

مدل سازی بی‌هنجاری‌های ژئومغناطیس به منظور شناسایی بهترین محل برای احداث سازه‌های مدفون مغناطیسی در جنوب زنجان

وحید بهتویی^۱، محمدیاسر رادان^{۲*}

۱- کارشناس ارشد ۲- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۴/۰۱/۱۹، پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۳)

چکیده

به منظور شناسایی بهترین محل برای احداث سازه‌های مدفون دربرگیرنده تجهیزات و تأسیسات دارای خواص مغناطیسی، بی‌هنجاری‌های زیرسطحی در جنوب استان زنجان با پیمایش‌های ژئومغناطیسی برداشت و مورد بررسی قرار گرفت. برآورد عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با استفاده از روش واهمامیخت اولر استاندارد انجام شد. پس از اعمال روش اولر به نقشه ادامه فراسو، سه بازه عمقی برای بی‌هنجاری‌ها به دست آمد. نتایج به دست آمده از تعبیر و تفسیر کیفی نمایان‌گر یک روند کلی شمال غربی- جنوب شرقی از بی‌هنجاری‌ها در منطقه مورد مطالعه است. مدل‌سازی بی‌هنجاری‌ها با نرم‌افزار مدل ویژن انجام شده و بهترین مناطق جهت احداث سازه‌های مدفون از نظر رعایت اصول اختفای مغناطیسی پیشنهاد شد.

کلیدواژه‌ها: بی‌هنجاری‌های مغناطیسی زیرسطحی، ژئومغناطیس، روش واهمامیخت اولر، مدل‌سازی، سازه‌های مدفون مغناطیسی

Geomagnetic Anomalies Modeling to Determine the Best Location for Construction of Buried Magnetic Structures in South of Zanjan

V. Behtooei, M. Y. Radan*

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 08/04/2015; Accepted: 02/02/2016)

Abstract

In order to identify the best location for the construction of underground structures including equipment and installation of subsurface, magnetic anomalies in the southern part of Zanjan provinc by geomagnetic surveys were determined and investigated. Estimation of the magnetic anomalies was performed using standard Euler method. Then, to map upward constitution, three depth intervals were calculated for the anomaly. The result of qualitative interpretation represents a northwest-southeast trend of the anomaly on the study area. Anomaly modeling was performed using Vision software and the best locations for the construction of underground structures in accordance with the principles of magnetic hiding were proposed.

Keywords: Subsurface Magnetic Anomalies, Geomagnetic, Euler Deconvolution Method, Modeling, Buried Magnetic Structures

*Corresponding Author E-mail: radan@mut.ac.ir

۱. مقدمه

تقسیم‌بندی کرد [۱۴]. محققین زیادی از این روش مدل‌سازی در تفسیر داده‌های میدان‌های پتانسیل استفاده کرده‌اند [۱۹-۱۵]. در زمینه به‌کارگیری مدل‌سازی وارون در تفسیر نتایج میدان‌های پتانسیل، الگوریتم‌های متفاوتی ارائه شده است [۲۲-۲۰]. امروزه مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های میدان‌های پتانسیل به طور گسترده برای تعیین پارامترهای فیزیکی و هندسی جسم هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله مرادزاده، دولتی و طیبی [۲۳] داده‌های مغناطیسی ذخیره آهن اجت آباد، شمال خاور سمنان را تفسیر و مدل‌سازی کردند. آسنسیو، ارمو و استارکل [۲۴] داده‌های گرانی و مغناطیسی منطقه مالینگن^۹ در مرکز سوئد را مدل‌سازی کردند. رایسکیلا، پلادو، روتسالاینین و پسونین [۲۵] یک مدل‌سازی ژئوفیزیکی حاصل از برخورد شهاب‌سنگ در منطقه کیورسلکا^{۱۰} فنلاند را ارائه دادند. رناتو کردانی [۲۶] داده‌های مغناطیسی ایالت پایو^{۱۱} در برزیل به منظور اکتشاف ذخایر آهن را مدل‌سازی کرده است. در پژوهش حاضر، ابتدا پردازش اولیه داده‌های ژئومغناطیس واقعی منطقه مورد مطالعه توسط نرم‌افزار ژئوسافت^{۱۲} مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس بی‌هنجاری‌های شناسایی شده با به‌کارگیری روش وارون پارامتری، توسط نرم‌افزار مدل‌ویژن^{۱۳} مدل‌سازی می‌شود.

۲. روش تحقیق

محدوده مورد مطالعه در جنوب شهرستان زنجان واقع شده که دو ساختار زمین‌شناسی را دربر دارد. شکل (۱) نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مورد نظر را نشان می‌دهد که خطوط زرد رنگ موجود در آن پروفیل‌های برداشتی در منطقه مورد مطالعه هستند. قسمت جنوبی محدوده را سازندهای گرانیتی دوران تحت عنوان *gd* دربر گرفته‌اند که در بررسی‌ها از لحاظ شدت و تغییرات مغناطیسی، تغییرات محسوسی را شامل نمی‌شوند. در بخش شمالی‌تر محدوده، ساختارهای حاوی سنگ‌های اسلیتی و فیلیتی سازند کهر مشاهده می‌شوند. این مجموعه دگرگونه در نقشه زمین‌شناسی شکل (۱) تحت عنوان Mt_2 مشخص شده است.

رخنمون مگنتیتی گسترش‌یافته در جهت شمال غربی- جنوب شرقی در امتداد کوهزایی در درون Mt_2 ، انگیزه اصلی انجام مطالعات در این منطقه بود. برای اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی، از یک مغناطیس‌سنج پروتون مدل GSM-19T

روش مغناطیس‌سنجی از کارآمدترین روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده جهت اکتشاف ذخایر مغناطیسی است. با استفاده از این روش می‌توان در مرحله اکتشاف مقدماتی که هیچ‌گونه اطلاعات قبلی موجود نمی‌باشد، با صرف وقت و هزینه اندک، محل و مشخصات ساختارهای زیرسطحی را تعیین کرد [۱]. امروزه مغناطیس‌سنجی علاوه بر اکتشاف مربوط به کاوش‌های نفتی و اکتشاف منابع معدنی، در تعیین محل اجسام مدفون مغناطیسی کاربرد دارد [۲]. یکی از مسائل مهم پس از اعمال تصحیحات مورد نیاز (تصحیح روزانه، عرض جغرافیایی، توپوگرافی و ارتفاع) و عملیات پردازشی گوناگون از قبیل برگردان به قطب^۱، ادامه فراسو^۲، ادامه فروسو^۳، روش‌های مشتق^۴ و سیگنال تحلیلی^۵، تعیین پارامترهای هندسی و فیزیکی است که این امر با مدل‌سازی‌های مناسب امکان‌پذیر است. به دلیل اهمیت کاربرد داده‌های مغناطیسی، تاکنون تلاش‌های زیادی برای بهبود دقت روش‌های برآورد عمق صورت گرفته است. روش واهامیخت اولیه^۶، یکی از روش‌های خودکار برای تفسیر داده‌های مغناطیسی است که اساس آن به‌کارگیری مشتق‌های میدان در معادله همگن اوپلر است. تامپسون از این روش برای برآورد عمق و اندیس ساختاری ساختارهای دوبعدی استفاده کرد [۳].

این روش توسط دیگر محققین نیز تعمیم داده شده است [۱۰-۴]. امروزه این روش به طور گسترده برای تخمین عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد. افراد مختلفی از این روش برای مطالعه عمق آنومالی‌های مغناطیسی در مطالعات صحرایی و هوایی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، اروک و سلیم از روش اوپلر به همراه مشتق تیلت و تبدیل موجک غیر پیوسته برای تفسیر داده‌های مغناطیسی استفاده نموده‌اند [۱۱]. صالح و پاستکا در شمال ناحیه ریفت دریای سرخ مصر برای تخمین عمق ساختارهای فعال از روش‌های ژئوفیزیکی و روش اوپلر بهره گرفته‌اند [۱۲].

ناجی، امجد و الوندی [۱۳] روش اوپلر استاندارد برای تخمین عمق داده‌های مغناطیس در منطقه بیجار ایران به‌کار برده‌اند. مدل‌سازی داده‌های میدان‌های پتانسیل با روش‌های متفاوتی صورت می‌گیرد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته پیشرو^۷ و وارون^۸

¹ Reduce to Magnetic Pole

² Upward Continuation

³ Downward Continuation

⁴ Derivative Methods

⁵ Analytical Signal

⁶ Euler Deconvolution

⁷ Forward Modeling

⁸ Inverse Modeling

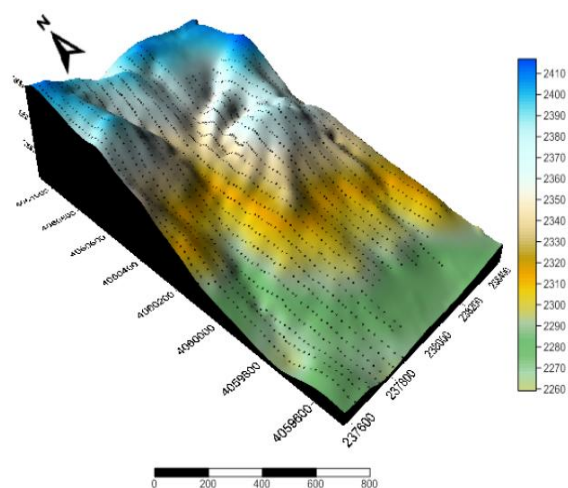
⁹ Målingen

¹⁰ Keurusselkä

¹¹ Piauí State

¹² Geosoft Oasis Montaj 6.4.2

¹³ Modelvision Pro



شکل ۲. موقعیت پروفیل‌ها بر روی نقشه توپوگرافی

۱-۲. پردازش اولیه داده‌های ژئومغناطیس منطقه مورد مطالعه

در روش کیفی اطلاعاتی از مناطق امیدبخش، بافت بی‌هنجاری‌ها، گسترش بی‌هنجاری‌ها و عمق نسبی آن‌ها به دست می‌آید [۲۸]. با توجه به ناچیز بودن تغییرات روزانه در مدت زمان انجام برداشت، از اعمال این تصحیح صرف نظر شده و نقشه‌ها با استفاده از میدان مغناطیسی کل^۲ در هر ایستگاه، ترسیم شد.

شکل (۳) نقشه شدت کل میدان مغناطیسی^۳ در جهت محور قائم را نشان می‌دهد. شدت میدان مغناطیسی در بخش‌های فاقد بی‌هنجاری، در گستره عددی حد زمینه قرار دارد. اما در بخش‌های بی‌هنجار، دوقطبی شدن میدان سبب ایجاد چنین اختلافی می‌شود. به این مفهوم که بخش‌های بی‌هنجار دارای بیشترین و کمترین مقدار شدت میدان مغناطیسی هستند که این تغییرات در رابطه با میزان حضور کانی‌های مغناطیسی با عمق‌های مختلف می‌باشد. بهترین روش عملی اختفای سازه‌های مغناطیسی مدفون از دید آشکارسازها، پوشش مناسب به وسیله سنگ درون‌گیر است.

چنانچه خودپذیری سنگ درون‌گیر نزدیک به خودپذیری هدف مورد نظر باشد می‌توان هدف مورد نظر را از دید مغناطیس‌سنج‌ها پنهان کرد و دلیل آن تأثیرگذاری خودپذیری مغناطیسی سنگ‌های دربرگیرنده بر داده‌های دریافتی توسط سنجنده‌ها است و چون این خودپذیری نزدیک به خودپذیری هدف مدفون است بنابراین تفکیک آن‌ها کار دشواری خواهد بود [۲۹]. در واقع همین بخش‌های بی‌هنجار، مکان‌های مناسب برای احداث سازه‌های مغناطیسی هستند. بنابراین اگر بخواهید بر روی

ساخت شرکت کانادایی جمسیس^۱ استفاده شد. تعداد ۲۳ پروفیل با فاصله جدایش ۴۰ متر از یک‌دیگر برداشت شد که فاصله ایستگاه‌های برداشت در مناطق با تغییرات مغناطیسی آرام، ۲۰ تا ۲۵ متر بوده و در مناطق با تغییرات مغناطیسی نسبتاً زیاد که به نوعی مستعد کانی‌زایی می‌باشند، تا حدود ۱۰ متر کاهش یافته است. ابعاد پهنه مورد مطالعه ۸۸۰ در ۱۶۰۰ متر بود که در مجموع ۲۰۰۰ نقطه به منظور پوشش پهنه مورد مطالعه برداشت شد. شکل (۲) موقعیت پروفیل‌ها بر روی نقشه توپوگرافی را نشان می‌دهد [۲۷].

برای مدل‌سازی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی ابتدا باید وضعیت بی‌هنجاری‌ها را به طور کیفی مورد بررسی قرار داد. به منظور بهره‌برداری‌های مختلف و شناخت کامل کانسار پردازش‌های لازم بر روی داده‌های خام برداشت شده اعمال شد و سپس نقشه‌های مربوط به آن تهیه شد و در نهایت مدل‌سازی انجام گردید.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مورد مطالعه

^۲ Total Magnetic Field

^۳ Total Magnetic Field Intensity

^۱ Gemsys

۲-۲. روش واهمامیخت اولبر استاندارد

روش واهمامیخت اولبر، یکی از روش‌های تخمین عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی است که اساس آن به‌کارگیری مشتق‌های میدان در معادله همگن اولبر است. رابطه کلی واهمامیخت اولبر برای میدان T اندازه‌گیری شده در نقطه (x_i, y_i, z_i) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$(x_i - x_0) \frac{\partial T_i}{\partial x} + (y_i - y_0) \frac{\partial T_i}{\partial y} + (z_i - z_0) \frac{\partial T_i}{\partial z} = -N(T_i - B) \quad (1)$$

که در آن، (x_i, y_i, z_i) پارامترهای معلوم هستند.

در رابطه بالا، با معلوم بودن N، پارامترهای (x_0, y_0, z_0) که موقعیت چشمه تولید کننده بی‌هنجاری هستند با استفاده از روش کمترین مربعات به‌دست خواهند آمد. درجه همگنی N به صورت شاخص ساختاری^۱ (SI) بیان می‌شود. به عبارتی SI، نرخ به صفر رسیدن شدت میدان مغناطیسی یا گرانشی نسبت به فاصله از چشمه و معیاری برای تبعیض قائل شدن بین شکل‌های متفاوت چشمه است. برای مناطقی که ساختار زمین‌شناسی قدیمی دارند، این عدد بین ۰ و ۱ و برای مناطقی که شاهد پدیده‌های زمین‌شناسی جوان‌تری هستند، بین ۰ و ۳ خواهد بود [۳۲]. در جدول (۱) مقادیر N برای شکل‌های مختلف زمین‌شناسی آورده شده است.

جدول ۱. مقادیر N (بدون واحد) برای شکل‌های مختلف زمین‌شناسی [۱۳].

مقدار N (بدون واحد)	شکل زمین‌شناسی
۰	کانکتک با گسترش عمقی بی‌نهایت
۱	سیل و دایک
۲	استوانه قائم
۳	دوقطبی کروی

۲-۳. مدل سازی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی

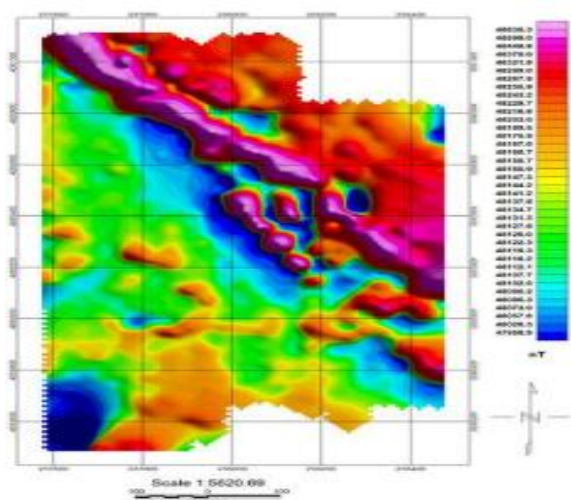
پس از بررسی‌های کیفی از منطقه مورد مطالعه، برای دستیابی به نتایج کمی و با قابلیت اعتماد بیشتر و به منظور تعیین مناسب‌ترین محل برای احداث سازه‌های مغناطیسی، با استفاده از نرم‌افزار مدل‌ویژن، بی‌هنجاری‌های زیرسطحی منطقه به روش مدل سازی پیشرو و معکوس مدل سازی می‌شود.

این نقشه به عنوان فرض اولیه، منطقه مورد مطالعه را بررسی کنید، با توجه به راستای قرارگیری دوقطبی، مناطق در راستای شمال غربی - جنوب شرقی نقشه مکان‌های مناسبی برای احداث سازه‌های مورد نظر هستند.

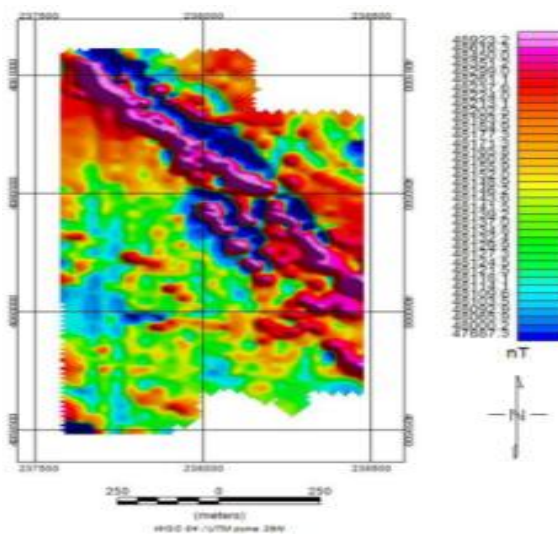
میدان اصلی زمین که نقش القا کننده را دارد، میدان مغناطیسی غیر محوری کجی است که باعث می‌شود شکل هر بی‌هنجاری به زاویه میل و انحراف میدان ژئومغناطیسی وابسته باشد و توده مغناطیسی یکسانی با توجه به مکانی که در داخل زمین قرار گرفته است تولید بی‌هنجاری‌های متفاوتی نماید. برای حذف این نامتقارنی از فیلتر برگردان به قطب استفاده می‌شود.

برگردان به قطب فرآیندی است که میدان مغناطیسی مکانی که زاویه میل مغناطیسی کمتر از ۹۰ درجه است را به میدان مغناطیسی در قطب که زاویه میل مغناطیسی ۹۰ درجه دارد تبدیل می‌نماید. پس با انجام برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی به گونه‌ای بازسازی می‌شود که به نظر می‌رسد در قطب قرار دارد و زاویه میل آن عمودی و زاویه انحراف آن صفر است. در این حالت شدت و خود بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بر روی منابع اصلی تولید کننده خود قرار می‌گیرند [۳۰]. شکل (۴) نقشه برگردان به قطب محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با دقت در این نقشه می‌توان روند شمال غربی - جنوب شرقی بی‌هنجاری مغناطیسی را مشاهده کرد. با مقایسه نقشه تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی و نقشه برگردان به قطب، مقداری جابه‌جایی به سمت بالا مشاهده می‌شود که این جابه‌جایی به دلیل حذف اثرات دوقطبی است. نتایج به‌دست آمده از تفسیر این نقشه، نتایج حاصل از نقشه شدت میدان کل مغناطیسی، جهت احداث سازه‌های مغناطیسی را تأیید می‌کند. شکل (۵) نقشه سیگنال تحلیلی است که از اعمال این فیلتر به نقشه شکل (۴) حاصل شده است. با استفاده از پردازش سیگنال تحلیلی، محل منبع بی‌هنجاری مشخص می‌شود [۳۱]. مشاهده می‌شود که به طور کلی بی‌هنجاری‌های موجود در قسمت مرکز متمایل به جنوب شرق، نزدیک به سطح و بی‌هنجاری‌های موجود در قسمت شمال غربی عمیق هستند. شکل‌های (۶) تا (۱۰) به ترتیب نقشه‌های ادامه فراسو برای عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ متر هستند که از اعمال این فیلتر به نقشه شکل (۴) حاصل شدند. با کمک نقشه‌های ادامه فراسو، عمق بی‌هنجاری به صورت نسبی مورد بررسی قرار گرفته است. اثرات متمایز بی‌هنجاری مغناطیسی وضوح خود را تا حد بالایی در نقشه فراسو برای عمق ۱۰۰ متر از دست داده است. بر این اساس و به دلیل اینکه شدت بی‌هنجاری در منطقه مورد مطالعه برای عمق‌های بیش از ۷۰ متر تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است، به طور کلی برای این عمق‌ها کار احداث سازه مغناطیسی پیشنهاد نمی‌شود.

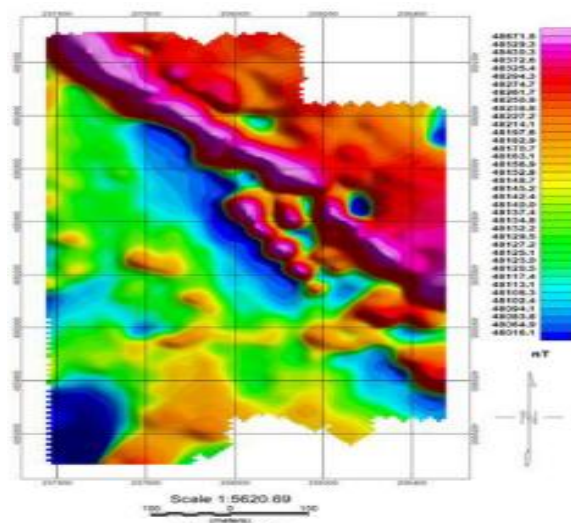
¹ Structural Index



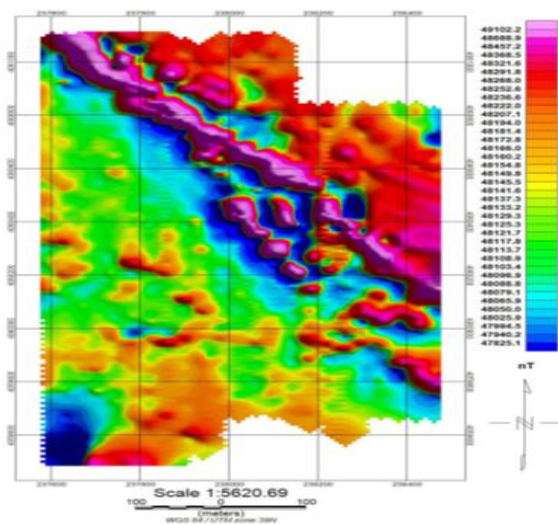
شکل ۲. نقشه ادامه فراسو برای عمق ۱۰ متر



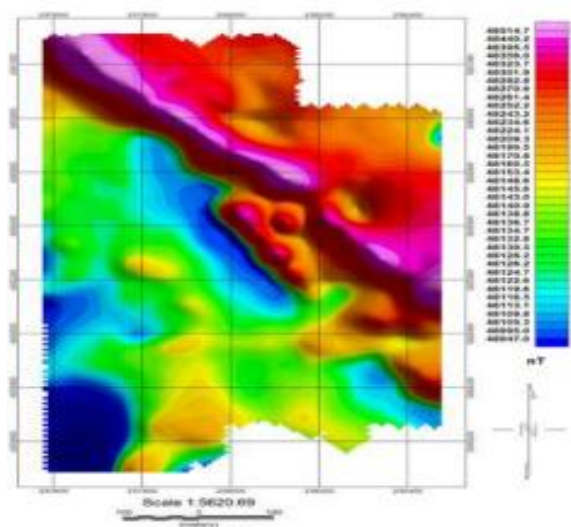
شکل ۳. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی



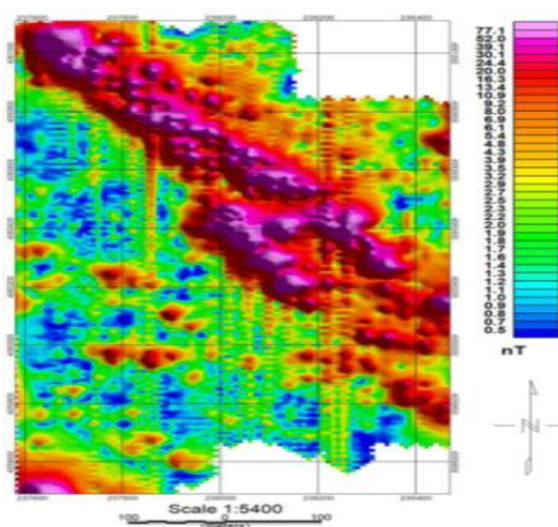
شکل ۴. نقشه برگردان به قطب



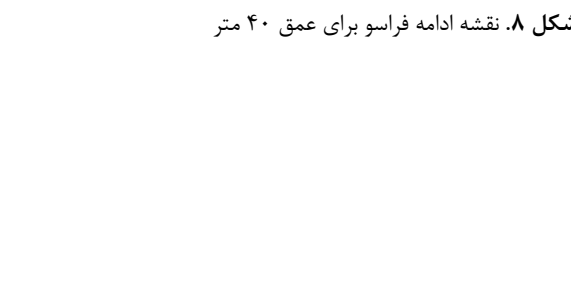
شکل ۵. نقشه سیگنال تحلیلی



شکل ۶. نقشه ادامه فراسو برای عمق ۲۰ متر



شکل ۷. نقشه ادامه فراسو برای عمق ۴۰ متر



شکل ۸. نقشه ادامه فراسو برای عمق ۴۰ متر

محاسبه می‌گردد. این عملیات تکرار می‌شود تا خطای مدل‌سازی به حد قابل قبول برسد و منحنی‌های برداشتی (اندازه‌گیری شده) و پاسخ مدل به هم نزدیک‌تر شوند [۲۸].

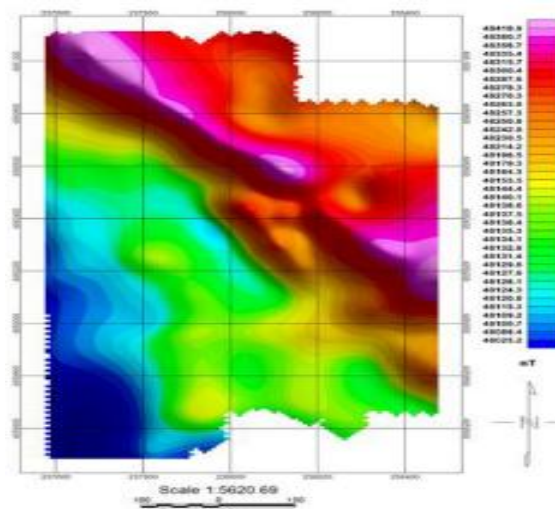
۳. نتایج و بحث

برای تخمین عمق دفن بی‌هنجاری‌ها در منطقه مورد مطالعه، از روش واهمامیخت اوپلر استفاده شد سپس عملیات مدل‌سازی بر روی این بی‌هنجاری‌ها صورت گرفت.

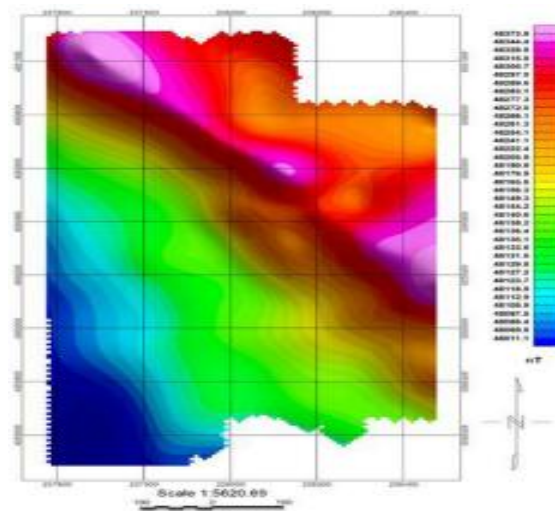
۳-۱. اعمال فرآیند واهمامیخت اوپلر استاندارد در محدوده مورد مطالعه

در این روش عمق بی‌هنجاری‌ها با دواپر رنگی که هر یک معرف محدوده عمقی مشخص است، نمایش داده می‌شود. در محاسبات، اندازه پنجره که از تقسیم طول رگه (۲۰۰) به ابعاد شبکه (۱۰×۱۰) حاصل می‌شود، ۲۰ به دست آمد. شاخص ساختاری برای ساختار مذکور ۱ در نظر گرفته شد و دلیل آن رگه‌ای بودن ساختار بود (SI=1). فاصله برای پذیرش^۴ با آزمون و خطا، ۶۰ در نظر گرفته شد (به طور معمول نصف طول رگه منظور می‌شود). چون مشتق در جهت‌های x، y و z با نوفه^۵ زیادی همراه بود، برای کاهش اثر نوفه‌های سطحی، نقشه‌های فراسو برای عمق‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متر تهیه شد و از میان این نقشه‌ها، نقشه عمق ۲۰ متری انتخاب شد زیرا هم جزئیات در آن بهتر مشخص بود و هم نوفه کمتری نسبت به سایر نقشه‌ها داشت. به این ترتیب روش اوپلر به نقشه فراسو با عمق ۲۰ متر اعمال شد.

نقشه شکل (۱۱) نشان دهنده تعیین عمق به روش اوپلر می‌باشد. در این نقشه مرز بالایی توده (فاصله سطح زمین تا ابتدای بی‌هنجاری) در بازه عمقی ۲ تا ۳۹ متری قرار دارد. روی نقشه، بی‌هنجاری‌ها از نظر عمق دسترسی، به سه دسته تقسیم‌بندی شده‌اند. مناطق با بی‌هنجاری‌های سطحی‌تر (کمتر از ۱۵ متر) در نقشه، با رنگ آبی، مناطق بی‌هنجاری با عمق متوسط (۱۵ تا ۳۰ متر) با رنگ زرد و در نهایت بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر (بیش از ۳۰ متر) به رنگ قرمز نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشتر حجم بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در عمق کمتر از ۳۰ متر قرار دارند. نتایج حاصل از روش اوپلر مویید این مطلب است که برای مناطقی که با رنگ آبی مشخص شده‌اند از عمق ۵ متری، برای نقاط زرد رنگ از عمق ۱۵ متری و برای نقاط قرمز رنگ از عمق بیش از ۳۰ متر می‌توان کار احداث سازه‌های مغناطیسی راهبردی را آغاز کرد.



شکل ۹. نقشه ادامه فراسو برای عمق ۷۰ متر



شکل ۱۰. نقشه ادامه فراسو برای عمق ۱۰۰ متر

مدل‌سازی پیشرو با انتخاب یک مدل فرضی اولیه آغاز شده، با استفاده از روابط ریاضی مشخص، پاسخ آن تعیین شده و با داده‌های اندازه‌گیری^۱ شده مقایسه می‌شود. در صورت نبود برازش مناسب، پارامترهای مدل تغییر داده شده و محاسبات تکرار می‌شود تا برازش لازم بین پاسخ^۲ مدل و داده‌های اندازه‌گیری با در نظر گرفتن خطای کمینه به دست آید [۲۸]. جهت انطباق منحنی‌های مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌ای ناشی از مدل‌سازی پیشرو و کاهش خطا، مدل‌سازی وارون پارامتری انجام می‌گیرد. به این منظور در پنجره مدل‌سازی وارون، پارامترهای جسم مورد نظر (از جمله عمق، شیب، آزیموت و ...) یک به یک، آزاد^۳ گذاشته می‌شود و با عملیات تکرار، پاسخ حاصل از جسم،

^۴ Distance to Accept

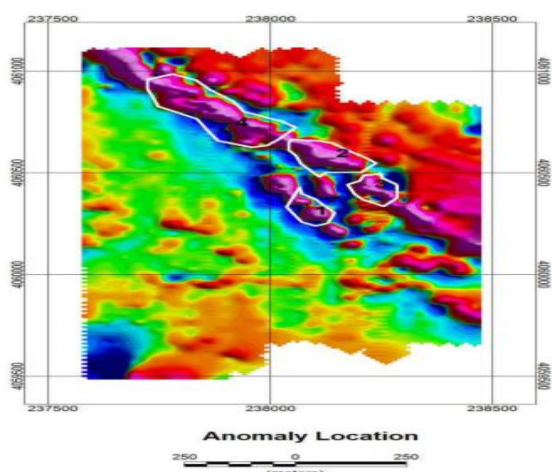
^۵ Noise

^۱ Measured

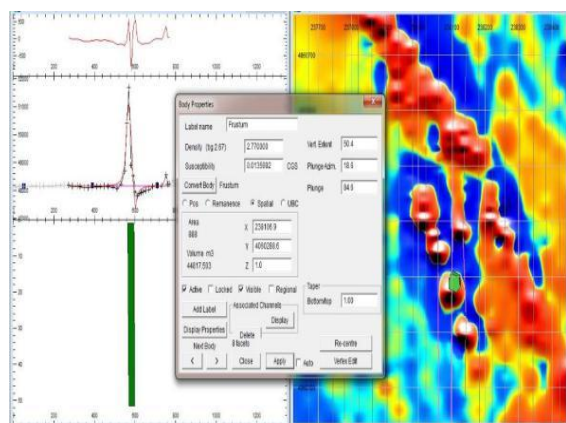
^۲ Response

^۳ Free

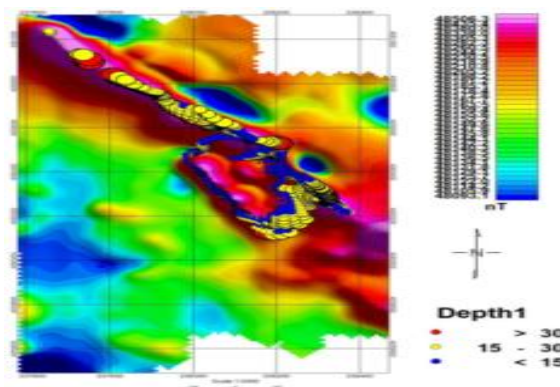
تقریبی ۳۵ متر با افزایش عمقی تقریبی ۵۰ متر را ارائه می‌دهد که مقدار مغناطیس‌پذیری آن ۰/۰۱ به‌دست آمده است. آزمون ۱۸ درجه و شبی ۸۴ درجه و نزدیک به قائم دارد. عمق دفن بی‌هنجاری کم (کمتر از ۵ متر) و تقریباً نزدیک به سطح است. مختصات X و Y مرکز آن نیز در سامانه مختصات جهانی (UTM)^۴ به ترتیب ۲۳۸۱۰۶،۹ و ۴۰۶۰۲۸۸،۶ متر و حجم تقریبی آن ۴۴۸۱۷ متر مکعب به‌دست آمد. این بی‌هنجاری بالاترین میزان مغناطیس ثبت شده در ناحیه را به‌خود اختصاص داده است. شکل (۱۳) مدل دوبعدی و مشخصات بی‌هنجاری شماره ۱ را نشان می‌دهد. با ترکیب نتایج به‌دست آمده، پیشنهاد می‌شود که احداث سازه مغناطیسی در بازه عمقی ۵ تا ۳۰ متر مد نظر قرار گیرد. با توجه به مختصات مرکز بی‌هنجاری در مختصات جهانی و قطر تقریبی به‌دست آمده برای این بی‌هنجاری، با شروع حفاری از مرکز بی‌هنجاری، مجاز به پیشروی به شعاع تقریباً ۱۷ متر در اطراف این نقطه هستید.



شکل ۱۲. تفکیک منطقه مورد مطالعه به ۴ زون مجزا بر روی نقشه برگردان به قطب



شکل ۱۳. مدل دوبعدی و مشخصات بی‌هنجاری شماره ۱



شکل ۱۱. تغییرات عمق بی‌هنجاری‌های محدوده با استفاده از روش اویلر. در این نقشه، بی‌هنجاری‌های کمتر از ۱۵ متر در نقشه با رنگ آبی، بی‌هنجاری‌های با عمق ۱۵ تا ۳۰ متر با رنگ زرد و در نهایت بی‌هنجاری‌های بیش از ۳۰ متر به رنگ قرمز نمایش داده شده است.

۲-۳. مدل سازی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی در منطقه مورد مطالعه

با استفاده از نرم‌افزار مدل‌ویژن، منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه برگردان به قطب در شکل (۱۲) به چهار بی‌هنجاری مجزا تقسیم شده و مدل سازی بر روی این مناطق انجام گرفت.

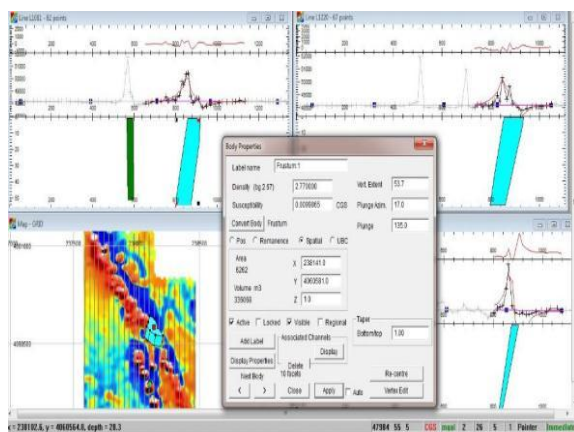
مدل سازی بی‌هنجاری شماره ۱: یک خط فعال^۱ در جهت عمود بر امتداد بی‌هنجاری شماره ۱ شکل (۱۲) ایجاد شد؛ به طوری که ابتدا و انتهای این خط فعال بر روی مقادیر با شدت مغناطیسی کم (رنگ آبی) و پیوستگی خط روی مناطق با شدت مغناطیسی بالا (رنگ صورتی) قرار گرفت. دلیل اینکه خط فعال باید طوری باشد که از پایین‌ترین مقدار مغناطیس شروع شود و به بالاترین مقدار مغناطیس رسیده و دوباره به پایین‌ترین مقدار برسد این است که برای مدل سازی، تمامی نقاط با مغناطیس بالا و پایین منطقه مورد نظر را شامل شود. از تقاطع خط فعال و پروفیل‌های داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی زمین، پروفیل‌های مدل توسط نرم‌افزار رسم می‌شود. برای بی‌هنجاری اول پس از اعمال خط فعال، پروفیلی که مقادیر مغناطیس آن بین حدود ۴۷۰۰۰ تا ۵۲۰۰۰ نانو تسلا تغییر می‌کند، به‌دست آمد. نمودار منحنی که با علامت + بر روی پروفیل شکل (۱۳) مشخص شده است مربوط به داده‌های برداشتی (اندازه‌گیری شده)^۲ است. منحنی قرمز رنگ موجود در این پروفیل، پاسخ^۳ مغناطیسی است که از مدل به‌دست آمد. هرچه نمودار خط داده‌های برداشتی به نمودار خط پاسخی که توسط مدل به‌دست آمده نزدیک‌تر باشد، صحت مدل به‌دست آمده را بهتر تأیید می‌کند. با توجه به اطلاعات به‌دست آمده، شکل مدل شده، شبه دایره‌ای با قطر

^۱ Active Line

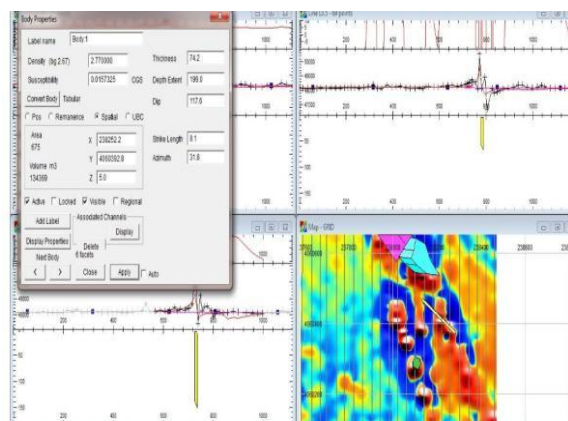
^۲ Measured

^۳ Response

^۴ Universal Transverse Mercator



شکل ۱۴. مدل دوبعدی و مشخصات بی‌هنجاری شماره ۲



شکل ۱۵. مدل دوبعدی و مشخصات بی‌هنجاری شماره ۳

مدل‌سازی بی‌هنجاری شماره ۴: یک خط فعال در جهت عمود بر امتداد بی‌هنجاری شماره ۴ شکل (۱۲) اعمال شد که این خط پنج پروفیل از داده‌های واقعی را قطع کرده و مقادیر مغناطیس حاصل از آن تقریباً بین مقادیر ۴۷۵۰۰ تا ۴۹۵۰۰ نانو تسلا تغییرات دارند. با توجه به اطلاعات به‌دست آمده، برای شکل مدل شده ابعاد و گسترش مناسبی مشاهده می‌شود. ابعاد سطحی این بی‌هنجاری ۷۰×۳۲۵ متر و گسترش عمقی آن $۱۳/۷$ متر است که مقدار مغناطیس‌پذیری آن تقریباً $۰/۰۲$ به‌دست آمده است. آزیموت آن ۱۳۳ درجه و شیب آن ۷ درجه می‌باشد. این بی-هنجاری عمق دفن بالاتری نسبت به سایر بی‌هنجاری‌ها دارد و تا نزدیک به ۱۵ متر نیز می‌رسد. مختصات x و y مرکز آن نیز به ترتیب $۲۳۷۹۶۴,۹$ و $۴۰۶۰۷۵۹,۲$ متر و حجم تقریبی آن ۳۱۴۳۲۹ متر مکعب به‌دست آمد. شکل (۱۶) مدل دوبعدی و مشخصات بی‌هنجاری شماره ۴ را نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از دو نرم‌افزار، خودپذیری و همچنین ابعاد به‌دست آمده، این بی‌هنجاری محل بسیار مناسبی برای احداث سازه‌های مغناطیسی راهبردی از جمله سازه مغناطیسی است. با توجه به عمق بی‌هنجاری، پیشنهاد می‌شود که در بازه عمقی ۱۵ تا ۳۰ متر عملیات احداث سازه صورت گیرد. نظر به اینکه

مدل‌سازی بی‌هنجاری شماره ۲: یک خط فعال در جهت عمود بر امتداد بی‌هنجاری شماره ۲ شکل (۱۲) اعمال شد که این خط سه پروفیل از داده‌های واقعی را قطع کرده و مقادیر مغناطیس حاصل از آن تقریباً بین مقادیر ۴۷۰۰۰ تا ۵۱۰۰۰ نانو تسلا تغییرات دارند. با توجه به اطلاعات به‌دست آمده، شکل مدل شده پل‌گون که بیشینه طول ۷۰ متر و عرض متغیر بین ۴۰ تا ۱۳۴ متر و گسترش عمقی $۹۴/۷$ متر را ارائه می‌دهد و مقدار مغناطیس‌پذیری آن $۰/۰۱$ به‌دست آمده است. آزیموت آن ۱۷ درجه و شیب آن ۱۳۵ درجه می‌باشد. عمق دفن این بی‌هنجاری نیز همچون بی‌هنجاری شماره ۱ نسبتاً کم (کمتر از ۵ متر) است. مختصات x و y مرکز آن نیز به ترتیب ۲۳۸۱۴۱ و ۴۰۶۰۵۸۱ متر و حجم تقریبی آن ۳۳۶۰۶۸ متر مکعب به‌دست آمد. شکل (۱۴) مدل دوبعدی و مشخصات بی‌هنجاری شماره ۲ را نشان می‌دهد. در این بی‌هنجاری نیز با ترکیب نتایج، بازه عمقی ۵ تا ۳۰ متر برای احداث سازه مغناطیسی پیشنهاد می‌شود. با توجه به شیب به‌دست آمده برای شکل مذکور که به سمت غرب می‌باشد با آغاز حفاری از نقطه مرکز (مربع قرمز رنگ داخل بی‌هنجاری روی نقشه دوبعدی شکل (۱۴))، تقریباً در عمق ۱۰ متری به بعد راستای حفاری باید به سمت غرب تغییر کند تا عملیات حفاری همچنان در داخل بی‌هنجاری صورت گرفته و از آن خارج نشود.

مدل‌سازی بی‌هنجاری شماره ۳: یک خط فعال در جهت عمود بر امتداد بی‌هنجاری شماره ۳ شکل (۱۲) اعمال شد که این خط نیز سه پروفیل از داده‌های واقعی را قطع کرده و مقادیر مغناطیس حاصل از آن تقریباً بین مقادیر ۴۷۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ نانو تسلا تغییرات دارند. با توجه به اطلاعات به‌دست آمده، شکل مدل شده شبیه به یک مکعب با گسترش طولی $۹/۱$ متر، ضخامت $۷۴/۳$ متر و گسترش عمقی ۱۹۹ متر است که مقدار مغناطیس‌پذیری آن تقریباً $۰/۰۱۶$ به‌دست آمده است. آزیموت آن ۳۱ درجه و شیب آن ۱۱۷ درجه می‌باشد. به دلیل اینکه این بی‌هنجاری به صورت شیب‌دار واقع شده است، مقطع عمودی در راستای هر پروفیل، گسترش عمقی متفاوت دارد. به عنوان مثال در مقاطع موجود در شکل (۱۵)، مقاطع عمودی برای پروفیل‌های نمایش داده شده تا عمق حدوداً ۵۰ و ۱۵۰ متری گسترش دارند. عمق دفن این بی‌هنجاری نیز همچون بی‌هنجاری شماره ۱ و ۲ نسبتاً کم (کمتر از ۵ متر) است. مختصات x و y مرکز آن نیز به ترتیب $۲۳۸۲۵۲,۲$ و $۴۰۶۰۳۹۲,۸$ متر و حجم تقریبی آن ۱۳۴۳۶۹ متر مکعب به‌دست آمد. شکل (۱۵) مدل دوبعدی و مشخصات بی‌هنجاری شماره ۳ را نمایش می‌دهد. در مورد این بی‌هنجاری با توجه به گسترش طولی کم و شیب زیاد، عملاً احداث سازه‌های بزرگ مقیاس کار چندان ساده‌ای نبوده و پیشنهاد نمی‌شود. با این وجود از عمق ۵ تا ۵۰ متر در گستره طولی ۹ متر می‌توان برای احداث سازه‌های راهبردی مغناطیسی اقدام نمود.

اسلیتی (سازند کهر) واقع شده بود. به منظور تعیین عمق دفن بی‌هنجاری‌ها، از روش واهمامیخت اولپر اعمال شده بر روی نقشه ادامه فراسوی ۲۰ متر استفاده شد. سه بازه عمقی برای بی‌هنجاری‌ها در نظر گرفته شد. مناطق سطحی با رنگ آبی، مناطق با عمق متوسط با رنگ زرد و مناطق عمیق با رنگ قرمز نمایش داده شد. نتایج حاصل از روش اولپر مؤید این مطلب است که برای مناطقی که با رنگ آبی مشخص شده‌اند از عمق ۵ متری، برای نقاط زرد رنگ از عمق ۱۵ متری و برای نقاط قرمز رنگ از عمق بیش از ۳۰ متر می‌توان کار احداث سازه‌های مدفون مغناطیسی را آغاز کرد. پس از تخمین عمق به روش اولپر مدل سازی بر روی ۴ بی‌هنجاری تفکیک شده بر روی نقشه برگردان به قطب انجام شد و با توجه به نتایج به دست آمده از مدل سازی به ترتیب مدل بی‌هنجاری‌های ۴، ۱، ۲ و ۳ به عنوان بهترین مناطق جهت احداث سازه‌های مدفون مغناطیسی پیشنهاد شدند. پیشنهاد می‌شود که چند ترانسه و گمانه اکتشافی در محل‌های مذکور در جدول‌های (۲ و ۳) به منظور تعیین دقیق روند بی‌هنجاری‌ها حفر شود.

جدول ۲. موقعیت ابتدا و انتهای ترانسه‌های اکتشافی [۲۷]

اولویت	X ₁	Y ₁	X ₂	Y ₂
۱	۲۳۷۹۳۸	۴۰۶۰۷۱۰	۲۳۷۹۶۲	۴۰۶۰۷۶۳
۲	۲۳۸۰۹۶	۴۰۶۰۲۷۹	۲۳۸۱۱۲	۴۰۶۰۳۳۰
۳	۲۳۸۱۲۰	۴۰۶۰۵۵۰	۲۳۸۱۵۰	۴۰۶۰۶۰۶
۴	۲۳۸۲۵۵	۴۰۶۰۳۸۵	۲۳۸۲۷۴	۴۰۶۰۴۰۸

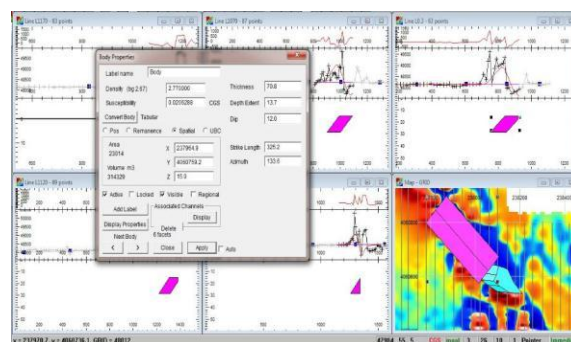
جدول ۳. موقعیت نقاط پیشنهادی جهت حفاری بر اساس اولویت [۲۷].

اولویت	X	Y
بی‌هنجاری ۴	۲۳۷۹۶۴/۹	۴۰۶۰۷۵۹/۲
بی‌هنجاری ۱	۲۳۸۱۰۶/۹	۴۰۶۰۲۸۸/۶
بی‌هنجاری ۲	۲۳۸۱۴۱	۴۰۶۰۵۸۱
بی‌هنجاری ۳	۲۳۸۲۵۲/۲	۴۰۶۰۳۹۲/۸

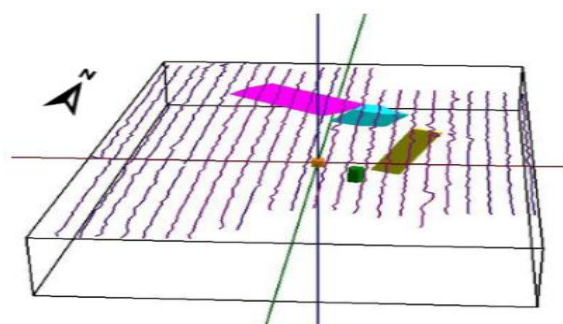
در حین عملیات احداث سازه مورد نظر، حضور متخصصین اکتشافی و استخراجی از جمله مهندسين معدن و ژئوفیزیک به منظور تأیید راستای حفاری در داخل بی‌هنجاری و جلوگیری از انحراف حفاری به خارج از بی‌هنجاری الزامی است. پس از احداث سازه‌های مدفون مغناطیسی در مکان‌های مشخص شده در منطقه مورد مطالعه، برای رسیدن به نتیجه مطلوب جهت پنهان‌سازی، پیشنهاد می‌شود که این سازه‌ها حتی المقدور به بخش‌های کوچک‌تر تفکیک شود که این امر علاوه بر کاهش اثر بی‌هنجاری موجب ایجاد نوفه نیز می‌گردد. برای گمراه کردن آشکاراها می‌توان چندین هدف دروغین در فواصل مختلف از

گسترش طولی بی‌هنجاری در حد مطلوب است، بنابراین محدودیتی برای آغاز حفاری از نقطه مرکز بی‌هنجاری وجود ندارد و عملیات حفاری را می‌توان از نقاط اطراف مرکز بی‌هنجاری نیز آغاز کرد.

شکل (۱۷) موقعیت ۴ توده مدل شده بر روی نمای سه‌بعدی از محدوده به همراه پروفیل‌های برداشتی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی به ترتیب بی‌هنجاری‌های ۴، ۱، ۲ و ۳ به عنوان بهترین مناطق جهت احداث سازه‌های مدفون مغناطیسی پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۶. مدل دوبعدی و مشخصات بی‌هنجاری شماره ۴



شکل ۱۷. نمایش پروفیل‌های برداشتی و نمای سه‌بعدی کلیه بی‌هنجاری‌ها در منطقه مورد مطالعه

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش داده‌های مغناطیس زمینی جنوب زنجان به منظور تعیین بهترین محل برای احداث سازه‌های مدفون مغناطیسی مورد پردازش و مدل‌سازی قرار گرفت. تفسیر کیفی و پردازش اولیه داده‌ها با اعمال فیلترهای گوناگونی همچون برگردان به قطب، سیگنال‌تحلیلی و ادامه فراسو توسط نرم‌افزار ژئوسافت تا عمق ۱۰۰ متر مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی نتایج تفسیر کیفی یک روند شمال غربی- جنوب شرقی برای بی‌هنجاری‌های منطقه مورد مطالعه به دست داد که محل قرارگیری این بی‌هنجاری‌ها با رخنمون‌های مشاهده شده در بازدید زمین‌شناسی مطابقت داشته و در بخش شمالی محدوده مورد مطالعه یعنی در ساختارهای حاوی شیل و ماسه‌سنگ

- [15] Hubbert, M. K. "A line-Integral Method of Computing the Gravimetric Effects of Two-Dimensional Masses"; *Geophys.* 1948, 13, 215-225.
- [16] Talwani, M.; Worzel, J. I.; Landisman, M. "Rapid Gravity Computation for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendicino Submarine Fracture Zone"; *Geophys. Res.* 1959, 64, 49-59.
- [17] Talwani, M.; Ewing, M. "Rapid Computation of Gravitational Attraction of Three-Dimensional Bodies of Arbitrary Shape"; *Geophys.* 1960, 25, 203-225.
- [18] Grant, F. S.; West, G. F. "Interpretation Theory in Applied Geophysics"; McGraw-Hill Book Co, 1965.
- [19] Won, I. J.; Bevis, M. "Computing the Gravitational and Magnetic Anomalies Due to Polygon: Algorithms and Fortran Subroutines"; *Geophys.* 1987, 52, 232-238.
- [20] Paterson, N. R.; Reeves, C. V. "Applications of Gravity and Magnetic Surveys: The State-of-the-Art in 1985"; *Geophys.* 1985, 50, 2558-2594.
- [21] Pilkington, M. "3-D Magnetic Imaging Using Conjugate Gradients"; *Geophys.* 1997, 62, 1132-1142.
- [22] Li, Y.; Oldenburg, D. W. "3-D Inversion of Gravity Data"; *Geophys.* 1998, 63, 109-119.
- [23] Moradzadeh, A.; Dolati Ardehjani, F.; Tayebi, B. "Interpretation of Magnetic Data of Ojt Abad Iron Deposit, North East of Semnan"; *J. Earth Sci.* 2009, 71, 63-68 (In Persian).
- [24] Asensio, M.; Ormö, J.; Sturkell, E. "Gravity and Magnetic Model of the Målingen Structure, a Proposed Marine Impact Crater"; *European Planetary Science Congress*, 2012, 7.
- [25] Raiskila, S.; Plado, J.; Ruotsalainen, H.; Pesonen, L. J. "Geophysical Signatures of the Keurusselkä Meteorite Impact Structure- Implications for Crater Dimensions"; *Geophysica* 2013, 49, 3-23.
- [26] Cordani, R. "Constrain Modeling in Iron Ore Exploration"; 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society Held in Rio De Janeiro, Brazil, 2013, 26-29.
- [27] Behtooei, V.; Radan, M. Y. "2D and 3D Modeling of Subsurface Magnetic Anomalies by Using Geomagnetic Method in Order to Determine the Best Location for a Buried Magnetic Structures (Caches of Ammunition) - South of Zanjan"; Research Report, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, 2012.
- [28] Agah, A. "Modeling and Interpretation of Gravity and Magnetic Data for Tabas Area"; M.Sc. Thesis of Engineering, Shahrood University of Technology, 2004.
- [29] Behtooei, V.; Radan, M. Y. "Performance and Application of Grand and Airborne Magnetic Survey Methods in Order to Identify and the Lack of Recognition of Buried Structures"; Research Report, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, 2012.
- [30] Blakely, R. J. "Potential Theory in Gravity and Magnetic Application"; Cambridge Univ. Press, 1995.
- [31] Salem, A. "Interpretation of Magnetic Data Using Analytic Signal Derivatives"; *Geophysical Prospecting* 2005, 53, 75-82.
- [32] Jazayeri, J. S. S.; Oskooi, B. "Depth Estimation of Ground Magnetic Anomalies using Standard Euler Deconvolution in the Reshm Area, Semnan"; *J. Earth Space Physics* 2010, 37, 33-43.

هدف اصلی قرار داد. بر روی سطح نیز باید از عوامل ایجاد نوفه مانند کابل‌های فشارقوی، دکل‌های انتقال برق، زنده‌های فلزی و سایر قطعات آهنی استفاده کرد.

۵. تشکر و قدردانی

نگارندگان از مساعدت و زحمات آقایان دکتر اسداله جوع عطا بیرمی، دکتر رضا احمدی، مهندس اسماعیل اسحق‌ی، و سرکار خانم دکتر آزاده آگاه و خانم مهندس مطهره سلیمی کمال تشکر را دارند.

۶. مراجع

- [1] Dobrin, M. B.; Savit, C. H. "Introduction Geophysical Prospecting"; McGraw-Hill, 1988, 867.
- [2] Norouzi, G. H. "Exploration Geophysics"; Tehran University Press, First Edition, 1998.
- [3] Thompson, D. T. "EULDPH" a New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data"; *Geophys.* 1982, 47, 31-37.
- [4] Reid, A. B.; Allsop, J. M.; Granser, H.; Milletts, A. J.; Somerton, I. W. "Magnetic Interpretation in Three Dimensions Using Euler Deconvolution"; *Geophys.* 1990, 55, 80-91.
- [5] Ravat, D. "Analysis of the Euler Method and its Applicability in Environmental Magnetic Investigations"; *J. Environ. Eng. Geophys.* 1996, 1, 229-238.
- [6] Barbosa, V. C. F.; Silva, J. B. C.; Medeiros, W. E. "Stability Analysis and Improvement of Structural Index Estimation in Euler Deconvolution"; *Geophys.* 1999, 64, 48-60.
- [7] Hsu, S. K. "Imaging Magnetic Sources Using Euler's Equation"; *Geophysical Prospecting* 2002, 50, 15-25.
- [8] Keating, P.; Pilkington, M. "Euler Deconvolution of the Analytic Signal and its Application to Magnetic Interpretation"; *Geophysical Prospecting* 2004, 52, 165-182.
- [9] Bin Doo, W.; Hsu, S. K.; Yeg, Y. "A Derivative-Based Interpretation Approach to Estimating Source Parameters of Simple 2D Magnetic Sources from Euler Deconvolution, the Analytic-Signal Method and Analytical Expressions of the Anomalies"; *Geophysical Prospecting* 2007, 55, 255-264.
- [10] Cooper, G. "Euler Deconvolution with Improved Accuracy and Multiple Different Structural Indices"; *J. China Univ. Geosciences* 2008, 19, 72-76.
- [11] Oruç, B.; Selim, H. H. "Interpretation of Magnetic Data in the Sinop Area of Mid Black Sea, Turkey, Using Tilt Derivative, Euler Deconvolution, and Discrete Wavelet Transform"; *J. Appl. Geophys.* 2011, 74, 194-404
- [12] Saleh, S.; Pasteka, R. "Applying the Regularized Derivatives Approach in Euler Deconvolution and Modeling Geophysical Data to Estimate the Deep Active Structures for the Northern Red Sea Rift Region, Egypt"; *Contributions to Geophysics and Geodesy* 2012, 42, 25-61.
- [13] Naji, J.; Amjadi, A.; Alvandi, A. "Application of Gradient Tensor Decomposition and Standard Euler Deconvolution for Interpretation Using Magnetic Data"; *J. Basic Appl. Scientific Res.* 2013, 3, 544-547.
- [14] Hinze, W. J. "The Role of Gravity and Magnetic Methods in Engineering and Environmental Studies"; *Geotech. Environ. Geophys.* 1990, 75-126.