

# مدل سازی و تفسیر داده های مغناطیس زمینی مرتبط با منابع انرژی زمین گرمایی، شمال غرب دلیجان

محمد محمدزاده مقدم<sup>۱\*</sup>، سعید میرزایی<sup>۲</sup>، محمود میرزایی<sup>۳</sup>، بهروز اسکویی<sup>۴</sup> و نسیم حیدریان دهکردی<sup>۵</sup>

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

۲. دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

۳. دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک

۴. استادیار موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۵. مربی پژوهشی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۱۹

## چکیده

وجود چشمه های آبگرم متعدد و همچنین نوع زمین شناسی منطقه شمال غرب دلیجان نشان دهنده حضور یک سامانه زمین گرمایی بزرگ در اعماق منطقه است. به منظور شناسایی دقیق این نواحی و مشخص نمودن ساختارهای زمین گرمایی مولد بی هنجاری های مغناطیسی، عملیات مغناطیس سنجی زمینی در محدوده اطراف چشمه های آبگرم دلیجان در منطقه ای به وسعت حدود ۳۰۰ کیلومتر مربع در سال ۱۳۹۰ انجام شد. تصحیحات و پردازش های لازم بر روی داده ها صورت گرفت تا با استفاده از نقشه های بی هنجاری های مغناطیسی به دست آمده، بتوان به ویژگی های ساختاری سیستم زمین گرمایی منطقه و همچنین عمق منبع زمین گرمایی پی برد. پس از شناسایی بی هنجاری های اصلی منطقه، با استفاده از روش اویلر، عمق و شاخص ساختاری آن برآورد شد. براین اساس منشاء بی هنجاری مغناطیسی اصلی در منطقه، یک توده مغناطیسی بزرگ شبه مخروطی در عمق بیشتر از ۲۰۰۰ متر فرض شد. سپس با استفاده از نتایج بدست آمده از روش اویلر، مدل سازی پیشرو و وارون سازی سه بعدی داده ها به ترتیب با استفاده از نرم افزار ModelVision و کد رایان های Mag3D بر روی داده های انجام شد. کد Mag3D براساس الگوریتم غیر خطی لی- اولدنبرگ عمل می کند به طوری که بهترین جواب ممکن برای توده های مغناطیسی، با روش تکرار حاصل می شود. نتایج این مدل سازی و وارون سازی نشان می دهد که در این منطقه یک بی هنجاری مغناطیسی بزرگ در عمق ۲۵۰۰ تا ۵۰۰۰ متری از سطح زمین وجود دارد که به عنوان منبع سامانه زمین گرمایی منطقه تفسیر می شود. نتایج بدست آمده از این پژوهش انطباق مناسبی با اطلاعات زمین شناسی منطقه مورد بررسی دارد.

**واژه های کلیدی:** مغناطیس سنجی، روش اویلر، مدل سازی، وارون سازی، زمین گرمایی، دلیجان.

\* نویسنده مرتبط mmz140@yahoo.com

## مقدمه

بررسی) می‌باشند؛ اما از آنجاکه بررسی و تفسیر آنها دو بعدی بود، نتایج به‌دست آمده قادر به توصیف مناسبی در مورد نحوه گسترش جانبی سامانه زمین‌گرمایی محلات نبود.

در این بررسی بیش از ۵۰۰۰ ایستگاه مغناطیس در محدودهای به وسعت حدود ۳۰۰ کیلومتر مربع در منطقه زمین‌گرمایی شمال غرب دلیجان در سال ۱۳۹۰ توسط موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و دانشگاه اراک برداشت شد. پس از برداشت داده‌ها، پردازش آنها شامل تصحیح تغییرات روزانه و IGRF بر روی داده‌ها اعمال و تفسیر داده‌ها با استفاده از روش تخمین عمق اوپلر، مدل‌سازی پیشرو توسط نرم‌افزار ModelVision و برگردان سه‌بعدی داده‌ها با کد نوشته‌شده توسط Li and Oldenburg, (1996) در قالب برنامه رایان‌های Mag3D انجام شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت.

## زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

در تقسیم‌بندی زمین‌ساختی ایران، منطقه محلات در زون آتشفشانی ایران مرکزی واقع گردیده است. این زون یکی از زون‌های فعال در طی دوران‌های مختلف زمین‌شناسی است که به شکل مثلث در مرکز ایران قرار گرفته است. مرز غربی زون مذکور به زون دگرگونی سهند- سیرجان محدود می‌گردد و مرز آن در استان مرکزی توسط گسل‌های تلخاب و تبرته مشخص می‌گردد. زون ایران مرکزی از سمت شمال به زون البرز و از سمت جنوب به زون مکران محدود می‌گردد. حد شرقی زون ایران مرکزی چندان مشخص نیست. زیرا برخی از زمین‌شناسان بلوک لوت را جزو ایران مرکزی در نظر گرفته و بعضی دیگر بلوک لوت را قطعه مجزایی از آن می‌دانند. چشمه‌های آبگرم دلیجان در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال غربی شهر دلیجان در میان ارتفاعات بلند منطقه قرار گرفته‌اند و از جمله مهمترین منابع

براساس مطالعات سراسری پتانسیل‌سنجی منابع انرژی زمین‌گرمایی انجام شده توسط سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) از سال ۱۳۷۷ تاکنون، چندین منطقه زمین‌گرمایی مهم در ایران معرفی شده است. منطقه زمین‌گرمایی شمال غرب دلیجان به‌علت وجود چشمه‌های آبگرم متعدد، تکتونیک فعال، نواحی دگرسان‌شده و رخنمون وسیع تراورتن به‌عنوان یکی از مهمترین مناطق زمین‌گرمایی در ایران به‌شمار می‌رود (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲). در سال‌های اخیر فعالیت‌های اکتشافی زیادی توسط سانا و دیگر گروه‌های تحقیقاتی در این منطقه صورت گرفته است. (Porkhial et al. (2013) زمین‌شناسی و ژئوشیمی منطقه را به‌طور کامل بررسی کرده و نشان دادند که فعالیت‌های هیدروترمال در منطقه دلیجان عمدتاً توسط گسل‌های فعال شمالی- جنوبی کنترل می‌شود. مطالعات ژئوشیمیایی، ژئوترموتری و مغناطیس‌سنجی انجام‌شده نشان می‌دهد که منشأ گرمای سامانه زمین‌گرمایی دلیجان ناشی از یک توده نفوذی در حال سردشدن است؛ که در اعماق منطقه نفوذ کرده و دمای آن از دمای کوری پایین‌تر آمده و سبب ایجاد یک بی‌هنجاری مغناطیسی برجسته در نقشه میدان مغناطیسی منطقه شده است (رضایی و همکاران، ۱۳۸۸؛ نورعلیئی و زارعی، ۱۳۸۹؛ نورعلیئی و ابراهیمی، ۱۳۹۱؛ میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲)؛ اما آنها به ارائه توضیح مناسبی از موقعیت، شکل و عمق این توده مغناطیسی نپرداختند. (Oskooi and Darijani و Oskooi et al. (2013) با استفاده از دو نیمرخ ۷ کیلومتری متقاطع شامل ۲۴ ایستگاه مگنتوتلوریک نشان دادند که ساختار سامانه زمین‌گرمایی دلیجان شامل سنگ‌پوش (از عمق ۱۰۰ تا ۶۰۰ متر)، مخزن (از عمق ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر) و منبع (از عمق ۱۰۰۰ متر تا بیشترین عمق قابل

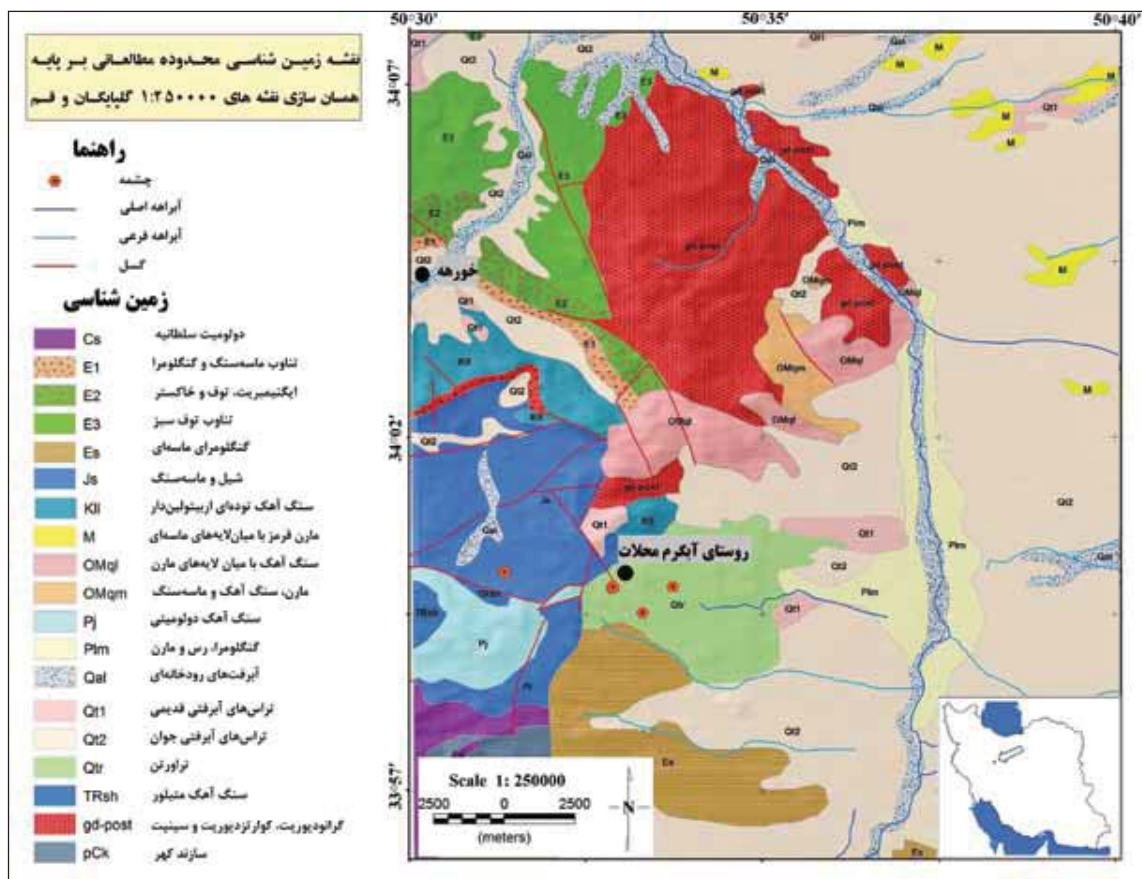
محمد محمدزاده مقدم و همکاران

تنگاتنگی با فعالیت سیالات هیدروترمال دارد. به عبارتی این نوع دگرسانی عمدتاً در دمای بالا اتفاق می‌افتد (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Oskooi et al., 2013).

رضایی و همکاران (۱۳۸۸) مدل فرضی و مفهومی تشکیل چشمه‌های آبگرم منطقه را به این ترتیب ارائه نمودند: ریزش‌های جوی در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های متقاطع (غالباً) و سنگ‌های نفوذپذیر منطقه به اعماق زمین نفوذ می‌کنند. اضافه شدن بخارات و مواد فرار پرفشار، از توده ماگما یا سنگ‌های داغ، از جمله  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ، قابلیت انحلال آنها را در واکنش با سنگ‌های دربرگیرنده از جمله کربنات‌ها افزایش می‌دهد. گرم‌شدن آب‌ها در اعماق در مجاورت ماگمای در حال سرد شدن و یا سنگ‌های بسیار داغ و نیز به دام انداختن گازها و مواد فرار، موجب کاهش چگالی آنها شده و بنابراین آب‌های گرم به دلیل خاصیت شناوری در امتداد گسل‌ها به سمت بالا حرکت می‌کنند. زمانیکه آب صعود می‌کند و در طول مسیر حرکت در سنگ‌های کربناته درجه حرارت خود را از دست می‌دهد، گازها و مواد فرار بیشتری در آب حل شده و به این ترتیب ظرفیت انحلالی آب‌های گرم با ایجاد کارست عمقی بالا می‌رود. البته پدیده اختلاط آب‌های گرم با آب‌های سرد کم‌عمق نیز می‌تواند در فرایند انحلال سنگ‌های کربناته مؤثر باشد. صعود آب‌ها به بخش‌های فوقانی و کاهش فشار هیدرواستاتیک باعث خروج گازها از جمله  $CO_2$  و فوق اشباع شدن آب‌ها از کلسیت و در نتیجه رسوبگذاری و تشکیل تراورتن می‌شود.

آب معدنی استان مرکزی محسوب می‌شوند. منطقه آبگرم دلیجان بخش کوچکی از پهنه ایران مرکزی است؛ که بر روی کمر بند آتشفشانی ارومیه - دختر قرار دارد. شکل ۱ وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و پراکندگی چشمه‌های آبگرم منطقه را نشان می‌دهد.

سازندهای رخنمون‌یافته در منطقه مورد مطالعه عبارتند از: سازند شمشک با لیتولوژی شیل و ماسه‌سنگ، واحد آهک اوربیتولیندار کرتاسه، واحد آهک مارنی سازند قم و در مجاورت این سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های آذرین شامل گرانودیوریت، توف و گدازه. چشمه‌های آبگرم محلات که موقعیت آنها در نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱) با مثلث‌های توپر قرمز رنگ مشخص شده است، از رسوبات تراورتن و آبرفت خارج می‌گردند. رسوبات تراورتن که به مرور زمان در اثر ته‌نشست رسوبات چشمه‌ها به وجود آمده‌اند، اغلب در مجاورت گسل‌های ناحیه تشکیل شده‌اند و ضخامت قابل توجهی دارند. گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گلیپایگان، ضخامت آنها حتی تا ۵۰۰ متر نیز ذکر شده است. گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی که در این منطقه به چشم می‌خورد، در چرخش آب از سطح به عمق و بالعکس نقش مهمی دارند. نکته حائز اهمیت دیگر، دگرسانی‌های فراوان منطقه است. اغلب دگرسانی‌های منطقه از نوع آرژیلیکی- سیریسیتی است؛ ولی دگرسانی از نوع کائولینیتی- آلونیتی نیز در منطقه زیاد مشاهده می‌شود (نورعلی، ۱۳۹۱). این نوع از دگرسانی‌ها، به خصوص نوع اول آن ارتباط



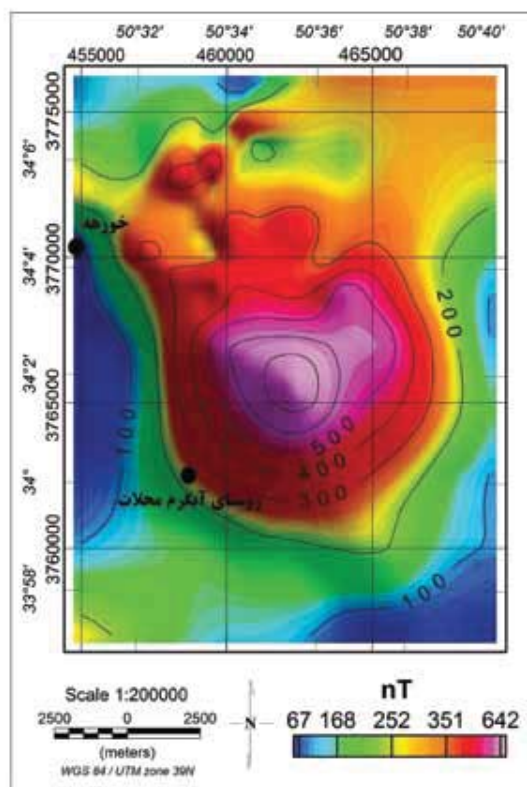
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی (برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ قم و ۱:۲۵۰۰۰۰ گلیپگان)

### برداشت داده‌های مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه

نیز که جزء مهمترین تصحیحات در پردازش داده‌ها است و اثر میدان مغناطیسی منطقه‌ای زمین را حذف می‌کند، بر روی داده‌ها انجام شد.

برای دستیابی به شکل و محل واقعی بی‌هنجاری مغناطیسی از تصحیح انتقال به قطب یا RTP استفاده شد. روش انتقال به قطب در ابتدا توسط Baranov, (1964), Baranov and Naudy, (1957) و Bhattacharyya, (1965) معرفی شد. در این روش با استفاده از روابط ریاضی، زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی منطقه مورد نظر به زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی در قطب شمال مغناطیسی (به ترتیب مقدار صفر و ۹۰ درجه) انتقال داده می‌شود. انجام این تصحیح بر روی داده‌ها سبب می‌شود تا اثر زاویه میل و

عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی در منطقه مورد بررسی در نواحی اطراف چشمه‌های آبگرم در امتداد ۱۲ پروفیل شمالی- جنوبی با طول تقریبی ۲۲ کیلومتر با فاصله ایستگاهی ۵۰ متر انجام شده است. این پروژه در نیمه اول سال ۱۳۹۰ توسط موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و دانشگاه اراک انجام شد. در این مطالعه در مجموع بیش از ۵۰۰۰ ایستگاه مغناطیس‌سنجی برداشت شد. مساحت کل ناحیه مورد مطالعه حدود ۳۰۰ کیلومتر مربع است. پس از اتمام عملیات برداشت داده، تصحیح روزانه که مهمترین تصحیح روی داده‌ها قبل از پردازش است، صورت گرفت. تصحیح IGRF



شکل ۲. نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده در منطقه زمین گرمایی شمال غرب دلیجان پس از اعمال روش RTP

### روش واهمامیخت اوپلر<sup>۱</sup>

روش واهمامیخت اوپلر از گرادایانهای قائم میدان مغناطیسی به منظور برآورد مکان افقی و عمق منشاءهای مغناطیسی استفاده می‌کند. معادله اوپلر در حالت سه بعدی به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Reid et al., 1990):

$$\text{رابطه (۱)} \quad \mathbf{x}-\mathbf{x}_0 \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{y}-\mathbf{y}_0 \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{z}-\mathbf{z}_0 \frac{\partial T}{\partial z} = N(\mathbf{B}-\mathbf{T})$$

که در آن  $(x_0, y_0, z_0)$  مختصات منشاء مغناطیس مشتقات  $(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z})$  میدان مغناطیسی در سه جهت  $N(x, y, z)$  اندیس ساختاری و مربوط می‌شود به نرخ تغییرات میدان با فاصله از منشاء و  $B$  میدان مغناطیسی منطقه‌ای درون پنجره اوپلر می‌باشند. معادله اوپلر با استفاده از یک

انحراف میدان مغناطیسی از شکل بی‌هنجاری مشاهده شده حذف و تفسیر بی‌هنجاری‌های آن آسانتر گردد. در محدوده مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار Geosoft Oasis Montaj 6.4.2 و با در نظر گرفتن زاویه میل و انحراف میانگین  $51/2$  و  $4/1$  درجه، تصحیح RTP بر روی داده‌های شبکه‌بندی شده انجام شد.

شکل ۲ نقشه بی‌هنجاری میدان باقیمانده پس از انجام مراحل پردازشی فوق را به صورت سایه‌دار نشان می‌دهد. بر این اساس، یک بی‌هنجاری مغناطیسی مثبت بزرگ در مرکز محدوده مورد مطالعه وجود دارد. با توجه به ستون رنگی راهنمای نقشه، شدت این بی‌هنجاری مغناطیسی در مرکز آن نسبت به زمینه، بیشتر از  $800$  نانوتسلا می‌باشند. با توجه به دامنه خودپذیری مغناطیسی مواد و کانی‌ها مختلف (Telford et al., 1990)، سنگ‌های آذرین فلسیک رخنمون یافته در قسمت‌های شمالی منطقه (گرانیت و گرانودیوریت در نقشه زمین‌شناسی شکل ۱) نمی‌توانند این چنین میدان مغناطیسی قوی ایجاد کنند؛ بنابراین این دامنه تغییرات شدید میدان مغناطیسی در ارتباط با یک توده سنگ‌های آذرین مافیک در اعماق منطقه تفسیر می‌شود؛ که می‌تواند به عنوان منبع گرمای سامانه زمین گرمایی منطقه عمل کند؛ هرچند تغییرات با دامنه کوتاه‌تر میدان مغناطیسی در قسمت‌های شمالی منطقه را می‌توان به علت حضور حجم زیاد سنگ‌های فلسیک (گرانیت و گرانودیوریت) تفسیر کرد. بر این اساس با استفاده از روش اوپلر، عمق و مکان تقریبی منشاء یا منشاءهای بی‌هنجاری عمده در منطقه برآورد شد و سپس با استفاده از اطلاعات به دست آمده، مدل سازی پیشرو و وارون سازی سه بعدی داده‌ها انجام شد؛ تا موقعیت و شکل دقیق تر منشاء یا منشاءهای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی منطقه برآورد شود.

1. Euler deconvolution

شکل بی‌هنجاری اصلی موجود در منطقه برآورد شد، دامنه عددی بین  $1/6$  تا  $1/9$  است که به‌طور میانگین شاخص ساختاری  $1/75$  به‌عنوان شاخص ساختاری میانگین در منطقه مورد بررسی انتخاب شد. با توجه به جدول ۱، این شاخص ساختاری تقریباً مربوط به یک جسم استوانه قائم (شبه مخروط) می‌باشند. با به نقشه درآوردن نقاط حل اویلر پس از اعمال پنجره‌سازی، بهترین مجموعه نقاط حل مربوط به روش اویلر با اندیس ساختاری  $1/75$  و اندازه پنجره  $400 \times 400$  تعیین شدند؛ که در شکل ۳، نقاط مذکور روی نقشه شدت میدان باقیمانده، تصویر شده و نتایج این تخمین عمق در نقاط مختلف نقشه با دایره رنگی توپر مشخص شده‌اند. عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی نیز در همین شکل در مناطق مختلف به تصویر کشیده شده است. با توجه به نمایش حل‌های اویلر بر روی نقشه مغناطیس باقیمانده منطقه در شکل ۳، روش اویلر بر روی بی‌هنجاری عمده منطقه مورد بررسی، اعماق متفاوتی را نشان می‌دهد؛ به طوری‌که عمق سقف بی‌هنجاری اصلی منطقه در را حدود  $1000$  تا بیشتر از  $3000$  متر قرار می‌دهد؛ اما از لحاظ آماری تعداد نقاط قرمز و سبز بسیار بیشتر از نقاط آبی می‌باشند. بنابراین عمق تقریبی به‌دست آمده با استفاده از این روش را در حدود  $2000$  تا  $2500$  متر در نظر گرفته و از این اطلاعات جهت انجام مدل‌سازی پیشرو استفاده خواهد شد. همچنین همانطور که بیان شد با توجه به شاخص ساختاری به‌دست آمده از اعمال روش اویلر و با توجه به جدول شماره ۱، شکل تقریبی منشاء بی‌هنجاری مغناطیسی عمده در منطقه مورد بررسی شبیه یک استوانه شبه مخروطی است که عمق سقف آن در حدود  $2000$  تا  $2500$  متر از سطح زمین است.

روش خطی کمترین مربعات قابل حل است (Reid et al., 1990). مقدار شاخص ساختاری به هندسه و شکل منشاء بی‌هنجاری مغناطیسی وابسته است و مقدار آن از  $0$  تا  $3$  (در مغناطیس) می‌باشند؛ به‌طوری‌که مقدار صفر مربوط به یک ساختار صفحه‌ای مانند مرز لایه‌های مختلف زمین‌شناسی، مقدار یک مربوط به دایک، مقدار  $2$  مربوط به استوانه و مقدار  $3$  به کره مغناطیسی مربوط می‌شود. Thompson (1982) مقادیر شاخص ساختاری مربوط به اجسام مختلف زمین‌شناسی را ارائه کرده است (جدول ۱).

به‌منظور اعمال روش اویلر بر روی داده‌های منطقه مورد بررسی از نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj 6.4.2 استفاده شد. پس از آماده‌سازی نقشه میدان باقیمانده، نقشه‌های مشتقات میدان مغناطیسی در سه جهت  $(x, y, z)$  که تهیه آن لازمه اجرای فرایند واهمامیخت اویلر است، تهیه شدند. همچنین برای اعمال فرآیند اویلر نیاز به اندیس ساختاری<sup>۱</sup> و اندازه پنجره<sup>۲</sup> حل اویلر است. برای دستیابی به پاسخ‌های مناسب، شاخص‌های ساختاری به‌صورت پیش‌فرض به مسئله داده می‌شود و شاخص ساختاری صحیح‌تر شاخصی در نظر گرفته می‌شود که اولاً بیشترین خوشه‌بندی را در پاسخ‌ها داشته باشد، یعنی پاسخ‌های با عمق یکسان مجاور هم باشند و ثانیاً در مناطقی که از لحاظ آماری بی‌هنجاری وجود ندارد، تعداد نقاط حل اویلر کمینه باشد (Beiki, 2010). از آنجاکه هیچ دید مناسبی از اعماق زمین وجود ندارد برای رسیدن به اندیس ساختاری مناسب، باید اعداد مختلف اندیس ساختاری، مورد آزمایش قرار گیرند. در این مطالعه از مقدار  $0/5$  تا  $3$  با افزودن مقادیر  $0/1$  تخمین این اندیس استفاده شد. با توجه به مطالب مذکور، بهترین شاخص ساختاری که برای

1. Structural index  
2. Window size

محمد محمدزاده مقدم و همکاران

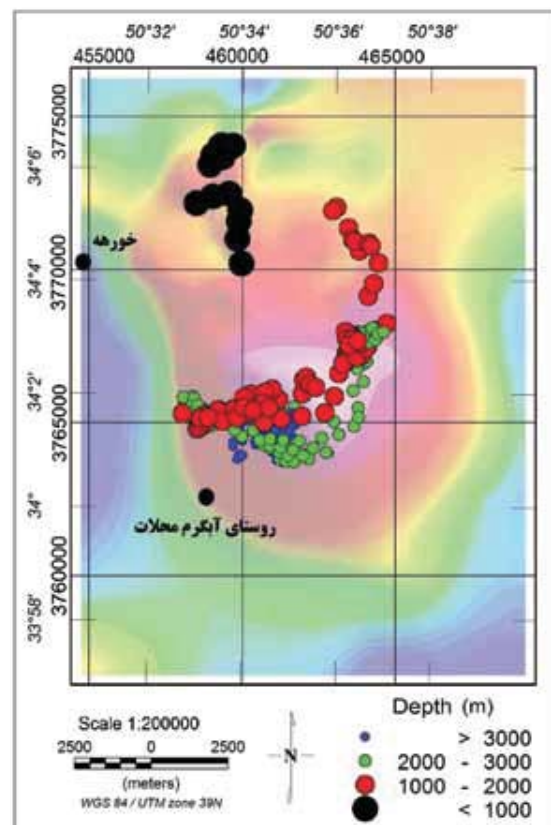
و روش اویلر برآورد شد، مدل سازی سه بعدی منشاء میدان مغناطیسی (توده مغناطیسی مولد بی هنجاری) امکان پذیر است. این رویه در مورد داده های مغناطیسی برداشت شده در منطقه زمین گرمایی دلیجان انجام شد؛ تا موقعیت و شکل هندسی دقیق تر توده منشاء بی هنجاری عمده میدان مغناطیسی زمین مشخص شود. به منظور تولید این مدل سه بعدی، از نرم افزار ModelVision استفاده شد. شکل ۴ نتایج این مدل سازی را نشان می دهد.

بر این اساس دیده می شود که میدان بی هنجاری ایجاد شده توسط اجسام مصنوعی شباهت بسیار زیادی با میدان مغناطیسی مشاهده شده دارد. مقدار خطای عدم برازش این دو شبکه بندی کمینه شده است.

یکی از پارامترهای مهم جهت انجام این مدل سازی پیشرو، برآورد صحیح خودپذیری مغناطیسی توده مولد بی هنجاری است. برای این منظور از جدول خودپذیری سنگ ها و کانی ها ارائه شده توسط Telford et al. (1990) و همچنین بررسی نتایج مدل استفاده شد. در این مدل سازی با استفاده از اطلاعات زمین شناسی منطقه مورد بررسی فرض شد که یک توده آذرین مافیک با خودپذیری در حد گستره ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ در واحد SI مولد بی هنجاری مغناطیسی در منطقه مورد بررسی است؛ در هر بار مدل سازی، یک مقدار خودپذیری در این بازه انتخاب می شد و سپس پاسخ میدان مغناطیسی مدل ساخته شده با پاسخ میدان مغناطیسی مشاهده شده منطقه مقایسه می شد؛ در نهایت پس از انجام چندین بار تکرار مدل سازی، مشاهده شد که انتخاب مقدار خودپذیری ۰/۰۵ سبب ایجاد بیشترین انطباق بین پاسخ مدل و پاسخ واقعی می شود (شکل ۴). در این مدل سازی مقدار این خودپذیری در کل توده ها یکسان در نظر گرفته شد.

جدول ۱. مقادیر شاخص ساختاری (بدون واحد) برای اشکال مختلف زمین شناسی (Thompson, 1982)

شکل ساختار	اندیس ساختاری
همبری	۰
همبری	۰-۵/۰
پله (فروافتادگی) ضخیم	۰/۵
دایک	۱
استوانه قائم	۲-۲۵/۲
استوانه با امتداد نامشخص	۲/۵
استوانه افقی	۲-۲/۷۵
کره	۳



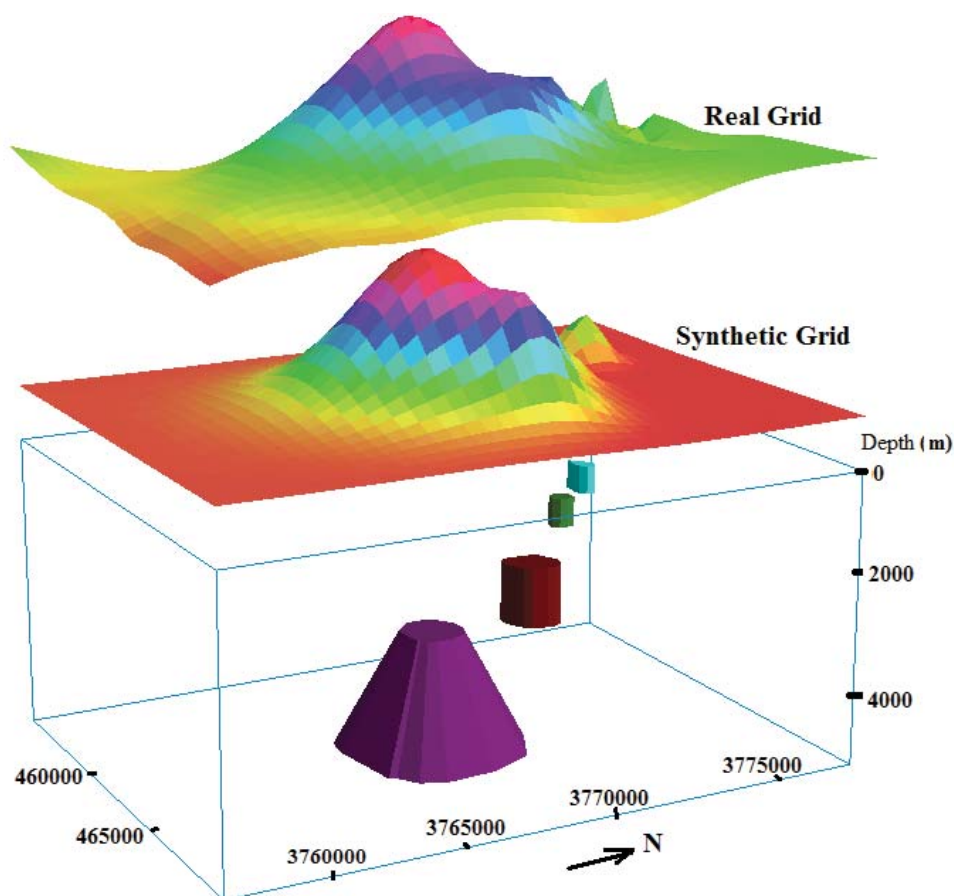
شکل ۳. نقشه شدت میدان باقیمانده به همراه نقاط تخمین عمق اویلر. (به منظور نمایش بهتر نقاط حل اویلر، نقشه میدان مغناطیسی، کمرنگ تر نمایش داده شده است)

## مدل سازی پیشرو

هنگامی که موقعیت تقریبی و عمق منشاء میدان مغناطیسی با استفاده از تحلیل نقشه میدان باقیمانده

سنگ‌های رسوبی دارای خودپذیری مغناطیسی بسیار بالاتری هستند (Telford et al., 1990). همچنین سنگ‌های آذرین اسیدی نسبت به سنگ‌های آذرین مافیک از خودپذیری مغناطیسی بسیار کمتری برخوردارند و بنابراین در نقشه‌های میدان مغناطیسی بی‌هنجاری بسیار ضعیف ایجاد می‌کنند. با توجه به نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱)، سنگ‌های آذرین گرانودیوریت و دیوریت در بخش زیادی از شمال منطقه رخنمون دارند که به‌نظر می‌رسد این سنگ‌ها سبب ایجاد بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ضعیف در شمال نقشه شده است.

براساس نتایج شکل ۴، عامل اصلی مولد بی‌هنجاری مغناطیسی، یک توده شبه‌مخروطی در اعماق حدود ۳ تا ۵ کیلومتری از سطح زمین است (جسم بنفش‌رنگ در شکل ۴) که با توجه به خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها، این توده دارای ترکیب سنگ‌های آذرین مافیک می‌باشند. اجسام کوچک‌تری که در قسمت شمال توده اصلی در بلوک مدل شکل ۴ مشاهده می‌شود، احتمالاً مربوط به دایک‌ها و یا توده‌های آذرین نفوذی کوچک در سنگ‌های رسوبی شمال منطقه مورد بررسی است. به‌طور کلی سنگ‌های آذرین نسبت به



شکل ۴. مدل مصنوعی تولید شده برای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در منطقه مورد بررسی. خودپذیری مغناطیسی این اجسام در حد ۰/۰۵ در واحد SI (سنگ‌های آذرین مافیک) در نظر گرفته شده است



## وارون سازی سه بعدی<sup>۱</sup>

استفاده شد.

الگوریتم عرضه شده از سوی لی- اولدنبرگ از رابطه ۲ آغاز می شود:

$$d=Gk \quad \text{رابطه (۲)}$$

که  $d$  مربوط به داده های واقعی،  $G$  ماتریس حساسیت و  $k$  خودپذیری مغناطیسی سنگ ها در یک بلوک متعامد و شبکه بندی شده به منظور انجام وارون 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 باز تولید شود. فرض کنید تابع هدف به صورت زیر باشد:

$$\begin{aligned} \phi_m(m) = & \alpha_s \int_v w_s \{w(r)(m(r) - m_0)\}^2 dv \\ & + \alpha_x \int_v w_x [\partial w r / \partial x] [m r - m_0]^2 dv \\ & + \alpha_y \int_v w_y [\partial w r / \partial y] [m r - m_0]^2 dv \\ & + \alpha_z \int_v w_z [\partial w r / \partial z] [m r - m_0]^2 dv, \quad \text{رابطه (۳)} \end{aligned}$$

که در آن  $m(r)$  مربوط به داده های واقعی و  $m_0$  مربوط داده های مدل هستند. همچنین توابع  $w_x$ ،  $w_y$ ،  $w_z$  و  $w_s$  مستقل های فضایی هستند در حالیکه ضرائب  $\alpha_x$ ،  $\alpha_y$ ،  $\alpha_z$  و  $\alpha_s$  بر درجه اهمیت نسبی متفاوت مولفه ها در تابع هدف تأثیر می گذارند. در این فرمول تابع یک تابع تعمیم یافته وزندهی عمقی است. هدف این تابع خنثی کردن میرایی هندسی خودپذیری مغناطیسی با فاصله از یک مکان مشاهده است؛ به طوری که این خودپذیری مغناطیسی به دست آمده در نزدیکی ایستگاه های اندازه گیری متمرکز نشود.

مقدار عدم برازش بین داده های مشاهده شده و داده های محاسبه شده با استفاده از رابطه ۴ به دست می آید:

$$\phi d = w_d Gk - d_{obs}^2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

به منظور بررسی سه بعدی ویژگی های زمین شناختی سامانه زمین گرمایی دلیجان، علاوه بر مدل سازی پیشرو، برگردان سه بعدی داده ها توسط الگوریتم Li and Oldenburg, (1996) and Oldenburg, (1996) نیز در قالب نرم افزار UBC Mag3D انجام شد. استفاده از این الگوریتم جهت انجام وارون سازی داده های مغناطیسی در مناطق مختلف دنیا نتایج بسیار سودمندی را ارائه داده است (به عنوان نمونه: Loura and Mantovani, 2012; Riberio et al., 2013; Oldenburg and Pratt, 2007; Kalate and Kahoo, 2013). در رویکرد برگردان عرضه شده از سوی Li and Oldenburg (1996) ابتدا در مورد متغیری که تفسیر براساس آن صورت خواهد گرفت، تصمیم گیری می شود که تابعی از خودپذیری مغناطیسی مورد جستجو می باشند. سپس یک تابع هدف چند مؤلفه های که دارای انعطاف پذیری کافی برای تولید انواع مدل باشد، ساخته می شود. این تابع هدف، ناهموازی ها را در سه جهت فضایی جبران می کند و یک وزندهی سه بعدی براساس توزیع خودپذیری مغناطیسی با عمق دارد. تابع های کمکی وزندهی 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 یا درک کمی و کیفی مفسر از ساختار زمین شناسی و ارتباط آن با خودپذیری مغناطیسی 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. حدس های اولیه در مورد هدف مورد بررسی از جمله خودپذیری مغناطیسی، موقعیت و شکل آن جهت انجام این وارون سازی، ما را در رسیدن به یک مدل واقعی تر هدایت می کنند. بنابراین به منظور وارون سازی دقیق داده ها از نتایج به دست آمده از روش های قبل

1. 3D inversion

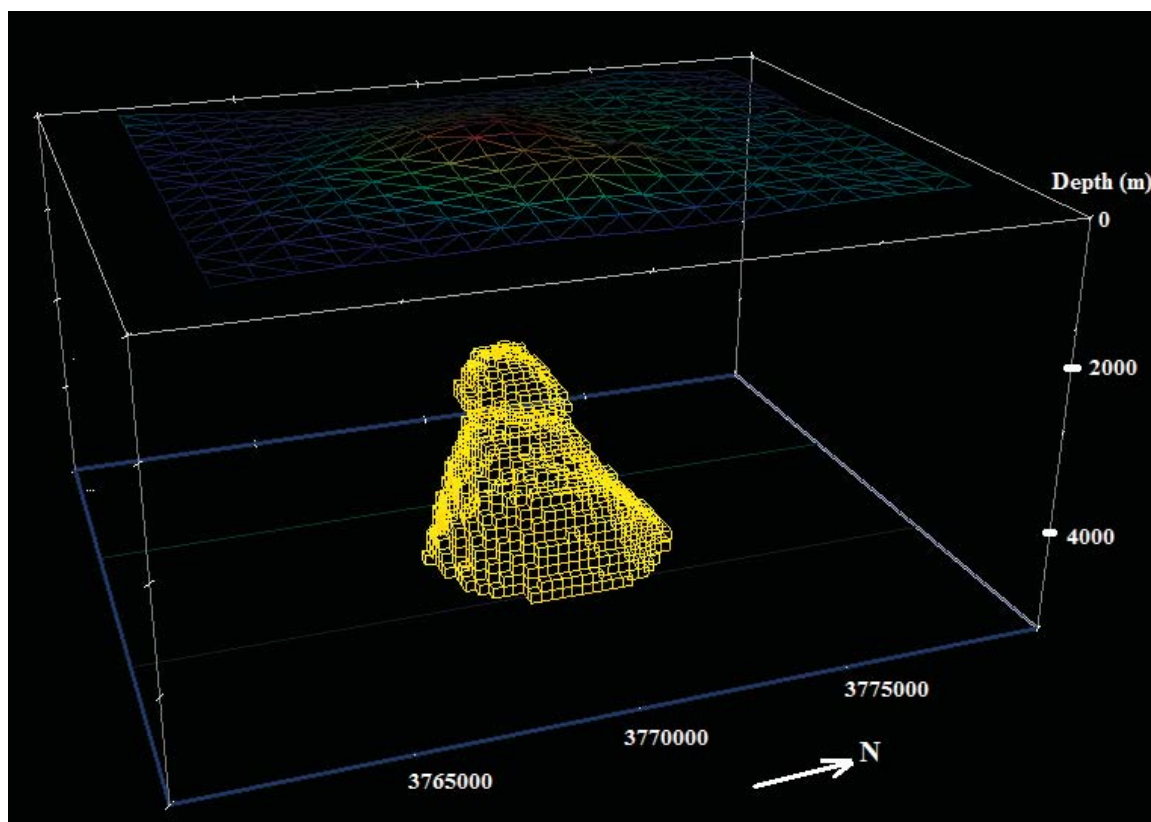
تباين خودپذیری مغناطیسی بیشتر از ۰/۰۵ در واحد SI به‌عنوان نماینده سنگ‌های آذرین مافیک در منطقه مورد بررسی در نظر گرفته شده و در شکل ۵ به نمایش درآمده است. با مقایسه نتایج این مدل‌سازی با نتایج مدل‌سازی پیشرو، به نظر می‌رسد اجسام کوچک‌تری که در شمال منطقه در شکل ۴ مشاهده شدند، نمی‌توانند بی‌هنجاری قابل ملاحظه‌ای را ایجاد کنند بنابراین در مدل به‌دست آمده از الگوریتم Li and Oldenburg (1996) مشاهده نمی‌شوند (شکل ۵). اما موقعیت و عمق توده اصلی منطقه در هر دو مدل انطباق مناسبی با هم دارند. بنابراین منبع سامانه زمین‌گرمایی دلیجان مربوط به این توده بزرگ می‌باشند. با توجه به نتایج وارون‌سازی لی-اولدنبورگ، عمق به‌دست آمده برای این توده از ۲/۵ تا ۵ کیلومتری از سطح زمین می‌باشند (شکل ۵).

که در آن  $w_d$  به عنوان یک ماتریس قطری است که عنصر  $i$  آن، انحراف استاندارد  $i$  امین داده،  $d_{mod}$  چگالی محاسبه شده و  $d_{obs}$  چگالی برداشت شده است. هدف از این معادله وارون (رابطه ۴)، کمینه‌کردن اختلاف بین تابع هدف و خطای برازش داده‌ها است (رابطه ۵):

$$\Phi = \Phi_d + \mu \Phi_m, \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن  $\mu$  پارامتر تنظیم‌کننده است. جزئیات و توصیف‌های بیشتر در مقاله Li and Oldenburg (1996) موجود است.

شکل ۵ نتایج مدل‌سازی داده‌ها با استفاده از این الگوریتم را تا عمق ۵ کیلومتری از سطح زمین نشان می‌دهد. با استفاده از نتایج مدل‌سازی پیشرو و همچنین خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها،



شکل ۵. نمایش مدل سه‌بعدی سنگ‌های با تباين خودپذیری مغناطیسی بیشتر از ۰/۰۵ در واحد SI در منطقه زمین‌گرمایی دلیجان تا عمق پنج کیلومتری از سطح زمین، با استفاده از (Li and Oldenburg (1996)

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش داده‌های مغناطیس مربوط به یکی از مناطق زمین‌گرمایی مهم در ایران واقع در شمال غرب شهر دلیجان مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفت. هدف اصلی از این پژوهش، شناسایی منبع (های) زمین‌گرمایی در منطقه مورد بررسی به منظور هدف‌گذاری چاه‌های اکتشافی می‌باشند. نقشه میدان مغناطیسی باقیمانده نشان‌دهنده وجود یک بی‌هنجاری بزرگ عمده در منطقه است؛ که در سطح زمین هیچ رخنمون قابل توجهی مربوط به آن مشاهده نمی‌شود. به نظر می‌رسد این بی‌هنجاری مربوط به سنگ‌های آذرینی است که در اعماق منطقه در سنگ‌های رسوبی نفوذ کرده و سبب ایجاد این بی‌هنجاری مغناطیسی شده است. با توجه به شواهد زمین‌شناسی به نظر می‌رسد که این توده پس از نفوذ در منطقه به مرور زمان گرمای خود را از دست داده و دمای آن از نقطه کوری عبور کرده است و سبب ایجاد این بی‌هنجاری مغناطیسی عمده در منطقه شده است. این بی‌هنجاری عمده به‌عنوان منبع سامانه زمین‌گرمایی دلیجان در نظر گرفته شد و بنابراین به‌منظور شناسایی دقیق آن، از روش اویلر استفاده شد تا موقعیت افقی و عمق آن برآورد شود. سپس با استفاده از نتایج اولیه به‌دست آمده از روش اویلر، امکان مدل‌سازی پیشرو و وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌ها توسط الگوریتم لی و اولدنبورگ فراهم شد. نتایج وارون‌سازی داده‌ها نشان می‌دهد که منبع سامانه زمین‌گرمایی در مرکز منطقه مورد بررسی و در عمق بین ۲۵۰۰ تا ۵۰۰۰ متری قرار دارد. نشانه‌های سطحی انرژی زمین‌گرمایی شامل موقعیت چشمه‌های آبگرم دلیجان و محدوده‌های دگرسان شده مرتبط با سیالات گرمایی، نتایج به‌دست آمده از روش مغناطیس‌سنجی را تایید می‌کند.

## منابع

- نخستین کنفرانس سراسری آب‌های زیرزمینی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان.
- میرزایی، م.، محمدزاده مقدم، م.، اسکویی، ب.، قدیمی، ف. و جزایری، س.، ۱۳۹۲. پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس زمینی مرتبط با منابع زمین‌گرمایی با استفاده از دو روش اویلر و AN-EUL. م. فیزیک زمین فضا، ۳۹، ۴، ۹۶-۸۳.
- مهجلی، م. و افتخارنژاد، ج.، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی قم و گلپایگان مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نورعلیئی، ج.، ۱۳۹۱. گزارش زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه زمین‌گرمایی محلات. پژوهشگاه نیرو. ۱۱۴.
- نورعلیئی، ج. و زارعی، ح.، ۱۳۸۹. گزارش مطالعات زمین‌شناسی در منطقه زمین‌گرمایی محلات. پژوهشگاه نیرو. ۱۰۹.
- نورعلیئی، ج. و ابراهیمی، ح.، ۱۳۹۱. گزارش مطالعات ژئوشیمیایی در منطقه زمین‌گرمایی محلات. پژوهشگاه نیرو. ۸۳.
- Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravitometric anomalies. *Geophysics*, 22, 359-383.
- Baranov, V. and Naudy, H., 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29, 67-79.
- Beiki, M., 2010. Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location. *Geophysics*, 75, 6, 159-174.
- Bhattacharyya, B.K., 1965. Two dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation. *Geophysics*, 30, 829-857
- 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.
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1996.

- رضایی، م.، قربانی، ص. و بومری، م.، ۱۳۸۸. هیدرژئولوژی و ژئوترموتری چشمه‌های آبگرم محلات،

- 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61, 394-408.
- Louro, V.H.A. and Mantovani, M.S.M., 2012. 3D inversion and modeling of magnetic and gravimetric data characterizing the geophysical anomaly source in Pratinha I in the southeast of Brazil. *Journal of Applied Geophysics* 80, 110-120.
  - 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.
  - Oskooi B, Darijani M, and 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.
  - Oskooi, B. and Darijani, M., 2013. 2D inversion of magnetotelluric data from Mahallat geothermal field in Iran using finite element approach. *Arabian. Journal of Geosciences*, 35, 122-134.
  - Porkhial, S., Nouraliee, J., Rahmani, M. and Ebrahimi, D., 2013. Resource assessment of Vartun geothermal region, central Iran. *Journal of Tethys*, 1, 29-40.
  - Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J. and Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91
  - Riberio, V.B., Louro, V.H. and Mantovani, M.S., 2013. 3D Inversion of magnetic data of grouped anomalies Study applied to São José intrusions in Mato Grosso, Brazil. *Journal of Applied Geophysics* 93, 67-76.
  - Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. 358.
  - Thompson, D.T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37.