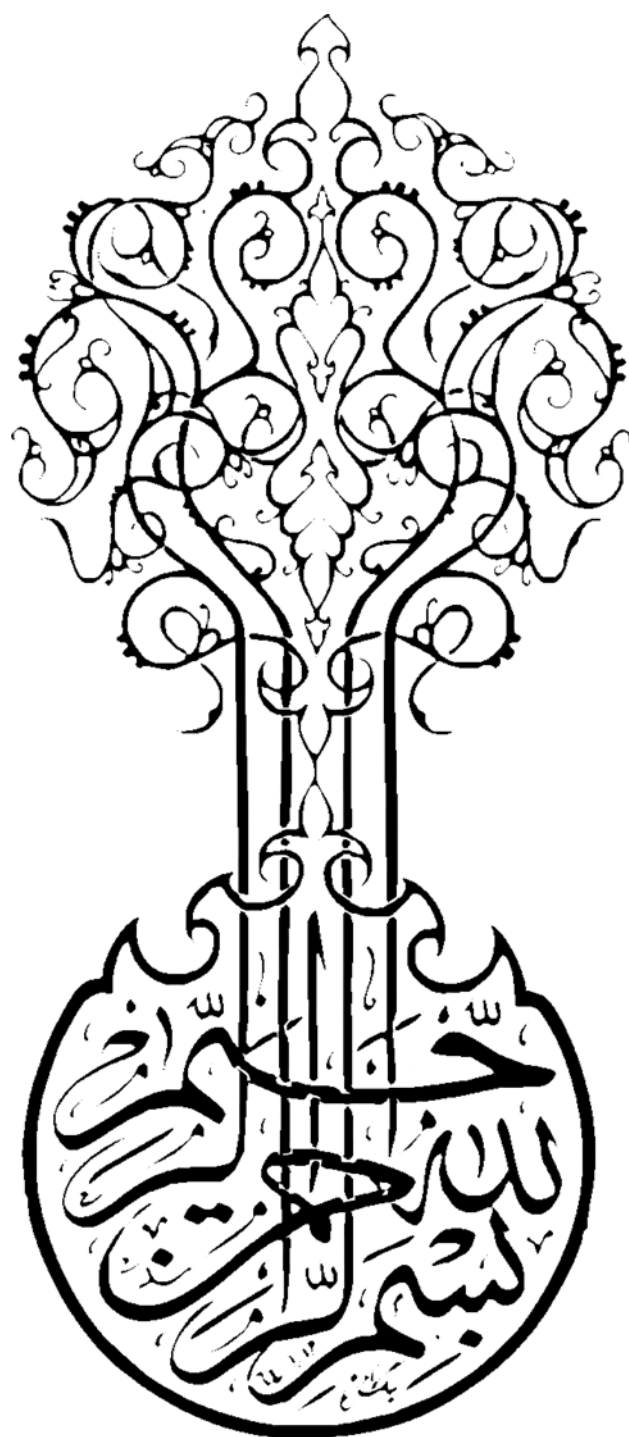






دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد گروه نفت و ژئوفیزیک

**مدل سازی وارون غیر خطی داده های میدان پتانسیل با استفاده از روش
منظم سازی تیخونوف، مطالعه موردی: شمال-غرب ایران منطقه اصلاندوز**

نگارنده

یاسر دهبان

استاد راهنما

دکتر علی نجاتی کلاته

استاد مشاور

دکتر محمد رضایی

شهریور ۹۷

تقدیم به

مقدس ترین و ارزیده‌اغت نامه دلم...

پدر و مادر مهربانم، که زندگی ام را بدون مهر و عطوفت آن‌ها می‌دانم

برادرانم، برادران همسگی و پشتوانه‌های زندگی ام

و همه کسانی که دوستان دارم...

تقدیر و تشکر

اکنون که باری خداوند موفّق به دفاع از پایان نامه‌ی خویش شدم بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌منت و خالصانه‌ی استاد و گران قدر جناب آقای دکتر علی نجفی کلانیه که راهنمایی این جانب را بر عهده

داشتند و استاد مشاورم جناب آقای دکتر محمد رضایی، کمال متشکر را بنمایم. از پدر و مادرم و تمامی اساتید و دوستانی که با الطاف صمیمانه‌ی خود طی این مسیر را بر من به‌وار کردند متشکر می‌نمایم. از زحمات داوران محترم

آقای دکتر حمید آقا جانی و آقای دکتر محمد رواد که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند و کمک به هر چه بهتر شدن این کار کردند، متشکر می‌کنم.

تعهد نامه

این جانب **یاسر دهبان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **ژئوفیزیک- ژئومغناطیس** دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی وارون غیرخطی داده های مغناطیس سنجی با استفاده از روش منظم سازی تیخونوف، مطالعه موردی: شمال-غرب ایران منطقه اصلاندوز تحت راهنمایی آقای دکتر علی نجاتی کلاته متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

هدف نهایی در روش‌های ژئوفیزیک تفسیر و تعیین خصوصیات ساختارهای زمین‌شناسی از روی داده‌های اندازه‌گیری شده است. معمولاً در روش‌های مدل‌سازی خصوصیات فیزیکی مانند چگالی یا خودپذیری مغناطیسی و خصوصیات هندسی مانند عمق مربوط به ساختار به‌عنوان پارامترهای مدل و اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان مفروضات (داده‌ها) تلقی می‌گردند. با توجه به وجود ساختارهای رسوبی فراوان در ایران که اغلب از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردارند (مانند تله‌های نفتی) مدل‌سازی سنگ‌بستر در تفسیرهای تکمیلی از داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در اختیار مفسر قرار دهد. حوضه‌های رسوبی به‌عنوان یکی از مکان‌های مستعد وجود منابع هیدروکربنی همیشه موردتوجه بوده‌اند و مطالعه هندسه سنگ‌بستر این حوضه‌ها همواره از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. در این پژوهش از مدل‌سازی وارون غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی جهت تعیین هندسه سنگ‌بستر استفاده می‌شود. برای حل مشکل عدم یکتایی و ناپایداری جواب از روش منظم‌سازی تیخونوف برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی استفاده شده است. در فرآیند مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی، یک سنگ‌بستر عموماً به‌وسیله یک سری منشورهای کنار هم چیده شده تقریب زده می‌شود و سپس ضخامت آن‌ها محاسبه می‌شود. به‌منظور نشان دادن کارایی روش، درک چگونگی کارایی روش و جزئیات مربوط به آن، ابتدا مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی بدون نوفه و نوفه دار صورت گرفته است. در پایان مدل‌سازی روی داده‌های گرانی‌سنجی منطقه‌ی چشایر انگلستان و داده‌های مغناطیس‌اصلاندوز ایران صورت گرفته است که نتایج به‌دست‌آمده با دیگر مطالعات و زمین‌شناسی منطقه همخوانی دارد. کلیه برنامه‌های مورد استفاده در این پژوهش توسط نگارنده در محیط نرم‌افزار MATLAB تهیه شده است.

کلمات کلیدی: گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، سنگ‌بستر، مدل‌سازی وارون، غیرخطی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

علمی پژوهشی: دهبان، ی.، نجاتی کلاته، ع.، رضایی، م.، (۱۳۹۷)، "مدل سازی دوبعدی غیرخطی سنگبستر برای اکتشاف منابع هیدروکربنی با استفاده از داده های گرانی منطقه کارلایل انگلستان"، نشریه پژوهش نفت.

علمی پژوهشی: دهبان، ی.، نجاتی کلاته، ع.، رضایی، م.، میرزایی، م.، (۱۳۹۷)، "تخمین و مدل سازی سه بعدی ضخامت رسوبات روی پی سنگ به منظور اکتشاف ذخایر هیدروکربور با استفاده از داده های ژئوفیزیکی"، نشریه پژوهش نفت. (در حال داوری)

فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- جایگاه روش‌های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در اکتشاف ذخایر هیدروکربوری ..	۳
۱-۲-۱- جایگاه گرانی سنجی	۳
۱-۲-۲- جایگاه مغناطیس سنجی	۴
۱-۳- مروری بر مطالعات انجام‌شده	۴
۱-۴- اهمیت و ضرورت تحقیق	۶
۱-۵- اهداف پایان‌نامه و روش تحقیق	۷
۱-۶- ساختار پایان‌نامه	۷
۲- فصل دوم: مفاهیم پایه مسائل وارون خطی و غیرخطی	۹
۲-۱- مقدمه	۱۰
۲-۲- فرمول‌بندی مسائل پیشرو و وارون ژئوفیزیکی	۱۱
۲-۳- میدان گرانی	۱۲
۲-۴- میدان مغناطیسی	۱۴
۲-۵- دسته‌بندی مسائل وارون از لحاظ روابط میان داده‌ها و پارامترهای مدل	۱۶
۲-۵-۱- مسائل وارون خطی	۱۶
۲-۵-۲- مسائل وارون غیرخطی	۱۷

۶-۲- دستة بندی مسائل وارون از لحاظ پارامترسازی و ابعاد مسائل وارون	۱۷
۶-۲-۱- مسائل فروبرآورد	۱۷
۶-۲-۲- مسائل فرابرآورد	۱۹
۷-۲- روش‌های حل مسائل وارون	۲۰
۷-۲-۱- مسائل وارون خطی	۲۰
۷-۲-۲- مسائل وارون غیرخطی	۲۱
۷-۲-۳- روش‌های تکرار	۲۲
۷-۲-۴- روش‌های خطی‌سازی	۲۷
۸-۲- نظریه وارون سازی داده‌ها	۳۲
۸-۲-۱- انتخاب بردارهای پایه	۳۴
۸-۲-۲- انتخاب پارامتر منظم سازی	۳۴
۳- فصل سوم: تئوری روش وارون‌سازی، الگوریتم و زیربرنامه‌های رایانه‌ای	۳۷
۳-۱- مقدمه	۳۸
۳-۲- مدل‌سازی وارون سه بعدی داده‌های گرانی‌سنجی	۳۸
۳-۳- مدل‌سازی وارون سه بعدی داده‌های مغناطیسی	۴۳
۴- فصل چهارم: مدل‌سازی وارون داده‌های مصنوعی گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی	۴۹
۴-۱- مقدمه	۵۰
۴-۲- مدل‌سازی وارون داده‌های مصنوعی گرانی‌سنجی	۵۰
۴-۲-۱- مدل‌سازی وارون داده‌های مصنوعی بدون نوفه گرانی‌سنجی	۵۱

۴-۲-۲-	مدل سازی وارون داده‌های مصنوعی همراه نوفه گرانی سنجی	۵۵
۴-۳-	مدل سازی وارون داده‌های مصنوعی مغناطیس سنجی	۵۹
۴-۳-۱-	مدل سازی وارون داده‌های مصنوعی بدون نوفه مغناطیس سنجی	۶۰
۴-۳-۲-	مدل سازی وارون داده‌های مصنوعی همراه نوفه مغناطیس سنجی	۶۶
۵-	فصل پنجم: مدل سازی وارون داده‌های واقعی گرانی سنجی و مغناطیس سنجی	۷۱
۵-۱-	مقدمه	۷۲
۵-۲-	مدل سازی وارون داده‌های واقعی گرانی سنجی	۷۲
۵-۲-۱-	زمین شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه	۷۲
۵-۲-۲-	نتایج مدل سازی داده‌های گرانی سنجی	۷۴
۵-۳-	مدل سازی وارون داده‌های واقعی مغناطیس سنجی	۷۹
۵-۳-۱-	زمین شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه	۷۹
۵-۳-۲-	نتایج مدل سازی داده‌های مغناطیس سنجی	۸۳
۶-	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات	۸۹
۶-۱-	نتیجه گیری و پیشنهادها	۹۰
	منابع و مأخذ	۹۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ توزیع چگالی در سه بعد با شکل دلخواه و نقطه مشاهده‌ای P ۱۳
- شکل ۲-۲ مقطع یک حوضه‌ی رسوبی که به وسیله بلوک‌های مستطیل شکل مدل‌سازی شده. ۲۳
- شکل ۳-۲ مدل سه بعدی استفاده شده در روش کوردل و هریسن ۲۵
- شکل ۴-۲ تقسیم گرانی بازماند به دو مولفه ۲۷
- شکل ۵-۲ تقریب یک منشا دوبعدی توسط منشوری نامتناهی با مقطع چندضلعی ۲۹
- شکل ۱-۳: نمایش مدل حوضه رسوبی توسط مجموعه‌ای از بلوک‌های راست گوشه. ۳۹
- شکل ۲-۳: الگوریتم برنامه وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی ۴۲
- شکل ۳-۳: الگوریتم برنامه وارون‌سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی ۴۶
- شکل ۱-۴: مدل مصنوعی سه‌بعدی داده‌شده به برنامه ۵۲
- شکل ۲-۴: داده‌های گرانی‌سنجی حاصل از مدل مصنوعی ۵۳
- شکل ۳-۴: داده‌های گرانی‌سنجی حاصل از وارون‌سازی بدون نوفه ۵۳
- شکل ۴-۴: مدل سه‌بعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی بدون نوفه ۵۴
- شکل ۵-۴: خطای RMS برای ۸ تکرار متوالی برای داده‌های گرانی‌سنجی بدون نوفه ۵۵
- شکل ۶-۴: برازش بین داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه‌شده از وارون‌سازی بدون نوفه ۵۵
- شکل ۷-۴: داده‌های گرانی‌سنجی حاصل از مدل مصنوعی با ۵ درصد نوفه ۵۷
- شکل ۸-۴: داده‌های گرانی‌سنجی حاصل از وارون‌سازی با ۵ درصد نوفه. ۵۷
- شکل ۹-۴: مدل سه‌بعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی با ۵ درصد نوفه ۵۸
- شکل ۱۰-۴: خطای RMS برای ۷ تکرار متوالی با ۵ درصد نوفه برای داده‌های گرانی‌سنجی. ۵۹
- شکل ۱۱-۴: برازش بین داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه‌شده از وارون‌سازی با ۵ درصد نوفه ۵۹
- شکل ۱۲-۴: مدل مصنوعی سه‌بعدی داده‌شده به برنامه ۶۲

- شکل ۴-۱۳: داده‌های مغناطیس‌سنجی حاصل از مدل مصنوعی ۶۳
- شکل ۴-۱۴: داده‌های مغناطیس‌سنجی حاصل از وارون‌سازی بدون نوفه ۶۳
- شکل ۴-۱۵: مدل سه‌بعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی بدون نوفه ۶۴
- شکل ۴-۱۶: خطای RMS برای ۸۰ تکرار متوالی با بدون برای داده‌های مغناطیس ۶۵
- شکل ۴-۱۷: برازش بین داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه‌شده از وارون‌سازی بدون نوفه ۶۵
- شکل ۴-۱۸: داده‌های مغناطیس‌سنجی حاصل از مدل مصنوعی با ۵ درصد نوفه ۶۷
- شکل ۴-۱۹: داده‌های مغناطیس‌سنجی حاصل از وارون‌سازی با ۵ درصد نوفه ۶۷
- شکل ۴-۲۰: مدل سه‌بعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی با ۵ درصد نوفه .. ۶۸
- شکل ۴-۲۱: خطای RMS برای ۷۰ تکرار متوالی با ۵ درصد نوفه برای داده‌های مغناطیسی ... ۶۹
- شکل ۴-۲۲: برازش بین داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه‌شده از وارون‌سازی با ۵ درصد نوفه ۶۹
- شکل ۵-۱: نقشه زمین‌شناسی چشایر انگلستان ۷۳
- شکل ۵-۲: نقشه گرانی بوگه مربوط به محدوده مورد مطالعه جهت انجام وارون‌سازی ۷۴
- شکل ۵-۳: اطلاعات حفاری در نقطه P ۷۵
- شکل ۵-۴: داده‌های گرانی‌سنجی حاصل از وارون‌سازی ۷۶
- شکل ۵-۵: مدل سه‌بعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌های واقعی گرانی‌سنجی ۷۷
- شکل ۵-۶: خطای RMS برای ۷ تکرار متوالی برای داده‌های واقعی گرانی‌سنجی ۷۸
- شکل ۵-۷: برازش بین داده‌های واقعی و داده‌های محاسبه‌شده از وارون‌سازی ۷۸
- شکل ۵-۸: نقشه زمین‌شناسی منطقه اصلاندوز ۸۱
- شکل ۵-۹: راهنمای نقشه زمین‌شناسی اصلاندوز ۸۲
- شکل ۵-۱۰: نقشه مغناطیس مربوط به محدوده مورد مطالعه جهت انجام وارون‌سازی ۸۳
- شکل ۵-۱۱: یک مقطع زمین‌شناسی شماتیکی در منطقه مورد مطالعه ۸۴
- شکل ۵-۱۲: داده‌های مغناطیس‌سنجی حاصل از وارون‌سازی ۸۵

شکل ۵-۱۳: مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی داده های واقعی مغناطیس سنجی ۸۶

شکل ۵-۱۴: خطای RMS برای ۱۲۰ تکرار متوالی برای داده های واقعی مغناطیس سنجی ۸۷

شکل ۵-۱۵: برازش بین داده های واقعی و داده های محاسبه شده از وارون سازی ۸۷

فهرست جداول

جدول ۵-۱: مقایسه بین حفاری صورت گرفته در منطقه و عمق به دست آمده ۷۹

۱- فصل اول:

کلیات

هدف نهایی در روش‌های ژئوفیزیک تفسیر و تعیین خصوصیات ساختارهای زمین‌شناسی از روی داده‌های اندازه‌گیری شده است. معمولاً در روش‌های مدل‌سازی خصوصیات فیزیکی مانند چگالی یا خودپذیری مغناطیسی و خصوصیات هندسی مانند عمق مربوط به ساختار به‌عنوان پارامترهای مدل و اندازه‌گیری-های ژئوفیزیکی به‌عنوان مفروضات (داده‌ها)، تلقی می‌گردند. مدل‌سازی وارون^۱، یکی از جالب‌ترین ابزارهای عددی به‌منظور به دست آوردن تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی از ساختارهای زمین‌شناسی است. حوضه‌های رسوبی به‌عنوان یکی از مکان‌های مستعد وجود منابع هیدروکربنی همیشه مورد توجه بوده‌اند و مطالعه هندسه سنگ‌بستر این حوضه‌ها همواره از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. مدل‌سازی سنگ‌بستر به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است که از جمله روش‌های مدل‌سازی وارون غیرخطی هستند. مسائل ژئوفیزیکی بیشتر حالت فرابرآورد^۲ هستند و باعث می‌شود مسائل وارون‌سازی بدخیم^۳ شوند و منجر به مسائل بد وضع^۴ می‌شوند که جواب آن نیاز به استراتژی منظم‌سازی^۵ دارد. به‌وسیله روش‌های منظم‌سازی می‌توان تقریبی از جواب هر معادله بد وضع را به دست آورد که پایدار نیز باشد. روش‌های منظم‌سازی شامل منظم‌سازی تیخونوف، تجزیه مقادیر تکین (SVD)، تجزیه مقادیر تکین قطع‌شده (TSVD)، تجزیه مقادیر تکین تعمیم‌یافته قطع‌شده (TGSVD) و ... می‌باشد [Li and Oldenburg, 2005]. برای رسیدن به یک جواب پایدار، به مقدار مناسب یک پارامتر که آن را پارامتر منظم‌سازی می‌نامند نیاز است. یکی از روش‌های حل دستگاه‌های معادلات بد وضع، روش تیخونوف بوده که معمول‌ترین روش در منظم‌سازی مسائل وارون‌سازی محسوب می‌گردد. این روش زمانی به کار می‌رود که اطلاعات یا فرض اولیه‌ای از مجهولات در اختیار باشد. در روش تیخونوف^۶، فرض

^۱ Inverse modeling

^۲ under determined

^۳ ill-posed

^۴ ill-condition

^۵ Regularization

^۶ Tikhonov

بر تصادفی بودن خطای مشاهدات و نرمال بودن تابع توزیع احتمال خطاها است [Tikhonov, 1963]. در این مطالعه از مدل سازی وارون غیرخطی داده های میدان پتانسیل جهت مدل سازی توده های زیرسطحی استفاده می شود. در مدل سازی های غیرخطی پارامترهای فیزیکی مدل ثابت در نظر گرفته شده (چگالی^۱، خودپذیری^۲ و...) و پارامترهای هندسی مدل متغیر در نظر گرفته می شود. در این فرآیند مدل سازی توده زیرسطحی عموماً به وسیله یک سری از بلوک های راست گوشه کنار هم چیده شده، مدل شده و سپس ضخامت آن ها محاسبه می شود. در ابتدا با استفاده از ابزار ریاضی سری تیلور مسئله غیرخطی به یک مسئله خطی در نزدیکی مدل اولیه تبدیل می شود و سپس با استفاده از تکنیک های وارون سازی مدل سازی انجام می شود.

۱-۲- جایگاه روش های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در اکتشاف ذخایر

هیدروکربوری

۱-۲-۱- جایگاه گرانی سنجی

روش گرانی سنجی در ابتدا برای مکان یابی گنبد های نمکی در آمریکا و مکزیک و بعدها برای یافتن ساختارهای زمین شناسی زیرسطحی از جمله طاق دیس ها در جنوب غرب آمریکا به کار گرفته است. امروزه نیز روش گرانی سنجی در شناسایی انواع ساختارهای زیرسطحی که در تله انداختن مواد هیدروکربوری سهمی دارند به کار برده می شود. اختلاف زیاد چگالی بین این ساختارهای زیرسطحی و تشکیلات اطراف منجر به شناسایی آن ها به وسیله روش گرانی سنجی می شود به طوری که در بعضی موارد تنها به وسیله این روش می توان محل حفاری ها را تعیین کرد [Dobrin and Savit, 1988].

در اکتشاف نفت در یک منطقه که هیچ نوع اطلاعات زمین شناسی از آن موجود نیست اولین سؤالی که مطرح می شود این است که آیا حوضه رسوبی به اندازه کافی بزرگ و ضخیم است یا نه؟ اگر شرایط

^۱ Density

^۲ Susceptibility

زمین‌شناسی مناسب باشد به وسیله روش گرانی‌سنجی با سرعت نسبتاً زیاد و هزینه کم می‌توان اطلاعات مفیدی را در این مورد به دست آورد. چگالی اغلب سنگ‌های رسوبی کمتر از پی‌سنگ می‌باشد؛ بنابراین به کمک روش گرانی‌سنجی می‌توان مرز بین آن‌ها و در نتیجه ضخامت کل سنگ‌های رسوبی را مشخص کرد. روش گرانی‌سنجی را معمولاً می‌توان در کنار روش‌های لرزه‌ای با هزینه‌ای جزئی انجام داد. ترکیب اطلاعات حاصل از کارهای لرزه‌ای و گرانی‌سنجی می‌تواند در تعیین وضعیت و موقعیت ساختارهای زمین‌شناسی موردنظر بسیار مفید واقع شود [Dobrin and Savit, 1988].

۱-۲-۲- جایگاه مغناطیس‌سنجی

قدیمی‌ترین شاخه ژئوفیزیک مغناطیس‌سنجی می‌باشد و عملاً سرآغازی بر ژئوفیزیک کاربردی است. اندازه‌گیری‌های صحرایی این روش در مقایسه با اغلب روش‌های ژئوفیزیکی راحت‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر بوده و در مقیاس اکتشافی (مقیاس کوچک) نیاز به اعمال تصحیح در داده‌ها نیست. در اکتشاف نفت و گاز در مناطقی که کارهای اکتشافی قبلی در آن صورت نگرفته به وسیله روش مغناطیس‌سنجی می‌توان عمق سنگ‌بستر (اغلب سنگ‌بستر از نوع سنگ‌های آذرین هستند) را تعیین کرد. به عبارت دیگر حداقل در مرحله شناسایی یک برنامه اکتشاف هیدروکربوری بدون کاربرد روش مغناطیسی در آن به‌سختی قابل قبول است.

۱-۳- مروری بر مطالعات انجام‌شده

ایده روش زیرفضا، تقریباً به‌طور هم‌زمان، توسط فیلیپس^۱ (۱۹۶۲) و تیخونوف^۲ (۱۹۶۳) ارائه گردید. تیخونوف و گلاسکو^۳ (۱۹۶۵) به معرفی ایده اصلی استفاده از روش تیخونوف پرداختند که می‌توان آن را کمینه کردن یک تابع F دانست که این کار در نهایت با تعیین دو تابع $misfit$ و تابع مدل کامل شد.

^۱ Phillips

^۲ Tikhonov

^۳ Glasko

سمبریج^۱ در سال (۱۹۹۰) روش زیرفضا را برای وارون‌سازی داده‌های حجیم زلزله و لرزه در استرالیا برای تعیین سرعت زیرسطحی پوسته بکار گرفته است؛ که در مسئله وارون‌سازی با تعریف قیدهای مناسب مسئله وارون‌سازی به یک مدل معقول زمین‌شناسی منجر گردیده است. اولدنبورگ و همکاران^۲ (۱۹۹۳) یک روش پایدار و قابل‌انعطاف و الگوریتم کارا برای حل مسائل حجیم معرفی کردند. مسئله وارون‌سازی در فضای کوچک‌تر از فضای اصلی پارامترهای مدل، طی دوره‌های متوالی تکرار صورت می‌گیرد. از آنجاکه وارون‌سازی ماتریس در فضای کوچک صورت می‌گیرد نسبت به نطفه بسیار پایدار است. کخ^۳ (۲۰۰۲) به توسعه روش تکرارشونده برای برآورد هم‌زمان از مؤلفه‌های انحراف معیار و پارامتر منظم‌سازی پرداخت. اسحاق^۴ (۲۰۰۹) با استفاده از روش انتگرال وارون به بازسازی آنومالی‌های ناشی از مؤلفه‌های تانسوری گرانی پرداخت. ژئو^۵ (۲۰۰۹) با استفاده از روشی بر پایه GCV برای برآورد هم‌زمان از مؤلفه‌های انحراف معیار و منظم‌سازی از سیستم معادلات پرداخت. نجاتی کلاته و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند با توجه به حساسیت وارون‌سازی به استفاده داده‌های مغناطیسی و نطفه زیاد همراه آن‌ها، لزوم به‌کارگیری روش‌های وارون‌سازی ساخت‌یافته مانند زیرفضا که توانایی زیادی در وارون‌سازی داده‌های نطفه‌ای دارند در وارون‌سازی این‌گونه داده‌ها ضروری به نظر می‌رسد. سیلوا^۶ (۲۰۱۰) به محاسبه امتداد سنگ‌بستر در اکتشافات نفت و گاز برای یافتن محل تله‌های چینه‌شناسی با داده‌های میدان پتانسیل پرداخت. گوان^۷ (۲۰۱۶) به مطالعه سنگ‌بستر دریا‌های شرق و جنوب چین با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی پرداخت. کنستانتینو^۸ و همکاران (۲۰۱۷) با داده‌های گرانی‌سنجی به مطالعه سنگ‌بستر جنوب آتلانتیک^۹ پرداختند. متولی و همکاران (۱۳۸۶)، متشرعی و همکاران (۱۳۸۶) با

^۱ Sambridge

^۲ Oldenburg

^۳ Koch

^۴ Eshagh

^۵ Zhou

^۶ Silva

^۷ Guan

^۸ Constantino

^۹ Atlantic

استفاده از روش گرانی سنجی در منطقه جنوب زاگرس و نجاتی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از روش مارکوارت-لونبرگ در منطقه مغان به مطالعه و مدل سازی سنگ بستر پرداختند.

۱-۴- اهمیت و ضرورت تحقیق

در وارون سازی داده های میدان پتانسیل دو مشکل عدم یکتایی^۱ جواب و پایدار سازی آن چالش برانگیز است. وقتی تعداد پارامترهای مدل بیشتر از تعداد داده ها باشد، در اصطلاح گفته می شود که مسئله فرا بر آورد است؛ بنابراین از لحاظ جبری بی نهایت جواب می توان به دست آورد. علاوه بر عدم یکتایی شدید، باید عدم پایداری جواب را نیز در نظر گرفت که ناشی از بد وضع بودن^۲ ماتریس کرنل و وجود نوفه در داده ها است؛ بنابراین حاصل شدن جوابی که از دیدگاه زمین شناسی قابل قبول باشد و هم زمان به نوفه موجود در داده ها حساسیت بسیار کمی داشته باشد، نیازمند منظم سازی^۳ جواب است. در این حالت تابع هدفی مرکب از دو عبارت عدم انطباق داده ها^۴ و عبارت تنظیم^۵ جایگزین مسئله اولیه شده و جواب از کمینه کردن این تابع هدف حاصل می شود. عبارت تنظیم چندین کاربرد دارد، در گام نخست اندازه پارامترهای مدل را محدود می کند و از تغییرات بزرگ و غیر واقعی در جواب جلوگیری می شود، در گام بعدی مشخصات خاصی که برای مدل مورد نظرند در این عبارت وارد می شود، این ویژگی ها را می توان از اطلاعات زمین شناسی و دیگر اطلاعات موجود در منطقه به دست آورد. یا اینکه بر اساس مفروضاتی درباره مدل مورد جستجو طراحی کرد. با توجه به وجود ساختارهای رسوبی فراوان در ایران که اغلب از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردارند (مانند تله های نفتی) مدل سازی وارون در تفسیرهای تکمیلی از داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی می تواند اطلاعات ارزشمندی در اختیار مفسر قرار دهد.

^۱ non-uniqueness

^۲ ill-condition

^۳ regularization

^۴ data misfit

^۵ regularization term

۱-۵- اهداف پایان نامه و روش تحقیق

هدف از این مطالعه انجام وارون سازی سه بعدی داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی و ارائه راهکاری که بتواند به طور هم زمان مدل سازی سه لایه جهت تعیین عمق سنگ بستر را انجام دهد. برای انجام این کار ابتدا زیر برنامه های مختلف نگاشته شد در برنامه های وارون سازی محدودی مورد مطالعه با توجه به نوع وارون سازی به شبکه ای منظم از توده های منشوری سه بعدی تقسیم شده و با استفاده از یک مدل اولیه و با یک فرآیند تکراری عمق هر یک از منشورها به دست می آید و توزیع هندسی مجموعه ای این منشورها شکل سنگ بستر را تعیین می نماید. برای ارزیابی میزان کارآمد بودن الگوریتم و برنامه های رایانه ای ارائه شده از این روش برای مدل سازی داده های مصنوعی بدون نوفه و همراه با نوفه استفاده شده است.

۱-۶- ساختار پایان نامه

این پایان نامه شامل شش فصل می باشد. در فصل اول همان طور که ملاحظه شد کلیاتی در مورد جایگاه روش های میدان پتانسیل و اهداف پایان نامه شرح داده شده است. در فصل دوم اصول و فرمول بندی مسائل وارون مطرح شده است. در فصل سوم الگوریتم و زیر برنامه های نگاشته شده معرفی شده اند. در فصل چهارم به منظور نشان دادن کارایی الگوریتم و برنامه های رایانه ای ارائه شده که قسمت اصلی این تحقیق است وارون سازی داده های مصنوعی انجام شده است. در فصل پنجم وارون سازی داده های واقعی صورت گرفته است و در فصل ششم که فصل انتهایی این پایان نامه هست نتیجه گیری و پیشنهادهایی از این تحقیق به طور خلاصه ارائه شده است.

۲- فصل دوم:

مفاهیم پایه مسائل وارون خطی و غیر خطی

روش‌های ژئوفیزیکی بر اساس مطالعه خصوصیات میدان‌های فیزیکی قابل انتشار در داخل زمین بنیان نهاده شده‌اند که مهم‌ترین این میدان‌ها عبارت‌اند از گرانی، مغناطیسی، الکترومغناطیسی و میدان‌های موجی لرزه‌ای. مقادیر مشاهده‌ای مربوط به هر یک از این میدان‌ها بستگی به ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های دربرگیرنده منطقه مورد مطالعه دارد. روش متداول در تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی حاصل مشتمل بر ساخت مدل‌های زمین‌شناسی مصنوعی مختلف و مقایسه داده‌های نظری به دست آمده از این مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده است. بر این پایه، مدل‌سازی عددی داده‌های ژئوفیزیکی به ازای پارامترهای یک مدل فرضی اصطلاحاً مسئله پیشرو^۱ نامیده می‌شود. بنابراین حل یک مسئله پیشرو امکان پیش‌بینی داده‌های ژئوفیزیکی را با دانستن ساختارهای زمین‌شناسی مفروض، فراهم می‌سازد. هدف نهایی روش‌های مختلف ژئوفیزیکی تعیین خصوصیات ساختارهای زمین‌شناسی از روی داده‌های به دست آمده است. به خاطر پیچیدگی ساختارهای درون زمین دستیابی به این امر بسیار مشکل می‌باشد. در این راستا، روش معمول شامل تقریب ساختار زمین‌شناسی مربوطه با مدل‌های ریاضی ساده و سعی در تعیین پارامترهای این مدل فرضی از روی داده‌های حاصل شده است، به این گونه مسائل اصطلاحاً مسائل وارون^۲ اطلاق می‌گردد. در این روش، موفقیت تفسیر ژئوفیزیکی به دست آمده به توانایی در تقریب ساختارهای زمین‌شناسی با مدل‌های منطقی و نیز راهکار مؤثر ارائه شده برای حل مسئله وارون مورد نظر، بستگی دارد.

در این فصل به فرمول‌بندی مسائل پیشرو، مسائل وارون و انواع روش‌های حل آن‌ها پرداخته می‌شود.

^۱ Forward problem

^۲ Inverse problem

۲-۲- فرمول بندی مسائل پیشرو و وارون ژئوفیزیکی

اغلب روندهای پردازش و تفسیر داده‌ها در ژئوفیزیک را می‌توان توسط عملگرهای ریاضی توصیف کرد.

تعاریف عمومی این مسائل را می‌توان به صورت الگووار توسط نمودارهای زیر بیان کرد:

در مسائل پیشرو: مدل (پارامترهای مدل m) $\longrightarrow$ داده‌ها d

در مسائل وارون: داده‌ها d $\longrightarrow$ مدل (پارامترهای مدل m)

به طور کلی هر رابطه ژئوفیزیکی را می‌توان به شکل زیر نوشت [Lelievre and Oldenburg, 2006]:

$$d = Gm \quad (1-2)$$

که در رابطه (۱-۲) d بردار داده‌ها^۱ است، m بردار پارامترهای مدل^۲ بوده و G ماتریس کرنل^۳ یا ماتریس حساسیت نامیده می‌شود که رابطه هندسی بین بردار داده‌ها و بردار پارامترهای مدل را بیان می‌کند [Li and Oldenburg, 1998].

در اغلب مسائل وارون ژئوفیزیکی توصیفی از داده‌ها به عنوان اولین گام برای فرمول بندی مسئله محسوب می‌شود. داده‌ها مجموعه‌ای از مقادیر عددی هستند که به صورت یک بردار به طول N (تعداد داده‌ها) نمایش داده می‌شود. به صورت مشابه پارامترهای مدل هم به صورت یک بردار به طول M (تعداد پارامترهای مدل) نمایش داده می‌شود [Menke, 1989].

$$d = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ \dots \ d_N]^T \quad (2-2)$$

$$m = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ \dots \ m_M]^T \quad (3-2)$$

نماد T بیانگر بردار یا ماتریس ترانپوز^۴ است. مفهوم بنیادی یک مسئله وارون رابطه هندسی میان

^۱ Data

^۲ Model parameters

^۳ Kernel matrix

^۴ Transpose

داده‌ها و پارامترهای مدل است، این رابطه همان مدل یا ماتریس کرنل نامیده می‌شود. معمولاً مدل یک یا چند فرمول است که انتظار داریم داده‌ها و پارامترهای مدل از آن پیروی کنند. در مورد بسیاری از مسائل واقعی داده‌ها و پارامترهای مدل توسط روابط پیچیده‌ای به یکدیگر مرتبط هستند. در حالت کلی داده‌ها و پارامترهای مدل توسط یک یا چند رابطه به هم مربوط هستند [Menke, 1989].

به‌طور کلی مسائل وارون به دودسته مسائل وارون غیرخطی^۱ و مسائل وارون خطی^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. در مسائل وارون غیرخطی هدف مدل کردن پارامترهای هندسی مدل می‌باشد که رابطه بین پارامترهای هندسی مدل و داده‌ها یک رابطه غیرخطی بوده، بنابراین این گونه مدل‌سازی‌ها را مدل‌سازی وارون غیرخطی نامیده‌اند. در مسائل وارون خطی هدف مدل کردن پارامترهای فیزیکی مدل می‌باشد که رابطه بین پارامترهای فیزیکی مدل و داده‌ها یک رابطه خطی بوده و این گونه مدل‌سازی‌ها، مدل‌سازی وارون خطی نامیده شده‌اند. در مسائل وارون غیرخطی می‌توان با استفاده از روش‌های بسط تیلور، گرادیان و غیره رابطه بین پارامترهای مدل و داده‌ها را به‌صورت خطی تبدیل کرد.

۳-۲- میدان گرانی

نیروی گرانی زمین که با قانون نیوتون بیان می‌شود، مبانی اکتشاف گرانی‌سنجی می‌باشد. این نیرو به‌صورت زیر نشان داده می‌شود [Blakely, 1996]:

$$\vec{F} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{r}_1 \quad (۴-۲)$$

که در رابطه (۴-۲) $\vec{F}$ نیروی وارد بر m_1 ، $\vec{r}_1$ بردار واحد در راستای m_1 به m_2 ، r فاصله‌ی بین m_1 و m_2 و γ ثابت جهانی گرانش می‌باشد. اما آنچه به‌وسیله دستگاه‌های گرانی‌سنجی اندازه‌گیری می‌شود، شتاب گرانی زمین می‌باشد [Blakely, 1996].

^۱ Linear inverse problems

^۲ Non-linear inverse problems

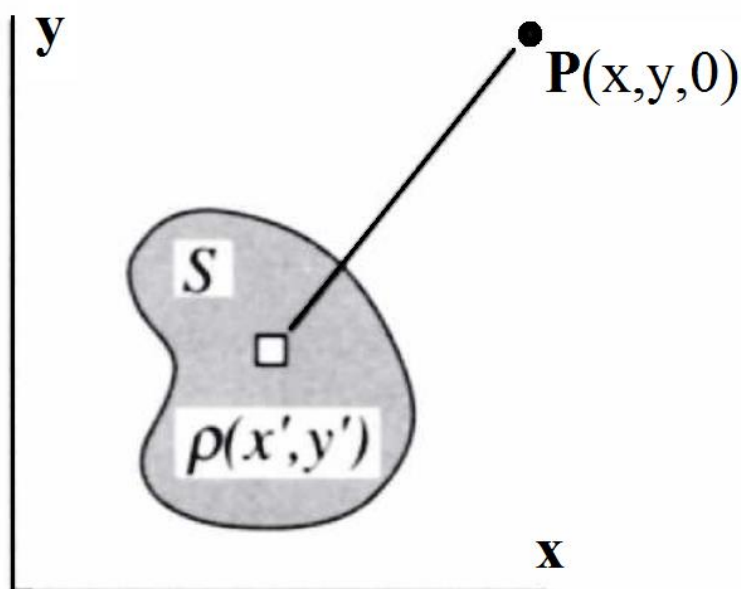
$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m_2} = -\gamma \frac{M_e}{R_e^2} \vec{r}_1 \quad (5-2)$$

که M_e و R_e به ترتیب جرم و شعاع زمین می‌باشد. واحد شتاب گرانی در سیستم CGS، cm/sec^2 می‌باشد که به افتخار گالیله، گال (gal) نامیده می‌شود.

با استفاده از شکل (۱-۲) پتانسیل گرانی ($u(p)$) و میدان وابسته به آن ($g(p)$) در نقطه مربوط به توزیع چگالی (ρ) از رابطه زیر به دست می‌آید [Blakely, 1996].

$$U(P) = \gamma \int_R \frac{\rho}{r} dv \quad (6-2)$$

$$g(P) = \nabla U = -\gamma \int_R \frac{\rho}{r^2} dv \quad (7-2)$$



شکل ۱-۲ توزیع چگالی در سه بعد با شکل دلخواه و نقطه مشاهده‌ای P [Blakely, 1996].

دستگاه مختصات استفاده شده به طور معمول سیستم مختصات راست گرد است و محور z به سمت پایین مثبت انتخاب شده است. گرانی‌سنج‌ها مؤلفه عمودی شتاب را اندازه‌گیری می‌کنند [Blakely, 1996]

$$g(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial z} = -\gamma \int_{x'} \int_{y'} \int_{z'} \rho(x', y', z') \frac{(z-z')}{r^3} dx' dy' dz' \quad (8-2)$$

که در رابطه بالا است $r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$ و رابطه (۸-۲) را در حالت کلی می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$g(x, y, z) = \int_{x'} \int_{y'} \int_{z'} \rho(x', y', z') \Psi(x - x', y - y', z - z') dx' dy' dz' \quad (9-2)$$

که در آن

$$\Psi = -\gamma \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (10-2)$$

که بنا به مفاهیم تئوری پتانسیل تابع گرین نامیده می‌شود. در حل مسئله مستقیم بی‌هنجاری گرانی را می‌توان با استفاده از رابطه (۸-۲) محاسبه کرد.

۲-۴- میدان مغناطیسی

شیوه دیگر در روش‌های ژئوفیزیکی یعنی کاوش‌های مغناطیسی، بر پایه اندازه‌گیری میدان مغناطیسی بی‌هنجار که با تغییرات مغناطیدگی زمین در رابطه بوده، بنانهاده شده است. خواص مغناطیسی سنگ‌ها دارای محدوده تغییرات وسیعی است. کانی‌های مغناطیسی توسط برداری موسوم به I (شدت مغناطیدگی) معرفی می‌گردند که با میدان‌های مغناطیسی خارجی (H_A) به صورت ذیل در رابطه است [Blakely, 1996]:

$$I = \chi_m H_A \quad (11-2)$$

که در این معادله χ_m خودپذیری^۱ مغناطیسی می‌باشد. همان‌طور که از قبل دانسته می‌شود، خودپذیری کانی‌های دیامغناطیس^۲ منفی و در کانی‌های پارامغناطیس^۳ این خاصیت مثبت فرض می‌گردد. به عبارتی دیگر، در کانی‌های دیامغناطیس میدان مغناطیسی القائی^۴ باعث کاهش میدان اعمالی

^۱ Susceptibility

^۲ Diamagnetic

^۳ Paramagnetic

^۴ Induced magnetic

خارجی شده درحالی که در کانی‌های پارامغناطیس این میدان باعث افزایش برآیند دو میدان می‌گردد. بیشتر کانی‌های موجود در طبیعت رفتاری شبیه به دیامغناطیس و پارامغناطیس‌ها دارند، این رفتارها تا حدود زیادی بستگی به وضعیت چرخش الکترون‌های درون اتم‌های مختلف دارد که باعث قرارگیری آن‌ها در جهت و یا خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی به کاربرده شده می‌گردد و این میدان می‌تواند میدان مغناطیسی زمین باشد. تعداد کمی از کانی‌های موجود در طبیعت فرومغناطیس^۱ هستند که این کانی‌ها دارای یک قطبش مغناطیسی چگال بوده و این رفتار زمانی واقع می‌شود که گروه‌های بزرگی از اتم‌ها که حوزه‌های مغناطیسی را تشکیل می‌دهند در یک جهت ذاتی قرارگرفته باشند و باعث افزایش میدان مغناطیسی خارجی گردند. مهم‌ترین این کانی‌ها، مگنتیت^۲ بوده و معمولاً در بیشتر موارد خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها با محتوای مگنتیت آن‌ها سنجیده می‌شود. خودپذیری کانی‌های فرومغناطیسی می‌تواند به بزرگی ۱۰^۶ نیز برسد، بر این اساس، این کانی‌ها میدان مغناطیسی را بسیار افزایش می‌دهند و وجود آن‌ها در طبیعت اکثراً با کانسارهای معدنی در رابطه است و به همین دلیل، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی نشانگرهای خوبی برای ذخایر معدنی می‌باشند. اگر فرض شود که حجم ID از یک جرم مغناطیسی با شدت مغناطیدگی I(r) پر شده

باشد، آنگاه میدان مغناطیسی حاصل از این جسم H(r') می‌تواند توسط رابطه ذیل بیان گردد [Blakely, 1996]:

$$H(r') = A^H(I) = \nabla' \iiint_D I(r') \cdot \nabla' \frac{1}{|r-r'|} dv \quad (12-2)$$

که در آن، A^H عملگر پیشرو در یک مسئله مغناطیسی خوانده می‌شود. مسئله وارون در این موارد می‌تواند به عنوان تعیین شدت مغناطیدگی جسم (I(r)) از روی داده‌های مغناطیسی مشاهده‌ای به صورت ذیل معرفی گردد [Blakely, 1996]:

^۱ Ferromagnetic

^۲ Magnetit

$$I = (A^H)^{-1}H \quad (2-13)$$

بعد مشترک با اهمیت در مسائل پیشروی گرانی و مغناطیس به ازای پارامترهای ρ و I این است که هر دو عملگرهای $A^g(\rho)$ و $A^H(I)$ عملگرهایی خطی از این خصوصیات فیزیکی هستند و در نتیجه عملگرهای معکوس آنها یعنی $(A^g)^{-1}(\rho)$ و $(A^H)^{-1}(I)$ نیز به ازای ρ و I عملگرهایی خطی خواهند بود.

۲-۵- دسته‌بندی مسائل وارون از لحاظ روابط میان داده‌ها و پارامترهای مدل

روش‌های وارون سازی بر مبنای رابطه میان تغییرات در پارامترهای مدل و اثرات متقابل آنها روی مشاهدات دسته‌بندی می‌شوند. این روابط می‌توانند به صورت خطی و غیرخطی باشند.

۲-۵-۱- مسائل وارون خطی

در این دسته‌بندی مسائلی قرار می‌گیرد که در آنها یک وابستگی خطی میان داده‌ها و پارامترهای مدل وجود دارد. این حالت در مورد داده‌های گرانی و مغناطیس سنجی زمانی اتفاق می‌افتد که چگالی یا مغناطیدگی به عنوان پارامترهای مدل در وارون سازی مطرح باشند. در این صورت با حل یک سیستم معادلات خطی مواجه هستیم، که ممکن است فرو برآورد^۱، فرابراورد^۲ یا دارای برآورد یکسان^۳ باشد. معمولاً یک جواب قطعی و مسلم را نمی‌توان به عنوان برآیند یک سیستم معادلات خطی ارائه داد. این امر

حتی در مورد مسائل برآورد یکسان نیز صادق است. این گونه سیستم‌ها معمولاً با روش‌های کمترین مربعات^۴ یا طول کمینه^۵ قابل حل هستند [Meju, 1994]. چون معمولاً در روند وارون سازی به سیستم‌های ماتریسی که دارای تکینگی (Singularity) یا شرایط نزدیک به آن رادارند، برخورد

^۱ Over determined

^۲ Under determined

^۳ Even determined

^۴ Least-Squares

^۵ Minimum-Length

می‌کنیم از روش‌هایی مانند SVD در کنار روش‌های ذکر شده به صورت ترکیبی برای حل سیستم معادلات خطی استفاده می‌شود [Meju, 1994].

۲-۵-۲- مسائل وارون غیر خطی

تا هنگامی که تغییرات در مدل نسبت به مدل اولیه در این مسائل کوچک باشد، انتظار داریم رابطه میان تغییرات پارامترهای مدل و اثرات ناشی از آن‌ها روی داده‌های مشاهده شده خطی باشد. طیف بزرگی از مسائل ژئوفیزیکی در این دسته قرار می‌گیرند. روند وارون سازی در مورد این مسائل سرانجام منجر به شکل‌گیری یک سیستم معادلات خطی بر مبنای تغییرات پارامترهای مدل خواهد شد. معمولاً این سیستم‌ها همان‌طور که در فصل مربوط به حل معادلات غیر خطی نیز بدان اشاره شد، با یکی از روش‌های گرادین قابل حل می‌باشند [Meju, 1994].

۲-۶- دسته‌بندی مسائل وارون از لحاظ پارامترسازی و ابعاد مسائل وارون

۲-۶-۱- مسائل فروبر آورد^۱

اگر فرض شود که معادله خطی ذیل:

$$d = Gm \quad (2-14)$$

یک مسئله کاملاً فروبر آورد باشد. بر این اساس می‌توان بیش از یک دسته از پارامترهای مدل را یافت که با داده‌های مشاهده‌ای تطابق داشته باشند. از مفاهیم پایه جبر خطی می‌دانیم که مسائل فرو بر آورد وقتی اتفاق می‌افتند که تعداد مجهولات (که در اینجا همان پارامترهای مدل هستند) از تعداد داده‌ها

بیشتر باشد یعنی (اگر M تعداد پارامترهای مدل و N تعداد داده‌های مشاهده‌ای باشد، داریم: $N < M$). بنابراین، سعی می‌شود که جوابی از فضای پارامترهای مدل انتخاب گردد که تا حد امکان ساده‌تر

^۱ Under determined

بوده و برای مثال دارای طول بردار کمینه باشد یعنی [Meju, 1994]:

$$l(m) = \|m\|^2 = m^T m = \text{Min} \quad (۱۵-۲)$$

با این اوصاف، چنین راه‌کاری در پی آن است که پارامترهای مدلی (m^{est}) را بیابد که تابع $l(m)$ را کمینه نموده و در شرط ذیل صدق نماید [Meju, 1994].

$$d - Gm = 0 \quad (۱۶-۲)$$

این مسئله کمینه‌سازی مشروط می‌تواند با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ^۱ حل شود، در این صورت

بایستی تابع ذیل کمینه‌سازی گردد [Meju, 1994]:

$$\phi(m) = m^T m + \lambda(d - Gm)^T \quad (۱۷-۲)$$

که در این معادله، λ یک ماتریس قطری شامل ضرایب لاگرانژ است.

با محاسبه تغییرات درجه اول تابع $\phi(m)$: [Meju, 1994]

$$\delta\phi(m) = 2\delta m^T m - \delta m^T G^T \lambda = \delta m^T (2m - G^T \lambda) \quad (۱۸-۲)$$

شرط لازم برای کمینه‌سازی $\phi(m)$ آن است که [Meju, 1994]:

$$\delta\phi(m) = \delta m^T (2m - G^T \lambda) = 0 \quad (۱۹-۲)$$

به ازای هر δm دلخواه. بنابراین عبارت ذیل را می‌توان برای تخمین m^{est} در این مسائل به دست آورد [Meju, 1994]:

$$m^{est} = \frac{1}{2} G^T \lambda \quad (۲۰-۲)$$

^۱ Lagrange multiplier

از طرفی این حل بایستی معادله (۲-۱۴) را نیز ارضا نماید یعنی [Meju, 1994]:

$$d = \frac{1}{2} G G^T \lambda \quad (2-21)$$

در این معادله ماتریس GG^T ماتریسی مربع با ابعاد $N \times N$ است که اگر صفر نباشد می تواند توسط رابطه ذیل معکوس گردد [Meju, 1994]:

$$\lambda = 2(G G^T)^{-1} d \quad (2-22)$$

و با جایگذاری این معادله در رابطه (۲-۲۱)

$$m^{est} = G^T (G G^T)^{-1} d \quad (2-23)$$

۲-۶-۲- مسائل فرابر آورد^۱

در این گونه مسائل تعداد داده ها بیشتر از تعداد پارامترهای مدل است. در این حالت تنها یک جواب برای مسئله وجود دارد و مقدار خطای پیش بینی شده در صورتی که مسئله فروبر آورد ذاتی یا فیزیکی نباشد، برابر صفر است ($M < N$). دیدیم که یک مسئله وارون خطی به شکل $d = Gm$ مطرح می شود. منظور از وارون سازی حل این معادله برای $M = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ ... \ m_M]^T$ می باشد. در عمل بین داده های مشاهده ای (d) و داده های پیش بینی شده ($d^{Pre} = Gm$) ناشی از پارامترهای مدل تخمینی، اختلاف وجود دارد. چنانچه این اختلاف با بردار خطای e نمایش داده شود می توان نوشت:

$$e = d - d^{Pre} = d - Gm \quad (2-24)$$

واضح است که بایستی پارامترهای مدلی را به دست آورد که به ازای آن ها بردار خطای e کمینه

شود

به این منظور تابع خطای^۲ q که عبارت است از مجموع مربعات باقیمانده تعریف می شود [Meju, 1994]:

^۱ Over determined

^۲ Misfit function

$$q = e^T e = \sum_{i=1}^N (d_i - \sum_{j=1}^M G_{ij} M_j)^2 \quad (25-2)$$

هدف در اینجا پیدا کردن برداری از پارامترهای مدل است به طوری که تابع خطای q کمینه شود. به این منظور از این تابع نسبت به هر کدام از پارامترهای مدل m_j مشتق گیری نموده و نتیجه برابر با صفر قرار داده می شود. بازنویسی رابط (25-2) منجر می شود به [Meju, 1994]:

$$q = e^T e = (d - Gm)^T (d - Gm) \quad (26-2)$$

بنابراین می توان نوشت [Meju, 1994]:

$$\frac{\partial q}{\partial m_j} = \frac{\partial [d^T d - d^T Gm - d^T G^T d + m^T G^T Gm]}{\partial m_j} = 0 \quad (27-2)$$

و به دست می دهد [Meju, 1994]:

$$m = [G^T G]^{-1} G^T d \quad (28-2)$$

رابطه (28-2) عبارت است از جواب کمترین مربعات برای معادله $d = Gm$. عبارت $[G^T G]^{-1} G^T$ وارون تعمیم یافته کمترین مربعات نامیده می شود که با عمل کردن روی داده ها، پارامترهای مدل حاصل می شود.

۷-۲- روش های حل مسائل وارون

در این قسمت به بحث در محدوده پارامترها و داده های گسسته برای مسائل ساده ای که از یک اپراتور مدل سازی پیشرو و وارون نتیجه می شوند، پرداخته می شود. داده های گسسته به طور شاخص در بسیاری از کاربردهای عملی به خوبی مورد استفاده قرار می گیرند.

۷-۲-۱- مسائل وارون خطی

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد صورت کلی یک مسئله وارون ژئوفیزیکی می تواند همانند ذیل بیان گردد:

$$d = G(m) \quad (29-2)$$

که در این رابطه m معرف پارامترهای مدل و d بیانگر داده‌های اندازه‌گیری شده است. همچنین فرض می‌گردد که N اندازه‌گیری ژئوفیزیکی در مسئله موردنظر وجود داشته باشد و بتوان با آن‌ها مانند اعضای بردار N مؤلفه‌ای d رفتار کرد (آن‌ها را می‌توان به‌عنوان مؤلفه‌های بردار N عضوی d به حساب آورد). به‌طور مشابه پارامترهای مدل نیز می‌توانند به‌صورت اعضای یک بردار مانند m با ابعاد M محسوب شوند.

در مواردی که G عملگری خطی است (یعنی با مسائل وارون خطی سروکار داریم) معادله (29-2) به شکل ماتریسی زیر نوشته می‌شود:

$$d = Gm \quad (30-2)$$

که در آن G ماتریسی $N \times M$ برای عملگر خطی G در معادله‌ی (29-2) است.

رابطه‌ی (30-2) معرف سیستمی از N معادله خطی نسبت به M پارامتر مجهول است [Meju, 1994].

$$d_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} m_j \quad (31-2)$$

بنابراین حل مسئله وارون (30-2) معادل با حل دسته‌ای از روابط خطی (معادله‌ی (31-2) نسبت به پارامترهای مجهول می‌باشد.

۲-۷-۲- مسائل وارون غیرخطی

گوس^۱ عنوان می‌کند، مسائل غیرخطی را می‌توان با استفاده از تقریب متوالی^۲ با استفاده از روش کمترین مربعات حل کرد [Blakely, 1996]. اغلب روش‌های معمول و متداول نیز در حل مسائل

^۱ Gauss

^۲ Successive approximations

غیرخطی در ژئوفیزیک به استثناء روش‌های کمینه‌سازی کلی^۱ با تفاوت‌های اندک بر مبنای همین روش استوارند. در این روش همگرایی مسئله وارون در یک تقریب خطی از تابع موردنظر با استفاده از بسط تیلور^۲ و استفاده از یک مدل اولیه (Initial Model) صورت می‌پذیرد. مدل اولیه مبتنی بر یک مجموعه عددی از پارامترهای مدل است که برای شروع روند وارون سازی‌های غیرخطی به مسئله اعمال می‌شود. این یک روند استاندارد و پذیرفته‌شده برای حل تمامی مسائل غیرخطی در ژئوفیزیک است.

۲-۷-۳- روش‌های تکرار^۳

مدل‌سازی پیشرو در یک‌روند سه مرحله‌ای انجام می‌شود به‌این‌ترتیب که ابتدا بی‌هنجاری مدل مفروض محاسبه گردیده سپس با داده‌های واقعی مقایسه شده و پارامترهای مدل جهت بهتر کردن اختلاف موجود تعدیل می‌گردند و این پروسه تا زمانی که نتایج راضی‌کننده باشند ادامه می‌یابد. تعدادی از الگوریتم‌های کامپیوتری نیز از همین روند منطقی استفاده کرده با این تفاوت که می‌توان آن‌ها را جزء روش‌های وارون دانست زیرا پارامترهای مدل در این الگوریتم‌ها به‌طور خودکار تغییر می‌یابند و کنترل شخصی در آن‌ها حداقل است.

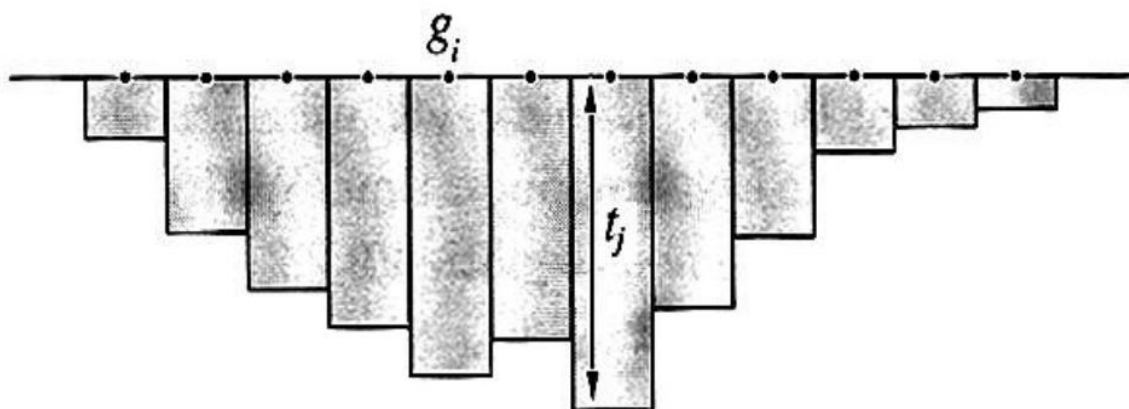
حال به مثالی در تخمین شکل مقطع حوضه‌های رسوبی پرداخته می‌شود. در این شیوه حوضه‌ی رسوبی موردنظر در جهت عمود بر پروفیل اندازه‌گیری به‌طور نامتناهی گسترش‌یافته (تقریب دوبعدی) و در محدوده سنگ‌های دربرگیرنده دارای اختلاف چگالی $\Delta\rho$ هست. حوضه‌ی رسوبی مربوطه به N بلوک مستطیل شکل با اعماق $t_j, j=1, 2, 3, \dots, N$ که در جهت عمود بر پروفیل به‌صورت نامتناهی بسط یافته‌اند همانند شکل (۲-۲) نشان داده‌شده و تنها میدان در N نقطه مفروض $i=1, 2, 3, \dots, N$ ، g_i در امتداد پروفیلی عمود بر روند حوضه در مرکز هر کدام از بلوک‌ها اندازه‌گیری گردیده است. به‌سادگی می‌توان ضخامت یک بلوک را بر اساس گرانی تک نقطه‌ای به‌صورت ذیل ارائه داد [Blakely, 1996]:

^۱ Global optimization

^۲ Taylor

^۳ Iterative methods

$$t_j^{(1)} = \frac{g_j}{2\pi\gamma\Delta\rho}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (32-2)$$



شکل ۲-۲ مقطع یک حوضه‌ی رسوبی که به وسیله بلوک‌های مستطیل شکل از یک سو نامتناهی مدل سازی شده است [Blakely, 1996].

که در این رابطه، اندیس بالایی بیان کننده‌ی تعداد تکرار بوده که در این حالت برابر با یک است. سپس یک روند سه مرحله‌ای برای تغییرات مکرر ضخامت بلوک‌ها می‌تواند به جریان افتد که این مراحل شامل موارد زیرند (k معرف تعداد دفعات تکرار فرآیند است):

۱- در هر تکرار میدان $g_j^{(k)}$ در هر کدام از نقاط مشاهده‌ای حاصل از تمام بلوک‌ها با فرض ضخامت‌های مربوط به تکرار قبل محاسبه می‌شود.

۲- باقیمانده‌ی $g_j - g_j^k$ در هر کدام از نقاط مشاهده‌ای تعیین می‌گردد.

۳- تقریب تخته نامتناهی^۱ جهت تعیین دسته‌ای از ضخامت‌های جدید دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار تصحیح بلوک بر اساس این فرض که بلوک‌ها به عنوان تخته‌های ضخیم نامتناهی ملزم به سازگاری با باقیمانده‌ی به دست آمده هستند تخمین زده می‌شود. بنابراین با این توضیحات ضخامت جدید برای تکرار (k+1) ام برابر خواهد بود با:

^۱ Infinit slab approximation

$$t_j^{(k+1)} = \frac{(g_j - g_j^k)}{2\pi\gamma\Delta\rho} + t_j^k \quad (33-2)$$

این سه مرحله تا زمانی که به همگرایی موردنظر برسیم ادامه می‌یابد.

در یک روش دیگر داده‌های اندازه‌گیری شده در شبکه‌هایی مربعی شکل درون‌یابی می‌شوند به‌طوری‌که منشأ مفروض می‌تواند در مقیاس سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گیرد. در این حالت منشأ مفروض توسط بلوک‌های مکعب مستطیل مدل‌سازی می‌شود که به ازای هر بلوک یک داده‌ی گرانی وجود دارد (شکل ۳-۲). در این روش ضخامت بلوک‌ها t_j ، $j=1, 2, 3, \dots, N$ نسبت به سطح مرجعی تعریف می‌شدند که می‌توانست برای مثال معرف بخش بالایی و یا پایینی آن‌ها باشد. همانند روش پیشین در اینجا نیز ضخامت بلوک‌های اولیه با فرض این که هر کدام از آن‌ها یک تخته‌ی نامتناهی است تخمین زده می‌شود. و پروسه محاسباتی سه مرحله‌ای صورت گرفته و تعدیل مدل به‌طور خودکار در هر دوره‌ی تکرار صورت می‌پذیرد [Blakely, 1996].

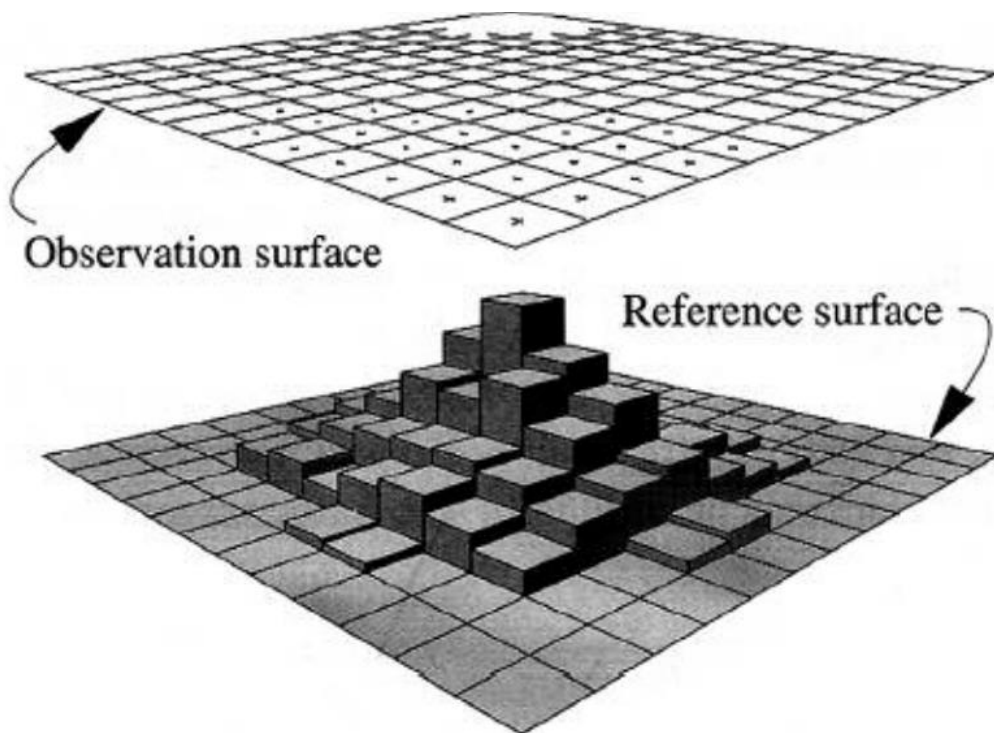
روش تا حدودی متفاوت نیز توسط جکنز و مورینگ^۱ (۱۹۹۰) بیان شده که مانند دو راهکار قبلی در تخمین شکل حوضه‌های رسوبی کم چگال کاربرد دارد با این تفاوت که شیوه آن‌ها احتمال متغیر بودن چگالی سنگ‌های دربرگیرنده حوضه‌ی رسوبی (سنگ‌بستر) را نیز به حساب می‌آورد. این راهکار بر اساس جداسازی داده‌های گرانی اندازه‌گیری شده به دو مؤلفه که یکی مربوط به میدان گرانی ایجادشده توسط خود حوضه‌های رسوبی و دیگری در رابطه با تغییرات چگالی سنگ‌های دربرگیرنده^۲ آن‌ها بوده بنیان نهاده شده است. به عبارت دیگر اگر فرض شود که g معرف داده‌های گرانی اندازه‌گیری شده بعد از حذف اثر ناحیه‌ای باشد (که در آن اثر باقیمانده‌ی ایزوستازی می‌تواند نقطه شروع مطلوب باشد)، آنگاه g را می‌توان به صورت $g = g_b + g_d$ نوشت که در آن g_b بی‌هنجاری مربوط به سنگ کف زیر حوضه و g_d بی‌هنجاری ایجادشده به واسطه ذخایر رسوبی کم چگال است. در این روش مراحل زیر برای نیل

^۱ Jackenes & Moring

^۲ Underlying Basement Rocks

به هدف باید صورت پذیرند [Blakely, 1996]:

۱- در اولین تکرار فرض می‌شود که g_b تنها توسط ایستگاه‌های واقع بر رخنمون سنگ‌بستر و یک سطح صاف عبوری از این داده‌ها، تعریف شده باشد. این مرحله شامل تقریب اول g_b^1 نسبت به میدان زیر لایه g_b است اما این تقریب تنها تخمینی ابتدایی است زیرا داده‌های اندازه‌گیری شده هنوز اثرات حوضه‌های مجاور را در بردارد که این اثرات می‌تواند در تکرارهای بعدی حذف گردد.



شکل ۲-۳ مدل سه بعدی استفاده شده در روش کوردل و هریسن [Blakely, 1996].

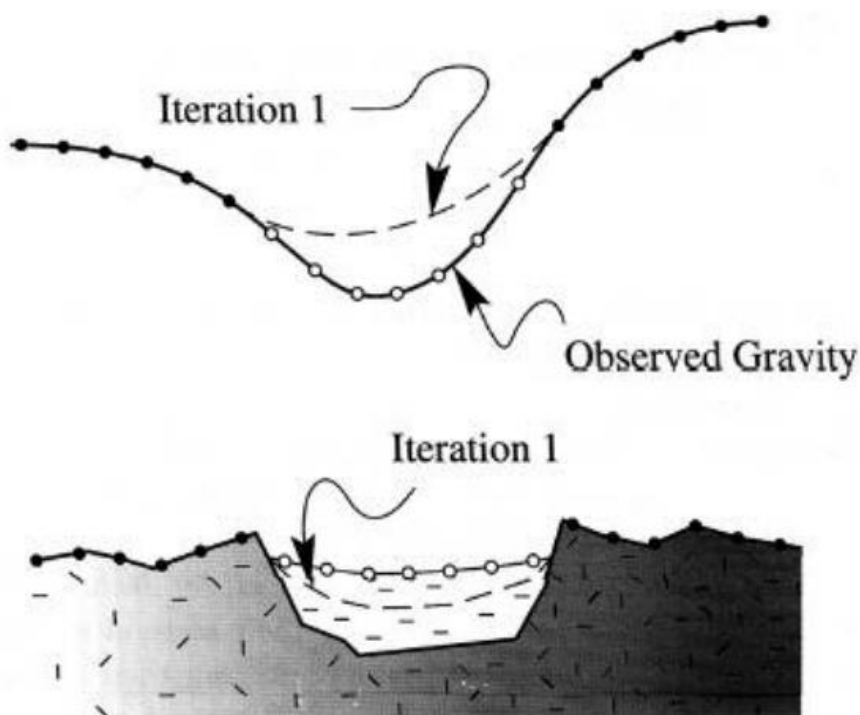
۲- تقریب اول g_d به واسطه کم کردن g_b^1 از داده‌های مشاهده‌ای گرانی به دست می‌آید که این مقدار جدید باقیمانده g_d^1 جهت یافتن اولین تقریب عمق حوضه رسوبی در روش تقریب تخته نامتناهی استفاده می‌شود.

۳- اثر گرانی حوضه‌های مجاور سپس می‌تواند توسط روش‌های مختلفی محاسبه گردد. به‌طور

مثال جکنز و مورینگ (۱۹۹۰) از روش پارکر^۱ (۱۹۷۲) برای این امر استفاده کردند. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده اثر گرانی حوضه‌های مجاور از داده‌های مربوط به ایستگاه‌های گرانی واقع بر رخنمون سنگ‌بستر کم می‌شود تا تخمین بعدی یعنی g_a^2 برای میدان گرانی سنگ‌بستر، حاصل شود.

سه مرحله مذکور تا زمانی که جواب مسئله مربوط به مقادیر رضایت بخشی برسد ادامه می‌یابد. بعد از انجام مراحل فوق دو نتیجه حاصل می‌شود که یکی شکل حوضه‌ی رسوبی کم چگال و دیگری جاذبه‌ی گرانی آن بدون در نظر گرفتن تأثیرات حوضه‌های دیگر است.

^۱ Parker



شکل ۲-۴ تقسیم گرانی بازماند به دو مؤلفه، مؤلفه ایجادشده ناشی از تغییرات چگالی در داخل سنگ‌بستر و مؤلفه ایجادشده ناشی از پر شدن حوضه رسوبی. خط چین، اندازه‌گیری‌های انجام‌شده درروی رخنمون سنگ‌بستر و دایره‌ها اندازه‌گیری‌های انجام‌شده درروی پوشش رسوبی را نشان می‌دهد [Blakely, 1996].

۲-۷-۴-روش‌های خطی‌سازی

اگرچه میدان‌های پتانسیل به‌طور غیرخطی بستگی به پارامترهای خاصی از منشأ دارند اما این وابستگی نسبت به مقادیر تغییرات کوچک آن‌ها می‌توان خطی فرض گردد. به‌عنوان مثال، میدان‌های پتانسیل مربوط به یک منشور چندضلعی با مختصات گوشه‌ای آن از طریق توابع آرک‌تانژانت و لگاریتمی در رابطه است و این یعنی میدان پتانسیل تابعی غیرخطی از مختصات گوشه‌ای چندضلعی بوده، بااین‌وجود، این چنین روابط غیرخطی‌ای می‌توانند با فرض تغییرات خیلی کوچک در پارامترهای مدل خطی فرض شوند. برای نمونه، میدان مغناطیسی و یا گرانی مربوط به گروهی از منشورهای چندضلعی می‌توانند به‌صورت سری تیلور بر اساس تغییرات مکان‌های مختصات چندضلعی‌ها بسط یابد. اگر میزان تغییر در

این مختصات کوچک باشد، سری مذکور می‌تواند قطع گردیده و بستگی تابع^۱ در این تغییرات خطی گردد، آنگاه الگوریتمی جهت محاسبه بهترین دسته از بلوک‌ها برای بی‌هنجاری مفروض به دست می‌آید که در آن پارامترهای اشکال مقطعی به میزان مقادیر کوچک از طریق تکنیک‌های کمترین مربعات تغییر داده می‌شوند.

راه‌کار فوق در فرم‌های گوناگون برای هردوی بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیس شرح داده شده است. با توجه به معادلات مربوط به مؤلفه قائم جاذبه گرانی و بی‌هنجاری کلی میدان مغناطیسی برای منشوری که از یک سمت تا بی‌نهایت گسترش یافته و دارای چگالی و یا مغناطیدگی یکنواخت و مقطعی N ضلعی (شکل ۲-۵) بوده و معرف یکی از L اندازه‌گیری گسسته بی‌هنجاری گرانی و یا مغناطیسی می‌باشد، فرم کلی ذیل برای آن روابط پیشنهاد می‌گردد که:

$$d_i = d(x'_1, z'_1, x'_2, z'_2, \dots, x'_N, z'_N, x_1, z_1) = d(x_i, z_i, w) \quad , i = 1, 2, \dots, L \quad (2-34)$$

که در آن (x_i, z_i) مبین مکان اندازه‌گیری نام است. مختصات مدل اولیه شامل N گوشه چندضلعی مذکور است که به‌طور خلاصه توسط آرایه $2N$ بعدی نمایش داده می‌شود. آرایه w تنها شامل مختصات گوشه‌های جسم مدفون نیست بلکه بسته به نوع مسئله می‌تواند شامل سایر پارامترها مانند چگالی، سه مؤلفه مغناطیدگی و به‌طور خلاصه همه پارامترهایی که میدان ناحیه‌ای را تشریح می‌کنند، باشد.

اگر فرضاً d_i و $\bar{d}_i$ به ترتیب معرف بی‌هنجاری‌های مشاهده‌ای و محاسباتی باشند، آنگاه هدف یافتن بردار w است به‌طوری‌که، خطای مربع ذیل تا حد امکان کوچک گردد یعنی:

$$E^2 = \sum (d_i - \bar{d}_i(w))^2 = \text{Min} \quad (2-35)$$

در این رابطه، به دلیل اینکه $\bar{d}_i$ تابعی غیر خطی از w می‌باشد، نمی‌شود از روش‌های عادی تحلیل‌های کمترین مربعات به‌طور مستقیم بهره برد. برای این منظور می‌توان المان را به ازای مقادیری

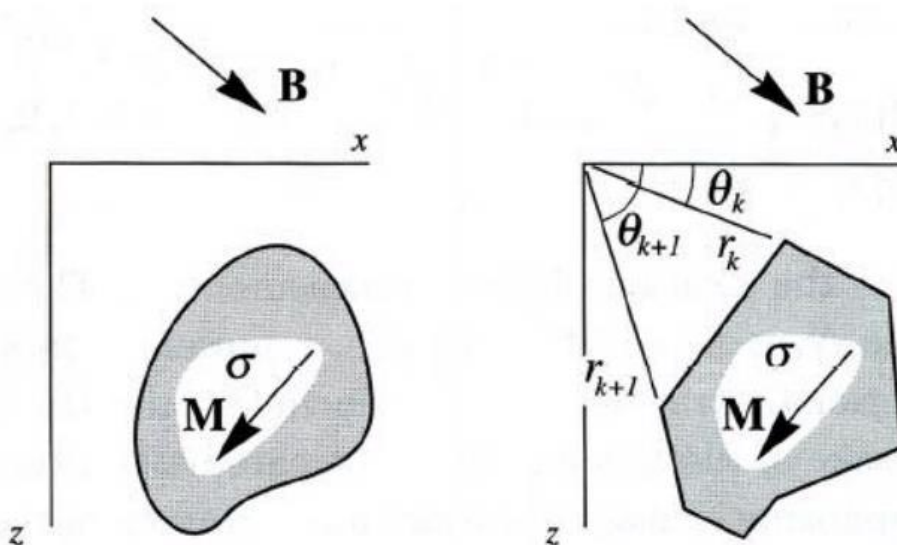
^۱Functional Dependence

کوچک در هر دوره تکرار تغییر داد اگر این تغییرات به اندازه کافی کوچک فرض گردند، آنگاه $\bar{d}_i$ تقریباً به تابعی خطی از این تغییرات بدل خواهد شد.

استفاده از بسط تیلور تابع خطا معمول‌ترین شیوه برای انجام این امر است. به عنوان مثال، مقادیر تابعی مانند $f(x, y)$ به ازای نقطه‌ای مانند $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ توسط این سری به فرم ذیل درونیابی می‌شود:

$$f(x + \Delta x, y + \Delta y) = f(x, y) + \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y + \dots \quad (۳۶-۲)$$

که در این رابطه عبارات درجه بالا حذف گردیده‌اند، زیرا فرض شده است مقادیر Δx و Δy به اندازه کافی کوچک باشند.



شکل ۲-۵ تقریب یک منشأ دوبعدی توسط منشوری نامتناهی با مقطع چندضلعی [Blakely, 1996].

به طور مشابه می‌شود $w^{(k)}$ را به عنوان معرف مقادیر $(x'_1, z'_1, x'_2, z'_2, \dots, x'_N, z'_N, x_1, z_1)$ بعد از

تکرار k ام فرض نمود که در این صورت بسط تیلور بی‌هنجاری مفروض در نقطه i برابر خواهد بود با:

$$\bar{d}_i(w^{(k+1)}) \approx \bar{d}_i(w^{(k)}) + \sum_{m=1}^{2N} \frac{\partial}{\partial w_m} \bar{d}_i(w^{(k)}) \Delta w_m^{(k)}, \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (۳۷-۲)$$

که در این معادله $\bar{d}_i(w)$ می‌تواند از تئوری‌های پیشرو همان‌طور که اشاره شد، به دست آید. بنابراین مسئله تنها محاسبه عباراتی برای مشتقات جزئی مربوطه است و بامنظور نمودن آرایه‌ای از پارامترهای اولیه، $w^{(k)}$ تنها مجهولات در رابطه فوق $m = 1, 2, \dots, 2N$ و $\Delta w_m^{(k)}$ هستند. جهت یافتن دسته‌ای از این مجهولات که کمترین مقدار را برای E^2 به دست می‌دهند، می‌شود مشتقات جزئی E^2 را نسبت به $j = 1, 2, \dots, 2N$ و w_j را محاسبه کرده و هر گروه از معادلات تعیین‌شده را به‌صورت ذیل برابر با صفر قرارداد:

$$\sum_{i=1}^L \left(d_i - \bar{d}_i(w^{(k)}) - \sum_{m=1}^{2N} \frac{\partial}{\partial w_m} \bar{d}_i(w^{(k)}) \Delta w_m^{(k)} \right) \left(\frac{\partial}{\partial w_j} \bar{d}_i(w^{(k)}) \right) = 0 \quad (38-2)$$

$$j = 1, 2, \dots, 2N$$

که در آن نیز مجدداً عبارات درجه بالا حذف گردیده‌اند. عبارت پیچیده فوق می‌تواند به فرم زیر درآید.

$$\alpha_j = \sum_{m=1}^{2N} G_{mj} \Delta w_m^{(k)} \quad (39-2)$$

که در آن:

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^L \left(d_i - \bar{d}_i(w^{(k)}) \right) \frac{\partial}{\partial w_j} \bar{d}_i(w^{(k)}) \quad (40-2)$$

و:

$$G_{mj} = \sum_{i=1}^L \frac{\partial}{\partial w_m} \bar{d}_i(w^{(k)}) \frac{\partial}{\partial w_j} \bar{d}_i(w^{(k)}) \quad (41-2)$$

و به‌طور کلی برای حل این‌گونه مسائل پیشنهاد می‌گردد:

۱- ابتدا بایستی مجموعه اولیه‌ای از مختصات گوشه‌های شکل موردنظر یعنی

$$w = (x'_1, z'_1, x'_2, z'_2, \dots)$$

می‌تواند آزادانه تغییر کند ولی در عمل بیشتر گوشه‌ها ثابت‌اند و تنها تعداد کمی از آن‌ها در

طی فرآیند مدل سازی تغییر می کند.

۲- مقادیر $\bar{d}_i(w^{(k)})$ و $\frac{\partial}{\partial w_m} \bar{d}_i(w^{(k)})$ به ازای $i = 1, 2, \dots, L$ و $m = 1, 2, \dots, 2N$ در این مرحله محاسبه میشوند.

۳- در مرحله سوم عبارت های α_j و G_{mj} با توجه به معادلات (۳۹-۲) و (۴۱-۲) تعیین می گردند.

۴- ماتریس معادله (۳۹-۲) را وارون کرده تا $\Delta w^{(k)}$ به دست آید.

۵- و نهایتاً متناسب با آن w تعدیل می گردد.

مراحل ۲ تا ۵ از فرآیند فوق تا زمانی که به جواب موردنظر همگرا گردد و یا عبارت دیگر مادامی که

خطای E^2 به سطح خاصی کاهش یافته و یا المان های $m = 1, 2, \dots, 2N$ و $\Delta w^{(k)}$ به اندازه کافی کوچک شوند، ادامه می یابد.

جانسون (۱۹۶۹)^۱ با پیگیری روش مارکوارت (۱۹۶۳) پیشنهاد انتخاب ضرایب وزنی برای اعضای

قطری معادله (۳۹-۲) به منظور کنترل همگرایی تکرار ارائه داد. با توجه به راهکار به کاررفته توسط

مارکوارت رابطه (۳۹-۲) به صورت ذیل تبدیل می گردد [Blakely, 1996]:

$$\alpha_j = \sum_{m=1}^M G_{mj} \Delta w_m^{(k)} (1 + \delta_{mj} \lambda) \quad (42-2)$$

که در آن:

$$\delta_{mj} = \begin{cases} 0, & \text{if } m \neq j; \\ 1, & \text{if } m = j; \end{cases} \quad (43-2)$$

و λ ضریبی مثبت و یا صفر است. همچنین اگر $\lambda = 0$ آنگاه رابطه (۴۳-۲) به (۳۹-۲) بدل شده

و برای $\lambda > 0$ مقادیر جدید $w^{(k+1)}$ به مقداری در همسایگی $w^{(k)}$ محدود خواهد شد و در صورتی که

$\lambda \rightarrow 0$ آنگاه معادله (۴۲-۲) به تکنیک شیب دارترین جهت^۲ نیل می کند.

^۱ Johnson

^۲ Steepest Descent Technique

۲-۸- نظریه وارون سازی داده‌ها

بسیاری از مسائل وارون را می‌توان با کمینه‌سازی یک تابع عدم تطابق میان داده‌های مشاهده‌ای و تخمین‌های تئوری با اعمال شرایط خاص تنظیم‌کننده^۱ (رابطه ۲-۴۲) حل کرد. در مسائل بزرگ مقیاس با افزایش تعداد داده‌ها و پارامترهای مدل و به تبع آن افزایش ابعاد ماتریس‌های مشخصه مدل مشکلات عدیده‌ای در رابطه با وارون سازی ماتریس‌ها و پایداری مدل به وجود خواهد آمد. بنابراین تکنیک‌های محاسباتی پیشرفته‌ای برای دستیابی به دقت و همگرایی مطلوب در این گونه سیستم‌ها مورد نیاز است. استفاده از تکنیک‌های محاسباتی پیشرفته (در مقابل استفاده از روابط کلاسیک و متداول) در حل مسائلی که سطح نوفه ذاتی در داده‌های مشاهده‌ای بالاست، می‌تواند مفسر را در دستیابی به یک مدل پایدار و منطبق بر واقعیات فیزیکی راهنمایی کند. استفاده از بردارهای نرمالیزه شده^۲ ماتریس مشتقات دوم پارامترهای مدل Matrix Hessian و تصویرسازی^۳ این ماتریس توسط این بردارهای پایه^۴ در یک زیر فضای جدید و تعریف جدید پارامترهای مدل و تابع عدم تطابق در این فضا، باعث می‌شود شرایط مسئله وارون بهبود یافته و مسئله به یک مسئله با شرایط خوب^۵ تبدیل شود. این امر موجب می‌شود تا از وارون‌سازی غیرضروری ماتریس‌هایی با ابعاد بالا اجتناب شود.

همچنین در شرایطی که با مسائل وارون چند پارامتری با ابعاد فیزیکی مختلف مواجه هستیم، روش‌های متداول ژئوفیزیکی اغلب به همگرایی ضعیف یا به کمینه‌های موضعی در وارون‌سازی منجر می‌شوند. این امر به این علت است که در ماتریس‌های مشتقات پارامترهای مدل در وارون‌سازی‌های غیرخطی (یا ماتریس‌های کرنل در وارون‌سازی‌های خطی) مؤلفات ماتریسی در مورد پارامترهای فیزیکی متفاوت دارای اختلاف بسیار فاحش از نظر مقدار هستند. این امر علت اساسی در سوق دادن یک ماتریس

^۱ Regularization

^۲ Normalized vectors

^۳ Projection

^۴ Basis vectors

^۵ Well condition

به سمت شرایط بد^۱ است.

در این موارد روش زیر فضا با طبقه‌بندی متغیرها به کلاس‌های مختلف و با استفاده از تصویرسازی‌های مجزا برای هر کلاس راه را برای میل به یک پاسخ منطبق بر واقعیات فیزیکی و همگرایی مطلوب هموار می‌کند.

$$\phi(x) = \frac{1}{2} \phi_d(x) + \frac{\alpha}{2} \phi_x(x) \quad (44-2)$$

در صورتی که تابع $\phi(x)$ یک تابع هموار برای پارامترهای مدل باشد، می‌توان با استفاده از تقریب درجه دوم از تابع هدف و بسط تیلور محدودشده برای این تابع روابط زیر را نوشت [Sambridge, 1990].

$$\phi(x + \delta x) = \phi(x) + \gamma^T \delta x + \frac{1}{2} \delta x^T H \delta x \quad (45-2)$$

در رابطه (۴۵-۲) بردار گرادیان و H ماتریس هسین می‌باشند؛ که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [Oldenburg, 2006].

$$\gamma = -G^T (d_0 - d(x)) \quad (46-2)$$

$$H = G^T G + \alpha I - \nabla_x G^T (d_0 - d(x)) \quad (47-2)$$

$$G_{ij} = \frac{\partial d_i(x)}{\partial x_j} \quad (48-2)$$

G_{ij} ماتریس ژاکوبین می‌باشد که با روش‌های عددی قابل محاسبه است. در رابطه (۴۷-۲) مقدار $\nabla_x G^T$ وابستگی غیرخطی داده‌ها و پارامترهای مدل را بیان می‌کند و در مقایسه با عبارت اول رابطه (۴۷-۲) مقدار قابل توجهی نیست، بنابراین در محاسبه ماتریس H قابل صرف نظر کردن است

^۱ Bad condition

[Wang and Houseman, 1994].

با ترکیب روابط بالا مقدار تغییرات پارامترهای مدل در هر تکرار (δx) با استفاده از رابطه (۴۹-۲) قابل محاسبه است.

$$\delta x = -V(V^T H V)^{-1} V^T \gamma \quad (49-2)$$

در هر تکرار مقدار تغییرات پارامتر مدل با استفاده از رابطه (۴۹-۲) محاسبه شده و بر روی مدل اولیه اعمال می شود و یک مدل جدید به دست می آید، این مدل جدید به عنوان مدل اولیه در تکرار بعدی در نظر گرفته می شود و تکرارها تا زمانی که مدل به یک همگرایی مطلوب برسد ادامه می یابد.

۲-۸-۱- انتخاب بردارهای پایه

در هر تکرار تغییرات پارامترهای مدل با استفاده از کمینه سازی و تغییرات به دست می آید، بنابراین بردارهایی که در تغییرات این توابع در تکرارهای متوالی نقش اساسی دارند، بردارهای پایه V هستند. به منظور انتخاب بردارهای پایه از تفکیک تابع هدف و گردانهای توابع تشکیل دهنده آن بهره گرفته می شود. بردارهای پایه (V) طوری انتخاب می شوند که به آسانی قابل محاسبه بوده و حاوی اطلاعاتی از هر دو فضای داده ها و پارامترهای مدل می باشد. بردارهای ویژه از ماتریس مربعی و متقارن H که توسط روش تجزیه به مقادیر تکین (SVD) به دست می آیند به عنوان بردارهای پایه برای ساختن V انتخاب شده اند. بردارهای پایه V فقط برای یکبار از مدل اولیه ساخته می شوند و در طول وارون سازی ثابت در نظر گرفته می شوند از این رو بردارهای پایه تنها از تعداد محدودی از بردارهای ویژه که مربوط به بزرگ ترین مقادیر منفرد که بیشترین اثر را روی داده های پیش بینی شده دارند انتخاب می شوند [Mirzaei, 1996].

۲-۸-۲- انتخاب پارامتر منظم سازی

انتخاب مقدار مناسب پارامتر منظم سازی، یکی از مسائل مهم در روش های منظم سازی، از جمله روش تیخونوف، است [Li and Oldenburg, 2005]. روش های متعددی برای انتخاب پارامتر منظم سازی در

مسائل وارون سازی غیرخطی داده های ژئوفیزیکی وجود دارد که این روش ها تحت شرایط مختلف امکان دارد جواب مطلوب و نامطلوبی بدهند [Hansen, 2010]. پارامتر منظم سازی $0 < \alpha < \infty$ است که پارامتر متعادل ساز نیز نامیده می شود. در رابطه (۲-۴۴) این پارامتر وزن نسبی بین تابع عدم برازش و تابع ثابت ساز را کنترل می کند. اگر α به صفر میل کند، تابعی که حداقل می شود فقط شامل عدم برازش خواهد بود. در نتیجه مدل به دست آمده، به گونه ای ساخته می شود که داده های حاصل از مدل کاملاً بر داده های مشاهده ای برازش پیدا کند. اگر مقدار α بزرگ انتخاب شود، مقدار تابع عدم برازش کوچک خواهد شد و فقط تابع ثابت ساز حداقل می شود. کمینه کردن هر دو مقدار تابع عدم برازش و تابع ثابت ساز برای حل مسئله وارون لازم است و در واقع نقش پارامتر منظم سازی متعادل کردن اهمیت نسبی بین دو تابع عدم برازش و تابع ثابت ساز است [Li and Oldenburg, 2005].

پارامتر منظم سازی باید به گونه ای انتخاب شود که اختلاف بین داده های مشاهده ای و داده های حاصل از مدل ساخته شده با توجه به نوبه موجود در داده های مشاهده ای، قابل توجیه باشد. بنابراین می توان گفت که هدف اصلی از تعیین پارامتر منظم سازی تعیین مقدار عدم برازش مناسب در وارون سازی داده ها است.

۳- فصل سوم:

تئوری روش وارون سازی، الگوریتم و زیر برنامه های

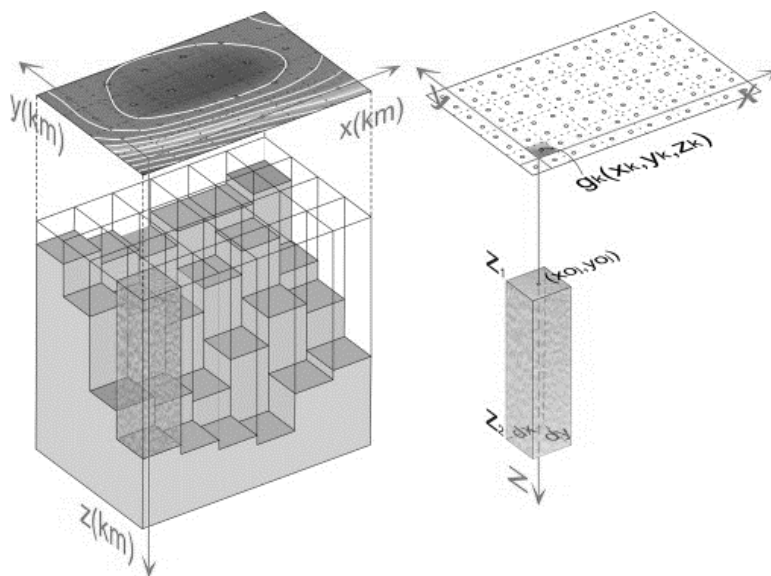
رایانه ای

۳-۱- مقدمه

منظور از مدل سازی در این مطالعه این است که رسوبات روی یک بستر مدل می شود. این رسوبات به وسیله مجموعه ای از بلوک های سه بعدی مدل شده به طوری که ضخامت بلوک های لایه اول عمق تا سنگ بستر و ضخامت بلوک های لایه دوم ضخامت سنگ بستر را نشان می دهد. بنابراین آنومالی ناشی از این ساختار در هر نقطه عبارت است از مجموع اثرات همه بلوک ها در آن نقطه. در نتیجه مسئله وارون تعیین توپوگرافی سنگ بستر به مسئله وارون تعیین ضخامت بلوک ها به عنوان پارامترهای مدل تبدیل می شود.

۳-۲- مدل سازی وارون سه بعدی داده های گرانی سنجی

مدل جمع منشوری سه بعدی که توسط Plouff (1976) معرفی شد یکی از پرکاربردترین مدل های هندسی ریاضی برای مدل سازی سه بعدی سنگ بستر می باشد. در اینجا نیز در انجام مدل سازی سه بعدی داده های گرانی سنجی از این مدل استفاده شده است به طوری که ضخامت بلوک های لایه اول عمق تا سنگ بستر و ضخامت بلوک های لایه دوم ضخامت سنگ بستر را نشان می دهد. یعنی عمق پایین هر بلوک لایه اول روی فصل مشترک حوضه رسوبی و سنگ بستر و عمق پایین هر بلوک لایه دوم، کف سنگ بستر می باشد. بنا به اصل برهم نهش بی هنجاری گرانی در هر نقطه را می توان به صورت مجموع اثر بلوک های راست گوشه در نظر گرفت. مدل سه بعدی حوضه رسوبی در شکل (۳-۱) آمده است. با توجه به این شکل به منظور تشکیل ساختار مورد نظر بلوک های راست گوشه در یک سیستم مختصات کارتزین با محور z رو به پایین مشخص می شوند. ابعاد افقی بلوک های مکعبی برابر با ابعاد شبکه بندی است به طوری که در زیر هر یک از نقاط مشاهده بی هنجاری یک بلوک از لایه اول و یک بلوک از لایه دوم قرار دارد. برنامه وارون سازی در این تحقیق عمق پایین هر کدام از بلوک ها را محاسبه می کند.



شکل ۱-۳: نمایش مدل حوضه رسوبی توسط مجموعه‌ای از بلوک‌های راست گوشه.

مؤلفه قائم جاذبه گرانش ناشی از بلوک‌های سه‌بعدی راست گوشه آنچه گرانی سنج اندازه می‌گیرد به صورت زیر تعریف می‌شود [Plouff, 1976]:

$$g = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 s \left[z_k \tan^{-1} \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \ln(R_{ijk} + y_j) - y_j \ln(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (1-3)$$

در رابطه بالا γ ثابت جهانی گرانش، ρ چگالی هر بلوک، $R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$ و

$s = s_i + s_j + s_k$ که $s_1 = -1$ و $s_2 = +1$ می‌باشد.

با توجه به اینکه در این مسئله وارون‌سازی پارامترهای مدل ضخامت هر بلوک می‌باشد و همان‌طور که در رابطه (۱-۳) مشاهده می‌شود میدان گرانی ناشی از یک بلوک راست گوشه رابطه غیرخطی با ضخامت هر بلوک دارد، بنابراین مسئله پیش رو یک مسئله غیرخطی می‌باشد و با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی زیرفضا حل می‌شود. همان‌طور که در فصل دوم اشاره گردید جهت انجام وارون‌سازی غیرخطی بایستی مشتق‌گیری نسبت به پارامترهای مدل انجام شود. با توجه به این‌که پارامترهای مدل در این مسئله عمق یا ضخامت بلوک‌ها می‌باشد بنابراین مشتق‌گیری از رابطه (۱-۳) نسبت به z صورت

می‌گیرد که نتیجه آن به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial g}{\partial z_k} = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left[\tan^{-1} \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - \frac{x_i y_j z_k (R_{ijk}^2 + z_k^2)}{R_{ijk} ((z_k R_{ijk})^2 + (x_i y_j)^2)} - \frac{x_i z_k}{R_{ijk} (R_{ijk} + y_j)} - \right. \quad (2-3)$$

$$\left. \frac{z_k y_j}{R_{ijk} (R_{ijk} + x_i)} \right]$$

جهت انجام وارون‌سازی، برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB تهیه شده است که از روابط بالا به صورتی که در ادامه توضیح داده می‌شود، استفاده می‌کند. ورودی برنامه شامل مختصات نقاط مشاهده شده روی یک شبکه منظم برداشت، داده‌های گرانی به دست آمده روی این نقاط (d_{obs})، مدل اولیه لایه‌ها و تباین چگالی هر لایه با سنگ‌های میزبان می‌باشد. در این برنامه تهیه شده، ابعاد افقی بلوک‌ها و تباین چگالی لایه‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شوند و فقط عمق بلوک‌ها متغیر می‌باشند. برنامه تهیه شده که از دو زیر برنامه اصلی تشکیل شده است در یک فرآیند تکراری عمق پایینی بلوک‌ها را به دست می‌آورد. همان‌طور که اشاره کردیم پارامترهای مدل در اینجا عمق پایین بلوک‌ها می‌باشند و با توجه به اینکه در زیر هر نقطه برداشت دو بلوک در نظر گرفته‌ایم پس تعداد پارامترهای مدل ما از تعداد داده‌های برداشت شده بیشتر بوده یعنی $M > N$ که مسئله وارون‌سازی ما یک مسئله فروبرآورد است. برای حل این وارون‌سازی از روش زیرفضا^۱ استفاده کرده‌ایم. فرمول الگوریتم تکرارشونده با توجه به روابط روش زیرفضا به صورت زیر ارائه می‌گردد [Oldenburg, 1995].

$$\delta x = -V(V^T H V)^{-1} V^T \gamma, \quad x^{k+1} = x^k + \delta x \quad (3-3)$$

که در رابطه بالا δx تغییرات پارامترهای مدل، H ماتریس حساسیت (Hessian)، V ماتریس بردارهای پایه و γ بردار گرادیان می‌باشند، که H و γ به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\gamma = -G^T (d_0 - d(x)) \quad (4-3)$$

^۱ Subspace

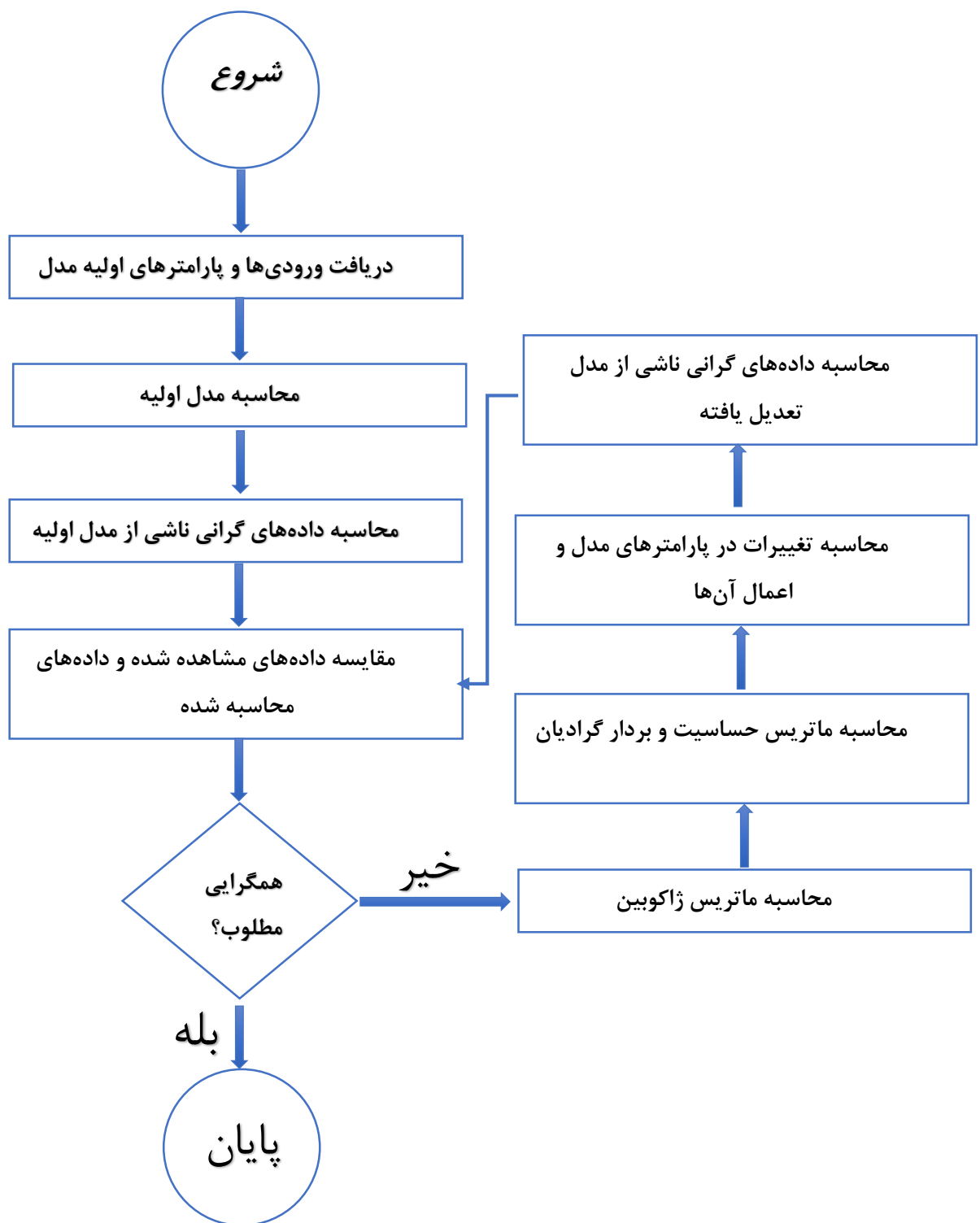
$$H = G^T G + \alpha I \quad (5-3)$$

در رابطه (5-3)، α پارامتر منظم‌سازی می‌باشد و ماتریس بردارهای پایه با استفاده از تجزیه به مقادیر تکین (SVD) ماتریس حساسیت به دست می‌آید و G ماتریس مشتقات جزئی (ماتریس ژاکوبین) می‌باشد.

مراحل اجرایی الگوریتم مدل‌سازی وارون: در مرحله اول پاسخ گرانی ناشی از مدل اولیه با استفاده از رابطه (1-3) محاسبه می‌شود و از آنجا بردار اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای شده و داده‌های محاسبه‌شده از مدل اولیه به دست می‌آید. در مرحله دوم با استفاده از رابطه (2-3) ماتریس مشتقات جزئی (ماتریس ژاکوبین) را محاسبه می‌شود. در مرحله سوم با استفاده از روابط (3-3 و 4-3) ماتریس حساسیت و بردار گرادیان محاسبه می‌شود. در مرحله چهارم با استفاده از رابطه (3-3) تغییرات پارامترهای مدل به دست آمده و مطابق رابطه با پارامترهای مدل اولیه جمع جبری می‌شود. حال مدل تعدیل‌یافته به عنوان مدل اولیه در مرحله اول قرار داده شده و بقیه مراحل تا رسیدن به یک همگرایی قابل قبول دنبال می‌شود. الگوریتم وارون‌سازی روش ذکر شده در شکل (2-3) نشان داده شده است. همگرایی مطلوب زمانی رخ می‌دهد که خطای RMS ناشی از اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای شده و داده‌های محاسبه‌شده از مدل تعدیل‌یافته با نظر مفسر از حد معینی کمتر باشد. خطای RMS به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N (d_i^{obs} - d_i^{pro})^2} / N \quad (6-3)$$

که N تعداد داده‌ها، d^{obs} داده‌های مشاهده‌ای شده و d^{pre} داده‌های پیش‌بینی شده می‌باشد.



شکل ۳-۲: الگوریتم برنامه وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی.

برنامه وارون‌سازی به‌گونه‌ای نوشته‌شده است که کمترین اطلاعات اولیه را بخواهد و همان‌طور که

در بالا گفته شد ورودی برنامه تنها شامل تباین چگالی لایه‌ها و یک مدل مصنوعی برای هر لایه می‌باشد. برای شروع برنامه یک مدل اولیه مورد نیاز است که به دو صورت می‌توان مدل اولیه را به دست آورد. ۱- از روی داده‌های گرانی‌سنجی و تباین چگالی هر لایه و با استفاده از رابطه بوت^۱ (رابطه ۷-۳)، که با استفاده از داده‌های اولیه و اختلاف چگالی بین لایه‌ها با استفاده از این رابطه یک مدل اولیه دولایه‌ای به دست می‌آید. ۲- با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و لرزه‌ای منطقه و یا با نظر مفسر. در این مطالعه برای انتخاب مدل اولیه از روش اول استفاده می‌شود با این فرض ضمنی که بی‌هنجاری گرانی در هر ایستگاه در تناسب مستقیم با ضخامت بلوک‌های راست‌گوشه زیر آن است.

$$t_j = \frac{g_j}{2\pi\gamma\Delta\rho}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (7-3)$$

۳-۳- مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی

مدل جمع منشوری سه‌بعدی که برای الگوریتم مغناطیس استفاده شده است همانند مدل منشوری سه‌بعدی الگوریتم گرانی می‌باشد که توسط Plouff (1976) معرفی شده است.

می‌توانیم یک جسم سه‌بعدی را با مجموعه‌ای از بلوک‌های راست‌گوشه مدل‌سازی کنیم. هر منشور در جهت موازی با x و y و z قرار دارد و مغناطیدگی آن $\vec{M} = M(\hat{i}\hat{M}_x + \hat{j}\hat{M}_y + \hat{k}\hat{M}_z)$ و با ابعاد $x_1 \leq x \leq x_2$ و $y_1 \leq y \leq y_2$ و $z_1 \leq z \leq \infty$. اگر بی‌هنجاری مربوط به بلوک در یک میدان منطقه‌ای موازی با $\vec{F} = (\hat{F}_x, \hat{F}_y, \hat{F}_z)$ اندازه‌گیری شود، بی‌هنجاری شدت کلی اندازه‌گیری شده در منشأ، با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta T = C_m M \left[\frac{a_{23}}{2} \log \left(\frac{r-x'}{r+x'} \right) + \frac{a_{13}}{2} \log \left(\frac{r-y'}{r+y'} \right) - a_{12} \log(r + \right. \quad (8-3)$$

$$\left. z_1) - \hat{M}_x \hat{F}_x \tan^{-1} \left(\frac{x'y'}{x'^2 + rz_1 + z_1^2} \right) - \hat{M}_y \hat{F}_y \tan^{-1} \left(\frac{x'y'}{r^2 + rz_1 + x'^2} \right) + \right.$$

^۱ Bott

$$\widehat{M}_z \widehat{F}_z \tan^{-1} \left(\frac{x'y'}{rz_1} \right) \Big|_{\substack{x'=x_2 \\ x'=x_1}} \Big|_{\substack{y'=y_2 \\ y'=y_1}}$$

$$a_{12} = \widehat{M}_x \widehat{F}_y + \widehat{M}_y \widehat{F}_x \quad (9-3)$$

$$a_{13} = \widehat{M}_x \widehat{F}_z + \widehat{M}_z \widehat{F}_x \quad (10-3)$$

$$a_{23} = \widehat{M}_y \widehat{F}_z + \widehat{M}_z \widehat{F}_y \quad (11-3)$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2 + z_1^2 \quad (12-3)$$

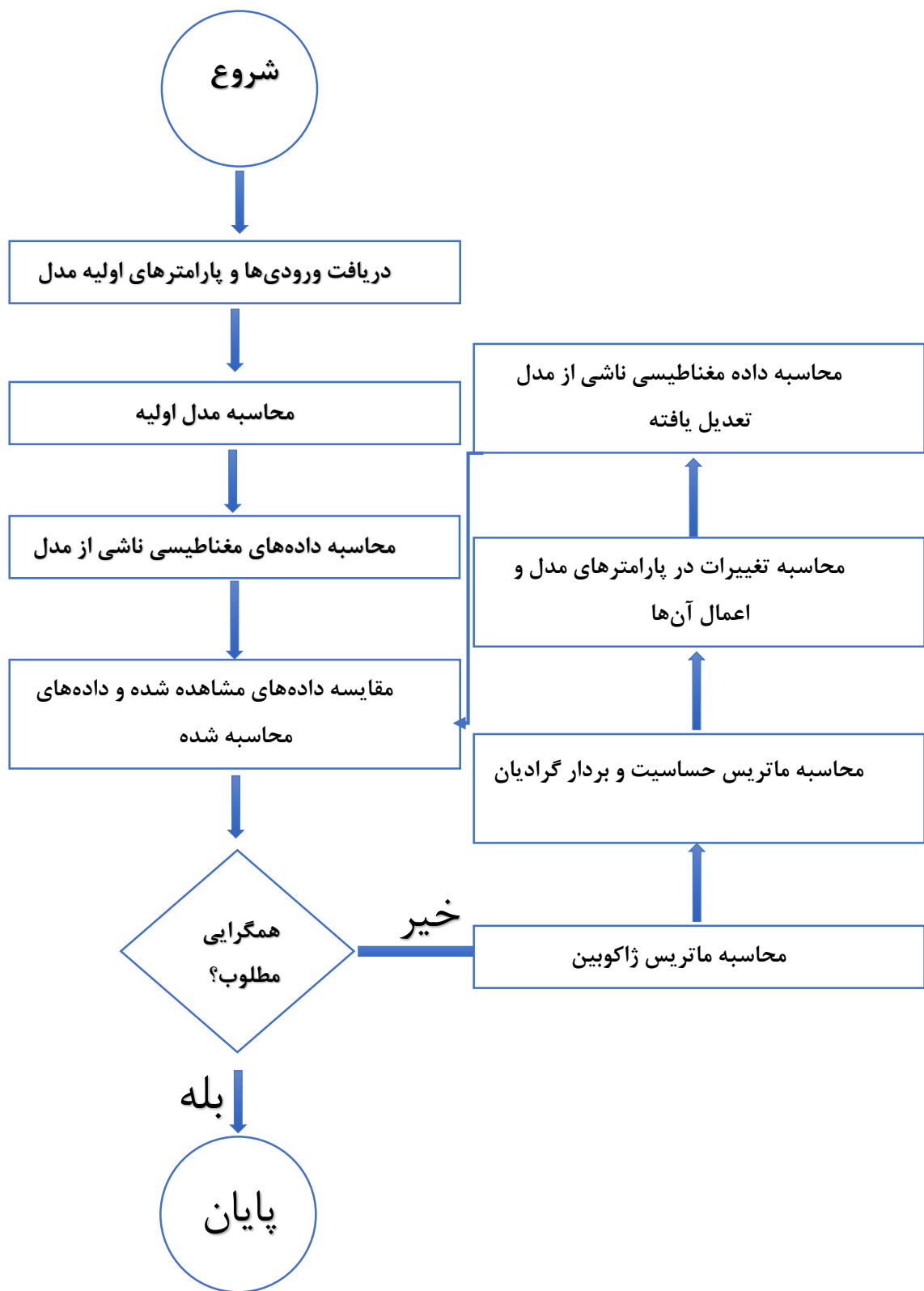
از رابطه (۸-۳) بی‌هنجاری شدت کلی یک بلوک با رویه بلوک در z_1 و انتهای آن در بی‌نهایت حاصل می‌شود. اگر این تساوی دو مرتبه محاسبه شود، یک‌بار برای $M = M_0$ و $z_1 = z_t$ و یک‌بار برای $M = -M_0$ و $z_1 = z_b$ ، در این صورت بر اساس اصل برهم‌نهی، جمع دو محاسبه میدان مغناطیسی یک بلوک با مغناطیدگی M_0 با رویه در z_t و انتهای آن در z_b است. با توجه به اینکه در این مسئله وارون‌سازی پارامترهای مدل ضخامت هر بلوک می‌باشد و همان‌طور که در رابطه (۸-۳) مشاهده می‌شود میدان مغناطیسی ناشی از یک بلوک راست‌گوشه رابطه غیرخطی با ضخامت هر بلوک دارد، بنابراین مسئله پیش رو یک مسئله غیرخطی می‌باشد و با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی زیرفضا حل می‌شود. همان‌طور که در فصل دوم اشاره گردید جهت انجام وارون‌سازی غیرخطی بایستی مشتق‌گیری نسبت به پارامترهای مدل انجام شود. با توجه به این که پارامترهای مدل در این مسئله عمق یا ضخامت بلوک‌ها می‌باشد بنابراین مشتق‌گیری از رابطه (۸-۳) نسبت به z صورت می‌گیرد که نتیجه آن به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial z_1} = M \left\{ [a_{23} \left(\frac{x' z_1}{r(y'^2 + z_1^2)} \right) + a_{13} \left(\frac{y' z_1}{r(x'^2 + z_1^2)} \right) - \right. \quad (13-3)$$

$$\frac{a_{12}}{r} + \hat{M}_x \hat{F}_x \left[\frac{x' y' \left(2z_1 + r + \frac{z_1^2}{r} \right)}{x'^2 y'^2 + (x'^2 + r z_1 + z_1^2)^2} \right] + \hat{M}_y \hat{F}_y \left[\frac{x' y' \left(2z_1 + r + \frac{z_1^2}{r} \right)}{x'^2 y'^2 + (y'^2 + r z_1 + z_1^2)^2} \right] -$$

$$\left. \hat{M}_z \hat{F}_z \left(\frac{x' y' (r^2 + z_1^2)}{(r^2 z_1^2 + x'^2 y'^2) r} \right) \right] \left| \begin{matrix} x' = x_2 \\ x' = x_1 \end{matrix} \right| \left| \begin{matrix} y' = y_2 \\ y' = y_1 \end{matrix} \right| \left. \right\}$$

جهت انجام وارون سازی داده های مغناطیس با استفاده از فرمول های بالا همانند الگوریتم مغناطیس (شکل ۳-۳) برنامه ای در نرم افزار MATLAB تهیه شده است. در مرحله اول پاسخ مغناطیس ناشی از مدل اولیه با استفاده از رابطه (۸-۳) محاسبه می شود و از آنجا بردار اختلاف بین داده های مشاهده ای شده و داده های محاسبه شده از مدل اولیه به دست می آید. در مرحله دوم با استفاده از رابطه (۱۳-۳) ماتریس مشتقات جزئی (ماتریس ژاکوبین) را محاسبه می شود. در مرحله سوم با استفاده از روابط (۴-۳ و ۵-۳) ماتریس حساسیت و بردار گرادیان محاسبه می شود. در مرحله چهارم با استفاده از رابطه (۳-۳) تغییرات پارامترهای مدل به دست آمده و مطابق رابطه با پارامترهای مدل اولیه جمع جبری می شود. حال مدل تعدیل یافته به عنوان مدل اولیه در مرحله اول قرار داده شده و بقیه مراحل تا رسیدن به یک همگرایی قابل قبول دنبال می شود.



شکل ۳-۳: الگوریتم برنامه وارون سازی داده‌های مغناطیس سنجی.

برنامه وارون سازی به گونه ای نوشته شده است که کمترین اطلاعات اولیه را بخواهد و همان طور که در بالا گفته شد ورودی برنامه تنها شامل تباین خودپذیری مغناطیسی لایه ها و یک مدل مصنوعی برای هر لایه می باشد. برای شروع برنامه یک مدل اولیه مورد نیاز است که با استفاده از اطلاعات زمین شناسی و مقطع های لرزه ای منطقه و یا با نظر مفسر انتخاب می شود.

۴- فصل چهارم:

مدل سازی وارون داده‌های مصنوعی گرانی سنجی و

مغناطیس سنجی

۴-۱- مقدمه

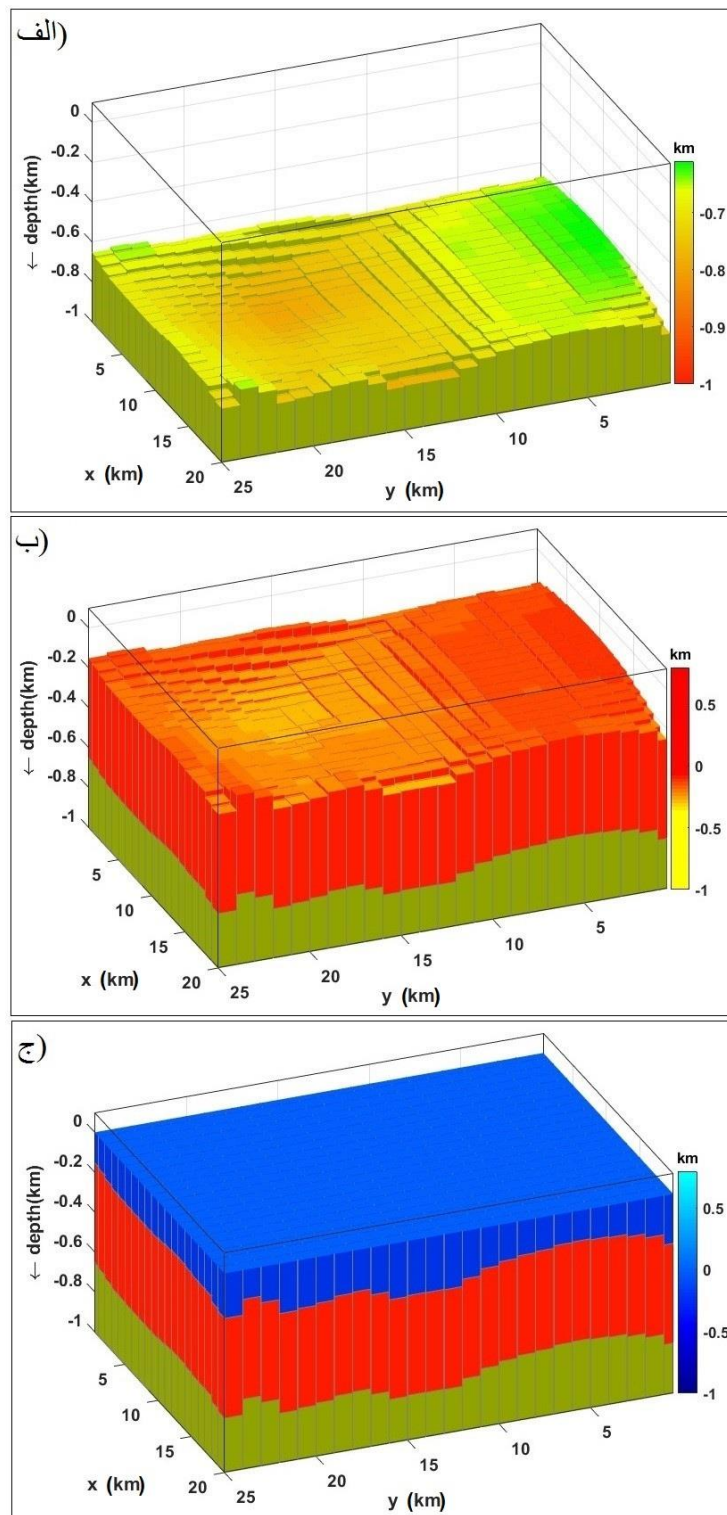
در این فصل به مدل سازی وارون داده های مصنوعی گرانی سنجی و مغناطیس سنجی پرداخته می شود. تمام مراحل وارون سازی به صورت خودکار توسط برنامه نوشته شده در نرم افزار MATLAB اجرا می شود. به منظور نشان دادن کارایی روش، درک چگونگی کارایی روش و جزئیات مربوط به آن، به مدل سازی وارون داده های مصنوعی بدون نوفه و داده های مصنوعی نوفه دار گرانی سنجی و مغناطیس سنجی می پردازیم که نتایج مربوط به مدل سازی در ادامه خواهد آمد.

۴-۲- مدل سازی وارون داده های مصنوعی گرانی سنجی

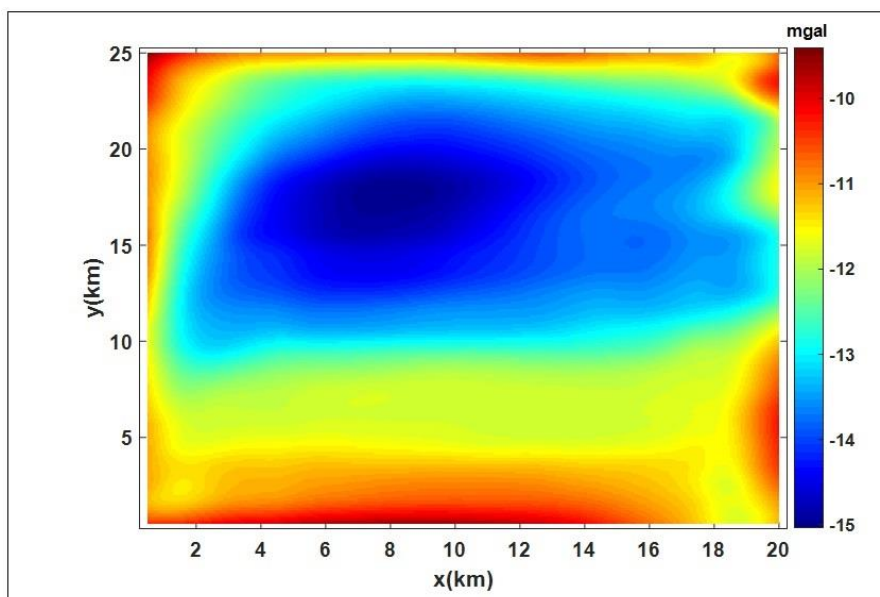
در این بخش به وارون سازی داده های مصنوعی گرانی سنجی پرداخته می شود. برای وارون سازی یک مدل مصنوعی سه لایه در نظر گرفته ایم و در ابتدا داده های حاصل از این مدل مصنوعی محاسبه شده و یک مدل اولیه از روی این داده ها با استفاده از رابطه بوت محاسبه می شود (همانطور که در فصل سوم توضیح داده شده است). ماتریس ژاکوبین بر اساس روابط فصل سوم محاسبه شده و با استفاده از ماتریس ژاکوبین ماتریس حساسیت، بردار گرادیان و بردارهای پایه محاسبه شده و با استفاده از این مقادیر در هر تکرار تغییرات پارامترهای مدل محاسبه شده (روابط بخش (۲-۸)) و با مدل اولیه جمع جبری شده و به عنوان مدل اولیه جدید در نظر گرفته می شود. در هر تکرار به ترتیب داده های حاصل از مدل تعدیل یافته و مشتق پارامترهای مدل (ماتریس Jacobian) محاسبه می شود و با توجه به روابط بخش (۲-۸) وارون سازی صورت می گیرد. با استفاده از بردارهای پایه و ماتریس حساسیت ابعاد ماتریسی که وارون می شود کوچک تر می شود و باعث سریع تر شدن وارون سازی شده و از حالت بدوضع بودن خارج می شود. برای حل مشکل عدم یکتایی و ناپایداری جواب در وارون سازی از پارامتر منظم سازی استفاده شده است که مقدار پارامتر منظم سازی در هر تکرار به قطر اصلی ماتریس حساسیت اضافه می شود.

۴-۲-۱- مدل سازی وارون داده‌های مصنوعی بدون نوفه گرانی سنجی

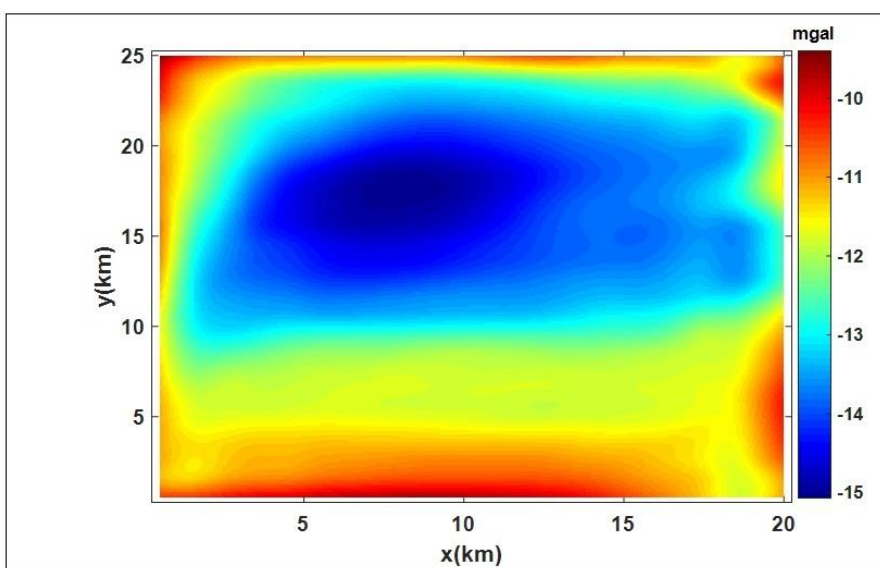
از آنجاکه برای مطالعه لایه‌های نظیر سنگ‌بستر باید ابعادی چند هزار متری را جستجو کرد، فواصل نمونه‌برداری ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین، در این قسمت برای آزمون روش وارون‌سازی از یک مدل مصنوعی دولایه‌ای با ابعاد 25000×20000 متر و با تباین چگالی 0.4 - گرم بر سانتی‌متر مکعب برای لایه دوم و 0.6 - گرم بر سانتی‌متر مکعب برای لایه اول استفاده شده است. برای به دست آوردن مدل اولیه، از رابطه بوت استفاده شده و دولایه برای مدل اولیه با استفاده از داده‌های گرانی به دست آمده است. در شکل (۴-۱) مدل مصنوعی ساخته شده و در شکل (۴-۲) داده‌های حاصل از مدل مصنوعی نشان داده شده است. ورودی برنامه نوشته شده داده‌های اندازه‌گیری شده، تباین چگالی بین رسوبات و سنگ‌بستر و مدل اولیه می‌باشد. ابتدا با استفاده از برنامه پیشرو داده‌های حاصل از مدل مصنوعی محاسبه شده و داده‌های اندازه‌گیری شده را به عنوان یکی از ورودی‌های برنامه در نظر می‌گیریم. سپس با استفاده از مدل سازی وارون این داده‌ها به مدل سه بعدی سنگ‌بستر می‌رسیم. نتایج وارون سازی این داده‌ها که بعد از ۸ تکرار به همگرایی خوبی با مدل مصنوعی رسیده است، در شکل‌های (۴-۳) و (۴-۴) آورده شده که به ترتیب داده‌های محاسبه شده در فرآیند وارون سازی و مدل به دست آمده از وارون سازی می‌باشد. در شکل (۴-۵) میزان خطای RMS نمایش داده شده است که مقدار خطا در تکرار اول از $3/392$ میلی‌گال به 0.125 میلی‌گال در تکرار هشتم رسیده است. در شکل (۴-۶) برازش داده‌های اولیه حاصل از مدل مصنوعی و داده‌های محاسبه شده در فرآیند وارون سازی نمایش داده شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند.



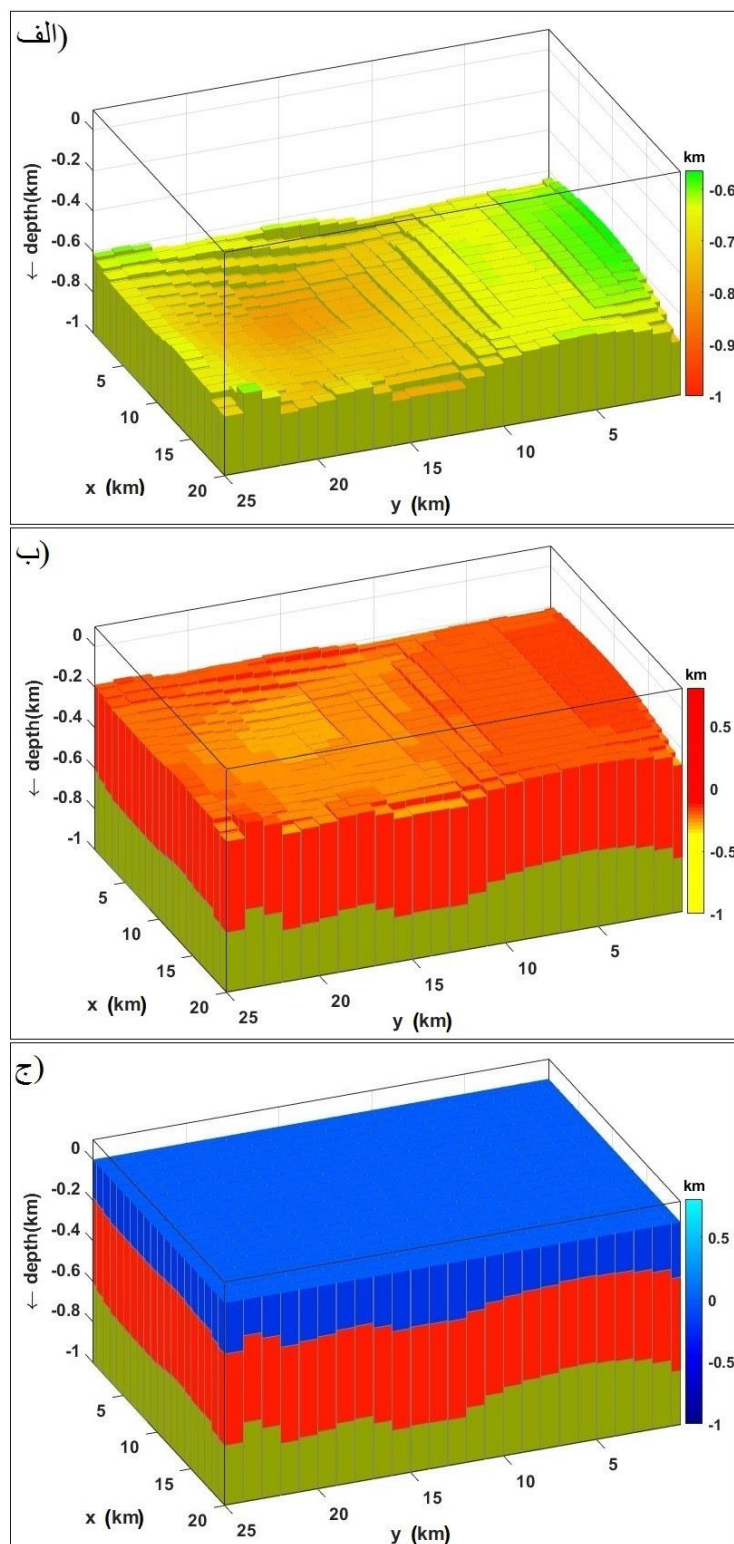
شکل ۴-۱: مدل مصنوعی سه بعدی داده شده به برنامه. الف) مدل لایه سوم ب) مدل لایه دوم و سوم ج) مدل سه لایه



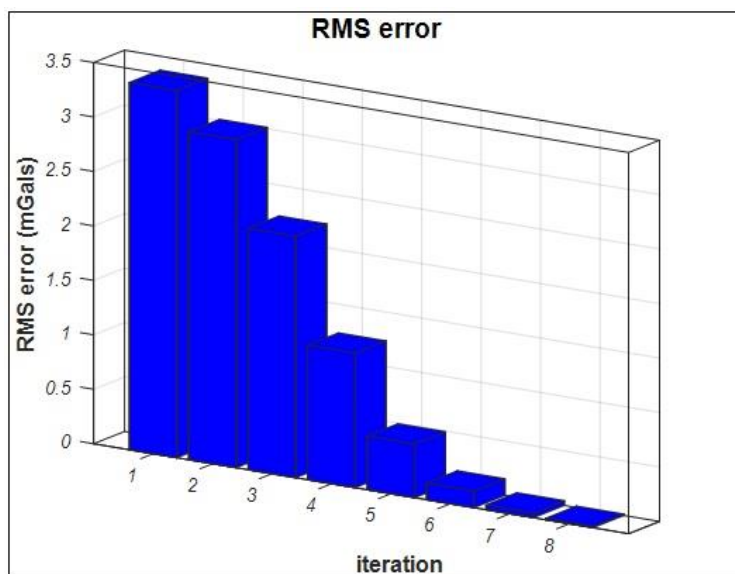
شکل ۴-۲: اثر گرانی حاصل از مدل مصنوعی



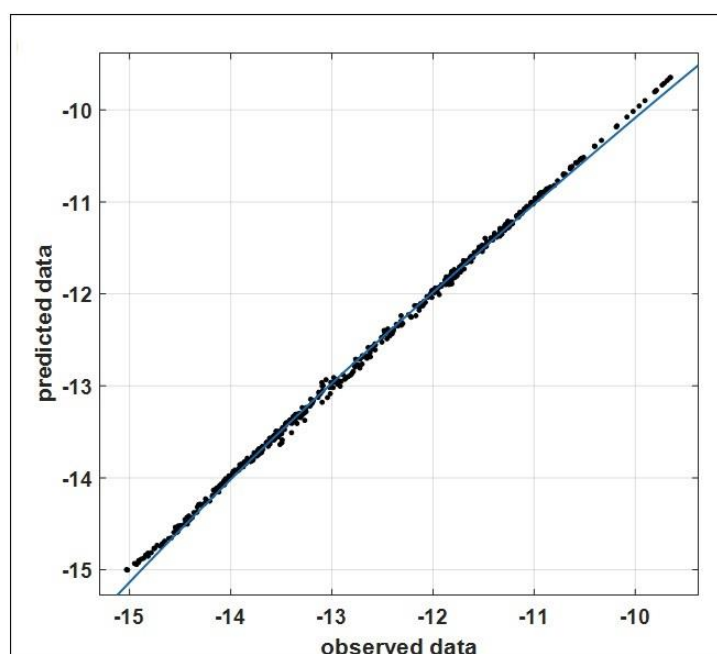
شکل ۴-۳: اثر گرانی حاصل از وارون سازی بدون نوفه.



شکل ۴-۴: مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی داده های گرانی سنجی بدون نوفه. الف) مدل لایه سوم
ب) مدل لایه دوم و سوم ج) مدل سه لایه



شکل ۴-۵: خطای RMS برای ۸ تکرار متوالی برای داده‌های گرانی‌سنجی بدون نوفه



شکل ۴-۶: برازش بین داده‌های گرانی‌سنجی اولیه و داده‌های گرانی‌سنجی محاسبه‌شده از

وارون‌سازی بدون نوفه

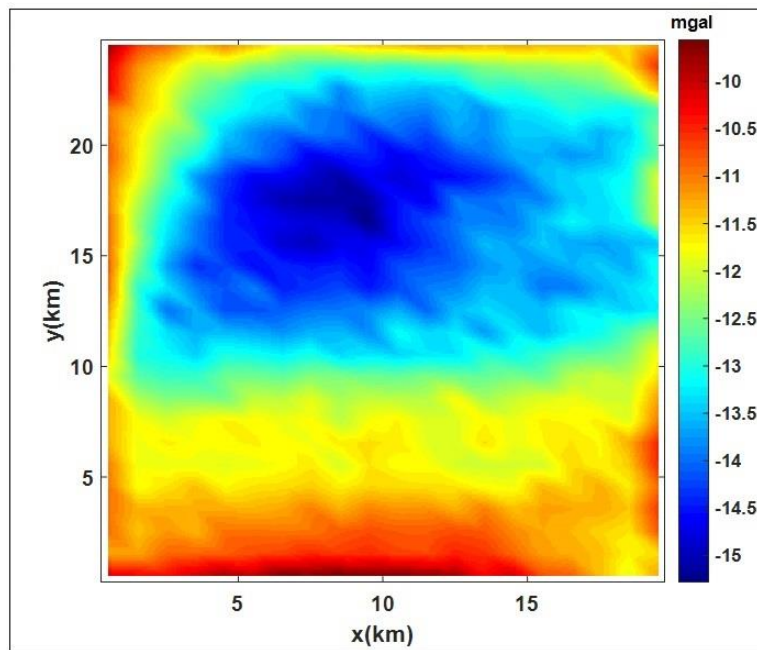
۴-۲-۲-مدل‌سازی وارون داده‌های مصنوعی همراه نوفه گرانی‌سنجی

این مدل مانند مدل مصنوعی بدون نوفه است با این تفاوت که به داده‌ها ۵ درصد نوفه اضافه کرده‌ایم.

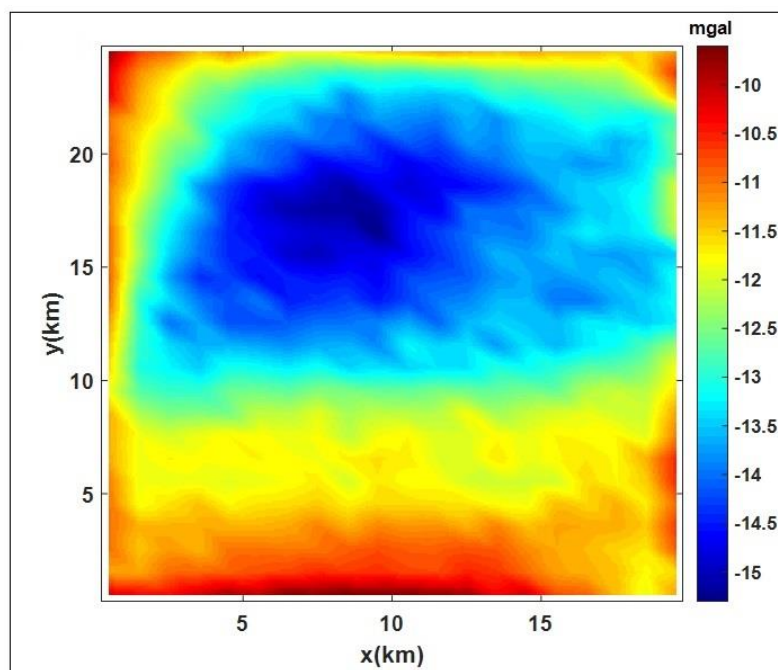
هرقدر هم که داده‌های برداشت‌شده دقیق باشند در عمل داده‌ها همراه با نوفه خواهند بود. که این نوفه می‌تواند به علت عوامل طبیعی یا غیرطبیعی باشد. بنابراین بایستی الگوریتم و برنامه وارون‌سازی در برابر داده‌های همراه با نوفه نیز آزموده شود. نوفه همراه با داده‌های ژئوفیزیکی به‌طور معمول توزیع گوسی یا عددی دارند، بر همین اساس یک منحنی با توزیع گوسی یا عددی با میانگین صفر در نظر می‌گیریم و با توجه به درصد نوفه به سیگنال واریانس منحنی گوسی تعیین می‌شود. بر همین اساس دامنه به‌دست‌آمده از این منحنی به‌صورت تصادفی به داده‌ها اضافه می‌شود. به داده‌های حاصل از مدل مصنوعی ۵ درصد نوفه اضافه‌شده است، داده‌های همراه با نوفه در شکل (۴-۷) نمایش داده‌شده است. روش کار همانند مدل‌سازی وارون داده‌های بدون نوفه است با این تفاوت که به داده‌های اولیه نوفه اضافه کرده‌ایم. ملاک توقف برنامه میزان خطای RMS می‌باشد به این ترتیب که هر زمان خطای RMS ناشی از اختلاف داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی از مقدار RMS نوفه اضافه‌شده کمتر باشد (رابطه ۴-۱) برنامه متوقف می‌شود. نتایج وارون‌سازی این داده‌ها که بعد از ۷ تکرار به همگرایی خوبی با مدل مصنوعی رسیده است، در شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) آورده شده که به ترتیب داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی و مدل به‌دست‌آمده از وارون‌سازی می‌باشد. در شکل (۴-۱۰) میزان خطای RMS نمایش داده‌شده است که مقدار خطا در تکرار اول از ۳/۴۱۲ میلی‌گال به ۰/۱۵۲۳ میلی‌گال در تکرار ۷ام رسیده است. در شکل (۴-۱۱) برازش داده‌های اولیه حاصل از مدل مصنوعی با ۵ درصد نوفه و داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی نمایش داده‌شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N (d_i^{obs} - d_i^{noise})^2} / N \quad (4-1)$$

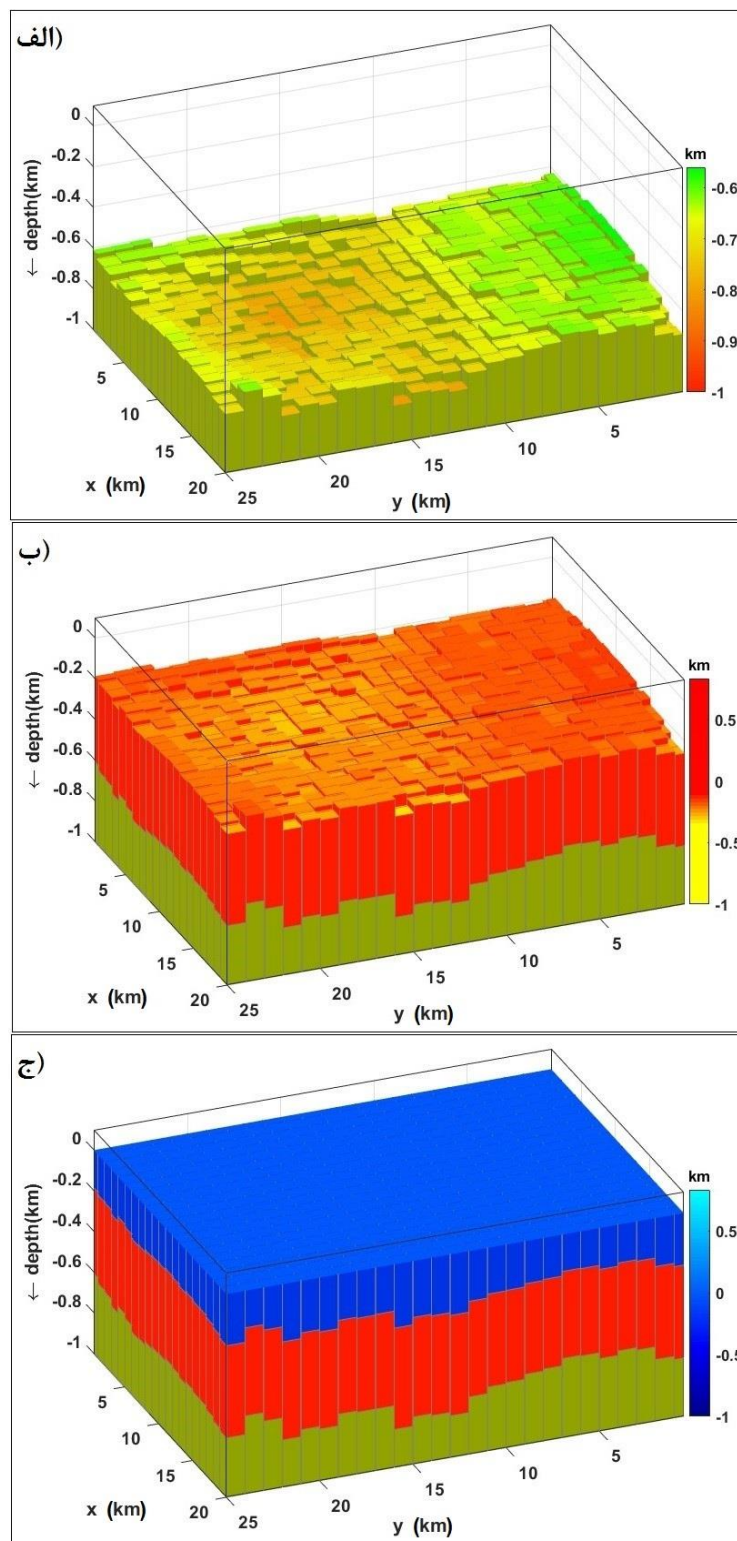
نتایج به‌دست‌آمده از وارون‌سازی داده‌های بدون نوفه و داده‌های همراه با نوفه تأییدکننده صحت الگوریتم و برنامه رایانه‌ای نوشته‌شده است.



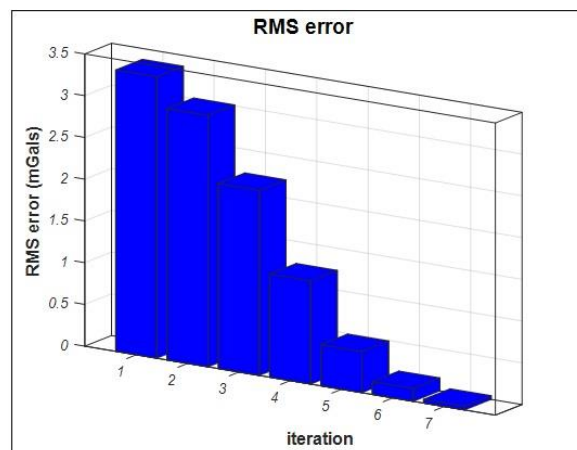
شکل ۴-۷: اثر گرانی حاصل از مدل مصنوعی با ۵ درصد نوفه



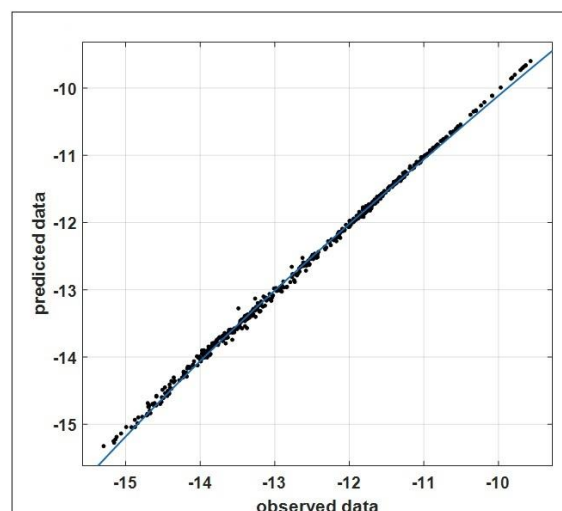
شکل ۴-۸: اثر گرانی حاصل از وارون سازی با ۵ درصد نوفه.



شکل ۴-۹: مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی داده های گرانی سنجی با ۵ درصد نوفه. الف) مدل لایه سوم ب) مدل لایه دوم و سوم ج) مدل سه لایه



شکل ۴-۱۰: خطای RMS برای ۷ تکرار متوالی با ۵ درصد نوفه برای داده‌های گرانی سنجی



شکل ۴-۱۱: برازش بین داده‌های گرانی سنجی اولیه و داده‌های گرانی سنجی محاسبه شده از

وارون سازی با ۵ درصد نوفه

۴-۳- مدل سازی وارون داده‌های مصنوعی مغناطیس سنجی

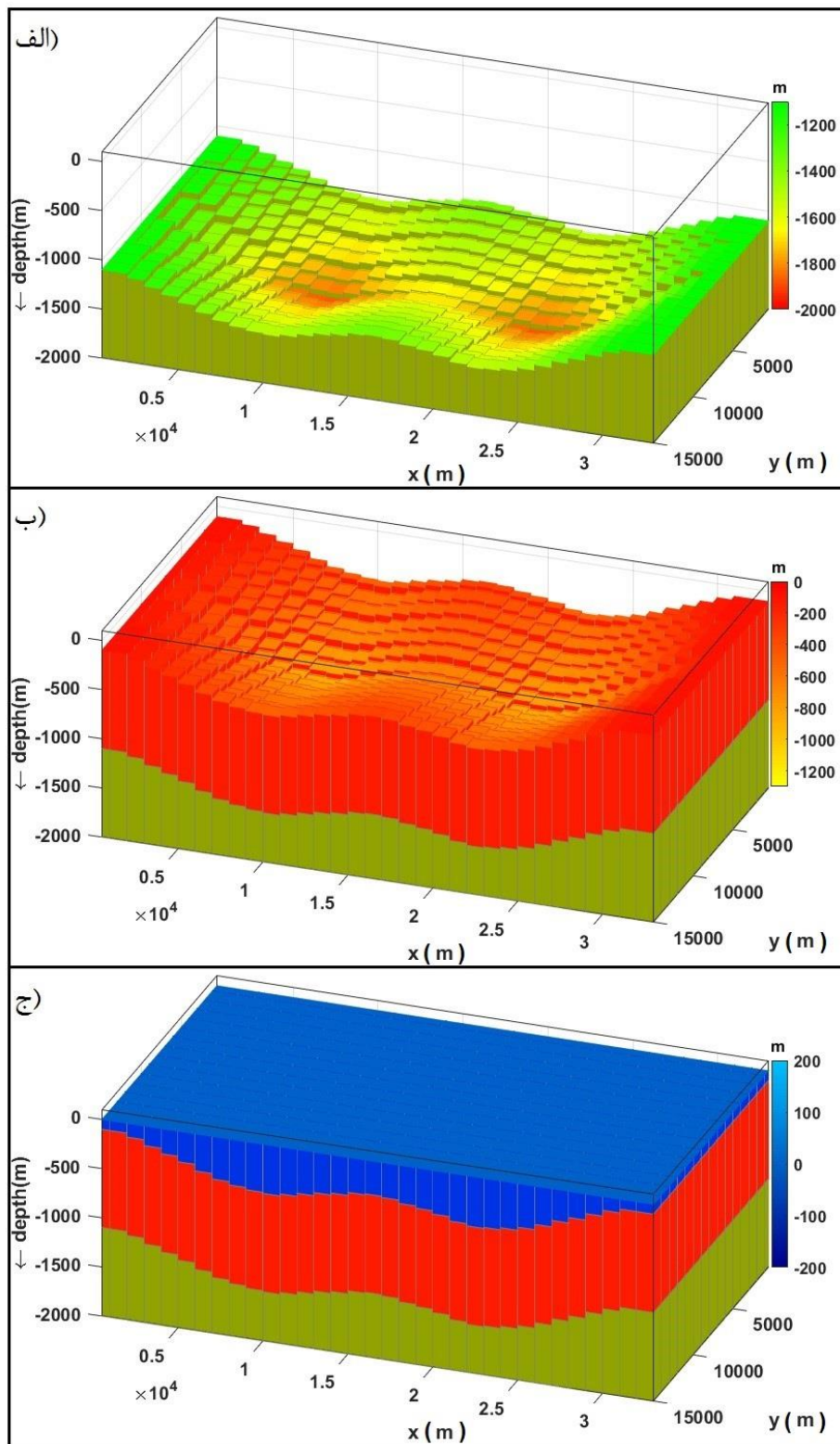
در این بخش به وارون سازی داده‌های مصنوعی مغناطیس سنجی پرداخته می‌شود. برای وارون سازی همانند مدل سازی داده‌های گرانی سنجی یک مدل مصنوعی سه لایه در نظر گرفته ایم و در ابتدا داده‌های حاصل از این مدل مصنوعی محاسبه شده و یک مدل اولیه از روی مقطع‌های لرزه‌ای، اطلاعات

زمین‌شناسی و یا نظر مفسر در نظر گرفته می‌شود. ماتریس ژاکوبین بر اساس روابط فصل سوم محاسبه شده و با استفاده از ماتریس ژاکوبین ماتریس حساسیت، بردار گرادیان و بردارهای پایه محاسبه شده و با استفاده از این مقادیر در هر تکرار تغییرات پارامترهای مدل محاسبه شده (روابط بخش (۲-۸)) و با مدل اولیه جمع‌جبری شده و به عنوان مدل اولیه جدید در نظر گرفته می‌شود. در هر تکرار به ترتیب داده‌های حاصل از مدل تعدیل یافته و مشتق پارامترهای مدل (ماتریس Jacobian) را محاسبه می‌شود و با توجه به روابط بخش (۲-۸) وارون‌سازی صورت می‌گیرد. در وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی همانند وارون‌سازی داده‌های گرانی برای حل مشکل وارون‌سازی از بردارهای پایه، ماتریس حساسیت و پارامتر منظم‌سازی استفاده شده است.

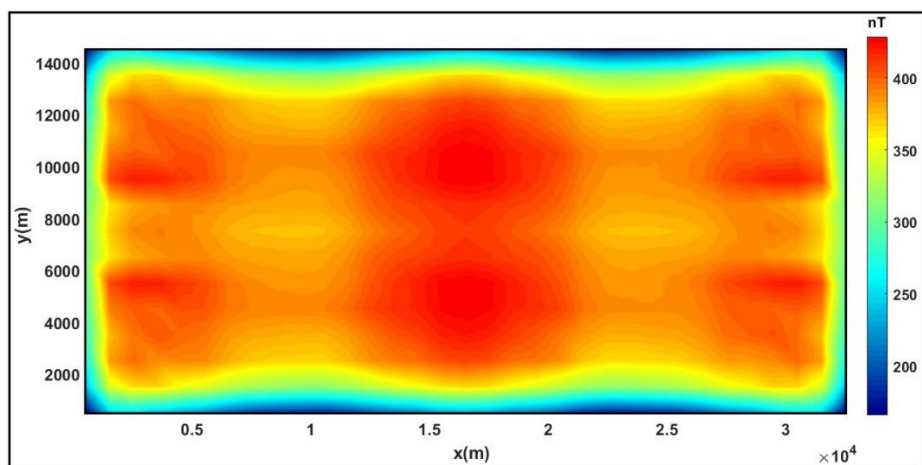
۴-۳-۱- مدل‌سازی وارون داده‌های مصنوعی بدون نوفه مغناطیس‌سنجی

از آنجاکه برای مطالعه لایه‌های نظیر سنگ‌بستر باید ابعادی چند هزار متری را جستجو کرد، فواصل نمونه‌برداری ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین، در این قسمت برای آزمون روش وارون‌سازی از یک مدل مصنوعی دولایه‌ای با ابعاد 15000×33000 متر و با اختلاف خودپذیری مغناطیسی SI -0.02 برای لایه اول و SI -0.04 برای لایه دوم استفاده شده است. در شکل (۴-۱۲) مدل مصنوعی ساخته شده و در شکل (۴-۱۳) داده‌های حاصل از مدل مصنوعی نشان داده شده است. ورودی‌های برنامه نوشته شده شامل: داده‌های اندازه‌گیری شده، اختلاف خودپذیری مغناطیسی بین رسوبات و سنگ‌بستر و مدل اولیه می‌باشد. ابتدا با استفاده از برنامه پیشرو داده‌های حاصل از مدل مصنوعی محاسبه شده و داده‌های اندازه‌گیری شده را به عنوان یکی از ورودی‌های برنامه در نظر می‌گیریم. سپس با استفاده از مدل‌سازی وارون این داده‌ها به مدل سه‌بعدی سنگ‌بستر می‌رسیم. نتایج وارون‌سازی این داده‌ها که بعد از ۸۰ تکرار به همگرایی خوبی با مدل مصنوعی رسیده است، در شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) آورده شده که به ترتیب داده‌های محاسبه شده در فرآیند وارون‌سازی و مدل به دست آمده از وارون‌سازی می‌باشد. در شکل (۴-۱۶) میزان خطای RMS نمایش داده شده است که مقدار خطا در تکرار اول از

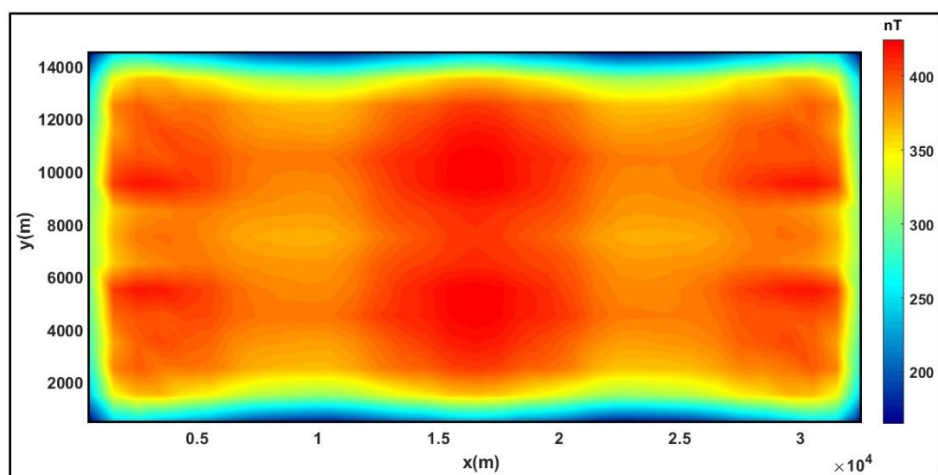
۱۰/۶۱۳۳ نانو تسلا به ۳/۲۱۶۲ نانو تسلا در تکرار ۸۰ام رسیده است. در شکل (۴-۱۷) برازش داده‌های اولیه حاصل از مدل مصنوعی و داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی نمایش داده‌شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند.



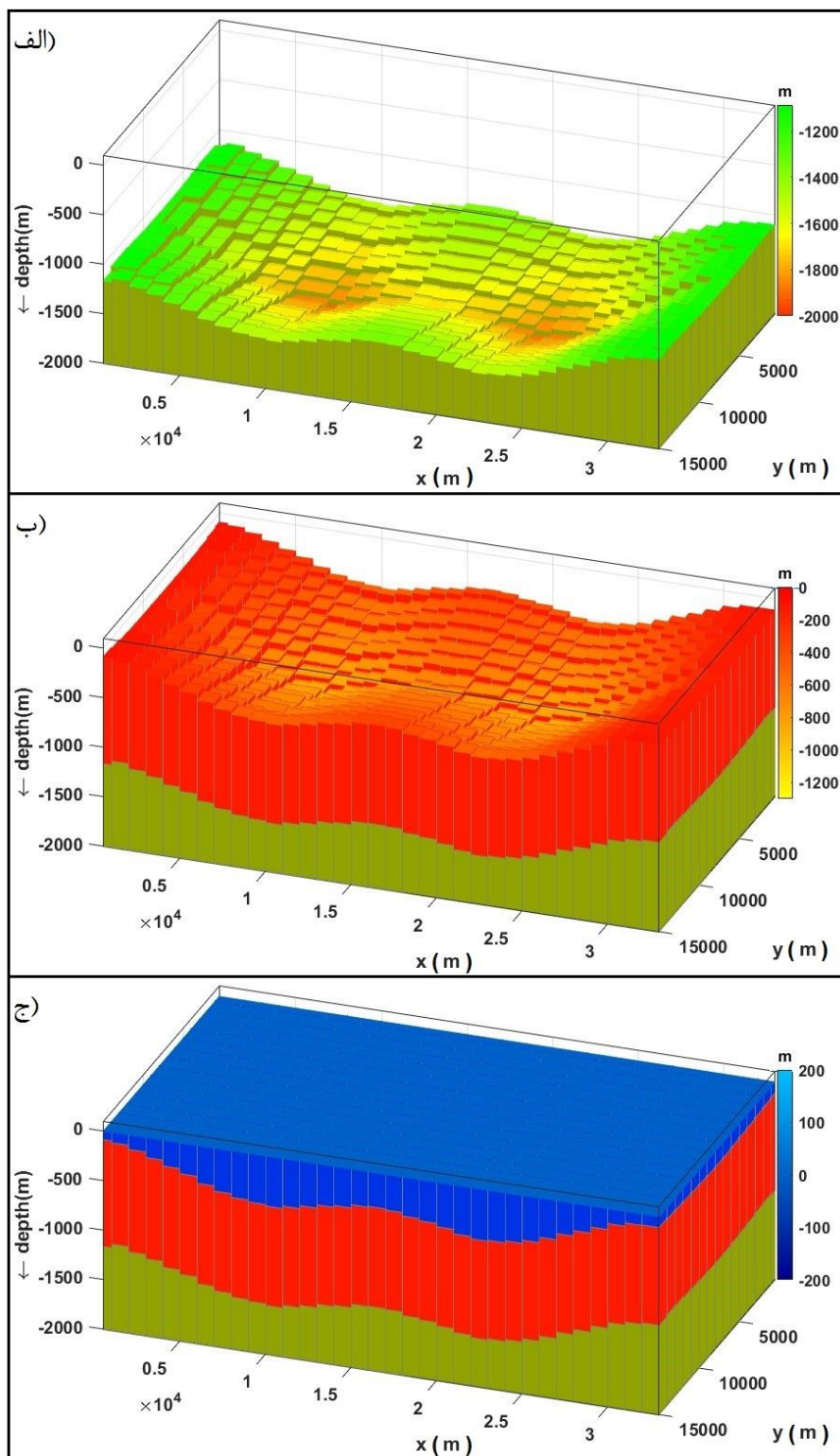
شکل ۴-۱۲: مدل مصنوعی سه بعدی داده شده به برنامه. الف) مدل لایه سوم ب) مدل لایه دوم و سوم
ج) مدل سه لایه



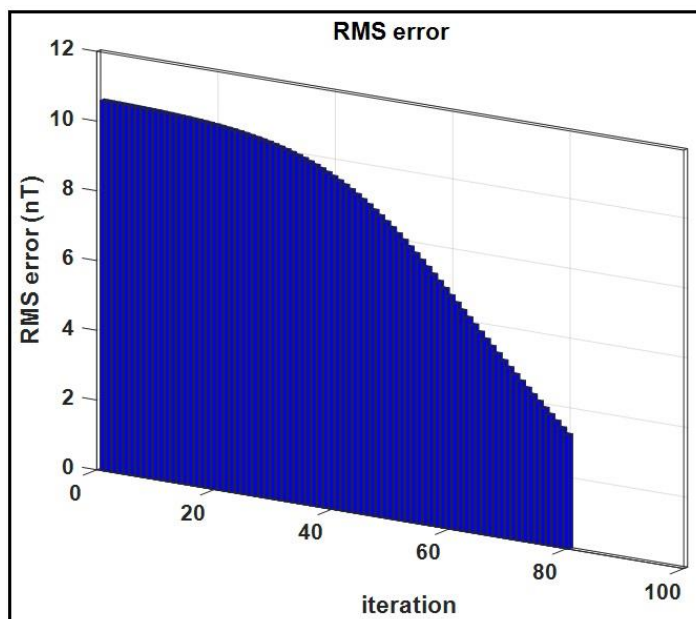
شکل ۴-۱۳: اثر مغناطیسی حاصل از مدل مصنوعی



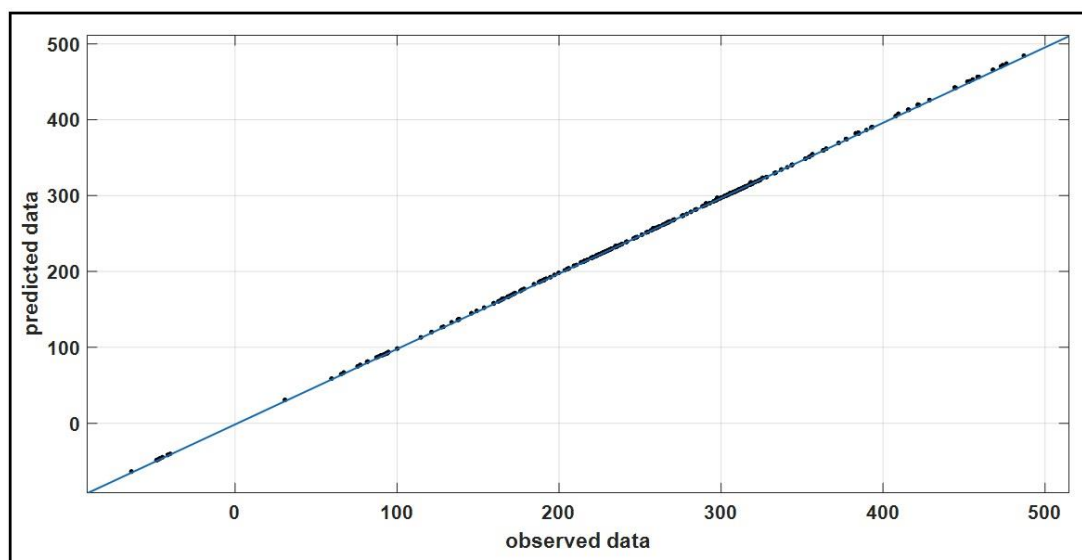
شکل ۴-۱۴: اثر مغناطیسی حاصل از وارون سازی بدون نوفه



شکل ۴-۱۵: مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی داده های مغناطیس سنجی بدون نوفه. الف) مدل لایه سوم ب) مدل لایه دوم و سوم ج) مدل سه لایه



شکل ۴-۱۶: خطای RMS برای ۸۰ تکرار متوالی برای داده‌های مغناطیس‌سنجی بدون نوفه



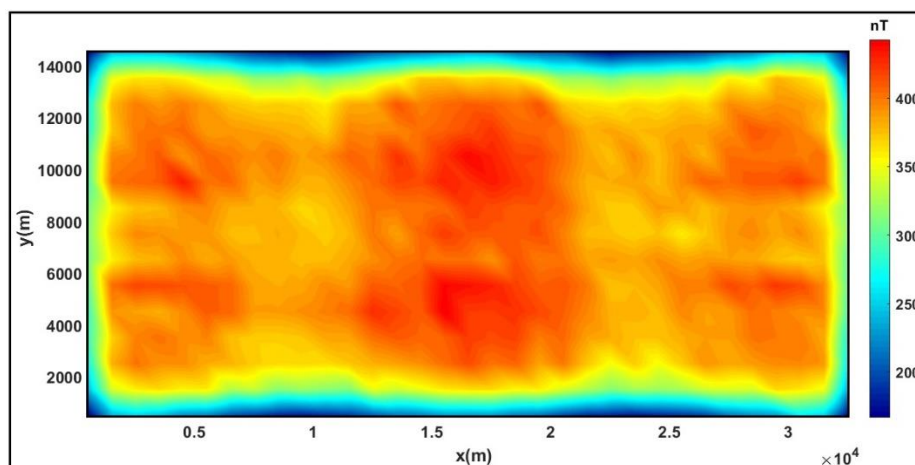
شکل ۴-۱۷: برازش بین داده‌های مغناطیس‌سنجی اولیه و داده‌های مغناطیس‌سنجی محاسبه‌شده از

وارون‌سازی بدون نوفه

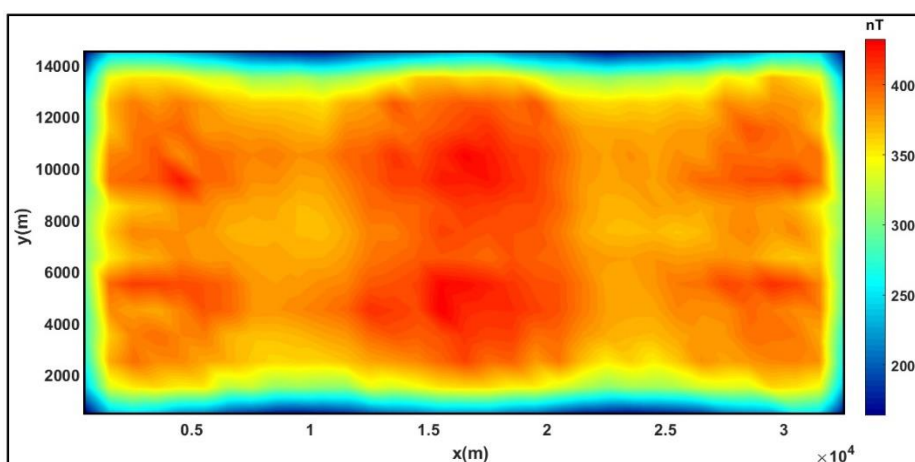
۴-۳-۲- مدل سازی وارون داده های مصنوعی همراه نوفه مغناطیس سنجی

این مدل مانند مدل مصنوعی بدون نوفه است با این تفاوت که به داده ها ۵ درصد نوفه اضافه کرده ایم. به داده های حاصل از مدل مصنوعی ۵ درصد نوفه اضافه شده است، داده های همراه با نوفه در شکل (۴-۱۸) نمایش داده شده است. روش کار همانند مدل سازی وارون داده های بدون نوفه است با این تفاوت که به داده های اولیه نوفه اضافه کرده ایم. ملاک توقف برنامه میزان خطای RMS می باشد به این ترتیب که هر زمان خطای RMS ناشی از اختلاف داده های اولیه و داده های محاسبه شده در فرآیند وارون سازی از مقدار RMS نوفه اضافه شده کمتر باشد (رابطه ۴-۱) برنامه متوقف می شود. نتایج وارون سازی این داده ها که بعد از ۷۰ تکرار به همگرایی خوبی با مدل مصنوعی رسیده است، در شکل های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) آورده شده که به ترتیب داده های محاسبه شده در فرآیند وارون سازی و مدل به دست آمده از وارون سازی می باشد. در شکل (۴-۲۱) میزان خطای RMS نمایش داده شده است که مقدار خطا در تکرار اول از ۱۱/۴۴۵۸ نانو تسلا به ۴/۸۰۱۹ نانو تسلا در تکرار ۷۰ام رسیده است. در شکل (۴-۲۲) برازش داده های اولیه حاصل از مدل مصنوعی با ۵ درصد نوفه و داده های محاسبه شده در فرآیند وارون سازی نمایش داده شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

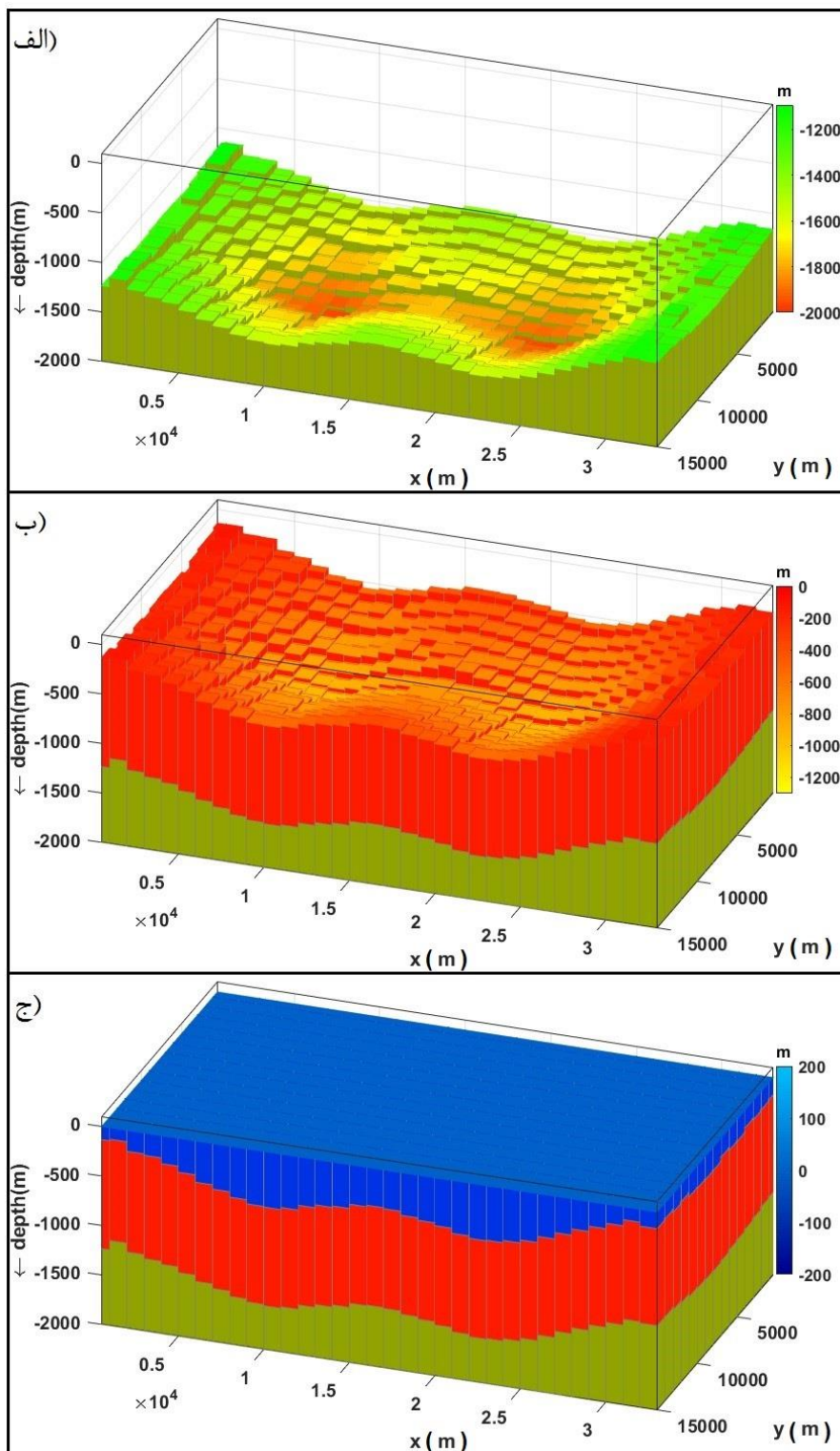
نتایج به دست آمده از وارون سازی داده های بدون نوفه و داده های همراه با نوفه تأیید کننده صحت الگوریتم و برنامه رایانه ای نوشته شده است.



شکل ۴-۱۸: اثر مغناطیسی حاصل از مدل مصنوعی با ۵ درصد نوفه

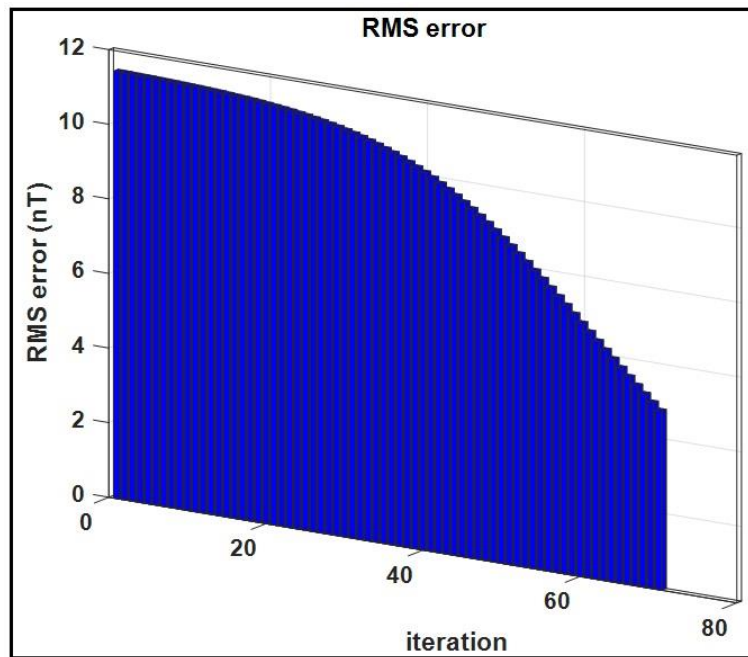


شکل ۴-۱۹: اثر مغناطیسی حاصل از وارون سازی با ۵ درصد نوفه

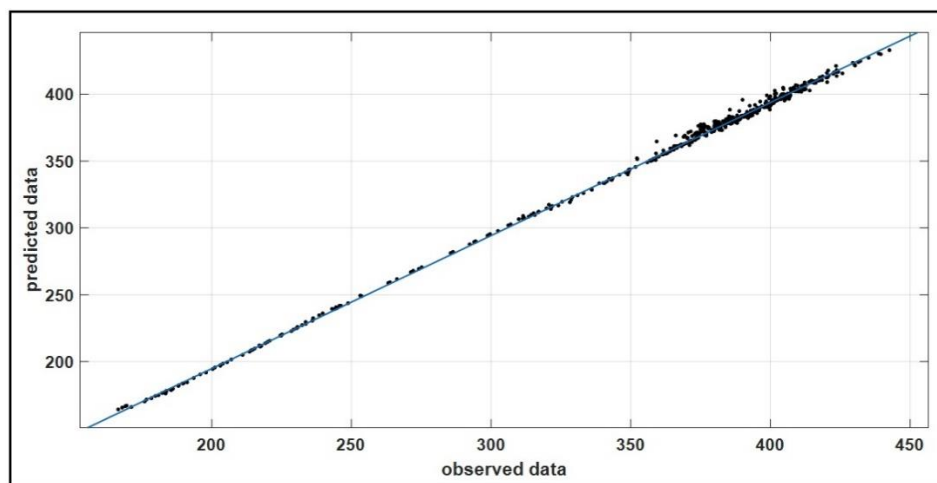


شکل ۴-۲۰: مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی داده های مغناطیس سنجی با ۵ درصد نوفه. الف) مدل لایه سوم

ب) مدل لایه دوم و سوم ج) مدل سه لایه



شکل ۴-۲۱: خطای RMS برای ۷۰ تکرار متوالی با ۵ درصد نوفه برای داده‌های مغناطیس‌سنجی



شکل ۴-۲۲: برازش بین داده‌های مغناطیس‌سنجی اولیه و داده‌های مغناطیس‌سنجی محاسبه‌شده از وارون‌سازی با ۵ درصد نوفه

۵- فصل پنجم:

مدل سازی وارون داده‌های واقعی گرانی سنجی و

مغناطیس سنجی

۵-۱- مقدمه

در این فصل برنامه و الگوریتم کامپیوتری تهیه شده را جهت وارون سازی داده های واقعی گرانی سنجی و مغناطیس سنجی به کار می بریم. بر همین اساس داده های گرانی سنجی مربوط به ناحیه چشایر انگلستان^۱ و داده های مغناطیس سنجی مربوط به اصلاندوز در استان آذربایجان شرقی انتخاب گردیده است.

۵-۲- مدل سازی وارون داده های واقعی گرانی سنجی

۵-۲-۱- زمین شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

سنگ بستر چشایر یکی از سه سنگ بستر مهم در شمال-غرب انگلستان می باشد، دو سنگ بستر مهم دیگر کارلایسل^۲ و دریای ایرلند^۳ هستند. این سه سنگ بستر متعلق به دوره پرموتریاس هستند که با توجه به عمق و گسل های گرابنی و گسل های نیم -گرابنی معرفی شده و همچنین به وسیله رسوبات دوره های پریمن و تریاس پوشانده شده اند. سنگ بستر چشایر به صورت کلی در غرب سنگ بستر لنکشایر^۴ قرار دارد و توسط سنگ بسترهای نزدیک به سطح از این سنگ بستر جدا شده و همچنین توسط سنگ های ضعیف و قوی متعلق به دوره کربونیفر پوشانده شده است. گسترش اندازه گیری زغال سنگ که به صورت شن و ماسه (متعلق به کربونیفر بالای) و ماسه سنگ های کربونیفر (متعلق به کربونیفر پایینی) هستند تنها از طریق داده های حفاری محدود به دست می آید.

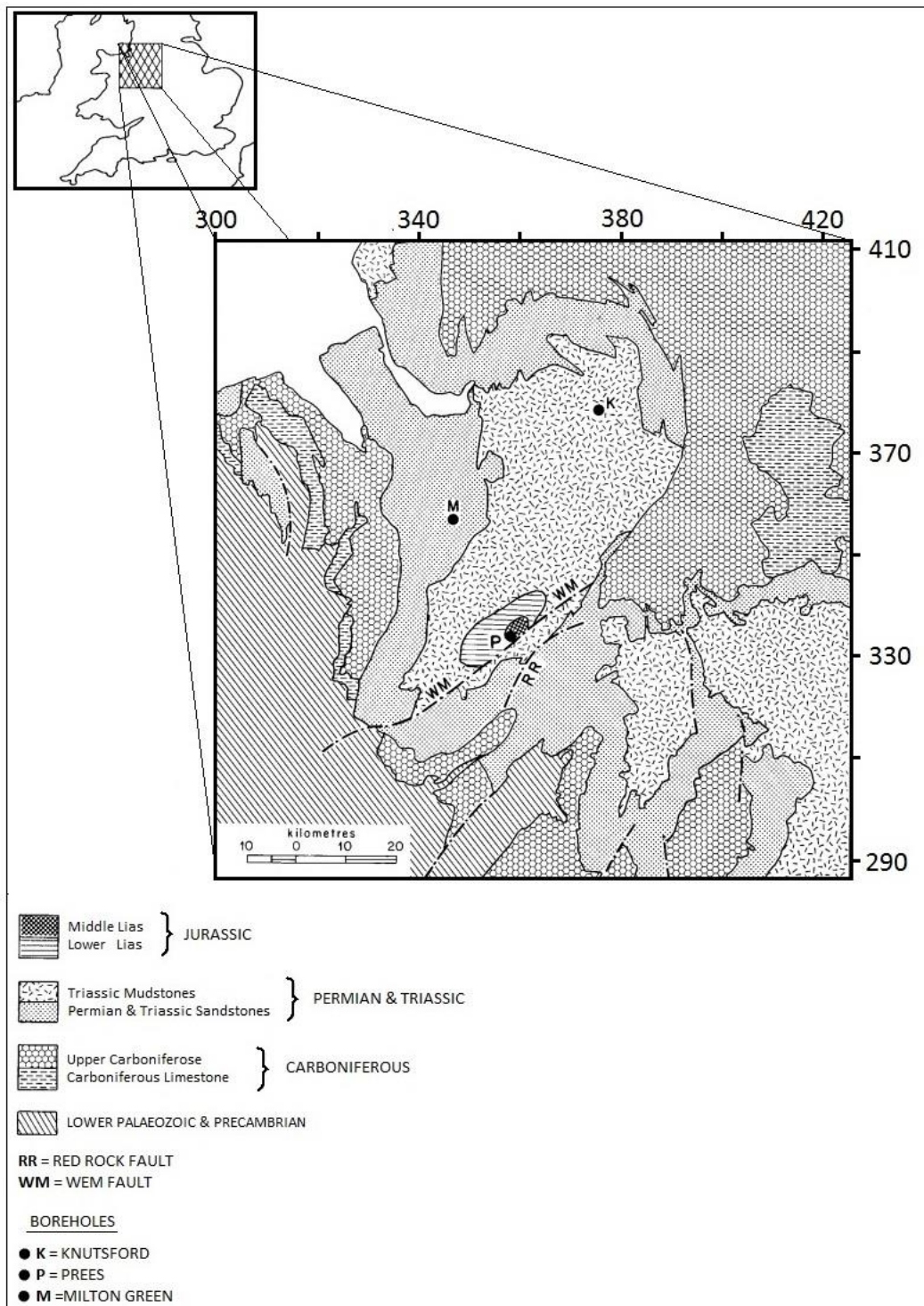
با توجه به نتایج مربوط به داده های گرانی سنجی برداشت شده در منطقه سنگ بستر منطقه گرابن می باشد که توسط گسل های حاشیه ای شرقی - غربی محاط شده است [White, 1984].

^۱ Cheshire England

^۲ Carlisle

^۳ Irish Sea

^۴ Lancashire

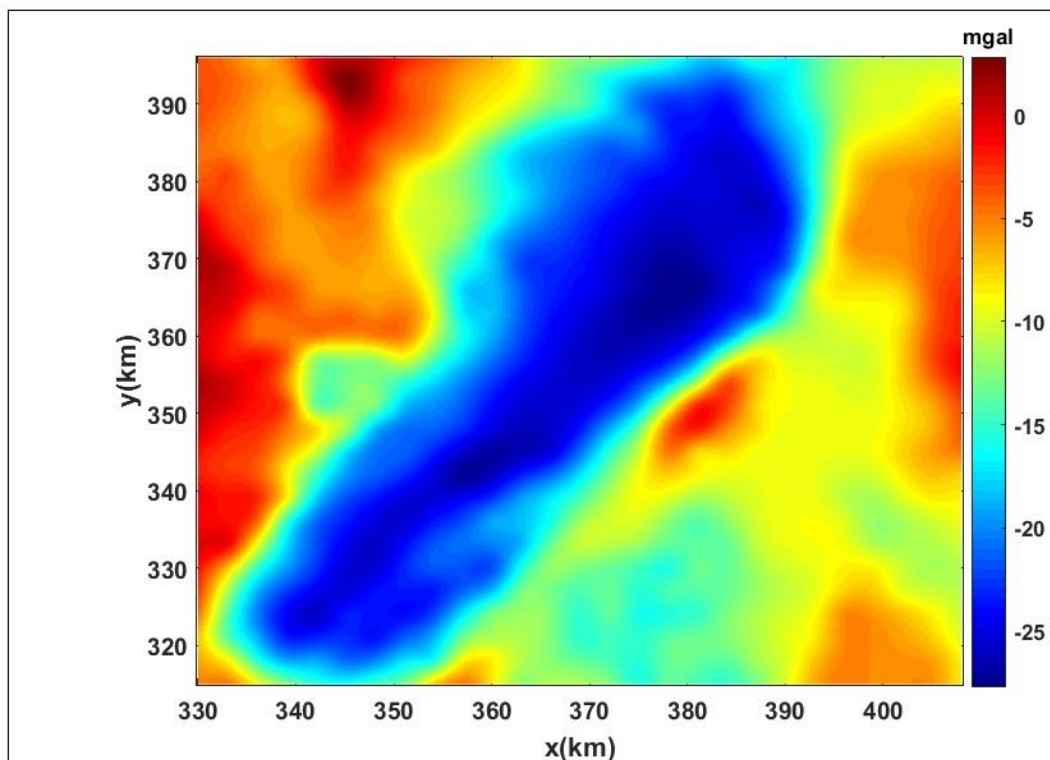


شکل ۵-۱: نقشه زمین‌شناسی چشایر انگلستان [Abdoh, 1990]

۵-۲-۲- نتایج مدل سازی داده های گرانی سنجی

داده های استفاده شده در این مطالعه داده های گرانی سنجی تصحیح شده بوگه در منطقه چشایر انگلستان می باشد. که ۷۵۶ داده در یک شبکه منظم نمونه برداری شده است.

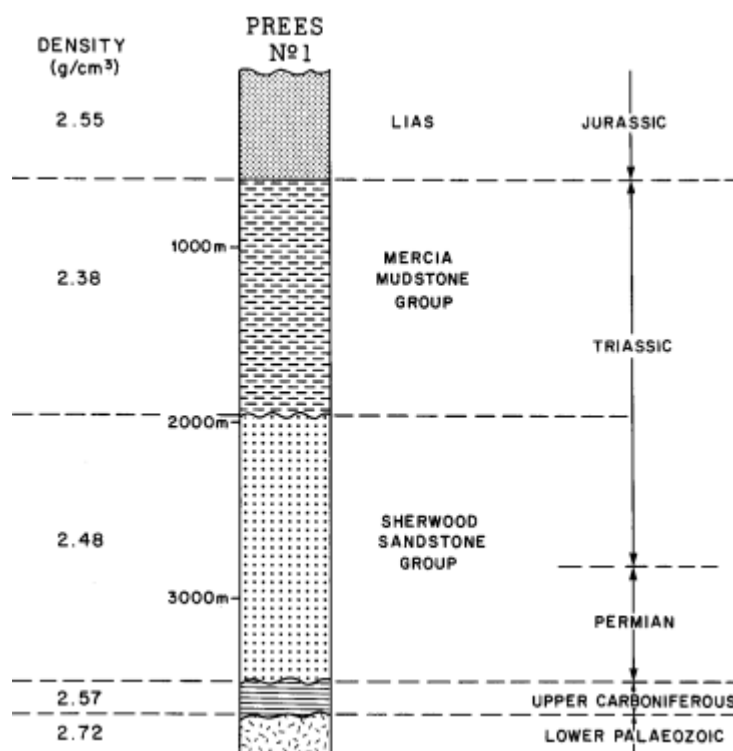
در شکل (۵-۲) داده های گرانی سنجی تصحیح شده بوگه مربوط به محدوده مورد مطالعه جهت انجام وارون سازی آمده است.



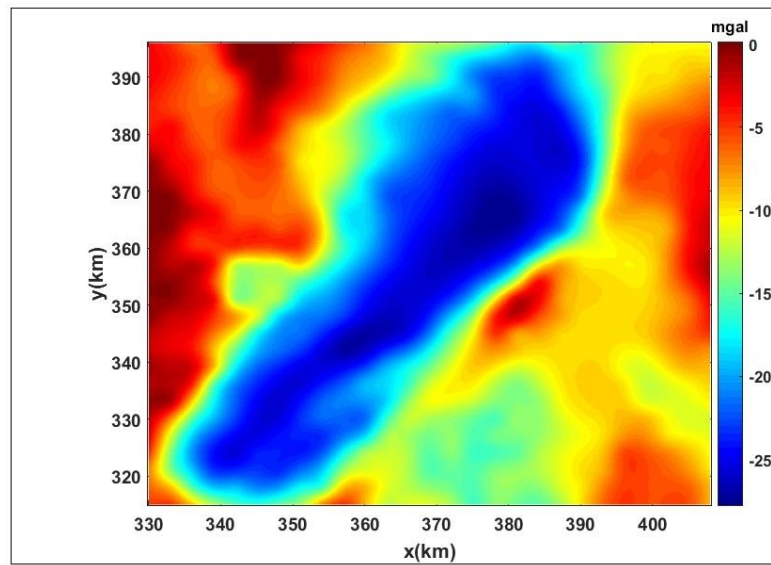
شکل ۵-۲: نقشه گرانی بوگه مربوط به محدوده مورد مطالعه جهت انجام وارون سازی

اختلاف چگالی بین لایه ها که برای وارون سازی در نظر گرفته شده است برای لایه اول ۰/۲۴- گرم بر سانتی متر مکعب و برای لایه دوم ۰/۱۵- گرم بر سانتی متر مکعب می باشد و برای محاسبه اختلاف چگالی بین لایه ها از اطلاعات حفاری در نقطه Prees استفاده شده است که در شکل (۵-۳) آورده شده است. نتایج وارون سازی این داده ها در شکل های (۵-۴) و (۵-۵) آورده شده که به ترتیب داده های محاسبه شده در فرآیند وارون سازی و مدل به دست آمده از

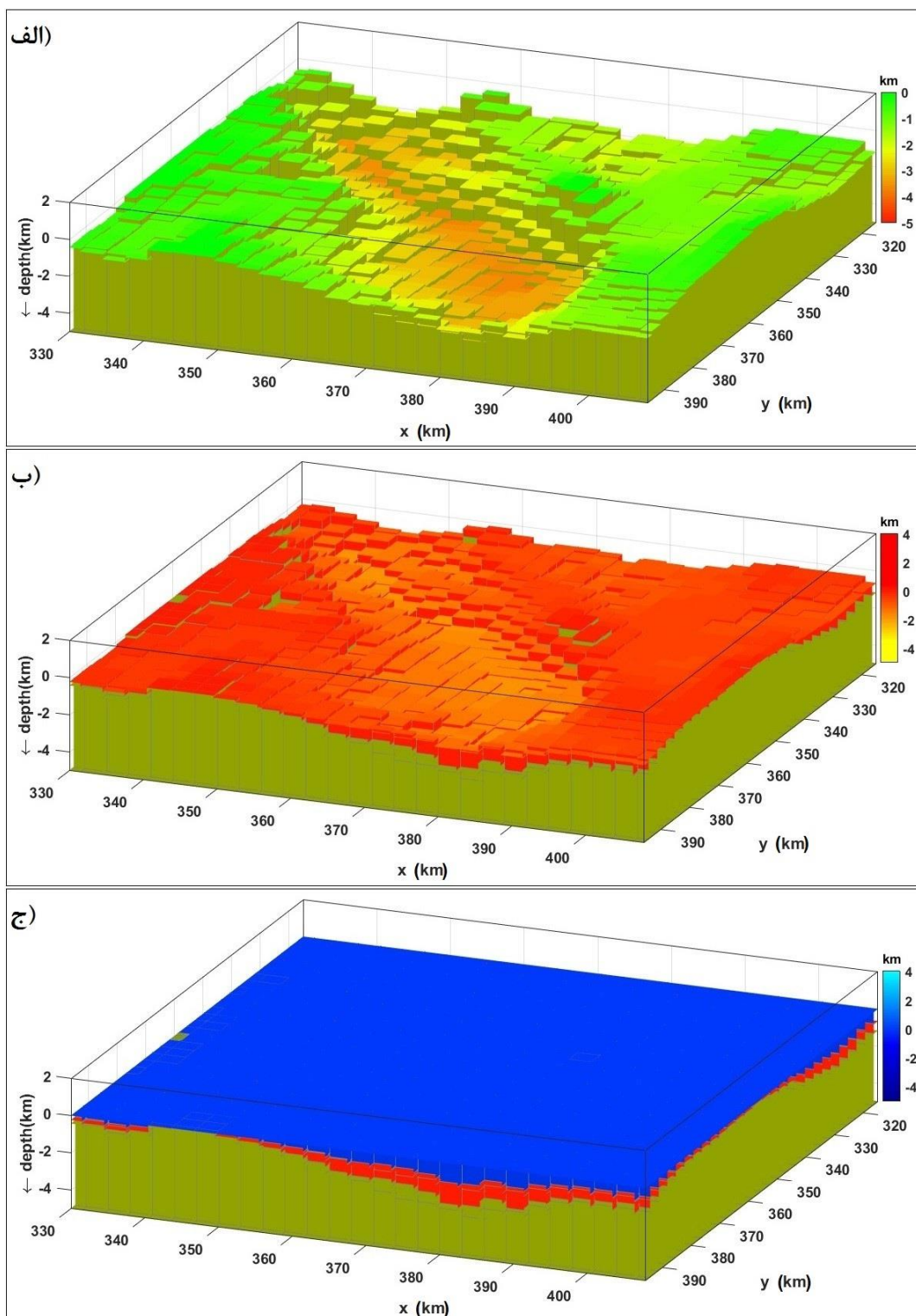
وارون‌سازی می‌باشد. در شکل (۵-۶) میزان خطای RMS نمایش داده شده است که مقدار خطا در تکرار اول از ۴/۵۶۵۷ میلی‌گال به ۰/۲۳۴۵ میلی‌گال در تکرار ۷ام رسیده است. در شکل (۵-۷) برازش داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه شده در فرآیند وارون‌سازی نمایش داده شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند. در منطقه مورد مطالعه سه حفاری در نقاط M، P و K که در نقشه زمین‌شناسی موقعیت آن‌ها مشخص شده‌اند صورت گرفته است، که عمق‌های به دست آمده از وارون‌سازی هم‌خوانی خوبی با حفاری‌ها دارند. در جدول (۵-۱) مقایسه بین حفاری‌های موجود در منطقه و نتایج حاصل از وارون‌سازی آمده است.



شکل ۵-۳: اطلاعات حفاری در نقطه P [Abdoh, 1990]

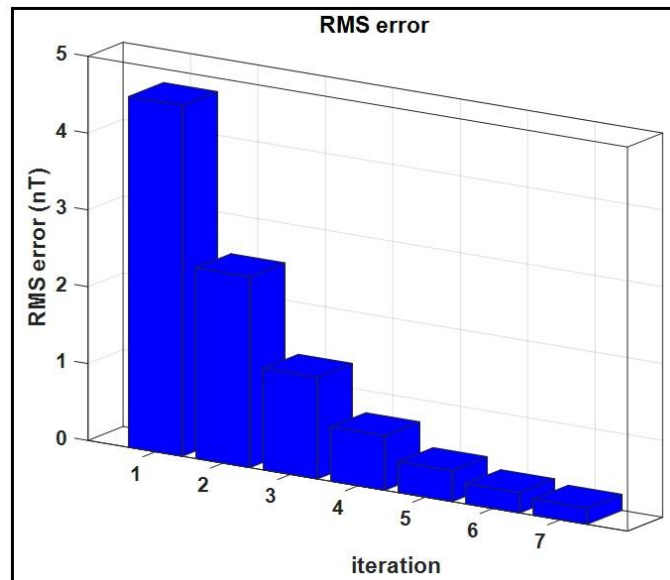


شکل ۵-۴: اثر گرانی حاصل از وارون سازی

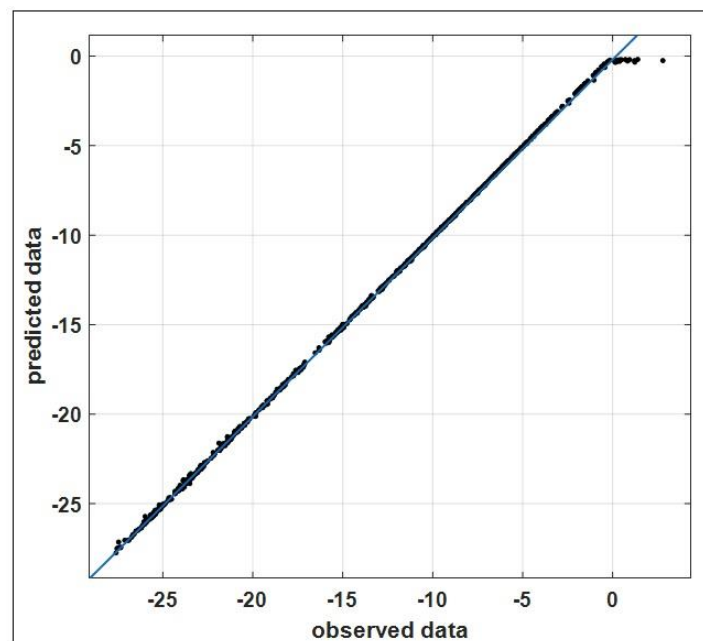


شکل ۵-۵: مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی داده های واقعی گرانی سنجی. الف) مدل لایه سوم ب) مدل

لایه دوم و سوم ج) مدل سه لایه



شکل ۵-۶: خطای RMS برای ۷ تکرار متوالی برای داده‌های واقعی گرانی‌سنجی



شکل ۵-۷: برازش بین داده‌های واقعی گرانی‌سنجی و داده‌های گرانی‌سنجی محاسبه‌شده از

وارون‌سازی

جدول ۵-۱: مقایسه بین حفاری صورت گرفته در منطقه و عمق به دست آمده

عمق به دست آمده (متر)	عمق حفاری (متر)	حفاری
۱۵۰۳	۱۴۸۰	Milton Green
۲۹۶۸	۲۹۹۲	Knutsford
۳۴۹۸	۳۷۲۶	Prees

۵-۳-مدل سازی وارون داده های واقعی مغناطیس سنجی

۵-۳-۱-زمین شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

ورقه اصلاندوز-خدا آفرین در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است و دارای عرض جغرافیایی ۳۹-۳۹,۳۰ و طول جغرافیایی ۴۶,۴۰-۴۷,۳۰ می باشد. چون این ورقه در منطقه مرزی کشوری جای دارد، از این رو ابعاد آن بیرون از استاندارد نقشه های به مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشور است.

کهن ترین نهشته های منطقه اصلاندوز مربوط به کرتاسه پسین می باشد، که از شیل، سنگ های آتشفشانی و آهک تشکیل شده است. ردیفی از توف، مارن های ژئوس دار و کنگلومرا که با دگرشیبی مشخصی بر روی سنگ های کرتاسه قرار گرفته اند، به پالئوسن نسبت داده شده اند. نهشته های ائوسن از مجموعه سنگ های رسوبی تخریبی، آذرآواری و گدازه با ترکیب متوسط بازیک تشکیل گردیده اند. این نهشته ها با دگرشیبی بر روی سنگ های پالئوسن قرار گرفته اند و بیشتر در بخش جنوبی منطقه گسترش یافته اند. از ویژگی های آشکار این رسوب ها وجود آثار گیاهی فراوان است، که در همه واحدهای رسوبی ائوسن دیده می شود. واحدهای الیگوسن-میوسن که به حوضه پاراتینس نسبت داده می شوند، گسترش وسیعی در این ورقه دارند. این رسوب ها با داشتن رخساره مولاسی تغییرات رخساره ای جانبی قابل ملاحظه ای دارند و با دگرشیبی خفیفی، بر روی واحدهای زیرین قرار گرفته اند. نهشته های زمان پلیوسن با دگرشیبی مشخص نهشته های میوسن پسین را می پوشانند، که خود به توسط رسوب های سیستم کواترنر پوشیده شده اند.

از نقطه نظر ریخت‌شناسی دو منظر کاملاً متمایز در منطقه دیده می‌شود:

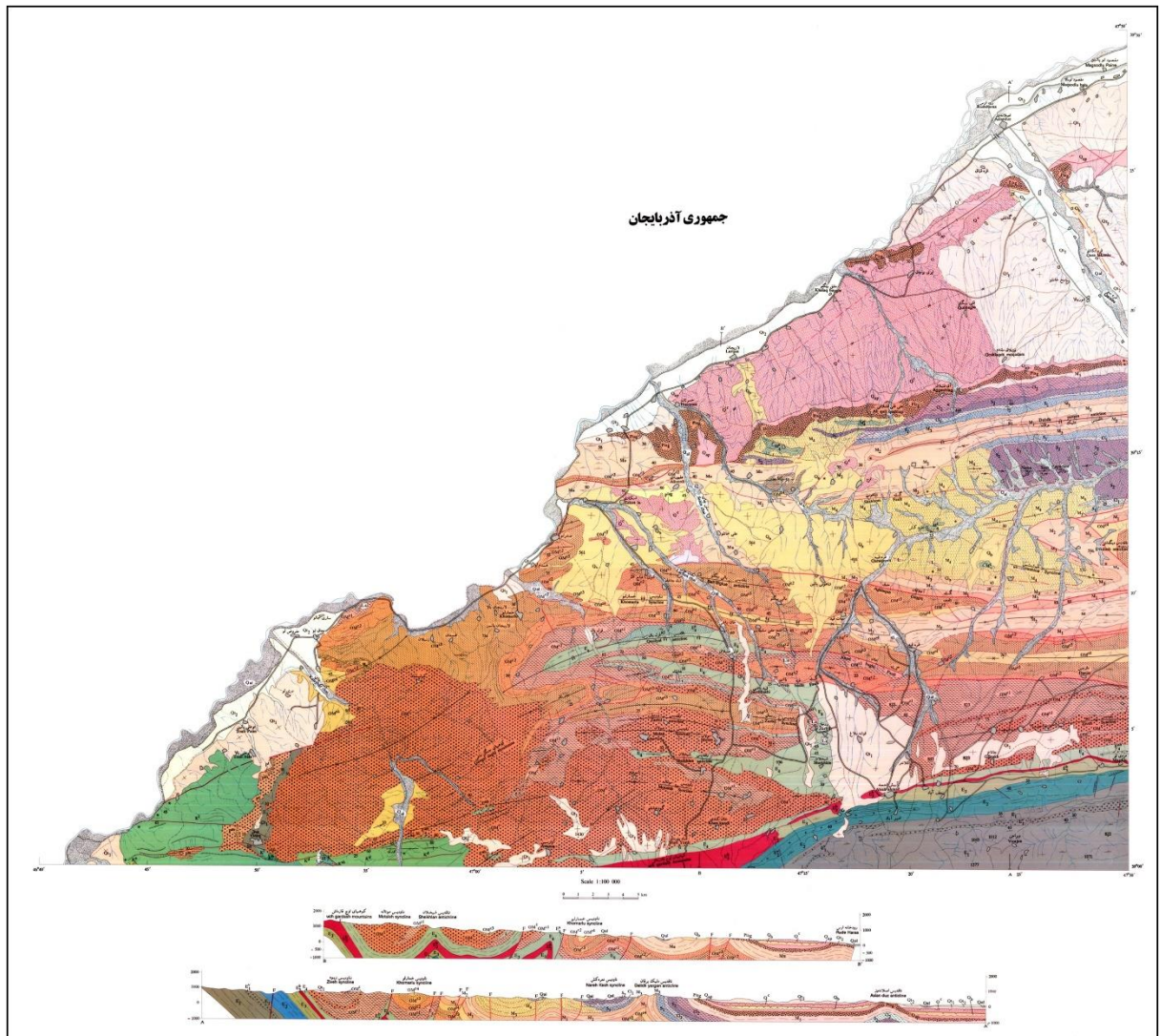
۱- ارتفاعات غربی و جنوبی به علت مقاومت در برابر فرسایش مرتفع و ناهموار باقی‌مانده‌اند، این سنگ‌ها اغلب از سنگ‌های ولکانیکی، آذرآواری ائوسن و آهک‌های کرتاسه تشکیل شده است.

این

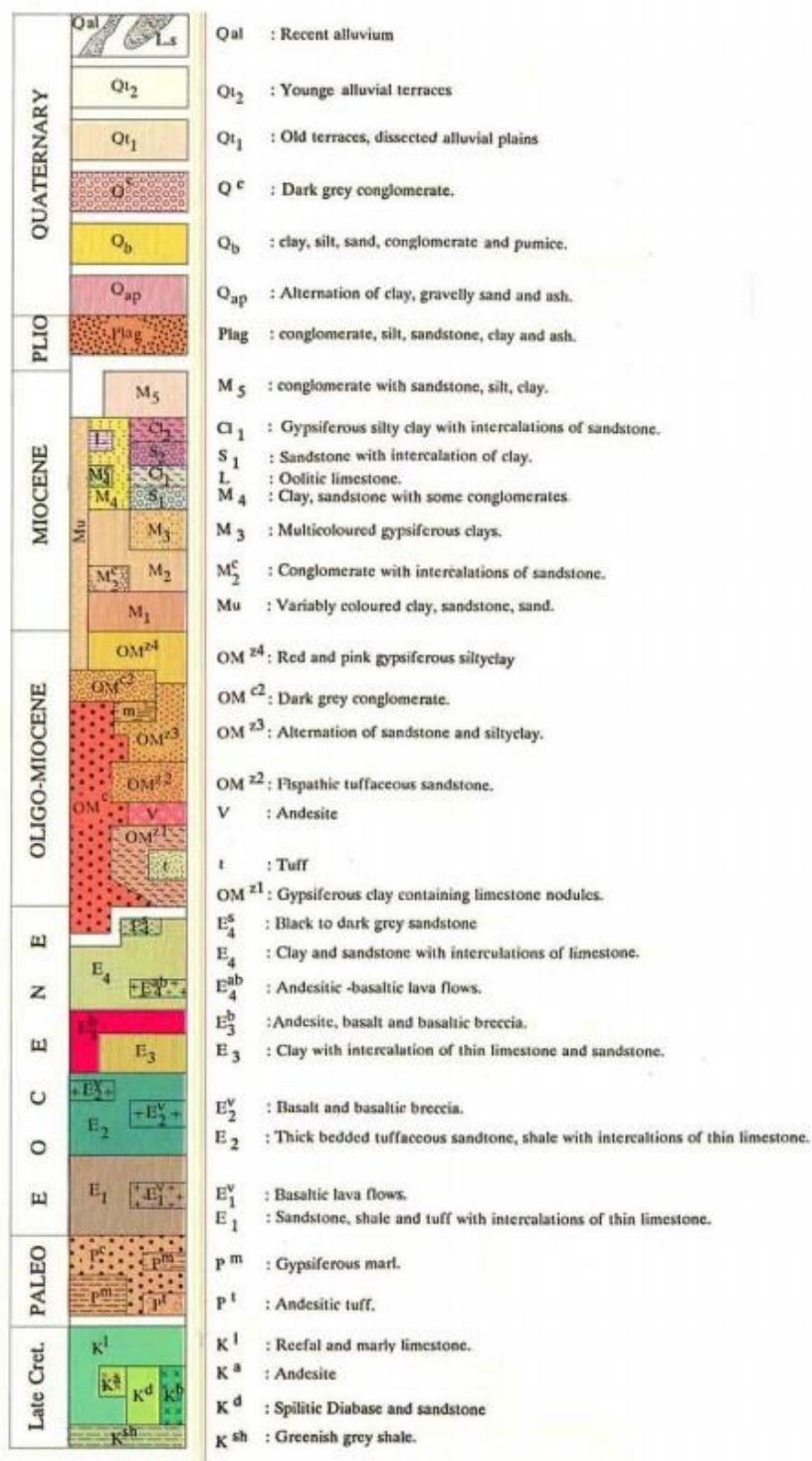
بخش در مقایسه با مساحت کل منطقه بخش بزرگی را نمی‌پوشاند.

۲- برجستگی‌های بخش شمالی و مرکزی که بیشتر از ری، مارن و رسوبات ریزدانه تشکیل شده است. این برجستگی‌ها کم ارتفاع بوده و به‌صورت مرتع یا زمین کشاورزی در منطقه دیده

می‌شود.



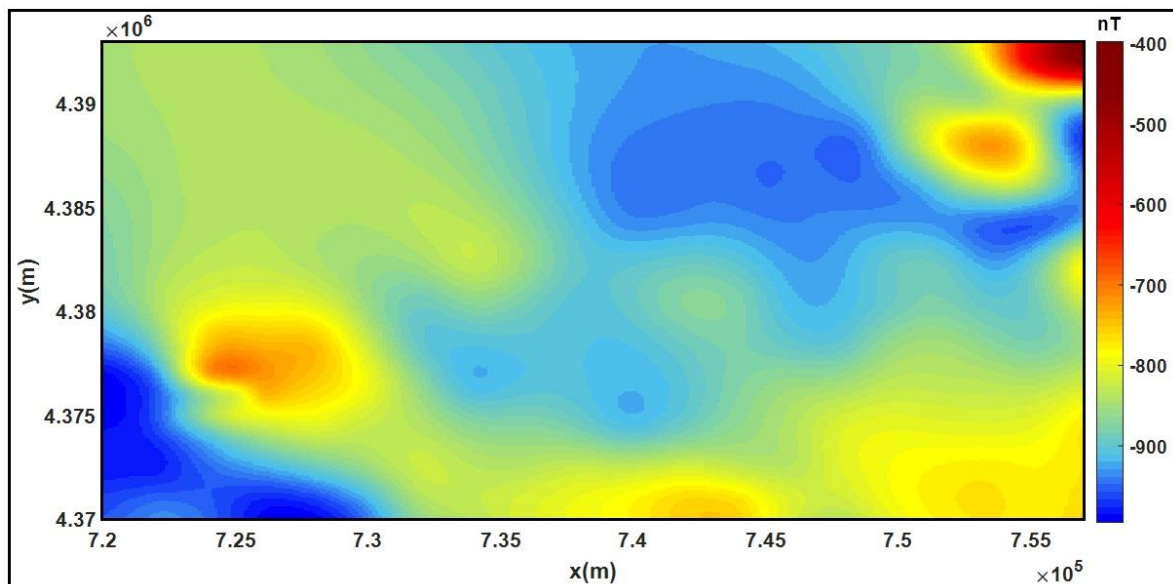
شکل ۵-۸: نقشه زمین‌شناسی منطقه اصلاندوز (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران)



شکل ۵-۹: راهنمای نقشه زمین‌شناسی اصلاندوز (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران)

۵-۳-۲- نتایج مدل سازی داده های مغناطیسی سنجی

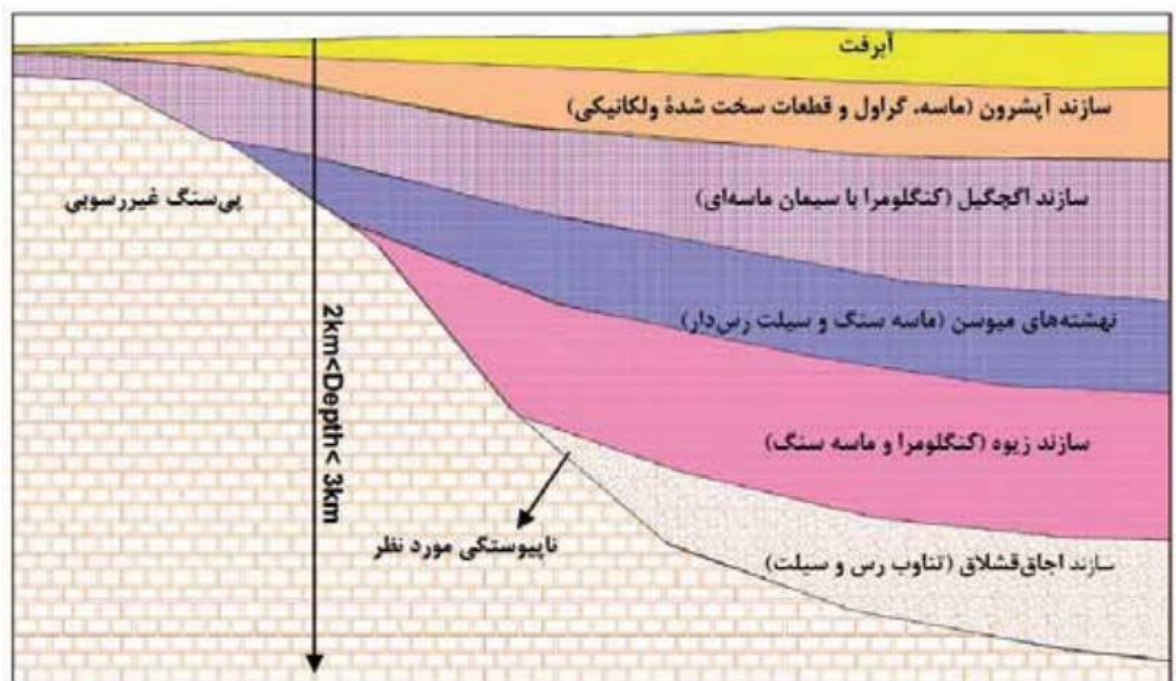
داده های استفاده شده در این مطالعه داده های مغناطیسی سنجی IGRF شده در منطقه اصلاندوز ایران می باشد. که ۹۱۲ داده در یک شبکه منظم با فاصله 1000×1000 متر نمونه برداری شده است. در شکل (۵-۱۰) داده های مغناطیسی سنجی مربوط به محدوده مورد مطالعه جهت انجام وارون سازی آمده است.



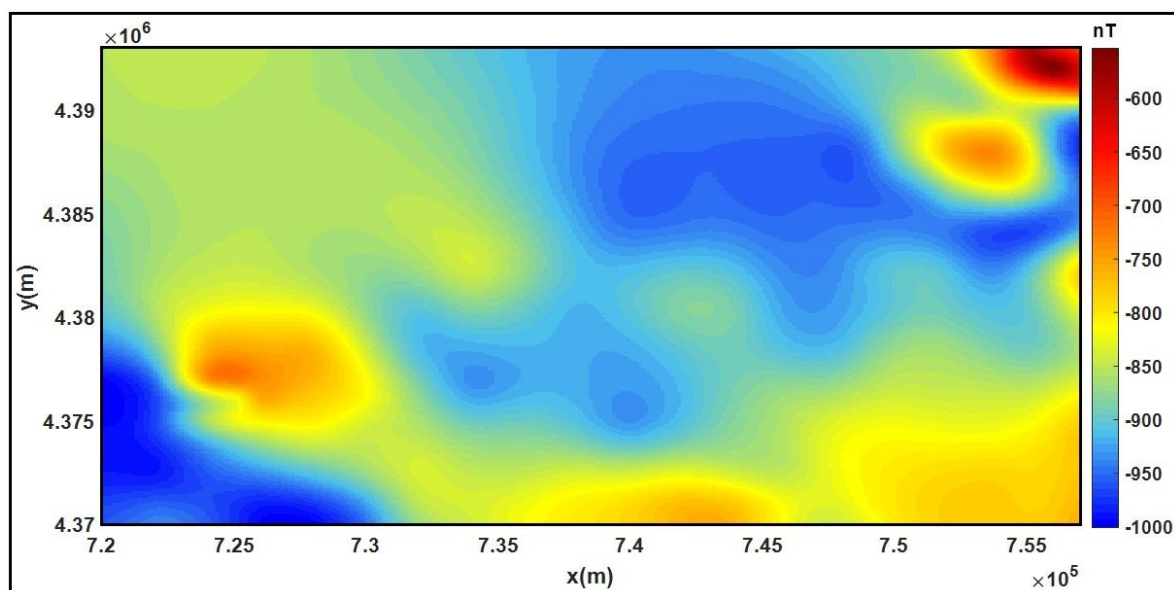
شکل ۵-۱۰: نقشه مغناطیسی مربوط به محدوده مورد مطالعه جهت انجام وارون سازی

اختلاف خودپذیری مغناطیسی بین لایه ها که برای وارون سازی در نظر گرفته شده است، برای لایه اول SI ۰/۰۱۲- و برای لایه دوم SI ۰/۰۰۹- می باشد. برای محاسبه اختلاف خودپذیری بین لایه ها از مقطع زمین شناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شده است که در شکل (۵-۱۱) آورده شده است. نتایج وارون سازی این داده ها در شکل های (۵-۱۲) و (۵-۱۳) آورده شده که به ترتیب داده های محاسبه شده در فرآیند وارون سازی و مدل به دست آمده از وارون سازی می باشد. در شکل (۵-۱۴) میزان خطای RMS نمایش داده شده است که مقدار خطا در تکرار

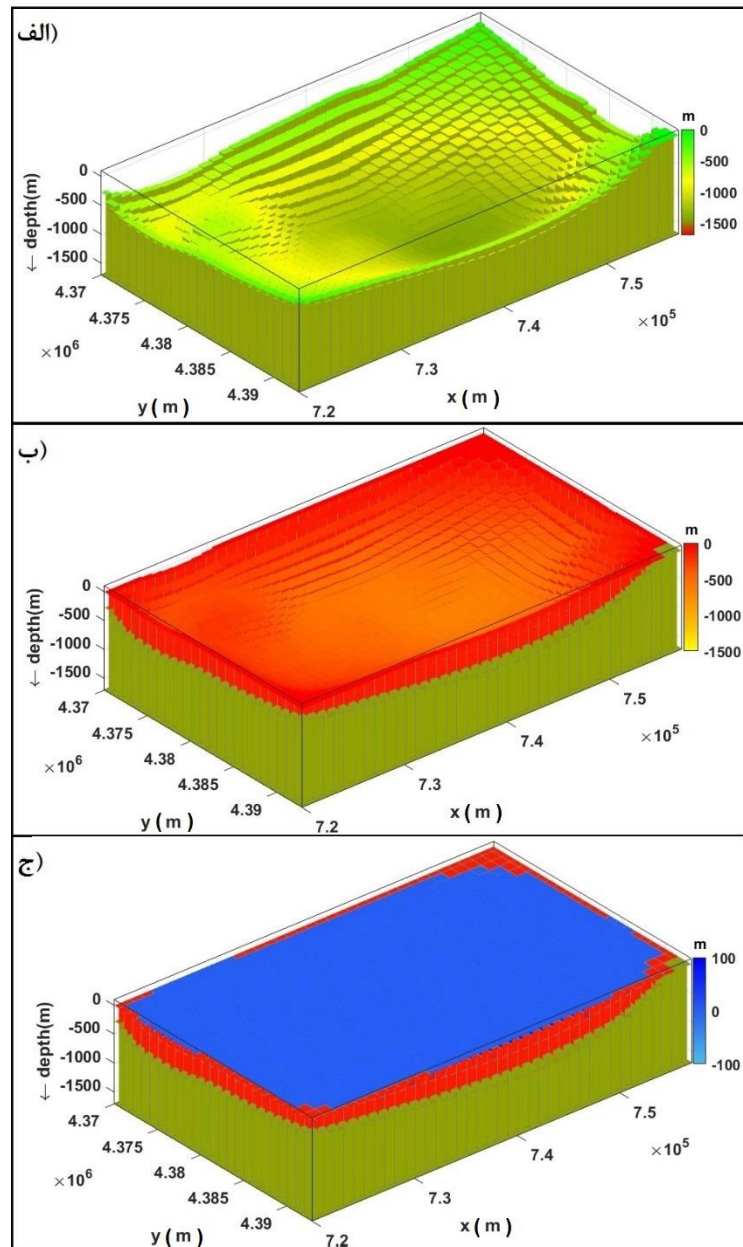
اول از ۱۵۵/۸۹ نانو تسلا به ۱۶/۸۶ نانو تسلا در تکرار ۱۲۰ ام رسیده است. در شکل (۵-۱۵) برازش داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی نمایش داده‌شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند. عمق سنگ‌بستر در قسمت جنوبی منطقه مورد مطالعه ۹۵۰ متر به دست آمده است، و مقطع‌های لرزه‌ای موجود در منطقه عمق سنگ‌بستر را در قسمت جنوبی منطقه مورد مطالعه حدود ۱۰۰۰ متر نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۱: یک مقطع زمین‌شناسی شماتیکی در منطقه مورد مطالعه [Nejati, 2010]

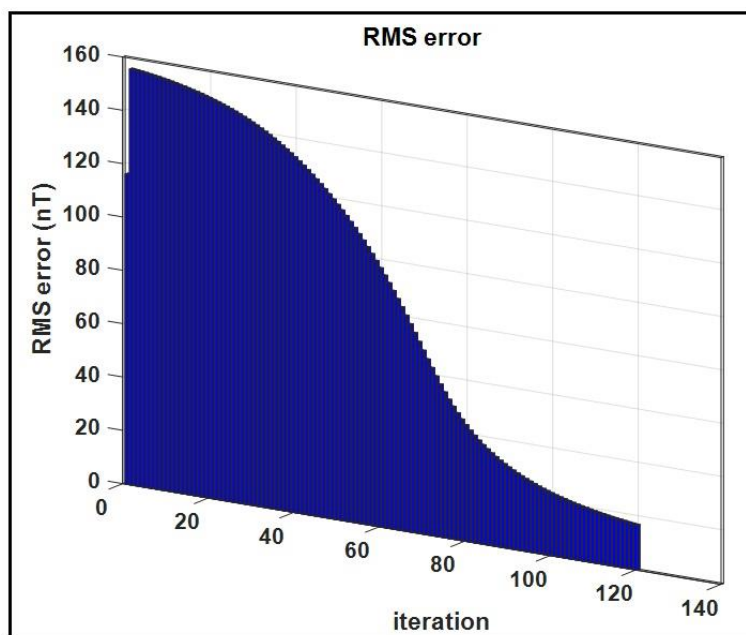


شکل ۵-۱۲: اثر مغناطیسی حاصل از وارون سازی

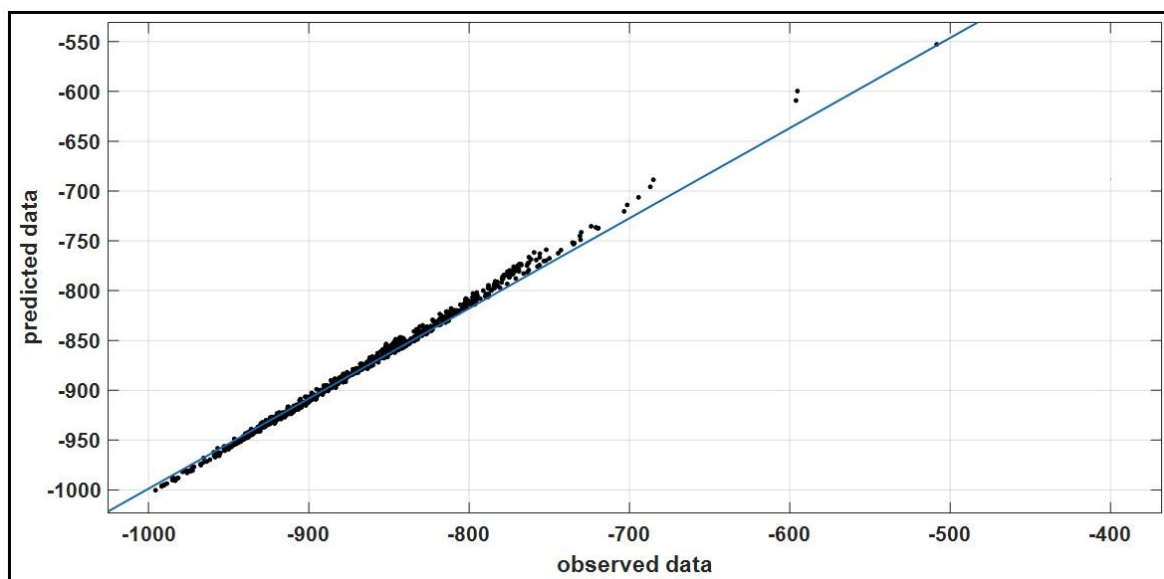


شکل ۵-۱۳: مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی داده های واقعی مغناطیس سنجی. الف) مدل لایه سوم ب)

مدل لایه دوم و سوم ج) مدل سه لایه



شکل ۵-۱۴: خطای RMS برای ۱۲۰ تکرار متوالی برای داده‌های واقعی مغناطیس‌سنجی



شکل ۵-۱۵: برازش بین داده‌های واقعی مغناطیس‌سنجی و داده‌های مغناطیس‌سنجی محاسبه‌شده از

وارون‌سازی

۶- فصل ششم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- نتیجه گیری

تعیین هندسه سنگ بستر و در کنار آن تعیین مرز لایه‌های با تباین چگالی یا خودپذیری در اعماق مختلف امروزه جزو اهداف حیاتی در بسیاری از پروژه‌های اکتشاف هیدروکربوری است و طرح راه کارهای مناسب، کم‌هزینه، آسان و دقیق از اهداف دانشمندان علوم زمین می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی به وارون‌سازی هم‌زمان سه لایه با استفاده از یک دسته داده (گرانی‌سنجی یا مغناطیس‌سنجی) جهت به‌دست آوردن هندسه سنگ‌بستر پرداخته شد.

استفاده از روش SVD برای محاسبه ماتریس Hessian در وارون‌سازی هم‌زمان سه لایه باعث همگرایی سریع و پایداری مدل می‌شود و همچنین در مقابل نوفه پایداری بسیاری دارد. در وارون‌سازی هم‌زمان سه لایه با روش زیرفضا این امکان را می‌دهد که بدون استفاده از داده‌های کمکی و با انتخاب بردارهای پایه مناسب با یک دسته داده می‌توان به خوبی سه لایه را به صورت هم‌زمان مدل‌سازی کرد. در این وارون‌سازی بخاطر استفاده از بردارهای پایه ابعاد ماتریس معکوس کوچک‌تر شده و سرعت مدل‌سازی افزایش می‌یابد.

۶-۲- پیشنهادها

برای به‌دست آوردن جواب‌های دقیق‌تر پیشنهاد می‌شود در منطقه مورد مطالعه وارون‌سازی هم‌زمان داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی و همچنین انجام وارون‌سازی مقید با داشتن چند نقطه عمقی از سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه صورت بگیرد. برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی پیشنهاد می‌شود استفاده از روش GCV بخاطر اینکه در همه تکرارها مقدار پارامتر منظم‌سازی ثابت در نظر گرفته می‌شود، مورد بررسی قرار بگیرد.

منابع و مأخذ

- گزارشات زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در ناحیه آذربایجان شرقی
متشرعی آ.، زمردیان ح.، (۱۳۸۶)، "تعیین عمق سنگ‌بستر با استفاده از روش گرانی‌سنجی در
منطقه جنوب زاگرس"، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱، شماره ۱۰، صفحات ۶۱-۶۹.
- متولی عنبران س. ه.، ابراهیم‌زاده اردستانی و.، (۱۳۸۹)، "تعیین عمق سنگ‌بستر با استفاده از
وارون‌سازی غیرخطی دوبعدی داده‌های گرانی‌سنجی"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۴، شماره ۳،
صفحات ۱-۱۹.
- نجاتی کلاته ع.، ابراهیم‌زاده اردستانی و.، متولی عنبران س. ه.، قمی ش.، جوان ا.، (۱۳۸۸)، "مدل‌سازی وارون دوبعدی غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی منطقه مغان با استفاده از روش مارکوارت-
لونبرگ"، مجله علوم زمین، دوره ۷۴، شماره ۱۹، صفحات ۱۳-۲۰.
- Abdoh, A., Cowan, D. and Pilkington, M., (1990), "3D GRAVITY INVERSION OF THE CHESHIRE BASIN", *Geophysical Prospecting*, 38(8), pp.999-1011.
- Blakely, R. J., (1996), "Potential theory in gravity and magnetic application", Cambridge university press.
- Bott, M. H. P., (1960), "The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins", *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 3, 63 – 67.
- Constantino, R.R., Hackspacher, P.C., de Souza, I.A. and Costa, I.S.L., (2017). "Basement structures over Rio Grande Rise from gravity inversion", *Journal of South American Earth Sciences*, 75, pp.85-91.
- Dobrin, M. B. and Savit, C. H., (1988), "Introduction geophysical prospecting", McGraw-Hill, 867.
- Eshagh, M. and Sjöberg, L.E., (2009). "Atmospheric effects on satellite gravity gradiometry data", *Journal of Geodynamics*, 47(1), pp.9-19.

Guan, D., Ke, X. and Wang, Y., (2016), "Basement structures of East and South China Seas and adjacent regions from gravity inversion", *Journal of Asian Earth Sciences*, 117, pp.242-255.

Hansen, Per Christian., (2010), "Discrete inverse problems: insight and algorithms", Vol. 7. Siam.

Jachens, R. C, and Moring, B. C., (1990), "Maps of Thickness of Cenozoic Deposits and the Isostatic Residual Gravity over Basement for Nevada", Open-File Report 90-404, U.S. Geological Survey.

Johnson, W. W., (1969), "A least squares method of interpreting magnetic anomalies caused by two-dimensional structures", *Geophysics*, v. 34. no. I. p. 65-74,

Koch, K-R., (2002), "Parameter estimation and hypothesis testing non linear models", Springer-Verlag Berlin, Germany

Lelievre, Peter G., and Douglas W. Oldenburg., (2006), "Magnetic forward modeling and inversion for high susceptibility", *Geophysical Journal International* 166.1, 76-90.

Levenberg, K., (1944), "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares", *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164–168.

Li, Y., and Oldenburg, D. W., (1998), "3-D inversion of gravity data", *Geophysics*, 63(1), 109–119.

Meju, M.A., (1994), "Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice", Society of Exploration Geophysics.

Menke, W., (1989), "Geophysical Data Analysis Discrete Inverse Theory", Academic Press, Inc.

Mirzaei, M., and J. W. Bredewout., (1996), "3-D Microgravity data inversion for detecting cavities", *European journal of environmental and engineering geophysics* 1, 249-270.

Nejati, K.A., Mirzaei, M., Gouta, N. and Shahin, E., (2010). "Inverse modeling of

magnetic data subspace method”, *Geosciences*, v. 19. N, 75. P, 165 -172.

Oldenburg, D. W., and Li, Y., (2005), “Inversion for applied geophysics: A tutorial”, pp89- 150, In: *Near-surface geophysics*, Butler, D. K., SEG, Investigations in Geophysics, US.

Oldenburg, D.W., McGillivray, P.R. and Ellis, R.G., (1993), “Generalized subspace method for large-scale inverse problems”, *Geophys.J.int.* 114, 12-20.

Oldenburg, D.W., Unsworth, M. (1995) Subspace inversion of electromagnetic data: application to mid-ocean-ridge exploration. *Geophys.J.int.* 123, 161-168

Parker, R. L., (1972), “The rapid calculation of potential anomalies”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 31,447-55.

Phillips, D.L., (1962), “A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind”. *J. Assoc. Comput. Mach.* 9, 84–97.

Plouff, D., (1976), “Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections”, *Geophysics*, 41, 727-741.

Sambridge, M.S., (1990), “Non-linear arrival time inversion: constraining velocity anomalies by seeking smooth models in 3-D”, *Geophys.J.int.* 102, 635-677.

Silva, J. B. C., Oliveira, A. S., Barbosa, V. C. F., (2010), “Gravity inversion of 2D basement relief using entropic regularization”, *Geophysics* 75 (3), I29–I35.

Tikhonov A.N. and Glasko V.B., (1965), “Application of the regularization method to nonlinear problems”, *Geophysics*, 5, 463–473.

Tikhonov, A. N., (1963), “Regularization of ill-posed problems”: *Doklady Akad. Nauk, SSSR*, 153, 49–52.

Tikhonov, A. N., and Arsenin. V.Y., (1977), “Solutions of ill-pose problem”: John Wiley and Sons, New York, U.S.A.

White, P.H. and Lovely, H.R., (1948), “Gravity data obtained in Great Britain by the Anglo-American Oil Company Limited”, *Quarterly Journal of the Geological Society*,

104(1-4), pp.339-364.

Yanghua, W and Gregory A.H., (1994), “Inversion of reflection seismic amplitude data for interface geometry”, *Geophys. J. Int.* (1994) 117, 92-110.

Zhou, D., Yao, B.C., (2009), “Tectonics and sedimentary basins of the South China Sea”, challenges and progresses. *J. Earth Sci*, 20 (1), 1–12.

Abstract

The final goal in geophysical methods is to interpret and determine the characteristics of geological structures from measured data. Typically, in modeling methods physical characteristic such as density or susceptibility and geometric properties such as structure depth as model parameters and geophysical measurements, they are considered as assumptions (data). Through being a lot of sedimentary structures in Iran such as oil traps which are economically important, study and modeling of basement topography might be deliver valuable information. Sedimentary basins have always been considered as one of the prerequisites for the presence of hydrocarbon resources, and the study of the geometry of these basins has always been of great importance. In this study, 3D non-linear inverse modeling of gravity and magnetic data is used to determine topography of basement. Two most useful models for modeling a three dimensional basement are juxtaposing rectangular prisms and the polygon. With the model of juxtaposing rectangular prisms, inversion become not only faster, also will be avoid of the difficulties associated with the model of Talwani and Ewing. In this study, a three-dimensional basement is modeled by equating it to a series of juxtaposing rectangular prisms and calculating their thicknesses. In order to demonstrate the efficiency of the method, understanding how the method works and its details, the modeling of free noise and noisy gravity and magnetic data was first performed. At the end of the modeling of real gravity data from the Cheshire England and real magnetic data from the North-West Iran (Aslanduz). All the programs used in this article are provided by the author in the MATLAB software environment.

Keywords: gravity, magnetic, basement, inverse modeling, nonlinear



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

MSc Thesis in Geophysics

**Appplication Of Tikhonov Method For Nonlinear Inverse
Modeling potential field Data Case Study Acquired In North-
West Iran (Aslanduz)**

By: Yaser Dehban

Supervisor
Dr. Ali Nejati Kalateh

Advisor
Dr. Mohammad Rezaie

September 2018