

وارون سازی همزمان سه بعدی داده های گرانی و مغناطیس با استفاده از قید ضرب گرادیان برداری

یاسر دهبان^۱؛ علی نجاتی کلاته^{۲*}؛ مهرداد سلیمانی منفرد^۳؛ محمد رضایی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی معدن-اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

* نویسنده مسئول مکاتبات: nejati@shahroodut.ac.ir

چکیده

روش های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی که در ژئوفیزیک معمولاً روش های میدان پتانسیل نامیده می شوند از مهم ترین روش های ژئوفیزیکی در اکتشاف مواد معدنی هستند. مدل سازی وارون داده های میدان پتانسیل از مهم ترین روش های تفسیر این داده ها است. مدل سازی وارون داده های میدان پتانسیل و به دست آوردن پارامترهای مدل از طریق داده ها، از نظر عددی مشکل بوده و جواب یکتا نیست. ممکن است بی نهایت مدل وجود داشته باشد که داده های میدان پتانسیل را به خوبی توجیه نماید. یک راه برای حل این مشکل، انتخاب مدلی است که با قیدهای زمین شناسی موجود در منطقه همخوانی داشته باشد. وارون سازی جداگانه داده های ژئوفیزیکی در موارد زیادی می توانند بازسازی مناسبی از مکان بی هنجاری های زیرسطحی را به دست آورند، اما ترکیب اطلاعات دو روش ژئوفیزیکی می توانند به بازیابی و در نتیجه تفسیر بهتری از بی هنجاری ها زیرسطحی شوند و در موارد زیادی پیمایش های ژئوفیزیکی یک روش به تنهایی نمی توانند تفسیر صحیحی از بی هنجاری های زیرسطحی را ارائه دهند در نتیجه ترکیب روش های ژئوفیزیکی امری ضروری است. وارون سازی همزمان برای پارامترهای ژئوفیزیکی یکسان یا مختلف، یک تکنیک اثربخش برای دستیابی به رزولوشن های بالاست. از این رو، تفسیر ژئوفیزیکی جامع بر اساس وارون سازی همزمان، در سال های اخیر کاربرد گسترده ای داشته است.

در این مقاله، وارون سازی همزمان سه بعدی داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی با استفاده از قید ضرب برداری گرادیان ها مورد بررسی قرار می گیرد. برای بررسی الگوریتم وارون سازی همزمان، در ابتدا الگوریتم روی داده های مدل مصنوعی اعمال می شود. در پایان، الگوریتم وارون سازی همزمان روی داده های واقعی اعمال گردید.

واژگان کلیدی

مدل سازی وارون
وارون سازی همزمان
مغناطیس سنجی
گرانی سنجی

۱- مقدمه

روش های ژئوفیزیکی بر اساس مطالعه خصوصیات میدان های فیزیکی قابل انتشار در داخل زمین بنیان نهاده شده اند که مهم ترین این میدان ها عبارتند از گرانی، مغناطیسی، الکترومغناطیسی و میدان های موجی لرزه ای. در پی جویی ذخایر معدنی از روش ها و تئوری های ژئوفیزیکی و زمین شناسی متعددی استفاده می شود. باتوجه به اهمیت ذخایر فلزات پایه و نیاز روزافزون به این ماده های معدنی روش های میدان پتانسیل یکی از راهکارهای ارزان و مناسب جهت اکتشاف این کانسارها هستند.

بازسازی دقیق ساختار و توزیع خواص فیزیکی در داخل زمین با استفاده از داده های روش های ژئوفیزیکی فردی به دلیل پیچیدگی زمین شناسی، غیرخطی بودن ذاتی اغلب فرایندهای ژئوفیزیکی و عدم دقت مدل سازی و عدم قطعیت های اندازه گیری، کاری دشوار است.

یک چالش بزرگ در حل مسائل وارون داده های ژئوفیزیکی، به ویژه داده های میدان پتانسیل، ابهام ذاتی در حل این مسئله ها است. در برخی موارد، این ابهام را می توان با وارون سازی مجموعه داده های ژئوفیزیکی مختلف در یک چارچوب وارون سازی مشترک کاهش داد.

وارون سازی همزمان برای پارامترهای ژئوفیزیکی یکسان یا مختلف، یک تکنیک اثربخش برای دستیابی به رزولوشن های بالاست. از این رو، تفسیر ژئوفیزیکی جامع بر اساس وارون سازی همزمان، در سال های اخیر کاربرد گسترده ای داشته است. وارون سازی همزمان یک تکنیک قدرتمند است که در ژئوفیزیک برای ادغام و تفسیر چندین مجموعه داده ژئوفیزیکی به طور همزمان استفاده می شود که منجر به یک مدل زیرسطحی دقیق تر و جامع تر می شود. هدف اصلی وارون سازی همزمان، به دست آوردن مدلی است که با استفاده از اطلاعات تکمیلی ارائه شده توسط روش های مختلف ژئوفیزیک، به بهترین وجه با تمام داده های موجود مطابقت داشته باشد. رایج ترین روش وارون سازی همزمان بر اساس شباهت های ساختاری، استفاده از قید ضرب برداری گرادیان ها است. برای وارون سازی همزمان داده های لرزه شناسی و ژئوالکتریک پایه گذاری شد که در این روش وارون سازی همزمان بر روی داده های مربوط به یک سایت آزمایشی در کورن انگلستان انجام شد که به مدل های بهتری نسبت به وارون سازی جداگانه رسیدند (Gallardo and Meju (2003). این الگوریتم باعث ایجاد شباهت ساختاری قابل توجهی بین مدل های مقاومت ویژه و سرعت گردید. (Gallardo and Meju (2003) تابع ضرب برداری گرادیان ها را برای وارون سازی همزمان سه بعدی داده های مغناطیس سنجی و گرانی سنجی به کار گرفتند. در این روش با استفاده از پارامتر منظم سازی به مدل هایی رسیدند که هم از نظر جانبی و هم از نظر عمقی نتایج بهتری

نسبت به وارون سازی های جداگانه داشته اند. ژوو و اون (۲۰۱۵) الگوریتم مشابهی را ارائه کردند که در آن از داده های مغناطیسی نرمال شده استفاده شد. Zhou and Owen (2015). الگوریتم های وارون سازی مشترک ضرب برداری گرادیان ها با موفقیت بر روی طیف وسیعی از مجموعه داده های ژئوفیزیکی اعمال شده اند و منجر به تولید مدل هایی با شباهت ساختاری بهبود یافته شده اند. از آنجایی که داده های میدان پتانسیل اغلب به طور گسترده در یک منطقه مشترک در دسترس هستند، کاربرد وارون سازی مشترک ضرب برداری گرادیان ها برای داده های گرانی و مغناطیسی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. گراس (۲۰۱۵) یک وارون سازی مشترک ضرب برداری گرادیان های وزن دار از داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی را ارائه کرد. او با وزندهی محلی ضرب برداری گرادیان ها، شباهت ساختاری بین مقادیر چگالی و خاصیت مغناطیسی بازیابی شده را به طور قابل توجهی بهبود بخشید Gross (2015). Bennington and Owen (2015) از قید ضرب برداری گرادیان ها برای وارون سازی همزمان داده های مگنتوتلوریک و لرزه شناسی در پارک فیلد کالیفرنیا استفاده کردند و به مطالعه توزیع و انتقال سیالات در اعماق کم و زیاد پرداختند و به شباهت ساختاری قابل توجهی بین مدل های مقاومت ویژه و سرعت در قیاس با وارون سازی جداگانه دست یافتند. ژانگ و وانگ (۲۰۲۰) یک الگوریتم وارون سازی مشترک برای داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی با حل یک تابع هدف ارائه کردند که این تابع هدف از سه بخش شامل عدم تطابق داده (data misfit)، پایدارکننده تغییرات کل (total variation stabilizer) و یک قید ضرب برداری گرادیان ها تشکیل شده است. توکل و همکاران با پیشنهاد یک الگوریتم که مبتنی بر ترکیب وارون سازی های جداگانه با مراحل تصحیح از طریق قید گرادیان متقاطع در فرایند وارون سازی همزمان است به وارون سازی همزمان داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی پرداختند Tavakoli et al. (2021). وطنخواه و همکاران (۲۰۲۲) با روش وارون سازی تمرکز یافته همزمان با استفاده از قید گرمین به وارون سازی همزمان داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی پرداختند Vatankeh et al. (2022). به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهادی شباهت خوبی بین مدل های بازسازی شده را فراهم می کند و اجرای قید گرمین در فضای پارامترهای وزن دار همبستگی نسبتاً خوبی را برای پارامترهای وزن دار فراهم می کند. مقالات دیگر که از این قید برای وارون سازی همزمان داده های ژئوفیزیکی استفاده کردند عبارت بودند از: وارون سازی همزمان داده های الکترومغناطیسی و لرزه شناسی Hu and Owen (2009). داده های الکترومغناطیس و لرزه بازتابی نیز توسط

$$\vec{t}(x, y, z) = \nabla m_1(x, y, z) * \nabla m_2(x, y, z)$$

(۲)

این تابع مرتبه دو غیرخطی دیگر مشکلات ناپیوستگی و تکینگی تابع زاویه‌ای را نخواهد داشت. هنگامی که مقدار این تابع صفر شود تصاویر مدل‌ها از نظر ساختاری به طور کامل به هم شبیه هستند. درواقع صفر بودن این حاصل ضرب برداری بیان‌کننده آن است که تغییر فضایی هم‌زمان در دو مدل ژئوفیزیکی متفاوت، مستقل از دامنه، باید در یک امتداد باشند، درواقع از نقطه نظر ریاضی دو بردار با هم موازی‌اند. از دیدگاه زمین‌شناسی این هم‌راستایی منجر به تشخیص مرز لایه‌ها می‌شود. انتخاب مقدار مناسب پارامتر منظم‌سازی، یکی از مسائل مهم در روش‌های منظم‌سازی، از جمله روش تیخونوف، است "(Oldenburg and Li, 2005)". روش منظم‌سازی تیخونوف رایج‌ترین روش حل مسائل بد شرط است. روش‌های متعددی برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی در مسائل وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی وجود دارد که این روش‌ها تحت شرایط مختلف امکان دارد جواب مطلوب و نامطلوبی بدهند "(Hansen, 2010)". پارامتر منظم‌سازی $0 < \alpha < \infty$ است که پارامتر متعادل ساز نیز نامیده می‌شود. این پارامتر وزن نسبی بین تابع عدم برازش و تابع ثابت ساز را کنترل می‌کند. اگر α به صفر میل کند، تابعی که حداقل می‌شود فقط شامل عدم برازش خواهد بود. در نتیجه مدل به دست آمده، به گونه‌ای ساخته می‌شود که داده‌های حاصل از مدل کاملاً بر داده‌های مشاهده‌ای برازش پیدا کند. اگر مقدار α بزرگ انتخاب شود، مقدار تابع عدم برازش کوچک خواهد شد و فقط تابع ثابت ساز حداقل می‌شود. کمینه کردن هر دو مقدار تابع عدم برازش و تابع ثابت ساز برای حل مسئله وارون لازم است و درواقع نقش پارامتر منظم‌سازی متعادل کردن اهمیت نسبی بین دو تابع عدم برازش و تابع ثابت ساز است "(Oldenburg and Li, 2005)". تابع هدف مسئله وارون‌سازی هم‌زمان با استفاده از قید ضرب برداری گرادین‌ها به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$\min \left\{ \varphi(m_1, m_2) \right. \\ = \left\| d_1 - A_1 m_1 \right\|_{c_{dd}^{-1}}^2 + \left\| a_1 D m_1 \right\|^2 \\ \left. + \left\| m_1 - m_{R1} \right\|_{c_{RR}^{-1}}^2 \right\} t(m_1, m_2) = 0$$

(۳)

d_2, d_1 لگاریتم داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. A_1, A_2 عملگرهای پیشرو را نشان داده و c_{dd} ماتریس کوواریانس داده‌های اندازه‌گیری شده است که در اینجا فرض بر قطری بودن این ماتریس است یعنی داده‌ها همبسته نیستند. $t(m_1, m_2)$ مقادیر تابع ضرب برداری گرادین‌ها

هوو و اون (۲۰۰۹) با استفاده از قید ضرب برداری گرادین‌ها وارون‌سازی شدند "(Hu and Owen, 2009)". Shi and Owen (2018) با استفاده از ضرب برداری گرادین‌ها وارون‌سازی هم‌زمان داده‌های ERT و لرزه انکساری را انجام دادند. زمان رسیده‌های لرزه‌شناسی و مگنتوتلوریک "(Molodtsov and Owen, 2013)" و داده‌های مغناطیس‌سنجی و مگنتوتلوریک با چشمه مصنوعی درگستره فرکانس‌های شنوایی وانگ و اوون (۲۰۱۷)، ژولیده سر (۲۰۱۸) قیدهای وزن‌دهی عمقی و فشردگی را در فرایند وارن‌سازی هم‌زمان بر پایه قید ضرب برداری گرادین‌ها وارد کردند.

باتوجه به معایب و مزایای دو روش وارون‌سازی هموار و وارون‌سازی متمرکز و با دقت به این موضوع که داده‌های ژئوفیزیکی هیچ‌وقت بدون نویز نبوده و ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی دارای پیچیدگی و تیزی و عدم یکنواختی هستند، در این مقاله، هدف ارائه یک روش وارون‌سازی هم‌زمان قوی و کارآمد با استفاده هم‌زمان از دو روش هموار و متمرکز برای داده‌های میدان پتانسیل است. روش ضرب برداری گرادین‌ها یک ابزار قدرتمند و چندمنظوره است که در طول سال‌ها توسط محققان مختلف در ترکیب با انواع متنوعی از داده‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده و توانایی خود را در بهبود شباهت ساختاری و کاهش ابهام در مدل‌های زیرسطحی اثبات کرده است.

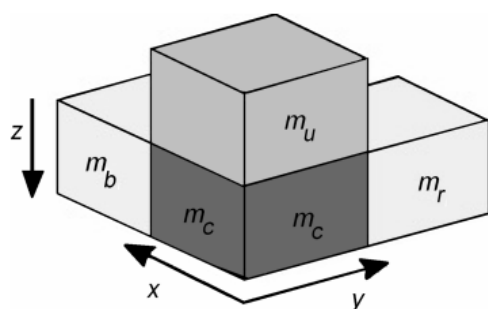
۲- روش تحقیق

گالاردو و میو (۲۰۰۳ و ۲۰۰۴) وارون‌سازی هم‌زمان دو روش دلخواه ژئوفیزیکی را با استفاده از قید ضرب برداری گرادین‌ها تعریف کرد. هنگامی که بین ویژگی‌های فیزیکی روش‌های ژئوفیزیکی مختلف ارتباط تحلیلی خاصی برقرار نباشد، می‌توان با استفاده از روش وارون‌سازی هم‌زمان مدل‌هایی را به دست آورد که با همدیگر انطباق ساختاری نسبتاً خوبی دارند. در ابتدا برای تفاوت ساختاری بین تصویرهای مختلف ژئوفیزیکی از رابطه زیر بهره گرفته می‌شد "(Gallardo and Meju, 2004)".

$$\theta(x, y, z) = \cos^{-1} \left(\frac{\nabla m_1(x, y, z) \cdot \nabla m_2(x, y, z)}{|\nabla m_1(x, y, z)| |\nabla m_2(x, y, z)|} \right) \quad (۱)$$

که در آن ∇m_1 و ∇m_2 گرادین مشخصات فیزیکی مختلف هستند. طبق رابطه بالا در جاهایی که ∇m_1 و ∇m_2 صفر است مخرج نیز صفر می‌باشد بر همین اساس تابع بردارهای گرادین را معرفی کردند.

این تابع عبارت است از حاصل ضرب برداری گرادین پارامترهای مدل‌های ژئوفیزیکی که برای اندازه‌گیری شباهت ساختاری تصویرهای مدل‌های ژئوفیزیکی مختلف به کار برده می‌شود.



شکل ۱: نمایش سه سلولی برای گسسته سازی تابع ضرب برداری گرادیانها. "(Gallardo and Meju, 2004)".

برای اندازه گیری کل مدل، بردارهای متناظر t_x ، t_y و t_z به صورت ستونی به عنوان بردارهای مدل مرتب می شوند و در قید برابری تابع هدف ترکیب می شوند. مؤلفه های گرادیان متقاطع شباهت ساختاری دو مدل را بر روی سطوح طرح ریزی عمودی آن ها بیان می کنند. هنگامی که گرادیان های مدل دارای جهت یکسان یا معکوس هستند، یعنی شیب آن ها موازی است، این سه جزء تمایل به نزدیک شدن به صفر دارند. در غیر این صورت، مقادیر غیر صفر می گیرند. برای کل حجم مدل، آرایه ساخته شده در عبارت محدودیت برابری برای اندازه گیری شباهت ساختاری کل استفاده می شود. هنگامی که ساختارها سازگار هستند، این آرایه باید به فضای تهی نزدیک شود. برای مدل های گسسته، گرادیان متقاطع معمولاً در طرح تفاوت روبه جلو محاسبه می شود.

۳- وارون سازی سه بعدی داده های مصنوعی

به منظور نشان دادن کارایی روش، در ادامه دو مثال با داده های بدون نوفه و نوفه دار ذکر شده است.

۳-۱ وارون سازی داده های بدون نوفه

به منظور ارزیابی الگوریتم ارائه شده، وارون سازی داده های حاصل از یک مدل مصنوعی با استفاده از این روش انجام شده است. مدل مصنوعی استفاده شده در این پژوهش دو توده مکعب مستطیل شکل است. ابعاد شبکه فرضی برداشت داده در سطح ۵۰ متر در ۵۰ متر لحاظ شده است. حجم زیر سطح زمین به سلول های مکعبی با ابعاد ۵۰ متر تقسیم شده است که باتوجه به ابعاد مدل تعداد این سلول های مکعبی ۴۰۰۰ = ۲۰ × ۲۰ × ۱۰ است (شکل ۲). ابتدا داده های حاصل از این مدل مصنوعی با استفاده از مدل سازی پیشرو برای مدل گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در یک محدوده ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر با شبکه ۵۰ در ۵۰ متر تولید شده است، (شکل های ۳ و ۴) سپس وارون سازی جداگانه هر مجموع داده انجام شده است تا مبنایی برای مقایسه نتایج وارون سازی همزمان فراهم شود. نتایج به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های گرانی سنجی و داده ها مغناطیس سنجی در (شکل های ۵ و ۶) آورده شده است. نتایج به دست آمده از وارون سازی همزمان داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در (شکل های ۷ و ۸) آورده شده است. در وارون سازی جداگانه داده های مغناطیس سنجی دو مدل به ویژه در عمق در یکدیگر ادغام می شوند، در حالی که مدل حاصل از وارون سازی همزمان گرادیان متقاطع تفکیک بهتری از دو مدل را نشان

برای تمام سلول های مدل است. D ماتریس منظم سازی و a_1 و a_2 پارامترهای منظم سازی هستند که میزان همواری مدل ها را تعیین می کنند و m_{R1} و m_{R2} مدل های مرجع برای دو روش هستند که ماتریس کوواریانس آن ها C_{RR} میباشد.

در حالت سه بعدی قید ضرب برداری گرادیانها به شکل زیر است:

$$t_x(x, y, z) = \left(\frac{\partial m_1(x, z)}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial m_2(x, z)}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial m_1(x, z)}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial m_2(x, z)}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$t_y(x, y, z) = \left(\frac{\partial m_1(x, z)}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial m_2(x, z)}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial m_1(x, z)}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial m_2(x, z)}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$t_z(x, y, z) = \left(\frac{\partial m_1(x, z)}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial m_2(x, z)}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial m_1(x, z)}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial m_2(x, z)}{\partial y} \right) \quad (6)$$

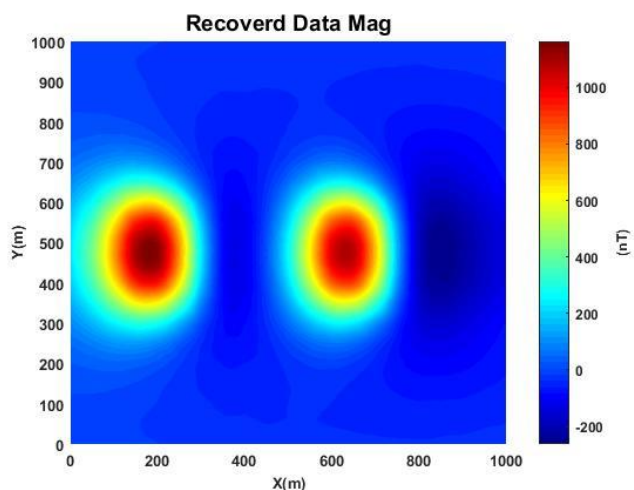
با استفاده از روش تفاضل پیشرو معادله های بالا گسسته می شود.

$$t_x \cong \frac{1}{\Delta y \Delta z} (m_{1c}(m_{2b} - m_{2u}) + m_{1b}(m_{2u} - m_{2c}) + m_{1u}(m_{2c} - m_{2b})) \quad (7)$$

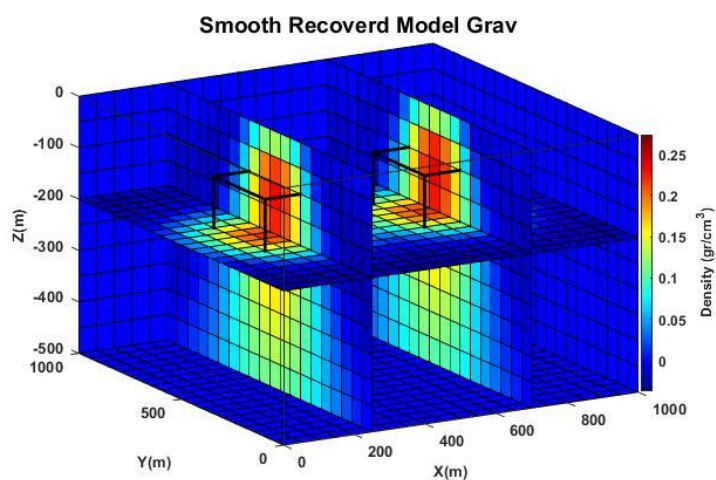
$$t_y \cong \frac{1}{\Delta x \Delta z} (m_{1u}(m_{2r} - m_{2c}) + m_{1c}(m_{2u} - m_{2r}) + m_{1r}(m_{2c} - m_{2u})) \quad (8)$$

$$t_z \cong \frac{1}{\Delta x \Delta y} (m_{1r}(m_{2b} - m_{2c}) + m_{1c}(m_{2r} - m_{2b}) + m_{1b}(m_{2c} - m_{2r})) \quad (9)$$

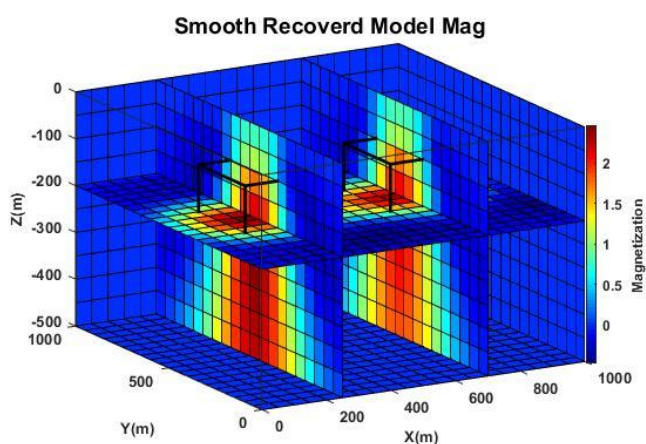
زیرنویس دوم c ، r و u در m_1 یا m_2 به ترتیب مرکز، پایین و سمت راست سلول را نشان می دهد.



شکل ۴: داده های مغناطیس سنجی تولید شده از مدل مصنوعی

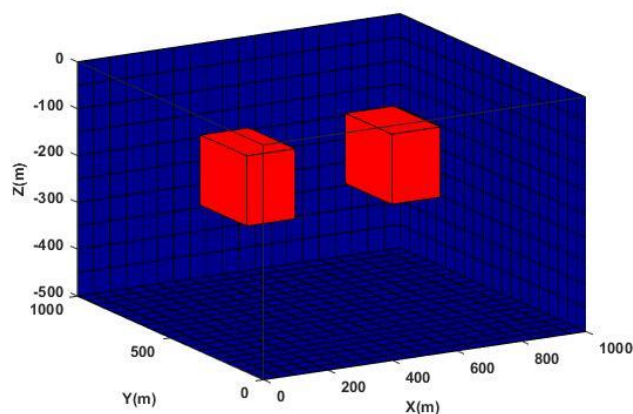


شکل ۵: مدل به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های گرانی سنجی

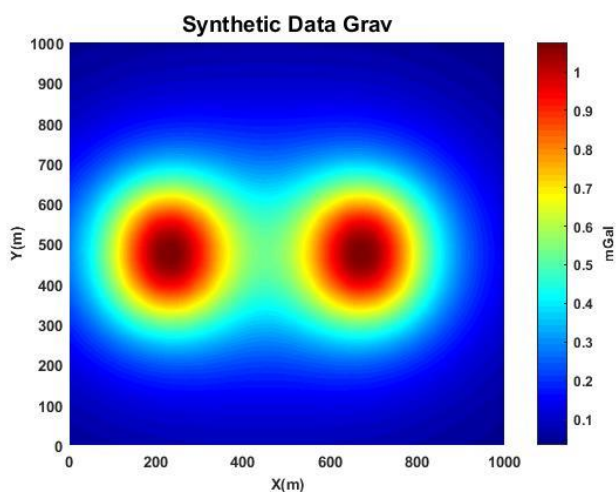


شکل ۶: مدل به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های مغناطیس سنجی

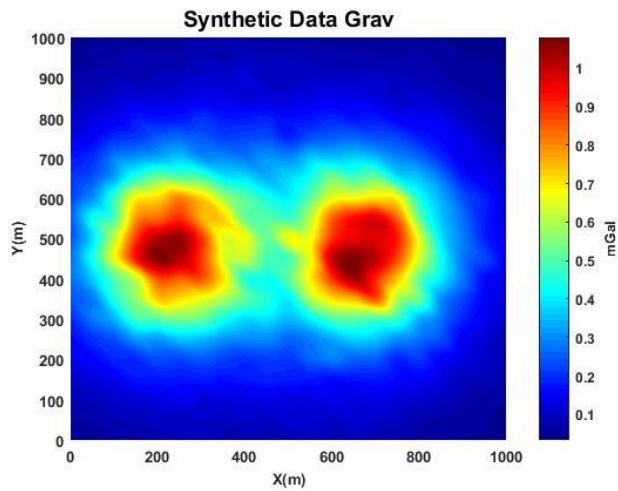
می‌دهد. همچنین می‌توانیم شاهد بهبود مدل مغناطش به‌دست‌آمده از وارونگی مشترک گرادیان متقاطع نسبت به مدل مغناطش به‌دست‌آمده از وارون سازی مغناطیسی جداگانه باشیم، به‌ویژه، اولی که در عمق موقعیت بهتری دارد. توجه داشته باشید که تنها اطلاعات پیشینی که در وارن سازی وارد شده است، محدودیت مثبت بودن دامنه‌های مغناطش است. این امر امکان ایجاد یک مدل مغناطش نسبتاً خوب را فراهم می‌کند که اطلاعات آن به طور مؤثر به مدل چگالی در مرحله گرادیان متقاطع منتقل می‌شود.



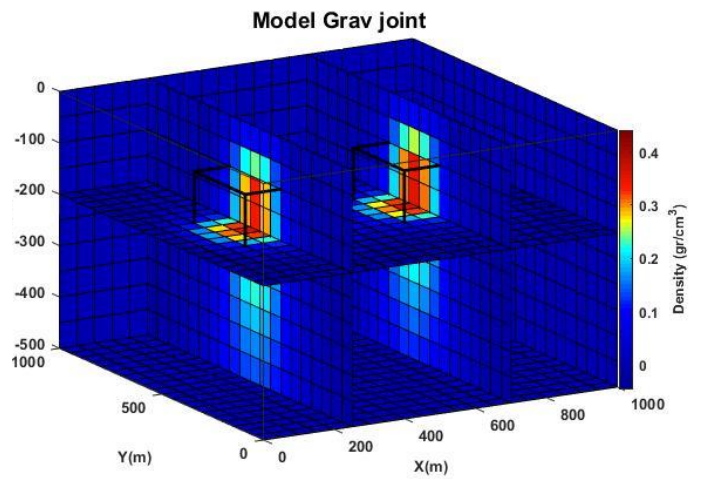
شکل ۲: مدل مصنوعی مورد استفاده



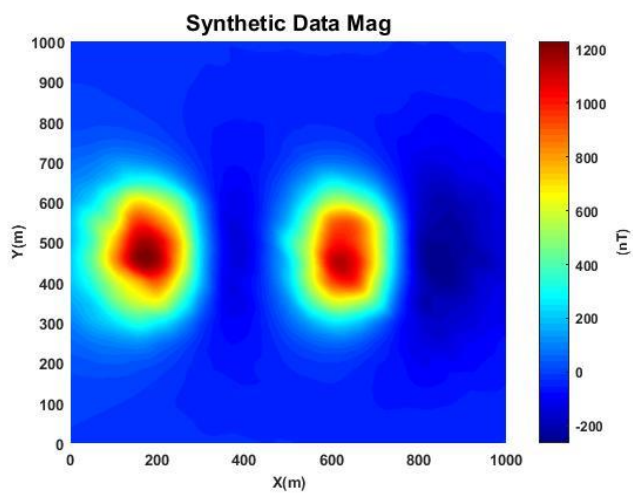
شکل ۳: داده های گرانی سنجی تولید شده از مدل مصنوعی



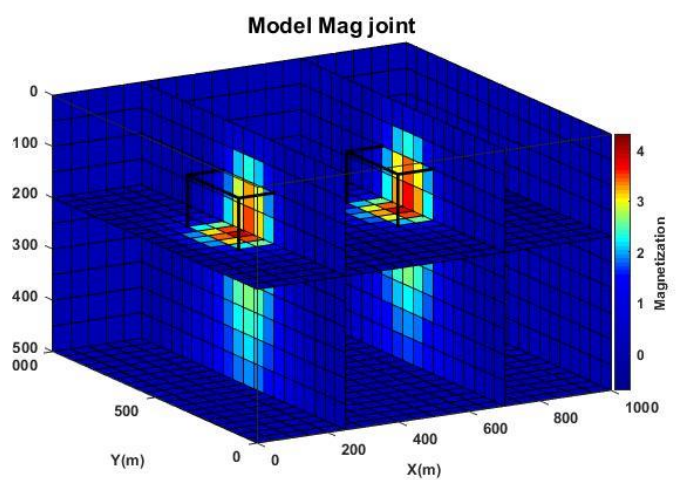
شکل ۹: داده های نوفه دار گرانی سنجی



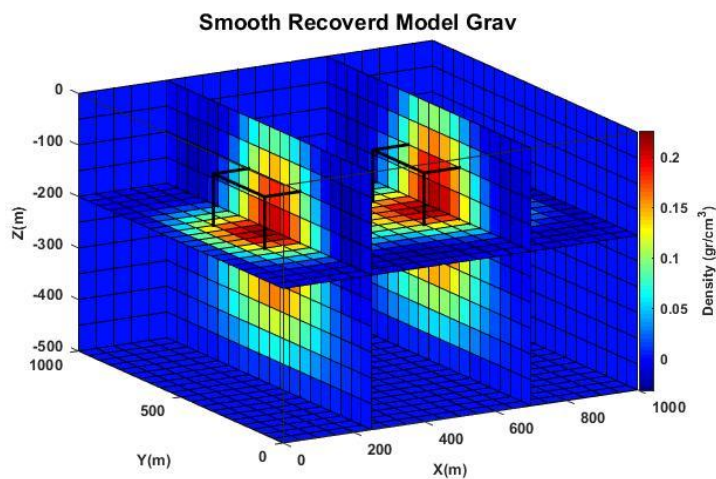
شکل ۷: مدل گرانی به دست آمده از وارون سازی همزمان داده ها



شکل ۱۰: داده های نوفه دار مغناطیس سنجی



شکل ۸: مدل مغناطیسی به دست آمده از وارون سازی همزمان داده ها

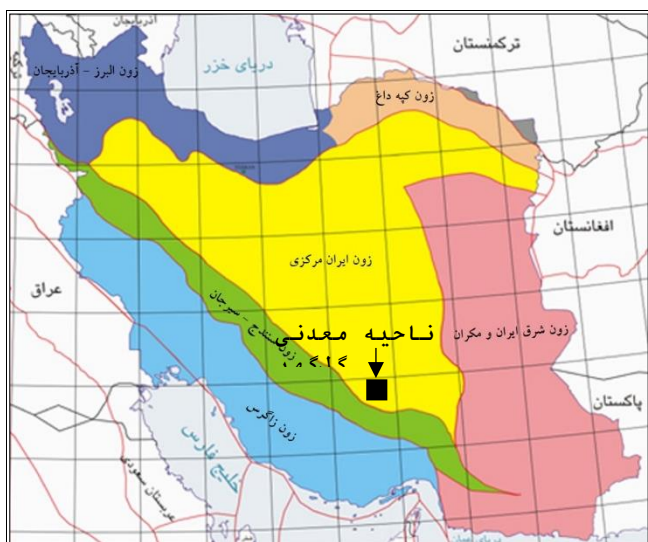


شکل ۱۱: مدل گرانی به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های نوفه دار

۲-۳ وارون سازی داده های نوفه دار

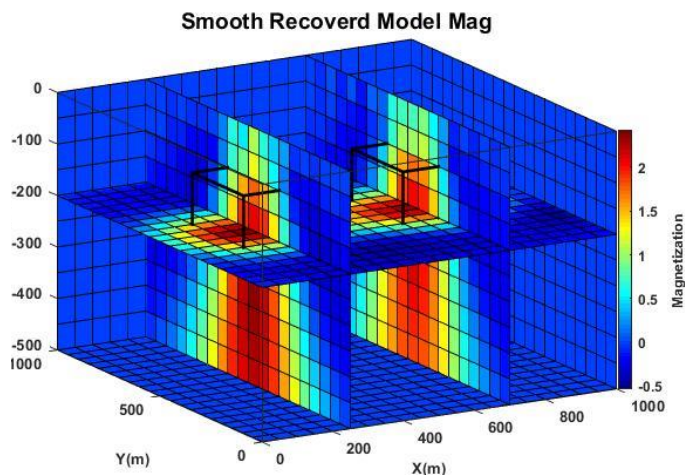
با توجه به اینکه داده های ژئوفیزیکی هیچ وقت بدون نوفه نبوده و برای ارزیابی میزان پایداری الگوریتم، ۵ درصد نوفه تصادفی با توزیع نرمال بر روی داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی اعمال شده است. (شکل های ۹ و ۱۰). وارون سازی جداگانه هر مجموع داده نوفه دار انجام شده است که نتایج به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های نوفه دار گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در (شکل های ۱۱ و ۱۲) آورده شده است. نتایج به دست آمده از وارون سازی همزمان داده های نوفه دار گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در (شکل های ۱۳ و ۱۴) آورده شده است. همان طور که از نتایج قابل مشاهده است الگوریتم پایداری قابل قبولی در برابر نوفه از خود نشان داده است.

یک شبکه ۵۰*۵۰ متر نمونه برداری شده اند. از دیدگاه زمین شناسی ناحیه معدنی گل‌گهر به طور کامل در بخش جنوبی پهنه سهندج - سیرجان قرار گرفته است (شکل ۱۵). روند عمومی این زون شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد. زون سهندج - سیرجان باریکه‌ای از جنوب غرب ایران مرکزی است که در بلا فصل شمال شرق راندگی اصلی زاگرس قرار دارد. طول تقریبی این زون ۱۵۰۰ کیلومتر بوده که از غرب دریاچه ارومیه تا شرق بندرعباس (حوالی حاجی آباد) ادامه دارد. در این زون پدیده‌های دگرگونی، ماگماتیسم و فرایندهای تکتونیکی پی در پی بسیار زیاد است، از اینرو این زون را ناآرامترین پهنه زمین ساختاری ایران می‌دانند. این منطقه دارای ساختارهای پیچیده‌ای است و تاریخچه پرماجرایی را پشت سر گذاشته و به علت دگرگونی‌های متعددی که در آن اتفاق افتاده است سنیابی و ارتباط واحدها بسیار مشکل است.

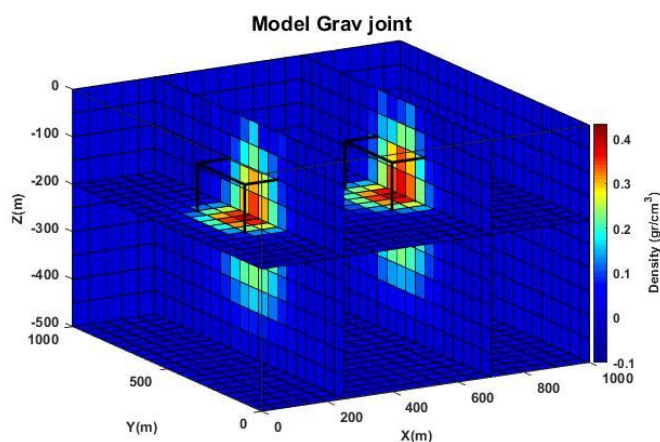


شکل ۱۵: موقعیت ناحیه معدنی گل‌گهر در زون ساختاری سهندج- سیرجان

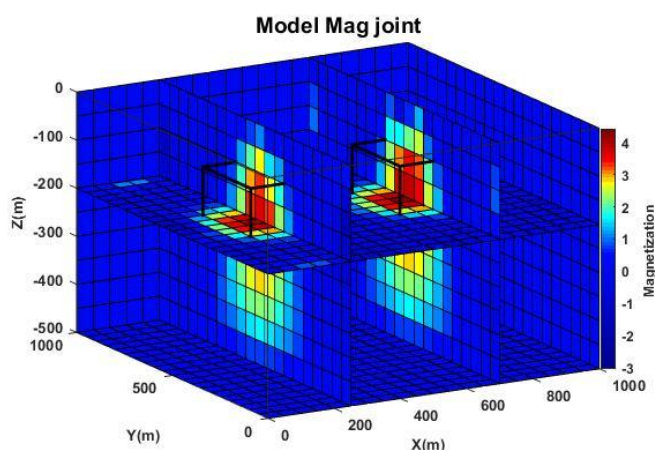
ناحیه معدنی گل‌گهر عموماً از آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده است و ارتفاعات معدودی که رخنمون دارند، شامل سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک در جنوب و جنوب غرب و سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و سنوزوئیک در شرق ناحیه می‌باشد. بررسی کانسنگ معدن ۲ در بخش-های رخنمون یافته نشان می‌دهد که ماده معدنی به صورت یک لایه شیب دار با شیب متغیر درجه به سمت جنوب و جنوب غرب و ضخامت متغیر (چند متر تا ۷۰ متر)، در زیر آبرفت‌های کواترنری و سنگ‌های دگرگونی رخساره شیبست سبز واقع شده است بررسی رخنمون‌های سنگ‌آهن در معدن ۲ نشان می‌دهد ماده معدنی در بخش بالایی توده به دلیل واکنش با آب‌های جوی و در نتیجه دگرسانی، در حواشی و مرز دانه‌ها به هماتیت تبدیل شده است (پدیده مارتیتی شدن پیشرفته). این قسمت از ماده معدنی که به نام بخش اکسیدی شناخته شده است، به دلیل فرایند لیچینگ محتوی گوگرد بسیار پایینی دارد. رنگ سنگ در این بخش به رنگ قرمز قهوه‌ای می‌باشد که در برخی موارد و در حاشیه های توده در اثر لیمونیتی شدن به رنگ زرد می‌باشد. این نوع ماده معدنی تا عمق حدود ۹۰ متری مشاهده شده است، اما از این پس مگنتیت‌های سیاه رنگ با رگه و رگچه‌های پیریت قابل مشاهده‌اند که



شکل ۱۲: مدل مغناطیسی به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های نوفه دار



شکل ۱۳: مدل گرانی به دست آمده از وارون سازی همزمان داده های نوفه دار



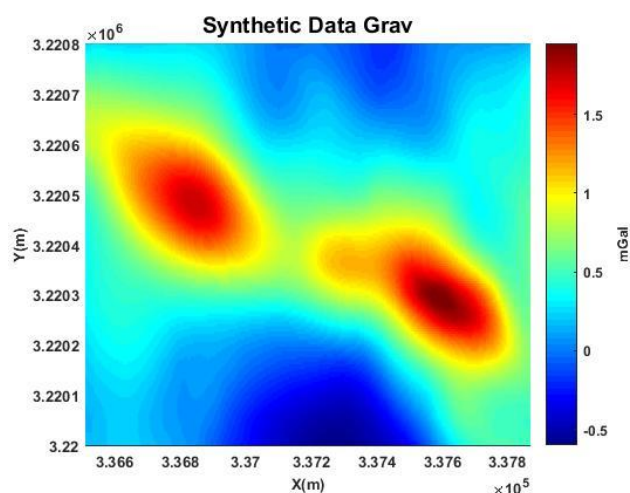
شکل ۱۴: مدل مغناطیسی به دست آمده از وارون سازی همزمان داده های نوفه دار

۴- وارون سازی سه بعدی داده‌های واقعی

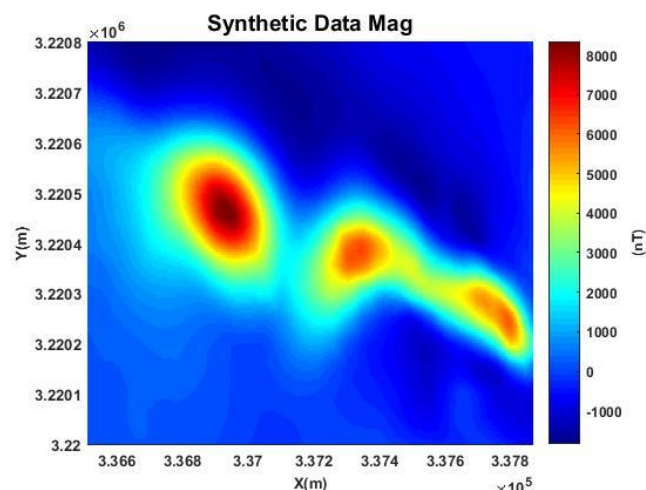
داده‌های واقعی مورد استفاده در این تحقیق مربوط به توده‌ی معدنی هماتیت مگنتیت در معدن ۲ گل‌گهر در کشور ایران است. داده ها در

بسته به میزان پیریت (یا به عبارت دقیق تر میزان سولفور) به دو نوع مگنتیت کم سولفور و مگنتیت پر سولفور تقسیم بندی شده است.

داده های نمونه برداری شده گرانی سنجی و مغناطیس سنجی با شبکه ۵۰ در ۵۰ متر در (شکل های ۱۶ و ۱۷) نشان داده شده است. مدل های به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در (شکل های ۱۸ و ۱۹) آورده شده است. نتایج به دست آمده از وارون سازی همزمان داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در (شکل های ۲۰ و ۲۱) آورده شده است. در وارون سازی جداگانه داده ها توده ها در یکدیگر ادغام شده اند، در حالی که مدل حاصل از وارون سازی همزمان گرادیان متقاطع تفکیک بهتری از توده ها را نشان می دهد. وارون سازی همزمان در مقایسه با وارون سازی جداگانه کارایی بهتری در تخمین عمق زیرین مدل ارائه می کند و مدل کاذب به دست آمده در عمق را کاملاً از بین می برد، همچنین مدل را در راستای X و Y کاملاً جمع می کند. در شکل ۲۲ یک برش در راستای $Y=3220450$ از مدل های وارون سازی جداگانه و همزمان داده های مغناطیس سنجی و گرانی سنجی آورده شده است و یک نقطه حفاری به عنوان نمونه بر روی مقطع برش داده شده نمایش داده شده است. تصویر (الف) مدل به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های گرانی سنجی و قسمت (ج) مدل به دست آمده از وارون سازی جداگانه داده های مغناطیس سنجی می باشد. قسمت های (ب) و (د) به ترتیب مدل گرانی و مدل مغناطیس به دست آمده از وارون سازی همزمان داده ها می باشد. همانطور که از در شکل ۲۲ قابل مشاهده است وارون سازی همزمان داده ها عملکرد بهتری نسبت به وارون سازی جداگانه داده ها داشته است و مدل در راستای X, Y و به ویژه در راستای Z کاملاً جمع شده است و با نقطه حفاری همخوانی بهتری دارد.

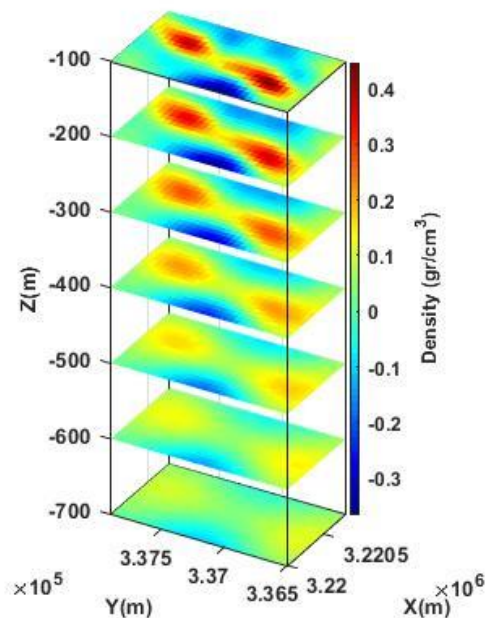


شکل ۱۶: داده های نمونه برداری شده گرانی سنجی

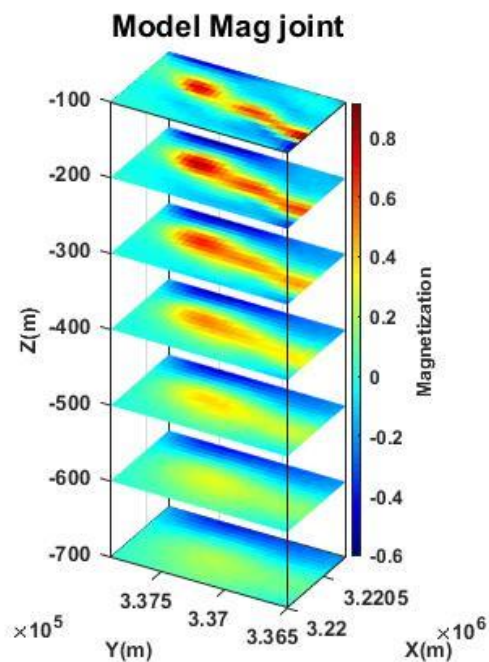


شکل ۱۷: داده های نمونه برداری شده مغناطیس سنجی

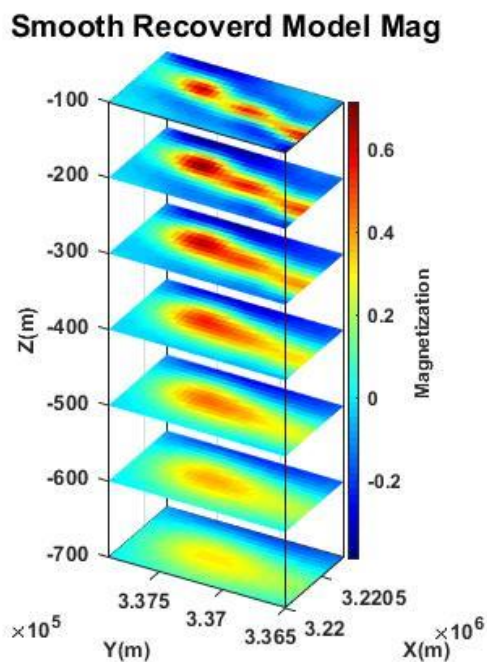
Smooth Recoverd Model Grav



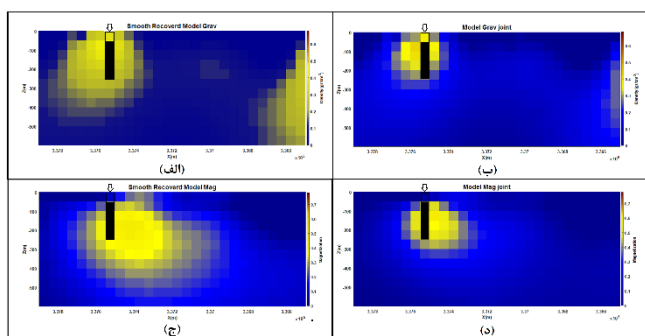
شکل ۱۸: مدل گرانی به دست آمده از وارون سازی جداگانه



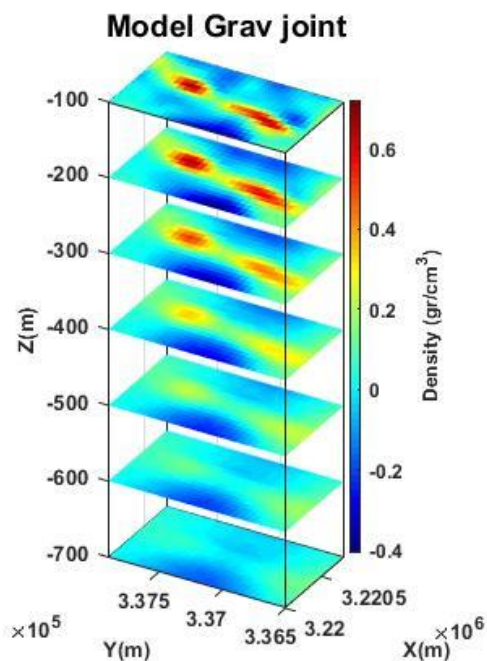
شکل ۲۱: مدل مغناطیسی به دست آمده از وارون سازی همزمان



شکل ۱۹: مدل مغناطیسی به دست آمده از وارون سازی جداگانه



شکل ۲۲: یک برش در راستای $Y=3220450$ از مدل های به دست آمده



شکل ۲۰: مدل گرانی به دست آمده از وارون سازی همزمان

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، وارون سازی همزمان سه بعدی داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی با استفاده از قید ضرب برداری گرادین ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ارزیابی و عملکرد این روش با استفاده از مجموعه ای از داده های مصنوعی و میدانی مورد سنجش قرار گرفته است. با توجه به مشکل اصلی در وارون سازی جداگانه داده های میدان پتانسیل که مدل به دست آمده در جهت های X, Y, Z کشیدگی دارند و مدل به دست آمده از نظر هندسی با مدل واقعی فاصله دارد، نتایج وارون سازی جداگانه مدل گرانی تا عمق حدود ۵۰۰ متر و مدل مغناطیسی تا عمق حدود ۶۰۰ متر را نشان می دهد، حال در وارون سازی همزمان این مشکل نسبتاً برطرف شده و مدل علاوه بر جمع شدن در راستاهای X, Y در راستای Z هم جمع شده و تا عمق حدود ۳۰۰ متر بالا کشیده شده است که با مدل واقعی و حفاری های منطقه همخوانی بهتری دارند. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می دهد که وارون سازی همزمان داده های میدان پتانسیل با استفاده از قید ضرب برداری گرادین ها کارایی

- Molodtsov, D. M., Troyan, V. N., Roslov, Y. V., & Zerilli, A. (2013). Joint inversion of seismic traveltimes and magnetotelluric data with a directed structural constraint. *Geophysical Prospecting*, 61(6), 1218-1228.
- Moorkamp, M., Heincke, B., Jegen, M., Roberts, A. W., & Hobbs, R. W. (2011). A framework for 3-D joint inversion of MT, gravity and seismic refraction data. *Geophysical Journal International*, 184(1), 477-493.
- Oldenburg, D. W., & Li, Y. (2005). Inversion for applied geophysics: A tutorial. *Near-surface geophysics*, 89-150.
- Oliver-Ocaño, F. M., Gallardo, L. A., Romo-Jones, J. M., & Pérez-Flores, M. A. (2019). Structure of the Cerro Prieto Pull-apart basin from joint inversion of gravity, magnetic and magnetotelluric data. *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103835.
- Saunders, J. H., Herwanger, J. V., Pain, C. C., Worthington, M. H., & De Oliveira, C. R. E. (2005). Constrained resistivity inversion using seismic data. *Geophysical Journal International*, 160(3), 785-796.
- Shi, B., Yu, P., Zhao, C., Zhang, L., & Yang, H. (2018). Linear correlation constrained joint inversion using squared cosine similarity of regional residual model vectors. *Geophysical Journal International*, 215(2), 1291-1307.
- Tavakoli, M., Kalateh, A. N., Rezaie, M., Gross, L., & Fedi, M. (2021). Sequential joint inversion of gravity and magnetic data via the cross-gradient constraint. *Geophysical Prospecting*, 69(7), 1542-1559.
- Vatankhah, S., Renaut, R. A., Huang, X., Mickus, K., & Gharloghi, M. (2022). Large-scale focusing joint inversion of gravity and magnetic data with Gramian constraint. *Geophysical Journal International*, 230(3), 1585-1611.
- Vernant, P., Masson, F., Bayer, R., & Paul, A. (2002). Sequential inversion of local earthquake traveltimes and gravity anomaly—The example of the western Alps. *Geophysical Journal International*, 150(1), 79-90.
- Wang, K. P., Tan, H. D., & Wang, T. (2017). 2D joint inversion of CSAMT and magnetic data based on cross-gradient theory. *Applied Geophysics*, 14, 279-290.
- Wang, X., Fang, J., & Hsu, H. (2011). Three-dimensional crustal density distribution beneath North China by sequential inversion of local earthquake traveltimes and gravity anomaly. *Earthquake Science*, 24(2), 135-141.
- Zhang, Y., & Wang, Y. (2020). Three-dimensional gravity-magnetic cross-gradient joint inversion based on structural coupling and a fast gradient method. *Journal of Computational Mathematics*, 758-777.
- Zhou, J., Xiu, C., & Zhang, X. (2015). Simultaneous structure-coupled joint inversion of gravity and magnetic data based on a damped least-squares technique. *International Journal of Geosciences*, 6(02), 172.
- بهتری در تخمین هندسه مدل و همچنین بازتولید خواص فیزیکی مدل دارد. به عبارت دیگر این روش می تواند در اعماق بیشتر تخمین دقیق تری از مقادیر پارامترهای مدل به دست آورد. این روش می تواند یکی از معایب اساسی در وارون سازی داده های میدان پتانسیل که به پایین کشیده شدن مدل و عدم تخمین مناسب از عمق پایینی است را برطرف کند.
- ۶: منابع
- Bennington, N. L., Zhang, H., Thurber, C. H., & Bedrosian, P. A. (2015). Joint inversion of seismic and magnetotelluric data in the Parkfield Region of California using the normalized cross-gradient constraint. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 1033-1052.
- Candansayar, M. E., & Tezkan, B. (2008). Two-dimensional joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 56(5), 737-749.
- Demirci, İ., Dikmen, Ü., & Candansayar, M. E. (2018). Two-dimensional joint inversion of Magnetotelluric and local earthquake data: Discussion on the contribution to the solution of deep subsurface structures. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 275, 56-68.
- Gallardo, L. A., & Meju, M. A. (2003). Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data. *Geophysical Research Letters*, 30(13).
- Gallardo, L. A., & Meju, M. A. (2004). Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3).
- Gallardo, L. A., & Meju, M. A. (2007). Joint two-dimensional cross-gradient imaging of magnetotelluric and seismic traveltime data for structural and lithological classification. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1261-1272.
- Gallardo, L. A., & Meju, M. A. (2011). Structure-coupled multiphysics imaging in geophysical sciences. *Reviews of Geophysics*, 49(1).
- Gross, L. (2019). Weighted cross-gradient function for joint inversion with the application to regional 3-D gravity and magnetic anomalies. *Geophysical Journal International*, 217(3), 2035-2046.
- Hansen, P. C. (2010). Discrete inverse problems: insight and algorithms. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Hu, W., Abubakar, A., & Habashy, T. M. (2009). Joint electromagnetic and seismic inversion using structural constraints. *Geophysics*, 74(6), R99-R109.
- Joulidehsar, F., Moradzadeh, A., & Doulati Ardejani, F. (2018). An improved 3D joint inversion method of potential field data using cross-gradient constraint and LSQR method. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 4389-4409.
- Menichetti, V., & Guillen, A. (1983). Simultaneous interactive magnetic and gravity inversion. *Geophysical Prospecting*, 31(6), 929-944.

