

بهبود تخمین مرز داده‌های میدان پتانسیل با استفاده از مشتق زاویه تیل و تتا

عبدالله عزام احمدی^۱؛ عبدالحمید انصاری^{۲*}؛ سید حسین مجتهدزاده^۳

۱- دانشجوی مقطع دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

* نویسنده مسئول مکاتبات: h.ansari@yazd.ac.ir

چکیده

هدف از این مطالعه ارزیابی عملکرد فیلتر مشتق زاویه تیل و فیلتر زاویه تتا در شناسایی مرزهای بی هنجاری های میدان پتانسیل و کاهش پدیده نویزهای مصنوعی و کاذب می باشد برای حذف ماهیت دوقطبی بیهنجاری های مغناطیسی ابتدا از فیلتر تبدیل به قطب استفاده شد. اما نتایج نشان داد که این فرایند خود موجب تولید یا تشدید نویزهای مصنوعی می شود به منظور رفع این محدودیت داده‌های انتقال به قطب شده به داده‌های شبه‌گرانی تبدیل گردیدند تا وابستگی جهت‌گیری مغناطیسی به‌طور مؤثری حذف شود. سپس فیلترهای مشتق زاویه تیل و زاویه تتا به ترتیب بر روی این داده‌های شبه‌گرانی و همچنین بر روی داده‌های واقعی گرانی اعمال شدند.

نتایج نشان داد که نقشه‌های مشتق زاویه تیل و زاویه تتا بر پایه داده‌های شبه‌گرانی، ناهنجاری‌های کاذب ناشی از انتقال به قطب را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده و مرزهای ساختاری، به‌ویژه پیرامون آنومالی ۲، را با دقت مکانی بالاتری برجسته می‌کنند. در حالی که مشتق زاویه تیل در داده‌های مغناطیسی انتقال به قطب‌شده همچنان تحت تأثیر جهت‌گیری منابع قرار دارد، فیلتر زاویه تتا نسبت به این محدودیت حساسیت کمتری نشان داد و در هر دو مجموعه‌ی داده‌ی گرانی و شبه‌گرانی مرزها را یکنواخت‌تر و بدون ارتفک تفکیک کرد. آزمون افزودن نویز تصادفی نیز پایداری عددی بالای هر دو فیلتر را تأیید نمود.

این پژوهش نشان می‌دهد که چارچوب پردازشی یکپارچه‌ی انتقال به قطب + شبه‌گرانی + (مشتق زاویه تیل+زاویه تتا) نه تنها دقت تفسیر مرزهای زیرسطحی را به سطح داده‌های گرانی واقعی نزدیک می‌کند، بلکه از چالش‌های ناشی از جهت‌گیری مغناطیسی و اعوجاج طیفی می‌کاهد. این رویکرد در مطالعات اکتشافی محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده، برای کاهش عدم قطعیت در تعیین موقعیت ذخایر معدنی بسیار کارآمد است.

واژگان کلیدی

مشتق زاویه تیل
زاویه تتا
میدان پتانسیل
داده‌های مصنوعی
داده‌های واقعی
شبه‌گرانی
مرز ناهنجاری‌ها

۱- مقدمه

میدان‌های پتانسیل مانند میدان‌های مغناطیسی و گرانی، ابزارهای اساسی در مطالعه ساختارهای زمین‌شناسی و فرآیندهای زیرسطحی هستند. این میدان‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره ترکیب، ساختار و توزیع ناهنجاری‌های زمین‌شناسی ارائه می‌دهند. مطالعه و تحلیل این میدان‌ها به شناسایی ساختارهای پنهان در زیرسطح زمین و همچنین درک فرآیندهای زمین‌شناسی کمک می‌کند. در این راستا، تکنیک‌های پردازش داده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [1]. در تحلیل داده‌های میدان پتانسیل، استفاده از مشتقات و فیلترهای مختلف برای استخراج اطلاعات دقیق‌تر از داده‌ها ضروری است. از روش‌های پیشرفته تحلیل میدان پتانسیل استفاده از فیلترهای تخمین مرز بی‌هنجاری‌ها مانند مشتق زاویه تیل (TDR) و زاویه تتا (Theta Angle) است، که مشتق زاویه تیل به عنوان یکی از تکنیک‌های پیشرفته، نقش مهمی در افزایش وضوح و دقت تحلیل‌ها ایفا می‌کند. این روش، بر اساس تغییرات زاویه‌ای میدان طراحی شده و به شناسایی مرزهای ناهنجاری‌های زیرسطحی کمک شایانی می‌کند. زاویه تتا با تقسیم مشتق افقی کل بر دامنه سیگنال تحلیلی، لبه‌ها را آشکار می‌کند و پاسخ حاصل به صورت کسینوس زاویه تتا تعبیر می‌شود. این فیلتر به دلیل ماهیت هم‌تراز خود، پاسخ‌های ناشی از منابع در عمق‌های مختلف را همگن می‌سازد [2].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی با استفاده از مشتق زاویه تیل در زمینه‌های مختلفی از جمله اکتشافات معدنی، ژئوفیزیک مهندسی و نقشه‌برداری ساختاری مورد توجه قرار گرفته است که چند مورد از این پژوهش‌ها به طور نمونه ذکر می‌شود. پژوهش میلر و همکاران که مشتق زاویه تیل را معرفی کردند، پایه‌ای برای مطالعات بعدی بود [3]. وردوزکو و همکاران مشتقات مغناطیسی مختلف را برای شناسایی ساختارها بررسی کرده و مشتق زاویه تیل را نسبت به سایر مشتقات ترجیح دادند و استفاده از این روش را پیشنهاد دادند [4]. کوپر و کاون فیلترهایی مبتنی بر فاز محلی را به منظور بهبود پردازش داده‌های میدان پتانسیل ارائه کردند. این فیلترها با کاهش نویز و افزایش وضوح مکانی، نقش مؤثری در شناسایی دقیق‌تر مرز ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی ایفا نمودند [5]. سلیم و روات روش ترکیبی از مشتق زاویه تیل و روش اوپلر ارائه دادند که امکان خودکار تفسیر داده‌های مغناطیسی را فراهم کرد [6]. بایکی و پدرسن با به کارگیری فیلتر مشتق زاویه تیل در تحلیل داده‌های گرانی، موفق به بهبود مکان‌یابی ساختارهای زمین‌شناسی شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مشتق زاویه تیل می‌تواند تفسیر داده‌های گرانی را با دقت بالاتری در تشخیص مرز ناهنجاری‌ها همراه سازد [7]. محققان فیرهد و ویلیامز به بررسی مشتقات مغناطیسی نرمالیزه شده پرداختند و دریافتند که این

تکنیک می‌تواند به همراه فیلتر زاویه تیل، به شناسایی دقیق‌تر مرزها و ساختارها کمک کند [8]. تحقیقات گسترده‌ای در ارتباط با آنومالی شماره ۲ گل‌گهر انجام شده است. این مطالعات شامل روش‌های متنوعی از جمله معکوس‌سازی همزمان دو بعدی و سه‌بعدی و تلفیق داده‌های مختلف (جوینت اینورژن) [9-11]، بررسی ارتباط بین میدان‌های پتانسیل ادامه فراسو شده در ارتفاعات مختلف و موقعیت توده‌های معدنی [12]، تفسیر ناهنجاری‌های میدان پتانسیل با بهره‌گیری از تکنیک‌های تصویرسازی پارامترهای توده [13]، و استفاده از تکنیک تصویرسازی پارامتر مستقیم (عدد موج محلی مستقیم) برای تحلیل ناهنجاری‌های گرانی دو بعدی و تخمین عمق برخی از ساختارهای زمین‌شناسی بوده است [14]. علاوه بر این، تعیین مرزهای توده‌های مغناطیسی با استفاده از گرادیان افقی ناهنجاری شبه‌گرانی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [15]. همچنین تحقیقات زیادی در رابطه به تخمین مرز بی‌هنجاری‌ها با استفاده از زاویه تتا صورت گرفته است که از جمله در سال ۲۰۰۵، وینز و همکاران روش «نقشه تتا» را به عنوان یک فیلتر لبه‌یابی جدید معرفی کردند [16]. در این روش، مقدار مشتق افقی کل بر دامنه سیگنال تحلیلی نرمال می‌شود، به گونه‌ای که پاسخ حاصل تحت عنوان زاویه تتا شناخته می‌شود [17]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این فیلتر هم‌تراز^۳ محسوب می‌شود و پاسخ دامنه‌ها را در منابع با عمق‌های مختلف یکنوا می‌کند؛ به طوری که دامنه پاسخ از منابع عمیق و کم‌عمق تقریباً برابر می‌شود [18]. به عنوان نمونه، دیده شده است که بیشینه مقادیر فیلتر نقشه تتا دقیقاً با مرزهای آنومالی‌ها منطبق است [19]. همچنین استفاده از فیلتر تتا در داده‌های گرانی نیز گزارش شده است [20]؛ به طوری که مقیاس و جهت‌گیری میدان (مغناطیسی یا گرانشی) اثر ناچیزی بر کارایی این فیلتر دارد [21]. در مجموع، روش زاویه تتا در مطالعات مختلف به عنوان ابزاری مؤثر برای شناسایی لبه‌ها در داده‌های مغناطیسی و گرانی معرفی شده است.

هدف اصلی این مطالعه، بررسی جامع و عمیق عملکرد تلفیقی مشتق زاویه تیل و زاویه تتا در تحلیل داده‌های مصنوعی و واقعی میدان پتانسیل است. در این راستا، با ارزیابی کارایی هر یک از این فیلترها به طور مستقل و سپس بررسی هم‌زمان آنها، سعی می‌شود نقاط قوت و محدودیت‌های هریک را در شناسایی لبه‌ها، تعیین موقعیت ساختارهای زمین‌شناسی و کاهش تأثیر نویزها مشخص شود. علاوه بر این، کاربرد داده‌های شبه‌گرانی به عنوان مطالعه مقدماتی اصلی این تحقیق در نظر گرفته شده است تا نشان دهد چگونه استفاده از زاویه تتا می‌تواند در کنار مشتق زاویه تیل به عنوان مکملی کارآمد برای تفکیک دقیق آنومالی‌ها و حذف نویزهای مصنوعی عمل کند. در ادامه، با مقایسه نتایج به دست آمده از هر دو روش، راهکارهایی نوین برای بهبود دقت و گسترش دامنه کاربرد آن‌ها در مطالعات ژئوفیزیکی ارائه خواهد شد.

¹ Tilt Derivative Angle

² Cos(θ), Theta Map

³ Balanced

۲- روش مورد مطالعه

۲-۱- مشتق زاویه تیلت

به دلیل ماهیت تابع مثلثاتی $\arctan$ تمام دامنه‌ها به مقادیر بین $-\pi/2$ و $+\pi/2$ یا $\pi/2$ معادل ($+90^\circ$ و -90°) محدود می‌شوند، صرف‌نظر از دامنه‌های VDR یا THDR، این واقعیت باعث می‌شود که این رابطه مانند یک فیلتر کنترل بهره خودکار گین^۷ (AGC) عمل کند و تمایل به همسان‌سازی خروجی دامنه آنومالی‌های TMI در یک شبکه یا در طول یک پروفیل داشته باشد. مشتق افقی کل TDR برای یک پروفیل برابر است با:

$$TDR_THDR = \left| \frac{\partial TDR}{\partial x} \right|$$

و برای یک گرید:

$$TDR_THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial TDR}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial TDR}{\partial y} \right)^2}$$

۲-۲- زاویه تتا

فیلتر زاویه تتا که به نام های «کسینوس تتا» (نقشه تتا) نیز یاد می‌شود برای شناسایی مرزهای آنومالی‌ها در داده‌های میدان پتانسیل استفاده می‌شود. روش زاویه تتا که توسط وینز و همکاران (۲۰۰۵) معرفی شده است، با تقسیم مشتق افقی کل بر دامنه سیگنال تحلیلی، لبه‌ها را آشکار می‌کند و پاسخ حاصل به‌صورت کسینوس زاویه تتا تعبیر می‌شود [17]. این فیلتر به دلیل ماهیت هم‌تراز خود، پاسخ‌های ناشی از منابع در عمق‌های مختلف را همگن می‌سازد. استفاده از این فیلتر در کنار فیلتر زاویه تیلت چشم‌انداز تازه‌ای را در شناسایی لبه‌ها فراهم می‌کند: در حالی که فیلتر زاویه تیلت مرزها را به صورت مکرراً نزدیک مقادیر صفر خود نشان می‌دهد، فیلتر زاویه تتا با تأکید بر بیشینه مقدار، لبه‌ها را به شکلی تیز و واضح مشخص می‌کند. فیلتر زاویه تتا ($\cos \theta$) با فرمول نسبت ساده مشتق‌های اول تعریف می‌شود. به بیان دیگر، کسینوس تتا برابر است با نسبت مشتق افقی کل (THDR) به دامنه سیگنال تحلیلی (AS) داده [2]:

$$\cos(\theta) = \frac{THDR}{AS} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2}}$$

۳- مدل‌سازی داده‌های مصنوعی

در این بخش برای بررسی روش مشتق زاویه تیلت ابتدا مدل‌های مصنوعی گرانی و مغناطیسی منشور مانند در محیط‌های همگن و غیر همگن با اضافه

مشتق زاویه تیلت (TDR) به عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل داده‌های میدان پتانسیل شناخته می‌شود که امکان شناسایی ویژگی‌های فیزیکی مرتبط با ساختارهای منبع پتانسیل را فراهم می‌آورد. این ویژگی‌ها شامل شکل، موقعیت مرزها، عمق تا سطح مرزها، شیب و تضاد خودپذیری مغناطیسی و چگالی سنگ‌ها هستند [22]. این مقاله به‌طور خاص بر روی شناسایی شکل و تشخیص مرزها تمرکز دارد. سیگنال تحلیلی پیچیده برای ساختارهای دوبعدی قرار زیر است:

$$A(x, y) = |A| \exp(j\theta)$$

از آنجایی که $|A| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2}$ معادل سیگنال تحلیلی شناخته شده است، j واحد موهومی در نمایش سیگنال‌های پیچیده، T نشان دهنده‌ی

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial T}{\partial x}} \right] \text{ و } [22] \text{ است } ^{\dagger} \text{ مقدار شدت کل مغناطیسی (TMI) است } ^{\ddagger}$$

فاز محلی است.

مشتق زاویه تیلت مشابه فاز محلی است، اما در مخرج از مقدار مطلق مشتق افقی استفاده می‌کند.

$$TDR = \tan^{-1} \left[\frac{VDR}{THDR} \right]$$

در اینجا $VDR^{\S}$ و $THDR^{\P}$ به ترتیب مشتق اول قائم و مشتق افقی کل از TMI هستند. از آنجاییکه VDR امکان دارد مثبت یا منفی باشد، THDR همیشه مثبت است. معادله مشتق افقی کل THDR در جهت x در حالت دوبعدی،

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2}$$

و معادله مشتق افقی کل برای گریدها:

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2}$$

⁷ Automatic Gain Control filter

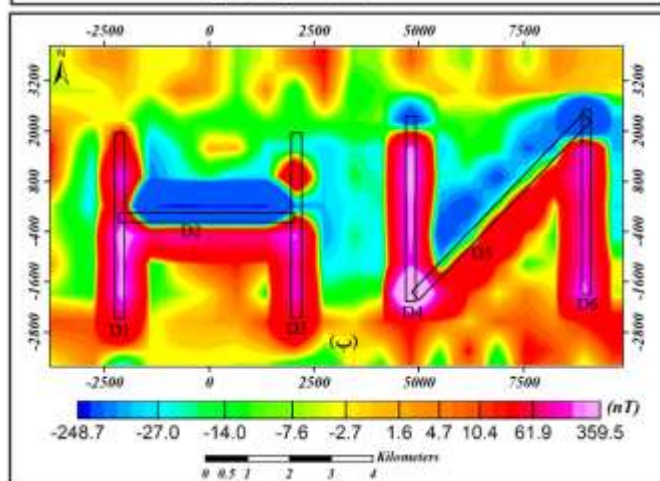
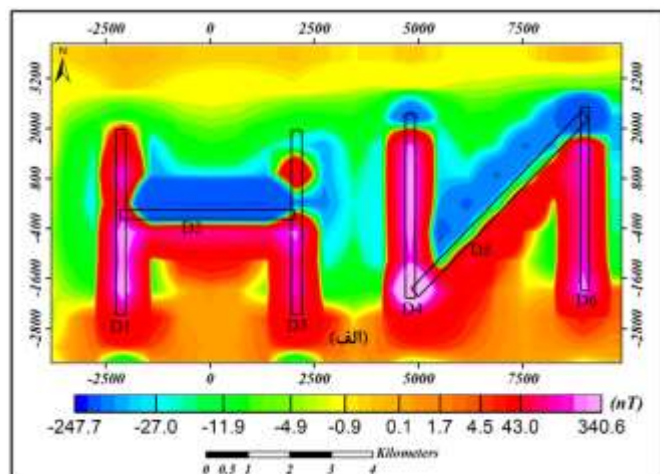
⁸ Analytical Signal

⁴ Total Magnetic Intensity

⁵ Vertical Derivative Ratio

⁶ Total Horizontal Derivative Ratio

نقشه‌ی میدان مغناطیسی و گرانی حاصل از مدل‌های مصنوعی تولید شده در شکل‌های (۲-الف و ب) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۲-الف-ب) دیده می‌شود مقدار تغییرات شدت میدان مغناطیسی بین ۲۴۸- تا ۳۵۹ نانوتسلا و مقدار تغییرات میدان گرانی به ۰ الی ۰٫۵ میلی‌گال می‌رسد. همانطور که در شکل (۲-الف و ب) مشاهده می‌شود منشور با امتداد شرقی-غربی و منشور با امتداد شمال شرق-جنوب غرب به صورت دوقطبی مغناطیسی ظاهر شده اند در حالیکه منشورهای با امتداد شمالی-جنوبی به صورت قطب مثبت طویل و یک قطب منفی کوچک در شمال آن ظاهر شده است. در محل اتصال منشورها آنومالی‌های مغناطیسی تجلی بیشتری یافته‌اند. در شکل‌های (۲-ج و د) اثر تمامی منشورها ظاهر شده است. نکته جالب توجه این که در محل اتصال منشورها آنومالی‌های گرانی نیز با وضوح بیشتر خود را نشان داده‌اند. برای نمایش بهتر بی‌هنجاری‌ها روی نقشه‌ها آنها را به حروف انگلیسی D که مخفف دایک مانند است و شماره‌های (۱-۶) که نشان دهنده ترتیب منشورها است، نشان داده شده است.



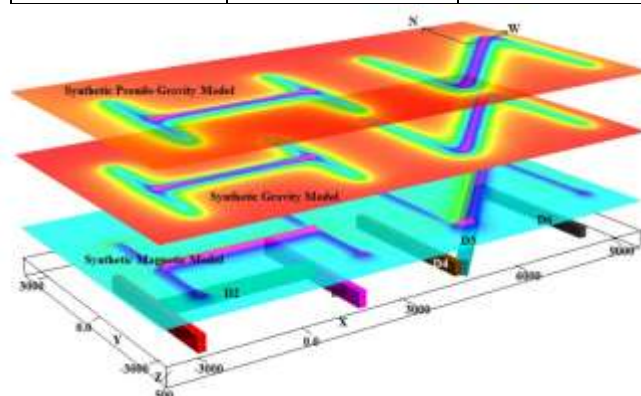
کردن ۱۰ درصد نویز بر اساس روش گوسین تولید شده است، امتداد این مدل‌ها در دو امتداد فرض شده و موقعیت آنها در شکل (۱-الف و ب) نمایش داده شده است. مشخصات فیزیکی و مغناطیسی این مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تعداد ۶ مدل در راستای شمال - جنوب، شرقی - غربی و شمال غرب - جنوب شرق در نظر گرفته شده است، مقدار خود پذیری مغناطیسی، چگالی و شیب در تمام مدل‌ها به ترتیب ۰٫۰۵ واحد SI ، $2,77 \text{ gr/cm}^3$ و 90° درجه فرض شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تمام مدل‌ها به شکل منشورهای با طول نسبتاً زیاد و عرض کم در نظر گرفته شده که شباهت به ساختارهای گسله دارد. میدان مغناطیسی القایی در این مدل‌ها آنطور که در جدول ۲ مشخص است، طوری در نظر گرفته شده است که با مشخصات میدان مغناطیسی القایی منطقه معدنی گل‌گهر شباهت داشته باشد.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های مصنوعی

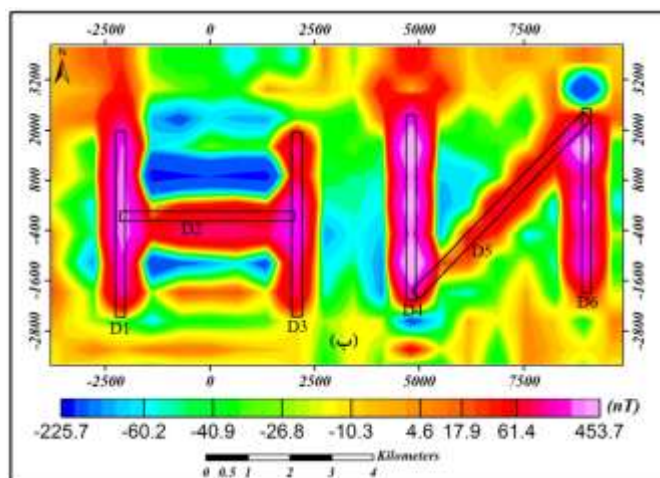
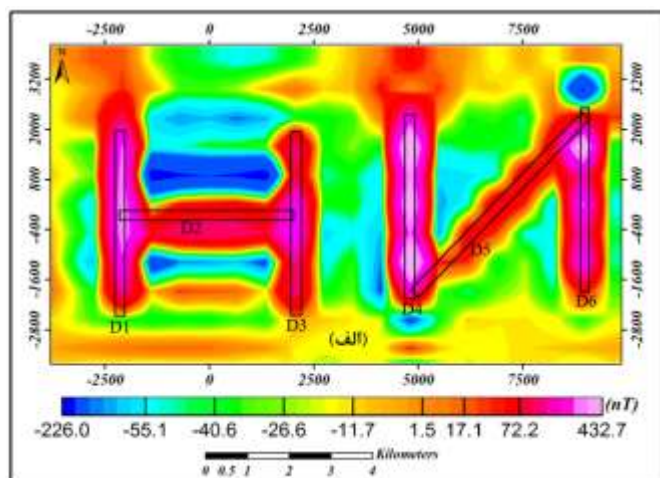
منشور	طول، عرض، ارتفاع (متر)	عمق از سطح زمین (متر)	شیب (درجه)	آزیمت (درجه)
منشور ۱	۲۰۰، ۴۰۰۰، ۴۰۰	۱۰۰	۹۰	۰٫۰
منشور ۲	۳۰۰، ۴۰۰۰، ۳۰۰	۱۰۰	۹۰	۹۰
منشور ۳	۲۰۰، ۴۰۰۰، ۴۰۰	۱۰۰	۹۰	۰٫۰
منشور ۴	۲۰۰، ۴۰۰۰، ۳۵۰	۱۰۰	۹۰	۰٫۰
منشور ۵	۳۰۰، ۵۵۰۰، ۴۰۰	۱۰۰	۹۰	۴۵
منشور ۶	۲۰۰، ۴۰۰۰، ۳۰۰	۱۰۰	۹۰	۰٫۰

جدول ۲: مشخصات میدان مغناطیسی القایی

شدت میدان مغناطیسی (nT)	زاویه انحراف میدان مغناطیسی (درجه)	زاویه میل میدان مغناطیسی (درجه)
۴۶۴۵۰	2.4	۴۳



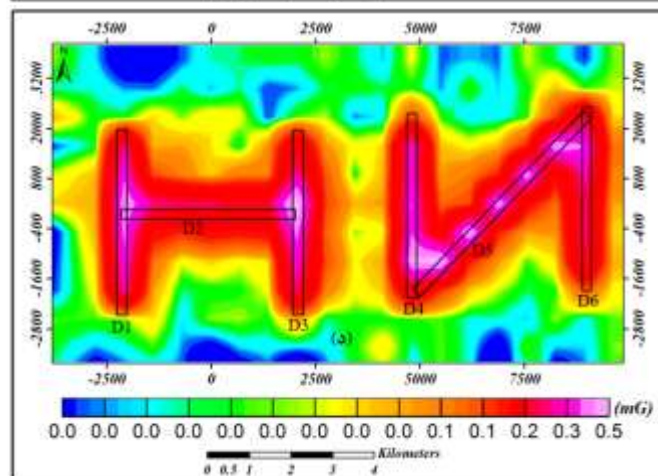
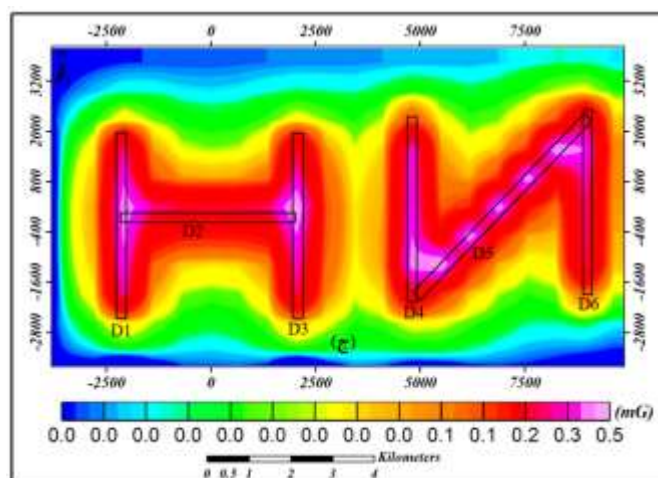
شکل ۱: نمای سه بعدی مدل‌های تولید شده



شکل ۳: نقشه‌های RTP حاصل از داده‌های مغناطیسی مصنوعی؛ شکل الف. نقشه RTP داده‌های مغناطیسی مدل‌های مصنوعی شکل ۳ در حالت بدون نویز؛ شکل ب. نقشه RTP حاصل از داده‌های مغناطیسی مدل‌های مصنوعی شکل ۳ به همراه نویز با توزیع گوسی

۴- معرفی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش توده شماره ۲ سنگ‌آهن در منطقه معدنی گل‌گهر در نظر گرفته شده است. منطقه معدنی گل‌گهر که در جنوب ایران و در نزدیکی شهر سیرجان واقع شده است، یکی از مهم‌ترین ذخایر سنگ‌آهن کشور به شمار می‌رود. این منطقه با دارا بودن ذخایر غنی، به‌عنوان یک قطب صنعتی و معدنی شناخته می‌شود. از نظر زمین‌شناسی، گل‌گهر در کمربند دگرگونی سندانج-سیرجان قرار دارد و شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی است که عمدتاً به دوره‌های پالئوزوئیک و مزوزوئیک تعلق دارند. این ترکیب پیچیده زمین‌شناسی به تشکیل کانسارهای وسیع آهن با غلبه مگنتیت کمک کرده و منطقه را به منبعی مهم برای تولید سنگ‌آهن در سطح ملی و بین‌المللی تبدیل کرده است.

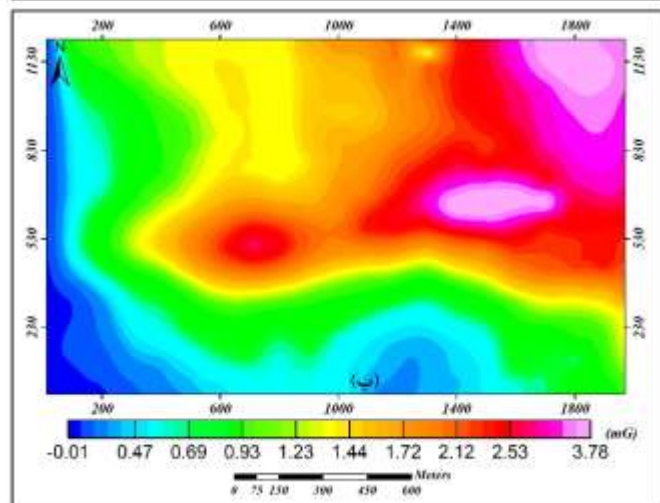
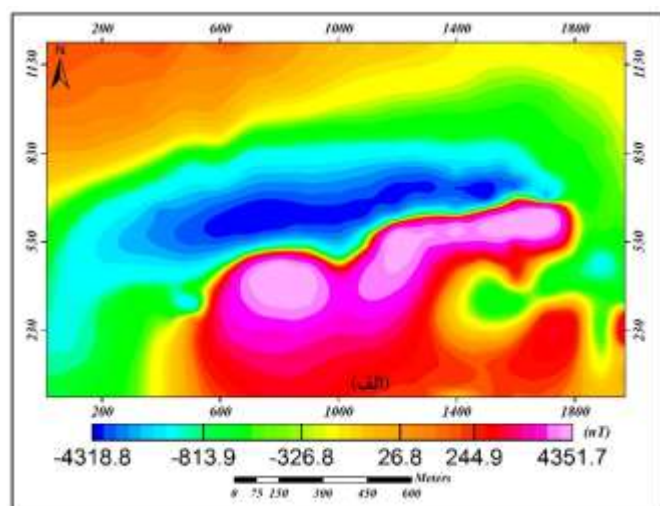


شکل ۲: نقشه‌های میدان مغناطیسی و گرانی باقیمانده مدل‌های مصنوعی؛ شکل الف. نقشه میدان مغناطیسی مدل‌های مصنوعی شکل ۲ در حالت بدون نویز؛ شکل ب. نقشه میدان مغناطیسی مدل‌های مصنوعی شکل ۲ به همراه نویز با توزیع گوسی؛ شکل ج. نقشه میدان گرانی مدل‌های مصنوعی شکل ۲ در محیط بدون نویز؛ شکل د. نقشه میدان گرانی مدل‌های مصنوعی شکل ۲ به همراه نویز با توزیع گوسی.

با هدف تفسیر دقیق‌تر موقعیت منابع مغناطیسی از فیلتر انتقال به قطب^۹ (RTP) استفاده شده است که این کار باعث می‌شود داده‌های مغناطیسی از حالت مایل به حالت قائم تبدیل شده و به صورت عمودی بر روی منبع قرار گیرد، این فیلتر روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی با در نظر داشتن مشخصات میدان القایی (جدول ۲) اعمال گردیده است. در نتیجه اعمال این فیلتر نقشه‌ی انتقال به قطب بدست آمد که در شکل (۳-الف و ب) نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در نقشه‌های انتقال به قطب محل منشورها با وضوح و دقت بیشتری ظاهر شده است.

⁹ Reduced to Magnetic Pole

شده است، آنطور که مشاهده می‌شود مقدار شدت تغییرات میدان مغناطیسی بین ۴۳۱۸- الی ۴۳۵۱ نانوتسلا و مقدار شدت میدان گرانی به ۳،۷۸ میلی‌گال می‌رسد.



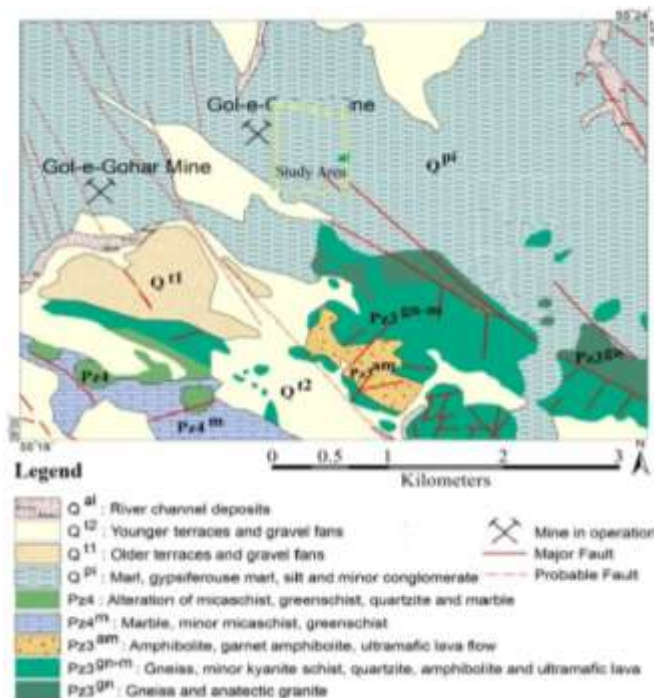
شکل ۵: نقشه‌های میدان مغناطیسی باقیمانده و آنومالی بوگه توده‌ی معدنی شماره ۲ گل‌گهر؛ شکل الف. نقشه میدان مغناطیسی باقیمانده توده‌ی شماره ۲ گل‌گهر؛ شکل ب. نقشه آنومالی بوگه توده‌ی معدنی شماره ۲ گل‌گهر.

۵- نتایج فیلترهای تخمین مرز روی داده‌های مصنوعی

۵-۱- نتایج اعمال مشتق زاویه تیلت روی داده‌های مصنوعی

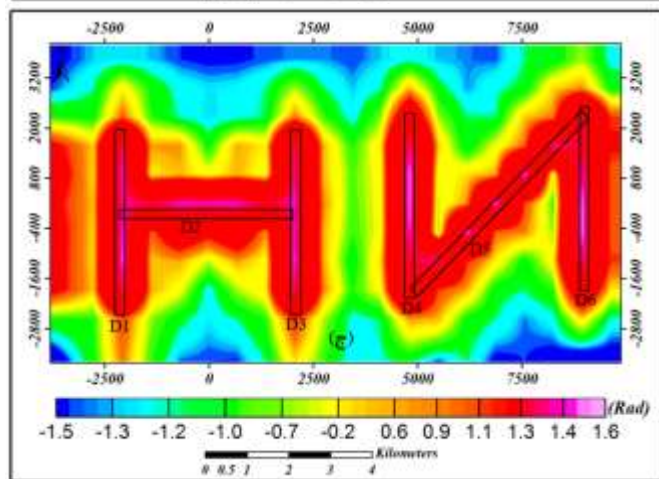
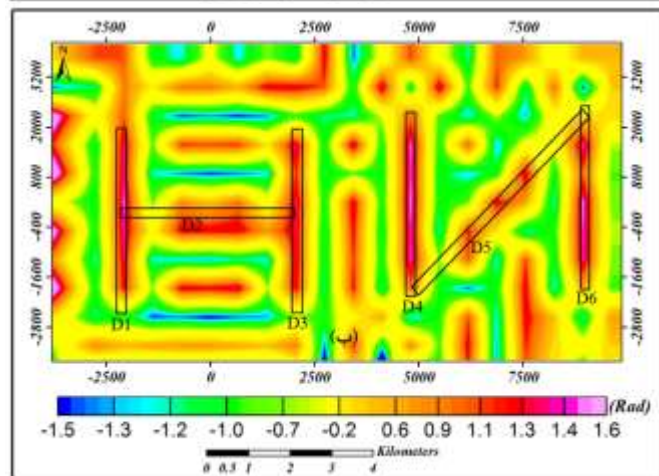
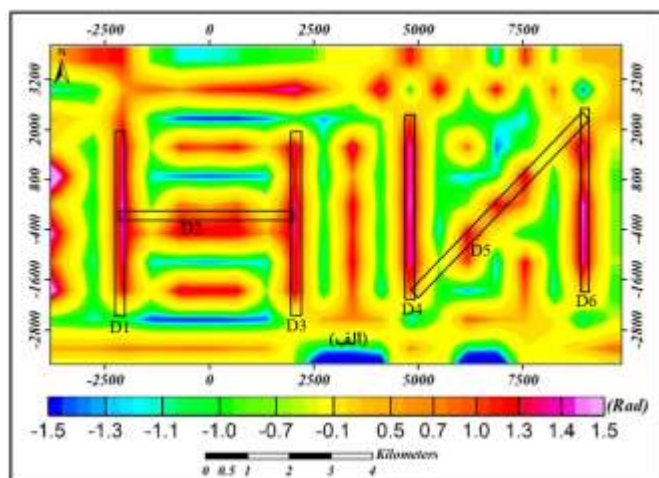
یکی از اهداف از این تحقیق بررسی فیلتر مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های میدان پتانسیل است، بنابراین این فیلتر روی گرید داده‌های مغناطیسی مصنوعی بدست آمده از فیلتر انتقال به قطب و داده‌های گرانی اعمال گردید. نتایج بدست آمده از این فیلتر در شکل (۶ الف-د) ارائه شده که نشان دهنده‌ی نقشه‌های بدست آمده از اعمال روش مشتق زاویه تیلت روی داده‌های مغناطیسی و گرانی می‌باشد. این روش با محاسبه نسبت مشتق عمودی به بزرگی مشتق افقی میدان پتانسیل، زوایای بین صفر تا

در میان شش توده معدنی شناسایی شده در گل‌گهر، توده شماره ۲ به دلیل ذخایر قابل توجه مگنتیت و هماتیت، برجسته است. توده معدنی شماره ۲ گل‌گهر در قسمت شمالی کمپلکس معدنی گل‌گهر قرار دارد. شکل کلی این کانسار به صورت یک عدسی کشیده با امتداد کلی شرقی - غربی بوده و قبل از روباره‌برداری و استخراج هیچ رخنمونی از آن در سطح زمین مشاهده نشده است. منشأ کانسار احتمالاً به فرآیندهای گرمایی مرتبط بوده که با فعالیت‌های تکتونیکی منطقه تقویت شده‌اند. کیفیت بالای آهن و حجم قابل توجه این ذخایر، توده شماره ۲ را به یکی از منابع اصلی عملیات معدنی گل‌گهر تبدیل کرده و نقش مهمی در تأمین نیازهای داخلی و صادراتی ایفا می‌کند. سنگهای در بر گیرنده ماده معدنی کلا از نوع دگرگونی با سن احتمالی اردوئین می‌باشد. این سنگها شامل کوارتز، کلریت‌شیت، کوارتز مسکویت‌شیت، گنیس، آمفیبولیت و اسکارن می‌باشد. ماده معدنی در این توده شامل سه قسمت می‌باشد، که مشتمل بر قسمت مگنتیت بالایی، زون اکسیده و مگنتیت پایینی است.



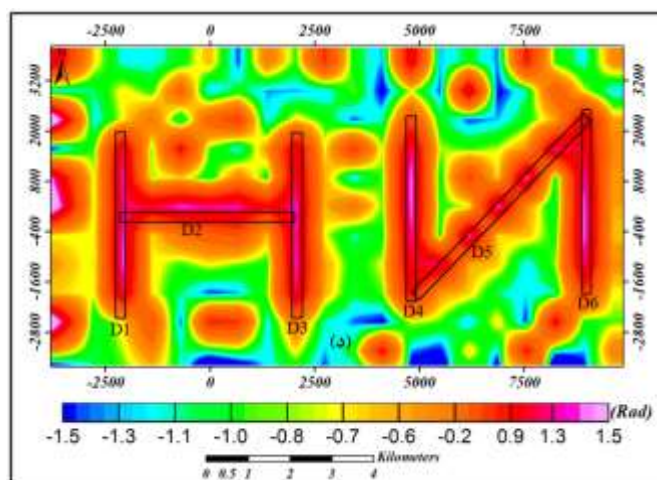
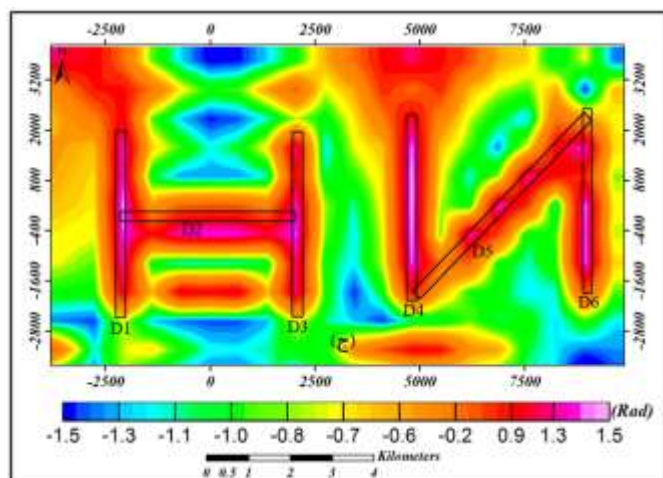
شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی گل‌گهر [24].

در این پژوهش از داده‌های زمینی گرانی و مغناطیس بر روی توده‌ی معدنی شماره ۲ گل‌گهر استفاده شده است. داده‌های گرانی و مغناطیس بر روی ۲۱ پروفیل برداشت شده است که فاصله بین پروفیل ها ۱۰۰ متر و بر روی هر خط برداشت ۳۱ ایستگاه اندازه‌گیری شده است. فاصله ایستگاه‌های برداشت گرانی و مغناطیس ۴۰ متر بوده است که به این ترتیب بر روی ۶۵۱ ایستگاه داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی اندازه‌گیری شده است. این داده‌ها بعد از انجام پیش‌پردازش‌های اولیه نقشه‌های میدان مغناطیسی و نقشه آنومالی بوگه تولید شده است که نتایج آن در شکل (۵-الف و ب) نشان داده



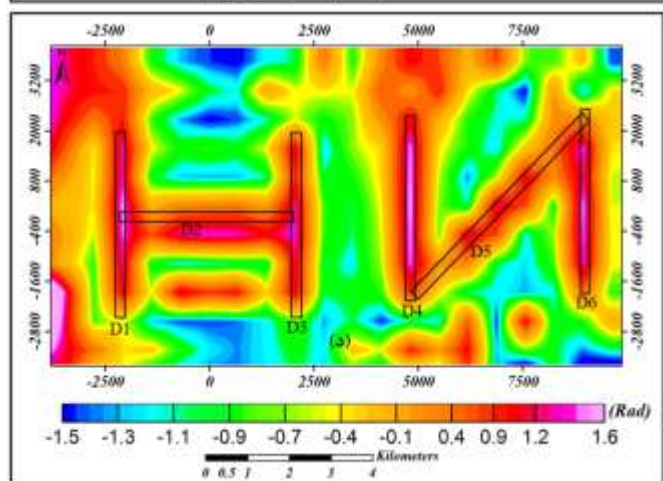
$\pm 90^\circ$ درجه تولید می‌کند که تغییرات تدریجی را به‌وضوح نشان می‌دهد. مقادیر نزدیک به صفر نشانگر قرارگیری بر روی مرز ناهنجاری‌ها و مقادیر مثبت و منفی بیانگر نواحی داخلی و خارجی آنومالی هستند. چنانچه مشاهده می‌شود در نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های مغناطیس‌سنجی تبدیل به قطب شده مرز منشورها تا حدودی مغشوش ظاهر می‌شود. علت این اغتشاش این است که با بررسی نقشه حاصل از فیلتر RTP پی برده می‌شود که در اثر این تبدیل بی‌هنجاری‌های کاذبی در نقشه تولید شده است که این ناهنجاری‌های کاذب بر روی نقشه حاصل از فیلتر TDR باعث ایجاد روندهای کاذب شده است (شکل ۶ الف وب). در این میان، باید توجه داشت که فیلتر تبدیل به قطب RTP نسبت به زاویه میدان زمین حساس بوده و در مناطق با میل و دکلینیشن میل، ممکن است باعث ایجاد ناهنجاری‌های کاذب و ارتفکتهای عددی شود. این در حالی است که فیلتر شبه‌گرانی با تبدیل داده‌های مغناطیسی به یک میدان پتانسیلی مشابه گرانی، وابستگی به جهت میدان نداشته و تصویر پایدارتر و واقعی‌تری از ساختارها ارائه می‌دهد. به همین دلیل، در این تحقیق از شبه‌گرانی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای حذف ارتفکتهای حاصل از RTP استفاده شده است. بنابراین برای از بین بردن این ناهنجاری‌های کاذب روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی از فیلتر شبه‌گرانی استفاده شده است (شکل ۶ ج و د). با اعمال فیلتر TDR روی داده‌های گرانی، مرز منشورها با وضوح بسیار بالاتری مشخص شده است اما گستره مرزها در این نقشه اغراق‌آمیز ظاهر شده است.

مغناطیسی مصنوعی، در حد کمتری ظاهر شده‌اند که در نتیجه دقت بالاتری در آشکارسازی مرزها و ویژگی‌های ساختاری مشاهده می‌شود.



شکل ۶: نقشه‌های TDR روی داده‌های گرانی و مغناطیسی مصنوعی؛

شکل الف. نقشه‌های TDR روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی در حالت بدون نویز؛ شکل ب. نقشه‌های TDR روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی به همراه نویز توزیع گوسی؛ شکل ج. نقشه‌های TDR روی داده‌های گرانی مصنوعی در حالت بدون نویز؛ شکل د. نقشه‌های TDR روی داده‌های گرانی مصنوعی به همراه نویز توزیع گوسی.



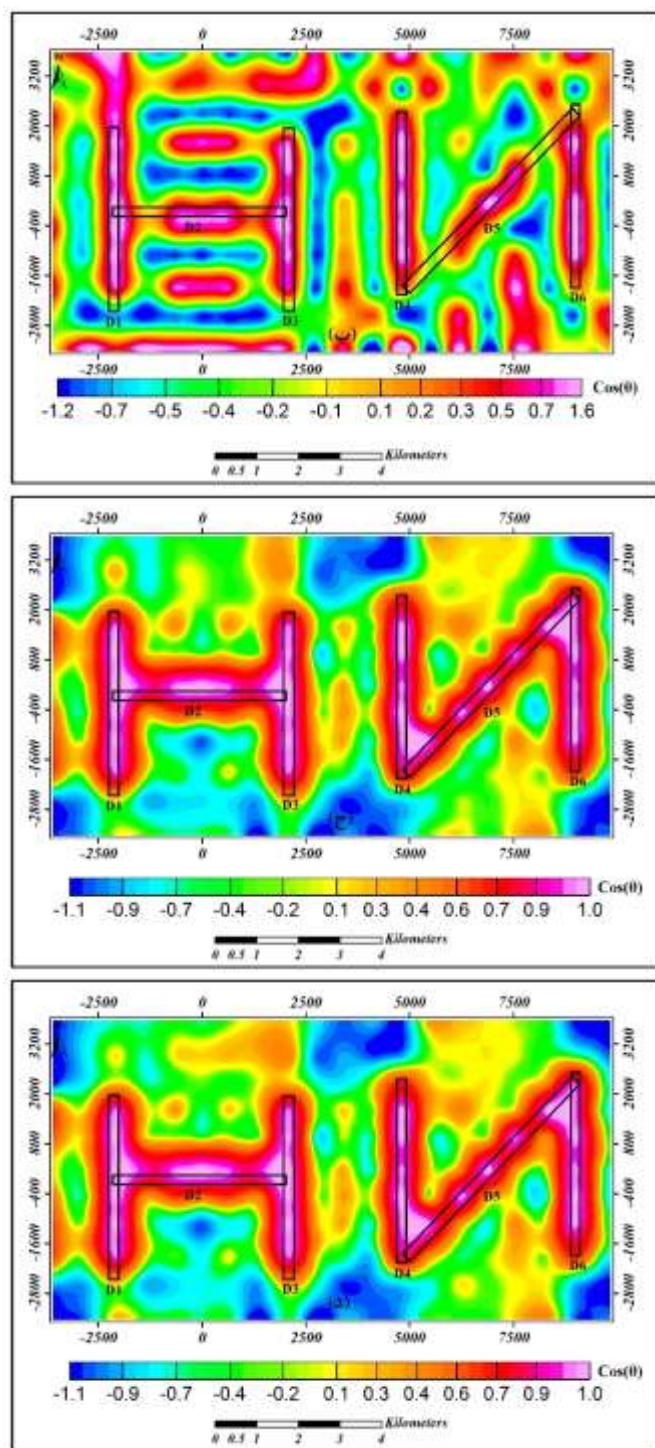
شکل ۷: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر مشتق زاویه تیلت (TDR)؛

شکل الف. نقشه بدست آمده از اعمال فیلتر زاویه تیلت روی داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی در حالت بدون نویز؛ شکل ب. نقشه حاصل فیلتر زاویه تیلت روی داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی به همراه نویز توزیع گوسی.

۵-۲- نتایج اعمال فیلتر زاویه تتا روی داده‌های مصنوعی

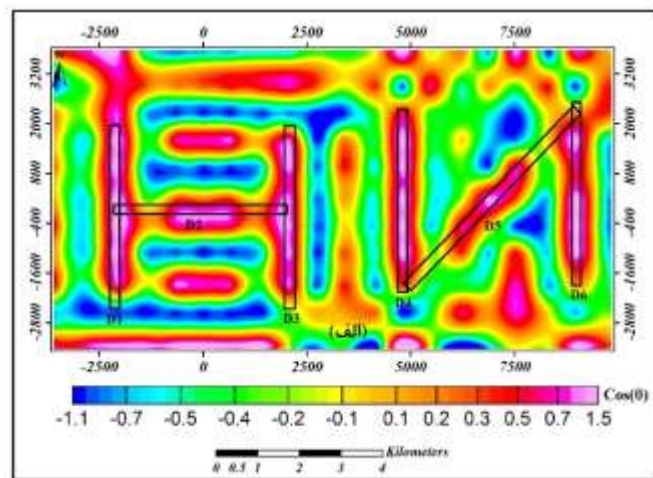
در ادامه این تحقیق، به منظور بررسی دقیق‌تر مرز ناهنجاری‌ها در داده‌های میدان پتانسیل، از فیلتر زاویه تتا ($\cos(\theta)$) استفاده شد. این فیلتر بر پایه محاسبه زاویه بین بردار گرادیان افقی و بردار گرادیان کلی میدان پتانسیل عمل می‌کند و خروجی آن، مقادیری بین صفر تا یک را تولید می‌نماید. مقدار یک معرف نواحی با گرادیان افقی غالب و در نتیجه نواحی مرزی بین ناهنجاری‌ها بوده و مقادیر نزدیک به صفر بیانگر بخش‌های مرکزی یا یکنواخت میدان پتانسیل است. در این مطالعه، فیلتر زاویه تتا روی داده‌های مصنوعی مغناطیسی تبدیل شده به قطب و همچنین داده‌های شبه‌گرانی اعمال گردید (شکل ۸ الف-د). شکل ۸-الف نتیجه اعمال فیلتر زاویه تتا بر داده‌های مغناطیسی کاهش یافته به قطب در محیط بدون نویز را نشان می‌دهد. در این نقشه، مرز منشورها با وضوح نسبتاً خوب مشخص شده‌اند،

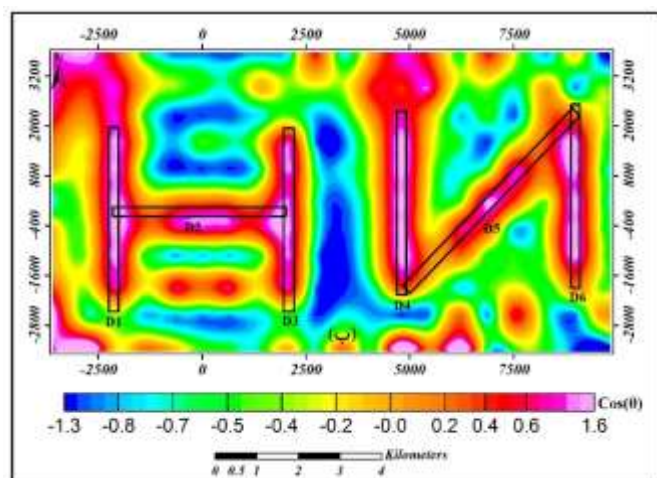
فیلتر شبه‌گرانی، آنومالی مغناطیسی TMI را به داده‌هایی شبیه به گرانی تبدیل می‌کند که در آن مغناطیس‌پذیری به عنوان چگالی در نظر گرفته می‌شود. این روش با فرض موازی بودن مغناطیس منبع و میدان ژئومغناطیسی، تحلیل داده‌های مغناطیسی را ساده‌تر کرده و پاسخ‌هایی با تک‌قطبی‌های نرم‌تر و طول موج بلندتر ارائه می‌دهد که مشابه اما نه کاملاً یکسان با پاسخ فیلتر RTP هستند. داده‌های شبه‌گرانی امکان مکان‌یابی مرزها را از طریق گرادیان افقی کل TDHR فراهم می‌کنند، هرچند که جزئیات کمتری نسبت به مشتقات مغناطیسی دارند. این داده‌ها تنها به سنگ‌های مغناطیسی مرتبط هستند و مقایسه آن‌ها با داده‌های واقعی گرانی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره بزرگی، توزیع چگالی و شکل منابع مغناطیسی ارائه دهد [23]. بنابراین برای حذف ناهنجاری‌های کاذب که روی نقشه‌های بدست آمده از فیلترهای RTP و TDR ایجاد شده است، از فیلتر شبه‌گرانی استفاده شده و نقشه‌های مشتق زاویه تیلت روی داده‌های بدست آمده از این فیلتر اعمال شده است که در شکل (۷ ج و د) قابل ارائه است. همان‌طور که در شکل‌های (۷-الف و ب) ملاحظه می‌شود، موقعیت منشورهایی با امتداد شمالی-جنوبی به طور نسبتاً واضح‌تر نمایان شده‌اند، هرچند که عرض توده‌ها به طور اغراق‌آمیز بزرگتر از اندازه واقعی آن‌ها نمایش داده شده است. در مقابل، منشورهایی با امتداد شرقی-غربی و منشور با امتداد شمال شرق-جنوب غرب نتوانسته‌اند به‌طور واضح آشکار شوند. از سوی دیگر، نتایج اعمال فیلتر مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های شبه‌گرانی (شکل‌های ۷-ج و د) مرزهای ناهنجاری‌ها را به‌طور قابل توجهی برجسته کرده است. با وجود برخی اعوجاج‌ها و مرزهای کاذب که به‌وجود آمده، این موارد نسبت به مرزهای کاذب ایجاد شده ناشی از اعمال فیلتر TDR بر روی داده‌های بدست آمده از فیلتر انتقال به قطب روی داده‌های



شکل ۸: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر زاویه تتا بر داده‌های میدان پتانسیل مصنوعی؛ شکل الف. نقشه بدست آمده از فیلتر زاویه تتا روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی کاهش یافته به قطب در حالت بدون نویز؛ شکل ب. نقشه بدست آمده از فیلتر زاویه تتا روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی کاهش یافته به قطب به همراه نویز؛ شکل ج. نقشه بدست آمده از فیلتر زاویه تتا روی داده‌های گرانی مصنوعی در حالت بدون نویز؛ شکل د. نقشه حاصل از فیلتر زاویه تتا روی داده‌های گرانی مصنوعی به همراه نویز.

اما در نواحی خاصی حضور بی‌هنجاری‌های کاذب مشاهده می‌شود که منشأ آن‌ها به فرآیند تبدیل به قطب بازمی‌گردد. این اثرات در شکل ۸-ب که داده‌های مشابه همراه با نویز پردازش شده‌اند، تشدید شده و مرز برخی ساختارها را با اختلال مواجه ساخته‌اند. این امر بیانگر حساسیت نقشه‌های RTP به اعوجاج‌های طیفی و تولید ارتفک‌های عددی به‌ویژه در مدل‌هایی با جهت‌گیری شرقی-غربی و مورب است. در مقابل، نتایج اعمال فیلتر زاویه تتا بر روی داده‌های گرانی در شکل‌های (۸-ج و د)، حاکی از شفافیت بیشتر و حذف ارتفک‌های کاذب هستند. در محیط بدون نویز (شکل ۸-ج)، مرزها با دقت بالا و بدون اعوجاج بازسازی شده‌اند، و در محیط نویزی (شکل ۸-د) نیز ساختارهای اصلی بدون تغییر چشمگیر حفظ گردیده‌اند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که این فیلتر توان بالایی در برجسته‌سازی مرز ساختارها دارد و نسبت به اغتشاشات عددی و ناهنجاری‌های کاذب ایجادشده توسط فیلتر انتقال به قطب، حساسیت کمتری نشان می‌دهد. در نقشه‌های حاصل از اعمال این فیلتر، مرز منشورها با دقت بالا و پیوستگی مناسب مشخص شده‌اند، به‌ویژه در داده‌های شبه‌گرانی که مرزها بدون اغتشاش و با تفکیک‌پذیری مطلوبی نمایان شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای فیلتر زاویه تتا در تفکیک ساختارهای زمین‌شناسی و کاهش اثرات ناخواسته ناشی از فیلترهای کلاسیک است.





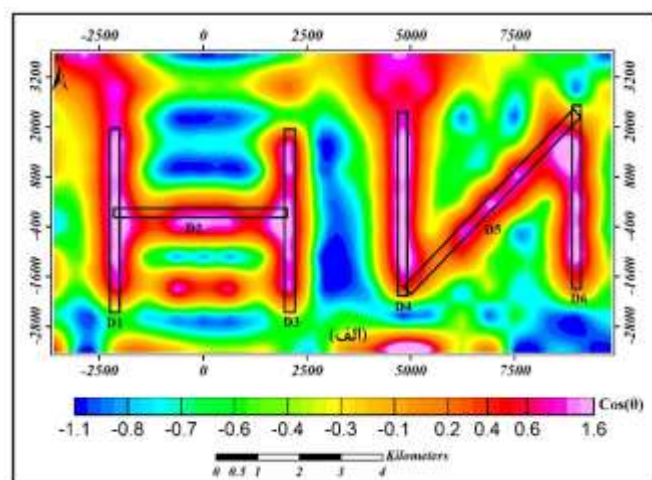
شکل ۹: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر زاویه تتا بر روی داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی؛ شکل الف. نقشه بدست آمده از اعمال فیلتر زاویه تتا روی داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی در حالت بدون نویز؛ شکل ب. نقشه بدست آمده از اعمال فیلتر زاویه تتا روی داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی شکل ۹ به همراه نویز توزیع گوسی.

۵-۳- مقایسه نتایج داده‌های مصنوعی

در بررسی داده‌های مصنوعی، عملکرد فیلترهای مشتق زاویه تیلت (TDR) و زاویه تتا ($\cos \theta$) در دو محیط بدون نویز و با نویز ارزیابی شد. همان‌طور که در شکل‌های ۳ مشاهده می‌شود، فیلتر انتقال به قطب (RTP) موجب افزایش تمرکز ناهنجاری‌ها در هر دو محیط همگن و ناهمگن شده، اما در برخی جهات ساختاری منجر به ایجاد بی‌هنجاری‌های کاذب گردیده است. اعمال فیلتر TDR بر داده‌های مغناطیسی (شکل‌های ۶-الف و ۶-ب) نشان می‌دهد که این فیلتر قادر است مرزهای ساختاری را با دقت بالا مشخص کند، ولی در مدل‌هایی با امتداد شرقی-غربی و مورب، اعوجاج‌هایی در مرزها مشاهده می‌شود. این در حالی است که در داده‌های گرانی (شکل‌های ۶-ج و ۶-د)، فیلتر TDR بدون وابستگی به جهت‌گیری، مرزها را با یکنواختی بیشتری تفکیک کرده است؛ گرچه عرض مرزها نسبت به ابعاد واقعی اغراق‌آمیز گزارش شده که ناشی از ماهیت انتگرالی پاسخ گرانی است.

نتایج فیلتر زاویه تتا نیز در شکل‌های (۸-الف تا ۸-د) ارائه شده است. در داده‌های مغناطیسی RTP شده (شکل‌های ۸-الف و ۸-ب)، مرز ناهنجاری‌ها تا حدی مشخص‌اند، ولی حضور ناهنجاری‌های کاذب، به‌ویژه در محیط نویزی، دقت تفسیر را کاهش می‌دهد. در مقابل، شکل‌های (۸-ج و ۸-د) که حاصل اعمال این فیلتر بر داده‌های گرانی هستند، ساختارها را با دقت بالا، پیوستگی مناسب و بدون اعوجاج عددی نمایش می‌دهند. همچنین، مقایسه نقشه‌های مشتق زاویه تیلت و زاویه تتا روی داده‌های شبه‌گرانی (شکل‌های ۷ و ۹ الف و ب) نشان می‌دهد که هر دو فیلتر مرزها را به‌خوبی مشخص کرده‌اند، اما فیلتر $\cos \theta$ توانسته است مرزها را با پیوستگی بیشتر و تأثیر کمتر از نویز بازسازی نماید.

در این مرحله، به‌منظور ارزیابی عملکرد فیلتر زاویه تتا در شرایط داده‌های تبدیل‌شده، این فیلتر بر روی داده‌های شبه‌گرانی حاصل از مدل مصنوعی مغناطیسی اعمال گردید. داده‌های شبه‌گرانی از تبدیل داده‌های مغناطیسی به یک میدان پتانسیلی با رفتار مشابه گرانی به‌دست آمده‌اند که با فرض هم‌راستایی مغناطیس‌دهی منبع و میدان زمین، پاسخ‌هایی یکنواخت‌تر و فاقد اعوجاج‌های ناشی از تبدیل به قطب تولید می‌کنند. در اینجا، فیلتر زاویه تتا که بر مبنای کسینوس زاویه بین بردار گرادیان افقی و گرادیان کل میدان تعریف می‌شود، بر روی این داده‌ها در دو حالت بدون نویز (شکل ۹-الف) و همراه با نویز (شکل ۹-ب) اعمال شد. در شکل ۹-الف که نمایانگر نتایج در محیط بدون نویز است، مرزهای ساختاری با وضوح و یکنواختی بالا به‌خوبی آشکار شده‌اند. منشورهای با امتداد شمالی-جنوبی به‌طور خاص با پاسخ‌های مشخص و پیوسته ظاهر شده‌اند. با این حال، در منشورهایی با امتداد شرقی-غربی یا مایل، مرزها ضعیف‌تر و تاحدی محو شده‌اند. در شکل ۹-ب که داده‌های مشابه همراه با نویز بررسی شده‌اند، ساختارهای اصلی همچنان قابل تشخیص هستند و فیلتر تتا توانسته است در برابر نویز عملکرد نسبتاً پایداری از خود نشان دهد. با وجود برخی اغتشاشات محلی، مرزهای ناهنجاری‌ها نسبت به نقشه‌های حاصل از داده‌های مغناطیسی RTP، همگن‌تر و از دقت مکانی بیشتری برخوردار هستند. این نتایج بیانگر آن است که اعمال فیلتر زاویه تتا بر روی داده‌های شبه‌گرانی، علاوه بر حذف ناهنجاری‌های کاذب، موجب تقویت مرزهای ساختاری شده و می‌تواند به‌عنوان روشی مکمل در تفسیر ژئوفیزیکی داده‌های میدان پتانسیل، به‌ویژه در مناطق با زمین‌شناسی پیچیده، مورد استفاده قرار گیرد.

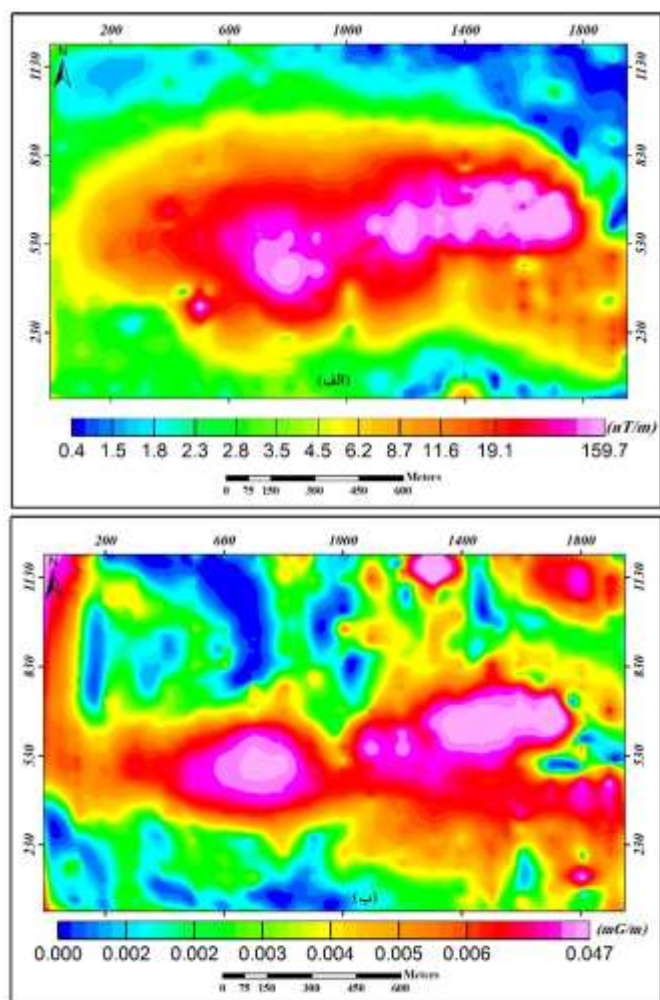


۶- نتایج تفسیر داده‌های واقعی

۶-۱- نتایج تفسیر فیلتر سیگنال تحلیلی

برای نمایش دقیق‌تر موقعیت مرکزی ناهنجاری‌های مربوط به توده شماره ۲ گل‌گهر، فیلتر سیگنال تحلیلی به‌طور جداگانه بر روی داده‌های مغناطیسی و گرانی اعمال شد. این فیلتر با ترکیب مشتقات افقی و عمودی میدان پتانسیل، یک سیگنال غیرجهت‌دار تولید می‌کند که بیشینه آن به‌طور تقریبی با مرکز جرم ناهنجاری هم‌مکان است. در داده‌های مغناطیسی، استفاده از این فیلتر امکان حذف وابستگی به زاویه میل و دکلینیشن مغناطیسی را فراهم کرده و موقعیت مرکزی توده‌های مغناطیسی را با دقت بالایی نمایش می‌دهد. در داده‌های گرانی نیز، این روش موجب تمرکز پاسخ و برجسته‌سازی نواحی دارای چگالی بالاتر شده است.

نقشه‌های حاصل از سیگنال تحلیلی برای هر دو مجموعه داده، ناهنجاری کشیده‌ای با امتداد تقریباً شرقی-غربی را نشان می‌دهند که با توده شماره ۲ گل‌گهر مطابقت دارد. علاوه بر این، در هر دو نقشه سه ناحیه فرعی متمایز مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی آن است که این توده معدنی از سه زیرتوده مجزا با منشأ مغناطیسی و چگالی متفاوت تشکیل شده است. موقعیت و حد و مرز این سه ناهنجاری فرعی، به‌طور واضح و یکنواخت در نتایج فیلتر سیگنال تحلیلی قابل تشخیص است، که نشان‌دهنده دقت بالای این روش در تعیین مرکز و هندسه منابع پتانسیل می‌باشد (شکل ۱۰).

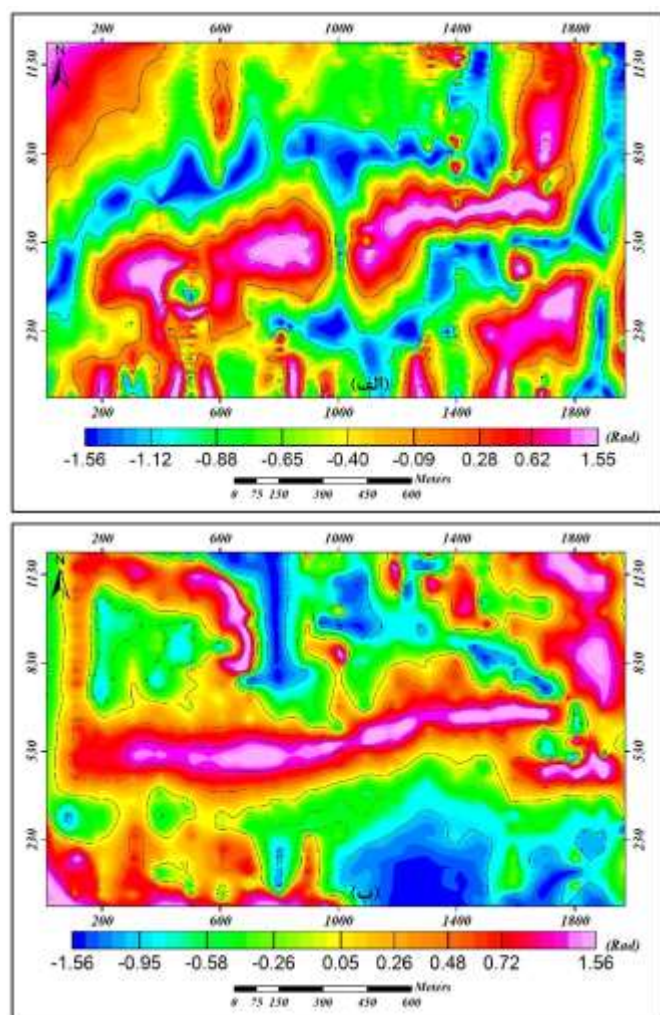


شکل ۱۰: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر داده‌های مغناطیسی و گرانی توده شماره ۲ گل‌گهر؛ شکل الف. نقشه حاصل از فیلتر سیگنال تحلیلی روی داده‌های مغناطیسی کاهش به قطب شده شکل ۵- الف توده‌ی شماره ۲ گل‌گهر؛ شکل ب. نقشه حاصل از فیلتر سیگنال تحلیلی روی داده‌های گرانی شکل ۵- ب توده‌ی شماره ۲ گل‌گهر.

۶-۲- نتایج تفسیر فیلتر انتقال به قطب

برای تفسیر دقیق‌تر ناهنجاری‌های مغناطیسی مربوط به توده شماره ۲ گل‌گهر، داده‌های مغناطیسی ابتدا با استفاده از فیلتر انتقال به قطب پردازش شدند. این فیلتر با حذف اثرات زاویه میل و دکلینیشن میدان مغناطیسی زمین، امکان بازنمایی ناهنجاری‌ها را به‌گونه‌ای فراهم می‌سازد که بیشینه پاسخ مغناطیسی در موقعیت مرکزی منبع واقع شود. بدین ترتیب، شکل نهایی ناهنجاری‌ها ساده‌تر و متقارن‌تر شده و موقعیت آن‌ها با دقت بیشتری قابل تعیین می‌گردد.

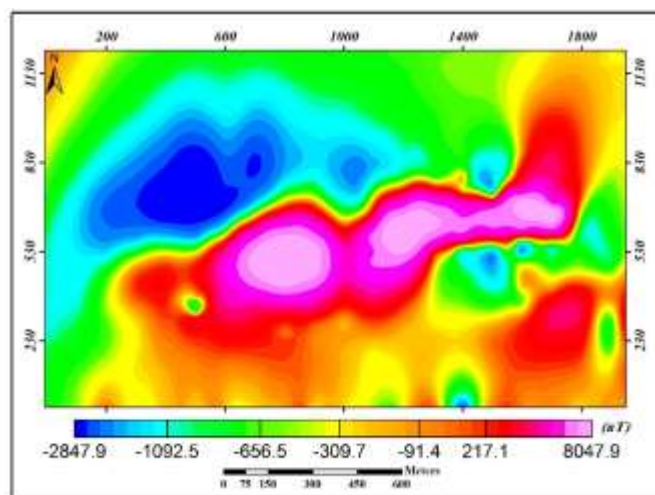
نتایج حاصل از اعمال RTP بر داده‌های مغناطیسی منطقه گل‌گهر نشان می‌دهد که ناهنجاری اصلی مرتبط با توده شماره ۲ به‌صورت کشیده با امتداد تقریباً شرقی-غربی ظاهر شده است. درون این ناهنجاری اصلی، سه ناهنجاری فرعی قابل شناسایی است که احتمالاً نمایانگر سه زیرتوده مجزای



شکل ۱۲: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر مشتق زاویه تیلت (TDR) بر داده‌های مغناطیسی و گرانی توده شماره ۲ گل‌گهر؛ شکل الف: نقشه TDR داده‌های مغناطیسی، نمایش مرز ناهنجاری با تمرکز بر امتداد شرقی-غربی توده و شناسایی نسبیت ساختارهای فرعی؛ شکل ب: نقشه TDR داده‌های گرانی، آشکارسازی مرزهای ساختاری با دقت بالا و یکنواختی بیشتر نسبت به داده‌های مغناطیسی.

همانطور که در شکل‌های (۱۲ الف و ب) مشخص است؛ در بررسی مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های واقعی گرانی و مغناطیسی، مشاهده شد که اعمال فیلتر انتقال به قطب روی داده‌های مغناطیسی موجب ایجاد تعدادی ناهنجاری کاذب گردیده است که اثر آن‌ها پس از اعمال مشتق زاویه تیلت نیز باقی می‌ماند. این پدیده باعث کاهش دقت تفسیر مرزهای توده‌های معدنی شده و تفکیک صحیح آن‌ها را دشوار می‌سازد. به منظور رفع این چالش، ابتدا با استفاده از داده‌های مغناطیسی، داده‌های شبه‌گرانی تولید گردید که شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختاری مورد نظر می‌باشد. سپس، مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های شبه‌گرانی اعمال شد تا مرزهای ناهنجاری بهبود یافته و به‌طور واضح‌تری مشخص شوند (شکل ۱۳-الف). نتایج حاصل نشان می‌دهد که این رویکرد باعث کاهش اثرات ناهنجاری‌های کاذب شده و مرز توده‌های معدنی در آنومالی ۲ را با دقت بالاتری شناسایی

سنگ آهن مگنتیتی هستند. این سه ناحیه در نقشه RTP با الگوی خطی و پیوسته نمایان شده‌اند و مرز آن‌ها با دقت نسبی مشخص است. با وجود این، باید توجه داشت که در برخی نواحی، به‌ویژه در اطراف منشورهای با امتداد شرقی-غربی، اثرات جانبی ناشی از اعوجاج طیفی و بی‌هنجاری‌های کاذب مشاهده می‌شود که در فیلترهای مکمل نظیر سیگنال تحلیلی یا شبه‌گرانی به‌طور مؤثرتری کنترل شده‌اند. با این حال، RTP همچنان به‌عنوان یک ابزار کلیدی در اصلاح جهت‌گیری و تقویت پاسخ ناهنجاری‌های مغناطیسی در تحلیل اولیه داده‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند (شکل ۱۱).

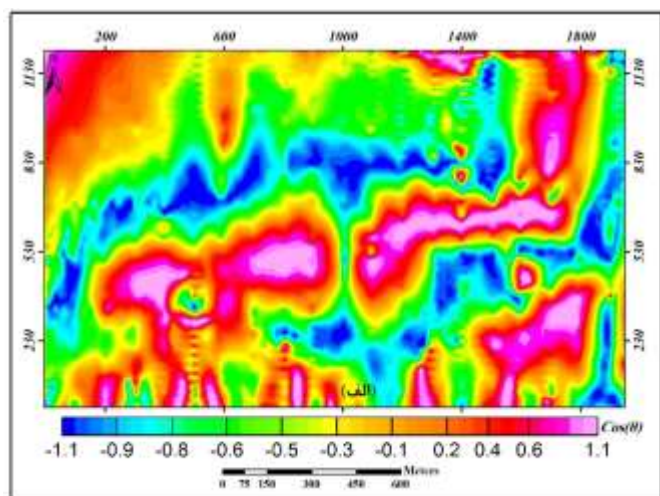


شکل ۱۱: نقشه حاصل از اعمال فیلتر انتقال به قطب (RTP) بر داده‌های مغناطیسی شکل ۵ توده‌ی شماره ۲ گل‌گهر.

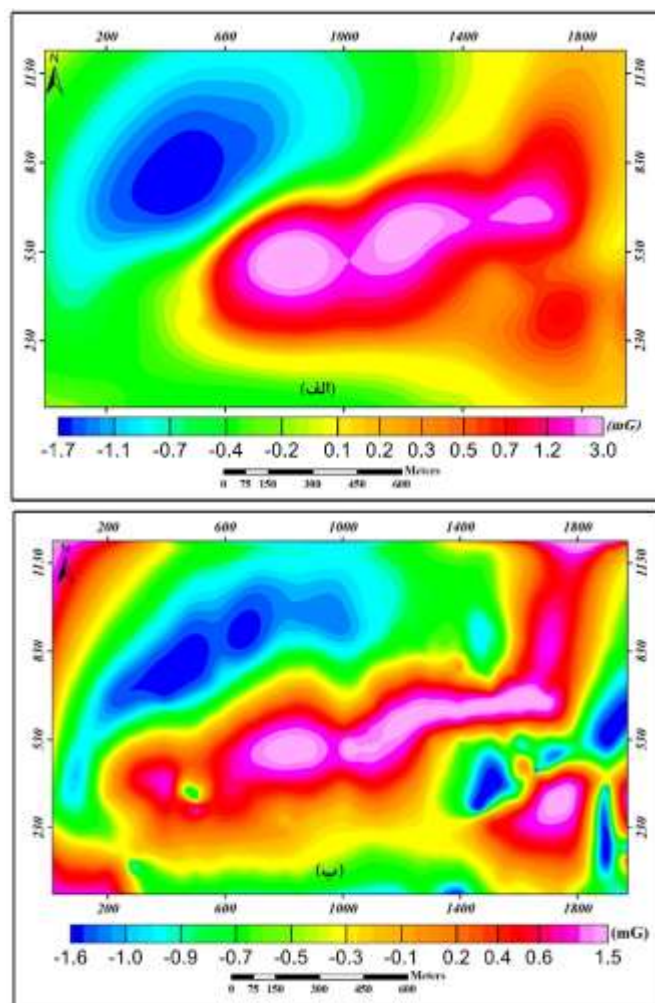
۳-۶- نتایج تفسیر مشتق زاویه تیلت

برای شناسایی مرزهای ناهنجاری‌های توده شماره ۲، از روش مشتق زاویه تیلت (TDR) استفاده شده است که به دلیل توانایی آن در برجسته‌سازی مرزهای ساختاری و موقعیت دقیق آنومالی‌ها، به‌ویژه در داده‌های مغناطیسی و گرانی، کاربرد گسترده‌ای دارد. این روش با محاسبه نسبت مشتق عمودی به بزرگی مشتق افقی میدان پتانسیل، زوایای بین صفر تا $\pm 90^\circ$ درجه تولید می‌کند که تغییرات تدریجی را به‌وضوح نشان می‌دهد. مقادیر نزدیک به صفر نشانگر قرارگیری بر روی مرز ناهنجاری‌ها و مقادیر مثبت و منفی بیانگر نواحی داخلی و خارجی آنومالی هستند که نتایج آن در شکل (۱۲ الف و ب) نشان شده است.

آن در شکل‌های ۱۴-الف و ۱۴-ب نمایش داده شده‌اند. در شکل ۱۴-الف، که نتیجه اعمال فیلتر زاویه تتا بر داده‌های مغناطیسی RTP شده است، مرز توده مغناطیسی با امتداد غالب شرقی-غربی با دقت مناسبی مشخص گردیده است. با این حال، در برخی نواحی به‌ویژه در لبه‌ها، نشانه‌هایی از بی‌هنجاری‌های کاذب ناشی از اعوجاج طیفی مرتبط با تبدیل به قطب قابل مشاهده است. این موضوع بیانگر آن است که اگرچه فیلتر تتا توانایی برجسته‌سازی مرزها را دارد، اما همچنان تا حدودی تحت تأثیر کیفیت داده اولیه قرار می‌گیرد. در مقابل، نقشه حاصل از اعمال همین فیلتر بر داده‌های گرانی واقعی (شکل ۱۴-ب) مرزهای ناهنجاری را با وضوح بالاتر و یکنواختی بیشتری نمایش می‌دهد. مرز توده معدنی با پیوستگی مناسبی آشکار شده و اثری از بی‌هنجاری‌های کاذب مشاهده نمی‌شود. این تفاوت عملکرد، بیانگر مقاومت بالاتر فیلتر زاویه تتا در مواجهه با نویز و اعوجاج در داده‌های گرانی نسبت به داده‌های مغناطیسی است. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که فیلتر زاویه تتا می‌تواند در داده‌های واقعی نیز همچون مدل‌های مصنوعی، ابزاری کارآمد برای تفکیک مرز ساختارهای ژئوفیزیکی محسوب شود، به‌ویژه زمانی که بر روی داده‌های گرانی یا شبه‌گرانی به کار رود که از پایداری عددی بیشتری برخوردارند.



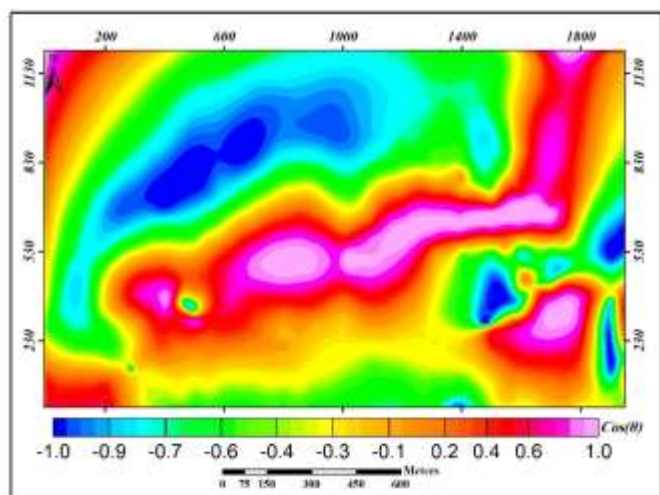
می‌کند؛ از سوی دیگر نقشه بدست آمده از مشتق زاویه تیلت روی داده‌های شبه‌گرانی مطابقت زیادی با نقشه بدست آمده از اعمال مشتق زاویه تیلت روی داده‌های گرانی واقعی دارد (شکل ۱۳-ب).



شکل ۱۳: نقشه‌های حاصل از پردازش داده‌های شبه‌گرانی مشتق شده از داده‌های مغناطیسی توده‌ی شماره ۲ گل‌گهر؛ شکل الف: نقشه حاصل از اعمال فیلتر شبه‌گرانی - تبدیل داده‌های مغناطیسی به پاسخ پتانسیلی مشابه گرانی به منظور حذف اثرات جهت‌گیری و اعوجاج‌های ناشی از میدان مایل؛ شکل ب: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق زاویه تیلت (TDR) بر داده‌های شبه‌گرانی - نمایش مرز ناهنجاری‌ها با دقت بالا و کاهش ناهنجاری‌های کاذب نسبت به حالت مغناطیسی اولیه.

۴-۶- نتایج تفسیر فیلتر زاویه تتا

در ادامه این تحقیق، به منظور بررسی عملکرد فیلتر زاویه تتا ($\cos(\theta)$) در شرایط واقعی، این فیلتر بر روی داده‌های میدان پتانسیل مربوط به توده شماره ۲ گل‌گهر اعمال گردید. ابتدا داده‌های مغناطیسی این منطقه با استفاده از فیلتر انتقال به قطب (RTP) تصحیح شدند تا اثرات وابسته به جهت میدان مغناطیسی زمین حذف گردد. سپس خروجی حاصل، به همراه داده‌های گرانی واقعی، با استفاده از فیلتر زاویه تتا پردازش شدند که نتایج



شکل ۱۵: نقشه حاصل از اعمال فیلتر زاویه تتا ($\cos(\theta)$) بر داده‌های شبه‌گرانی توده شماره ۲ گل‌گهر؛ ساختار اصلی با امتداد شرقی-غربی با دقت بالا بازسازی شده و مرز ناهنجاری‌ها به صورت پیوسته و بدون اغتشاش عددی مشخص شده‌اند. پهنای مرزها نسبت به داده‌های گرانی کمی بیشتر ظاهر شده، اما نقشه فاقد نویز و بی‌هنجاری‌های کاذب است که بیانگر پایداری عددی بالای فیلتر در محیط شبه‌گرانی است.

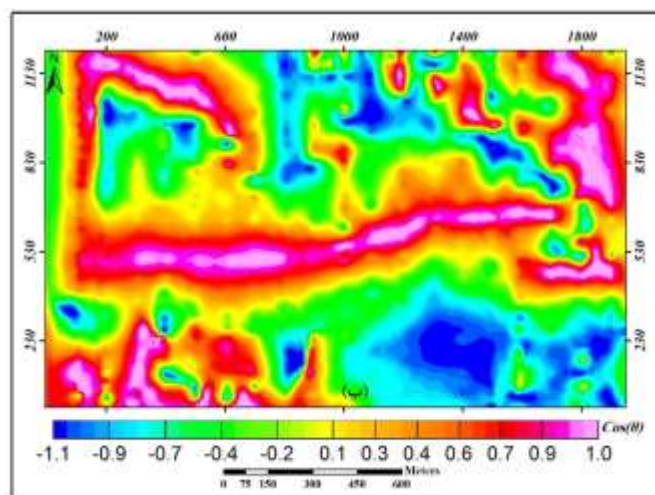
۵-۶- مقایسه نتایج داده‌های واقعی

در داده‌های واقعی مربوط به آنومالی شماره ۲ گل‌گهر، ابتدا داده‌های مغناطیسی تحت فیلتر RTP قرار گرفتند (شکل ۱۱) که اگرچه موجب تمرکز ناهنجاری شد، اما اعوجاج‌هایی در مرزها ایجاد کرد. اعمال فیلتر TDR بر این داده‌ها (شکل ۱۲-الف) مرز توده را با دقت نسبی نشان داد، اما اثرات باقی‌مانده از فیلتر RTP باعث کاهش وضوح برخی ساختارها شد. در مقابل، فیلتر TDR بر داده‌های گرانی (شکل ۱۲-ب) توانست مرزهای توده را با وضوح بالا، مستقل از جهت‌گیری ساختار، استخراج نماید.

نتایج حاصل از اعمال فیلتر زاویه تتا در شکل‌های ۱۴-الف (داده مغناطیسی RTP شده) و ۱۴-ب (داده گرانی) ارائه شده است. فیلتر $\cos \theta$ در داده مغناطیسی توانست مرز توده را با دقت مناسبی مشخص سازد، هرچند که اثرات کاذب ناشی از RTP همچنان در برخی نواحی باقی ماندند. اما در داده‌های گرانی، این فیلتر عملکردی پایدار، پیوسته و بدون اعوجاج نشان داد. همچنین، اعمال فیلتر زاویه تتا و شبه‌گرانی بر داده‌های شبه‌گرانی حاصل از داده مغناطیسی (شکل ۱۳ و ۱۵) مرزهای توده را با دقت بالا و بدون حضور ارتفکتهای عددی بازیابی کرد و نتایجی بسیار نزدیک به داده‌های گرانی ارائه داد.

۷- بحث

این پژوهش با هدف ارزیابی و مقایسه دو فیلتر مشتق زاویه تیل و تتا (TDR) و زاویه تتا ($\cos(\theta)$) در شناسایی مرز ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی و کاهش اثرات کاذب ناشی از پردازش داده‌های مغناطیسی و گرانی انجام شد. در گام نخست، عملکرد



شکل ۱۴: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر زاویه تتا ($\cos(\theta)$) بر داده‌های واقعی مغناطیسی و گرانی توده شماره ۲ گل‌گهر؛

شکل الف: نقشه زاویه تتا داده‌های مغناطیسی RTP شده نمایش مرز

ناهنجاری اصلی با امتداد شرقی-غربی، همراه با اثرات موضعی

بی‌هنجاری‌های کاذب در برخی نواحی؛ شکل ب: نقشه زاویه تتا داده‌های

گرانی - آشکارسازی دقیق و یکنواخت مرزهای ساختاری بدون

ارتفکتهای عددی، با وضوح بالاتر نسبت به داده‌های مغناطیسی.

به‌منظور بررسی بیشتر کارایی فیلتر زاویه تتا ($\cos(\theta)$)، این روش بر روی داده‌های شبه‌گرانی مشتق‌شده از داده‌های مغناطیسی توده شماره ۲ گل‌گهر اعمال گردید. نقشه حاصل، شباهت بالایی به نقشه زاویه تتا داده‌های گرانی واقعی دارد و ساختار کشیده با امتداد تقریباً شرقی-غربی توده به‌خوبی بازسازی شده است. مرز ناهنجاری‌ها با وضوح مناسب و پیوستگی کامل مشخص شده‌اند، هرچند که نسبت به داده‌های گرانی، پهن‌تر تفکیک شده‌اند. از سوی دیگر، نقشه شبه‌گرانی فاقد هرگونه نویز یا اعوجاج عددی بوده و مرزها بدون ارتفکتهای کاذب ظاهر شده‌اند، که نشان‌دهنده پایداری عددی بالای این ترکیب پردازشی است. این نتیجه تأییدی بر دقت و اعتبار فیلتر زاویه تتا در تفسیر مرزهای ساختاری در داده‌های تبدیل‌شده میدان مغناطیسی است.

خنثی‌سازی اثرات مغناطیسی ناهمسان‌گرد، منجر به بهبود کیفیت تفکیک مرزها و تطابق بهتر با داده‌های گرانی واقعی شد. از سوی دیگر، فیلتر زاویه تتا به دلیل ماهیت غیرجهت‌دار خود، عملکرد یکنواخت‌تر و پایدارتری را در آشکارسازی مرز ناهنجاری‌ها نشان داد. این فیلتر در هر سه نوع داده، به‌ویژه در داده‌های گرانی و شبه‌گرانی، موفق شد مرزهای ساختاری را بدون ارتفک‌های عددی و با دقت بالا بازیابی کند و نسبت به اعوجاج‌های ناشی از پردازش‌های اولیه مقاومت بیشتری نشان داد.

در مجموع، تلفیق فیلترهای RTP، تبدیل شبه‌گرانی، TDR و زاویه تتا به‌عنوان یک چارچوب پردازشی مکمل، امکان دستیابی به تفسیر دقیق، پایدار و مستقل از جهت‌گیری میدان برای ساختارهای زیرسطحی را فراهم می‌سازد. این رویکرد، به‌ویژه در مطالعات اکتشافی ذخایر معدنی در محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده، می‌تواند به‌طور مؤثری عدم قطعیت‌های تفسیری را کاهش داده و به بهینه‌سازی فرآیندهای اکتشاف ژئوفیزیکی کمک کند. با این حال، توجه به ویژگی‌های خاص هر فیلتر، محدودیت‌های تفکیک‌پذیری عمقی در داده‌های گرانی و نیاز به اعمال اصلاحات هندسی، همچنان در تفسیرهای کمی از اهمیت بالایی برخوردار است.

۹- منابع

1. Telford, W. M., et al. (1990). Applied geophysics, Cambridge university press.
2. Ibraheem, I. M., et al. (2019). "Edge detectors as structural imaging tools using aeromagnetic data: a case study of Sohag Area, Egypt." 9(5): 211.
- 3.
4. Miller, H.G. and V.J.J.o.a.G. Singh, Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. 1994. 32(2-3): p. 213-217.
5. Verduzco, B., et al., New insights into magnetic derivatives for structural mapping. 2004. 23(2): p. 116-119.
6. Cooper, G., D.J.C. Cowan, and Geosciences, enhancing potential field data using filters based on the local phase. 2006. 32(10): p. 1585-1591.
7. Salem, A. and D.J.G. Ravat, A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data. 2003. 68(6): p. 1952-1961.
8. Beiki, M.J.G., Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location. 2010. 75(6): p. I59-I74.
9. Fairhead, J. D., & Williams, S. E. (2006). Evaluating normalized magnetic derivatives for structural mapping. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006 (pp. 845-849). Society of Exploration Geophysicists.
10. Kianoush P, Khah NKF, Hosseini SA, Jamshidi E, Afzal P, Ebrahimabadi AJH. Geobody estimation by Bhattacharyya method utilizing nonlinear inverse modeling of magnetic data in Baba-Ali iron deposit, NW Iran. 2023;9(11).

فیلتر TDR بر روی داده‌های مصنوعی مغناطیسی (کاهش‌یافته به قطب) و گرانی تحلیل شد. نتایج نشان دادند که اگرچه فیلتر انتقال به قطب (RTP) منجر به بهبود تمرکز پاسخ مغناطیسی در مرکز منابع می‌شود، اما در برخی مدل‌ها، به‌ویژه با امتداد شرقی-غربی یا مورب، بی‌هنجاری‌های کاذبی ایجاد می‌کند که دقت مرزبندی را کاهش می‌دهد. برای کاهش این اثرات، داده‌های مغناطیسی به داده‌های شبه‌گرانی تبدیل شدند. نتایج اعمال فیلتر TDR بر روی داده‌های شبه‌گرانی حاکی از آن بود که ضمن حفظ ساختار کلی ناهنجاری‌ها، اثرات کاذب ناشی از RTP به‌طور محسوسی کاهش یافته و مرزها با دقت مکانی بهتری آشکار شدند. این نقشه‌ها تطابق خوبی با نتایج حاصل از اعمال TDR بر داده‌های گرانی واقعی داشتند. بررسی پایداری این روش در برابر نویز نیز با افزودن نویز تصادفی تأیید شد؛ به‌طوری‌که الگوی کلی ناهنجاری‌ها بدون تغییر باقی ماند. البته همچنان محدودیت‌هایی در رابطه با جهت‌گیری ساختارها نسبت به میدان مغناطیسی زمین وجود دارد، به‌ویژه در مدل‌های با امتداد هم‌راستا با مؤلفه القایی، وضوح بیشتر و در سایر جهات کاهش دقت مشاهده شد.

در ادامه، فیلتر زاویه تتا نیز بر روی مجموعه داده‌های مصنوعی و واقعی شامل مغناطیسی (RTP)، گرانی و شبه‌گرانی اعمال شد. نتایج نشان دادند که این فیلتر نیز با عملکرد مستقل از جهت مغناطش، توان بالایی در تفکیک مرز ناهنجاری‌ها دارد. در داده‌های گرانی و شبه‌گرانی، فیلتر زاویه تتا مرزها را با دقت بالا، بدون ارتفک‌های عددی و با یکنواختی مناسب مشخص کرد. در داده‌های مغناطیسی نیز با وجود باقی‌ماندن برخی اثرات کاذب ناشی از RTP، ساختار کلی با وضوح قابل قبولی آشکار شد. مقایسه کلی نشان داد که فیلتر زاویه تتا نسبت به TDR حساسیت کمتری به اعوجاج‌های طیفی داشته و در بسیاری از موارد مرزها را یکنواخت‌تر و پیوسته‌تر نمایش داده است.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تلفیق فیلترهای RTP، شبه‌گرانی و تکنیک‌های مرز-محور مانند TDR و $\cos(\theta)$ ، می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب پردازشی یکپارچه و مؤثر برای بهبود تفسیر داده‌های میدان پتانسیل به‌کار رود. این رویکرد به‌ویژه در مناطق با ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در تعیین موقعیت و مرز ذخایر معدنی کمک شایانی نماید. همچنین استفاده هم‌زمان از دو فیلتر مکمل TDR و زاویه تتا، امکان دستیابی به هر دو جنبه‌ی عمق‌محور و مرز-محور توده‌های زیرسطحی را فراهم می‌آورد.

۸- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی و مقایسه عملکرد دو فیلتر مشتق زاویه تیل (TDR) و زاویه تتا ($\cos(\theta)$) در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل مغناطیسی، گرانی و شبه‌گرانی، به بررسی دقیق قابلیت این فیلترها در شناسایی مرز ناهنجاری‌ها و کاهش اثرات کاذب پردازشی پرداخت. نتایج نشان دادند که فیلتر TDR در محیط‌های نویزی و غیرنویزی عملکرد مطلوبی در تفکیک مرز ساختارهای زیرسطحی دارد، اما در داده‌های مغناطیسی، خروجی آن به جهت‌گیری منابع نسبت به میدان القایی زمین حساس است؛ به‌گونه‌ای که مدل‌های با امتداد شمالی-جنوبی وضوح بالاتری نسبت به مدل‌های شرقی-غربی یا مایل دارند. تبدیل داده‌های مغناطیسی به شبه‌گرانی با هدف

11. Bizhani H, Mansour Shoar P, Moghadasi MJJoM, Geo-Engineering. 2D inversion of magnetic and gravity data: a case study on Golgohar mine. 2023;57(1):41-6.
12. Milano M, Varfinezhad R, Bizhani H, Moghadasi M, Kalateh AN, Baghzendani HJJoAG. Joint interpretation of magnetic and gravity data at the Golgohar mine in Iran. 2021;195:104476.
13. Ansari A, Ghari H, Alamdar K, Moradi SJJoG. Investigation of the relationship between upward continued potential fields and depth of the causative bodies: a case study from Gol-Gohar Iron ore mine. 2016;5(4):1-12.
14. Alamdar K, Ansari AJJoG. Interpretation of potential field anomalies using source parameter imaging method (SPI). 2016;3(2):25-40.
15. Alvandi A, Deniz Toktay H, Nasri SJAG. Application of direct source parameter imaging (direct local wave number) technique to the 2D gravity anomalies for depth determination of some geological structures. 2022;70(2):659-67.
16. Alamdar K, Ansari A, Ghorbani AJGR. Edge detection of magnetic body using horizontal gradient of pseudo gravity anomaly. 2009;11.
17. Wijns, C., et al. (2005). "Theta map: Edge detection in magnetic data." 70(4): L39-L43.
18. Ibraheem, I. M., et al. (2023). "A new edge enhancement filter for the interpretation of magnetic field data." **180**(6): 2223-2240.
19. Lv, W., et al. (2024). "A Novel Method of Magnetic Sources Edge Detection Based on Gradient Tensor." 14(7): 657.
20. An- Guo, C., et al. (2017). "APPLICATION OF AN ENHANCED THETA- BASED FILTER FOR POTENTIAL FIELD EDGE DETECTION: A CASE STUDY OF THE LUZONG ORE DISTRICT." **60**(2): 203-218.
21. Núñez-Demarco, P., et al. (2023). "Potential-field filters for gravity and magnetic interpretation: a review." **44**(3): 603-664.
22. ARISOY, M. Ö., & DİKMEN, Ü. (2013). Edge detection of magnetic sources using enhanced total horizontal derivative of the tilt Angle Geliştirilmiş Eğim Açısı Toplam Yatay Türevi ile Manyetik Kaynakların Sınırlarının Belirlenmesi. Bull Earth Sci Appl Res Centre Hacettepe Univ, 34(1), 73-82.
23. Dentith, M. and S. T. Mudge (2014). Geophysics for the mineral exploration geoscientist, Cambridge University Press.
24. Behnam, S. and H. J. J. o. A. G. Ramazi (2019). "Interpretation of geomagnetic data using power spectrum and 3D modeling of Gol-e-Gohar magnetic anomaly." **171**: 103829.