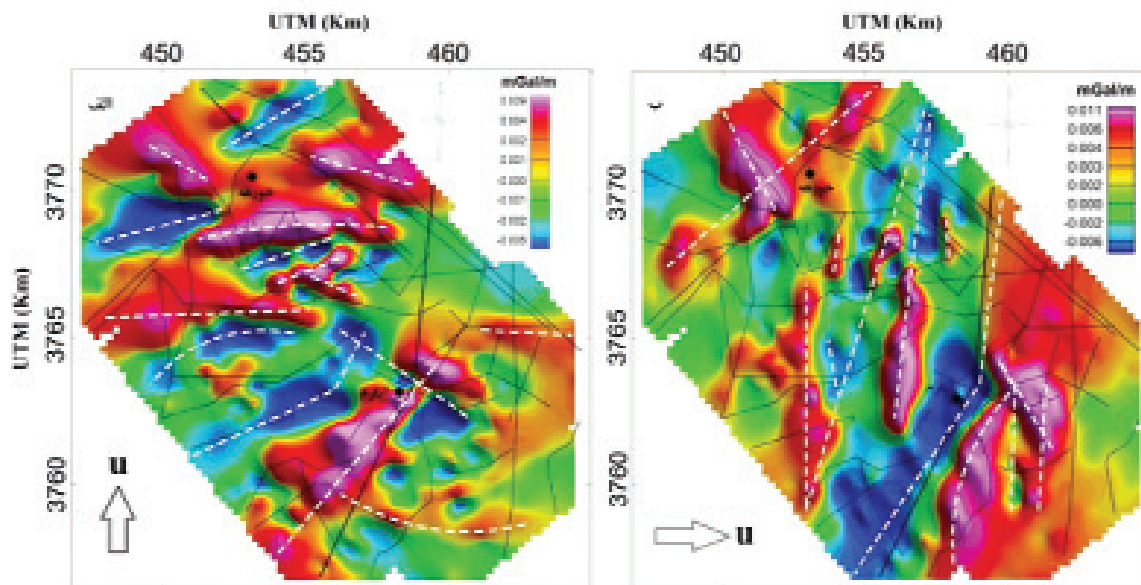
استفاده از فیلتر مشتق قائم یکی دیگر از روش های برآورد مرز

مخزن زمین گرمایی از اهمیت کمتری برخوردار می سازد. زون A3 در ناحیه ای با رخنمون های دولومیت، ماسه سنگ و شیل منطبق است. وجود رخنمون های قابل توجه، گسل های فعال و چشمه های با درجه حرارت متوسط سبب شده است که براساس مطالعات گرانی سنجی انجام شده، این زون نیز به عنوان یکی از پتانسیل های مخزن سامانه زمین گرمایی منطقه مورد توجه قرار گیرد. زون A4 در ناحیه ای با رخنمون های شیل و ماسه سنگ واقع شده است. این زون نسبت به سه زون قبلی دارای بی هنجاری منفی ضعیف تری می باشد و از آن جایی که شواهد سطحی زمین گرمایی در این زون دیده نمی شود، بنابراین به نظر نمی رسد این بی هنجاری ناشی از فعالیت سامانه زمین گرمایی در منطقه باشد.

### ۳-۳-۱- مشتقات جهت میدان گرانی

#### ۳-۳-۱-۱- مشتقات افقی

مشتق افقی درجه اول میدان گرانی در یک جهت خاص، سبب تقویت تغییرات جانبی در میدان گرانی و تضعیف روند منطقه ای در آن جهت می شود (نیقیان ۱۹۸۴). در نواحی که تباین چگالی بیشتر است، مقدار مشتق به بیشینه یا کمینه خود می رسد؛ بنابراین ناپیوستگی های عمود بر جهت مشتق، بارزتر شده و لبه ساختارها آشکارتر می شود. با توجه



تصویر ۶- نقشه های مشتقات افقی درجه اول میدان گرانی بوگه. الف- نقشه مشتق افقی درجه اول در جهت شمال. ب- نقشه مشتق افقی درجه اول در جهت شرق. در این شکل خطوط سیاه رنگ گسل های شناخته شده در نقشه زمین شناسی می باشد که بر روی این نقشه ها ترسیم شده و خطوط منقطع سفید رنگ خطواره های شناسایی شده با استفاده از نقشه های مشتق افقی میدان گرانی است.

شکل این تابع هدف به گونه ای است که می تواند برای جنبه های ناخواسته ریاضی قابل قبول، از قبیل تمرکز چگالی در نزدیکی سطح، ساختار بسیار بزرگ و یا وجود چگالی های متفاوت، تصحیح شود. این تابع هدف، ناهموازی ها را در سه جهت فضایی جبران می کند و یک وزن دهی سه بعدی بر اساس توزیع چگالی با عمق دارد. تابع های کمکی وزن دهی سه بعدی در تابع هدف را می توان در ترکیب کردن اطلاعات بیشتر درباره مدل به کار برد. چنین اطلاعاتی ممکن است از کاوش های دیگر ژئوفیزیکی، داده های زمین شناسی و یاد درک کمی و کیفی مفسر از ساختار زمین شناسی و ارتباط آن با چگالی سنگ ها باشد. راه حل عددی برای برگردان از راه تقسیم زمین به تعداد زیادی سلول، تحقق یافته است تا اجسام زمین شناسی پیچیده به طور نسبی ساخته شوند.

الگوریتم عرضه شده از سوی لی - اولدنبرگ از رابطه ۱ آغاز می شود:

$$d = Gp \quad (1)$$

در این رابطه  $d$  مربوط به داده های واقعی،  $G$  ماتریس حساسیت و چگالی سنگ ها در یک بلوک متعامد و شبکه بندی شده به منظور انجام مدل سازی است. مسئله برگردان به منزله یک مسئله بهینه سازی، فرمول بندی 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 بازتولید شود. فرض کنید تابع هدف به صورت زیر باشد:

(۲)

$$\phi_m = a_s \int_V wsw2(z)(p - p_0)2dv + \alpha_x \int_V wx\{[\partial w(z)/\partial x](p - p_0)\}^2 dv + \alpha_y \int_V \{[\partial w(z)/\partial x](\rho - \rho_0)\}^2 dv + \alpha_z \int_V wz\{[\partial w(z)/\partial x](\rho - \rho_0)\}^2 dv$$

که در آن  $P$  مربوط به داده های واقعی،  $\rho_0$  مربوط داده های مدل،  $W_x$ ،  $W_y$ ،  $W_z$  و 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 زیر به دست می آید:

$$\phi_d = \|wd(d_{mod} - d_{obs})\|^2 \quad (3)$$

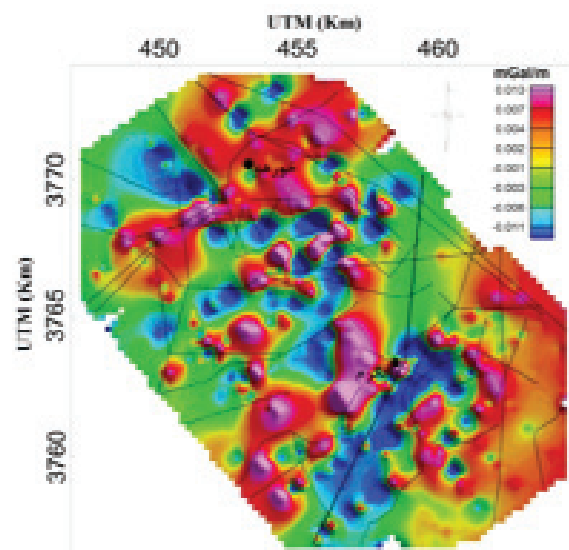
که در آن  $W_d$  به عنوان یک ماتریس قطری است که عنصر  $\lambda_m$  آن، انحراف استاندارد امین داده،  $d_{mod}$  چگالی محاسبه شده و  $d_{obs}$  چگالی برداشت شده است. هدف از این معادله ی وارون (معادله ۳)، کمینه کردن اختلاف بین تابع هدف و خطای برازش داده ها است:

$$\phi = \phi_d + \mu\phi_m \quad (4)$$

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 (کوپر و کوان ۲۰۰۴). 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 (نبیقیان ۱۹۸۴). در تصویر ۷ نقشه مشتق قائم درجه اول از میدان گرانی بوگه منطقه مورد بررسی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، بی هنجاری های کوچکتر در کل منطقه و بخصوص در مرکز، با وضوح بیشتری نمایان شده اند. علت اصلی این بی هنجاری ها، گسل خوردگی های شدید در منطقه می باشد. این موضوع با گسل های شناخته شده در منطقه انطباق قابل قبولی دارد.

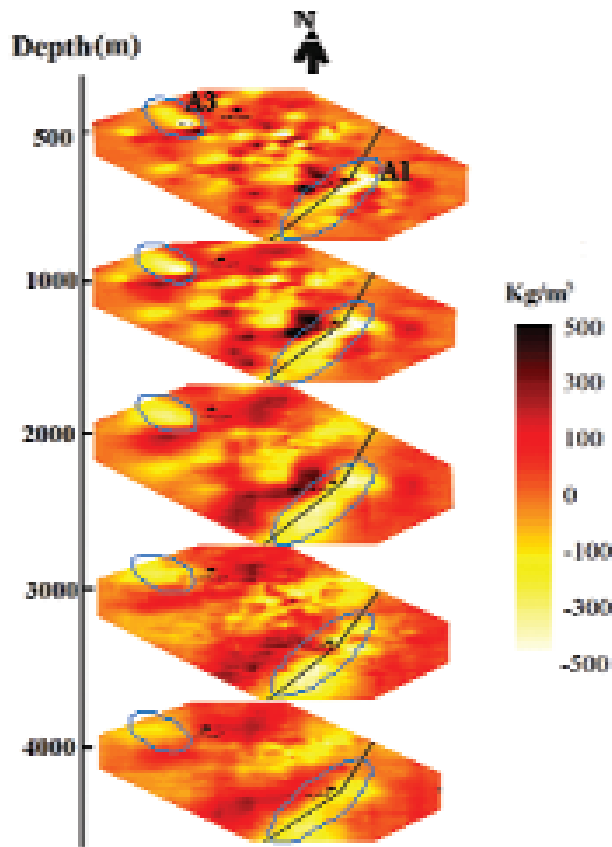
#### ۴- برگردان سه بعدی داده ها

به منظور بررسی سه بعدی ویژگی های زمین شناختی سامانه زمین گرمایی محلات، برگردان سه بعدی داده ها توسط الگوریتم لی - اولدنبرگ (۱۹۹۸) در قالب نرم افزار Grav3D انجام شد. در رویکرد برگردان عرضه شده از سوی لی - اولدنبرگ که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، ابتدا در مورد تغییری که تفسیر بر اساس آن صورت خواهد گرفت، تصمیم گیری می شود، که تابعی از چگالی مورد جستجو می باشد. سپس یک تابع هدف چند مؤلفه ای که دارای انعطاف پذیری کافی برای تولید انواع مدل باشد ساخته می شود.

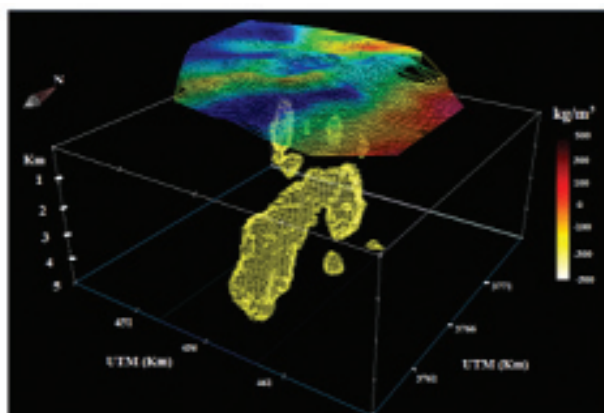


تصویر ۷- نقشه مشتق قائم درجه اول از میدان گرانی بوگه. خطوط سیاه رنگ گسل های شناخته شده در نقشه زمین شناسی می باشند.

گرفتیم و بنابراین به منظور نمایش مناسب تر این نواحی، سنگ های با تباین چگالی کمتر از ۱۵۰- کیلوگرم بر مترمکعب را در تصویر ۹ نشان دادیم. همانطور که مشاهده می شود در این حالت فقط زون A1 از اعماق حدود ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متر از وضعیت بسیار مناسب تری نسبت به زون های دیگر برخوردار است.



تصویر ۸- مقدار تباین چگالی سنگ ها در منطقه مورد بررسی تا عمق ۴ کیلومتر، با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبرگ (۱۹۹۸).



تصویر ۹- نمایش مدل سه بعدی سنگ های با تباین چگالی کمتر از منفی ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در منطقه زمین گرمایی مورد بررسی تا عمق ۵ کیلومتر، با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبرگ (۱۹۹۸).

که در آن  $\mu$  پارامتر تنظیم کننده است. جزئیات و توصیف های بیشتر در مقاله لی-اولدنبرگ (۱۹۹۸) موجود است.

تصویر ۸ و ۹ نتایج به دست آمده از این مدل سازی داده های گرانی منطقه مورد بررسی را تا عمق ۵ کیلومتر نشان می دهد. همان طور که در ستون رنگی راهنمای این شکل ها مشاهده می شود، تباین چگالی برآورد شده در این مدل سازی در حدود ۵۰۰+ تا ۵۰۰- کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. در مدل به دست آمده سنگ های با چگالی بیشتر، با رنگ تیره و سنگ های با چگالی کمتر با رنگ روشن نمایش داده شده اند. تصویر ۸ برش هایی از مدل تباین چگالی سنگ ها تا عمق ۴۰۰۰ متر را نشان می دهد. با توجه به این شکل، گسل اصلی منطقه سبب ایجاد تباین چگالی منفی در سنگ ها شده است و همان طور که بر اساس نقشه های مختلف میدان گرانی انتظار می رود، زون A1 که با این گسل منطبق است در همه برش های عمقی (تصویر ۸) نشان دهنده محدوده با تباین چگالی منفی قابل توجهی است. این ناحیه، در برش عمقی ۲۰۰۰ متر نسبت به عمق های دیگر، دارای پیوستگی و وسعت بی هنجاری مناسب تری است و بنابراین به نظر می رسد مخزن سامانه زمین گرمایی در این عمق از کیفیت بالاتری برخوردار باشد. 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 بوجود 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 کند.

ناحیه قابل توجه دیگری که سبب ایجاد بی هنجاری چگالی منفی در مدل به دست آمده شده است، زون A3، واقع در جنوب-غرب روستای خوره می باشد. این ناحیه نسبت به زون A1 از گستردگی کمتری برخوردار است. این ناحیه در برش های عمقی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از وضعیت مناسب تری برخوردار است. زون های A2 و A3 به دلیل عدم وجود تباین چگالی قابل توجه در مدل به دست آمده، از درجه اهمیت بسیار کمتری برخوردار هستند.

در منطقه مورد بررسی، با استفاده از جدول چگالی سنگ ها توسط Blakely et al. 1990، تباین چگالی کمتر از ۱۵۰- کیلوگرم بر مترمکعب را به عنوان نواحی مستعد مخزن زمین گرمایی در نظر



## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش داده‌های گرانی مربوط به یکی از مناطق زمین گرمایی مهم در ایران واقع در شمال شرق شهر محلات مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفت. هدف اصلی از این پژوهش شناسایی مخزن (های) زمین گرمایی در منطقه مورد بررسی به منظور هدف گذاری چاه‌های اکتشافی می‌باشد. نقشه گرانی محلی نشان‌دهنده وجود ۴ ناحیه با بی‌هنجاری گرانی منفی (زون A1 تا A4) در منطقه است. این زون‌ها به عنوان مخازن احتمالی سامانه زمین گرمایی مورد توجه قرار گرفت و بنابراین به منظور شناسایی بیشتر این نواحی مستعد، وارون‌سازی سه بعدی داده‌ها توسط الگوریتم لی-اولدنبرگ انجام شد. با انجام این مدل سازی آشکار شد که زون A1 از وضعیت مناسب تری از نظر مخزن زمین گرمایی برخوردار است. نقشه‌های مشتقات میدان گرانی نشان‌دهنده وجود گسل‌های مهم و یا مرزهای سنگ شناسی (عمدتاً دارای روند تقریباً شمالی-جنوبی) در منطقه است. فعالیت این گسل‌ها سبب انتقال سیالات جوی از سطح به عمق شده و پس از داغ شدن در اعماق از طریق این مسیرها به بالا حرکت می‌کند و سبب تجمع آن‌ها در سنگ‌های کم عمق تا عمیق منطقه شده و شرایط تشکیل مخزن زمین گرمایی را ایجاد کرده است. نتایج وارون‌سازی داده‌های گرانی در تصویر ۹ به طور واضح اهمیت گسل‌ها به خصوص گسل اصلی منطقه در کاهش چگالی سنگ‌ها در زون A1 را نشان می‌دهد. بر اساس آن، مخزن زمین گرمایی محلات در زون A1 و در عمق ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متر قرار دارد. نشانه‌های سطحی انرژی زمین گرمایی شامل چشمه‌های آبگرم و محدوده‌های دگرسانی شدید مرتبط با سیالات گرمایی، نتایج به دست آمده از روش گرانی سنجی را تایید می‌نماید.

## تشکر و قدردانی

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

## مراجع:

میرزایی، م، محمدزاده مقدم، م، اسکویی، ب، قدیمی، ف. و جزایری، س،

۱۳۹۲. پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس زمینی مرتبط با منابع زمین گرمایی با استفاده از دوروش اویلر و AN-EUL، م. فیزیک زمین فضا، ۳۹ (۴) ۹۶-۸۳. نقشه زمین شناسی گلیپایگان مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. نقشه توپوگرافی گلیپایگان مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، انتشارات سازمان نقشه برداری کشور. نورعلی، ج. و شاه‌حسینی، ع، ۱۳۹۱، گزارش زمین شناسی منطقه زمین گرمایی محلات. پژوهشگاه نیرو، گروه انرژی‌های نو.

**Abiye T.A. & Haile T., 2008.** Geophysical exploration of the Boku geothermal area, Central Ethiopian Rift. *Geothermics*, 37(6):586-596.

**Blakely, R.J., 1995.** Potential theory in gravity and magnetic applications, 1 ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

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

**Gottsmann, J., Camacho, A.G., Martí J., Wooller, L., Fernnández, J., García, A. & Rymer, H., 2008.** Shallow structure beneath the Central Volcanic Complex of Tenerife from new gravity data: implications for its evolution and recent reactivation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168, 212-230.

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

**Montesinos, F.G., Camacho, A.G., Nunes, J.C., Oliveira, C.S. & 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., 1984.** Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations. *Geophysics*, 49, 780-786.

**Oskooi, B. & Darijani, M., 2013.** 2D inversion of magnetotelluric data from Mahallat geothermal field in Iran using finite element approach, *Arabian J. Geosci.*, doi:10.1007/s12517-013-893-6.

**Oskooi, B., Darijani, M. & Mirzaie, M., 2013.** Investigation of electrical resistivity and geological structure on the hot springs in Markazi province of Iran using magnetotelluric method, *Bollettino di Geofisica ed Applicata*. 54, 245-256.

**Porkhial, S., Nouraliee, J. Rahmani, M. & Ebrahimi, D., 2013.** Resource assessment of Vartun geothermal region, central Iran, *J. Tethys*, 1, 29-40.

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

**Salem, A., Furuya, S., Aboud, E., Elawadi, E., Jotaki, H. & Ushijima, K., 2005.** Subsurface Structural Mapping Using Gravity Data of Hohi Geothermal Area, Central Kyushu, Japan. *Proceedings World Geothermal Congress*,

*Antalya, Turkey.*

**Schiavone, D. & 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., 1990.** Applied Geophysics, *Cambridge University Press*.