



## شناسایی مخازن زمین گرمایی با استفاده از مدل سازی وارون داده های گرانی سنجی در چشمه های آبگرم محلات

بهنام بابایی<sup>۱</sup>، مهدی فلاحی پور<sup>۲</sup> و حمیدرضا باغزندانی<sup>۳\*</sup>

- ۱- استادیار، گروه معدن- نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات  
۲- کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف معدن، شرکت عملیات اکتشاف نفت تهران  
۳- کارشناس ارشد ژئوفیزیک (گرانی سنجی)

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۲؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۸

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [hbaghzendani@yahoo.com](mailto:hbaghzendani@yahoo.com)

### چکیده

گرانی سنجی یکی از روش های ژئوفیزیکی است که به کمک دیگر روش های ژئوفیزیکی در حل بعضی از مسائل و مشکلات موجود در تفسیر ساختارهای زمین شناسی کمک می کند. هرچند به منظور دستیابی به یک تفسیر جامع می توان از مدل سازی داده های ژئوفیزیکی بهره برد. یکی از این روش ها، مدل سازی وارون داده ها است. مدل سازی وارون به منظور تعیین پارامترهای مدل از داده ها به کار می رود. در وارون سازی داده های ژئوفیزیکی، پارامترهای مدل دو دسته اند: (۱) فیزیکی (۲) هندسی. بر همین مبنا دو روش وارون سازی داده های میدان پتانسیل وجود دارد، در روش اول پارامترهای هندسی ثابت و پارامترهای فیزیکی به عنوان مجهولات مسئله در نظر گرفته می شود و در روش دوم پارامترهای فیزیکی مدل ثابت فرض شده و پارامترهای هندسی مانند عمق در روند وارون سازی تخمین زده می شود. در این تحقیق با برداشت ۳۸۰ داده گرانی سنجی در منطقه محلات و انجام تصحیحات لازم، پردازش داده ها و اعمال فیلترینگ مناسب جهت تشخیص روندهای سطحی و تلفیق داده ها با اطلاعات زمین شناسی موجود، سعی گردید روندهای سطحی و عمقی تأثیرگذار بر روی چشمه های آبگرم موجود در منطقه تعیین شده و مخازن احتمالی موجود در منطقه با استفاده از آن شناسایی گردد.

### واژگان کلیدی

گرانی سنجی  
مدل سازی وارون  
مخازن زمین گرمایی

## ۱- مقدمه

گرانی سنجی یکی از روش های ژئوفیزیکی است؛ که به کمک دیگر روش های ژئوفیزیکی در حل بعضی از مسائل و مشکلات موجود در تفسیر ساختارهای زمین شناسی کمک می کند. هرچند به منظور دستیابی به یک تفسیر جامع می توان از مدل سازی داده های ژئوفیزیکی بهره برد. تئوری وارون دسته ای سازمان دهی شده از روش های ریاضی جهت به دست آوردن اطلاعات مفید درباره فیزیک بر اساس استنتاجات به دست آمده از مشاهدات، یعنی مجموعه ای اندازه گیری ها یا داده هاست. منظور از اطلاعات مفید در جمله فوق، پارامترهای مقادیر عددی یا آماری هستند که پارامترهای مدل نامیده می شوند. روش ها و تئوری های ریاضی گوناگونی برای مرتبط ساختن پارامترهای مدل به داده ها توسط پژوهشگران معرفی و بکار می رود. برای انجام مدل سازی بهتر که به واقعیت نزدیک تر باشد، باید به بهترین صورت امکان آنومالی ناحیه ای از محلی جدا شود.

روش های مرسوم زیادی جهت تفکیک آنومالی های و تفسیر آن ها کاربرد دارند. ولی عمدتاً این روش ها دارای نواقصی نیز می باشند؛ که در عمل استفاده از آن ها یا دامنه کاربرد آن ها را محدود می نماید. یکی از انعطاف پذیرترین روش های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه ای، روش روند سطحی است. در این روش، میدان ناحیه ای از مقادیر مشاهده ای به وسیله روش کمترین مربعات یا روش اورتونر مال تقریب زده می شود.

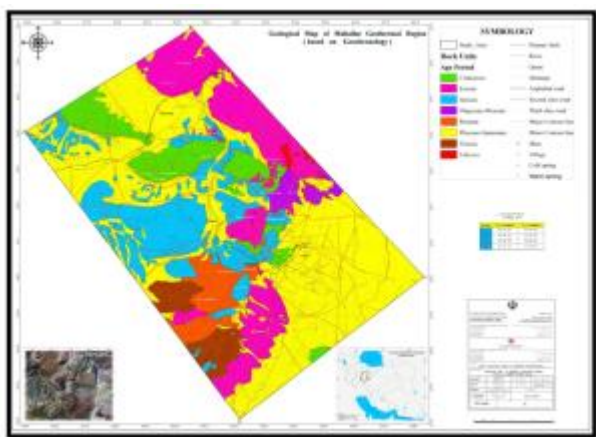
در سال ۱۹۷۹ پیتز مورفی و همکاران خصوصیات چشمه های آبگرم در ایالت یوتا آمریکا را با استفاده از داده های گرانی سنجی مورد مطالعه قرار دادند (Murphy et al., 1979). امیلو و همکاران در سال ۱۹۸۱ داده های گرانی سنجی را بر روی منطقه زمین گرمایی تانگونان در فیلیپین مورد بررسی قرار داده و بر اساس آن مقاطع زمین شناسی را تفسیر کردند (Ignacio et al., 1981). وات و همکاران در سال ۲۰۰۷ در منطقه زمین گرمایی شمال نوادا با استفاده از داده های گرانی سنجی مدل های سه بعدی زمین شناسی را تهیه کردند (Watt et al., 2007). حکیم سیبی و همکاران در سال ۲۰۰۸ در ژاپن و در شهر فوکوکا، رابطه بین ساختارهای زمین شناسی و دمای آب های زمین گرمایی را با استفاده از مدل سازی دو بعدی داده های گرانی سنجی با الگوریتم تالوانی (Talwani et al., 1959) مورد مطالعه قرار دادند (Saibi, et al, 2008). منجوکوا در سال ۲۰۱۳ و در کشور تانزانیا، با استفاده از انواع روش های ژئوفیزیکی مناطق زمین گرمایی را برای استفاده از انرژی آن ها مورد بررسی قرار داده است (Mnjokava, 2013).

در این تحقیق پس از بررسی و مطالعات روش های مختلف و انجام گرفته در مناطق زمین گرمایی کشورهای مختلف، سعی خواهد شد با استفاده از تلفیق داده های گرانی سنجی و برداشت های صحرائی زمین شناسی و الگوهای تکتونیکی منطقه مورد مطالعه و تعیین زون های گسلی و خرد شده، مخازن آبگرم در ناحیه مدل سازی شده و

عمق تخمینی نیز برای این مخازن به جهت توسعه و استفاده از منابع انرژی آن محاسبه و تعیین گردد.

## ۲- موقعیت جغرافیایی

منطقه زمین گرمایی مورد مطالعه در شمال شهرستان محلات (منطقه آبگرم و خورهه) از عرض جغرافیائی ۳۳ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۶ دقیقه و طول جغرافیائی ۵۰ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه را شامل می شود. شکل ۱ نیز موقعیت منطقه زمین گرمایی محلات و نحوه ی توزیع نقاط را در این منطقه نشان می دهد. از نظر توپوگرافی بخش عمده ای از منطقه زمین گرمایی محلات شامل زمین های پست و ارتفاعات صعب العبور می شود. با توجه به تجربه و به منظور افزایش سرعت و حفظ دقت کار، عملیات اندازه گیری گرانی سنجی و نقشه برداری ایستگاه ها به صورت همزمان انجام پذیرفت. به منظور اتصال مشاهدات گرانی به شبکه سراسری گرانی کشور و اتصال به شبکه سراسری ژئودزی کشور، از نزدیک ترین ایستگاه های چند منظوره ژئودزی واقع در منطقه یعنی مشاهدات ایستگاه درجه ۲ چند منظوره به شماره ۲۲۰۱۷۸ استفاده گردید که دقت مسطحاتی برداشت  $\pm 10$  cm و دقت ارتفاعی  $\pm 3$  cm بوده است. جمعاً تعداد ایستگاه های طراحی شده ۳۸۰ ایستگاه اندازه گیری بوده که تماماً با کیفیت و دقت بسیار خوب برداشت گردید.



شکل ۱: موقعیت کلی منطقه و نقشه زمین شناسی آن.

## ۳- برداشت داده ها و انجام تصحیحات

برای انجام این عملیات از یک دستگاه گرانی سنجی CG-5 استفاده گردید. بعد از انجام کالیبراسیون استاتیکی و دینامیکی دستگاه گرانی سنجی و انتقال شتاب جاذبه مطلق عملیات برداشت در منطقه آغاز شد، به نحوی که هر روز صبح با قرائت در ایستگاه دارای شتاب مطلق کار شروع و پس از قرائت نقاط مشخص شده توسط گروه نقشه برداری به ایستگاه شتاب مطلق مجدداً بازگشته و عملیات به

به سمت بالا (ربایش به سمت بالا) ایجاد می‌شود و همچنین وجود دره‌های پایین‌تر از ایستگاه اندازه‌گیری و تهی بودن مواد در این قسمت‌ها (فقدان ربایش به سمت پایین) هر دو سبب کاهش شتاب جاذبه قرائت شده در ایستگاه می‌گردد. در این تحقیق به کمک نرم‌افزار (ژئوسافت) GeoSoft تصحیح توپوگرافی بر روی داده‌ها انجام شد. بعد از انجام تمام تصحیحات لازم بر روی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Grav3D که بر اساس الگوریتم لی و اولدنبرگ کار می‌کند؛ مدل‌سازی صورت گرفت؛ که در ادامه ارائه می‌گردد.

#### ۴- زمین‌شناسی منطقه

منطقه محلات قسمت کوچکی از زون ایران مرکزی و در حد فاصل کمربند آتشفشانی ارومیه - کرمان و زون سنندج - سیرجان قرار دارد. رسوبات موجود در منطقه که به رخساره پالئوزوئیک محلات معروف می‌باشند؛ که به ترتیب شامل دولومیت‌های سلطانیه، زاگون، لالون، میلا و پرمین است.

علاوه بر آن واحد آبرفتی کواترنری نیز در گستره منطقه مشاهده می‌شود. واحدهای سنگی دوران اول شامل دوره‌های کامبرین و پرمین هستند. پس از آن واحدهای دولومیتی و آهکی با سن پرمین مشاهده می‌شود. واحد آهکی تریاس و کنگلومرای ائوسن از دیگر واحدهای سنگی موجود در منطقه هستند. منطقه از نظر نفوذپذیری با توجه به گسترش واحدهای آهکی و دولومیتی موجود و درز و شکاف‌های موجود در آن‌ها، وضعیت مناسبی دارد.

در منطقه آبگرم توده‌ای نفوذی نیمه ژرف و با ترکیب اسیدی برونزد دارد؛ که به احتمال بسیار فراوان عامل اصلی چشمه‌های آبگرم منطقه است. بافت سنگ‌ها در بخش مرکزی از نوع گرانولار و در حاشیه از نوع پورفیریتیک است. ترکیب شیمیایی این توده گرانیت تا گرانودیوریت است؛ که واحدهای رسوبی ائوسن را قطع و دگرگون کرده است.

#### ۵- پردازش و تفسیر داده‌های گرانی

پس از بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه و پردازش داده‌ها، آنومالی بوگه محاسبه و نقشه آن تهیه گردید (شکل‌های ۲ و ۳). تعبیر و تفسیر داده‌ها در دو مرحله کمی و کیفی انجام شد. در مرحله کیفی نخست آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده با استفاده از روش تحلیل روند سطحی از آنومالی بوگه به دست آمد. همچنین فیلترهای گرادبان مشتق در حالت قائم و افقی نیز با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت بر روی داده‌ها اعمال گردیده و نقشه‌های آن‌ها ترسیم شد و در نهایت تعبیر و تفسیر مناطق دارای پتانسیل مشخص و مدل‌سازی آن صورت گرفت.

پس از این برداشت کلی از منطقه بر اساس نتایج به دست آمده از نقشه آنومالی باقیمانده و بر اساس اطلاعات به دست آمده از

پایان می‌رسد. پردازش اطلاعات گرانی‌سنجی در دو بخش ۱- پردازش در حین عملیات و ۲- پردازش بعد از عملیات انجام می‌گیرد.

۱- پردازش در حین عملیات شامل تصحیح جذر و مد و دریافت روزانه است که هر دو به وسیله دستگاه محاسبه و اعمال می‌گردد.

۲- پردازش بعد از عملیات شامل تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه و تصحیح توپوگرافی است:

**الف) گرانی نرمال بوده و به تنهایی برای عرض جغرافیایی کافی نیست.**

چرخش زمین و برآمدگی خفیف استوایی آن هر دو باعث افزایش گرانی با عرض جغرافیایی می‌شوند. شتاب جانب مرکز به علت چرخش زمین که در قطبین صفر و در استوا ماکزیمم است، در جهت مخالف شتاب گرانی اثر می‌کند؛ در حالی که تخت‌شدگی قطبی نیز باعث افزایش گرانی در قطبین می‌شود. این تصحیح طبق رابطه زیر برای هریک از ایستگاه‌ها محاسبه و اعمال می‌گردد (Otieno et al., 2011):

$$g_L = 9.78049(1 + 0.0052884 \sin^2 \phi - 0.000059 \sin 2\phi) \quad (1)$$

در این رابطه  $g_L$  مقدار شتاب جاذبه میدان ثوری و  $\phi$  عرض جغرافیایی تک‌تک ایستگاه‌های برداشتی است؛ که واحد آن‌ها به ترتیب بر حسب میلی‌گال و درجه است.

#### ب) تصحیح هوای آزاد

چون گرانی با عکس مربع فاصله تغییر می‌کند لذا لازم است مقدار آن به علت تغییرات ارتفاعی بین ایستگاه‌ها تصحیح شود و تمام قرائت‌ها به یک سطح مبنا برگردانده شوند. چون مواد بین هر ایستگاه و سطح مبنا (ژئوئید) در این مورد در نظر گرفته نمی‌شود، این تصحیح به نام تصحیح هوای آزاد معروف است. تصحیح هوای آزاد مطابق رابطه ذیل محاسبه می‌گردد (نوروزی، ۱۳۸۸):

$$g_f = 0.30859h_s \quad (2)$$

در رابطه بالا  $h_s$  ارتفاع هر ایستگاه بر حسب متر بوده که به صورت قدر مطلق بر مقدار شتاب جاذبه ایستگاه اثر می‌نماید.

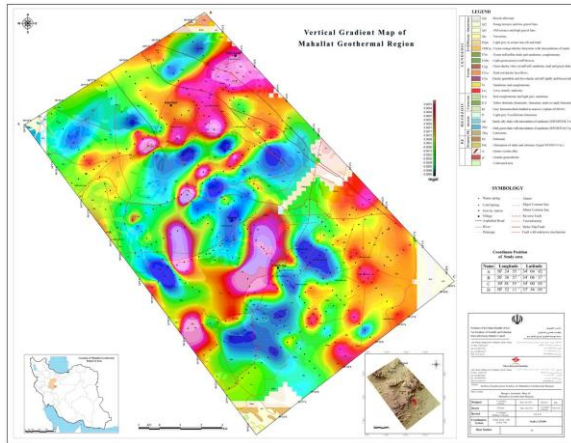
#### ج) تصحیح بوگه

این تصحیح برای در نظر گرفتن ربایش مواد بین ایستگاه و سطح مبنا اعمال می‌شود. اگر ایستگاه اندازه‌گیری در مرکز فلاتی با گسترش افقی زیاد و ضخامت و چگالی یکنواخت باشد قرائت‌های گرانی در اثر این تخته بین ایستگاه و سطح مبنا افزایش می‌یابد. تصحیح بوگه در جهت مخالف تصحیح هوای آزاد بکار می‌رود؛ بدین معنی که وقتی ایستگاه در بالای سطح مبنا باشد کاسته و وقتی در زیر آن باشد، اضافه می‌شود (نوروزی، ۱۳۸۸).

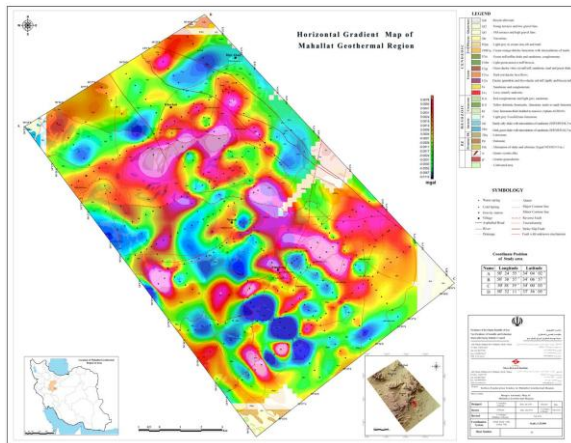
#### د) تصحیح توپوگرافی

وجود تپه‌های بالاتر از ایستگاه سبب می‌شود که مؤلفه شتابی

**بابایی و همکاران، شناسایی مخازن زمین گرمایی با استفاده از مدل سازی وارون داده های گرانی سنجی در چشمه های آبگرم محلات، صفحات ۴۹-۴۳.**



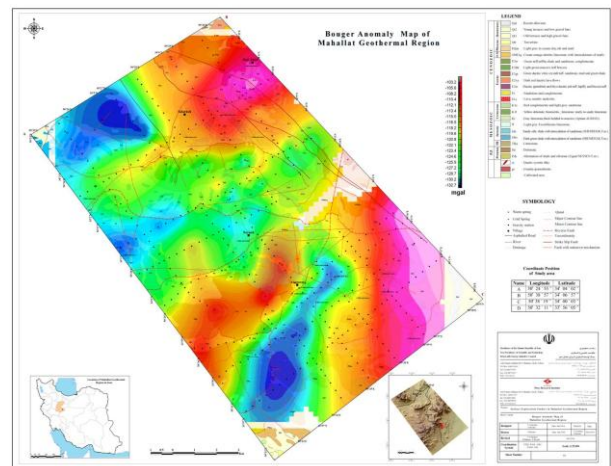
شکل ۴: نقشه مشتق اول قائم به همراه گسل های منطقه که با خط های قرمز مشخص شده است.



شکل ۵: نقشه مشتق اول افقی به همراه گسل های منطقه که با خط های قرمز مشخص شده است.

بررسی زمین شناسی و با توجه به اینکه هدف در این مطالعه یافتن مخازن زمین گرمایی است و به دلیل وجود تخلخل فراوان در این نوع مخزن ها و پائین بودن چگالی سنگ مخزن نسبت به محیط اطراف مناطق مشخص شده در نقشه آنومالی باقیمانده به صورت آنومالی منفی به عنوان نقاط دارای پتانسیل معرفی می گردد به نحوی که این نقاط با توجه به تمامی اطلاعات اعم از زمین شناسی، نقشه های بوگه، ناحیه ای و چشمه سطحی مورد تأیید قرار گرفته است.

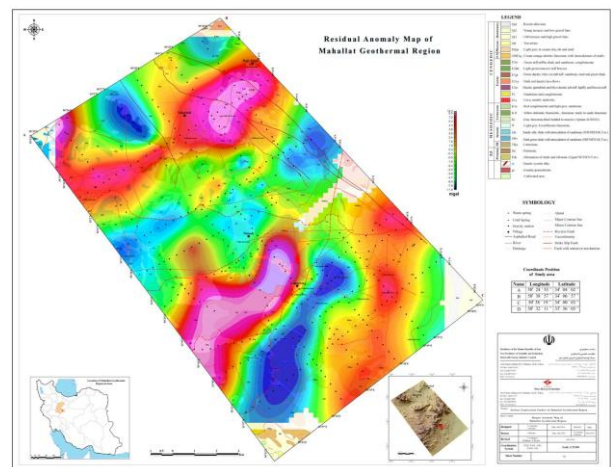
با استفاده از نرم افزار ژئوسافت از آنومالی بوگه، مقادیر مشتق اول (در حالت گرادیان افقی و قائم) شکل های ۴ و ۵ به دست آمد؛ که در این نقشه ها نیز در مشتق اول چه در حالت افقی و چه در حالت قائم بیانگر ارتباط بخش آنومالی منفی با چشمه ها است که تمامی نقشه ها دو گسل شمالی - جنوبی را تأیید نموده و همچنین در بخش آنومالی منفی ارتباط دو گسل با آنومالی ها و چشمه آبگرم به خوبی مشهود است و از طرفی نیز بخش جنوبی منطقه به عنوان آنومالی ژئوترمال را تأیید و همچنین نشان می دهد که این آنومالی بسته نشده و لذا پیشنهاد می گردد کار در بخش جنوبی ادامه یابد.



شکل ۲: آنومالی بوگر در منطقه مورد مطالعه.

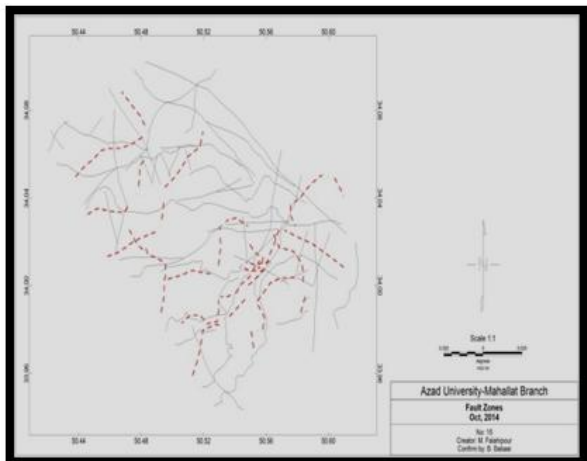
پس از بررسی داده ها و نقشه های آنومالی بوگه، باقیمانده، ناحیه ای، مشتق قائم و افقی و اطلاعات زمین شناسی از دیدگاه زمین گرمایی، بخش جنوبی، شرقی و بخش مرکزی منطقه محلات به عنوان پتانسیل مخزن زمین گرمایی معرفی گردید در این مرحله با استفاده از نرم افزار ژئوسافت عمق حدودی آن ها محاسبه گردید و چند گسل شمال شرقی - جنوب غربی نیز در این قسمت تأیید گردید و از نظر عمقی نیز افتادگی در بخش غربی کاملاً مشهود است و عمق به دست آمده از نقشه سه بعدی حدود ۸۰۰ الی ۲۰۰۰ متر از سطح زمین است.

پس از اتمام مدل سازی های وارون گرانی سنجی بر اساس الگوریتم لی و اولنبرگ، تحلیل اوپلر نیز با توجه به شاخصه های این تحلیل بر روی مدل سازی ها اعمال گردید. در واقع این شاخصه ها بیانگر میزان تضعیف آنومالی با فاصله تعریف می شوند. در این تحلیل شاخصه های با میزان کمتر از یک و یا صفر به عنوان گسل و دایک، برابر با یک استوانه ها و یا تنوره ها و پایپها و برابر با یک و نیم تا دو

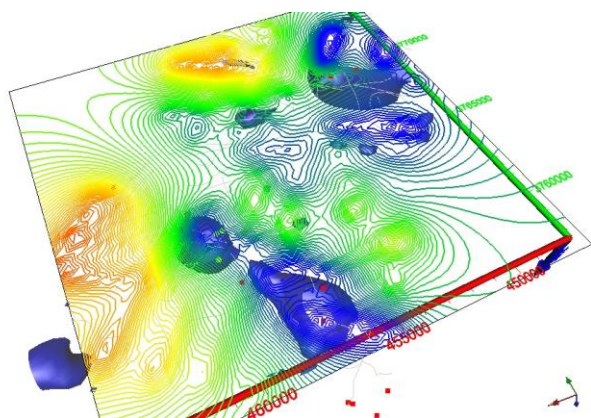


شکل ۳: نقشه آنومالی باقی مانده به همراه گسل های منطقه که با خط های قرمز مشخص شده است.

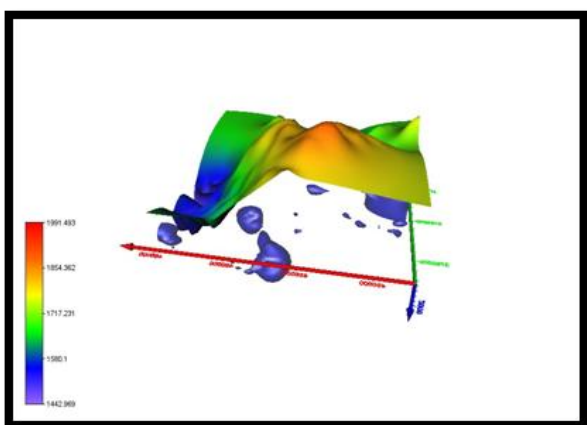
محلات بر اساس روش TDR.



شکل ۷: گسل‌های شناسایی شده (قرمز رنگ) در منطقه آبگرم محلات بر اساس روش TDR.



شکل ۸: محل مخازن زمین‌گرمایی در منطقه محلات و محل چشمه‌ها که با نقاط قرمز و سبز مشخص شده است.



شکل ۹: کشف مخازن زمین‌گرمایی در منطقه و نقشه توپوگرافی منطقه.

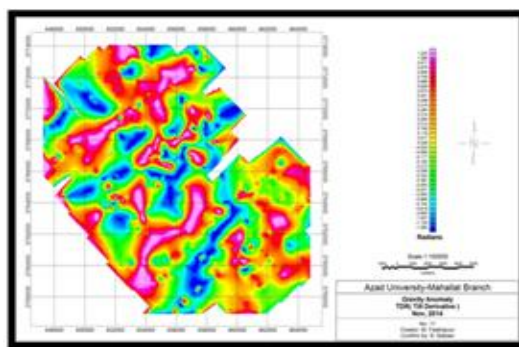
به عنوان سیگنال‌های دایره‌ای بیان می‌شوند؛ اما برای شناخت بیشتر و تعیین دقیق‌تر روندهای ساختاری منطقه با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها که از داده‌های مشتق اول افقی و قائم حاصل می‌شود با عنوان (Tilt Derivative) از داده‌های گرانی است.

این تحلیل بر اساس ترکیب گرادیان افقی، TDR و تحلیل‌گر اوپلر است؛ که روندهای ساختاری مانند گسل‌ها را بهتر آشکار می‌سازد. بر اساس این تحلیل مقادیر ماکزیمم گرادیان افقی معرف لبه‌های آنومالی می‌باشند و تحلیل‌گر اوپلر نیز عمق آنومالی‌ها را مشخص می‌سازد (Saibi et al., 2008).

بر این اساس و با استفاده از مقایسه مشتق قائم (شکل ۴) و گرادیان افقی (شکل ۵) و سپس با استفاده از ترکیب لایه‌ها و آرک تانژانت آن‌ها، مقدار TDR برای منطقه محاسبه گردید (شکل ۶). از این روش برای تعیین دقیق گوشه‌های آنومالی‌ها و تعیین خطوط گسلی استفاده می‌شود.

در شکل ۶ و همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد محدوده صفر درجه معرف گسل‌های اصلی و احتمالی در منطقه هستند؛ که در مقایسه با نقشه زمین‌شناسی می‌توان اکثر گسل‌های منطقه را شناسایی نمود. پس از مقایسه نقشه گسل‌های منطقه که از نقشه زمین‌شناسی و پی‌جویی‌های منطقه‌ای به دست آمده بود؛ با نقشه حاصل از روش TDR، گسل‌های دیگری نیز شناسایی گردید؛ که در شکل ۷ نمایش داده شده است.

با توجه به پردازش‌ها، فیلترینگ و تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی در منطقه، در نهایت محدوده مخزن‌های زمین‌گرمایی منطقه محلات شناسایی شده و در شکل‌های ۸ و ۹ مشخص گردید. همان‌طور که در این اشکال مشخص است، عمق این مخازن تا ۲۰۰۰ متر می‌رسد و با احتمال بسیار زیاد توده نفوذی بسیار بزرگی در اعماق منطقه وجود دارد و یا به عبارت دیگر منبع زمین‌گرمایی در این سامانه، یک توده نفوذی آذرین بزرگ است؛ که احتمالاً آخرین مراحل سرد شدن را طی می‌کند (با توجه به سن ائوسن) و آب چشمه‌های آبگرم محلات به آخرین مراحل سرد شدن ماگمایی این توده مذاب در منطقه و شیب زمین‌گرمایی بیشتر منطقه به واسطه وجود توده نفوذی، مربوط می‌شود.



شکل ۶: گسل‌های شناسایی شده (قرمز رنگ) در منطقه آبگرم

## ۶- نتیجه گیری

پس از برداشت اطلاعات و پردازش آن، نقشه های آنومالی بوگه، ناحیه ای، باقیمانده، مشتق اول تهیه شده و بر اساس آن تعبیر و تفسیر کیفی و کمی صورت گرفت و نتایج زیر به دست آمد.

رسوبات آبرفتی جوان تر، بخش هایی از تراورتن های منطقه را پوشانده اند و این به این معنی است که در زیر منطقه، رسوبات تراورتنی وجود دارد که حاصل از همین چشمه های آبگرم قدیمی است. در شکل ۳ و دیگر مقاطع مدل سازی شده در پروفیل های انتخابی در منطقه، به وضوح زون حاوی رسوبات و آبرفت های جوان با چگالی کمتر از دیگر نواحی مشخص است؛ که سفره های آب را در خود جای داده و توسط گسل های موجود در منطقه که این رسوبات را قطع نموده اند، آب به سطح زمین می رسد.

مخزن زمین گرمایی به احتمال بسیار زیاد در همین رسوبات احتمالاً تراورتنی با عمق ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر قرار دارد و به دلیل وجود سازند قم در منطقه دارای سنگ پوشی از جنس توف و یا مارن (احتمالاً) است؛ که باعث گردیده آب های موجود در مخزن پس از گرم شدن توسط توده نفوذی، راهی به بالا نداشته باشند و به ناچار با فشار از درزه ها و گسل های منطقه به سطح راه یابند.

حضور چندین گسل عمیق در منطقه عامل بسیار خوبی برای نفوذ آب به اعماق و سپس بالا آمدن پس از گرم شدن مجدد در مخزن است. حجم و ضخامت بسیار زیاد تراورتن ها در منطقه شاهد بسیار خوبی از قدمت زیاد این سیستم زمین گرمایی و گسل های منطقه است.

در نهایت با توجه به تحقیقات گرانی سنجی، زمین شناسی و تکتونیک منطقه به نظر می رسد نهشته های آبرفتی و تراورتنی که با چگالی کمتر از دیگر نقاط و با عمق ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر در نقشه ها مشخص می شود، مخزن زمین گرمایی را در محلات تشکیل داده و توده نفوذی که در قسمت شمال شرقی منطقه برونزد دارد و به احتمال بسیار زیاد در عمق نیز بزرگ تر می شود؛ منبع گرما را برای این سیستم زمین گرمایی به وجود آورده است.

## ۷- منابع

نوروزی، غ، ۱۳۸۸، ژئوفیزیک اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران.

Ignacio, C.P. and Bromley, C.J., 1981, Interpretation of Gravity Surveys at Tongonan Geothermal Fiel, Report of Philippine National Oil Company.

Mnjokava, T.T., 2013, Geothermal Exploration in Tanzania-Status Report, Exploration for Geothermal Resources, Kenya.

Murphy, P. and Gwynn, J.W., 1979, Geothermal Investigation of the Warm Springs Fault Geothermal System, Report of Investigation Utah Geological and Mineral Survey.

Oskooi, B., Mohammadi, B. and Mirzaei, M., 2014, A Study on the Geothermal Reservoirs in Mahallat Area, Markazi Province by 1D and 2D Inversion of the Magnetotelluric Data, Iran Geophysics Magazine, 8 (2), 10-25.

Otieno, A.B., Antony, O., Ambusso, W.J. and Gitonga, G.J., 2011, Geophysical Structure of Homa Hills Geothermal Field Based on Gravity and Magnetic Survey, Kenya Geothermal Conference.

Saibi, H., Nishijmia, J., Hirano, T., Fujimitsu, Y. and Ehara, S., 2008, Relation Between Structure and Low-Temperature Geothermal System in Fukuoka City, Southwestern Japan, Earth Planets Space, 60, 821-826.

Talwani, M. and Ewing, M., 1960, Rapid Computation of Gravitational Attraction of Three-Dimensional Bodies of Arbitrary Shape, Geophysics, 25, 203-225.

Talwani, M., Worzel, J. and Landisman, M., 1959, Rapid Gravity Computations for Tow-Dimensional Bodies with Application to the Mendicino Submarine Fracture Zone, Geophysics J. Res, 64, 49-59.

Watt, J.T., Glen, J.M.G., John, D.A. and Ponce, D.A., 2007, Three-Dimensional Geologic Model of the Northern Nevada Rift and the Beowawe Geothermal System, North-Central Nevada, Geosphere, 3 (6), 667-682.



## Recognition of geothermal reservoirs using inverse modeling of gravimetric data in the Mahallat hot springs

Behnam Babaei<sup>1</sup>, Mahdi Falahipour<sup>2</sup> and Hamid Reza Baghzendani<sup>3\*</sup>

1- Assistant Professor, School of Mining and Petroleum, Mahallat Azad University, Mahallat, Iran

2- M.Sc. in Mine Exploration Engineering, Oil Exploration Operations Company, Tehran, Iran.

3- M.Sc. in Geophysics (Gravimetry), Iran

Received: 12 September 2016; Accepted: 8 December 2016

Corresponding author: hbaghzendani@yahoo.com

### Keywords

Gravimetry  
Inverse Modeling  
Geothermal Reservoirs

### Extended Abstract

#### Summary

Gravimetric survey, together with other geophysical methods, could be used for analysis and interpretation of geological structures. For a more comprehensive interpretation, we could employ geophysical data modeling methods. One of these methods is the method of data inverse modeling, which is used to determine the model parameters from the obtained data. In this method, we consider two types of model parameters, namely, physical and geometrical parameters. Consequently, there are two types of inverse modeling for interpretation of potential field data. In the first type, the geometrical parameters are considered to be constants and physical parameters are considered to be variables which need to be determined, while in the second type, physical parameters are constants and geometrical parameters, such as depth, should be calculated. In the present study, gravity data were measured in 380 points in Mahallat area, and then, necessary corrections and appropriate filtering and processing, were applied on the acquired data to determine surface trends. After combining the gravity data with the existing geological information, an attempt was made to find out the effective surface and deep trends on local hot springs, and hence, to determine the possible presence of geothermal reservoirs in the area.

### Introduction

In this paper, after reviewing various geophysical methods in studying geothermal areas of different countries, the geothermal reservoir in the study area is modeled and the depth of the reservoir is estimated using combination of gravity data and geological field observations, and also, determination of tectonic patterns, especially fault zones and fractures in the study area.

### Methodology and Approaches

After processing the obtained gravity data, the Bouguer anomaly map of the area was obtained. Considering the geological information of the area, the anomalous zones of the area were obtained using the trend analysis of the Bouguer anomaly map. The gradient filters derived in vertical and horizontal modes were also applied on the gravity data. Finally, the geothermal potential areas were determined as a result of the modeling and interpretation of the gravity data.

### Results and Conclusions

The presence of geothermal resources in the study area is evident considering hot springs, geological and tectonic observations in the area such as formation of travertine rocks due to possible geothermal reservoirs and outcrops of an intrusive body in the northeast of the area that is very likely larger in depth. Processing, modeling and interpretation of the acquired gravity data, combined with the geological and tectonic information of the study area have led to determination of the geothermal potential zones in the area.