

پردازش داده‌های مغناطیسی دریا و استخراج نقشه ناهنجاری‌های مغناطیسی

محمد رضا خلیل آبادی^۱، محسن صفی‌خانی^۲، حسین شاهمیرزایی^{۳*}

rezakhalilabadi@gmail.com

^۱ دکترای فیزیک دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز

mohsensafikhani65@gmail.com

^۲ کارشناس ارشد فیزیک دریا، دانشگاه اصفهان، اصفهان

hshahmirzaee@mut.ac.ir

^{۳*} نویسنده مسئول، استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۹

چکیده

آشکارسازی به وسیله نقشه ناهنجاری‌های مغناطیسی در دریا، یکی از روش‌های آشکارسازی و کنترل غیرفعال تجهیزات سطحی و زیرسطحی از جمله زیردریایی‌هاست. با توجه به این که امروزه زیردریایی‌ها از لحاظ صوتی بسیار ساکت ساخته می‌شوند، شناسایی و تشخیص آن‌ها در دریا به وسیله آشکارسازهای آکوستیکی مشکل و حتی ناممکن است. به همین علت استفاده از روش آشکارسازی ناهنجاری‌های مغناطیسی ضروری به نظر می‌رسد. با استفاده از این روش، اختلال موجود در میدان مغناطیسی زمین که به وسیله جسم فرومغناطیس ایجاد شده آشکار و به کمک پردازش‌های رایانه‌ای، نقشه مغناطیسی منطقه تهیه می‌شود. در این پژوهش با پردازش و تحلیل داده‌های مغناطیس‌سنجی، نقشه ناهنجاری مغناطیسی در ناحیه خلیج فارس و نزدیک ساحل گناوه؛ پس از تصحیحات لازم تهیه شده است. ناهنجاری‌های مغناطیسی، نخست با استفاده از فیلتر مشتق قائم مرتبه اول، به منظور برجسته‌سازی ناهنجاری‌های سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه نقشه‌ها با روش واهم آمیخت اولیه که با هدف مکان‌یابی و تعیین عمق ناهنجاری‌ها به کار می‌رود، پردازش شده است. هر دو روش وجود ناهنجاری‌های سطحی با عمق کم در راستای شمالی جنوبی در پایین و میانه منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: خلیج فارس، روش واهم آمیخت اولیه، فرومغناطیس، ناهنجاری‌های مغناطیسی

۱. مقدمه

استفاده از روش آشکارسازی ناهنجاری‌های مغناطیسی ضروری به نظر می‌رسد [۱]. با استفاده از این روش اختلال در میدان مغناطیسی زمین که از سوی جسم فرومغناطیس ایجاد شده، آشکار و به کمک پردازش‌های رایانه‌ای نقشه مغناطیسی منطقه تهیه می‌شود که یکی از سریع‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها برای شناخت الگوی مغناطیسی در یک منطقه هستند. از آنجا که هر تغییر، تحول و تحرکی در محیط دریا باعث آشفتگی در میدان مغناطیسی خواهد شد، پایش مغناطیسی منطقه حائز اهمیت است. اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین در مناطق دریایی یکی از کاربردی‌ترین روش‌های ژئوفیزیک دریایی است. داده‌های تغییر میدان

آشکارسازی تجهیزات شناور زیر آب یا مدفون در بستر دریا، شامل دو روش آکوستیکی و غیر آکوستیکی است. این روش‌ها در تعیین موقعیت مکانی بسیار مؤثر و مفیدند. اجسام زیر آب با فن‌سنجش‌ازدور نیز قابل آشکارسازی هستند. نخستین روش غیر آکوستیکی، آشکارسازی ناهنجاری‌های مغناطیسی^۱ است که یکی از روش‌های آشکارسازی و کنترل غیرفعال اجسام مغناطیسی از جمله زیردریایی، تجهیزات کف خواب فلزی، تجهیزات سطحی و زیرسطحی است. با توجه به این که امروزه زیردریایی‌ها از نظر صوتی بسیار ساکت ساخته می‌شوند، شناسایی و تشخیص آن‌ها در دریا با آشکارسازهای آکوستیکی مشکل و حتی ناممکن است؛ به همین علت

مغناطیس دریا کاربردهای مختلفی دارند. کاربردهای متعارف این داده‌ها، تعیین عمق و میل سنگ‌های مغناطیسی زیرین که در جای خود ضخامت زیادی دارند، همچنین علامت‌گذاری حوزه و به دست آوردن اطلاعات از ساختارهای زیرین است. داده‌های مغناطیس دریایی به‌عنوان یکی از ابزارهای تمایز مناطقی است که در زیر قاره‌ها و پوسته اقیانوسی قرار گرفته‌اند. یکی دیگر از کاربردهای این روش درزمینه باستان-شناسی دریایی یا جستجوی اجسام فلزی غرق شده است. باوجوداین، مهم‌ترین استفاده داده‌های مغناطیس دریایی پاسخ به سؤال‌های مربوط به ژئودینامیک است [۲]. میدان مغناطیسی زمین در هر نقطه روی سطح زمین، برابر است با جمع مؤلفه‌های منابع درونی، بیرونی و منابع ناهنجاری مغناطیسی. میدان مغناطیسی زمین از منبع درونی (میدان مغناطیسی اصلی یا میدان ژئومغناطیسی) جریان‌های همرفتی در پوسته خارجی زمین ایجاد می‌شود؛ درحالی‌که میدان خارجی در اثر جریان الکتریکی حاصل از لایه یونی بخش بیرونی جو ایجاد می‌شود. منابع ناهنجاری‌های مغناطیسی (ناهنجاری‌های مغناطیسی محلی) سنگ‌های مغناطیسی در قسمت بالایی پوسته زمین هستند. دانستن رفتار میدان ژئومغناطیسی برای مرتب کردن داده‌های مغناطیسی روی یک مرجع مناسب و تفسیر ناهنجاری‌ها لازم است. میدان ژئومغناطیسی شبیه میدان یک آهن‌رباست. قدرت میدان مغناطیسی از ۳۰۰۰۰ نانو تسلا در استوای مغناطیسی تا ۶۰۰۰۰ نانو تسلا در نزدیکی قطب‌های مغناطیسی تغییر می‌کند.

میدان مغناطیسی زمین به‌وسیله دستگاه مغناطیس‌سنج و با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه‌های مورد استفاده در آب کمی متفاوت‌تر از خشکی است. مغناطیس‌سنجی دریایی به دو روش کلی؛ یدک‌کشی در سطح و در نزدیک بستر انجام می‌شود. دستگاه مغناطیس‌سنج به‌منظور کم کردن اثر مغناطیسی کشتی، باید در فاصله‌ای حدود دو تا سه برابر طول کشتی در دنباله آن کشیده شود. داده‌برداری بیشتر شامل خطوط اصلی و یک یا چند خط کنترل است. خطوط اصلی به‌عنوان خطوط مرجع به کار می‌روند و از خطوط کنترل که اغلب عمود بر خطوط اصلی داده‌برداری می‌شوند،

برای تصحیح خطوط اصلی استفاده می‌شود [۳]. یکی از مراحل مهم در مطالعات مغناطیس‌سنجی؛ تصحیح، پردازش و تفسیر داده‌هاست. تفسیر با استفاده از داده‌های خام در بسیاری مواقع می‌تواند گمراه‌کننده باشد، زیرا در مغناطیس‌سنجی با یک میدان دوقطبی سروکار داریم. بنابراین در ابتدا باید تصحیح‌ها و پردازش لازم روی داده‌های خام صورت گیرد. عملیات جمع‌آوری داده‌های مغناطیسی در شرایط متغیر و همراه با خطا انجام می‌شود. بیشترین تأثیر واضح چنین خطاهایی یک انتقال یا اختلاف در تراز خطوط همسایه موازی است که پدیده‌ای معمول است و به‌عنوان خطای هم‌ترازسازی شناخته می‌شود. خطا در داده‌ها به دو بخش خطاها و نویزهای سیستماتیک تقسیم می‌شود. خطاهای سیستماتیک قابل اندازه‌گیری و با استفاده از فرمول‌های ساده ریاضی قابل اصلاح هستند. منبع خطاهای سیستماتیک شامل: تغییرات روزانه میدان مغناطیسی، خطاهای تأخیر زمانی بین حسگر و دستگاه GPS و غیره است که با تصحیح شناخته‌شده مانند: حذف اثرات روزانه، تأخیر زمانی و حذف میدان مرجع ژئومغناطیس^۲ برطرف می‌شوند. نویزهای سیستماتیک خطاهای باقیمانده در داده‌ها هستند که بعد از تصحیح سیستماتیک داده‌ها به‌جا مانده‌اند. این نویزها اغلب از اختلاف گرادیان یا ارتفاع داده‌ها ناشی می‌شوند. روش‌های هم‌ترازسازی برای حذف این نویزهای سیستماتیک به کار می‌روند [۴]. بعد از اتمام تصحیح داده‌ها، عملیات پردازش و تفسیر ناهنجاری‌ها با نرم‌افزارهای پردازشی مانند ژئوسافت و با اعمال فیلترهای مختلف انجام می‌شود. با استفاده از این فیلترها، اطلاعات لازم برای تفسیر کیفی داده‌ها، با توجه به اهداف موردنظر امکان‌پذیر خواهد بود. فیلترهای گوناگون در تفسیر داده‌های مغناطیسی مانند: تبدیل به قطب، ادامه فراسو^۳، مشتقات قائم، افقی، واهم-آمیخت اولر^۴ و غیره هر یک به‌منظور خاصی به کار می‌روند.

از جمله فعالیت‌های انجام‌شده درزمینه پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی در ایران می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- فاز اول؛ پردازش اولیه شامل: (۱) بررسی و تأیید اولیه داده‌های خام؛ (۲) حذف داده‌های قرار گرفته در محدوده ناحیه مرده^۶ و نوفه؛
- فاز دوم؛ پردازش اصلی شامل: (۱) تصحیح تأخیر زمانی^۷، (۲) حذف اثرات روزانه^۸، (۳) حذف میدان مرجع زمین، (۴) هم‌ترازسازی داده‌ها^۹، (۵) ریزهم‌ترازسازی داده‌ها^{۱۰}.

۲-۱. اندازه‌گیری میدانی

محل برداشت داده‌ها در منطقه خلیج فارس، بین ساحل گناوه و جزیره خارک در شبکه‌ای مستطیل شکل به مساحت ۲/۵ کیلومتر مربع است. اندازه‌گیری میدانی با استفاده از یک دستگاه مغناطیس‌سنج اسکالر اورهاو سر که در انتهای یک قایق یدک کشیده می‌شود و شکل دینامیکی آن تا حدودی شبیه ماهی است، انجام گرفت. دقت این مغناطیس‌سنج ۰/۰۱ نانوتسلاست. خطوط اصلی در راستای شرقی غربی به طول ۵۰۰ متر و با فاصله ۱ کیلومتر از هم داده‌برداری شد. همچنین تعداد ۳ خط شمالی جنوبی به طول ۵ کیلومتر با فاصله ۲۵۰ متر از یکدیگر به عنوان خطوط کنترل و عمود بر خطوط اصلی برداشت شد. آهنگ برداشت داده ۱ قرائت به ازای هر ثانیه انتخاب شد. در طول کل مسیر تعداد ۱۰۳۱ داده مغناطیسی برداشت شد که فاصله بین نقاط برداشت داده به طور متوسط برای خطوط اصلی حدود ۱ متر و برای خطوط کنترل حدود ۲ متر است.

۲-۲. تصحیح داده‌های مغناطیسی

۲-۲-۱. تصحیح خطای تأخیر زمانی

خطای تأخیر زمانی به علت متفاوت بودن موقعیت مکانی مغناطیس‌سنج و آنتن دستگاه GPS ایجاد می‌شود که عاملی برای اینکه میدان قرائت شده مربوط به نقطه ثبت شده نباشد؛ بنابراین باید مختصات ثبت شده را تغییر داد تا مقادیر میدان روی محل اصلی خود قرار گیرند. این تصحیح با کمک نرم‌افزار رابط کاربری خود مغناطیس‌سنج و در هنگام داده‌برداری انجام می‌شود.

(الف) برآورد عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ناشی از پیمایش‌های مغناطیسی در منطقه رشم استان سمنان، با استفاده از روش اوپلر به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده با روش هوابرد [۵]؛

(ب) پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد برای تعیین مرز ساختارهای مغناطیسی و محل گسل‌های مدفون ایران با استفاده از داده‌های شبکه‌ای ۷/۵ کیلومتر مغناطیس هوابرد ایران که در فاصله سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۵۵ از سوی شرکت آمریکایی ایرو سرویس^۵ داده‌برداری انجام گرفته است، در این مطالعه نتایج استفاده از دو روش مشتق افقی و سیگنال تحلیلی روی داده‌های مغناطیس هوابرد کاهیده به قطب محدوده ایران برای تشخیص ساختارهای زیرسطحی ارائه شده است [۶]؛

(ج) کاربرد فیلتر گسترش رو به بالا در تفسیر داده‌های میدان مغناطیس با تعیین ارتفاع بهینه در منطقه منصورآباد یزد [۷].

البته در مطالعه‌های گفته شده داده برداری در خشکی و اغلب به روش هوابرد انجام شده است. در مطالعه حاضر استخراج ناهنجاری‌های مغناطیسی در دریا و داده‌ها با روش دریا برد از طریق یدک کردن دستگاه مغناطیس‌سنج در عقب یک قایق اخذ شده‌اند.

۲. مواد و روش‌ها

نقشه‌های مغناطیسی اغلب بسیار پیچیده بوده و تفسیر آن‌ها کار دشواری است که به مهارت، تجربه بسیار، دانش فیزیکی و ریاضی کافی همراه با اطلاعات زمین‌شناسی نیاز دارد که به دلیل خاصیت برداری میدان مغناطیسی زمین است که از نقطه‌ای به نقطه دیگر، نه تنها اندازه آن بلکه راستای متغیری دارد. یکی از مراحل مهم در مطالعه‌های مغناطیس‌سنجی تصحیح، پردازش و تفسیر داده‌هاست. تفسیر با استفاده از داده‌های خام در بسیاری مواقع می‌تواند گمراه‌کننده باشد، زیرا در مغناطیس‌سنجی با یک میدان دوقطبی سروکار داریم. پس لازم است که نخست تصحیح‌ها و پردازش لازم روی داده‌های خام صورت گیرد. در این مقاله تصحیح داده‌های مغناطیس در دو فاز و هفت مرحله انجام شده است.

۲-۲-۲. خطای تغییرات روزانه

خطای تغییرات روزانه به علت تغییرات میدان مغناطیسی کره زمین برحسب زمان ایجاد می‌شود. این تغییرات دارای دوره تناوب‌های متفاوتی بوده و به دو نوع تغییرات درازمدت و زودگذر تقسیم می‌شود. با توجه به مدت‌زمان برداشت داده در هر روز مسلم است که فقط تغییرات زودگذر و اثرات روزانه میدان در داده‌های ثبت شده اثر می‌گذارند. بیشتر خطاهای روزانه با ایجاد یک ایستگاه مینا برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در یک مکان ثابت، تصحیح می‌شوند. به این منظور یک دستگاه مغناطیس سنج در منطقه نقشه‌برداری مستقر و میدان مغناطیسی را در طول عملیات اندازه‌گیری می‌کند [۸]. به دلیل عدم امکان به کارگیری دستگاه مغناطیس سنج دیگری که برای محیط‌های دریایی طراحی شده باشد، در این تحقیق داده‌های ایستگاه مینا جمع‌آوری نشد؛ بنابراین امکان اعمال این نوع تصحیح روی داده‌ها میسر نیست.

۲-۲-۳. تصحیح میدان مرجع ژئومغناطیسی

میدان مرجع ژئومغناطیسی بین‌المللی زمین (IGRF) یک توصیف ریاضی استاندارد از میدان مغناطیسی اصلی زمین و ناشی از هسته زمین است. این میدان مرجع، نتیجه تلاش گروهی مشترک بین مدل‌سازان میدان ژئومغناطیس زمین و پژوهشگرهای مرتبط به جمع‌آوری و انتشار داده‌های مغناطیسی است. این داده‌ها از جمع‌آوری اطلاعات روی سطح زمین، دریاها، در هوا و به وسیله ماهواره‌ها به دست آمده‌اند. میدان IGRF در سال ۱۹۶۹م. برای نخستین بار معرفی شده و هر پنج سال یک‌بار زیر نظر انجمن بین‌المللی ژئومغناطیس و علوم جوی^{۱۱} اصلاح می‌شود. رابطه ریاضی میدان IGRF شامل ضرایب گاوس است که به صورت یک بسط هماهنگ کروی از تابع پتانسیل اسکالر میدان مغناطیسی تعریف می‌شود [۹]:

(۱)

$$v(r, \theta, \phi) = a \sum_{l=1}^L \sum_{m=l}^M \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} (g_l^m \cos m\theta + h_l^m \sin m\theta) P_l^m \cos(\theta)$$

در رابطه بالا، r فاصله شعاعی از مرکز زمین، L حد بالای سری، θ طول جغرافیائی شرقی، ϕ زاویه متمم عرض جغرافیایی (زاویه قطبی)، a شعاع زمین، g_l^m و h_l^m ضرایب گاوس و $P_l^m \cos(\theta)$ توابع لژاندر بهنجار از درجه l مرتبه m هستند. (شکل ۱) نقشه میدان مرجع ژئومغناطیسی بین‌المللی منطقه مورد مطالعه که با نرم‌افزار ژئوسافت استخراج شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل؛ مشاهده می‌شود با حرکت به سمت عرض‌های شمالی‌تر و حرکت از سمت شرق به غربی شدت میدان مرجع افزایش می‌یابد. برای اجرای تصحیح IGRF باید میدان مرجع زمین را در هر نقطه به دست آورده و آن را از مقدار ثبت شده کم نمود که مهم‌ترین مرحله در تصحیح داده‌ها به‌شمار می‌آید. تصحیح IGRF اثر میدان مغناطیسی پس‌زمینه منطقه‌ای زمین را حذف می‌کند و میدان باقی‌مانده، فقط میدان ناشی از بی‌هنجاری‌های موجود خواهد بود.

۲-۲-۳. هم‌ترازسازی

برای حذف اثرات باقیمانده خطا در داده‌ها و اطمینان از صحت داده‌های برداشت‌شده، در پروژه‌های مغناطیس‌سنجی اغلب یک سری خطوط عمود بر خطوط اصلی نیز داده‌برداری می‌شوند. فاصله این خطوط اغلب ۴ تا ۱۰ برابر فاصله‌ی خطوط اصلی بوده که باید از تحلیل نقشه شدت کل منطقه به دست آورده شود. بعد از داده‌برداری خطوط یادشده، در نقاط تقاطع دو مقدار قرائت‌شده مربوط به دو زمان متفاوت موجود است. هم‌ترازسازی فرایندی است که طی آن اختلاف بین مقادیر قرائت‌شده در هر نقطه تقاطع به کمترین مقدار کاهش پیدا می‌کند. روش هم‌ترازسازی نیاز به ارزیابی هم‌زمان خطوط اصلی و کنترل دارد. ابتدا همه خطوط کنترل تصحیح و خطوط اصلی برای منطبق شدن روی خطوط کنترل تنظیم می‌شوند. این تنظیمات شامل: اعمال یک روند به همه خطوط کنترل و اصلی (هم‌ترازسازی ساده^{۱۲}) یا اعمال یک یا چند روند به یک خط یا یک گروه از خطوط است (هم‌ترازسازی با دقت^{۱۳}). اغلب فرایند هم‌ترازسازی نیازمند یک سری تصحیح‌های دستی مانند حذف برخی نقاط تقاطع مسئله‌دار است. همچنین در

قطب موقعیت افقی توده تصحیح شده و بیشینه مقدار نقشه محل قرارگیری توده را نشان می‌دهد. این امر موجب تشخیص مناسب‌تر توده‌ها می‌شود. این عملگر در حوزه بسامد از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱].

$$A'(u, v) = \frac{A(u, v)}{(\sin\theta + i\cos(\varphi + \alpha))^2} \quad (2)$$

در این رابطه $A(u, v)$ شدت ناهنجاری در حوزه بسامدهای (u, v) ، θ و φ به ترتیب زاویه میل و انحراف بردار میدان مغناطیس زمین و $\alpha = \tan^{-1}(u/v)$ است.

۲-۳-۲. مشتق افقی ناهنجاری میدان مغناطیسی

مشتق افقی ناهنجاری میدان مغناطیسی بیانگر شدت تغییرات میدان در راستای افق است. از مشتق افقی جهت دار (مشتق در جهت x و y)؛ همچنین از مشتق افقی کل (برآیند مشتق افقی جهت x و y) برای مشخص و برجسته کردن مرز ناهنجاری‌ها نیز استفاده می‌شود. رابطه کلی مشتق افقی در جهت x یا y و مشتق افقی کل را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۲].

$$\frac{\partial J}{\partial X} = \frac{J_{X+\Delta X} - J_X}{\Delta X} = j'_X \quad (3)$$

$$\frac{\partial J}{\partial Y} = \frac{J_{Y+\Delta Y} - J_Y}{\Delta Y} = j'_Y \quad (4)$$

$$\frac{\partial J}{\partial H} = \sqrt{(j'_X)^2 + (j'_Y)^2} \quad (5)$$

۲-۳-۳. تخمین عمق ناهنجاری‌ها به روش واهم آمیخت اوپلر

در پردازش و تفسیر داده‌های ژئومغناطیسی، عمق بی‌هنجاری‌ها از چندین روش قابل محاسبه است [۵]. یکی از این روش‌ها، روش واهم آمیخت اوپلر است. تابع $V(x, y, z)$ در دستگاه دکارتی اگر در رابطه زیر صدق کند، همگن از درجه N نامیده می‌شود:

$$x \frac{\partial V}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial y} + z \frac{\partial V}{\partial z} = -NV \quad (6)$$

با یک بار مشتق گرفتن از رابطه ۶ نسبت به مؤلفه z و مرتب کردن جمله‌ها، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$x \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial z} + y \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial z} + z \frac{\partial V}{\partial z} \frac{\partial V}{\partial x} = -(N+1)V \quad (7)$$

که نشان می‌دهد، مؤلفه‌های مشتق تابع همگن V از درجه N ، همگن و از درجه $N+1$ خواهند بود. پتانسیل مغناطیسی یک

مواردی که گرادیان بیش از حد مجاز باشد، خطوط اصلی و کنترلی بر هم منطبق نمی‌شوند. خطاهای خطوط اصلی و کنترلی ممکن است به دلایل گوناگونی رخ دهند. گرادیان‌های افقی و قائم بالا، توفان‌های مغناطیسی و تغییرات روزانه منبع خطاهای هم‌ترازسازی هستند [۱۰].

۲-۲-۴. ریزهم‌ترازسازی داده‌ها

ریزهم‌ترازسازی یک اصطلاح کلی است و به حذف و تصحیح هرگونه خطای باقی مانده مشهود در داده‌ها اطلاق می‌شود که پس از اعمال تمامی روش‌های استاندارد باز در داده‌ها باقی می‌ماند. این بخش از کار از این لحاظ مهم است که وجود خطاهای خیلی کوچک در داده‌ها باعث پدید آمدن اشکال مصنوعی در نقشه‌های نهایی، به خصوص نقشه‌های با تفکیک بالاتر (مشتق قائم) می‌شود. روش ریز هم‌ترازسازی یک روش پایه شبکه است که می‌تواند هم به طور مستقل یا با هم‌ترازسازی اعمال شود [۸].

۲-۳-۳. پردازش داده‌های مغناطیسی

۲-۳-۱. تبدیل به قطب

تبدیل به قطب عملگری است که شکل نامتقارن ناهنجاری مغناطیسی را به شکلی متقارن تبدیل می‌کند. استفاده از انتقال به قطب به منظور دستیابی به محل واقعی بی‌هنجاری‌ها، بایستی با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه موردبررسی قرار گیرد. تفسیر اصلی از مجموعه داده‌های مغناطیسی روی داده‌های انتقال داده شده به قطب صورت می‌گیرد. با استفاده از این عمل می‌توان میدان مغناطیسی را از یک عرض مغناطیسی، جایی که میدان زمین شیب‌دار است، به میدانی در قطب مغناطیسی انتقال داد. در این حالت بی‌هنجاری‌ها به‌طور عمودی در بالای منبع ایجادکننده خود قرار می‌گیرند و به این ترتیب ناهنجاری مغناطیسی به ناهنجاری اندازه‌گیری شده در قطب مغناطیسی تبدیل می‌شود. با این کار در واقع اثر مربوط به عرض جغرافیایی از بین می‌رود و خطوط کانتور به آنچه مشابه داده‌ها در قطب است، تبدیل می‌شوند. در نقشه برگردان به

که (x_i, y_i, z_i) پارامترهای معلوم هستند. پس در رابطه‌های بالا با مشخص بودن N ، پارامترهای (x_0, y_0, z_0) که موقعیت منشأ تولید ناهنجاری هستند با استفاده از روش حداقل مربعات به دست می‌آیند. انتخاب درست N که شاخص ساختاری^{۱۴} نام دارد و اندازه پنجره اوایلر در روش اوایلر برای رسیدن به نتایج بسیار اهمیت دارند [۲]. برای اعمال روش اوایلر روی داده‌ها، به دلیل حجم زیاد داده‌های برداشت شده در روش‌های مغناطیسی و نبود دستیابی به دقت و کیفیت لازم در یک پردازش یک‌باره و کلی داده‌ها در کل شبکه، پنجره مربعی اوایلر، تعریف می‌شود که روی کل شبکه جابجاء شده و عملیات پردازشی درون پنجره صورت می‌گیرد. این پنجره باید دو مشخصه داشته باشد: اول این که باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تغییرات اساسی میدان را در بر گیرد. دوم این که باید به اندازه کافی کوچک باشد تا اثر چند چشمگی در پنجره رخ ندهد، یعنی پنجره در یک موقعیت فقط شامل یک چشمه باشد.

۳. بررسی نتایج

شکل ۱ نقشه میدان مرجع ژئومغناطیسی بین‌المللی منطقه مورد مطالعه را که با نرم‌افزار ژئوسافت استخراج شده است، نشان می‌دهد. با توجه به شکل؛ مشاهده می‌شود با حرکت به سمت عرض‌های شمالی‌تر، همچنین حرکت از سمت شرق به غرب شدت میدان مرجع افزایش می‌یابد. به منظور اجرای تصحیح IGRF باید میدان مرجع زمین را در هر نقطه به دست آورده و آن را از مقدار ثبت شده کم نمود که مهم‌ترین مرحله در تصحیح داده‌ها به شمار می‌آید. تصحیح IGRF اثر میدان مغناطیسی پس‌زمینه منطقه‌ای زمین را حذف می‌کند و میدان باقی‌مانده، فقط میدان ناشی از بی‌هنجاری‌های موجود خواهد بود. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب پروفایل داده‌های مغناطیسی و نقشه شدت میدان باقی‌مانده مغناطیسی را پس از حذف میدان مرجع نشان می‌دهد.

دوقطبی، شامل مشتق مرتبه اول فضایی تابع $V = 1/r$ می‌شود، پس معادله اوایلر را با $N=2$ برآورده می‌کند. به طور مشابه میدان پتانسیلی شکل‌های هندسی دیگر، مشتقات مراتب بالاتری از $V = 1/r$ را شامل می‌شود، پس آن‌ها به ازای مقادیر بزرگ‌تری از N در رابطه اوایلر صدق می‌کنند. چشمه پتانسیلی ساده‌ای در موقعیت (x_0, y_0, z_0) در نظر بگیرید. در نقطه‌ای به مختصات (x_i, y_i, z_i) اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی کل به تابع $T(x_i, y_i, z_i)$ منجر می‌شود که در آن $i = 1, 2, 3, \dots, m$. همچنین صفحه برداشت داده‌ها صفحه $z = 0$ است و جهت مثبت محور قائم رو به پایین در نظر گرفته می‌شود. بنابراین

(۸)

$$(x_i - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y_i - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z_i - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = -NT(x_i, y_i, z_i)$$

اگر میدان ثابت زمینه (IGRF)، معادل B باشد، میدان ناشی از بی‌هنجاری ΔT_i به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$\Delta T_i = T(x_i, y_i, z_i) - B \quad (۹)$$

از این رو رابطه ۸ به صورت زیر درمی‌آید:

(۱۰)

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

برای $i = 1, 2, 3, \dots, m$ رابطه بالا به شکل ماتریسی زیر نوشته می‌شود:

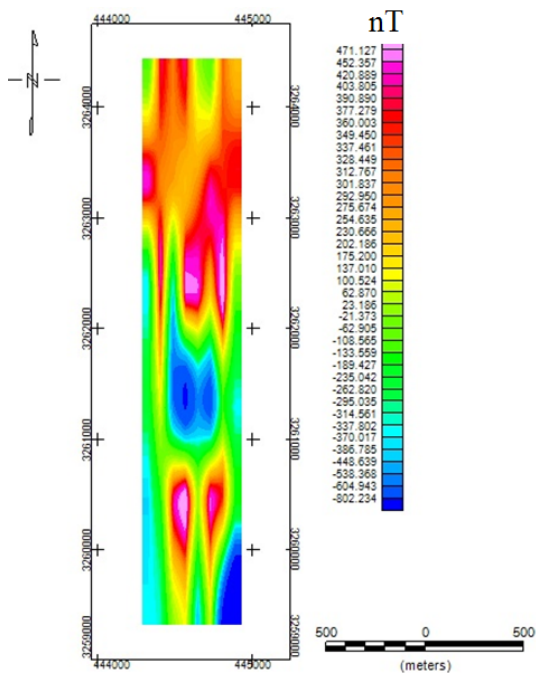
(۱۱)

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta T_1}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_1}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \Delta T_2}{\partial x} & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial \Delta T_m}{\partial x} & \cdot & \cdot \end{pmatrix} z \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{bmatrix} = -N \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \Delta T_3 \end{bmatrix}$$

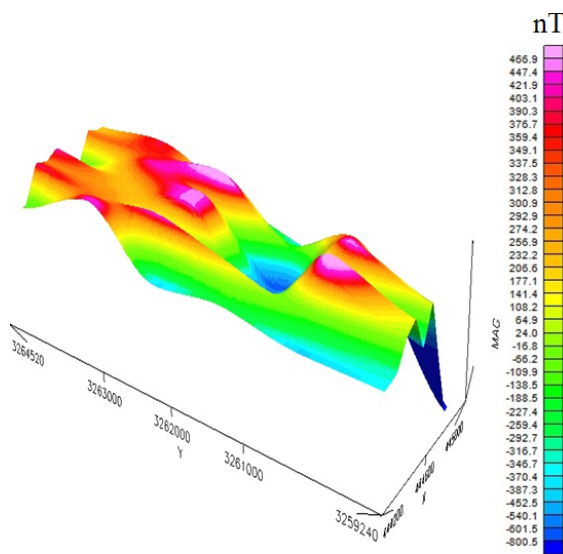
رابطه کلی واهم آمیخت اوایلر برای میدان T اندازه‌گیری شده در نقطه (x_i, y_i, z_i) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(x_i - x_0) \frac{\partial T_i}{\partial x} + (y_i - y_0) \frac{\partial T_i}{\partial y} + (z_i - z_0) \frac{\partial T_i}{\partial z} = -N(T_i - B) \quad (۱۲)$$

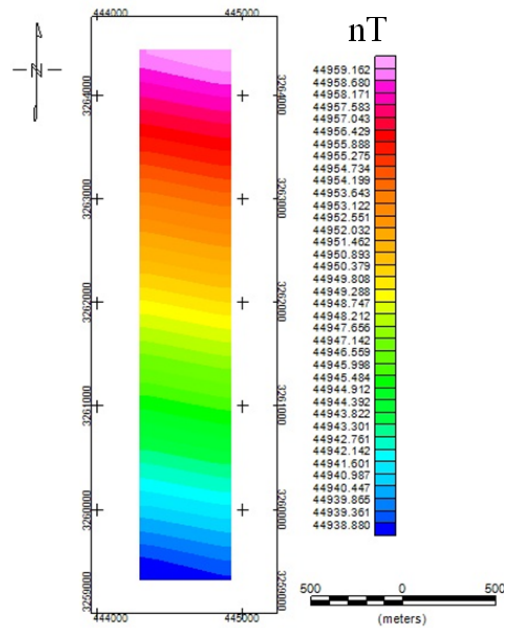
به کمک خطوط کنترل انجام شد. در نتیجه میدان به جامانده، فقط میدان ناشی از بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه خواهد بود. شکل ۴ میدان ناشی از ناهنجاری‌های موجود در منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد. این نقشه مبنای تمام مراحل پردازش و اعمال فیلتر و تفسیر نهایی خواهد بود. همچنین نمای سه‌بعدی از این نقشه در شکل ۵ دیده می‌شود. در این شکل محور قائم اندازه میدان ناهنجاری مغناطیسی در منطقه را نشان می‌دهد. مناطق دارای شدت بیشینه در قسمت‌های جنوبی، شمالی و منطقه دارای شدت باقی‌مانده کمینه در مناطق مرکزی منطقه مورد مطالعه به خوبی دیده می‌شوند.



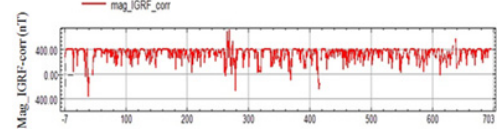
شکل ۴. نقشه میدان مغناطیسی مربوط به داده‌ها پس از اعمال هم‌ترازسازی



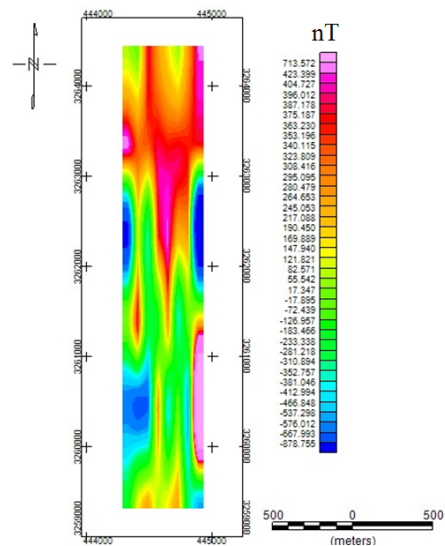
شکل ۵. نقشه سه‌بعدی میدان مغناطیسی منطقه



شکل ۱. میدان مغناطیس مرجع IGRF مربوط به ناحیه داده‌برداری



شکل ۲. پروفایل میدان مغناطیسی داده‌ها پس از اعمال تصحیح IGRF

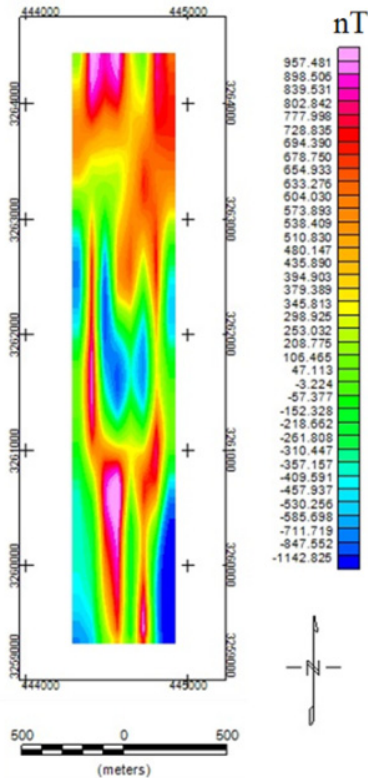


شکل ۳. نقشه میدان مغناطیسی مربوط به داده‌ها پس از تصحیح IGRF

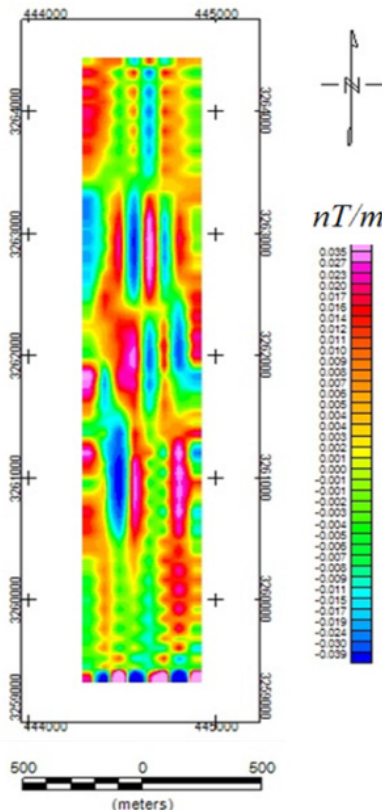
۱-۳. استخراج نقشه ناهنجاری شدت میدان کل مغناطیسی

در مرحله نخست تمام اثرات ناشی از منابع غیر از پوسته زمین، از جمله اثرات دستگاهی و نویز، خطای تأخیر زمانی و اثر میدان مغناطیسی هسته زمین با استفاده از تصحیح IGRF حذف شد. همچنین هم‌ترازسازی و ریزهم‌ترازسازی داده‌ها

از اعمال این فیلتر به تنهایی کم‌اهمیت باشد و مجبور به استفاده از اطلاعات مشتق قائم اول در کنار آن باشیم.



شکل ۶. نقشه ناهنجاری منطقه پس از اعمال برگردان به قطب



شکل ۷. نقشه گرادیان افقی بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه

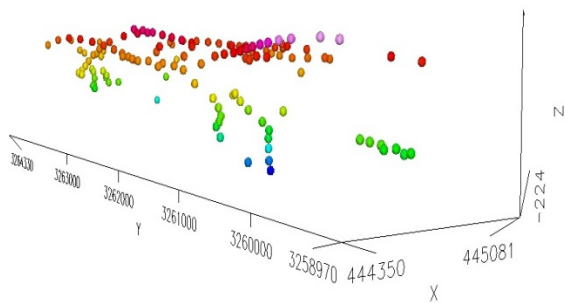
در این تحقیق آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت و با اعمال فیلترهای متداول اجرا شد. با اعمال این فیلترها، اطلاعات لازم برای تفسیر کیفی داده‌ها، با توجه به اهداف موردنظر امکان‌پذیر خواهد بود. فیلترهای گوناگون در تفسیر داده‌های مغناطیسی به کار برده می‌شوند. فیلترهای اعمال شده برای پردازش داده‌ها در این تحقیق به این شرح است: تبدیل به قطب، فیلتر ادامه فراسو، مشتقات قائم، افقی و واهم-آمیخت اوپلر. هر یک از این فیلترها به منظور خاصی به کار می‌روند. همچنین با توجه به در دسترس بودن اطلاعات خام داده‌های ثبت شده، امکان پردازش مجدد داده‌ها و انجام تفسیر آن‌ها با در اختیار داشتن اطلاعات جدیدتر میسر خواهد بود.

مقادیر مربوط به زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس زمین در منطقه مورد مطالعه، طبق سیستم میدان مغناطیس مرجع IGRF به ترتیب برابر با ۴۵/۹۹ و ۳/۱۴ درجه، در زمان داده برداری تعیین شده است. شکل ۶ نقشه ناهنجاری را پس از اعمال برگردان به قطب نشان می‌دهد. با مقایسه نقشه حاصل از اعمال این فیلتر با نقشه ناهنجاری مغناطیسی کل، یک جابه‌جایی افقی در راستای شمال در ناهنجاری‌ها مشاهده می‌شود.

در شکل ۷ نقشه گرادیان افقی بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه نشان داده شده است. در مرز توده مولد ناهنجاری، به علت تغییرات ناگهانی میدان مغناطیسی، گرادیان افقی شدید است. این در حالی است که روی توده مولد بی‌هنجاری میزان گرادیان افقی کاهش می‌یابد. در شکل؛ مناطق با رنگ‌های آبی و صورتی بیانگر مرز ناهنجاری‌ها هستند و رنگ‌های سبز و زرد روی توده مولد واقع شده‌اند.

در شکل ۸ سمت راست نقشه مشتق قائم مرتبه اول و در سمت چپ مشتق قائم مرتبه دوم بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه مشخص شده است. اعمال فیلتر مشتق قائم دوم بر داده‌ها موجب ظاهر شدن ناهنجاری‌های کم عمق با نسبت بیشتری در مقایسه با اعمال فیلتر مشتق قائم اول شده است. اشکال استفاده از فیلتر مشتق قائم دوم، تأثیر شدید نویزها بر خروجی فیلتر است؛ همین امر موجب می‌شود که تفسیر نقشه حاصل

به منظور اعمال فرایند اوپلر نقشه‌های مشتق ناهنجاری شدت میدان در سه جهت x ، y و z تهیه شد. مقدار شاخص ساختاری و اندازه پنجره اوپلر با آزمون و خطا به ترتیب برابر $1/6$ و 320×320 متر انتخاب شد. شمار حل‌های به دست آمده قابل قبول پس از اعمال فرایند اوپلر ۱۳۱ مورد است. شکل ۱۰ نمای سه بعدی از نقاط ناهنجاری را نشان می‌دهد که محور قائم عمق ناهنجاری‌ها را نشان می‌دهد. مناطق با عمق ناهنجاری بالای ۱۰۰ متر در ۲ بخش شمالی و جنوبی در این شکل به خوبی مشخص است.

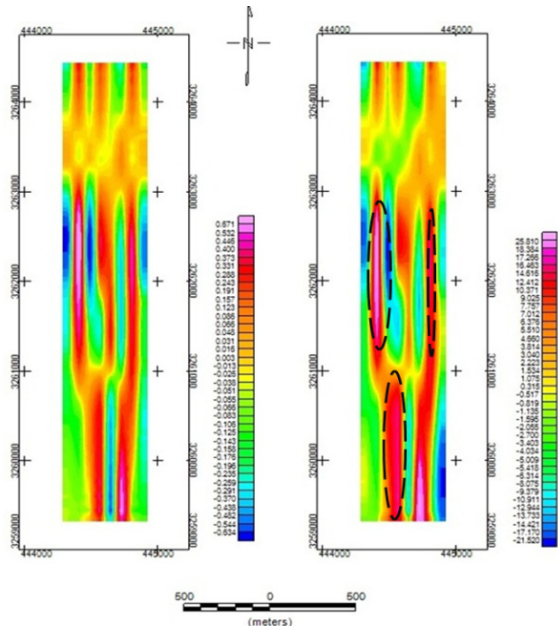


شکل ۱۰. نمای سه بعدی از نقاط ناهنجاری

۴. بحث و نتیجه گیری

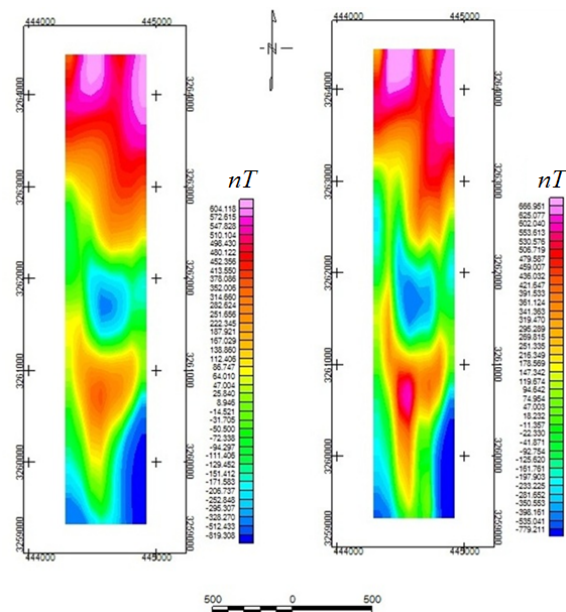
در این پژوهش، از روش برگردان به قطب استفاده شد تا شکل نامتقارن ناهنجاری مغناطیسی را به شکلی متقارن تبدیل کند. استفاده از این روش که به منظور دست‌یابی به محل واقعی بی‌هنجاری‌ها استفاده می‌شود، با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به حوزه مورد مطالعه انجام شد. با مقایسه نقشه حاصل از اعمال این فیلتر با نقشه ناهنجاری مغناطیس کل، یک جابه‌جایی افقی در راستای شمال در ناهنجاری‌ها مشاهده می‌شود.

همچنین در این پژوهش، نقشه‌های مشتق قائم مرتبه اول و مشتق قائم مرتبه دوم بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه استخراج شد. اعمال فیلتر مشتق قائم دوم بر داده‌ها موجب ظاهر شدن ناهنجاری‌های کم عمق بیشتری در مقایسه با اعمال فیلتر مشتق قائم اول شده است. اشکال استفاده از فیلتر مشتق قائم مرتبه دوم، تأثیر شدید نویزها بر خروجی فیلتر است که همین امر موجب می‌شود که تفسیر نقشه حاصل از اعمال این فیلتر به تنهایی اهمیت کمی دارد و باید از اطلاعات مشتق قائم مرتبه اول در کنار آن استفاده شود.



شکل ۸. نقشه مشتق قائم مرتبه اول (نمودار بالا)، سمت چپ مشتق قائم مرتبه دوم بی‌هنجاری مغناطیسی (نمودار پایین)

شکل ۹ نقشه ادامه فراسو برای عمق‌های ۲۰ و ۴۰ متری منطقه را نشان می‌دهند. شکل سمت راست عمق ۲۰ و شکل سمت چپ، عمق ۴۰ متر را مشخص می‌کنند. همان گونه که مشاهده می‌شود، اثر ناهنجاری‌های سطحی با افزایش عمق کاهش می‌یابد و فقط اثر توده‌های با منشأ عمیق‌تر باقی می‌ماند.



شکل ۹. نقشه ادامه فراسو در عمق‌های ۲۰ متر (سمت راست) و ۴۰ متری (سمت چپ)

ساختارهای مغناطیسی و محل گسل‌های مدفون ایران. علوم زمین. ۹۷:۱۳۹۵-۱۱۵-۱۲۲.

[۷] آزاد محمدرضا. کاربرد فیلتر گسترش رو به بالا در تفسیر داده‌های میدان مغناطیس به همراه تعیین ارتفاع بهینه در منطقه منصورآباد. مجله فیزیک زمین و فضا. ۴۱(۲):۲۲۹-۲۳۸-۱۳۹۴.

[8] Hall E. Use of Proton Magnetometer in Underwater Archaeology. Journal of Archaeometry. 2007;9:32-43.

[9] Finlay CC, Maus S, Beggan CD, Bondar TN, Chambodut A, Chernova TA, et al. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. Geophysical Journal International. 2010;183(3):1216-30.

[10] White James, Beamish D. Levelling aeromagnetic survey data without the need for tielines. geophysical prospecting. 2015;63:451-60.

[11] Cooper GR, Cowan D. Filtering using variable order vertical derivatives. Computers & Geosciences. 2004;30(5):455-59.

[12] Guo-Qing M, Xiao-Juan D, Li-Li L, Ling-Shun M. Interpretation of magnetic anomalies by horizontal and vertical derivatives of the analytic signal. Applied Geophysics. 2012; 9(4):468-74.

پی‌نوشت

1. Magnetic Anomaly Detection (MAD)
2. International Geomagnetism Reference Field (IGRF)
3. upward continuation
4. Euler de-convolution method
5. Aero Service
6. dead zone
7. lag correction
8. diurnal correction
9. leveling
10. micro leveling
11. International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)
12. simple leveling
13. careful leveling
14. structural index

با اعمال فیلتر فراسو مشخص می‌شود اثر ناهنجاری‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه با افزایش عمق کاهش می‌یابد و فقط اثر توده‌های عمیق‌تر باقی می‌ماند.

با انجام روش واهم آمیخت اوپلر روی داده‌های منطقه مورد بررسی، ۱۳۱ نقطه شبکه به‌عنوان نقاط ناهنجاری شناسایی شد. مناطق با عمق ناهنجاری بالا در دو بخش شمالی و جنوبی به‌خوبی مشخص هستند. همچنین ناهنجاری‌های سطحی با عمق کمتر از ۲۰ متر در امتداد خطوط شمالی جنوبی در پایین و میانه حوزه دیده می‌شوند. با توجه به عمق کم و راستای مستقیم‌الخط این نقاط، می‌توان حدس زد این ناهنجاری‌ها شاید از خطوط لوله یا کابل ناشی می‌شوند. این مناطق روی نقشه مشتقات قائم که ناهنجاری‌های سطحی را برجسته می‌کنند، مشخص شده‌اند که تطابق خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود.

مراجع

- [1] May D, Wren GG. Detection of submerged vessels using remote sensing techniques. Australian Defence Force Journal. 1997 Nov; 127:8.
- [2] Pavón-Carrasco FJ, Torta JM, Catalán M, Talamá A, Ishihara T. Improving total field geomagnetic secular variation modeling from a new set of cross-over marine data. Physics of the earth and Planetary Interiors. 2013 Mar 1;216:21-31.
- [3] Arnold JB. Marine magnetometer survey of archaeological materials near Galveston, Texas. Historical Archaeology. 1987;21(1):18-47.
- [4] Gorodnitskiy AM, Brusilovskiy YV, Ivanenko AN, Filin AM, Shishkina NA. New methods for processing and interpreting marine magnetic anomalies: Application to structure, oil and gas exploration, Kuril forearc, Barents and Caspian seas. Geoscience Frontiers. 2013;4(1):73-85.
- [5] جزائری جونقانی سید سجاد، اسکویی بهروز. برآورد عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی زمینی با استفاده از روش واهم آمیخت اوپلر استاندارد در منطقه رشم استان سمنان. مجله فیزیک زمین و فضا. ۴۳-۳۳(۲):۲۷-۱۳۹۰-۴۳.
- [6] امیرپور اصل میان‌و آب امیر، سهرابی قهرمان. پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد برای تعیین مرز