



مقاله پژوهشی

تحلیل داده‌های مغناطیسی هوابرد منطقه معدنی گل گهر سیرجان

عبدالحمید انصاری^{۱*}، عبدالله عزام احمدی^۱، سید حسین مجتهدزاده^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۴، بازنگری: ۳۰ شهریور ۱۴۰۴، پذیرش: ۱۷ آبان ۱۴۰۴)

چکیده

شناسایی دقیق ساختارهای زیرسطحی در نواحی معدنی پیچیده مانند گل گهر، به دلیل همپوشانی منابع سطحی و عمیق، همواره یکی از چالش‌های اصلی در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی بوده است. برای غلبه بر این چالش‌ها، بهره‌گیری از ترکیب روش‌های پیشرفته پردازش و مدل‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. داده‌های مغناطیسی هوابرد و شبه‌گرانی ابزارهای مهمی در اکتشاف معادن هستند که با ارائه تصویری سه‌بعدی از توزیع خواص زیرسطحی، به شناسایی پهنه‌های کانسنگ و ساختارهای تکتونیکی کمک می‌کنند. در این پژوهش، برای پهنه‌سازی تفسیر ژئوفیزیکی داده‌های گل گهر، از یک رویکرد چندابزاری شامل تحلیل طیف توان، فیلتر ادامه فراسوی چندمرحله‌ای، مشتق زاویه تیلت و مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی استفاده شد. ابتدا با استفاده از مدل‌سازی مصنوعی دایک‌مانند، کارایی تبدیل شبه‌گرانی و فیلتر ادامه فراسوی در جداسازی منابع سطحی و عمیق ارزیابی شد. نتایج تحلیل طیفی نشان داد که در میدان مغناطیسی باقیمانده، منابع کم‌عمق (حدود ۳۰۰-۶۰۰ متر) با فرکانس‌های بالا غالب‌اند، در حالی که تبدیل شبه‌گرانی نشانه حضور منابع عمیق‌تر (حدود ۸۰۰-۱۰۰۰ متر) را نشان می‌دهد. اعمال ادامه فراسو در ارتفاعات میانی، بی‌هنجاری‌های سطحی را تضعیف و توده‌های اصلی عمیق (نظیر An1 و An3) را برجسته ساخت. با استفاده از مشتق زاویه تیلت، مرزهای بی‌هنجاری‌ها مشخص گردید؛ به گونه‌ای که در داده‌های شبه‌گرانی مرزها کاملاً واضح و بدون آلودگی نوفه ظاهر شدند. مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی نتایج میدان مغناطیس و شبه‌گرانی نیز نشان داد که حجم‌های با پذیرش مغناطیسی بالا تا عمق حدود ۱۵۰۰ متر و توده‌های چگالی مثبت تا بیش از ۲۰۰۰ متر امتداد دارند. این یافته‌ها بیانگر همپوشانی ساختاری توده‌های ماگمایی و سیالات غنی از آهن در کنترل کانی‌سازی هستند. نوآوری این پژوهش در ارائه یک چارچوب چندمرحله‌ای برای تلفیق داده‌های مغناطیسی و شبه‌گرانی است که شامل استفاده هم‌زمان از فیلتر توان طیفی، ادامه فراسو در ارتفاعات مختلف، و مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های واقعی و مصنوعی است. افزون بر این، به کارگیری مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی مستقل برای هر دو مجموعه داده و مقایسه تطبیقی آن‌ها، امکان تحلیل ساختارهای زیرسطحی با دقت بهتر و تخمین عمق بی‌هنجاری‌ها را فراهم ساخته است. در این چارچوب، نشان داده شد که تبدیل شبه‌گرانی در کنار فیلتر تیلت، قدرت جداسازی مرزهای ساختاری را در حضور نوفه به‌طور چشمگیری بهبود می‌دهد.

کلمات کلیدی

مغناطیس هوابرد، تبدیل شبه‌گرانی، ادامه فراسو، مشتق زاویه تیلت، گل گهر سیرجان

*عهده‌دار مکاتبات: h.ansari@yazd.ac.ir

DOI: 10.22034/anm.2025.23140.1677

۱- مقدمه

در اکتشافات معدنی و نقشه‌برداری سازه‌های زیرسطحی، داده‌های مغناطیسی هوابرد و تبدیل شبه‌گرانی ابزارهایی کلیدی هستند که با ارائه تصویر سه‌بعدی از توزیع مغناطیس‌پذیری، امکان شناسایی پهنه‌های کانسنگ و ساختارهای تکتونیکی را فراهم می‌آورند [۱]. باوجود گسترش استفاده از داده‌های میدان پتانسیل در اکتشاف منابع معدنی، بسیاری از مطالعات با محدودیت‌هایی چون تداخل نوفه‌های سطحی، پوشش رسوبی و جابجایی مکانی بی‌هنجاری‌ها روبه‌رو هستند که منجر به تفسیرهای نادقیق می‌شود. در این میان، تلفیق روش‌های مختلف پردازش سیگنال و مدل‌سازی داده‌ها، می‌تواند با افزایش دقت شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی پنهان، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های حفاری و افزایش موفقیت اکتشاف داشته باشد. این ضرورت در نواحی پرپتانسیل اما پیچیده‌ای چون منطقه گل‌گهر، دوچندان احساس می‌شود. با این حال، میدان مغناطیسی زمین به دلیل دوقطبی بودن، موجب جابه‌جایی جانبی قله‌های بی‌هنجاری و ادغام سیگنال‌های سطحی و عمقی می‌شود که تفسیر مستقیم آن‌ها را دشوار می‌سازد [۲]. به همین دلیل، در دهه‌های گذشته روش‌های متعددی برای اصلاح و برجسته‌سازی مؤلفه‌های مختلف بی‌هنجاری‌ها توسعه یافته‌اند تا ضمن حذف نوفه و ناهمگونی‌های القایی، وضوح سازه‌های زیرسطحی بهینه شود [۳]. مطالعات اولیه در حوزه تحلیل طیف‌توان با ارائه چارچوبی برای برآورد عمق منابع از طریق تحلیل شیب طیف رادیالی، توسط اسپکتور و گرانت در سال ۱۹۷۰ پایه‌گذاری شد که با استفاده از تبدیل فوریه دوبعدی، طول‌موج‌های غالب بی‌هنجاری‌ها را استخراج می‌کند [۴]. پایلکینگتون و کیاتینگ در سال ۲۰۰۶ با توسعه پنجره‌های طیفی و مدل‌های آماری، دقت عمق‌یابی طیفی را در محیط‌های رسوبی بهبود بخشیدند [۵]. ماوس و دیمیر در سال ۱۹۹۵ نیز کاربرد این روش را در شرایط چندلایه، به‌ویژه برای تفکیک لایه‌های با مغناطیس‌پذیری متغیر، بررسی کردند [۶]. نبیقیان و همکاران (۲۰۰۵) مروری جامع بر پیشرفت‌های این روش و نیازمندی‌های پیش‌پردازش داده‌ها ارائه نمودند [۷]. راوات و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که انتخاب پنجره مناسب و حذف مؤلفه‌های کم‌فرکانس، نقش مهمی در کاهش خطای عمق‌یابی دارد

[۸]. فیلتر فراسو به‌عنوان روش مؤثر برای حذف نوفه‌های سطحی و تقویت منابع عمیق معرفی شده است. بلیکلی در سال ۱۹۹۶ اصول طیفی این فیلتر را شرح داد و نشان داد که با انتقال داده‌ها به ارتفاع بالاتر، می‌توان فرکانس‌های کوتاه‌موج را تضعیف و عناصر عمیق را برجسته کرد [۹]. پایلکینگتون و بلونگر تأکید کردند که فراسوسازی فضایی، ضمن حفظ جزئیات مهم، هموارسازی مناسبی از داده ارائه می‌دهد و کاربرد گسترده‌ای در داده‌های هوابرد یافته است [۱۰]. انصاری و همکاران (۲۰۱۶) با مقایسه انواع فیلترهای فراسوسازی، نشان دادند که ترکیب فیلتر فضای-طیف با تنظیم ارتفاع مناسب می‌تواند بهینه‌ترین نتایج را در تفسیر داده‌های گل‌گهر ارائه دهد [۱۱]. البانا و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان دادند که استفاده از فراسوسازی چندمرحله‌ای می‌تواند قابلیت جداسازی بهتر منابع تکتونیکی را فراهم کند [۱۲]. سلیم و همکاران (۲۰۰۸) مشتق زاویه تیلت با تکیه بر نسبت مشتقات عمودی و افقی، ابزاری قدرتمند برای آشکارسازی لبه‌های تند بی‌هنجاری و مرزهای زمین‌شناسی است. آنها نخستین تعاریف ریاضی این پارامتر و کاربرد آن در نقشه‌برداری گسله‌ها را ارائه کردند و اثبات نمودند که تیلت در شناسایی ساختارهای سطحی عملکرد برتری نسبت به مشتقات ساده دارد [۱۳]. بیمیش در سال (۲۰۰۹) حساسیت تیلت به نوفه داده را مورد ارزیابی قرار داد و پیشنهادات عملی برای کاهش خطا ارائه نمود [۱۴]. چینی و همکاران (۲۰۱۱) نیز در مطالعه‌ای عددی، نشان دادند که تیلت پس از فراسوسازی و شبه‌گرانی، دقت بالاتری در تشخیص لبه‌های عمیق دارد [۱۵]. مشهدی و همکاران (۲۰۱۷) با کاربرد تیلت در داده‌های هوابرد زنجان، سازگاری نتایج را با نقشه‌های زمین‌شناسی تأیید کردند [۱۶]. الحسن و همکاران (۲۰۲۱) مقایسه‌ای بین مشتق تیلت و مشتق عمودی انجام دادند و نشان دادند که تیلت قابلیت تشخیص سریع‌تر تماس‌های لیتولوژیکی را دارد [۱۷]. غربا و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که فیلتر مشتق زاویه تیلت با برجسته‌سازی بی‌هنجاری‌های مستقل از اندازه و عمق، در شناسایی تماس‌های رسوبی-آذرین و ساختارهای هورست و گرابن کارایی بالایی دارد [۱۸].

روش معکوس سه‌بعدی برای تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی نخستین‌بار توسط لی و اولدنبرگ در سال ۱۹۹۶ معرفی و بر مبنای نظریه رگولاریزاسیون تیخانوف برای داده‌های

چشم‌اندازی روشن برای بهبود روش‌شناسی اکتشافی فراهم می‌آورد. با در نظر گرفتن محدودیت‌های روش‌های سنتی در تفکیک منابع سطحی و عمیق، مطالعه حاضر با طراحی یک چارچوب پردازشی-تحلیلی شامل شبیه‌سازی مصنوعی، تبدیل شبه‌گرانی، فیلتر توان طیفی، ادامه فراسو و مدل‌سازی سه‌بعدی، نوآوری مهمی در ترکیب روش‌های ژئوفیزیکی ارائه می‌دهد. از جمله ویژگی‌های برجسته این چارچوب، می‌توان به به‌کارگیری مدل‌سازی معکوس مستقل و مقایسه‌ای برای داده‌های مغناطیسی و شبه‌گرانی و ارزیابی اثر تیلت در کاهش نوفه اشاره کرد که در مطالعات مشابه کمتر به‌صورت هم‌زمان بررسی شده‌اند.

۲- روش‌ها

۲-۱- روش تحلیل طیف توان

در روش تحلیل طیف توان، با تبدیل داده‌های میدان پتانسیل ثبت‌شده روی یک شبکه منظم به حوزه فرکانس از طریق تبدیل فوریه سریع (FFT) اجزای فرکانسی سیگنال تفکیک می‌شوند و با مجذور کردن قدرمطلق آن‌ها که طیف توان (P) را برحسب عدد موج (K) نمایش می‌دهد، توزیع انرژی فرکانسی به دست می‌آید [۹]. در ادامه، برای ارتباط دادن این توزیع طیفی با عمق منابع زیرسطحی، معمولاً طیف دوبعدی به‌طور شعاعی میانگین‌گیری می‌شود و با رسم نمودار $\ln P$ برحسب $\ln K$ از شیب بخش‌های خطی آن عمق هندسی منابع برآورد می‌گردد [۸]. این فرآیند، حتی در حضور بی‌هنجاری‌های هم‌پوشان یا نوفه قابل توجه، با تکیه بر نرخ زوال توان در فرکانس‌های پایین و بلند، تخمین‌های پایدار و کارآمدی ارائه می‌دهد. طور خلاصه، تحلیل طیف توان پلی است میان مشاهدات مکانی و ساختار زیرسطحی و مسیری هموار از اندازه‌گیری‌های خام میدانی تا مدل‌های با وضوح بالا فراهم می‌آورد که در اکتشاف معادن، نقشه‌برداری تکتونیکی و مشخصه‌یابی مخازن کاربرد دارد [۲۳]:

$$P(k) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |F(k\cos\theta, k\sin\theta)|^2 d\theta \quad (1)$$

در رابطه فوق $F(k\cos\theta, k\sin\theta)$ ، تبدیل فوریه سریع (FFT) است.

۲-۲- روش ادامه فراسو

تکنیک ادامه فراسو در ژئوفیزیک به‌عنوان روش پیشرفته شناخته می‌شود که با استفاده از مشاهدات انجام‌شده در ارتفاع

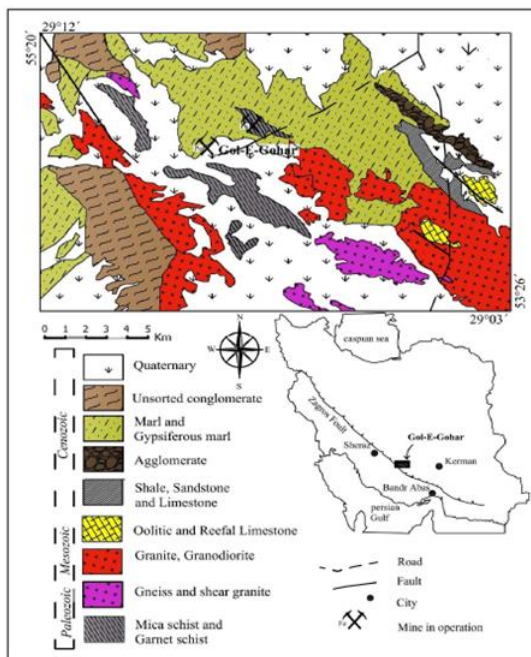
مغناطیسی به‌کار گرفته شد، به‌گونه‌ای که امکان بازیابی ساختار زیرسطحی با تفکیک فضایی بالا فراهم آمد [۱۹]. در سال ۲۰۰۲، پارتیاگوین و ژاندوف الگوریتم همگراکننده وزنی (reweighted conjugate gradient) را برای معکوس‌سازی متمرکز معرفی کردند که با اعمال تابع حداقل پشتیبانی، مرزهای توده‌های زیرسطحی را با وضوح بیشتری آشکار ساختند [۲۰]. دو سال بعد، ژاندوف و همکاران (۲۰۰۴) این رویکرد را به داده‌های گرانی و گرادیان‌گرانی تعمیم دادند و نشان دادند که معکوس‌سازی با حداقل پشتیبانی می‌تواند در حذف نوفه و بهبود دقت اعماق‌یابی مؤثر باشد [۲۱]. پائولتی و همکاران (۲۰۱۳) با معرفی روش وارون‌سازی مقید در داده‌های میدان پتانسیل نشان دادند که با استفاده از اطلاعات اولیه استخراج‌شده صرفاً از داده‌های گرانی و مغناطیسی (مانند عمق سقف منبع، شاخص ساختاری، موقعیت افقی و شیب مرزها) می‌توان محدودیت‌های مؤثری برای تعداد پارامترها در حل مسائل ایجاد کرد [۲۲]. در پی این پیشرفت‌ها، ژی و همکاران (۲۰۱۸) با به‌کارگیری ساختار چند رزولوشن و مدل‌سازی ابرشبکه (multi-resolution mesh) سرعت محاسبات معکوس‌سازی را افزایش و انعطاف‌پذیری روش را در مطالعات پهنه‌های گسترده ارتقا دادند [۲۳]. رضایی (۲۰۲۱) با ارائه‌ی الگوریتم وارون‌سازی پراکنده نشان دادند که این روش در داده‌های دارای مغناطش باقی‌مانده، مدل‌هایی متمرکزتر و زمین‌شناسی‌پذیرتر نسبت به روش‌های متداول فراهم می‌کند و دقت تفسیر را در داده‌های مصنوعی و واقعی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۲۴]. قاری و همکاران (۲۰۲۳) با ادغام مدل‌های وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی و مغناطیسی همراه با اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های حفاری، موفق به شناسایی یک واحد گنبدی‌شکل نمکی حاوی پتاس در منطقه قره‌آغاج زنجان شدند [۲۵].

با توجه به پیشینه‌ی پژوهش‌ها و چالش‌های تفسیر داده‌های مغناطیسی هوابرد، از جمله جابه‌جایی بی‌هنجاری‌ها، تداخل مؤلفه‌های سطحی و عمقی و تأثیر نوفه، اجرای یک چارچوب جامع شامل تحلیل طیف توانی، فراسو‌سازی، مشتق زاویه تیلت و مشتق گرادیان کل افقی، همراه با مدل‌سازی سه‌بعدی، می‌تواند دقت مکان‌یابی منابع و شناخت سازه‌ها را به‌طور چشمگیری ارتقاء دهد. این رویکرد نه تنها به‌عنوان یک استاندارد نوین در مطالعات اکتشافی گل‌گهر، بلکه در سایر پروژه‌های ژئوفیزیکی نیز قابلیت تعمیم و کاربرد دارد و

از آنجاکه محاسبات این روش ساده و نیازی به تعیین پنجره‌های مکانی بزرگ ندارد، در مطالعات اکتشافی معدنی و تفسیر ساختارهای زیرسطحی کاربرد فراوان یافته است.

۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کانسار آهن گل‌گهر در حدود ۵۵ کیلومتری جنوب غربی سیرجان در استان کرمان و در حاشیه پهنه ساختاری سهندج-سیرجان واقع شده است. میزبان‌های سنگی آن شامل گنیس گرانیتی، آمفیبولیت، مرمر و شیست‌های متنوع (شیست سبز تا قرمز) هستند که تحت تأثیر دگرگونی‌های پلی‌فازی و نفوذ توده‌های گرانیتی قرار گرفته‌اند. از منظر زمین‌شناسی ساختاری، دو فاز اصلی دگرشکلی با ورقه‌بندی‌های S1 و S2 شناسایی شده که فابریک بیوتیت، گارنت و استارولیت در فاز اول و جایگزینی ثانویه مگنتیت در فاز دوم را کنترل می‌کند. این ساختارهای ورقه‌ای و پهنه‌های برشی، زمینه‌ساز تمرکز و تشکیل کانسار مگنتیت را ایفا می‌کنند [۳۲].



شکل ۱: نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه [۳۲].

۴- داده‌ها

این پژوهش از داده‌های مغناطیسی هوابرد استفاده کرده است که در سال ۱۹۷۲ توسط شرکت ایروسرویس کانادا با فاصله خطوط برداشت ۵۰۰ متر، ارتفاع متوسط پرواز ۱۲۰ متر و پوشش منطقه‌ای به طول تقریبی ۱۲ کیلومتر و عرض

پایین‌تر، مقادیر میدان گرانی یا مغناطیسی را در ارتفاع‌های بالاتر مدل‌سازی می‌کند [۲۶]. این فرآیند با کاهش تأثیر مؤلفه‌های با طول موج کوتاه که معمولاً ناشی از منابع سطحی یا نوفه‌های ناشی از ساختارهای نزدیک به سطح هستند، به برجسته‌سازی بی‌هنجاری‌های ناشی از منابع عمیق‌تر کمک می‌کند. از طرف دیگر، ادامه فراسو امکان یکسان‌سازی داده‌های برداشت‌شده در ارتفاعات مختلف را به یک سطح مرجع مشترک فراهم می‌آورد تا تفسیر و تحلیل‌های بعدی با دقت و سهولت بیشتری انجام شوند [۲۷].

در این روش، بی‌هنجاری‌های با طول موج بلند که بیانگر منابع عمیق‌تر هستند تقویت می‌شوند. اساس کار بدین صورت است که میدان مغناطیسی در سطحی هم‌ارتفاع (h) بالاتر از صفحه برداشت محاسبه می‌شود و به این ترتیب داده‌ها تبدیل می‌گردند. فیلتر ادامه فراسو با کاهش نویز و حذف اثر منابع کم‌عمق، داده‌ها را پالایش کرده و بی‌هنجاری‌های عمیق و ناحیه‌ای را برجسته می‌سازد. در یک ارتفاع مشخص (h-z =)، ادامه فراسوی میدان کل بی‌هنجاری (FΔ) به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود [۲۸]:

$$\Delta F(x, y, -h) = \frac{h}{2\pi} \iint \frac{\Delta F(x, y, 0) dx dy}{((x - x^0)^2 + (y - y^0)^2 + h^2)} \quad (2)$$

که میدان مغناطیسی را برحسب مقدار متوسط ΔF در نقطه‌ی (x, y, 0) بیان می‌کند، با این تفاوت که این مقدار در ارتفاع h بالاتر از صفحه داده‌های برداشت‌شده (z = 0) محاسبه می‌شود.

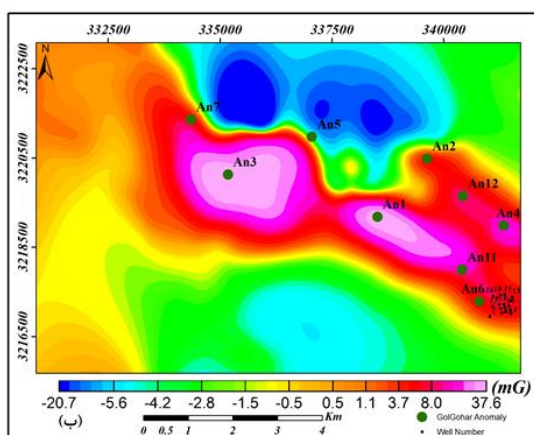
۲-۳- روش مشتق زاویه تیلت (TDR)

مشتق زاویه تیلت شاخصی است که از تقسیم تغییرات عمودی میدان پتانسیل بر تغییرات افقی آن به‌دست می‌آید و با تابع آرک‌تانژانت محدود به بازه -90° و $+90^\circ$ می‌شود [۲۹]. به‌طورکلی، مقادیر منفی در خارج از محدوده بی‌هنجاری‌ها قرار می‌گیرند، مقدار صفر تقریباً متناظر با مرز بی‌هنجاری بوده و مقادیر مثبت محدوده داخل بی‌هنجاری را نشان می‌دهند [۳۰].

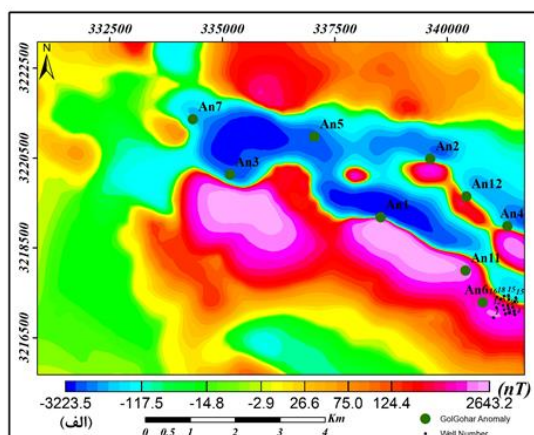
معادله مشتق زاویه تیلت در رابطه (۳) ارائه‌شده است [۳۱]:

$$TDR_{(x,y)} = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{df}{dz}}{\sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2}} \right] \quad (3)$$

شکل ۲ (الف و ب) نشان‌دهنده نقشه‌های میدان مغناطیسی باقیمانده و شبه‌گرانی محدوده بی‌هنجاری‌های گل‌گهر است. آن‌طور که در شکل ۲ مشخص است بی‌هنجاری‌ها به امتداد شمال‌غرب-جنوب‌شرق در دو قسمت (شکل ۲ ب) تجمع کرده که می‌شود گفت دو توده چگال بزرگ که اولی در قسمت مرکزی محدوده بی‌هنجاری‌ها که احتمالاً از بی‌هنجاری‌های ۳، ۵ و ۷ به وجود آمده و توده دومی در قسمت شرقی محدوده واقع شده که احتمالاً از تجمع بی‌هنجاری‌های ۱، ۶، ۴، ۲ و ۱۱ به وجود آمده است.



۷ تا ۸ کیلومتر برداشت شده‌اند. این داده‌ها با اعمال فیلتر شبه‌گرانی، بی‌هنجاری‌های میدان مغناطیسی باقیمانده به داده‌های شبه‌گرانی تبدیل شدند تا امکان شناسایی دقیق‌تر ویژگی‌های ژئوفیزیکی زیرسطحی فراهم گردد. برای اعتبارسنجی عملکرد فیلتر شبه‌گرانی، ارزیابی تأثیر متغیرها و اطمینان از دقت پالایش داده‌ها، از مدل‌سازی مصنوعی بهره گرفته شد. این رویکرد ترکیبی، با تکیه بر تحلیل‌های تجربی و شبیه‌سازی شده، زمینه‌ای مستحکم برای تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی منطقه فراهم می‌کند [۴۰].



شکل ۲: نقشه‌های میدان مغناطیسی باقیمانده و شبه‌گرانی منطقه معدنی گل‌گهر.

مشخصات کامل هر سه مدل در جدول ۱ و نمای سه‌بعدی مدل‌ها در شکل ۳ ارائه شده است.

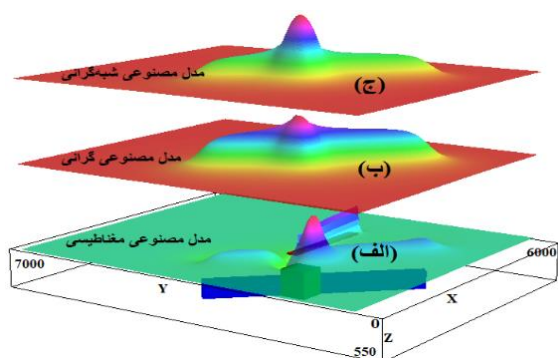
۵- بحث و نتایج

۵-۱- مدل‌سازی مصنوعی

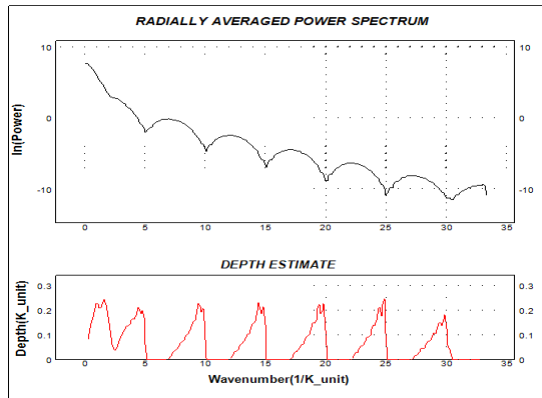
در مطالعات پیش‌پردازش داده‌های مغناطیسی و شبه‌گرانی، مدل‌سازی مصنوعی ابزاری کلیدی برای ارزیابی دقت روش‌های تفسیر است؛ با ایجاد پاسخ‌های نظری بی‌هنجاری بر مبنای هندسه و ویژگی‌های مغناطیسی منابع، می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف مانند عمق، جهت‌گیری و ابعاد جسم را به صورت کنترل‌شده بررسی کرد [۳۲]. در این تحقیق، سه مدل دایک‌مانند با ویژگی‌های منحصربه‌فرد انتخاب شده‌اند تا پیچیدگی خطی پهنه گل‌گهر را بازتولید کنند. مدل ۱ عمیق و خطی در نظر گرفته شده تا ساختارهای گسلی عمیق را شبیه‌سازی کند، مدل ۲ سطحی و خطی در نظر گرفته شده تا منابع نزدیک به سطح را شبیه‌سازی کند و مدل ۳ عمودی در نظر گرفته شده تا منابع عمودی را شبیه‌سازی کند و لبه یابی تیلت شبیه‌سازی شود. در تمامی مدل‌ها شیب برابر با 90° در نظر گرفته شده است و

جدول ۱: مشخصات مدل مصنوعی

مدل	ابعاد (طول، عرض، عمق) (متر)	عمق تحتانی (متر)	آزیموت ($^\circ$)
دایک ۱	$250 \times 200 \times 4000$	۵۵۰	۱۳۵
دایک ۲	$20 \times 200 \times 2000$	۳۲۰	۹۰
دایک ۳	$100 \times 500 \times 500$	۴۰۰	۰

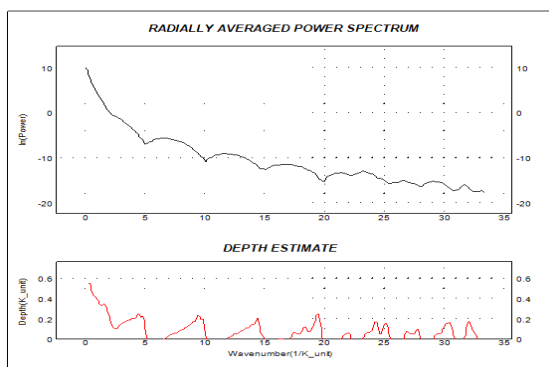


شکل ۳: مدل مصنوعی تولید شده



شکل ۵: نمودار طیف توان روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی

در مقابل، منحنی طیف توان داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی، در فرکانس‌های پایین شیب ملایم‌تری دارد که نشان‌دهنده تأثیر منابع عمیق‌تر (مدل اول و سوم) است. عمق متوسط این منابع بر اساس منحنی توان تقریباً ۰/۹ واحد عدد موج تخمین زده شد که با داده‌های مصنوعی در محدوده ۸۵۰-۹۵۰ متر مطابقت دارد (شکل ۶).

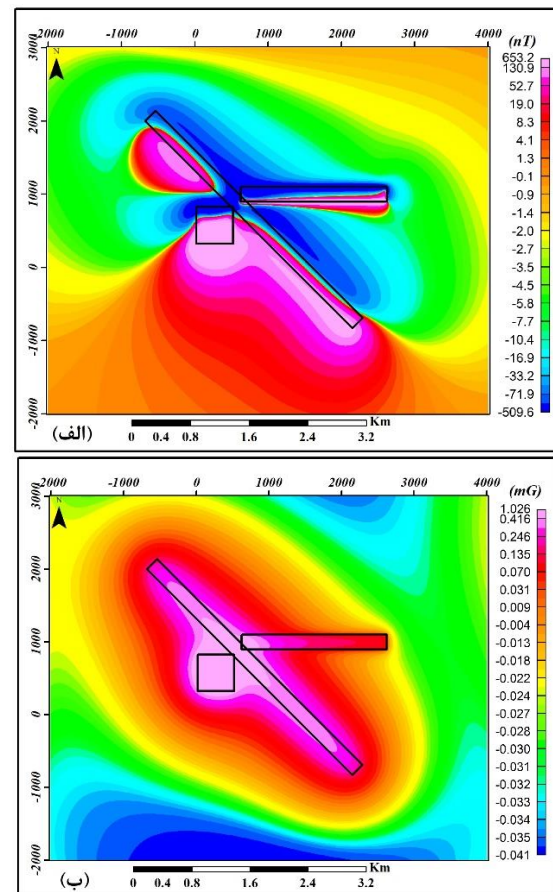


شکل ۶: نمودار طیف توان روی داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی

۵-۳- اعمال فیلتر ادامه فراسو داده‌های مصنوعی

در نقشه میدان مغناطیسی باقیمانده مدل مصنوعی (شکل ۴ الف)، بی‌هنجاری‌های سطحی با دامنه بالا و پراکندگی ناپیوسته مشاهده می‌شوند که نشان‌دهنده تأثیر قوی مدل دوم (سطحی) است. با اعمال ادامه فراسوی ۱۰۰ متری (شکل ۷ الف)، اجزای کوتاه‌برد کاهش یافته و بی‌هنجاری‌های گسترده‌تر و کم‌دامنه‌تر برجسته می‌شوند؛ این تغییر نشان می‌دهد که منابع عمیق‌تر (مدل اول و سوم) شروع به تسلط بر سیگنال می‌کنند. در ادامه فراسوی ۶۰۰ متری (شکل ۷ ب)، تقریباً تمامی ساختارهای کوچک سطحی حذف و یک بی‌هنجاری نسبتاً همگن و گسترده باقی می‌ماند که بازتاب‌دهنده پاسخ اجسام عمیق (بیش از ۲۵۰

از شکل ۳ معلوم است که مدل شبه‌گرانی شباهت زیادی با داده‌های گرانی دارد، بنابراین می‌توان با اطمینان از مدل شبه‌گرانی در بررسی‌های آینده استفاده کرد. همچنین نقشه مغناطیس باقیمانده و شبه گرانی مدل مصنوعی تولید شد که در شکل ۴ ارائه شده است.

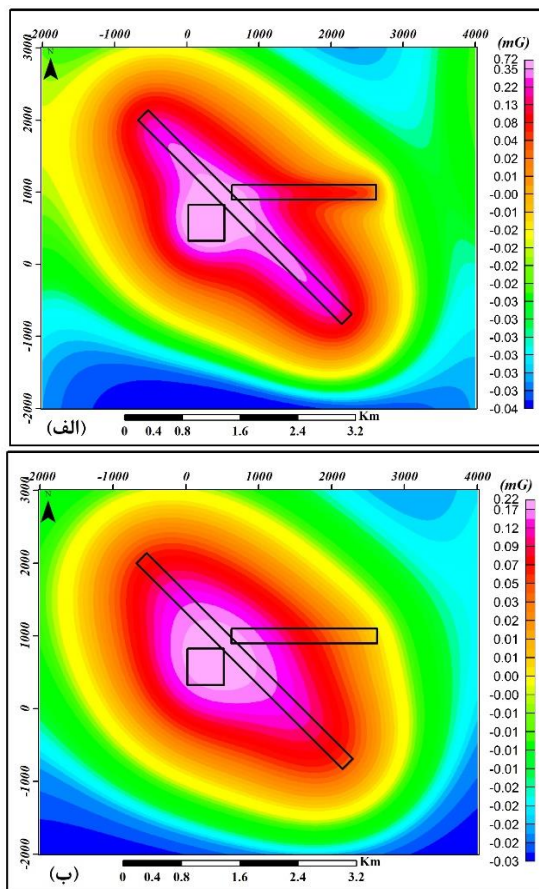


شکل ۴: نقشه‌های میدان مغناطیسی باقیمانده (الف) و شبه‌گرانی (ب)

۵-۲- نتایج فیلتر طیف توان روی داده‌های مصنوعی

با اعمال تکنیک طیف توانی بر روی داده‌های مصنوعی مغناطیسی، منحنی لگاریتم توان برحسب عدد موج نشان داد که در بخش فرکانس‌های بالا یک شیب تند وجود دارد؛ این الگو ناشی از ترکیب سه مدل با عمق‌های متفاوت و قرارگیری مماس آن‌هاست که تسلط منابع کم‌عمق (مدل دوم) را تقویت می‌کند. از شیب این بخش، عمق متوسط قسمت فوقانی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی معادل حدود ۰/۴ واحد عدد موج برآورد شد که با مقیاس مطالعه معادل عمق ۳۵۰-۵۵۰ متر است (شکل ۵).

ادامه فراسوی آن سریع‌تر به یک پاسخ یکنواخت منتهی می‌شود.

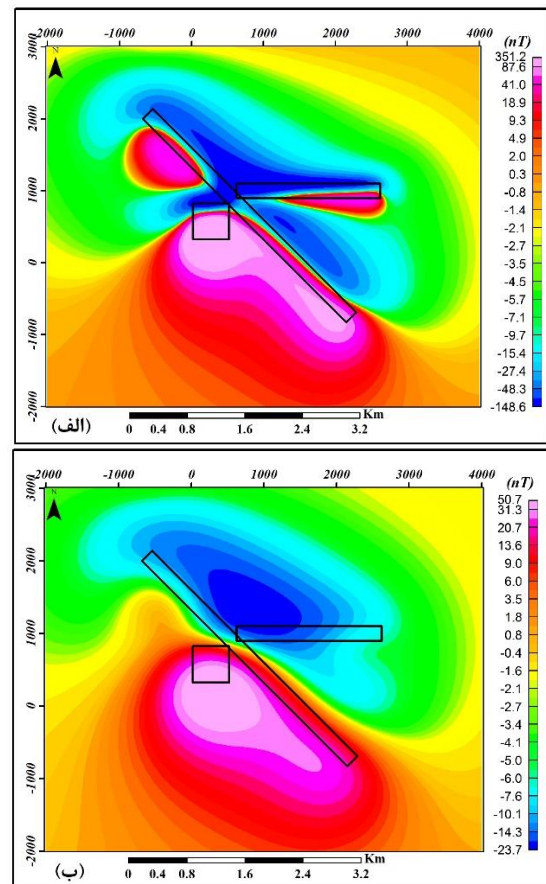


شکل ۸: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسوی روی داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی به ارتفاع ۱۰۰ متر (الف) و ۶۰۰ متر (ب)

۵-۴- نتایج اعمال مشتق زاویه تیلت روی مدل مصنوعی

در شکل (۹ الف) که نتیجه‌ی اعمال مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های انتقال به قطب شده‌ی مغناطیسی مصنوعی است، مشاهده می‌شود که خطوط هم‌ارز صفر (مرز ناهنجاری) با دقت قابل قبولی محل تقاطع منابع مغناطیسی را نشان می‌دهند، اما اختلالات پراکنده‌ای (نوفه) در پس‌زمینه پدیدار شده است. این نوفه نامنتظره، علیرغم فرض محیط کاملاً همگن و فاقد اختلال، ناشی از حساسیت ذاتی فیلتر انتقال به قطب به مؤلفه‌های فرکانس‌های بلند و کوتاه میدان اصلی است که در فرآیند انتقال به قطب تشدید می‌گردند. در مقابل، شکل (۹ ب) که حاصل اعمال مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های شبه‌گرانی مصنوعی است، ضمن حفظ شفافیت کامل مرز بی‌هنجاری‌ها (مقادیر مثبت درون

متر) است. این تحول در نوفه و پراکندگی بی‌هنجاری‌ها نشانگر کارایی فیلتر ادامه فراسو در جداسازی مؤلفه‌های سطحی و عمقی بر مبنای ارتفاع است.

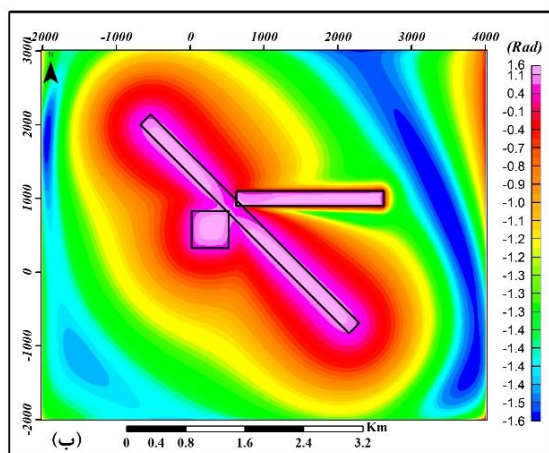


شکل ۷: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسوی روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی به ارتفاع ۱۰۰ متر (الف) و ۶۰۰ متر (ب)

در نقشه شبه‌گرانی مدل مصنوعی (شکل ۴ ب)، بی‌هنجاری‌های معمولاً پهن و طولانی‌تر دیده می‌شوند که گویای نفوذ عمیق‌تر منابع است. با اعمال ادامه فراسوی ۱۰۰ متری روی شبه‌گرانی (شکل ۸ الف)، جزئیات توده‌های نزدیک سطح تا حدودی تضعیف و تمرکز بر منابع میانی افزایش می‌یابد؛ این امر نشانی از پاسخ ترکیبی مدل اول و دوم است. در ادامه فراسوی ۶۰۰ متری (شکل ۸ ب)، بی‌هنجاری‌ها به شکل یکنواخت‌تری درمی‌آیند و دامنه‌نهایی آن‌ها کاهش یافته که بیانگر سیگنال غالب ناشی از مدل سوم (عمیق‌ترین منشور) است. مقایسه نتایج فراسوسازی مغناطیسی و شبه‌گرانی نشان می‌دهد که شبه‌گرانی برخلاف مغناطیس، از ابتدا گرایش بیشتری به منابع عمیق دارد و

به کار رود: یکی ملایم برای کاهش نویز خیلی نزدیک به سطح و دیگری قوی برای برجسته‌سازی مؤلفه‌های ناحیه‌ای و عمیق. انتخاب ۱۰۰ متر به عنوان ادامه فراسوی نزدیک به سطح، باعث تضعیف نسبتاً اندک مؤلفه‌های بسیار سطحی و در عین حال حفظ اطلاعات میانی می‌شود و از این رو برای آشکارسازی لبه‌ها و ساختارهای میانی مناسب است.

در مقابل، ادامه فراسوی ۶۰۰ متر به طور مؤثری پاسخ منابع سطحی را حذف و مؤلفه‌های طول موج بلند مربوط به توده‌های عمیق را برجسته می‌سازد؛ به عبارت دیگر، استفاده هم‌زمان از دو ارتفاع یادشده یک استراتژی «چند-مقیاسی» فراهم می‌آورد که به طور روشن قادر است منابع سطحی، میانی و عمیق را از یکدیگر تمیز دهد و بدین ترتیب تحلیلی قابل اطمینان‌تر برای تفسیر ساختارهای زیرسطحی ارائه نماید.



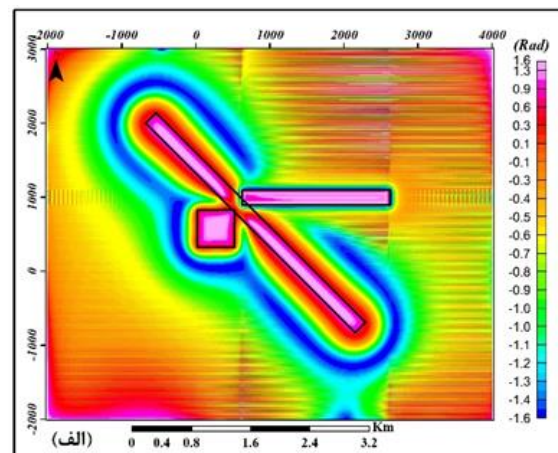
شکل ۹: نقشه‌های به دست آمده از نتیجه اعمال مشتق زاویه تیلت روی داده‌های مغناطیسی (الف) و شبه‌گرانی (ب) مصنوعی.

عدد موج ترسیم شد که امکان تشخیص شیب‌های معنادار طیفی را فراهم ساخت.

نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد که در داده‌های مغناطیسی گل‌گهر، قسمت‌های پرتیب منحنی در فرکانس‌های بالا قرار دارند که نشان‌دهنده تسلط منابع کم‌عمق بر میدان اندازه‌گیری شده هستند. این رفتار با حضور بی‌هنجاری‌های سطحی ناشی از سنگ‌های غنی از مگنتیت که در افق‌های فوقانی زمین‌شناسی منطقه جای گرفته‌اند هم‌راستا است. بر اساس شیب حدودی ۰/۵-۰/۳ واحد عدد موج، عمق این منابع در محدوده ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر برآورد گردید (شکل ۱۰ الف).

محدوده، صفر در مرز و مقادیر منفی بیرون محدوده، هیچ‌گونه آلودگی نویزی نشان نمی‌دهد. این ویژگی به دلیل تک‌قطبی‌سازی مؤلفه‌های مغناطیسی در تبدیل شبه‌گرانی و حذف کامل اثرات فرکانس‌های بالا در فرآیند گرادیان‌گیری اتفاق افتاده است. به طوری که با وجود مدل‌های سه‌گانه با عمق‌ها و آزمون‌های گوناگون، محیط خروجی کاملاً همگن باقی‌مانده و مرز ناهنجاری‌ها به شکل یک‌دست و شفاف بازیابی شده است، نکته‌ای که بر برتری روش شبه‌گرانی در کاربرد فیلتر زاویه تیلت تأکید می‌کند.

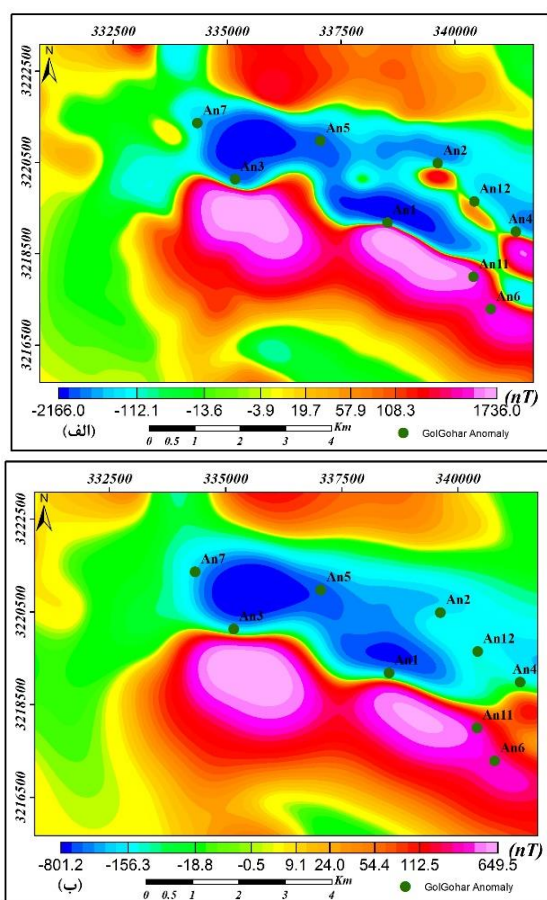
برای توجیه انتخاب ارتفاع‌های ادامه فراسو ۱۰۰ و ۶۰۰ متری از یک راهبرد چندمعیاره استفاده شد. ابتدا تحلیل طیف توان نشان داد که مؤلفه‌های کوتاه‌برد (منابع نسبتاً سطحی) در بازه عمق صفر تا حدود ۳۰۰ متر و مؤلفه‌های با طول موج بلند (منابع عمیق) در حدود ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر غالب‌اند؛ بنابراین لازم بود که حداقل دومرتبه ادامه فراسو



۵-۵- نتایج اعمال فیلتر طیف توان روی داده‌های واقعی

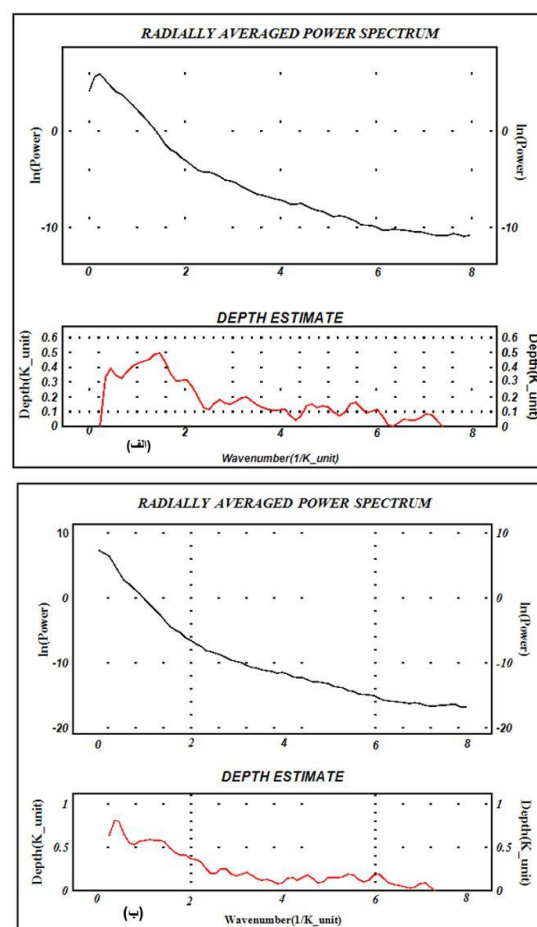
در این مطالعه، تکنیک طیف توان به منظور تخمین عمق منابع زیرسطحی مغناطیسی و چگالی منطقه گل‌گهر به کار گرفته شده است. این روش بر پایه تحلیل فرکانسی داده‌ها و محاسبه شیب‌های طیفی عمل می‌کند و از مهم‌ترین ابزارهای مؤثر در تعیین عمق متوسط منبع ژئوفیزیکی محسوب می‌شود. در این فرآیند، ابتدا داده‌های مغناطیسی انتقال‌یافته به قطب (RTP) و داده‌های شبه‌گرانی حاصل از تبدیل تابعی میدان مغناطیسی، وارد تحلیل فوری (FFT) شده و طیف توان دوبعدی آنها استخراج گردید. سپس با میانگین‌گیری شعاعی، منحنی لگاریتمی طیف توان در برابر

بی‌هنجاری‌های سطحی و ناشی از تغییرات زیرسطحی، تمرکز بر ساختارهای ژئوفیزیکی بزرگ و عمیق را افزایش داد. در ادامه، نتایج اعمال ادامه فراسو در ارتفاع‌های منتخب و تفسیر علمی هر دو مجموعه داده ارائه می‌شود. با افزایش ارتفاع ادامه فراسو از ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ متر، به تدریج تأثیر بی‌هنجاری‌های سطحی حذف و تنها چند منبع عمیق‌تر باقی می‌ماند. در ادامه فراسو ۱۰۰ و ۳۰۰ متری، علی‌رغم کاهش دامنه‌ی کلی میدان، هنوز اغلب بی‌هنجاری‌های کوچک سطحی دیده می‌شوند. در ارتفاع ۵۰۰ متر، بی‌هنجاری‌های جزئی (نظیر بی‌هنجاری‌های شماره‌های ۲، ۵، ۷ و ...) تقریباً محو و فقط بی‌هنجاری‌های بزرگ (۱، ۳، ۶ و ۴) برجای می‌مانند. ادامه فراسو ۸۰۰ و ۱۲۰۰ متری به ترتیب تنها بی‌هنجاری‌های اصلی ۱، ۳ و ۶ را نگه می‌دارد و دامنه میدان کاهش قابل توجهی می‌یابد. از نگاه تفسیر ژئوفیزیکی، نقشه‌های ادامه فراسو ۱۰۰ متری و ۵۰۰ متری بهترین تعادل را بین حذف نوفه سطحی و حفظ بی‌هنجاری‌های عمیق ارائه می‌دهد (شکل ۱۱ الف و ب).



شکل ۱۱: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلترهای فراسوی داده‌های مغناطیسی ۱۰۰ متر (الف) و ۵۰۰ متر (ب).

در مقابل، منحنی طیف توان داده‌های شبه‌گرانی، شیب ملایم‌تری در قسمت فرکانس پایین نمودار نشان داد؛ این ویژگی بیانگر حضور منابع عمیق‌تر است که معمولاً با توده‌های با چگالی بالاتر و اندازه گسترده‌تر شناخته می‌شوند. در اینجا، شیب ملایم در ناحیه عدد موج پایین (حدود ۰/۸ تا ۱/۰) نمایان شد که با عمق تقریبی ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر متناظر است. چنین الگوی طیفی تأیید می‌کند که داده‌های شبه‌گرانی، بیشتر متأثر از توده‌های درونی‌تر زمین بوده و در تحلیل ساختارهای عمیق‌تر کارآمدتر عمل می‌کنند (شکل ۱۰ ب).



شکل ۱۰: نمودارهای لگاریتمی طیف توان حاصل از داده‌های مغناطیسی هواورد (الف) و شبه‌گرانی (ب) منطقه مورد مطالعه.

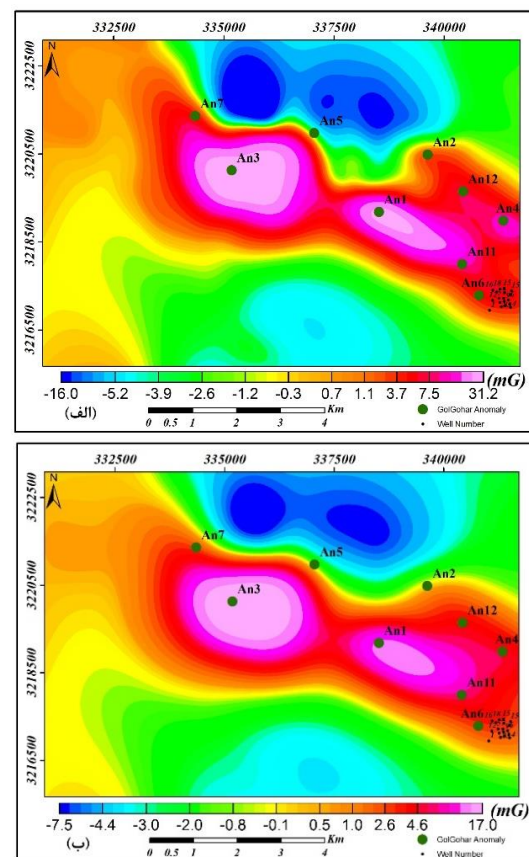
۵-۶- نتایج اعمال فیلتر ادامه فراسو روی داده‌های واقعی

برای جداسازی دقیق‌تر بی‌هنجاری‌های عمیق از اجزای کم‌عمق و نویزی در داده‌های ژئوفیزیکی، روش ادامه فراسو روی گریدهای میدان مغناطیس و شبه‌گرانی منطقه گل گهر به‌کاربرده شد. با این فیلتر، می‌توان ضمن کاهش تأثیر

مطالعه مشتق زاویه تیلت روی داده‌های واقعی مغناطیس‌سنجی کاهش‌یافته به قطب (RTP) و شبه‌گرانی منطقه گل‌گهر اعمال شد. این فیلتر با تلفیق مشتقات افقی و عمودی میدان، نقاطی را که مقدار تابع تیلت صفر می‌شود، به‌عنوان مرز ناهنجاری‌ها به‌صورت برجسته و متمرکز ارائه می‌کند و امکان تفکیک سریع نواحی کانسار از نوفه و بی‌هنجاری‌های جانبی را فراهم می‌آورد. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده برای هر دو نوع داده تشریح شده و نقاط قوت و محدودیت‌های هر روش در استخراج مرزهای بی‌هنجاری بیان می‌شود.

در شکل (۱۳ الف) که نتیجه‌ی اعمال مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های مغناطیس‌سنجی کاهش‌یافته به قطب (RTP) منطقه گل‌گهر است، خطوط هم‌ارز صفر (مرز ناهنجاری) با دقت مناسبی محل برهم‌کنش و تقاطع توده‌های مغناطیسی را نمایان می‌سازند. این مرزها، تطابق خوبی با مکان بی‌هنجاری‌های شناخته‌شده (An^۱ تا An^{۱۲}) دارند؛ به‌ویژه در ناحیه‌ی مرکزی و شرقی که توده‌های مگنتیتی سطحی قرار گرفته‌اند، خطوط صفر از مرز بی‌هنجاری‌ها عبور می‌کنند. لیکن در پس‌زمینه نقشه، اختلالات پراکنده‌ای مشاهده می‌شوند که به‌صورت نقاط و لکه‌های نویزی در اطراف مرزها پدیدار شده است. این نوفه نامنتظره علی‌رغم پیش‌فرض محیط همگن، ناشی از تشدید مؤلفه‌های فرکانس‌های بسیار بلند و کوتاه (بیش از حد مجاز فیلتر) در فرآیند انتقال به قطب است که هنگام محاسبه مشتق زاویه تیلت خود را به‌صورت «رگه‌های پراکنده» نشان می‌دهد. در مقابل، در شکل (۱۳ ب) که نتیجه‌ی اعمال مشتق زاویه تیلت بر روی داده‌های شبه‌گرانی گل‌گهر است، خطوط صفر مرزی کاملاً شفاف و یک‌دست رسم شده‌اند؛ مقادیر مثبت داخل محدوده‌ی بی‌هنجاری، مقادیر صفر در مرز و مقادیر منفی خارج از بی‌هنجاری. این نقشه هیچ آلودگی نویزی در پس‌زمینه ندارد و مرزها بدون نوفه در سراسر گستره تکرار می‌شوند. دلیل این پایداری و وضوح، تک‌قطبی‌شدن سیگنال در تبدیل شبه‌گرانی و حذف کامل مؤلفه‌های فرکانس بالا در گام گرادیان‌گیری است؛ به‌طوری‌که حتی در مدل‌های مختلف با عمق‌ها و آزمون‌های گوناگون، محیط خروجی کاملاً همگن باقی‌مانده و مرز ناهنجاری‌ها با وضوح حداکثری بازایی گردیده است. این ویژگی نشان‌دهنده برتری روش شبه‌گرانی در کاربرد

در داده‌های شبه‌گرانی نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود: در ادامه فراسوی ۱۰۰ و ۳۰۰ متری، باوجود افت دامنه چگالی بی‌هنجاری‌های فرعی هنوز آشکارند. در ارتفاع ۵۰۰ متر، بی‌هنجاری‌های کوچک سطحی از بین رفته و تنها منابع عمیق و بزرگ بی‌هنجاری‌های شماره‌های ۱، ۳، ۶، ۱۱ و ۴ برجای مانده‌اند. ادامه فراسوی ۸۰۰ و ۱۲۰۰ متری، مجموعه کوچک‌تری از بی‌هنجاری‌های اصلی (۱، ۳ و ۶) را حفظ می‌کند و نشان می‌دهد که دو توده‌ی عمده عمیق (احتمالاً متناظر با An^۱ و An^۳) در تمامی ارتفاعات بالادستی حضور دارند. از نظر تفکیک مناسب بخش‌های عمیق و حذف نوفه سطحی، نقشه‌ی ادامه فراسوی ۱۰۰ متر و ۵۰۰ متری شبه‌گرانی بهترین نمایانگر ساختار زیرسطحی و متوازن‌ترین نتیجه را ارائه کرده است (شکل ۱۲ الف و ب).

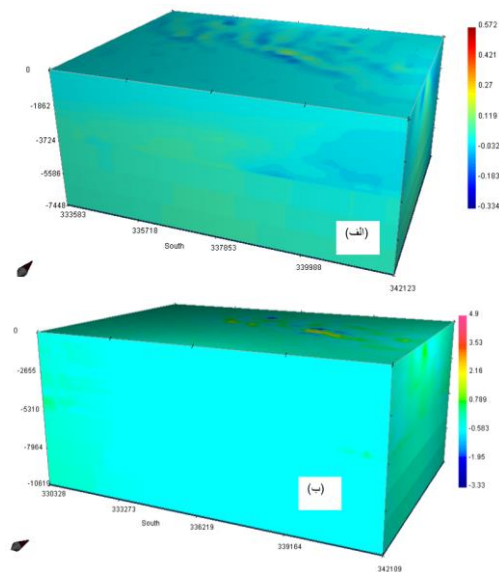


شکل ۱۲: نقشه‌های حاصل از اعمال فیلترهای فراسوی روی داده‌ها شبه‌گرانی ۱۰۰ متر (الف) و ۵۰۰ متر (ب).

۷-۵- نتایج اعمال مشتق زاویه تیلت روی داده‌های واقعی

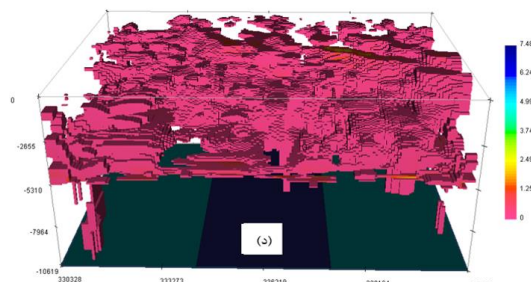
برای بهبود دقت تعیین مرزهای بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی و تحلیل ساختارهای زیرسطحی پیچیده، در این

میزبان و زون‌های مگنتیتی رعایت شود؛ خروجی این مرحله، نمای سه‌بعدی اولیه از توزیع پذیرش مغناطیسی و تباین چگالی بود که در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



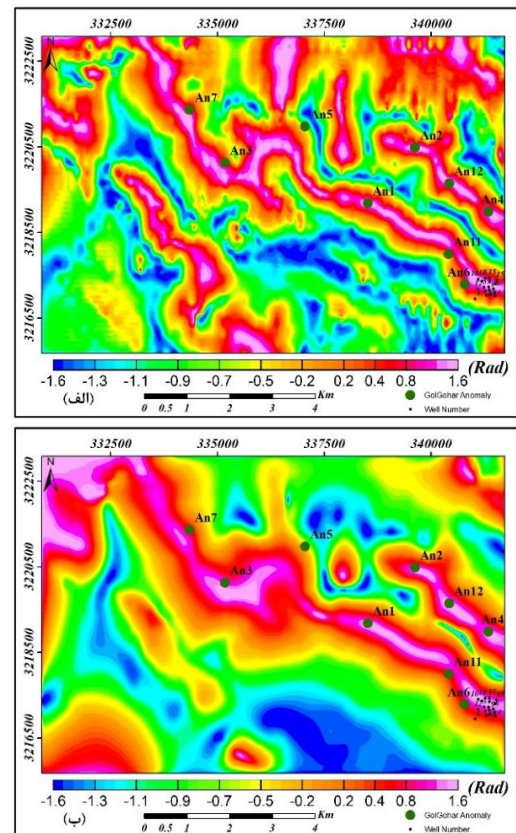
شکل ۱۴: نمای سه‌بعدی به دست مدل معکوس‌سازی سه‌بعدی مغناطیسی (الف) و گرانی (ب) (شکل ۱۴ ب).

برای متمرکز کردن تفسیر روی ساختارهای شاخص و بی‌هنجاری‌های قوی، در هر دو مدل مغناطیسی و شبه‌گرانی در نرم‌افزار مربوطه، مقدار حدی یا (Cut off) برابر ۰/۱ واحد انتخاب شد. در این برش، حجم‌های بالاتر از این آستانه آشکار شده و نواحی پرفراز و فرود خواص فیزیکی برجسته می‌گردند. در مدل مغناطیسی (شکل ۱۵ ج) نواحی با پذیرش مغناطیسی بیش از ۰/۱ SI به‌صورت پشته‌های منظم در امتداد روند NE-SW کانسار گل‌گهر دیده می‌شوند که هماهنگی نزدیکی با جهت‌گیری ساختارهای اصلی دارد. در مدل شبه‌گرانی (شکل ۱۵ د)، گستره‌ای از بی‌هنجاری‌های مثبت چگالی بیش از ۰/۱ gr/cm^3 به‌ویژه در پیرامون زون‌های مگنتیتی شناخته‌شده برجسته است که نشان‌دهنده کانون‌های متراکم‌تر در عمق کم تا متوسط است.



شکل ۱۵: نمای سه‌بعدی ساختارهای منطقه معدنی گل‌گهر که از داده‌های مغناطیسی هواپرد با خودپذیری مغناطیسی ۰/۱ SI (شکل ۱۵ ج) و شبه‌گرانی با چگالی ۰/۱ gr/cm^3 (شکل ۱۵ د) به‌دست آمده‌اند.

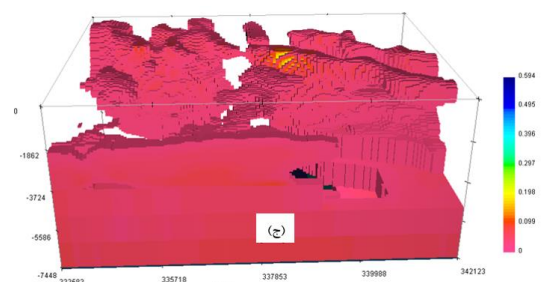
مشق زاویه تیلت برای تعیین دقیق مرزهای بی‌هنجاری‌های منطقه گل‌گهر است.



شکل ۱۳: نقشه‌های حاصل از اعمال مشق زاویه تیلت روی داده‌های مغناطیسی (الف) و شبه‌گرانی (ب) منطقه مورد مطالعه.

۸-۵- نتایج مدل‌سازی معکوس روی داده‌های واقعی

مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس ایزاری قدرتمند در ژئوفیزیک کاربردی است که با استفاده از داده‌های میدانی، توزیع مکانی پراکندگی خواص فیزیکی (مانند پذیرش مغناطیسی یا تراکم سنگ‌ها) را در زیرسطح زمین بازسازی می‌کند [۳۳]. در مدل مغناطیسی، بازه پیش‌فرض پذیرش مغناطیسی بین ۰/۰۱ تا ۰/۳ SI (بر اساس مشخصات زمین‌شناسی گل‌گهر) تعیین گردید تا تناسب با سنگ‌های



اعتبارسنجی گردید. داده‌های حفاری به‌عنوان قابل‌اعتمادترین مرجع در تعیین عمق شروع و ضخامت کانسارهای آهن در نظر گرفته شدند و اطلاعات حاصل از آن‌ها مبنایی برای ارزیابی دقت و صحت نتایج ژئوفیزیکی محسوب شد. جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج منتخب حفاری‌ها در آنومالی‌های مختلف را نشان می‌دهد که امکان تطبیق مستقیم با برآوردهای طیف توان را فراهم می‌سازد.

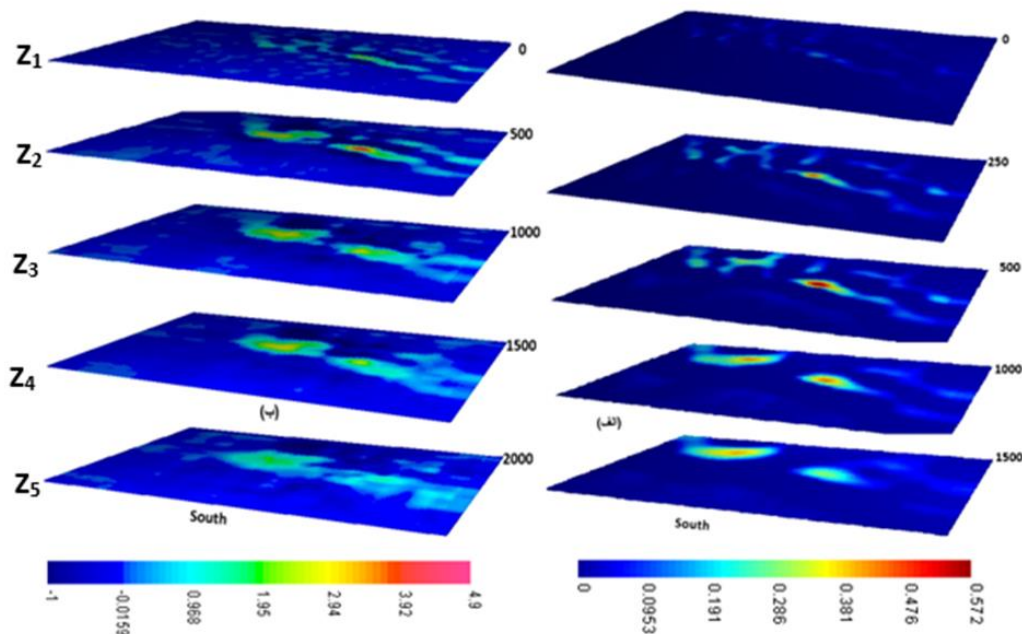
جدول ۲: نتایج داده‌های حفاری شده منطقه مورد مطالعه

آنومالی	عمق برخورد ماده معدنی (متر)	عمق سطح ماده معدنی (متر)	عمق متوسط (متر)	منبع
۱	۰	۳۵۰	۲۲۰	[34]
۲	۴۰	۲۲۰	۳۵	[35]
۳	۱۰۰		۳۰۰	[36]
۴	۳۴	۵۵۹		[37]
۶	۴۶۴	۷۴۰	۵۱۵	[39]
۷	۵۰	۳۴۰	۲۵۰	[38]
۱۱	۳۵۰	۷۶۰	۵۵۰	[38]
۱۲	۵۴	۲۳۰	۱۰۰	[38]

تحلیل عمقی مدل‌های معکوس امکان بررسی توزیع عمقی را فراهم می‌آورد. در شکل ۱۶ الف، حجم‌های با خودپذیری مغناطیسی بالای ۰/۰۱ SI تا عمق حدود ۱۵۰۰ متر از سطح زمین نمایش داده شده‌اند؛ این حجم‌ها نمایانگر گسترش پیوسته زون‌های مگنتیتی اصلی بوده و احتمالاً پیوند قوی با توده‌های مافیک-ولتراپروفریزی دارند که منشأ احتمالی کانسار را تأمین کرده‌اند. در شکل ۱۶ ب، تباین چگالی مثبت تا عمق ۲۰۰۰ متر امتداد یافته و حاکی از وجود توده‌های متراکم زیرسطحی است که با بی‌هنجاری‌های مغناطیسی هم‌پوشانی می‌کند. این تطابق دوجانبه نشان می‌دهد که منشأ ماگماهای تغذیه‌کننده کانسار و مهاجرت سیالات غنی از آهن در یک سیستم ساختاری واحد کنترل شده است که در سطوح عمقی مختلف قابل رهگیری است.

۹-۵- اعتبارسنجی نتایج طیف توان با داده‌های حفاری

به‌منظور افزایش اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل طیف توان، نتایج عمقی این روش با داده‌های واقعی حاصل از حفاری‌های اکتشافی در محدوده گل‌گهر مقایسه و



شکل ۱۶: نمایش سه‌بعدی مدل خودپذیری مغناطیسی و تباین چگالی نظر به عمق: الف: نمایش سه‌بعدی خودپذیری مغناطیسی را از سطح زمین الی عمق ۱۵۰۰ متر نشان می‌دهد؛ ب: نمایش سه‌بعدی تباین چگالی را از سطح زمین الی عمق ۲۰۰۰ متر نشان می‌دهد.

سطحی مانند An1 و An2 تطابق بالایی با داده‌های حفاری (۰ تا ۳۵۰ متر) دارد و توانسته است ساختارهای نزدیک

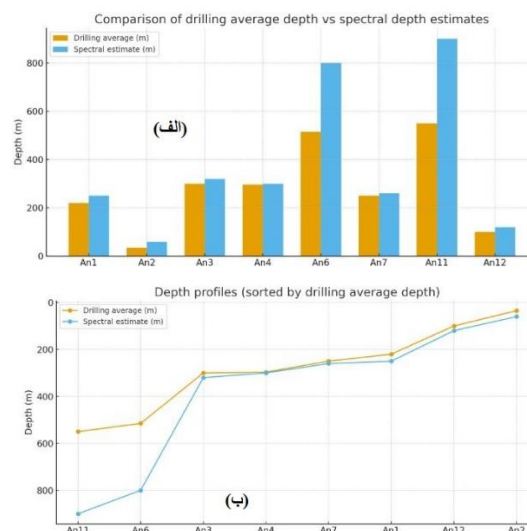
مقایسه تطبیقی نشان می‌دهد که در داده‌های مغناطیسی هوابرد، برآورد عمق طیف توان برای آنومالی‌های

موج و عمیق را برجسته می‌کند و در مقابل، ناهنجاری‌های کوتاه‌موج و کم‌عمق را تضعیف می‌سازد. از سوی دیگر، مشتق زاویه تیلت، لبه‌های منابع مغناطیسی را مشخص می‌کند؛ نمودار زاویه تیلت مقادیر نزدیک صفر را در امتداد لبه‌های توده‌های مغناطیسی نمایش می‌دهد. تحلیل طیف توان بر روی داده‌های مصنوعی نیز عمق بالایی و پایینی منابع را با دقت مناسبی تخمین زد. در کار با داده‌های هوابرد و شبه‌گرانی منطقه گل‌گهر، نتایج پردازش‌ها با شواهد زمین‌شناسی ناحیه همخوانی داشت. فیلتر زاویه تیلت، لبه‌های رگه‌های مغناطیسی سطحی را با وضوح بالا مشخص کرد. این رگه‌ها عمدتاً به سمت NW-SE امتداد یافته و توسط گسل‌هایی تقریباً N-S قطع می‌شوند. ادامه فراسو نیز اجازه داد تا منابع مغناطیسی عمیق‌تر در عمق آشکار شوند و روند کلی ساختارهای زیرسطحی را روشن سازد. علاوه بر این، نتایج طیفی عمق‌های تخمین زده شده را به‌دست داد که با اطلاعات حاصل از حفاری‌ها و شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی منطبق بود.

خلاصه‌ی یافته‌های اصلی به‌صورت کمی و کیفی به قرار زیر است: تحلیل طیف توان روی داده‌های مغناطیسی عمق‌های میانگین منابع نزدیک سطح را در بازه‌ی تقریباً ۳۰۰-۶۰۰ متر و روی داده‌های شبه‌گرانی عمق‌های میانی-عمیق را در حدود ۸۰۰-۱۰۰۰ متر نشان داد؛ ادامه فراسو در ارتفاع‌های ۱۰۰ متر (فیلتر ملایم) و ۶۰۰ متر (فیلتر قوی) به‌عنوان دو سطح فیلترینگ مکمل انتخاب و با تحلیل طیفی توجیه شدند؛ اعمال ادامه فراسو ۱۰۰ متر جزئیات میانی را حفظ و نویز سطحی را کاهش داد، درحالی‌که ادامه فراسو ۶۰۰ متر مؤلفه‌های سطحی را عملاً حذف و منابع عمیق را برجسته ساخت. مدل‌های معکوس سه‌بعدی نشان دادند که حجم‌های دارای پذیرش مغناطیسی بالا تا حدود ۱۵۰۰ متر و نواحی دارای تباین چگالی مثبت تا بیش از ۲۰۰۰ متر امتداد دارند.

بدین ترتیب، تلفیق نتایج این فیلترها نقشه‌ای یکپارچه از گستره عمقی و جانمایی منابع مغناطیسی ارائه داد؛ به‌طوری‌که علاوه بر تفکیک بهتر مرزهای ساختاری کم‌عمق، محل و عمق توده‌های اصلی عمیق نیز با دقت بیشتری تعیین شد. بررسی حاضر نشان می‌دهد که به‌کارگیری هم‌زمان این روش‌ها منجر به افزایش معنی‌دار قابلیت تفکیک‌پذیری ساختاری-عمقی در تفسیر ژئوفیزیکی شده و با داده‌های زمین‌شناسی و حفاری منطقه به‌خوبی همسو است.

سطح را به‌خوبی شناسایی کند. در مقابل، در مورد آنومالی‌های عمیق‌تر مانند An6 و An11، طیف توان شبه‌گرانی دقت بیشتری از خود نشان داده و برآورد عمقی (حدود ۴۰۰-۷۰۰ متر) آن به‌خوبی با داده‌های حفاری همخوانی دارد. این نتایج بیانگر آن است که روش مغناطیسی در تفکیک لایه‌های سطحی و میانی برتری دارد، درحالی‌که روش شبه‌گرانی در آشکارسازی ساختارهای عمیق عملکرد بهتری ارائه می‌دهد (شکل ۱۷ الف و ب).



شکل ۱۷: مقایسه داده‌های حفاری و برآوردهای طیف توان برای آنومالی‌های منتخب منطقه گل‌گهر؛ (الف) نمودار ستونی تطبیقی بین عمق متوسط حاصل از حفاری و عمق برآوردی طیف توان، (ب) نمودار پراکندگی عمق حفاری در برابر طیف توان به همراه خط همبستگی یک‌به‌یک ($y=x$).

به‌طورکلی، صحت‌سنجی نتایج طیف توان با داده‌های حفاری نشان می‌دهد که اختلاف میان برآورد ژئوفیزیکی و داده‌های واقعی در محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد قرار دارد که برای داده‌های هوابرد با نویز ذاتی، عددی قابل‌قبول محسوب می‌شود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده هم‌زمان از طیف توان مغناطیسی و شبه‌گرانی، چارچوبی قابل‌اعتماد برای تحلیل عمقی منابع در منطقه گل‌گهر فراهم می‌آورد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از مدل‌های مصنوعی، تأثیر سه فیلتر مغناطیسی (ادامه فراسو، طیف توان و زاویه تیلت) بر ناهنجاری‌های سطحی و عمقی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فیلتر ادامه فراسو با افزایش ارتفاع شبیه‌سازی شده، پاسخ مغناطیسی ناشی از ساختارهای بلند-

مراجع

- [14] Beamish, D. The tilt derivative applied to AEM conductivity data. in Near Surface 2009-15th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2009. European Association of Geoscientists & Engineers.
- [15] Cheyney, S., I. Hill, and N.J.A.P. Linford, Advantages to using the pseudogravity transformation to aid edge detection of total field archaeomagnetic datasets. 2011. 18(2): p. 81-93.
- [16] Shahverdi, M., et al., Interpretation of magnetic data based on tilt derivative methods and enhancement of total horizontal gradient, a case study: Zanjan Depression. 2017.
- [17] Alhassan, A., et al., Comparison Between Second Vertical Derivative and Tilt Angle Methods in Detecting Edges of Gravity Anomaly. 2021. 5: p. 83-7.
- [18] Garba, M.L., et al., A Pseudogravimetric Study of Part of the Upper Benue Trough, Nigeria. 2024. 9(9): p. 279-297.
- [19] Li, Y. and D.W.J.G. Oldenburg, 3-D inversion of magnetic data. 1996. 61(2): p. 394-408.
- [20] Dai, W., et al., A Fast Algorithm for 3D Focusing Inversion of Magnetic Data and Its Application in Geothermal Exploration. 2024. 17(16): p. 4000. YANG, B.J.P.i.G., 3D smooth inversion of magnetic data and its application to the Daye iron mine. 2010. 25(4): p. 1433-1441.
- [21] Deniz Toktay, H., et al., MTAHG and MTBHG: Modified approaches for interpreting gravity data. 2025. 12(4): p. e2024EA003900.
- [22] Paoletti, V., et al., Self-constrained inversion of potential fields. 2013. 195(2): p. 854-869.
- [23] Codd, A., et al., Fast multi-resolution 3D inversion of potential fields with application to high-resolution gravity and magnetic anomaly data from the Eastern Goldfields in Western Australia. 2021. 157: p. 104941.
- [24] Rezaie, M.J.P. and A. Geophysics, 3D inversion of magnetic amplitude data with sparseness constraint. 2021. 178(6): p. 2111-2126.
- [25] Ghari, H., R. Varfinezhad, and S.J.N.S.G. Parnow, 3D joint interpretation of potential field, geology, and well data to evaluate a salt dome in the Qarah-Aghaje area, Zanjan, NW Iran. 2023. 21(3): p. 233-246.
- [26] Huestis, S.P. and R.L.J.G.J.I. Parker, Upward and downward continuation as inverse problems. 1979. 57(1): p. 171-188.
- [27] Tóth, G., et al., Upward/downward continuation of gravity gradients for precise geoid determination. 2006. 41: p. 21-30.
- [1] Mashhadi, S.R. and M. Safari. The effectiveness of pseudo-gravity transformation in mineral exploration: an example from a placer magnetite deposit. in NSG2020 3rd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. 2020. European Association of Geoscientists & Engineers.
- [2] Baranov, V. and H. Naudy, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. Geophysics, 1964. 29(1): p. 67-79.
- [3] Ravat, D., Reduction to Pole, in Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism, D. Gubbins and E. Herrero-Bervera, Editors. 2007, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 856-858.
- [4] Spector, A. and F.J.G. Grant, Statistical models for interpreting aeromagnetic data. 1970. 35(2): p. 293-302.
- [5] Pilkington, M. and P. Keating, The relationship between local wavenumber and analytic signal in magnetic interpretation. %J Geophysics, 2006. 71(1): p. L1-L3.
- [6] Maus, S. and V.J.J.o.G.R.s.e. Dimri, Potential field power spectrum inversion for scaling geology. 1995. 100(B7): p. 12605-12616.
- [7] Nabighian, M.N., et al., The historical development of the magnetic method in exploration. 2005. 70(6): p. 33ND-61ND.
- [8] Ravat, D., et al., A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data. 2007. 169(2): p. 421-434.
- [9] Blakely, R.J., Potential theory in gravity and magnetic applications. 1996: Cambridge university press.
- [10] Pilkington, M. and O.J.G. Boulanger, Potential field continuation between arbitrary surfaces—Comparing methods. 20 : (۲)۴۲ . ۱۱۶p. J9-J25.
- [11] Ansari, A., et al., 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): p. 1-12.
- [12] Al-Banna, A.S. and H.H.J.T.I.G.J. Majeed, Multi-Elevations Upward Continuation Method to Depth Detection of the Main Crustal Layers in Western Desert of Iraq. 2023: p. 290-303.
- [13] Salem, A., et al., Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. 2008. 73(1): p. L1-L10.

- [35] Hazrati Nejad, Y., Interpretation and Analysis of Gravity and Magnetic Anomalies of Anomaly No. 2 in the Gol Gohar Sirjan Iron Ore Mine, Bachelor's Thesis (in Persian). Yazd University, 2004.
- [36] Esekandari, S., et al., Determining optimal points for future drilling in Gol Gohar Sirjan Mine No. 3 using Gaussian-fractal sequential simulation (in Persian). Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) 2008. Vol. 3, No. 5, 2008, pp. 11-19.
- [37] Dehqani Poor, A., M. Yavary, and A.A. KhudaYari, Determining the final scope and production planning of anomaly number four of Golgohar iron ore mine (in Persian). SID., 2010.
- [38] DonyayeEghtesad, D.E., Karnameh mosbat ekteshasf dar Gol-Gohar (in Persian)., 2019. <https://donya-e-eqtesad.com>.
- [39] Hezarkhani, A., Decision-making models in mining: the case example of the Golgohar 6 Iron Ore Deposit, Iran. 2015: Technische Universität Clausthal.
- [40] Ahmady, A.E, Ansari, A.H., Mojtahedzadeh, S.H., Detection of Geological Structures in the Gol Gohar Mining Iron Ore Area Using Airborne Magnetic Data. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 2025, 15(43), 01-10.
- [28] Issa, T., S. Olatunji, and G.J.I.J.o.S. Omolaiye, Upward Continuation and Reduction to Equator Filters on Aeromagnetic Data of parts of Bida Basin, Nigeria. 2024. **11**(3 (Special)): p. 311-318.
- [29] Fairhead, J.D., et al., Tilt-depth: a simple depth-estimation method using first order magnetic derivatives. 2009. 40390.
- [30] Alamdar, K., A. Ansari, and A. Ghorbani. Edge detection of potential field anomalies using tilt angle and its inferred filters. in EGU General Assembly Conference Abstracts. 2009.
- [31] Dadi, B., et al., Litho-structural interpretation of aeromagnetic anomalies reveals potential for mineral exploration in Tizi n'Test Region, Western High Atlas, Morocco. 2024. **14**(1): p. 17116.
- [32] Mahmoudi, S., Mahmoudi, A., & Mehrabi, B. (2017). Microstructure and geochemical evidences for genesis of the Gol-Gohar iron deposit. *Journal of Economic Geology*, 9(2), 463-481.
- [33] Bevan, B., Forward magnetic models: Creation and calculation. *Geosight*, ۲۰۱۶. Weems VA, USA.
- [34] Talesh Hosseini, S. and O.J.J.o.M.R.E. Asghari, Design Optimization of Estimation Process Using the Quantitative Kriging Neighbourhood Analysis in the Gol-E-Gohar No. 1 Mine. 2020. **5**(3): p. 1-18.