

به نام خداوند بخشنده مهربان



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی وارون سه بعدی داده های گرانی سنجی با استفاده از

روش لی - اولدنبرگ (مطالعه موردی: منطقه سبزوار)

وحید جعفرزاده

استاد راهنما

دکتر علی نجاتی کلاته

استاد مشاور:

دکتر حمید آقاجانی

شهریورماه ۱۳۹۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره: ۶۹۴/۱۵۷۲
تاریخ: ۹۳/۷/۲۶
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای وحید جعفرزاده به شماره دانشجویی ۹۱۰۱۹۰۴ رشته ژئوفیزیک گرایش گرانی سنجی تحت عنوان مدلسازی وارون سه بعدی داده های گرانی سنجی با استفاده از روش لی-اولدنبِرگ (مطالعه موردی: منطقه سبزوآر) که در تاریخ ۹۴/۰۶/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ قبول (با درجه : عالی امتیاز ۱۹)	☐ دفاع مجدد	☐ مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	علی نجاتی کلاته	استادیار	
۲- استاد مشاور	حمید آقاجانی	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	آرزو عابدی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	علیرضا عرب امیری	دانشیار	

رئیس دانشکده:



تقدیم :-

تمام آن ہائی کہ فارغ از هرگونه نژاد، کشور، قومیت، مکتب، مذہب و...،
"انسانیت" را سرلوحہ زندگی خویش قرار داده اند و الہام بخش زندگانی من ہستند.

شکر و قدردانی

از خانواده ام که همیشه و همه جا، برایم دگر می به همراه داشته اند خالصانه شکر می نمایم.

از الطاف اساتید راهنا و مشاور بنده، جناب آقای دکتر علی نجابی کلاته و جناب آقای دکتر حمید آقا جانی که در این مسیر راهنمای به حق من بوده اند صمیمانه سپاسگزارم.

از جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و جناب آقای دکتر علیرضا عرب امیری که افتخار دانش آموزی در محضر ایشان نصیب اینجانب شد و زحمات داور این پایان نامه به گردن ایشان افتاد، کمال قدردانی را دارم.

از کادربیریت دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک به دلیل فراهم نمودن شرایط عالی جهت بهره مندی دانشجویان از تجهیزات روز دنیا شگرم. بدیهی است که هر جا افتخاری نصیب دانش آموختگان شود، متعلق به دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک است.

شکر ویژه از جناب آقای مهندس محمد رضایی که در کل مسیر، سروسامان بخش من بوده اند.

و بالاخره، به پاس احترام به تمام هم کلاسی ها، دوستان و هم خوابگاهی ها، کلاه از سربرمی دارم.

تعهد نامه

اینجانب وحید جعفرزاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش گرانی سنجی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه " مدل سازی وارون سه بعدی داده های گرانی سنجی با استفاده از روش لی-اولدنبورگ (مطالعه موردی: منطقه سبزوار) " تحت راهنمایی آقای دکتر علی نجاتی کلاته و به مشاوره آقای دکتر حمید آقاجانی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » 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 (با بافتهای آنها) 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 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

امروزه تلاش برای شناسایی ساختارهای مدفون و دستیابی به منابع زیرسطحی، گسترش وسیعی پیدا کرده و ژئوفیزیک یکی از ابزارهای شناسایی این ساختارها است. هدف نهایی در روش‌های ژئوفیزیکی و از جمله در گرانی‌سنجی، شناسایی هرچه دقیق‌تر خصوصیات ساختارهای زمین‌شناسی است. برای نیل به این هدف، مدل‌سازی دو و سه‌بعدی، از موفق‌ترین روش‌های تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی است؛ که نتیجه آن، پیدا کردن درک صحیح‌تر از ساختارهای زیرسطحی همچون شکل منبع، میزان عمق، گستردگی سطحی، کشیدگی عمقی و ... می‌باشد. مشخص شدن این پارامترها، تأثیر مستقیم و بسزا در تصمیم‌گیری‌های بعدی دارد؛ که می‌تواند در مدیریت هزینه‌ها، مؤثر واقع گردد.

هدف از تدوین نوشتار حاضر، ارائه تفسیر درست نتایج، به منظور شناسایی دقیق‌تر ساختارهای زیرسطحی است، که این هدف با وارون‌سازی مقید سه‌بعدی داده‌های گرانی‌سنجی با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبرگ (نرم‌افزار GRAV3D) تحقق می‌یابد. دو هدف اصلی در این روش وجود دارد؛ در اولین رهیافت هدف از وارون‌سازی، تعیین هندسه منبع و در رهیافت دوم، تشخیص تباین چگالی توده موردنظر با محیط اطراف است. این روش شامل یک تابع هدف چند مؤلفه‌ای است که برای تولید انواع مدل، انعطاف‌پذیری کافی دارد و می‌تواند نسبت به مدل‌های غیرمنطبق با ساختارهای زمین‌شناسی نیز تصحیح گردد.

از نقاط قوت این الگوریتم، شرکت دادن داده‌های جانبی در فرایند وارون‌سازی است؛ که این کار با استفاده از قیود مختلفی همچون همواری، مثبت‌بودن، مدل مرجع و مدل کرانه‌ای انجام می‌شود. انجام وارون‌سازی مقید باعث بهبود نتیجه مدل‌سازی به سمت مدلی می‌شود که با ساختارهای زمین‌شناسی انطباق بیشتری دارد و اعتبار و اعتماد به مدل‌نهایی بیشتر می‌شود. به منظور استفاده بهینه الگوریتم مذکور، ابتدا کاربرد آن بر روی داده‌های مصنوعی به همراه نوفه بررسی و براساس میزان تطابق نتایج با جواب اصلی، از این روش جهت مدل‌سازی داده‌های واقعی استفاده شده است. در این تحقیق داده‌های گرانی‌سنجی محدوده اکتشافی کرومیت واقع

در شرق سبزوار، گنبدنمکی قم و گنبد نمکی هامبل (واقع در آمریکا) مورد مدل‌سازی قرار گرفته‌اند؛ که جهت درک کامل‌تر نتایج نهایی، نماهای مختلفی از آن‌ها آورده شده است.

کلمات کلیدی: گرانی‌سنجی، وارون‌سازی لی-اولدنبگ، مدل‌سازی مقید سه‌بعدی، کرومیت سبزوار، گنبدنمکی قم، گنبدنمکی هامبل.

مقالات مستخرج از پایان نامه:

۱- وحید جعفرزاده، علی نجاتی کلاته، حمید آقاجانی، ۱۳۹۴، وارون سازی دوبعدی داده های گرانی سنجی محدوده اکتشافی کرومیت سبزوار، هفتمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی دامغان، ایران.

۲- وحید جعفرزاده، علی نجاتی کلاته، حمید آقاجانی، ۱۳۹۴، مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی وارون سه-بعدی با فیلترهای فازمحلی، در پردازش و تفسیر داده های گرانی سنجی محدوده اکتشافی کانسار کرومیت سبزوار، مجله مهندسی منابع معدنی و هیدروکربنی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

مقالات در دست بررسی:

۱- وحید جعفرزاده، علی نجاتی کلاته، حمید آقاجانی، وارون سازی مقید سه بعدی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم با استفاده از قیدهای مثبت بودن، هموارسازی، مدل مرجع و مدل کرانه ای، مجله فیزیک زمین و فضا، تهران، ایران.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول - کلیات

۱-۱- مقدمه	۲
۱-۱-۱- طبقه‌بندی روش‌های ژئوفیزیکی اکتشافی	۲
۱-۱-۲- جایگاه روش گرانی‌سنجی	۳
۱-۲- روش انجام تحقیق	۴
۱-۳- سابقه مطالعات انجام شده	۴
۱-۴- ضرورت تحقیق	۶
۱-۵- هدف از تحقیق	۶
۱-۶- ساختار پایان‌نامه	۷

فصل دوم - مبانی وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیک

۱-۲- مقدمه‌ای بر مدل‌سازی	۱۰
۱-۱-۲- آشکارسازی و نمایش داده‌ها	۱۰
۱-۲-۲- مدل‌سازی مستقیم	۱۰
۱-۲-۳- مدل‌سازی وارون	۱۱
۲-۲- مروری بر مفاهیم پایه‌ای در مسائل وارون	۱۱
۱-۲-۲- داده	۱۱
۲-۲-۲- شاخص‌های مدل	۱۱
۳-۲-۲- مدل	۱۲

- ۴-۲-۲- پارامترسازی یک سیستم ژئوفیزیکی ۱۲
- ۵-۲-۲- فضای مدل ۱۲
- ۳-۲- طبقه بندی مسائل وارون ۱۳
- ۴-۲- مبانی روش گرانی سنجی ۱۴
- ۵-۲- مسائل وارون گسسته خطی ۱۸
- ۱-۵-۲- حل مسائل وارون خطی فرابراآورد ۱۹
- ۲-۵-۲- حل مسائل وارون خطی فروبرآورد ۲۰
- ۶-۲- مشکلات مسائل وارون ۲۲
- ۱-۶-۲- آیا پاسخی برای حل مسئله وجود دارد؟ ۲۳
- ۲-۶-۲- آیا پاسخ به دست آمده یکتا است؟ ۲۳
- ۳-۶-۲- آیا جواب به دست آمده پایدار است؟ ۲۴
- ۷-۲- تابع پارامتری تیخونوف ۲۶
- ۸-۲- انتخاب پارامتر منظم سازی بهینه ۲۸
- ۹-۲- بهینه سازی ۲۸
- ۱۰-۲- انواع روش های بهینه سازی ۲۹
- ۱۱-۲- نظریه روش وارون سازی هموار لی-اولدنبگ ۳۱
- ۱۲-۲- استفاده از داده های اولیه در روند وارون سازی به روش لی-اولدنبگ ۳۴
- ۱۳-۲- فیلترها و روش های مورد استفاده در تحقیق ۳۵
- ۱-۱۳-۲- روش روند سطحی ۳۵
- ۲-۱۳-۲- فیلترهای فاز محلی ۳۶

فصل سوم - وارون سازی داده های مصنوعی

۴۰	۱-۳- مقدمه
۴۰	۲-۳- مدل مصنوعی مکعبی ساده
۴۶	۳-۳- مدل مصنوعی مرکب
۵۲	۴-۳- مدل مصنوعی گنبدنمکی
۵۵	۵-۳- مدل مصنوعی مرکب شیب دار

فصل چهارم - وارون سازی داده های واقعی

۶۰	۱-۴- مقدمه
۶۰	۲-۴- وارون سازی سه بعدی داده های گرانی سنجی محدوده اکتشافی کانسار کرومیت سبزوار
۶۱	۱-۲-۴- روش های اکتشافی کرومیت
۶۲	۲-۲-۴- مختصری درباره کانسارهای کرومیت ایران و جهان
۶۲	۳-۲-۴- معرفی منطقه مورد مطالعه
۶۴	۴-۲-۴- آماده سازی داده های واقعی
۶۸	۵-۲-۴- وارون سازی داده های واقعی
۷۳	۶-۲-۴- نتیجه گیری وارون سازی داده های گرانی سنجی کرومیت سبزوار
۷۴	۳-۴- وارون سازی سه بعدی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی هامبل
۷۵	۱-۳-۴- اهمیت اقتصادی گنبد های نمکی
۷۷	۲-۳-۴- محل تشکیل گنبد های نمکی
۷۸	۳-۳-۴- معرفی منطقه مورد مطالعه
۷۸	۴-۳-۴- وارون سازی داده های گنبد نمکی هامبل

- ۴-۳-۵- نتیجه گیری وارون سازی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی هامبل ۸۳
- ۴-۴- وارون سازی سه بعدی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم ۸۴
- ۴-۴-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه ۸۴
- ۴-۴-۲- وارون سازی داده های گنبد نمکی قم ۸۵
- ۴-۴-۳- نتیجه گیری وارون سازی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم ۹۱

فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۵-۱- نتیجه گیری ۹۴
- ۵-۲- پیشنهادات ۹۴

فهرست شکل‌ها

شکل	صفحه
شکل ۱-۲: میدان گرانی بی‌هنجاری روی یک کانسار معدنی با چگالی بالا.....	۱۷
شکل ۲-۲: مثالی از یک تابع با چندین کمینه محلی	۳۱
شکل ۳-۲: یک مورد مشکل برای بهینه‌سازی سراسری	۳۱
شکل ۴-۲: گسسته سازی زمین از طریق شبکه بندی سه بعدی عمود بر هم	۳۲
شکل ۱-۳: نمای دوبعدی مدل مصنوعی مکعبی	۴۱
شکل ۲-۳: شبکه‌ی حاصل از داده‌های خام بدون نوفه	۴۲
شکل ۳-۳: شبکه‌ی حاصل از داده‌های گرانی مدل مصنوعی مکعبی با ۳ درصد نوفه	۴۲
شکل ۴-۳: وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض و بدون اعمال هیچ‌گونه قیدی	۴۲
شکل ۵-۳: مقطع عرضی وارون‌سازی مدل مصنوعی مکعبی با اعمال قید مثبت بودن	۴۳
شکل ۶-۳: اعمال قید هموارسازی (همواری در راستاهای افقی بیشتر از راستای قائم است)	۴۴
شکل ۷-۳: اعمال قید هموارسازی (همواری در راستای قائم بیشتر از راستاهای افقی است)	۴۵
شکل ۸-۳: اعمال قید مدل مرجع به وارون‌سازی (نصف مدل مصنوعی به عنوان قید مدل مرجع)	۴۵
شکل ۹-۳: اعمال قید مدل کرانه‌ای به وارون‌سازی (نصف مدل مصنوعی به عنوان قید مدل کرانه‌ای)	۴۶
شکل ۱۰-۳: نمای سه‌بعدی مدل مصنوعی مرکب	۴۷
شکل ۱۱-۳: وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض	۴۸
شکل ۱۲-۳: افزایش هموارسازی در راستاهای افقی نسبت به راستای قائم	۴۸
شکل ۱۳-۳: اعمال همزمان قیود مثبت بودن و افزایش هموارسازی افقی	۴۹
شکل ۱۴-۳: نمایشی از سطح بالای اجسام شکل (۳-۱۳) در عمق ۳۰ متری	۴۹
شکل ۱۵-۳: نقشه آنومالی باقی‌مانده گرانی حاصل از مدل مصنوعی مرکب	۵۰
شکل ۱۶-۳: نقشه حاصل از عمل کرد فیلتر زاویه تمایل روی داده‌های گرانی مدل مصنوعی مرکب	۵۱

- شکل ۳-۱۷: نقشه حاصل از عمل کرد فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک روی داده‌های گرانی مدل مصنوعی مرکب ۵۱
- شکل ۳-۱۸: نمای سه‌بعدی مدل مصنوعی گنبدنمکی ۵۲
- شکل ۳-۱۹: وارون‌سازی با استفاده از مقادیر پیش‌فرض ۵۳
- شکل ۳-۲۰: اعمال همزمان قیود مثبت بودن و افزایش هموارسازی قائم ۵۳
- شکل ۳-۲۱: نمای سه‌بعدی شکل (۳-۲۰) ۵۴
- شکل ۳-۲۲: مقطع عرضی - سه‌بعدی شکل (۳-۲۰) ۵۴
- شکل ۳-۲۳: نمای سه‌بعدی مدل مصنوعی مرکب شیب‌دار (نمای جنوبی) ۵۵
- شکل ۳-۲۴: نمای سه‌بعدی مدل مصنوعی مرکب شیب‌دار (دید از بالا) ۵۶
- شکل ۳-۲۵: وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض (نمای جنوبی) ۵۶
- شکل ۳-۲۶: نمای جنوبی وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض ۵۷
- شکل ۳-۲۷: نمای بالایی وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض ۵۷
- شکل ۳-۲۸: اعمال قید مثبت بودن به وارون‌سازی (نمای جنوبی) ۵۸
- شکل ۳-۲۹: اعمال قید مثبت بودن به وارون‌سازی ۵۸
- شکل ۴-۱: زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰ سبزوار) ۶۳
- شکل ۴-۲: نقاط چهارگوش محدوده مورد مطالعه و موقعیت امام‌زاده حیدر روی قله کوه ۶۴
- شکل ۴-۳: واحدهای سنگی الترابازیکی (مجموعه افیولیتی) که در بیشتر موارد به سرپانتین تبدیل شده است ۶۴
- شکل ۴-۴: واحدهای سنگی الترابازیکی سرپانتینی شده ۶۴
- شکل ۴-۵: نقشه بوگه کامل محدوده اکتشافی مورد مطالعه ۶۵
- شکل ۴-۶: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده حاصل از حذف اثرات بی‌هنجاری ناحیه‌ای به روش روند سطحی با مرتبه دو ۶۶
- شکل ۴-۷: قسمتی از نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده به روش روند سطحی با مرتبه دو ۶۷
- شکل ۴-۸: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل ۶۸
- شکل ۴-۹: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک ۶۸
- شکل ۴-۱۰: پلان وارون‌سازی (روی سطح زمین)، در حالت پیش‌فرض ۶۹

- شکل ۴-۱۱: پلان وارون سازی مقید با استفاده از افزایش وزن سلول‌های سطحی تر ۷۰
- شکل ۴-۱۲: نمای سه‌بعدی مدل‌سازی نهایی ۷۱
- شکل ۴-۱۳: مقطع عرضی مدل‌سازی نهایی (جهت نمایش عمق پایین توده بزرگ موجود در غرب محدوده) ۷۱
- شکل ۴-۱۴: مقطع عرضی مدل‌سازی نهایی (جهت نمایش عمق پایین توده‌های کوچک موجود در شرق محدوده) ۷۲
- شکل ۴-۱۵: گسل‌های بازسازی شده در مدل‌سازی نهایی در عمق ۲۰ متری (دید از بالا) ۷۲
- شکل ۴-۱۶: نمایی از مقطع عرضی عمقی مربوط به شکل (۴-۱۵) ۷۳
- شکل ۴-۱۷: طرحی از گنبد‌های نمکی ۷۴
- شکل ۴-۱۸: تصویری ماهواره‌ای از گنبدنمکی قشم واقع در ۱۱۰ کیلومتری جنوب باختری جزیره قشم ۷۶
- شکل ۴-۱۹: ستون‌هایی از نمک با چگالی پائین که از میان واحدهای سنگی فوقانی صعود می‌نماید ۷۷
- شکل ۴-۲۰: نقشه بوگه کامل منطقه مورد مطالعه ۷۹
- شکل ۴-۲۱: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده با مرتبه یک ۷۹
- کل ۴-۲۲: وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض ۷۹
- شکل ۴-۲۳: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل ۸۰
- شکل ۴-۲۴: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک ۸۰
- شکل ۴-۲۵: طراحی قید مدل کرانه‌ای با استفاده از اطلاعات اولیه ۸۱
- شکل ۴-۲۶: وارون‌سازی مقید با استفاده از مدل کرانه‌ای ۸۲
- شکل ۴-۲۷: واروسازی با استفاده از قیدهای مثبت بودن، همواری در راستای قائم و افزایش وزن سلول‌های سطحی ۸۲
- شکل ۴-۲۸: مقطع عمقی شکل (۴-۲۷) در عمق ۴۰۰ متری ۸۳
- شکل ۴-۲۹: زمین‌شناسی حوضه نفتی البرز - سراج ۸۴
- شکل ۴-۳۰: موقعیت گنبد نمکی قم در ساختمان چین خورده البرز ۸۵
- شکل ۴-۳۱: نقشه زمین‌شناسی محدوده حوضه نفتی البرز قم با مشخصه شهر قم ۸۷
- شکل ۴-۳۲: نقشه بوگه کامل منطقه مورد مطالعه ۸۸
- شکل ۴-۳۳: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده به روش روند سطحی با مرتبه سه ۸۸

- شکل ۴-۳۴: مقطع عرضی وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض ۸۸
- شکل ۴-۳۵: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل ۸۹
- شکل ۴-۳۶: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک ۸۹
- شکل ۴-۳۷: طراحی قید مدل کرانه‌ای با استفاده از اطلاعات اولیه ۸۹
- شکل ۴-۳۸: وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض (مقطع عمقی ۲۰۰۰ متری) ۹۰
- شکل ۴-۳۹: مقطع عرضی وارون‌سازی مقید با استفاده از مدل کرانه‌ای ۹۰

فهرست جدول‌ها

صفحه

جدول

جدول ۴-۱: مقایسه نتایج حاصل از روش‌های متفاوت برای تفسیر گنبد نمکی هامیل ۷۸

فصل اول

کلیات پایان نامه

هر تیری که پرتاب می شود، جاذبه کره زمین را حس می کند (Henry Wadsworth Longfellow).

بررسی میدان مغناطیسی کره زمین، کشف قطب‌نما توسط چینی‌ها و نیز نظریه‌ی نیوتون در مورد گرانش، به‌طور قطع از قدیمی‌ترین مطالعات ژئوفیزیکی کره زمین برای رضایت‌مندی حس کنجکاوی و پیشرفت بشر می‌باشد. از آن زمان تاکنون با پیشرفت فناوری‌ها، ژئوفیزیک از نظر تنوع روش و کاربردها، پایه‌پای انسان پیشرفت کرد. امروزه کاربرد ژئوفیزیک طیف گسترده‌ای از مطالعات مربوط به فضا، دریا و زمین را تشکیل می‌دهد که بخشی از آن شامل اکتشاف منابع معدنی، هیدروکربونی، آب و شناسایی آلودگی زمین و محیط‌زیست می‌باشد. استفاده از ژئوفیزیک در زمینه مطالعات آب، ژئوتکنیک، عمران و آلودگی محیط‌زیست نسبت به زمینه‌های قبلی از سابقه کمتری برخوردار است ولی در سال‌های اخیر شتاب بیشتری گرفته است. استفاده از این راهکارها به عنوان روش‌های غیرمخرب، در مطالعات زیست‌محیطی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. تاکنون بیشتر کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در صنعت نفت برای شناخت حوضه‌های نفتی جدید و نیز اکتشاف معادن برای تعیین موقعیت کانسارهای معدنی بوده است. به همین دلیل قسمت اعظم کارهای پژوهشی و توسعه دستگاه‌های ژئوفیزیکی در راستای اهداف این دو زمینه اکتشافی حرکت کرده است. روش گرانی‌سنجی نیز مانند دیگر روش‌های ژئوفیزیکی، یک نقش اساسی در اکتشافات ایفا می‌کند (نوروزی، ۱۳۸۸).

۱-۱-۱- طبقه‌بندی روش‌های ژئوفیزیکی اکتشافی

عمده‌ترین روش‌های اکتشافات ژئوفیزیکی شامل روش‌های گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، ژئوالکتریک، الکترومغناطیس، رادیومتری و لرزه‌نگاری است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی روش‌های استاتیکی یا غیرفعال و روش‌های دینامیکی یا فعال تقسیم کرد. در گروه اول، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از میدان‌های طبیعی زمین صورت می‌پذیرد؛ مانند روش‌های گرانی و مغناطیس‌سنجی. این روش‌ها توانایی به دست آوردن اطلاعات از اعماق زیاد را دارا هستند. در گروه دوم، از منابع مصنوعی یا القایی (چشمه‌ها) استفاده می‌شود؛ که شامل ایجاد میدان‌های لرزه‌ای، الکتریک و الکترومغناطیسی است. این روش‌ها تصویری بهتر و جامع‌تر از وضعیت زمین در

مقیاس کوچکتر ارائه می‌دهند (قاسم‌العسگری، ۱۳۸۳). در مطالعات اکتشافی، گرانی‌سنجی مانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی، از روش‌های غیرمستقیم محسوب می‌شود که با ارائه نقشه بی‌هنجاری‌های بارزش و مناطق امیدبخش، در بهینه‌سازی شبکه حفاری‌های اکتشافی، نقش ارزنده‌ای داشته و سبب کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت عملیات اکتشافی می‌شود. از آن‌جا که روش‌های ژئوفیزیکی در گمانه‌ها و چاه‌های اکتشافی نیز قابل اجرا است، می‌تواند در تکمیل اطلاعات حاصل از مغزه‌ها و همبستگی گمانه‌ها و چاه‌ها و در نتیجه شناخت دقیق‌تر گسترش جانبی اهداف مورد تجسس نقش عمده‌ای ایفا کند (نوروزی، ۱۳۸۸).

۱-۲- جایگاه روش گرانی‌سنجی

اولین مخازن نفت آمریکا در سال ۱۹۲۶ میلادی با اندازه‌گیری‌های گرانی‌سنجی کشف شدند (Jakosky, 1950). اساس روش گرانی‌سنجی، رابطه مشهور قانون جاذبه نیوتون است. طبق این قانون هر جسمی با جرم M می‌تواند به هر جرم دیگری که در فاصله معینی از آن قرار گرفته است نیرو وارد کند. بر این اساس هر جسم مادی روی زمین تحت تأثیر نیروی گرانی زمین قرار دارد که این نیرو شتاب گرانی را ایجاد می‌کند. گاليله (۱۶۴۲-۱۵۶۴) در اوایل سده شانزدهم میلادی، قانون سقوط آزاد اجسام و شتاب گرانی را کشف کرد؛ بر همین اساس، گرانی-سنجی شاخه‌ای قدیمی از علوم کلاسیک است که برای مطالعه نظری و تجربی میدان جاذبه اطراف زمین گسترش یافته و شامل ابداع روش‌های اندازه‌گیری دقیق تغییرات شتاب گرانی است (ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۸۹). مبنای مطالعات گرانی در اکتشافات، ناهمگونی محلی چگالی کانی‌ها و سنگ‌ها است که تباین چگالی بین هدف مورد نظر و سنگ میزبان، بازتابی به صورت تغییر میدان گرانی خواهد داشت (نوروزی، ۱۳۸۸). تغییرات شکل یک لایه، کاهش ناگهانی چگالی (گنبد‌های نمکی) و نفوذ سنگ‌های آذرین (دایک، سیل و ...) در یک حوضه رسوبی، باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های گرانی می‌شود (قاسم‌العسگری، ۱۳۸۳). عوامل دیگری مانند توپوگرافی، ارتفاع، موقعیت جغرافیایی و ... نیز روی میدان گرانی اثر می‌گذارند که جهت تفسیر، باید اثر این عوامل از داده‌های اصلی کسر شوند؛ بنابراین با این روش می‌توان شکل، اندازه، حدود گسترش لایه‌ها و سنگ-

های نامتجانس را مشخص نمود. کاربردهای متداول این روش، شامل اکتشاف منابع معدنی و هیدروکربونی، اطلاع از عمق و هندسه پی‌سنگ در مسائل مهندسی، تعیین حفرات زیرزمینی، مشخص کردن مکان‌های دفن زباله، اکتشاف گنبد‌های نمکی و ... می‌باشد (نوروزی، ۱۳۸۸).

۱-۲- روش انجام تحقیق

روش انجام تحقیق بدین‌گونه است که پس از آشنایی کامل با تئوری روش، شناخت صحیح پارامترهای آن و کار با بخش‌های مختلف نرم‌افزار، اقدام به تولید مدل‌های مصنوعی کرده و داده‌های آن به عنوان ورودی، به نرم‌افزار اعمال و خروجی آن با مدل مصنوعی از قبل ساخته شده مقایسه می‌شود. با توجه به این‌که در واقعیت داده‌های خالص بدون نوفه وجود ندارد، در همین مرحله مقادیر استاندارد نوفه به داده‌های مصنوعی اضافه کرده و خروجی نرم‌افزار در حضور نوفه نیز آزمایش می‌شود. پایداری مدل ساخته شده با استفاده از داده‌های مصنوعی با و بدون نوفه، شاهدهی برای اعتبارسنجی روش مورد استفاده است. در صورت مطلوب بودن خروجی‌ها، داده‌های واقعی نیز به نرم‌افزار اعمال و خروجی آن به عنوان مدل نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت اعتبارسنجی مدل‌های نهایی ارائه شده، در صورت وجود از اطلاعات زمین‌شناسی و حفاری منطقه استفاده خواهد شد.

۱-۳- سابقه مطالعات انجام شده

از دهه ۴۰ و ۵۰ میلادی به بعد تلاش قابل توجهی در حل مسائل میدان پتانسیل برای پیدا کردن انطباق آنومالی مغناطیسی یا گرانی با ساختارهای زمین‌شناسی صورت گرفته است. محققین زیادی از روش مدل‌سازی پیش‌رو در تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی استفاده کرده‌اند (Hubbert, 1948; Talwani et al, 1959; Talwani and Ewing, 1960; Grant and West, 1965; Won and Bevis, 1987). با پیشرفت رایانه‌ها و محاسبات عددی، حل مسائل وارون با استفاده از روش‌های وارون‌سازی خودکار و با استفاده از قابلیت‌های رایانه‌ها انجام شد.

پدرسن^۱ (۱۹۷۷) تفسیر داده‌های میدان پتانسیل با استفاده از ساختارهای دوبعدی گسسته از چگالی یا اختلاف مغناطیدگی را با روش ماتریس معکوس تعمیم یافته حل نمود. گرین^۲ (۱۹۷۵) از یک ماتریس وزن‌دهی مناسب برای ثابت نگه داشتن تعدادی از پارامترهای مدل، هنگامی که اطلاعات زمین‌شناسی و چگالی موجود باشند، استفاده کرد. لاست و کوبیک^۳ (۱۹۸۳) جوابی فشرده با استفاده از قید کمینه‌سازی^۴ حجم چشمه بی-هنجاری به دست آوردند. در زمینه بکارگیری روش مدل‌سازی وارون برای تفسیر نتایج گرانی سنجی، الگوریتم‌های متفاوتی ارائه شده و توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است که شامل وارون‌سازی هموار^۵ (Li and Oldenburg, 1996, 1998)، وارون‌سازی تمرکز یافته^۶ (Portniaguine and Zhadanov, 1999, 2002)، وارون‌سازی به کمک ترکیب مدل‌های ریاضی^۷ (Boulanger and Chouteau, 2001)، وارون‌سازی بر مبنای کواریانس^۸ (Chasseriau and Chouteau, 2003)، وارون‌سازی بر مبنای سنگ‌شناسی احتمالاتی^۹ (Guillen et al., 2004)، وارون‌سازی ساختاری با برنامه‌ریزی خطی^{۱۰} (Van Zon and Roy-Chowdhury, 2006) و وارون-سازی با استفاده از شبکه انطباقی^{۱۱} (Fullagar and Pears, 2007) است. ابینگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۰) مدل‌سازی مستقیم و معکوس گرانی را با در نظر گرفتن ساختارهای پوسته‌ای آلپ شرقی انجام دادند؛ که نتایج مدل‌سازی پیشرو و وارون، یک مرز پوسته-گوشته کم عمق‌تری را در جنوب ناحیه آدریاتیک در مقایسه با بخش شمالی آن پیش‌بینی می‌کند. در طی سال‌های اخیر از روش‌های ترکیبی نیز برای حل مسائل ژئوفیزیکی استفاده شده است. به عنوان نمونه، گالاردو و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از ترکیب داده‌های گرانی و مغناطیس

¹ Pedersen

² Green

³ Last & Kubic

⁴ Compactness

⁵ Smooth inversion

⁶ Focused inversions

⁷ Combinations of mathematical model forms

⁸ Covariance-based inversion

⁹ Stochastic lithology-based inversion

¹⁰ Structural inversion using linear programming

¹¹ Inversion using an adaptive mesh

¹² Ebbing

و وارون‌سازی هم‌زمان داده‌ها، به نتایج بهتری برای مدل‌سازی سنگ‌کف دست پیدا کرد. روش وارون‌سازی لی-اولدنبِrg، در تحقیقات پژوهش‌گرانی همچون فیلیپس (۲۰۰۱)، ویلیامز (۲۰۰۸) و للیور (۲۰۰۹) استفاده شده است. در سال ۲۰۱۳ نیز مدل‌سازی آتشفشان مننگای^۱ واقع در کنیا با استفاده از معکوس‌سازی هم‌زمان داده‌های گرانی و مگنتوتلوریک به روش لی-اولدنبِrg توسط والمالا و همکارانش انجام شد.

۴-۱- ضرورت تحقیق

آینده صنایع معدنی کشور، نه‌تنها به کشف کانسارهای جدید وابسته است؛ بلکه به تولید و بازیافت بهینه معادن فعلی وابستگی تام دارد. اهمیت استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی برای توصیف دقیق ذخایر معدنی بر متخصصین این رشته پوشیده نیست. با توجه به اینکه کشور ما سرشار از منابع معدنی بوده، برای استخراج و توسعه این مواهب، استفاده از روش‌های جدید و کارآمد به منظور بهینه‌سازی و جلوگیری از مخارج اضافی از اهمیت بسزایی برخوردار است. از این‌رو در قدم اول یعنی اکتشاف، باید تا جایی که ممکن است هر گونه اطلاعاتی در مورد کانسار مورد نظر به دست آورد. روش‌های موفق تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی، نیاز به روش‌های مدل‌سازی دارند؛ که نتیجه این فرآیند، پیدا کردن درک صحیح‌تر از ساختارهای زیرسطحی همچون شکل‌منشا، میزان عمق، گستردگی سطحی، کشیدگی عمقی می‌باشد. مشخص‌شدن این پارامترها، تاثیر مستقیم و بسزایی در تصمیم‌گیری‌های بعدی دارد؛ که می‌تواند در مدیریت هزینه‌های کلان موثر واقع گردد.

۵-۱- هدف از تحقیق

هدف از این تحقیق، وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی‌سنجی برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی در اکتشاف مواد معدنی، با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبِrg است. با استفاده از این روش می‌توان با کاهش مخارج

1- Menengai volcano.

سنگین حفاری، اطلاعات نسبتاً کاملی از توزیع سه‌بعدی ذخایر معدنی در عمق بدست آورد. این اطلاعات می‌تواند شامل آگاهی از میزان کشیدگی عمقی نهشته‌هایی که بر روی سطح زمین رخنمون دارند یا یافتن نهشته‌های دیگری که به سطح زمین نرسیده و پنهان هستند، باشد. همچنین می‌توان دیگر ساختارهای موجود در منطقه نظیر گسل‌ها که می‌تواند راهنمای اکتشافی مناسبی باشد؛ را پی‌گیری کرد.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی‌سنجی با مطالعات موردی در خصوص مواد معدنی و هیدروکربونی است؛ در فصل اول مختصری از تاریخچه اکتشاف، استفاده و انواع روش‌های ژئوفیزیکی، جایگاه روش گرانی‌سنجی، سابقه مطالعات انجام شده در این زمینه، ضرورت و هدف از تحقیق تشریح شده است. در فصل دوم به تبیین و توضیح روش مدل‌سازی به‌کاررفته در این تحقیق پرداخته خواهد شد. در فصل سوم با استفاده از مدل‌های مصنوعی و داده‌های گرانی حاصل از آن‌ها، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی آمده است. در فصل چهارم، روش مدل‌سازی وارون سه‌بعدی روی چندین داده واقعی اعمال و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. فصل پنجم این تحقیق نیز به نتایج به‌دست آمده و پیشنهادات برای تحقیقات بیشتر در این زمینه اشاره دارد.

فصل دوم

مبانی وارون سازی داده‌های ژئوفیزیکی

شرلوك هولمز: برای بسیاری از آدم‌ها، اگر سلسله‌ای از حوادث را تعریف کنید، غالباً به شما خواهند گفت که نتیجه چه می‌شود، اما تعداد کمی از مردم وجود دارند که اگر نتیجه را به آن‌ها بگویید، قادر خواهند بود که با استعداد درونی خود استنتاج کنند که چه مرحله‌ای به این نتیجه منجر شده است. این قدرت چیزی است که من آن را استنتاج وارون می‌نامم.

۲-۱- مقدمه‌ای بر مدل‌سازی

پس از انجام اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی، تصحیح و پردازش داده‌ها و جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای از محلی، مرحله مهم تفسیر است. در روند تفسیر باید از تمامی اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و سایر اطلاعات وابسته استفاده کرد تا بتوان بهترین تفسیر ممکن را انجام داد. روش‌های تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد که هر کدام با فرآیندهای منطقی اما متفاوت، به هدف نزدیک می‌شوند:

۲-۱-۱- بهبود و نمایش داده‌ها^۱

در این روش هیچ یک از شاخصه‌های مدل محاسبه نمی‌شود، اما بی‌هنجاری به گونه‌ای پردازش و نمایش داده می‌شود که بعضی از خصوصیات منشأ بارز و تفسیر کلی آسان‌تر می‌گردد. از این مجموعه روش‌ها می‌توان به عنوان ابزار تکمیلی در مدل‌سازی استفاده کرد (Blakely, 1996). به عنوان مثال، انواع روش‌های تخمین مرز، جزو این دسته از تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی قرار می‌گیرند.

۲-۱-۲- مدل‌سازی مستقیم^۲

در روش مستقیم یا پیشرو، بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی یا مطالعات ژئوفیزیکی موجود، یک مدل اولیه برای بی‌هنجاری در نظر گرفته شده، اثر گرانی این مدل محاسبه و با بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای مقایسه می‌گردد. در صورت عدم برازش کافی، مفسر آن‌قدر پارامترهای مدل را تغییر می‌دهد تا بهترین برازش بین اثر گرانی مدل و بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای حاصل شود. در واقع در این روش مشخصه‌های مدل به روش آزمون و خطا تعیین می‌شوند (ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۸۹).

^۱ Enhancement and display

^۲ Forward modeling

۲-۱-۳- مدل سازی وارون^۱

در این روش مشخصه های چشمه ی بی هنجاری به صورت خودکار یا نیمه خودکار و با استفاده از داده های مشاهده ای محاسبه می شود.

۲-۲- مروری بر مفاهیم پایه ای در مسائل وارون

۲-۲-۱- داده

مقادیر معلومی که طی یک اندازه گیری ژئوفیزیکی به دست می آیند را داده گویند. این داده ها را به صورت یک بردار با طول N نمایش می دهند؛ که T ، بیانگر ترانپاده^۲ است.

$$d = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T \quad (۲-۱)$$

۲-۲-۲- شاخص های مدل^۳

مجموعه ای از متغیرهای ناشناخته که توصیف کننده محیط مطالعه هستند را شاخص های مدل گویند. این مجموعه را نیز همانند مجموعه داده ها می توان با بردار m با طول M نمایش داد.

$$m = [m_1, m_2, \dots, m_M]^T \quad (۲-۲)$$

^۱ Inverse modeling

^۲ Transpose

^۳ Model parameter

۲-۲-۳-مدل^۱

مدل، مجموعه معادلاتی است که داده‌ها و پارامترهای مدل را به هم پیوند می‌دهد. در واقع، اساس مدل‌سازی در حل مسائل وارون، ارتباط دادن داده‌های برداشت شده و یک سری پارامترهای هندسی و فیزیکی است؛ که این ارتباط مدل نامیده می‌شود (ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۸۹). در مورد بسیاری از مسائل واقعی، داده‌ها و مشخصه‌های مدل توسط روابط پیچیده‌ای به یکدیگر مربوط‌اند. هدف تئوری وارون حل این معادلات برای مشخصه‌های مدل یا بدست آوردن انواع جواب‌های ممکن و مطلوب با توجه به شرایط یک مسأله خاص است.

۲-۲-۴ پارامترسازی یک سیستم ژئوفیزیکی^۲

پارامترهایی که خواص فیزیکی داخل زمین را مشخص می‌کنند به دلیل ناهمگنی زمین، توابع پیوسته‌ای از مکان هستند. به منظور سادگی محاسبات، این توزیع‌های پیوسته به وسیله تعداد محدودی پارامتر مشخص می‌شوند که این عمل را پارامترسازی سیستم ژئوفیزیکی می‌نامند. این پارامترسازی و ساده‌سازی باید شامل حداقل اعضای مشخصه‌های مدل باشد و در عین حال بتواند به طور کامل سیستم فیزیکی در دست مطالعه را توصیف کند.

۲-۲-۵- فضای مدل^۳

با در نظر گرفتن یک فضای M بعدی، هر نقطه از آن می‌تواند یک مدل قابل تصور از سیستم ژئوفیزیکی باشد، به این فضا، فضای مدل می‌گویند و تعداد شاخص‌های مستقل از هم، بیانگر بعد فضای مدل است (ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۸۹).

¹ Model

² Parameterization

³ Model space

۲-۳- طبقه بندی مسائل وارون

در یک تقسیم بندی کلی، مسائل وارون به دو دسته گسسته و پیوسته تقسیم می‌شوند. در مسائل گسسته تعداد مشخصه‌های مدل و در نتیجه بعد فضای مدل محدود بوده اما در مسائل پیوسته بعد فضای مدل نامحدود است. گرچه مسائل زیادی با ماهیت پیوسته وجود دارند اما برای حل آن‌ها نخست باید به صورت گسسته در آیند و آنگاه به عنوان یک مسئله وارون گسسته حل شوند. با توجه به این‌که گسسته‌سازی مسائل پیوسته یک نوع تقریب زنی بوده و کاهش دقت را به دنبال دارد، اما از آنجایی‌که نظریه مسائل وارون گسسته بر مبنای بردار و ماتریس‌ها بنا نهاده شده است، پس گسسته سازی این مسائل، شروع خوبی می‌باشد (ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۸۹).

در تقسیم‌بندی دیگر که بر اساس نوع ارتباط بین پارامترهای مدل و داده‌ها وجود دارد، می‌توان مسائل وارون را به دو دسته‌ی خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی کرد. در مسائل وارون خطی ارتباط بین مشخصه‌های مدل و داده‌ها خطی است در حالی که در مسائل غیرخطی این ارتباط غیرخطی بوده اما با استفاده از روش‌هایی مانند بسط تیلور، گرادیان و ... قابل تبدیل به مسائل خطی هستند (Meju, 1994).

در تئوری پتانسیل معادلات انتگرالی بین میدان و منشأهای ایجاد کننده وجود دارد. به عنوان نمونه، اگر D حجم اشغال شده توسط منشأ، P نقطه‌ی مشاهده‌ای به مختصات (x, y, z) ، Q نقطه‌ی انتگرال‌گیری به مختصات (x', y', z') در داخل D و $\vec{r}$ برداری باشد که Q را به P وصل می‌نماید؛ در این صورت برای مؤلفه قائم گرانی داریم (Blakely, 1996):

$$g(P) = -\gamma \int_D \rho(Q) \frac{z - z'}{r^3} dv \quad (۲-۳)$$

که در آن، $\rho(Q)$ توزیع چگالی و ضریب γ ، ثابت جهانی گرانش می‌باشد. معادله اخیر را می‌توان در حالت کلی به صورت رابطه (۲-۴) نوشت:

$$f(P) = \int_D s(Q) \Psi(P, Q) dv \quad (4-2)$$

که در این معادله $f(P)$ میدان پتانسیل در نقطه P ، $s(Q)$ معرف یک کمیت فیزیکی مانند چگالی و $\Psi(P, Q)$ نیز تابعی است که به مکان هندسی نقطه‌ی مشاهده‌ای P و نقطه‌ی Q از منشأ بستگی دارد. رابطه (4-2)، به معادله فردهلم نوع اول معروف است (Blakely, 1996).

رابطه‌ی (4-2) ابزار مناسبی برای ارتباط میان روش‌های وارون و پیشرو تلقی می‌گردد. بر این اساس، محاسبه‌ی پیشرو یا مستقیم، شامل تعیین $f(P)$ از توابع معلوم $s(Q)$ ، $\Psi(P, Q)$ و D است که در این حالت محاسبه مذکور دارای حلی یکتا است. به عبارت دیگر مدل‌سازی پیشرو شامل انتخاب مقادیر مختلف، محاسبه و مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری شده است تا زمانی که، انطباق مناسبی با این داده‌ها پدید آید. روش مدل‌سازی وارون، داده‌ها را در طرف چپ معادله (4-2) قرار داده و برای بعضی مقادیر $s(Q)$ یا D رابطه‌ی مفروض را حل می‌نماید. در این روش، محاسبه $s(Q)$ به عنوان یک مسأله‌ی خطی مطرح است در حالی که تعیین پارامترهای حجم D در محدوده مسائل غیرخطی قرار می‌گیرد.

۴-۲- مبانی روش گرانی‌سنجی

مبانی اکتشاف گرانی‌سنجی، نیروی گرانی زمین می‌باشد که با قانون نیوتون بیان می‌شود و به صورت رابطه (۲-۵) نشان داده می‌شود (Blakely, 1996):

$$F = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (5-2)$$

که در آن F نیروی وارد بر m_1 و m_2 ، r فاصله بین m_1 و m_2 و γ ثابت جهانی گرانش می‌باشد. اما آنچه که به وسیله دستگاه‌های گرانی‌سنجی اندازه‌گیری می‌شود، شتاب گرانی زمین است، یعنی:

$$g = \frac{F}{m_2} = -\gamma \frac{M_e}{R_e^2} \quad (۶-۲)$$

که M_e و R_e به ترتیب جرم و شعاع زمین می باشند. واحد شتاب گرانی سانتی متر بر مجذور ثانیه است که به افتخار گالیله، گال^۱ نامیده می شود. بر اساس قانون نیوتون، میدان گرانی $g(r)$ برای یک توزیع جرمی سه بعدی با چگالی $\rho(r)$ در روابط زیر صدق می کند (Zhdanov, 1988):

$$\nabla \cdot g = -4\pi\gamma\rho \quad (۷-۲)$$

$$\nabla \times g = 0$$

همچنین می توان آن را به وسیله پتانسیل گرانی U به صورت زیر نوشت:

$$g = \nabla U \quad (۸-۲)$$

که در معادله پواسون^۲ به صورت زیر صدق می کند:

$$\nabla^2 U = -4\pi\gamma\rho \quad (۹-۲)$$

با توجه به این معادله، میدان پتانسیل گرانی ناشی از یک توزیع جرم در خارج از آن در معادله لاپلاس^۳ صدق می کند:

$$\nabla^2 g = 0 \quad (۱۰-۲)$$

که ∇^2 عملگر لاپلاس یا لاپلاسیان است. همچنین می شود حل معادله پواسون را به شکل انتگرال حجمی زیر ارائه کرد (Zhdanov, 1988):

^۱ Gal

^۲ Poisson's equation

^۳ Laplace equation

$$U(r') = \gamma \iiint_D \frac{\rho(r)}{|r - r'|} dv \quad (۱۱-۲)$$

که در آن D محدوده تمرکز جرمی می‌باشد. با توجه به اینکه:

$$\nabla' \frac{1}{|r - r'|} = \frac{r - r'}{|r - r'|^3} \quad (۱۲-۲)$$

می‌توان عبارت مربوط به میدان گرانی ناشی از هر توزیع جرمی در محدوده حجمی D در نقطه r' به صورت زیر به دست آورد:

$$g(r') = A^g(\rho) = \gamma \iiint_D \rho(r) \frac{r - r'}{|r - r'|^3} dv \quad (۱۳-۲)$$

که در این رابطه $A^g(\rho)$ عملگر پیشرو در مسائل گرانی نام دارد. و به طور جزئی‌تر، برای مولفه قائم میدان گرانی می‌توان نوشت:

$$g_z(r') = \gamma \iiint_D \rho(r) \frac{z - z'}{|r - r'|^3} dv \quad (۱۴-۲)$$

کاوش‌های گرانی بر پایه مطالعه میدان‌های گرانی بی‌هنجار که توسط توزیع‌های چگالی غیر یکنواخت در درون زمین بوجود می‌آیند، بنا نهاده شده است. اختلاف چگالی $\Delta\rho$ ، زمانی مشخص می‌گردد که بین چگالی آنومالی $\rho(r)$ و چگالی زمینه ρ_b اختلاف وجود داشته باشد. این اختلاف چگالی بی‌هنجار می‌تواند باعث بوجود آمدن یک بی‌هنجاری گرانی Δg گردد که با معادله‌ی (۱۳-۲) بیان می‌شود (Zhdanov, 1988):

$$\Delta g(r') = A^g(\Delta\rho) = \gamma \iiint_D \Delta\rho(r) \frac{r - r'}{|r - r'|^3} dv \quad (۱۵-۲)$$

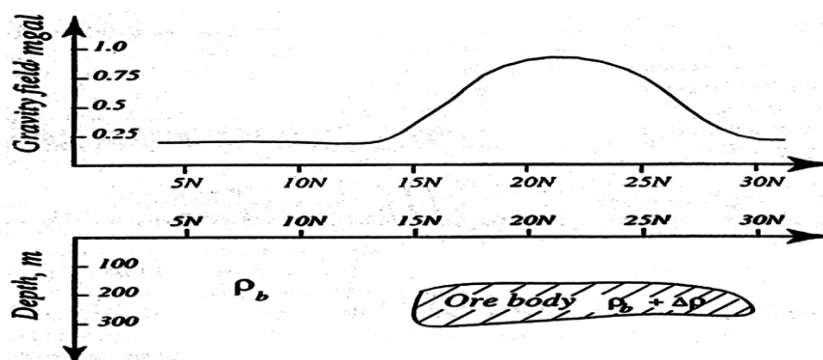
بنابراین، مسأله پیشرو برای میدان گرانی شامل محاسبه انتگرال (۱۵-۲) روی محدوده D بوده که با جرم منشأ بی‌هنجاری پر شده است. بنابراین:

$$\Delta g = A^g(\Delta \rho) \quad (۱۶-۲)$$

اما هدف نهایی در جستجوهای گرانی بازسازی توزیع چگالی بی‌هنجار $\Delta \rho$ در داخل زمین از روی داده‌های مربوطه Δg که در روی سطح زمین اندازه‌گیری شده، است. یعنی:

$$\Delta \rho = (A^g)^{-1} \Delta g \quad (۱۷-۲)$$

که در آن، نماد $(A^g)^{-1}$ به عنوان عملگر مسأله وارون در گرانی نامیده می‌شود. توزیع چگالی می‌تواند اطلاعات یکتایی در مورد ساختارهای عمیق زمین‌شناسی فراهم آورد که به طور شاخص در مراحل مطالعه زمین‌شناسی ناحیه‌ای پوسته زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، اندازه‌گیری‌های گرانی با دقت بالا می‌تواند در کاوش نفت و گاز و همچنین کاربردهای معدنی جهت به تصویر کشیدن موقعیت و وضعیت ذخایر معدنی مورد استفاده قرار گیرد. شکل (۱-۲) توزیع میدان گرانی بی‌هنجاری را بر روی یک ذخیره معدنی شاخص نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: میدان گرانی بی‌هنجاری روی یک کانسار معدنی با چگالی بالا (Zhdanov, 2002).

۲-۵- مسائل وارون گسسته خطی^۱

صورت کلی یک مسأله وارون ژئوفیزیکی را می‌توان به صورت رابطه (۲-۱۸) بیان کرد (Menke, 1989):

$$d = G(m) \quad (2-18)$$

که در آن، m ، بردار پارامترهای مدل شامل M آرایه و d ، بردار مقادیر داده‌های مشاهده‌ای شامل N داده است و G ماتریس عملگر مستقیم یا کرنل است. در مواردی که حل مسائل خطی است، G عملگری خطی است؛ پس معادله (۲-۱۸) در شکل ماتریسی به صورت رابطه (۲-۱۹) نوشته می‌شود.

$$d = Gm \quad (2-19)$$

که در آن G ماتریس $N \times M$ است. در واقع رابطه‌ی (۲-۱۹) معرف سیستمی از N معادله خطی نسبت به M پارامتر مجهول $m_1, m_2, m_3, \dots, m_M$ است.

$$d_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} m_j \quad (2-20)$$

حل مسأله وارون (۲-۱۹) معادل با حل N دسته از روابط خطی (معادله ۲-۲۰) نسبت به M تعداد پارامترهای مجهول می‌باشد.

اگر در سیستم معادله (۲-۲۰)، $N < M$ باشد یعنی تعداد داده‌ها از تعداد پارامترهای مجهول کمتر باشد، مسئله فروبرآورد^۲ نامیده می‌شود. از نظر ریاضی دستگاه معادلات فروبرآورد در اغلب موارد بی‌نهایت جواب و گاهی با توجه به شرایط مسئله هیچ جواب معنی‌دار ژئوفیزیکی ندارند. در مسائل وارون ژئوفیزیکی فروبرآورد، حتی اگر داده‌های اندازه‌گیری شده تمیز و بدون نوفه باشند، همواره دچار مشکل عدم یکتایی هستند؛ زیرا تعداد اندازه‌گیری‌ها برای تعیین یکتای پارامترهای مدل کافی نیستند.

^۱ Linear discrete invers problems

^۲ Under determined

اگر در سیستم معادله (۲-۲۰)، $N > M$ باشد یعنی تعداد داده‌ها از تعداد پارامترهای مجهول بیشتر باشد، سیستم فرابراآورد^۱ نامیده می‌شود.

اگر در سیستم معادله (۲-۲۰)، $M = N$ باشد یعنی تعداد داده‌ها با تعداد پارامترهای مجهول برابر باشد، این سیستم هم‌ارز^۲ نامیده می‌شود. از نظر ریاضی دستگاه معادلات هم‌ارز در اغلب موارد جواب یکتایی دارند اما گاهی دارای بی‌نهایت جواب بوده یا جوابی ندارند. در بسیاری از مسائل ژئوفیزیکی با سیستم‌های فروبرآورد مواجه هستیم که در آنها تعداد مشاهدات بسیار کمتر از مجهولات است (Menke, 1989).

۲-۵-۱ حل مسائل وارون خطی فرابراآورد^۳

در عمل بین داده‌های مشاهده‌ای (d^{obs}) و داده‌های محاسبه‌ای ($d^{pre} = Gm^{est}$) ناشی از پارامترهای مدل تخمینی، اختلاف وجود دارد. چنانچه این اختلاف با بردار خطای e نمایش داده شود، می‌توان نوشت (Menke, 1989):

$$e = d^{obs} - d^{pre} \quad (2-21)$$

واضح است که پارامترهای مدلی مناسب است که به ازای آن، بردار خطای e کمینه شود. به این منظور تابع خطا^۴ که عبارت از مجموع مربعات باقی‌مانده (فاصله اقلیدسی) است، به صورت رابطه (۲-۲۲) تعریف می‌شود:

$$\phi(m) = e^T e = \sum_{i=1}^N \left(d_i - \sum_{j=1}^M A_{ij} m_j \right)^2 = (d - Gm)^T (d - Gm) \quad (2-22)$$

در اینجا هدف پیدا کردن برداری از پارامترهای مدل، m ، است به طوری که تابع خطای $\phi(m)$ کمینه شود. به

¹ Over determined

² Even determined

³ Over determined linear inverse problem

⁴ Misfit function

این منظور از این تابع نسبت به هر کدام از پارامترهای مدل m_j ، مشتق‌گیری نموده و نتیجه را برابر با صفر قرار می‌گیرد، پس:

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

که در آن، d داده‌ها و m پارامترهای مدل است و این رابطه جواب کمترین مربعات برای معادله (2-19) است و عبارت $(G^T G)^{-1} G^T$ ، وارون تعمیم یافته کمترین مربعات نامیده می‌شود که با اعمال روی داده‌ها، پارامترهای مدل را به دست می‌دهد.

۲-۵-۲ حل مسائل وارون خطی فروبرآورد^۱

فرض کنید معادله (2-19)، یک معادله خطی فروبرآورد باشد، در این صورت داده‌ها اطلاعاتی در مورد مشخصه‌های مدل به دست می‌دهند اما تعداد داده‌ها جهت تعیین دقیق مشخصه‌های مدل، کافی نیست و بر این اساس بیش از یک دسته از پارامترهای مدل را می‌توان یافت که با داده‌های مشاهده‌ای تطابق داشته باشند. برای دستیابی به یک جواب یکتا، باید به مسئله مورد نظر اطلاعات اولیه اضافه شود (Jackson, 1979).

اندازه P -(norm-P) یک بردار برای $p \geq 1$ به صورت زیر تعریف می‌شود (Aster et al., 2011):

$$\|x\|_p = (|x_1|^p + |x_2|^p + \dots + |x_n|^p)^{1/p} \quad (2-24)$$

یک راهکار برای یافتن بهترین جواب تقریبی، کمینه کردن نرم ۲ بردار خطا است (رابطه 2-25) که روش حداقل مربعات نامیده می‌شود. نرم ۲، همان طول هندسی یا اقلیدوسی^۲ معمول می‌باشد.

¹ Under determined linear inverse problem

² Euclidean length

$$\|d - G(m)\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^M (d_i - (G(m))_i)^2} \quad (25-2)$$

که این رابطه، جذر مجموع مربعات باقیمانده‌های داده‌های اندازه‌گیری شده است.

معیار دیگری از نرم بردار خطا، نرم ۱ آن است:

$$\|d - G(m)\|_1 = \sum_{i=1}^M |d_i - (G(m))_i| \quad (26-2)$$

پاسخ تقریبی مربوط به کمینه کردن نرم ۱ در مقایسه با نرم ۲ نسبت به داده‌هایی که با مدل ریاضی به شدت ناسازگار هستند کمتر حساس است، در نتیجه در صورت وجود داده‌های پرت^۱ و نوفه‌ها، در مقابل آن‌ها مقاوم‌تر است و جواب تقریبی حاصل به مدل واقعی نزدیک‌تر است.

بنابراین، در حل مسائل وارون خطی فروبرآورد سعی می‌شود که جوابی از فضای پارامترهای مدل انتخاب

گردد که متناسب با شرایط مسئله دارای طول بردار کمینه باشد یعنی (Menke, 1989):

$$L(m) = \|m\|^2 = m^T m = \text{Min} \quad (27-2)$$

چنین راهکاری دنبال آن است که پارامترهای مدلی (m^{est}) را بیابد که تابع $L(m)$ را کمینه نموده و تا حد ممکن در شرایط ذیل صدق نماید:

$$e = d - Gm = 0 \quad (28-2)$$

این مسأله به راحتی می‌تواند با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ^۲ حل شود، در این صورت بایستی تابع زیر کمینه گردد:

¹ Outliers

² Lagrange Multiplier

$$\phi(m) = m^T m + \lambda(d - Gm)^T \quad (2-29)$$

که در آن، λ یک ماتریس قطری شامل ضرایب لاگرانژ است. شرط لازم برای کمینه سازی رابطه (2-22) آن است مشتق اول آن صفر شود:

$$\frac{\delta \phi}{\delta m} = 2\delta m^T m - \delta m^T G^T \lambda = \delta m^T (2m - G^T \lambda) = 0 \quad (2-30)$$

در نتیجه:

$$m^{est} = \frac{1}{2} G^T \lambda \quad (2-31)$$

و از طرفی این حل بایستی در معادله (2-28) نیز صدق نماید، یعنی:

$$d = \frac{1}{2} G G^T \lambda \quad (2-32)$$

در این معادله، ماتریس $G G^T$ یک ماتریس مربعی با ابعاد $N \times N$ است که می‌تواند با رابطه (2-33) وارون گردد:

$$\lambda = 2(G G^T)^{-1} d \quad (2-33)$$

و با جایگزینی این معادله در رابطه (2-31) داریم:

$$m^{est} = G^T (G G^T)^{-1} d \quad (2-34)$$

که در این رابطه حلی با حداقل طول برداری برای پارامترهای مدل در مسائل فروبرآورد به‌دست خواهد داد. در رابطه آخر، ماتریس $G^T (G G^T)^{-1}$ ماتریس وارون تعمیم یافته نامیده می‌شود.

۲-۶- مشکلات مسائل وارون

در فرآیند حل هر مساله وارون، سه پرسش اساسی وجود دارد که در ادامه بررسی خواهد شد:

۲-۶-۱- آیا پاسخی برای حل مسئله وجود دارد؟

شرط وجود جواب، مربوط به فرمول‌بندی ریاضی و پارامترسازی مساله وارون است. از دیدگاه ژئوفیزیکی از آنجایی که ساختارهای زمین‌شناسی واقعی داخل زمین مطالعه می‌شود، باید جواب معینی وجود داشته باشد، اما از دیدگاه ریاضی ممکن است هیچ‌گونه مدلی وجود نداشته باشد که بر داده‌های مشاهده‌ای به طور کاملاً دقیق برازش شود.

به طور کلی، می‌توان داده‌ها را به صورت مجموع داده‌های بدون خطا به علاوه خطای اندازه‌گیری در نظر گرفت (Aster et al, 2011):

$$d = Gm^{\text{true}} + \varepsilon = d^{\text{true}} + \varepsilon \quad (2-48)$$

در واقع خطاهای اندازه‌گیری (ε)، ارتباطی با پارامترهای واقعی مدل ندارند و به دلایلی ایجاد می‌شوند که هیچ زمینه مشترکی با معادلات میدان‌های ژئوفیزیکی ندارند؛ بنابراین خطاها را نمی‌توان با مدل ریاضی رابطه (۲-۱۸) برای داده‌های ژئوفیزیکی توصیف کرد. به همین دلیل هیچ علاقه‌ای نیست که داده‌های مدل، به طور کامل بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش شوند؛ پس باید به دنبال بهترین جواب تقریبی یعنی پاسخی که اختلاف بین داده‌های پیش‌بینی شده به وسیله مساله مستقیم و داده‌های تجربی (به زبان ریاضی طول بردار باقی‌مانده) را کمینه کند.

۲-۶-۲ آیا پاسخ به دست آمده یکتا است؟

جهت بررسی یکتایی جواب وارون‌سازی، با توجه به رابطه (۲-۴۹) فرض می‌شود که دو مدل مختلف m_1 و m_2 داده‌های یکسانی را تولید می‌کنند:

$$d_1 = Gm_1 \quad , \quad d_2 = Gm_2 \quad , \quad d_1 = d_2 \quad (2-49)$$

در این صورت غیرممکن است که بتوان به وسیله مجموعه داده‌ها، این دو مدل را از یکدیگر تمیز داد (Zhadanov, 2002).

برای غلبه بر مسئله عدم یکتایی در مسائل وارون دو روش کلی وجود دارد. در روش اول به وسیله مفسر فرض‌های ساده‌ای در مورد شکل مدل انجام می‌شود. برای مثال ممکن است فرض شود که جسم مورد نظر تا بی‌نهایت در یک جهت گسترش دارد. با این‌که چنین فرضیاتی تعداد جواب‌ها را تا حد زیادی کاهش می‌دهد اما تا حد زیادی مدل را از واقعیات زمین‌شناسی که اغلب دارای پیچیدگی‌های فراوانی هستند دور می‌کند. در روش دوم با استفاده از اطلاعات مختلف به دست آمده از چشمه بی‌هنجاری، می‌توان جواب‌ها را محدودتر کرد. برای مثال تعیین محدوده یا تخمین عمق بی‌هنجاری با دیگر روش‌ها و فیلترهای ژئوفیزیکی، می‌تواند محدوده جواب‌ها را کوچک و کوچک‌تر کرده و مجموعه کوچکی از جواب‌های ممکن و منطبق با واقعیات زمین‌شناسی را ارائه دهد. به این گونه داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی، اطلاعات اولیه^۱ گویند (Blakely, 1996).

۲-۶-۳- آیا جواب به دست آمده پایدار است؟

اگر تغییر کوچکی در داده‌های مشاهده‌ای منجر به تغییر قابل توجهی در مدل تخمینی نسبت به مدل واقعی شود، اصطلاحاً به دستگاه معادلات مساله وارون، ناپایدار گفته می‌شود. به عبارت دیگر، با توجه به رابطه (۲-۴)، در سیستم‌های خطی، $f(P)$ یک تابعی خطی از $s(Q)$ است. به ازای تمام نقاط $P \neq Q$ ، $\Psi(P, Q)$ یک تابع یکنواخت است که به آرامی تغییر می‌نماید و مادامی‌که P خارج از جسم باشد، $f(P)$ هموارتر از $s(Q)$ خواهد بود. یعنی، تغییرات کوچکی در $f(P)$ باعث ایجاد تغییرات بزرگ و غیر واقعی در $s(Q)$ شده و حل به دست آمده در این حالت ناپایدار نامیده می‌شود (Blakely, 1996).

¹ Prior information

به زبان ریاضی اگر طبق رابطه (۵۰-۲)، دو مدل کاملاً متفاوت m_1 و m_2 ، دو مجموعه داده‌های متفاوت d_1 و d_2 را تولید کنند:

$$d_1 = Gm_1 \quad , \quad d_2 = Gm_2 \quad (50-2)$$

آنگاه اگر دو مدل کاملاً از یکدیگر متفاوت باشند؛ در حالی که اختلاف داده‌ها در محدوده خطای اندازه‌گیری باشد، مسئله وارون ناپایدار است (Zhadanov, 2002):

$$\|\delta m\| = \|m_1 - m_2\| > C \quad , \quad \|\delta d\| = \|d_1 - d_2\| > \varepsilon \quad , \quad C \gg \varepsilon \quad (51-2)$$

در روابط بالا نماد $\|\dots\|$ ، مبین نرم یا اندازه اختلاف بین دو مدل یا گروه داده‌ها است. تحت این شرایط، تمیز دادن این دو مدل از داده‌های مشاهده‌ای غیرممکن است.

در طراحی مدل‌های خطی، در یک حالت ایده‌آل ریاضی می‌توان گفت که اگر تعداد بلوک‌های استفاده شده در مدل‌سازی زیاد باشد، طبیعتاً دقت شبیه‌سازی ساختار مورد مطالعه بیشتر می‌شود؛ اما همچنین باعث می‌شود تا در رابطه (۲۰-۲) (که همان فرم ماتریسی رابطه (۴-۲) است)، Ψ_{ij} دارای مولفه‌های زیادی از j شود (Blakely, 1996).

$$f_i = \sum_{j=1}^M s_j \Psi_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (52-2)$$

پس با افزایش تعداد بلوک‌ها، مقادیر Ψ_{ij} در ماتریس $[i \times j]$ بسیار به هم نزدیک شده و ماتریس به سمت شرایط بد^۱ و بحرانی و در نتیجه مدل به سمت ناپایداری پیش خواهد رفت. با این شرایط، وجود یک نوفه بسیار کوچک در داده‌های برداشتی، باعث ایجاد تغییرات بسیار زیاد و غیرواقعی در مشخصه‌های مدل می‌شود. پس یکی از مسائل اصلی در مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی، طراحی یک مدل مناسب به همراه حداقل تعداد پارامترهای آن است.

¹ Bad condition

برای این منظور در مرحله طراحی مدل و پارامترسازی آن، باید با استفاده از تمامی اطلاعات اولیه، سعی در کاهش پارامترهای مدل کرد، به طوری که مدل را از شرایط واقعی دور نکند (نجاتی، ۱۳۸۳).

با توجه به تعاریف بالا، اگر جواب مساله وارون وجود داشته و یکتا و پایدار باشد، مساله وارون مناسب و خوش – حالت^۱ است و اگر حداقل یکی از شرایط مذکور برقرار نباشد، بد – حالت^۲ نامیده می شود. در ژئوفیزیک و سایر علوم، بیشتر مسائل وارون بد- حالت هستند؛ زیرا نسبت تعداد مجهولات یا پارامترهای مدل به داده ها بسیار زیاد است. در نتیجه مسئله به سمت فروبرآوردی پیش می رود و پارامترهای آزاد مدل موجب ناپایداری می شود.

مجموعه روش هایی که برای حل مشکل عدم پایداری مساله وارون به کار برده می شود، تحت عنوان نظریه منظم سازی مورد بررسی قرار می گیرد. مبانی این نظریه توسط ریاضی دان روسی آندره تیخونوف^۳، بنیان نهاده شد و اصول نظریه مسائل بد – حالت را گسترش داد. مبنای این روش تقریب یک مسئله بد- حالت بوسیله ی تعدادی مسائل خوش – حالت است (Zhadanov, 2002).

۲-۷- تابع پارامتری تیخونوف

با محدود کردن گروه مدل هایی که برای حل مساله وارون به کار برده می شود، ممکن است مساله بد – حالت به مساله خوش – حالت تبدیل شود. به زبان ریاضی به جای اینکه معادله $d = G(m)$ را در تمام فضای مدل M حل شود، تنها در یک زیر فضای خاص C حل می شود که برای تمامی مدل های موجود در آن شرایط خوش- حالت بودن مساله وارون برقرار است. چنین زیر فضای برداری، مجموعه تصحیح^۴ نامیده می شود. برای ساختن مجموعه تصحیح در یک فضای برداری از توابع پایدارکننده استفاده می شود.

¹ Well-posed

² Ill-posed

³ Andrei Tikhonov

⁴ Correctness set

بنا بر تعریف، تابع نامنفی $s(m)$ در یک فضای برداری، پایدارکننده^۱ نامیده می‌شود اگر برای هر عدد حقیقی مثبت $(c > 0)$ ، زیرمجموعه M_c از اعضای فضای برداری که برای تمامی آنها شرط $s(m) \leq c$ صادق است، یک مجموعه تصحیح باشد (Zhadanov, 2002). تابع پایدارکننده از میان تمامی مدل‌های ممکن فضای برداری، مجموعه تصحیح M_c را انتخاب می‌کند. پس مساله وارون $d = G(m)$ را باید در مجموعه M_c حل شود به طوری که:

$$d = G(m) \quad m \in M_c \quad (53-2)$$

توابع مختلفی را می‌توان به عنوان پایدارکننده استفاده کرد، به عنوان مثال می‌توان ثابت کرد که تابع نرم ۱ و ۲ در فضای M پایدارکنند است (Zhadanov, 2002):

$$S(m) = \|m\| \quad (54-2)$$

همان‌گونه قبلاً اشاره شد به دلیل وجود خطای اندازه‌گیری، اصراری به برازش دقیق داده‌ها نیست، بلکه به دنبال مدلی باید بود تا بهترین برازش ممکن با داده‌ها ایجاد شود. در فرمول‌بندی نظریه منظم‌سازی، مناسب‌تر است که به جای کمینه کردن باقیمانده، مدلی انتخاب شود که داده‌ها را در محدوده خطای اندازه‌گیری برازش دهد؛ یعنی:

$$\|d - G(m)\| \leq \delta \quad (55-2)$$

که در آن δ خطای اندازه‌گیری است. برای انتخاب مجموعه‌ای از مدل‌های پایدار، باید تابع پایدارکننده کمینه گردد (Zhadanov, 2002). بنابراین یافتن پاسخی پایدار به قسمتی از فضای داده محدود می‌شود؛ که علاوه بر برقراری رابطه $\|d - G(m)\| \leq \delta$ ، شرط $S(m) = \min$ را هم برقرار کند. بر مبنای معادلات دیفرانسیل توابع چند متغیره، این مساله معادل با کمینه کردن تابع زیر است:

¹ Stabilizer

$$f(m, \alpha) = \|d - G(m)\|^2 + \alpha S(m) \quad (56-2)$$

تابع $f(m, \alpha)$ تابع پارامتری تیخوخوف نامیده می‌شود و α پارامتر منظم‌سازی نام دارد. تیخونوف و آرسنین (۲۰۰۹) ثابت کردند که مقدار کمینه برای بسیاری از توابع پایدارکننده، زمانی صورت می‌پذیرد که رابطه زیر صدق کند:

$$\|d - G(m)\| = \delta \quad (57-2)$$

پس قید نامساوی به مساوی تبدیل می‌شود و به این ترتیب مقدار پارامتر مثبت α از این رابطه به دست می‌آید.

۲-۸- انتخاب پارامتر منظم‌سازی بهینه

پارامتر منظم‌سازی α توازی بین بهترین برازش به داده‌ها و پایداری جواب مساله وارون ایجاد می‌کند. اگر این پارامتر خیلی کوچک انتخاب شود، کمینه کردن تابع پارامتری تیخونوف عملاً معادل با کمینه کردن اندازه باقیمانده است، در نتیجه منظم‌سازی انجام نمی‌شود و جواب تقریبی ناپایدار و ناصحیح خواهد بود. از سوی دیگر اگر این پارامتر خیلی بزرگ انتخاب شود کمینه کردن تابع پارامتری تیخونوف عملاً معادل با کمینه کردن تابع پایدارکننده است و نقش اندازه باقیمانده حذف می‌شود و جواب تقریبی حاصل برازش نامناسبی بر داده‌ها و ناصحیح خواهد بود. بنابراین انتخاب پارامتر منظم‌سازی بهینه مرحله بسیار مهمی در وارون‌سازی است (Aster et al, 2011).

۲-۹- بهینه‌سازی^۱ و کمینه کردن تابع هدف مساله وارون

مبانی و روش‌های کمینه کردن توابع تحت عنوان نظریه بهینه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، مدل ریاضی مسائل خطی را می‌توان به شکل یک معادله ماتریسی (معادله خطی) نوشت. در

¹ Optimization

نتیجه می‌توان از روش‌ها و تکنیک‌های جبرخطی برای حل آن‌ها استفاده کرد. این روش‌ها بر مبنای فاکتورگیری ماتریس عملگر G ، عمل می‌کنند. مانند تجزیه مقدار تکین^۱ و فاکتورگیری چولسکی^۲ (Zhadanov, 2002؛ Aster et al., 2011). با این وجود، این روش‌ها برای مسائل خطی بزرگ مقیاس یعنی مسائلی که تعداد پارامترهای مدل و ابعاد ماتریس G بسیار بزرگ هستند (مانند مسائل وارون دو و سه بعدی ژئوفیزیک)، به دلیل سرعت پایین آن‌ها و همچنین حجم زیادی که از حافظه کامپیوتر اشغال می‌کنند مناسب نیستند. در این گونه موارد از روش‌های تکرار شونده مانند گرادیان مزدوج خطی^۳ استفاده می‌شود (Aster et al., 2011).

۲-۱۰- انواع روش‌های بهینه‌سازی

از یک دیدگاه، روش‌های بهینه‌سازی به دو دسته قطعی^۴ و تصادفی^۵ تقسیم می‌شوند (Aster et al., 2011). روش‌های تصادفی مانند الگوریتم ژنتیک^۶، بر مبنای الگوریتم‌های تصادفی، تعداد زیادی مدل را شبیه‌سازی کرده و سپس به وسیله آن‌ها پاسخ نهایی را به عنوان مثال با میانگین‌گیری به دست می‌آورد. روش‌های قطعی مانند روش تندترین شیب^۷، روش‌های شبه نیوتون و گرادیان مزدوج، بر اساس الگوریتم‌های تکرار شونده، دنباله مشخصی از تکرارها که به جواب درست مساله همگرا می‌شود را تولید می‌کنند. روش‌های اتفاقی بسیار کندتر از روش‌های قطعی بوده و به لحاظ محاسباتی پرهزینه و کم‌بازده هستند و در برخی موارد که تعداد پارامترهای مدل بسیار زیاد است، انجام آن‌ها مشکل است (Roy, 2002). به همین دلیل در وارون‌سازی مسائل بزرگ مقیاس، بسیار کم استفاده می‌شوند، از این‌رو، روش‌های قطعی در میان ژئوفیزیک‌دانان از مقبولیت بیشتری برخوردارند.

¹ Singular value decomposition

² Cholesky factorization

³ Linear conjugate gradient

⁴ Deterministic methods

⁵ Stochastic methods

⁶ Genetic algorithm

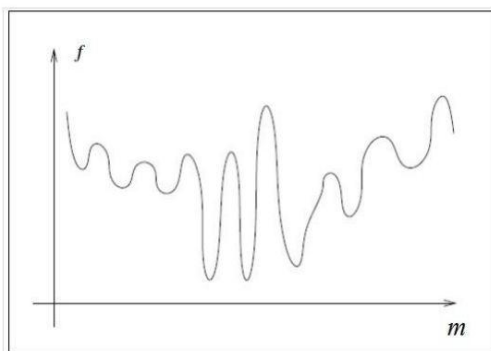
⁷ Steepest descent method

از دیدگاهی دیگر، روش‌های بهینه‌سازی به دو دسته بهینه‌سازی محلی^۱ و بهینه‌سازی سراسری^۲ تقسیم می‌شوند. بهینه‌سازی محلی، کمینه‌های محلی (نسبی) تابع هدف را تعیین می‌کند یعنی مدلی که تنها در یک همسایگی خود در فضای مدل دارای کمترین مقدار تابع است. در حالی که بهینه‌سازی سراسری، کمینه سراسری (مطلق) تابع هدف را تعیین می‌کند؛ یعنی مدلی که در تمامی فضای مدل موردنظر، دارای کمترین مقدار تابع است را مشخص می‌کند. بیشتر روش‌های عددی بهینه‌سازی سراسری، الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی را به عنوان زیربرنامه‌های خود استفاده می‌کنند (Aster et al., 2011).

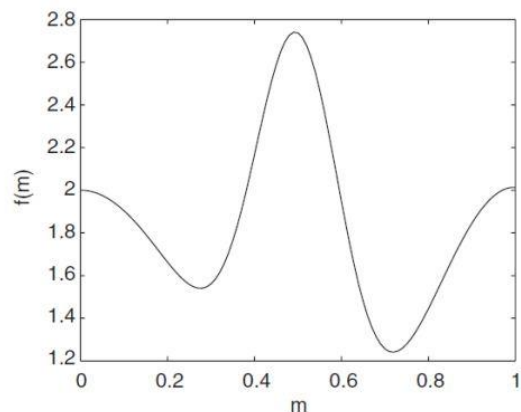
این روش‌ها، بسته به مدل اولیه، تنها به سمت یک کمینه محلی همگرا می‌شوند. اگر تابع هدف تنها یک کمینه داشته باشد، این کمینه هم محلی است و هم سراسری. اما در بیشتر موارد، تابع هدف چندین کمینه محلی دارد (شکل ۲-۲). هرچه تعداد کمینه‌های محلی بیشتر بوده و در فضای مدل به هم نزدیک‌تر باشند، حل مساله وارون دشوارتر است. پیچیدگی بیشتر زمانی است که مقدار تابع هدف در تعدادی از کمینه‌های محلی یکسان باشد (شکل ۲-۳)، که تمامی مدل‌های مربوط به این کمینه‌ها از نظر آماری به یک اندازه درست هستند (عدم یکتایی مساله وارون) و نمی‌توان به سادگی یکی از آن‌ها را به عنوان جواب نهایی مساله وارون معرفی کرد. سرعت عمل کرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری، برای مسائل بزرگ مقیاس بسیار پایین است. به همین دلیل ژئوفیزیکدانان در این‌گونه موارد ترجیح می‌دهند که به جای بهینه‌سازی سراسری، از تمامی اطلاعات موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده کنند و مدل اولیه مناسبی را پیدا کنند که با روش‌های بهینه‌سازی محلی به مدل درست زمین همگرا می‌شود یا این‌که حداقل بتوانند تعداد محدودی مدل اولیه را گزینش کرده و با اعمال الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی، پاسخ‌های حاصل از آن‌ها را برای یافتن صحیح‌ترین و دقیق‌ترین مدل توصیف-کننده زمین بررسی کنند (Aster et al., 2011).

¹ Local optimization methods

² Global optimization methods



شکل ۲-۳: یک مورد مشکل برای بهینه‌سازی سراسری
(Nocedal and Wright, 2006)



شکل ۲-۴: مثالی از یک تابع با چندین کمینه محلی (Aster et al., 2011)

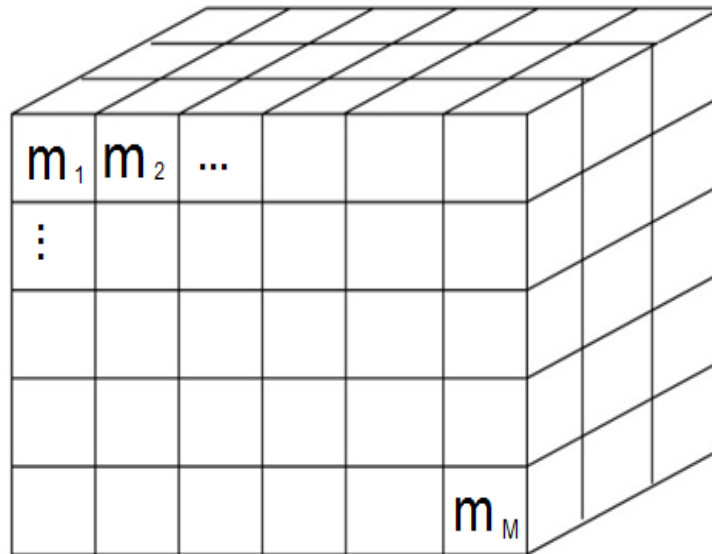
۲-۱۱- نظریه روش وارون‌سازی هموار لی-اولدنبورگ

مؤلفه قائم میدان گرانی در نقطه مشاهده‌ای نام که به فاصله r_i از جسم ناهنجار است، به صورت زیر تعریف می‌شود (Li and Oldenburg, 1998):

$$g_z(r_i) = \gamma \int_V \rho(r) \frac{z - z_i}{|r - r_i|^3} dv \quad (2-58)$$

که در آن $\rho(r)$ توزیع چگالی غیرمتشابه و γ ثابت جهانی گرانش است. هدف از وارون‌سازی، محاسبه مستقیم چگالی ρ ، از داده‌های گرانی به دست آمده از g_z می‌باشد.

برای مدل‌سازی، زمین به تعداد زیادی سلول مکعبی که دارای ویژگی فیزیکی ثابتی هستند، تقسیم می‌شود. این سلول‌ها درون یک دستگاه مختصات متعامد (شکل ۲-۴)، یک سیستم شبکه‌ای سه‌بعدی تشکیل می‌دهند. در این سیستم، زمین به وسیله یک بردار ستونی $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T$ با طول M (تعداد سلول‌ها) معرفی می‌شود. هر درایه‌ی این بردار، مربوط به مقدار ویژگی فیزیکی هر سلول در مدل می‌باشد. براساس توزیع ویژگی



شکل ۲-۴: گسسته سازی زمین از طریق شبکه بندی سه بعدی عمود بر هم (Philips, 2002).

فیزیکی زمین گسسته، جهت محاسبه پاسخ در هر نقطه‌ی مشاهده‌ای، حل مسئله پیش‌رو که شامل حل یک سیستم معادلات است، انجام می‌شود. برای یک سیستم معادلات خطی، داده‌ها از ضرب برداری ماتریسی حاصل می‌شوند (رابطه ۲-۱۹). در این مسائل، مقادیر معلوم در مسئله d و G هستند و در نهایت، هدف محاسبه‌ی m می‌باشد (Philips, 2002). همان‌طور که گفته شد وارون‌سازی مسائل ژئوفیزیکی معمولاً از نوع مسائل فروبرآورد است، بنابراین بی‌نهایت مدل حاصل می‌شود (Lelièvre, 2009)، که از میان آن‌ها، جواب مطلوب مدلی است که با ساختارها و خصوصیات زمین‌شناسی مطابقت داشته باشد. در الگوریتم لی-اولدنبرگ تابع هدف مدل به صورت رابطه (۲-۵۹) تعریف می‌شود (Williams, 2008). قسمت اول معادله‌ی (۲-۵۹)، معیار نزدیکی^۱ مدل به دست-آمده به مدل مرجع (m_{ref}) است، و عبارات بعد، میزان همواری^۲ مدل را در جهات x ، y و z کنترل می‌کند. ضرایب α_s ، α_x ، α_y و α_z جهت وزن‌دهی قسمت‌های مختلف معادله است که تابع هدف مدل را قادر می‌سازد تا با تغییر یک یا دو پارامتر، موفق به بازسازی مدل‌هایی شود که به مدل مرجع نزدیک یا ترجیحاً در یک راستای

¹ Closeness

² Smoothness

خاص هموارتر باشد. توابع وزنی وابسته‌ی فضایی w_x, w_y, w_z و جهت وزندهی اهمیت یک پارامتر مدل نسبت به دیگری است (Philips, 2002).

$$\begin{aligned} \phi_m = & \alpha_s \int_V w_s [W_r(z)(m - m_{ref})]^2 dV + \alpha_x \int_V w_x \left[\frac{\partial}{\partial x} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \\ & + \alpha_y \int_V w_y \left[\frac{\partial}{\partial y} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \\ & + \alpha_z \int_V w_z \left[\frac{\partial}{\partial z} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \end{aligned} \quad (59-2)$$

ϕ_m تابع هدف مدل و تابع W_r ماتریس وزنی عمقی است که هدف آن، خنثی کردن میرایی هندسی حساسیت با فاصله می‌باشد. بنابراین تمام سلول‌ها دارای احتمال یکسان برخورداری اثر منشا هستند و از تمرکز مدل در سطح جلوگیری می‌شود (Williams, 2008).

از طریق توابع وزندهی و مدل مرجع، می‌توان اطلاعات اولیه قابل اعتماد که از زمین‌شناسی یا دیگر روش‌های ژئوفیزیکی حاصل می‌شوند را وارد روند وارون‌سازی کرد. نتیجه این کار، هدایت عملی وارون‌سازی به سمت مدلی است که علاوه بر برازش نسبی بر داده‌ها، با ساختارهای زمین‌شناسی نیز انطباق دارد. شکل ماتریسی رابطه (59-2)، به صورت رابطه (60-2) است:

$$\Phi_m = \|w_m(m - m_{ref})\|^2 \quad (60-2)$$

که در آن w_m یک ماتریس وزنی با ابعاد $M \times M$ است که تمام توابع مشتق و وزندهی های تابع هدف مدل، درون آن جای می‌گیرند و $\|\dots\|$ نرم l_2 است. جهت اندازه‌گیری میزان انطباق داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های مشاهده‌ای، یک تابع عدم برازش داده، به صورت زیر طراحی شده است:

$$\phi_d = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{obs} - d_i^{pre}}{\epsilon_i} \right)^2 \quad (۶۱-۲)$$

و شکل ماتریسی آن به صورت رابطه (۶۲-۲) است:

$$\Phi_d = \|w_d(d^{obs} - d^{pre})\|^2 \quad (۶۲-۲)$$

که در دو رابطه فوق، N تعداد داده‌ها، d_i^{obs} ، $\hat{d}_i$ آمارین داده مشاهده‌ای، d_i^{pre} ، $\hat{d}_i$ آمارین داده پیش‌بینی شده به وسیله مدل و ϵ_i بیانگر انحراف معیار آمارین داده است. روند وارون‌سازی مانند مسائل بهینه‌سازی می‌باشد و هدف پیدا کردن مدلی است که تابع هدف مدل را کمینه کرده و داده‌های آن، تا مقدار معینی بر داده‌های مشاهده‌ای منطبق باشد. رابطه (۶۳-۲)، تابع هدف را نشان می‌دهد؛ که شامل عدم برازش داده‌ها (Φ_d)، تابع هدف مدل (Φ_m) و ضریب منظم‌سازی μ است. کمینه شدن این تابع هدف نهایی منجر به تولید مدل مطلوب می‌شود (Philips, 2002):

$$\phi = \phi_d + \mu\phi_m \quad (۶۳-۲)$$

تابع هدف جدید به صورت رابطه (۶۴-۲) در می‌آید (Gill et al, 1991; Saunders, 1995; Li and Oldenburg, 2003):

$$\phi(\lambda) = \phi_d + \mu\phi_m - 2\lambda \sum_{j=1}^M \ln(m_j) \quad (۶۴-۲)$$

که در آن، عبارت $2\lambda \sum_{j=1}^M \ln(m_j)$ ، تابع حصاربندی^۱، λ ، ضریب حصاربندی^۲ بوده و μ ضریب منظم‌ساز^۳ است که پارامتر μ بین میزان نزدیکی نمودار مدل نهایی به داده‌های اصلی و عدم مدل‌سازی نوفه‌ها، تعادل برقرار می‌-

^۱ Barrier function

^۲ Barrier parameter

^۳ Tradeoff parameter

کند. مراحل به کار رفته در این روش را می‌توان شامل مراحل مدل‌سازی پیش‌رو، انتخاب تابع هدف مدل شامل وزن‌دهی عمقی مناسب، تعیین تابع عدم برازش بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای، مشخص کردن ضریب تعیین‌کننده چگونگی تطابق داده‌ها با یکدیگر و سپس اعمال یک حصار لگاریتمی برای به‌دست آوردن جواب-های مثبت برآورده شده حاصل از وارون‌سازی دانست.

۲-۱۲- استفاده از داده‌های اولیه در روند وارون‌سازی به روش لی-اولدنبگ

علاوه بر ضرایب هموارسازی در جهات مختلف و توابع وزنی عمقی، می‌توان با استفاده از قیدهای مدل مرجع^۱ و مدل کرانه‌ای^۲، اطلاعات به دست آمده از زمین‌شناسی، حفاری و دیگر روش‌های ژئوفیزیکی را وارد روند وارون-سازی کرد. داده‌های استفاده شده از این طریق، از اهمیت و اعتماد بالایی برخوردارند و در نتیجه‌ی نهایی مدل-سازی، بدون هیچ‌گونه تغییری باقی مانده و باعث بهبود مدل نهایی نسبت به حالت بدون قید آن می‌شوند. برای طراحی مدل مرجع می‌توان از اطلاعات حفاری و دیگر فیلترهای متداول ژئوفیزیکی نظیر روش‌های تخمین عمق و مرز، جهت تعیین کردن عمق تقریبی و میزان گستردگی سطحی ساختار مورد مطالعه سود برد. در طراحی مدل کرانه‌ای، حد بالا و پایین تباین‌چگالی برای هر سلول تعریف می‌شود و اجازه نمی‌دهد که از این مقادیر خارج شود؛ با این روش، مدل به شدت مقید شده و نتایج مفیدتری ارائه می‌دهد (Williams, 2008).

۲-۱۳- فیلترها و روش‌های مورد استفاده در تحقیق

۲-۱۳-۱- روش روند سطحی

مقدار گرانی اندازه گرفته شده در هر نقطه، مجموع تمام اثرات ناشی از منابع زیر سطح را نشان می‌دهد. به ندرت یک پروفیل گرانی بر آمده از یک منبع منفرد می‌باشد بلکه غالباً ترکیبی از آثار منابع نزدیک به سطح، ساختارهایی در اعماق متوسط و نیز منابع ناحیه‌ای وسیع‌تر یا دورتر است. به عبارتی در هیچ محلی نمی‌توان

¹ Reference model

² Bounded model

بی‌هنجاری ناشی از یک منبع را اندازه گرفت مگر آنکه با آثار منابع دیگر پوشیده شده باشد. مجموع آثار ناشی از منابع سطحی و متوسط، تحت عنوان آنومالی باقی‌مانده شناخته می‌شود، در حالی که آثار ناشی از منابع عمیق و وسیع به نام بی‌هنجاری ناحیه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Nettleton, 1976). روش‌های متفاوتی برای جدایش آنومالی‌های ناحیه‌ای و محلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از انعطاف‌پذیرترین روش‌های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای، روش روند سطحی است (Unwin, 1975; Miller, 1956). در این روش بر داده‌های گرانی مشاهده‌ای، سطحی عبور داده می‌شود که پیچیدگی معادله ریاضی سطح مورد نظر به روند حاکم بر داده‌ها بستگی دارد (Robinson and Coruh, 1988). در حالت کلی معادله سطح مذکور برای حالت دوبعدی به صورت رابطه (۶۵-۲) است:

$$T(x, y) = A_{00} + A_{10}x + A_{01}y + A_{11}xy + \dots + A_{mn}x^m y^n \quad (۶۵-۲)$$

پس از عبور دادن سطح مزبور بر داده‌های گرانی، مقدار باقی‌مانده گرانی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_i = G_i - T_i \quad (۶۶-۲)$$

که در آن، G_i داده‌های مشاهده‌ای، T_i پاسخ سطح مزبور به عنوان اثر ناحیه‌ای و R_i بیانگر آنومالی باقی‌مانده می‌باشد.

۲-۱۳-۲- فیلترهای فاز محلی

فیلتر زاویه‌ی تمایل یکی از فیلترهای فاز محلی است که مبتنی بر نسبت مشتقات میدان گرانی است و به بررسی تغییرات فازی (زاویه‌ای) مشتق‌های میدان پتانسیل می‌پردازد. این فیلتر در متعادل کردن دامنه‌ی آنومالی‌های عمیق نسبت به آنومالی‌های سطحی مؤثر است؛ به عبارتی فیلتر زاویه‌ی تمایل، دامنه آنومالی‌های عمیق‌تر را نسبت به سطحی‌تر تقویت می‌کند. این فیلتر به صورت رابطه (۶۷-۲) تعریف می‌شود (Miller and Singh, 1994):

$$TA = \tan^{-1} \left(\frac{\partial g / \partial z}{\sqrt{(\partial g / \partial x)^2 + (\partial g / \partial y)^2}} \right) \quad (۶۷-۲)$$

در رابطه (۶۷-۲)، مشتق قائم اول بر روی منشا مقداری مثبت و در لبه‌های آنومالی دارای مقدار صفر بوده همچنین گرادیان افقی بر روی منشا صفر و در لبه‌ها دارای مقدار بیشینه است. به عبارت دیگر در نزدیکی لبه‌های توده، مقدار مشتق افقی بیشینه، میزان مشتق قائم صفر و در نتیجه مقدار زاویه تیلت صفر است. در همین راستا، اگر در محاسبات مربوط به زاویه تیلت، به جای استفاده از تابع تانژانت، از قسمت حقیقی تابع تانژانت هایپربولیک استفاده شود، لبه‌ی توده‌های زیرسطحی با شدت بیشتری برجسته خواهند شد. مقدار کمینه این فیلتر درست در بالای لبه و مرز توده قرار خواهد گرفت. از مزایای بسیار مهم این فیلتر، عدم حساسیت آن به نویزهای موجود می‌باشد. فیلتر زاویه‌ی تمایل هایپربولیک نیز جهت تعیین موقعیت افقی بی‌هنجاری‌ها به کار می‌رود که به صورت زیر تعریف می‌شود (Cooper and Cowan, 2006):

$$HTA = \text{Real} \left(\tan^{-1} \left(\frac{\partial g / \partial z}{\sqrt{(\partial g / \partial x)^2 + (\partial g / \partial y)^2}} \right) \right) \quad (۶۸-۲)$$

که در دو معادله‌ی اخیر g ، میدان گرانی، TA ، زاویه‌ی تمایل و HTA ، زاویه‌ی تمایل هایپربولیک هستند.

فصل سوم

وارون سازی داده های مصنوعی

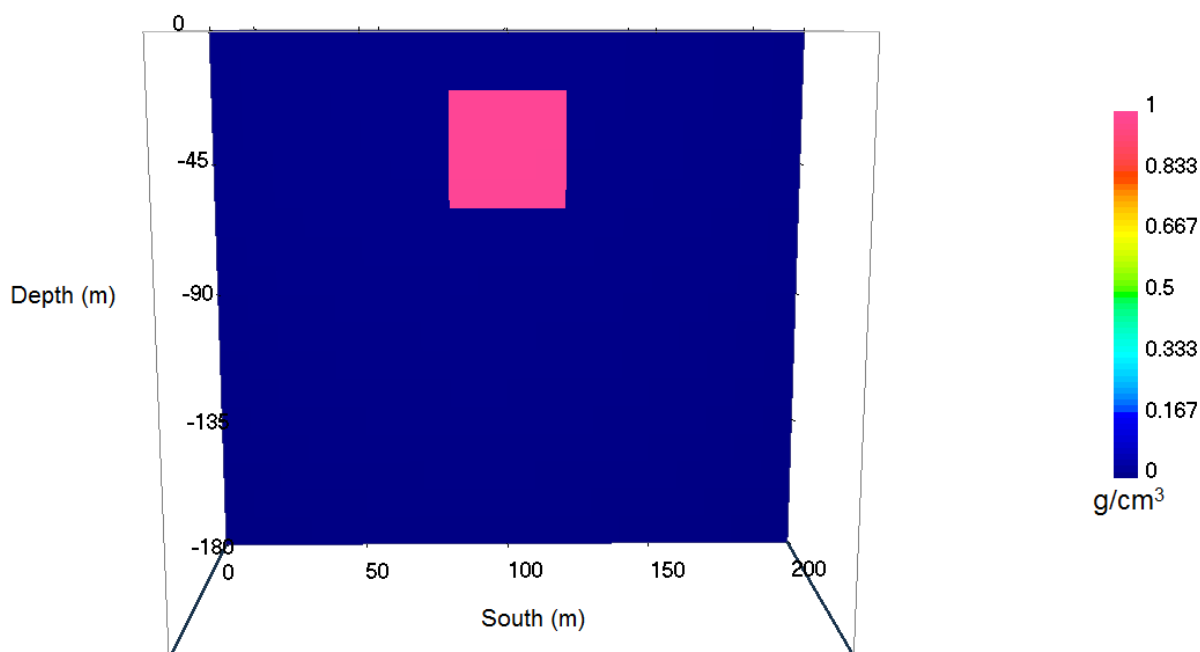
در روش‌های گوناگون ژئوفیزیکی به منظور استفاده بهینه و کاربرد یک روش، فیلتر یا الگوریتم و تحلیل نتایج ابتدا کاربرد آن بر روی داده‌های مصنوعی به همراه نوفه بررسی می‌شود. براساس میزان تطابق نتایج با جواب اصلی، از این روش برای بررسی داده‌های واقعی در یک منطقه استفاده می‌شود. در روش وارون لی-اولدنبرگ، روش‌های متعددی جهت وارد کردن اطلاعات به دست آمده از زمین‌شناسی یا دیگر روش‌های ژئوفیزیکی، برای مقید کردن هر چه بیشتر مدل‌سازی وجود دارد. با استفاده از این قیده‌ها، مدل نهایی از اعتبار و اعتماد بالایی برخوردار بوده و با واقعیات زمین‌شناسی نیز تطابق دارد. از جمله قیود به کار رفته در این روش می‌توان به هموارسازی در سه راستای فضایی، قید مثبت بودن^۱، مدل مرجع، مدل کرانه‌ای اشاره کرد. در این‌جا به منظور بررسی شرایط مدل‌سازی، آشنایی هرچه بیشتر با پارامترهای به‌کاررفته در الگوریتم و تاثیر آن‌ها بر روی نتایج وارون‌سازی، اقدام به مدل‌سازی گام به گام مدل‌های مصنوعی شده است.

۳-۲- مدل مصنوعی مکعبی ساده

مدل مصنوعی استفاده شده در این قسمت به صورت یک مکعب (شکل ۳-۱) تعریف شده است، که دارای طول و عرض ۴۰ متر، عمق سطح بالایی و پایین آن به ترتیب ۲۰ و ۶۰ متر و تباین چگالی آن با محیط اطراف، ۱+ گرم بر سانتی‌متر مکعب منظور شده است (Philips, 2002). این مدل مصنوعی با استفاده از تعداد ۷۲۰۰ سلول با طول، عرض و ارتفاع برابر و به اندازه ۱۰ متر ساخته شده است. داده‌های به‌دست آمده از این مدل، در یک شبکه مربعی به فواصل ۱۰ متر محاسبه شده که حاصل آن، تعداد ۴۰۰ داده و میزان نوفه گوسی تصادفی اضافه شده به این داده‌ها، ۳ درصد است. شبکه‌ی حاصل از داده‌های خام و همراه با نوفه در شکل‌های (۳-۲) و (۳-۳) آمده است. در گام اول، وارون‌سازی بدون اعمال هیچ‌گونه قیدی (حالت پیش‌فرض) انجام شده است (شکل ۳-۴). با استفاده از این شکل می‌توان کارایی روش مورد نظر را در صورت عدم وجود هیچ‌گونه اطلاعات دیگری

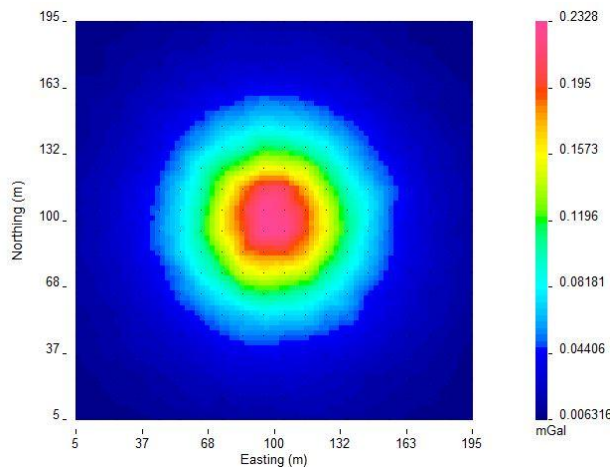
¹ Positivity

بررسی نمود و هم این که از مقایسه این شکل با نتایج حاصل از اعمال پارامترهای مختلف، نقش و تاثیر قیود دیگر بارز می شود. در تمامی شکل ها، مکان صحیح مدل مصنوعی مورد استفاده، با مربع مشکی مشخص شده است تا بتوان میزان تطابق نتایج با جواب اصلی را مورد ارزیابی قرار داد. همچنین در تمامی مدل ها، مقدار بیشینه و کمینه ستون تباین چگالی کنار شکل، یکسان در نظر گرفته شده است تا مقایسه شکل های مختلف به درستی صورت بگیرد.

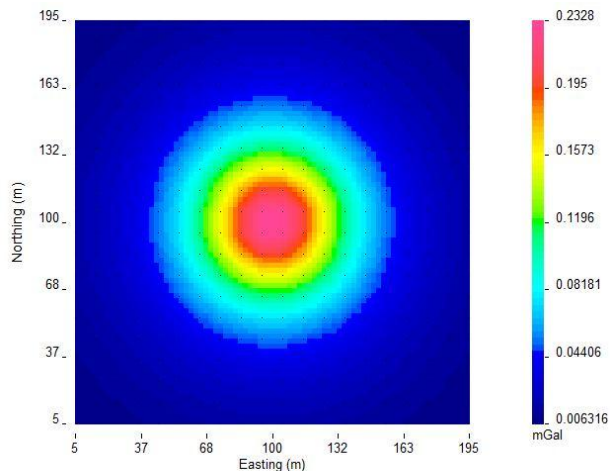


شکل ۳-۱: نمای دوبعدی مدل مصنوعی مکعبی.

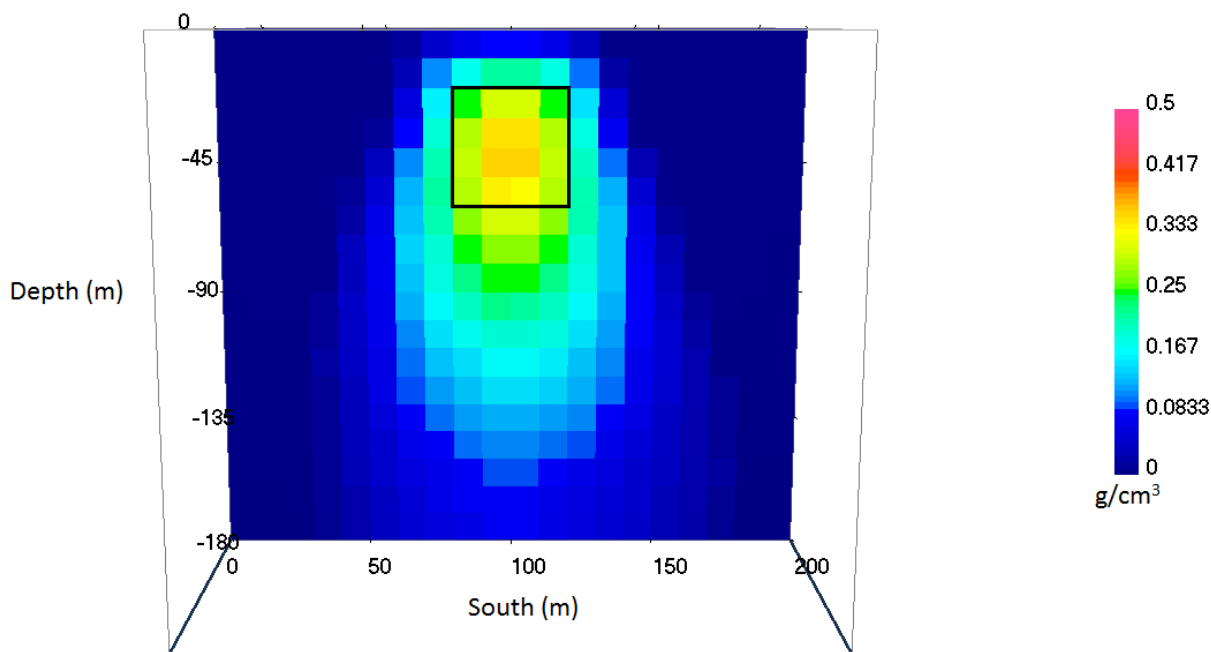
همان طور که در شکل (۳-۴) ملاحظه می شود، در صورت نبود اطلاعات زمین شناسی و صرفا با استفاده از داده های برداشت گرانی سنجی، می توان درک نسبتا مناسبی از ساختار زیرسطحی به دست آورد. با توجه به اینکه روش گرانی سنجی به تغییرات جانبی چگالی حساس بوده، در این شکل مرز افقی بی هنجاری به خوبی مشخص شده؛ اما قسمت زیرین مدل، به سمت عمق کشیده شده است و تباین چگالی آن از مقدار واقعی کمتر می باشد. در گام دوم قید مثبت بودن به وارون سازی اعمال شده است (شکل ۳-۵). این قید در جاهایی کاربرد دارد که بی هنجاری مورد مطالعه، با زمینه دارای تباین چگالی مثبت یا منفی است؛ اما در صورت وجود بی هنجاری های



شکل ۳-۳: شبکه‌ی حاصل از داده‌های گرانی مدل مصنوعی مکعبی با ۳ درصد نوفه



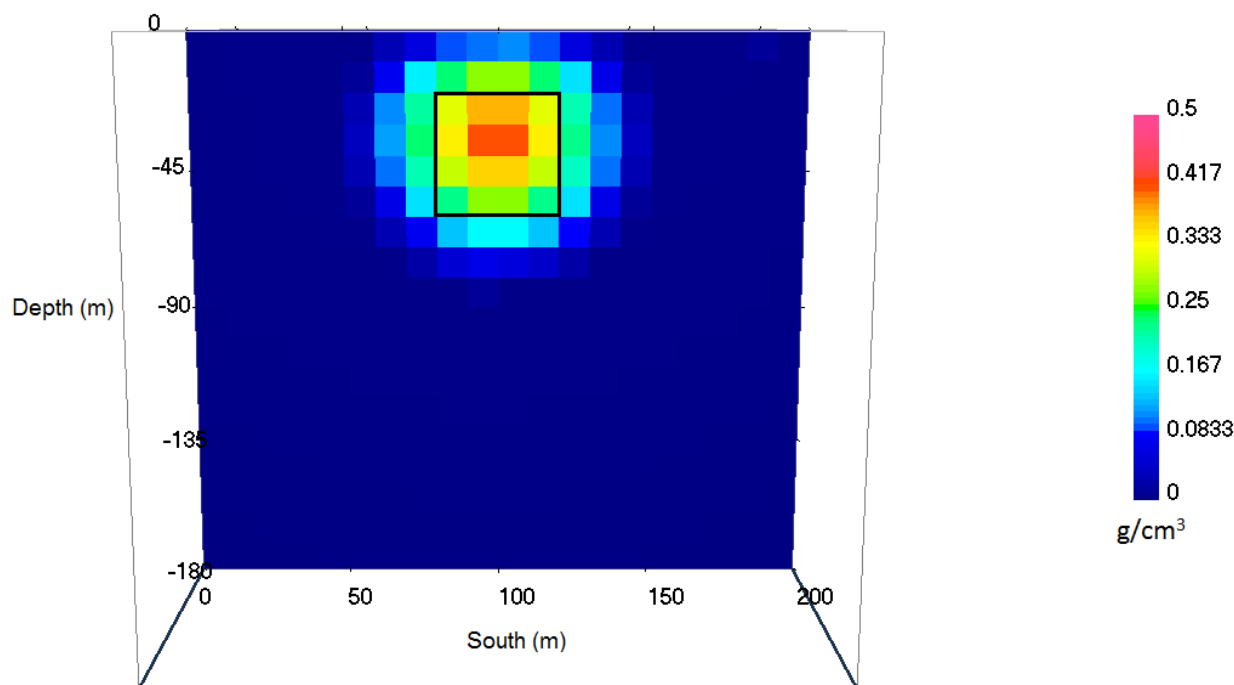
شکل ۳-۲: شبکه‌ی حاصل از داده‌های خام بدون نوفه



شکل ۳-۴: وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض و بدون اعمال هیچ‌گونه قیدی

مثبت و منفی، استفاده از این قید باعث محو شدن یکی از بی‌هنجاری‌ها می‌شود. در این موارد معمولاً هر یک از بی‌هنجاری‌ها به صورت مجزا مورد مدل‌سازی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۳-۵) مشخص است، قید مثبت بودن از کشیدگی عمقی زیاد مدل جلوگیری کرده و میزان تباین چگالی مدل بهبود یافته است. در گام بعد، تاثیر افزایش میزان همواری در جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از این قید در مواردی

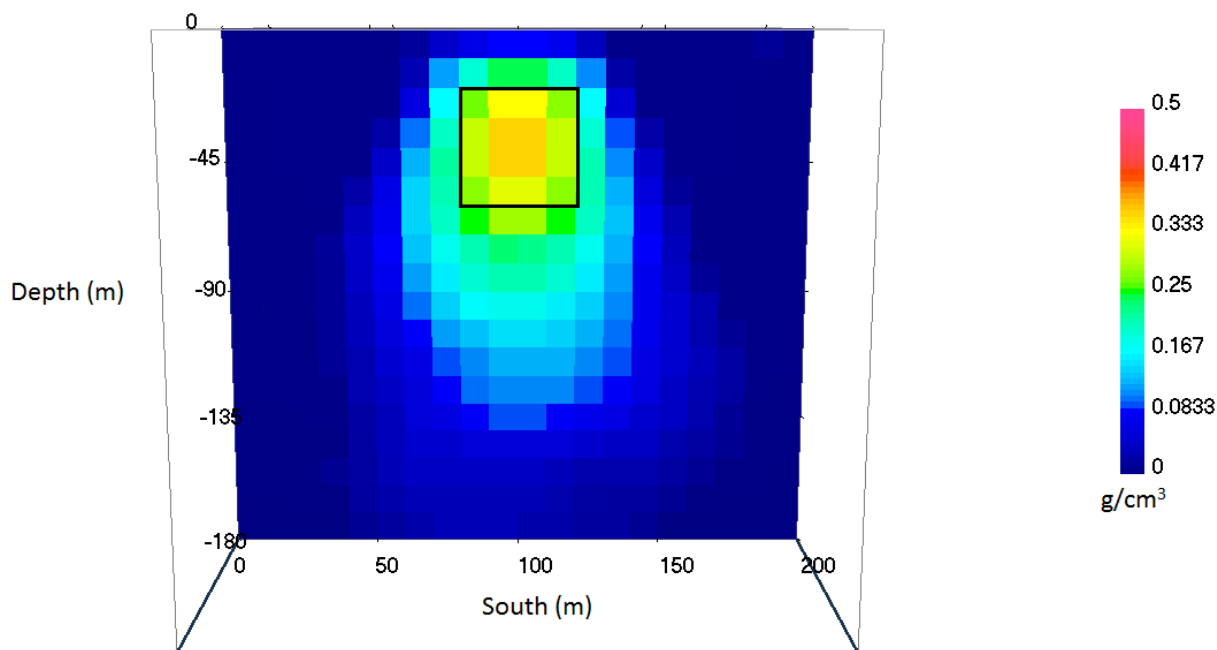
است که از ساختار موردنظر، کشیدگی در یک جهت خاص انتظار می‌رود. برای مثال در مدل‌سازی لایه‌ای کشیدگی در راستای قائم بسیار کمتر از راستاهای افقی است و در ساختارهایی نظیر گنبدنمکی کشیدگی



شکل ۳-۵: مقطع عرضی وارون‌سازی مدل مصنوعی مکعبی با اعمال قید مثبت بودن.

عمقی بیشتر از کشیدگی افقی است. در شکل (۳-۶)، میزان همواری در راستای x و y نسبت به راستای z بیشتر بوده و در شکل (۳-۷)، ضریب همواری قائم نسبت به افقی بیشتر می‌باشد. از مقایسه شکل (۳-۶) با شکل (۳-۴) می‌توان تاثیر افزایش همواری در راستاهای افقی را مشاهده کرد. در شکل (۳-۷) نیز اثر افزایش هموارسازی در راستای قائم، به خوبی مشهود و عمق پایین مدل کشیده شده است. در گام‌های بعد، قیود مدل مرجع و مدل کرانه‌ای بررسی خواهند شد. با استفاده از این قیدها، می‌توان اطلاعات دقیقی مانند مشخص شدن محدوده‌های وجود یا عدم وجود ماده معدنی که از نقاط حفاری به دست می‌آید را وارد روند وارون‌سازی کرد. همچنین با استفاده از این اطلاعات می‌توان تباین چگالی ماده معدنی را محاسبه و اقدام به طراحی قید مدل مرجع کرد. در این قسمت، نصف مدل مصنوعی به عنوان قید مدل مرجع به وارون‌سازی اعمال شده و نتیجه آن

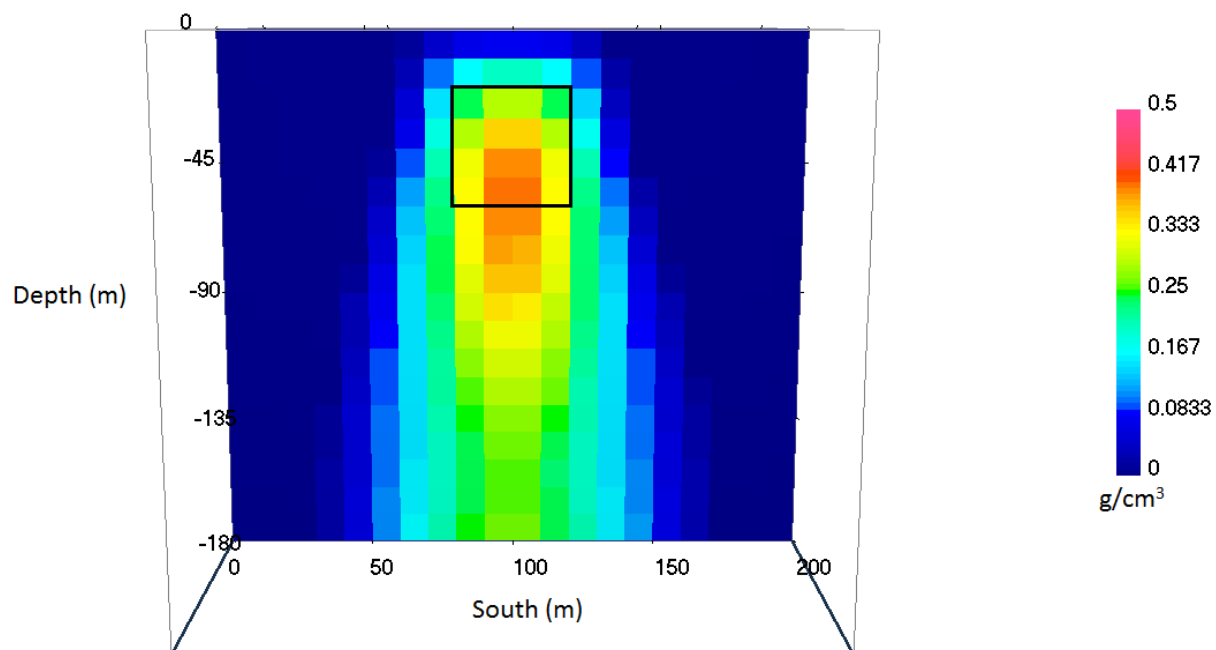
در شکل (۸-۳) آورده شده است. در طراحی مدل کرانه‌ای، برای هر سلول می‌توان یک محدوده تعریف کرد که کران‌های آن، بیشینه و کمینه‌ی تباین چگالی هستند. با استفاده از این روش، وارون‌سازی به شدت مقید شده اما لازمه آن داشتن اطلاعات دقیقی از بی‌هنجاری مورد مطالعه است.



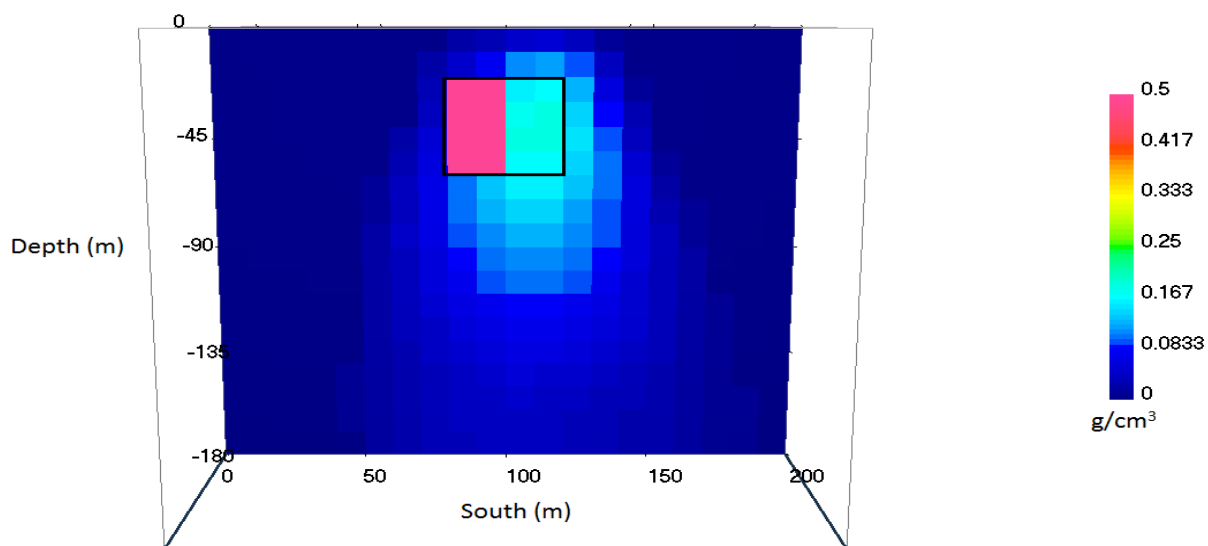
شکل ۳-۶: اعمال قید هموارسازی (همواری در راستاهای افقی بیشتر از راستای قائم است).

در شکل (۹-۳) نصف مدل مصنوعی به عنوان قید مدل کرانه‌ای به وارون‌سازی وارد شده است (Philips, 2002). کشیدگی عمقی مدل در شکل (۸-۳) در مقایسه با حال پیش‌فرض (شکل ۳-۴) کمتر بوده و تمرکز آن در مکان صحیح مدل بیشتر بوده و در نتیجه با مدل مصنوعی تطابق بیشتری دارد. از مقایسه شکل (۹-۳) با شکل (۳-۴)، مشخص است که تمرکز مدل بازسازی شده در محدوده صحیح مدل مصنوعی، بسیار مناسب است و به-وضوح تاثیر مثبت قید مدل کرانه‌ای مشاهده می‌شود.

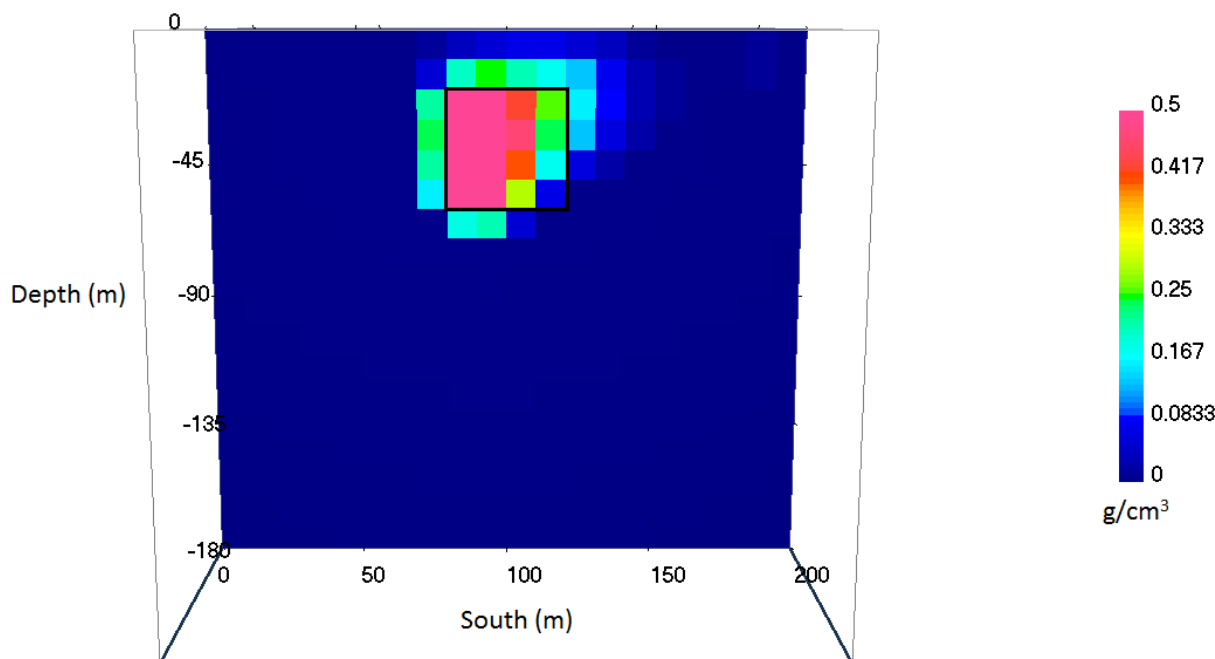
با مقایسه شکل (۸-۳) و (۹-۳) ملاحظه می‌شود که بازسازی و تباین چگالی نصفه‌ی دیگر مدل مصنوعی در شکل (۹-۳) بهتر است. پس نتیجه گرفته می‌شود که در کل عمل کرد قید مدل کرانه‌ای بسیار بهتر از قید مدل مرجع است.



شکل ۳-۷: اعمال قید هموارسازی (همواری در راستای قائم بیشتر از راستاهای افقی است).



شکل ۳-۸: اعمال قید مدل مرجع به وارون سازی (نصف مدل مصنوعی به عنوان قید مدل مرجع)



شکل ۳-۹: اعمال قید مدل کرانه‌ای به وارون‌سازی (نصف مدل مصنوعی به عنوان قید مدل کرانه‌ای)

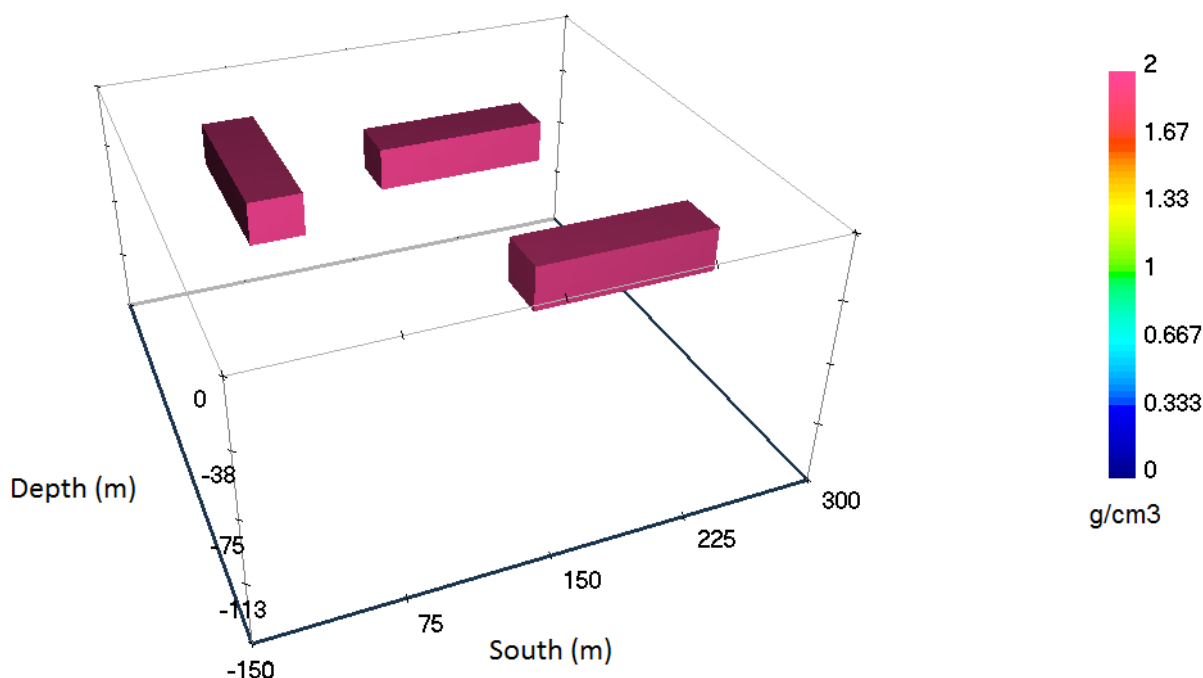
۳-۳- مدل مصنوعی مرکب

در این قسمت، برای بررسی کارایی روش لی-اولدنبرگ در بازسازی بی‌هنجاری‌های چندگانه و با اعماق مختلف، یک مدل مصنوعی که متشکل از دو مکعب مستطیل در شمال غرب و جنوب شرق، با عمق بالا و پایین به ترتیب ۱۵ و ۴۰ متر و یک مکعب مستطیل در شمال شرق با عمق بالا و پایین به ترتیب ۲۵ و ۵۰ متر است، مورد استفاده قرار گرفت که تباین چگالی مکعب‌ها با محیط اطراف، ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب منظور شده است. این مدل مصنوعی با استفاده از تعداد ۲۱۶۰۰۰ سلول با طول، عرض برابر و به اندازه ۵ متر و ارتفاع ۲/۵ متر ساخته شده است (شکل ۳-۱۰). جهت وارون‌سازی، اثر گرانی حاصل از وجود این اجسام، در یک شبکه منظم مربعی به فواصل ۵ متر محاسبه شده که حاصل آن تعداد ۳۶۰۰ داده است. به منظور واقعی جلوه دادن داده‌ها، نوفه گوسی به میزان دو درصد به داده‌ها اضافه شد. نتیجه مدل‌سازی پیش‌فرض، در شکل (۳-۱۱) آورده شده است. قابل ذکر است که در این شکل، جهت مشاهده بهتر نتیجه، سلول‌هایی با تباین چگالی کمتر از ۰/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که تباین چگالی از میزان

واقعی کمتر است و مدل‌ها به سمت عمق کشیده شده‌اند؛ اما در همین مرحله و با وجود تمام کاستی‌ها، مکعب موجود در شمال شرق، در عمق بیشتری نسبت به دو مکعب دیگر قرار گرفته است.

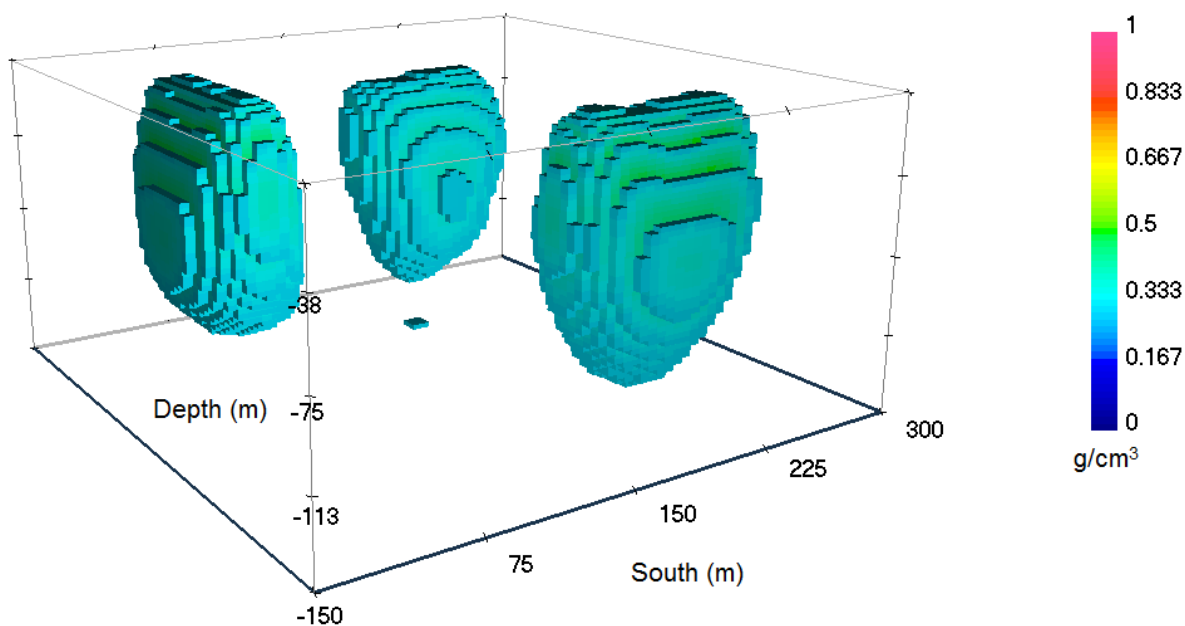
با توجه به این که میزان کشیدگی سطحی مکعب‌ها بیشتر از کشیدگی عمقی آن‌ها است، پس در گام بعد، ضریب هموارسازی در راستاهای افقی را نسبت به ضریب هموارسازی عمقی بیشتر شده است (شکل ۳-۱۲). مطابق این شکل، کشیدگی مدل‌ها نسبت به حالت قبل (شکل ۳-۱۱) کمتر می‌باشد.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، برای از بین بردن کشیدگی عمقی زیاد در شکل (۳-۱۲)، از قید مثبت بودن استفاده می‌شود (شکل ۳-۱۳).



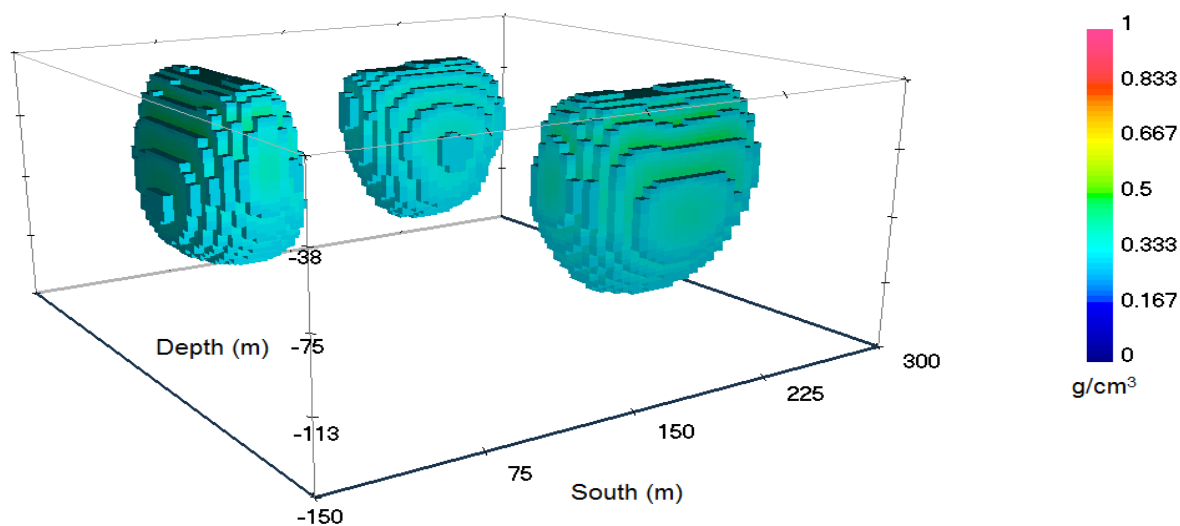
شکل ۳-۱۰: نمای سه‌بعدی مدل مصنوعی مرکب.

در شکل (۳-۱۴)، نمایشی از سطح بالای مدل‌ها در افق ۳۰ متری نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تباین چگالی مکعبی که در عمق بیشتری نسبت به دو مکعب دیگر است، کمتر برآورد شده است. در این موارد اعمال قیود بیشتر در مدل‌سازی باعث نزدیک‌تر شدن میزان تباین چگالی مکعب عمیق‌تر به مقدار واقعی

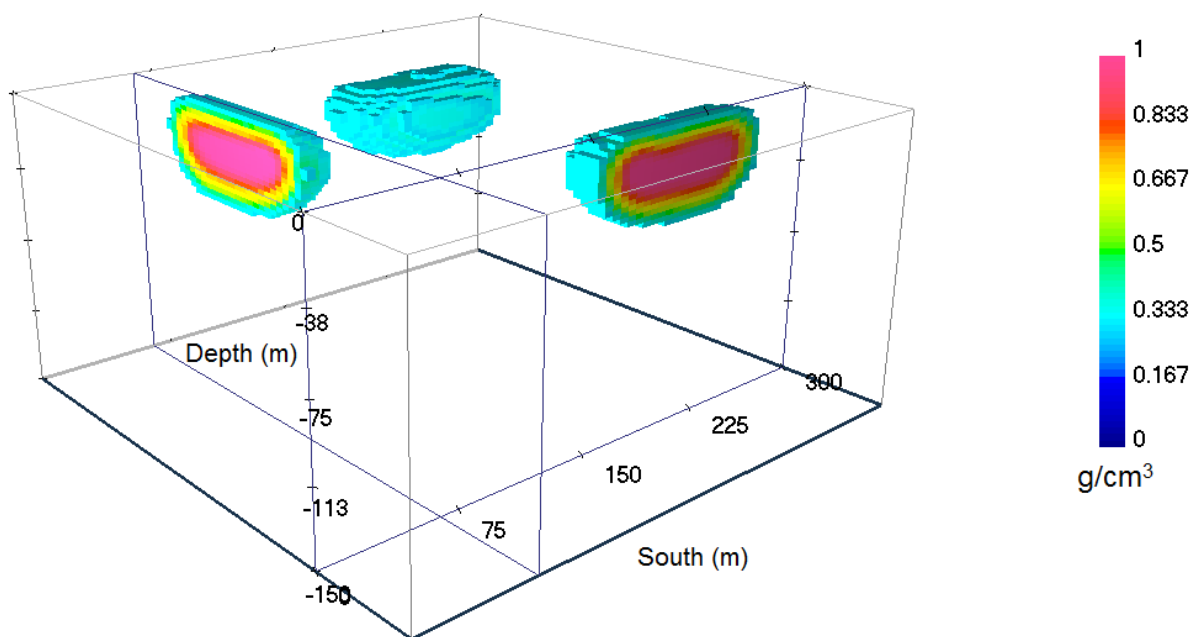


شکل ۳-۱۱: وارون سازی در حالت پیش فرض (سلول هایی با تباین چگالی کمتر از 0.3 گرم بر سانتی متر مکعب نمایش داده نشده اند).

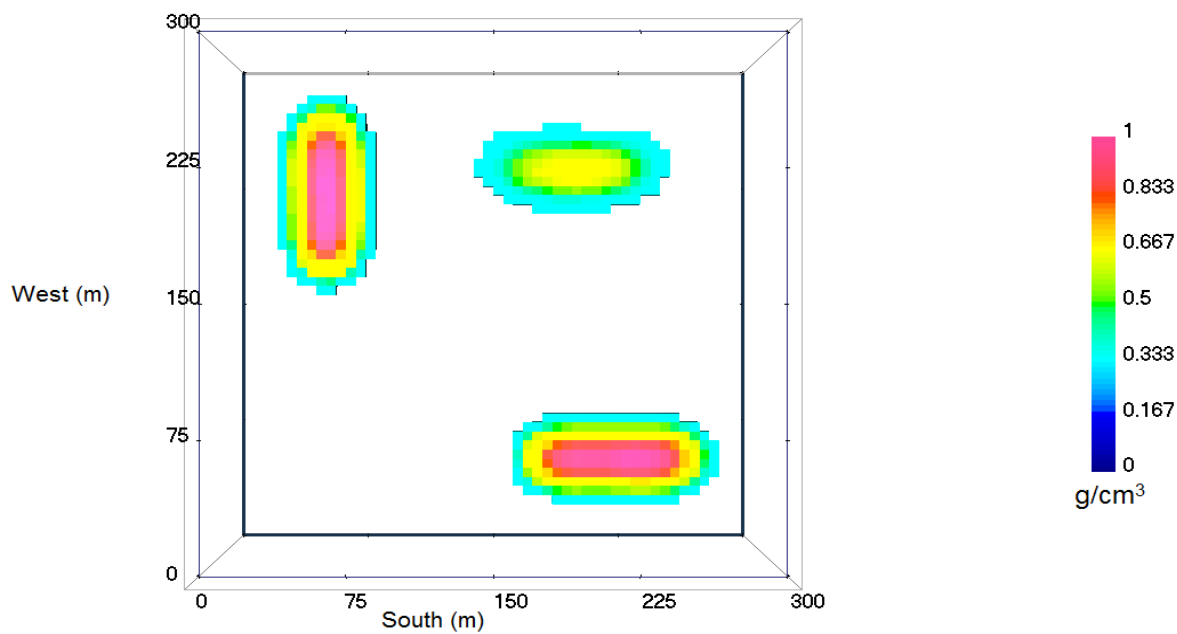
خواهد شد. با دقت در این شکل ها، مشخص است که با استفاده از الگوریتم وارون سازی لی-اولدنبورگ، مدل های مصنوعی پراکنده با تباین چگالی مناسب به راحتی قابل تشخیص و مدل سازی می باشند.



شکل ۳-۱۲: افزایش هموارسازی در راستاهای افقی نسبت به راستای قائم (سلول هایی با تباین چگالی کمتر از 0.3 گرم بر سانتی متر مکعب حذف شده اند).



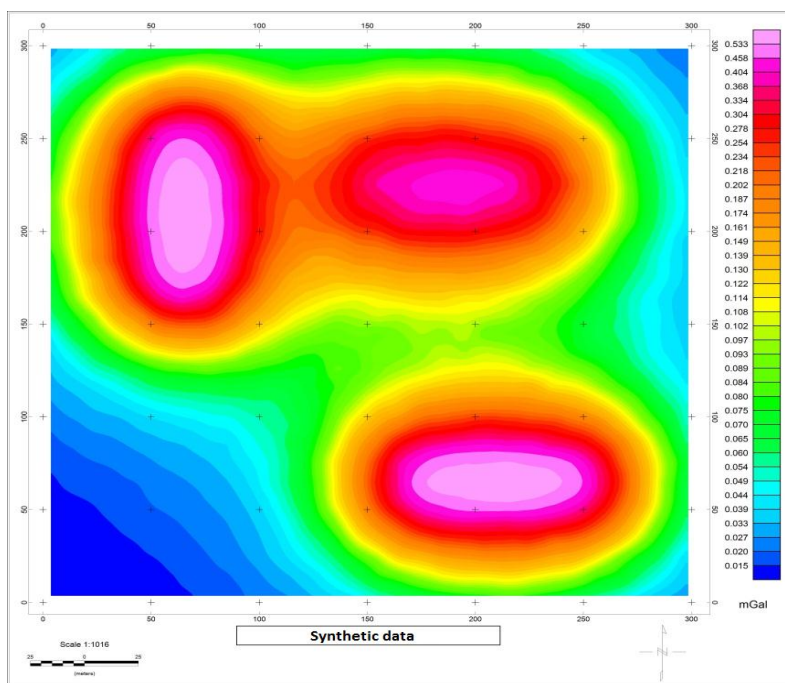
شکل ۳-۱۳: اعمال همزمان قیود مثبت بودن و افزایش هموارسازی افقی (سلول‌هایی با تباین چگالی کمتر از 0.3 گرم بر سانتی-متر مکعب حذف شده‌اند).



شکل ۳-۱۴: نمایشی از سطح بالای اجسام شکل (۳-۱۳) در عمق 30 متری (سلول‌هایی با تباین چگالی کمتر از 0.3 گرم بر سانتی-متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

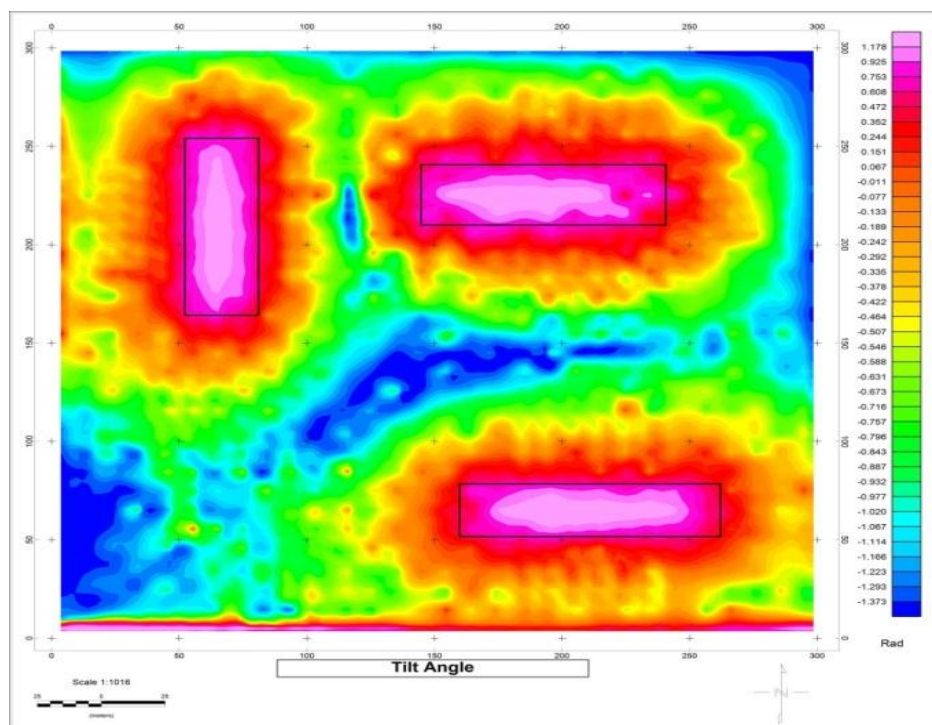
در وارون‌سازی داده‌های واقعی، با توجه به این‌که اطلاعات چندانی در مورد ساختار زیرسطحی وجود ندارد، برای بهبود بخشیدن مدل نهایی و نزدیک‌تر کردن آن به مدل زمین‌شناسی، به اطلاعات اضافی نیاز است، لذا می‌توان از روش‌های دیگری مثل انواع فیلترهای ژئوفیزیکی استفاده و نتایج آن‌ها را به عنوان قید وارد روند وارون‌سازی نمود. برای مثال می‌توان از فیلترهای فاز محلی برای تخمین مرز بی‌هنجاری استفاده نمود.

نقشه آنومالی باقی‌مانده حاصل از مدل مصنوعی مرکب، در شکل (۳-۱۵) آمده است. با استفاده از کدهای MATLAB تحت عنوان پوتن‌سافت^۱ (Arisoy and Dikmen, 2011)، فیلترهای زاویه‌تمایل و زاویه‌تمایل هایپربولیک، به داده‌ها اعمال و نتایج آن در شکل‌های (۳-۱۶) و (۳-۱۷) آورده شده است؛ که با توجه به قرارگرفتن مکان صحیح مدل‌ها بر روی شکل‌ها، مشاهده می‌شود که فیلترهای مورد استفاده، عمل‌کرد قابل قبولی داشته و ابزار مناسبی جهت مقید کردن وارون‌سازی به شمار می‌روند.

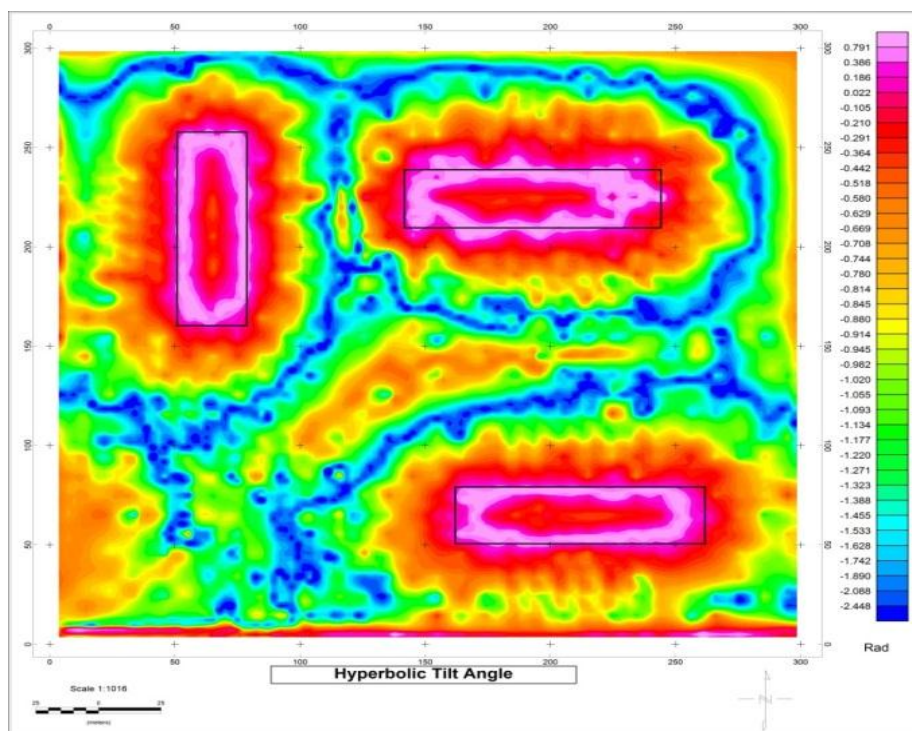


شکل ۳-۱۵: نقشه آنومالی باقی‌مانده گرانی حاصل از مدل مصنوعی مرکب.

¹ Poten Soft



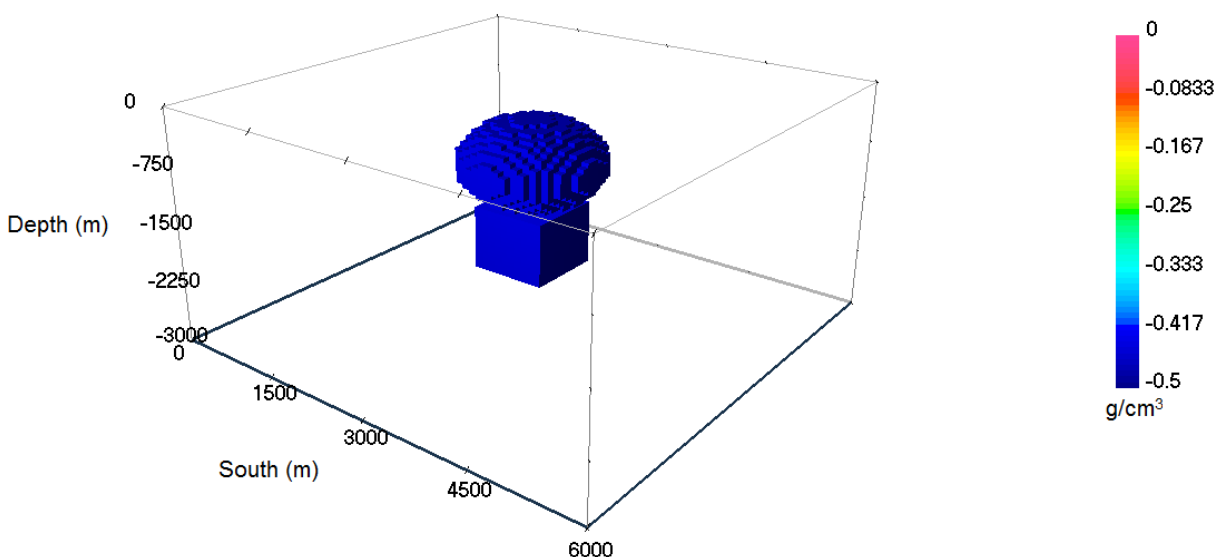
شکل ۳-۱۶: نقشه حاصل از عمل کرد فیلتر زاویه تمایل روی داده‌های گرانی مدل مصنوعی مرکب.



شکل ۳-۱۷: نقشه حاصل از عمل کرد فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک روی داده‌های گرانی مدل مصنوعی مرکب.

۳-۴- مدل مصنوعی گنبدنمکی

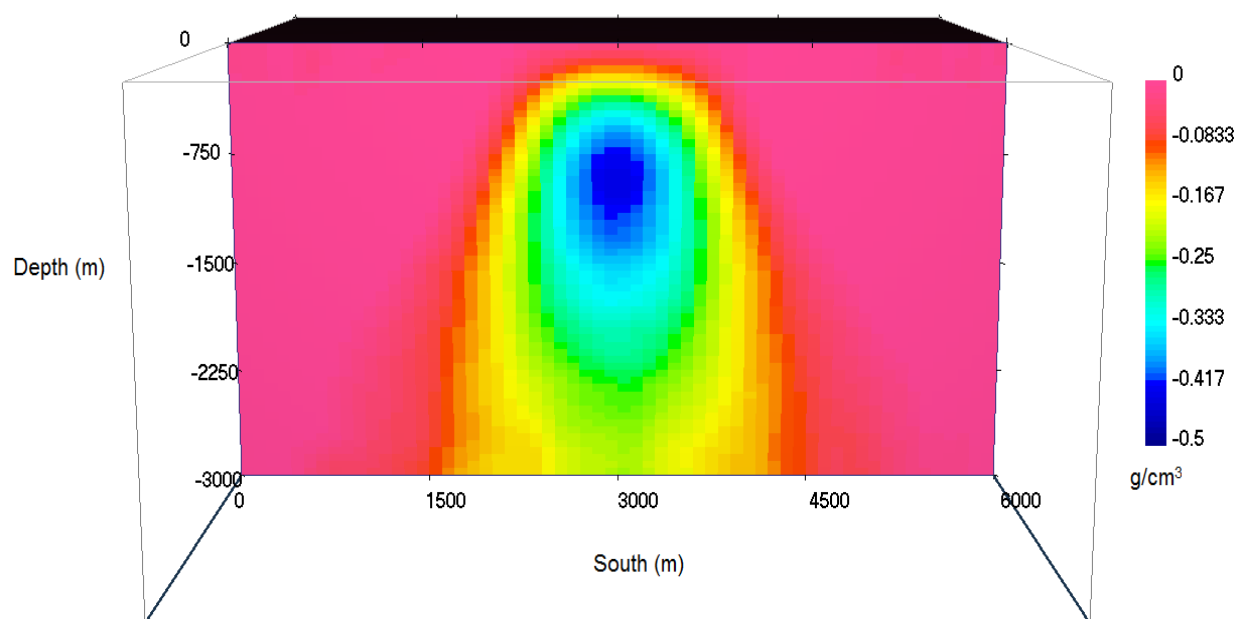
برای بررسی مدل‌هایی با جزئیات بیشتر و تباین چگالی منفی، از مدل مصنوعی پیچیده‌تر که با پدیده‌های زمین‌شناسی بیشتر هماهنگ باشد، استفاده شد (شکل ۳-۱۸). در این مدل که از یک قسمت بیضی شکل در بالا و منشوری شکل در پایین درست شده است، عمق بالای ساختار، ۳۰۰ متر و عمق پایین آن ۲۲۰۰ متر و مقدار تباین چگالی آن با محیط اطراف، ۰/۵- گرم بر سانتی‌متر مکعب است.



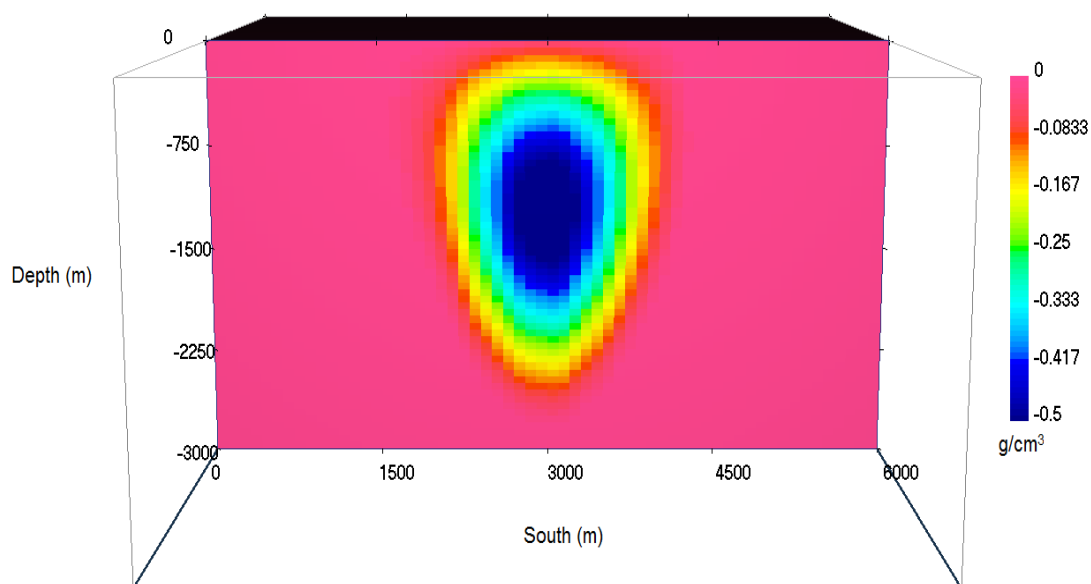
شکل ۳-۱۸: نمای سه‌بعدی مدل مصنوعی گنبدنمکی.

با استفاده از مقادیر پیش‌فرض وارون‌سازی، مدل شکل (۳-۱۹) حاصل شد که در آن تباین چگالی مرکز شکل مناسب بوده اما اطراف شکل، دارای تباین چگالی کمتری نسبت به مقدار واقعی‌اند و همچنین شکل نیز به سمت عمق کشیده شده است. در این قسمت، جزئیات شکل (باریک شدگی از بالا به پایین) به خوبی بازسازی نشده است. با توجه به میزان کشیدگی عمقی، در مرحله بعد با افزایش ضریب هموارسازی در راستای قائم و اعمال قید مثبت بودن، مدل مناسبی حاصل شد (شکل ۳-۲۰). همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، تمرکز تباین چگالی مطلوب در مرکز شکل وسیع‌تر و از کشیدگی عمقی مدل جلوگیری شده است؛ همچنین جزئیاتی

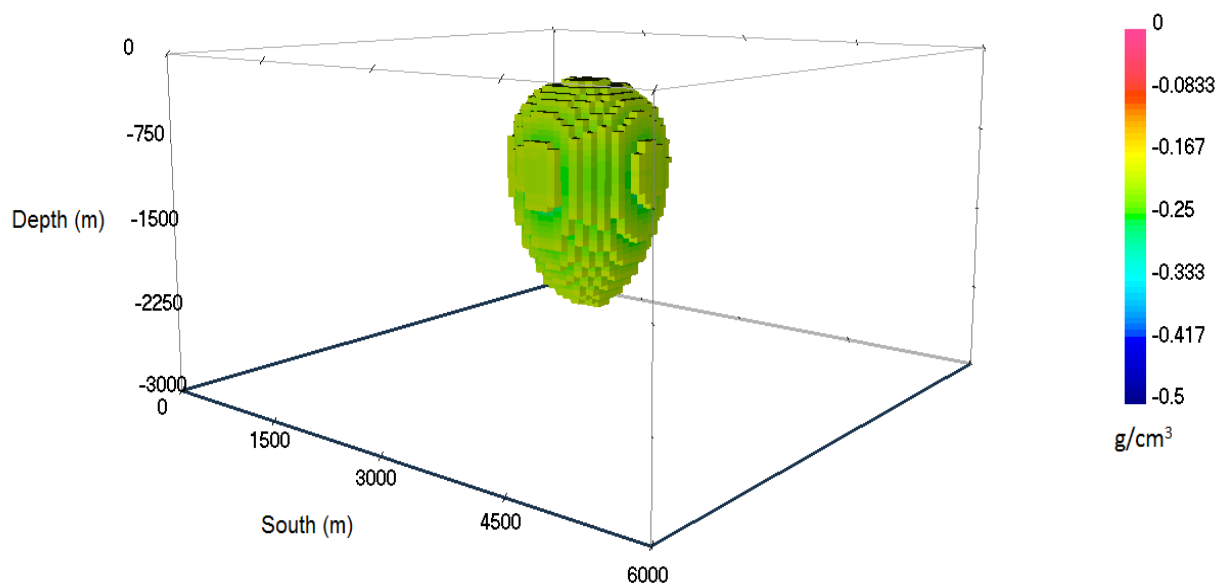
مثل باریک شدگی از بالا به پایین به خوبی نمایان است. جهت درک بهتر مدل به دست آمده از شکل (۳-۲۰)، نمای سه بعدی آن نیز در شکل های (۳-۲۱) و (۳-۲۲) آورده شده است.



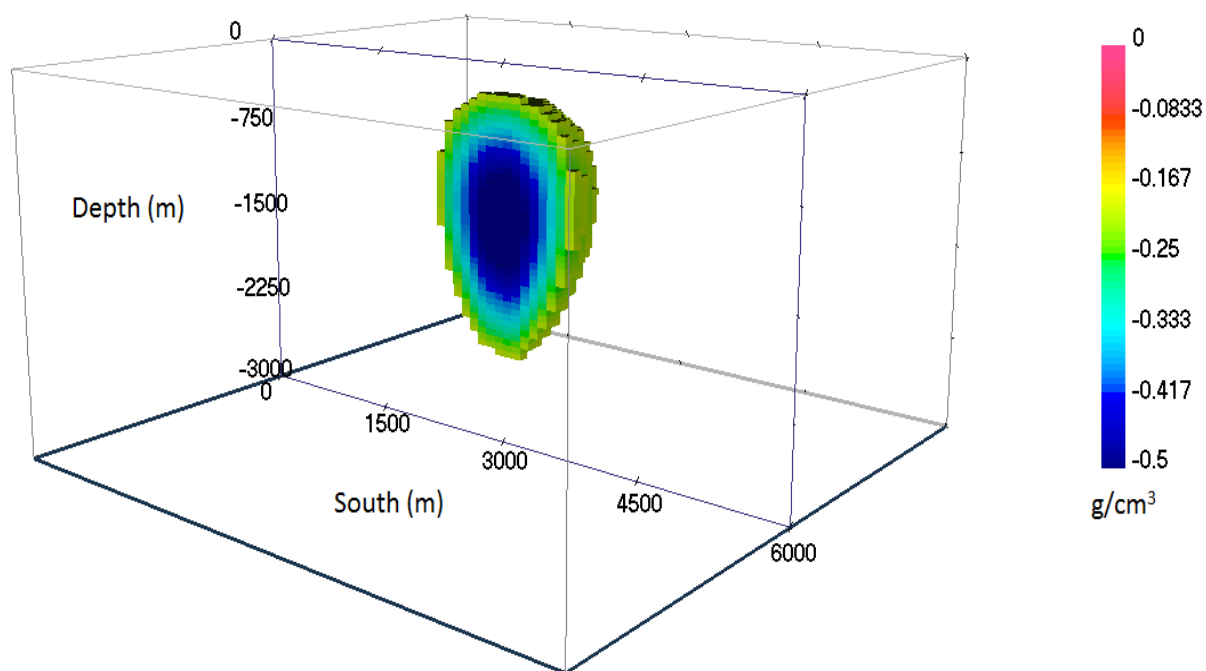
شکل ۳-۱۹: وارون سازی با استفاده از مقادیر پیش فرض.



شکل ۳-۲۰: اعمال همزمان قیود مثبت بودن و افزایش هموارسازی قائم.



شکل ۳-۲۱: نمای سه‌بعدی شکل (۳-۲۰) سلول‌هایی با تباین چگالی بیشتر از 0.2 - گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده- اند).

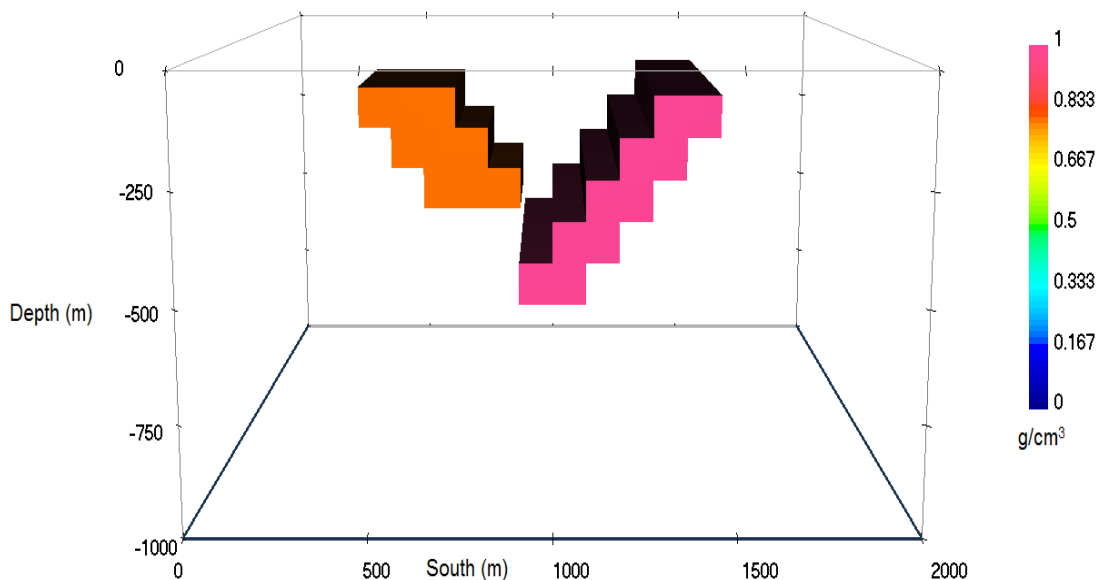


شکل ۳-۲۲: مقطع عرضی - سه‌بعدی شکل (۳-۲۰) سلول‌هایی با تباین چگالی بیشتر از 0.2 - گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

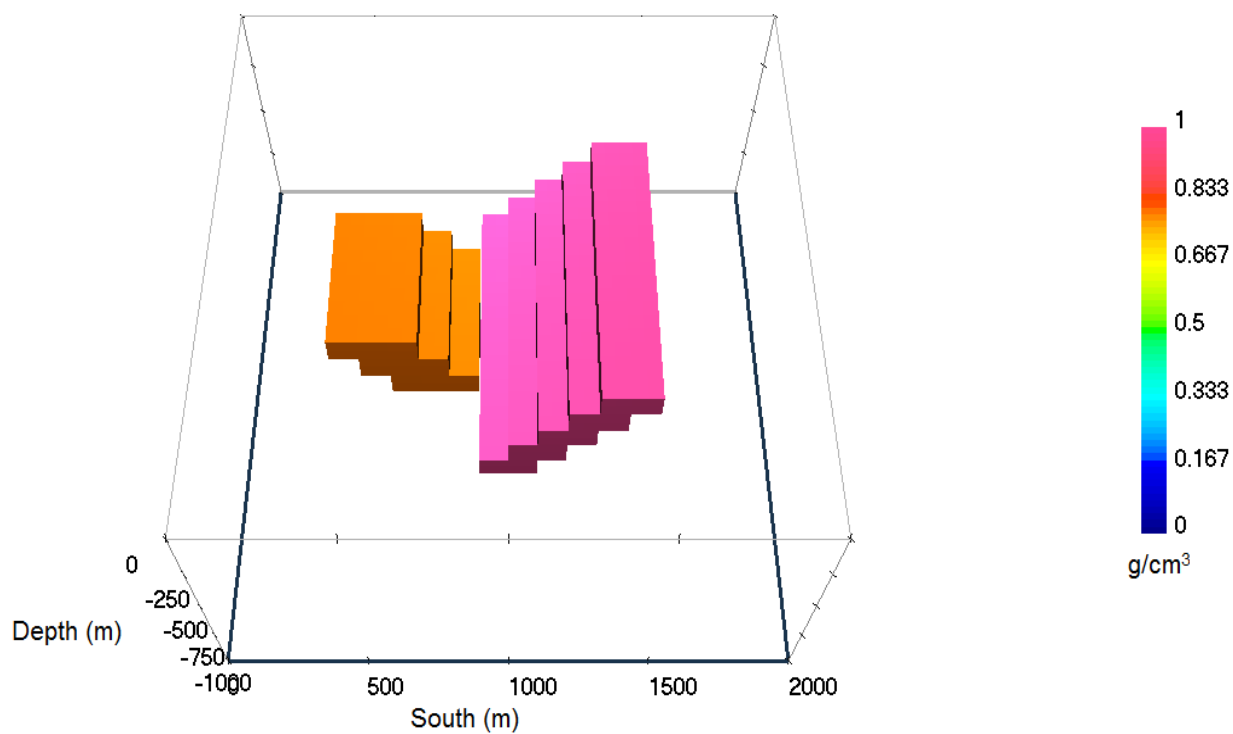
۳-۵- مدل مصنوعی مرکب شیب‌دار

در این قسمت، به تحلیل و بررسی مدل مصنوعی پیچیده‌تر پرداخته شده است (li and Oldenburg, 1998). این مدل مصنوعی از دو پله تشکیل شده است که دارای شیب، تباین چگالی، طول، عرض و ارتفاع متفاوتی از یکدیگر هستند. تباین چگالی پله شرقی و غربی به ترتیب ۱ و ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است (شکل ۳-۲۳ و ۳-۲۴).

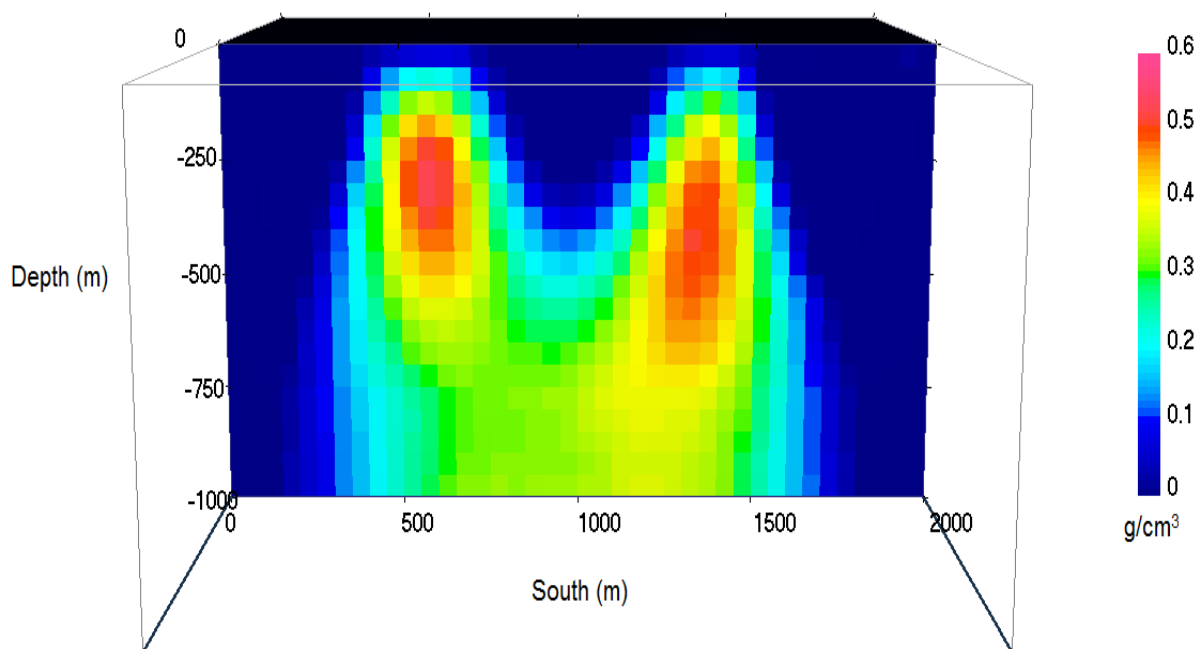
ابتدا جهت بررسی این نکته که آیا بدون هیچ‌گونه اطلاعات اولیه و قیدی، مدل مناسبی حاصل می‌شود یا نه، وارون‌سازی با حالت پیش‌فرض، انجام شد و نتیجه آن با نماهای مختلفی در شکل‌های (۳-۲۵)، (۳-۲۶) و (۳-۲۷) آورده شده است. با دقت در شکل‌های (۳-۲۵)، (۳-۲۶) و (۳-۲۷)، مشخص می‌شود که تباین چگالی مدل‌ها، نسبتاً مناسب، پله‌ای بودن مدل، تا حد زیادی بازسازی و مدل‌ها به عمق کشیده شده‌اند اما همچنان، جهت شیب‌های مخالف در دو پله، به خوبی قابل تشخیص می‌باشد. در نتیجه عمل کرد این روش در شرایط عدم وجود اطلاعات اولیه قابل قبول است.



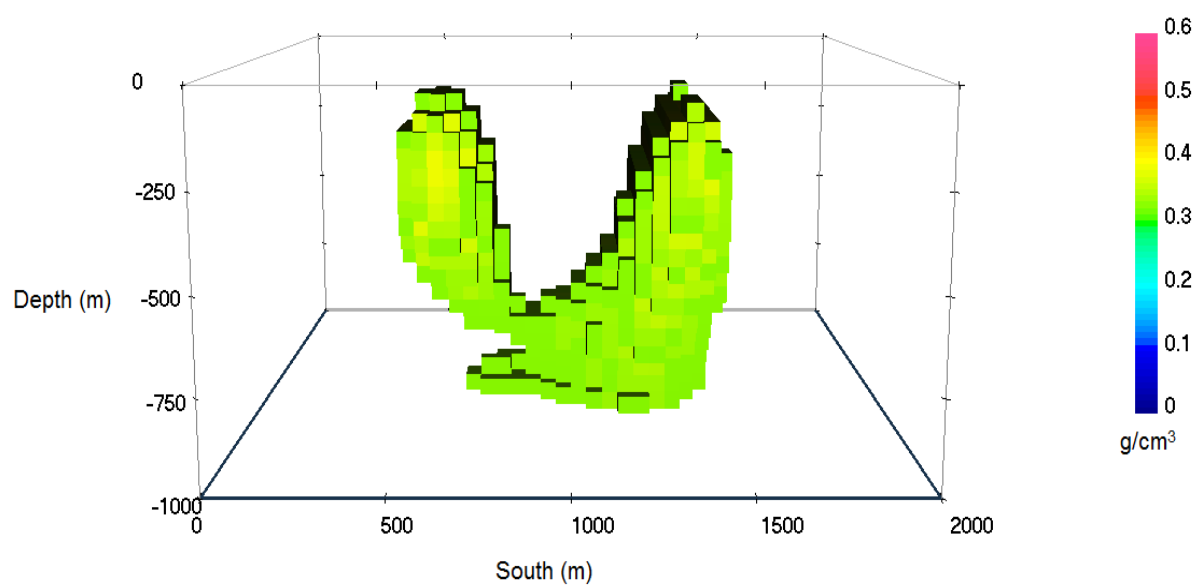
شکل ۳-۲۳: نمای سه‌بعدی مدل مصنوعی ۴ (نمای جنوبی).



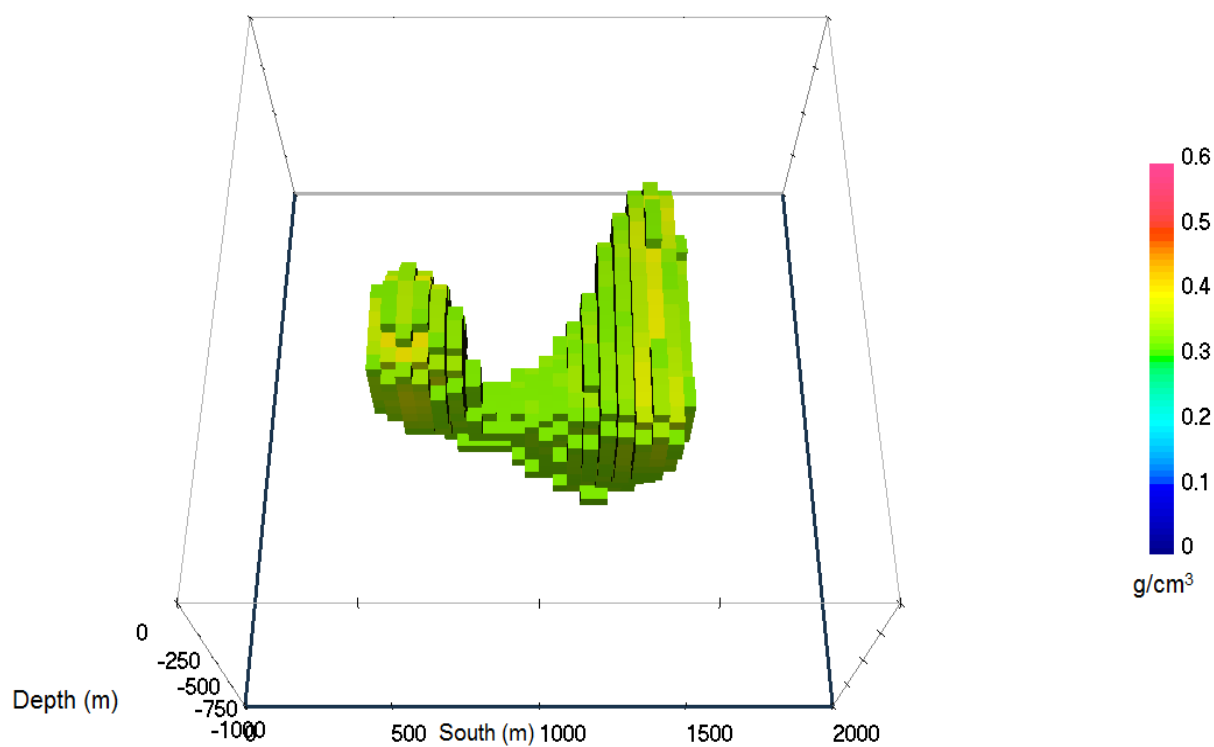
شکل ۳-۲۴: نمای سه‌بعدی مدل مصنوعی (دید از بالا).



شکل ۳-۲۵: وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض (نمای جنوبی).

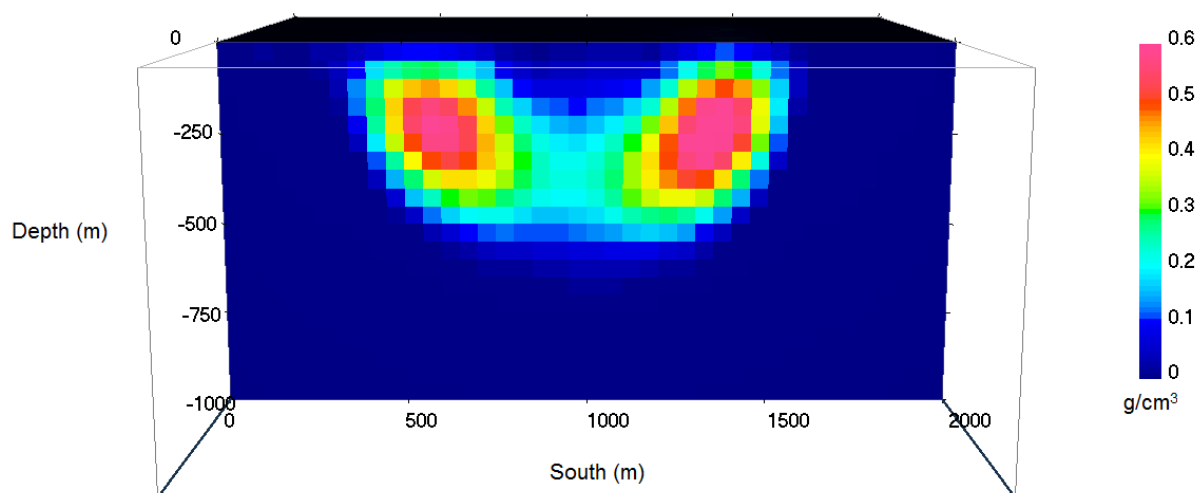


شکل ۳-۲۶: نمای جنوبی وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض (سلول‌هایی با تباین چگالی کمتر از 0.33 گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

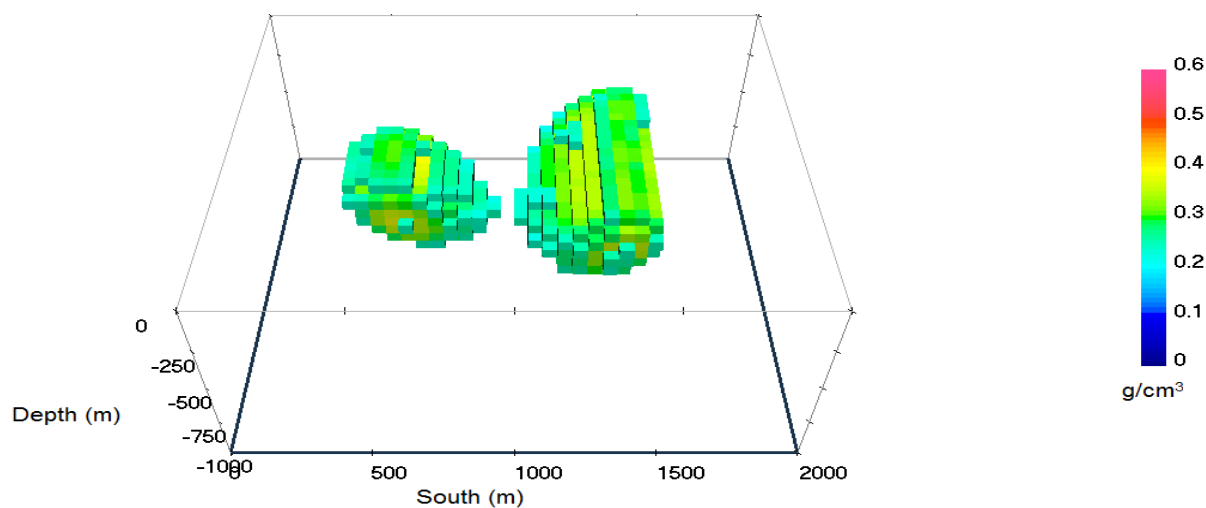


شکل ۳-۲۷: نمای بالایی وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض (سلول‌هایی با تباین چگالی کمتر از 0.33 گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

در گام بعد با اعمال قید مثبت بودن روی داده‌های گرانی، تاثیر مثبت این قید روی داده‌ها کاملاً مشهود است (شکل‌های ۳-۲۸ و ۳-۲۹). در این شکل‌ها میزان تباین چگالی مرکز شکل بهبود یافته، از کشیدگی مدل در عمق جلوگیری شده و همچنان متفاوت بودن طول، عرض، ارتفاع و شیب دو پله کاملاً مشخص است.



شکل ۳-۲۸: اعمال قید مثبت بودن به وارون‌سازی (نمای جنوبی).



شکل ۳-۲۹: اعمال قید مثبت بودن به وارون‌سازی (سلول‌هایی با تباین چگالی کمتر از ۰/۲۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

فصل چهارم

وارون سازی داده های واقعی

در این قسمت، داده‌های واقعی محدوده اکتشافی کرومیت سبزوار، گنبدنمکی قم و گنبدنمکی هامبل (واقع در کشور آمریکا) مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفته‌اند. قابل ذکر است که تعهد نویسندگان فقط مربوط به مورد اول یعنی وارون‌سازی داده‌های واقعی محدوده اکتشافی کرومیت سبزوار بوده است اما به دلیل علاقه‌مندی و کار بیشتر، داده‌های گنبدنمکی قم و هومبل نیز مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

۴-۲- وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی‌سنجی محدوده اکتشافی کانسار کرومیت سبزوار (روستای چشمه‌سیر)

یکی از کانه‌های با ارزش کروم، کرومیت است که عمده تولید جهانی آن به فروکروم^۱ تبدیل شده و نزدیک به ۷۰ درصد آن در تولید فولاد ضدزنگ مصرف می‌شود. هیچ جانشینی برای کرومیت در تولید فروکروم وجود ندارد؛ که این عامل همراه با توزیع جغرافیایی بسیار محدود منابع کرومیت، آن را در شمار کانی‌های راهبردی قرار داده است. کرومیت، ماده اولیه صنایع مهمی همچون فولاد، آلیاژهای غیرآهنی سخت، دیرگذاها، مواد شیمیایی، صنایع نسوز و ریخته‌گری است (یعقوب پور، ۱۳۸۳؛ Edwards and Atkinson, 1986).

چهار نوع کانسار کرومیت در جهان شناخته شده است؛ که دو نوع آن به صورت لایه‌ای و عدسی‌های معدنی و دو نوع دیگر آن به صورت لاتریت و پلاسر هستند؛ که نسبت به دو نوع اول، اهمیت کمتری دارند (Barker et al., 2006). تقریباً همه‌ی کانسارهای کرومیت ایران خاستگاه افیولیتی دارند؛ که کمپلکس‌های افیولیتی ایران بخشی از کمربند افیولیتی تتیس است؛ که در شرق به بقیه افیولیت‌های آسیا از قبیل پاکستان و در غرب به افیولیت‌های موجود در ناحیه‌مدیترانه از قبیل ترکیه و شرق اروپا وصل می‌شود (یعقوب پور، ۱۳۸۳). ذخایر عدسی و انبانی کرومیت، غالباً در پریدوتیت‌های آلیپی مشاهده می‌شود. این ذخایر به طور معمول با هارزبورژیت و انبانی

¹ Ferrochrome

کرومیت، غالباً در پریدوتیت‌های آلیپ مشاهده می‌شود. این ذخایر به طور معمول با هارزبورژیت و پریدوتیت از نوع دونیت همراه هستند. ذخایر مذکور معمولاً دارای هسته مرکزی هستند که بخش اعظم آن از کرومیت تشکیل شده است. دونیت‌های موجود در ذخایر کرومیت تیپ آلیپ حاوی مقداری کرومیت می‌باشند؛ ولی به طور کلی به مقدار خیلی ناچیز کانی‌هایی غیر از الیوین و سرپانتین دارند (یعقوب‌پور، ۱۳۸۳).

۴-۲-۱- روش‌های اکتشافی کرومیت

از نظر زمین‌شناسی، سودمندترین راهنمای اکتشافی کرومیت، همجواری کرومیت انبانی با منطقه اولترامافیک کمپلکس‌های افیولیتی است. به ویژه مناطق دونیت زیر گابروها، واحدهای سنگی بهینه برای کرومیت است (Flint et al, 1948; Peters and Kramers, 1974). نزدیکی عدسی‌های بزرگتر کرومیت در بخش فوقانی هارزبورژیت در کمپلکس‌های افیولیتی معمولاً راهنمای خوبی برای پی‌جوئی مکان تمرکز کرومیت است. همچنین پی‌جوئی برای کرومیت در صورت جابجا نشدن بخش‌های مختلف افیولیت به وسیله عوامل تکتونیکی مانند گسل؛ باید در مکان‌هایی که هارزبورژیت مجاور واحدهای گابرو قرار گرفته است، صورت گیرد (یعقوب‌پور، ۱۳۸۳؛ Edwards and Atkinson, 1986).

وجود گسل‌ها، پدیده سرپانتینی شدن در منطقه و رگه‌های منیزیت، در پاره‌ای موارد می‌تواند مهندس اکتشاف را به سمت وجود یک ناهمگنی در درون توده‌های اولترامافیک که می‌تواند کرومیت باشد، راهنمایی کند. با توجه به بالا بودن وزن مخصوص کان‌سنگ کرومیت نسبت به سنگ میزبان، گرانی‌سنجی روش ژئوفیزیکی متداولی در اکتشاف ذخایر کرومیت است (آقاجانی، ۱۳۹۱).

با استفاده از این روش، مناطق معدنی کرومیت بسیاری در کشورهای ترکیه، آلبانی و یوگسلاوی تعیین و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند (Kospiri et al, 1999). هامر و همکاران (۱۹۴۵) و دیویس و همکاران (۱۹۵۷) در کوبا، ارگین (۱۹۵۲) و یونگل (۱۹۵۶) در ترکیه، نجاتی (۱۳۸۳)، کامکارروحانی (۱۳۸۷)، کامکارروحانی و

بیکی (۱۳۸۸)، آقاجانی (۱۳۹۱) و آزاد و همکاران (۱۳۹۲) در ایران، با استفاده از پردازش داده‌های گرانی-سنجی، توانستند بی‌هنجاری‌های کرومیتی مختلفی را شناسایی کنند.

۴-۲-۲- مختصری درباره کانسارهای کرومیت ایران و جهان

سنگ‌های دربرگیرنده کرومیت در ایران بیشتر از نوع آذرین بسیار غنی از آهن و منیزیم (پریدوتیت، سرپانتینیت، پیروکسینیت) هستند. کانسارهای کرومیت ایران با توجه به شکل نامنظم و همراهی سرپانتینیت‌ها و پریدوتیت‌های سرپانتینی شده، به نظر می‌رسد که غالباً از نوع آلپی باشند. البته برای بعضی از نمونه‌های کانسارهای کرومیت در جنوب ایران نوعی نظم و پیوستگی که از مشخصات کانسارهای نوع لایه‌ای است گزارش شده است. در بعضی از کانسارها مانند معادن اطراف سبزوار، کرومیت به صورت عدسی در داخل توده‌های سرپانتینیتی شده مشاهده می‌شوند (یعقوب‌پور، ۱۳۸۳).

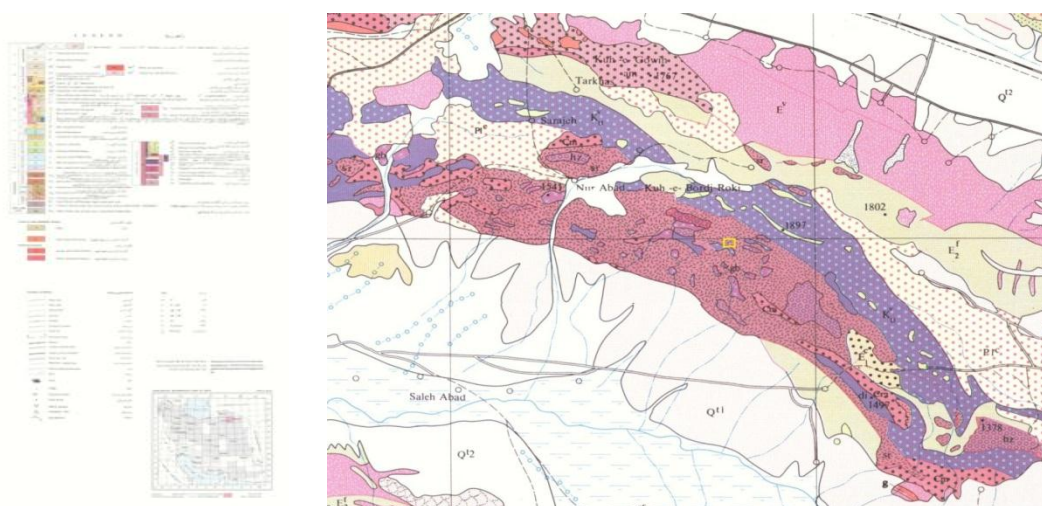
از نمونه‌های بارز کانساری کرومیت در جهان، می‌توان به بوشولد (آفریقای جنوبی)، استیل واتر (آمریکا)، دایک بزرگ (زیمبابوه)، کوه دون موا (نیوزلند)، ناحیه کاماگنی (کوبا) و ... نام برد که زیمبابوه و آفریقای جنوبی جزء ذخایر اصلی کرومیت جهانی به‌شمار می‌روند (یعقوب‌پور، ۱۳۸۳).

۴-۲-۳- معرفی منطقه مورد مطالعه

داده‌های استفاده شده در این قسمت، از گزارش پروژه مطالعات گرانی‌سنجی در منطقه سبزوار (آقاجانی، ۱۳۹۱) تهیه شده است. این پروژه، در قالب یک طرح پژوهشی، ماحصل کار صحرایی برداشت داده‌های گرانی‌سنجی در شرق سبزوار می‌باشد؛ که به درخواست شرکت زمین‌کاوان‌زمان، در اواخر بهار ۱۳۹۱، به منظور مطالعات ژئوفیزیکی جهت شناسایی وضعیت کانی‌سازی و تعیین نقاط بهینه حفاری برای اکتشاف کرومیت انجام شد. تمامی مراحل برداشت داده، انجام تصحیحات، پردازش و تفسیر توسط تیم ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود انجام شد و در این تحقیق، قسمتی از نتیجه نهایی گزارش مذکور (نقشه بوگه کامل و باقی‌مانده بی‌هنجاری‌های گرانی)

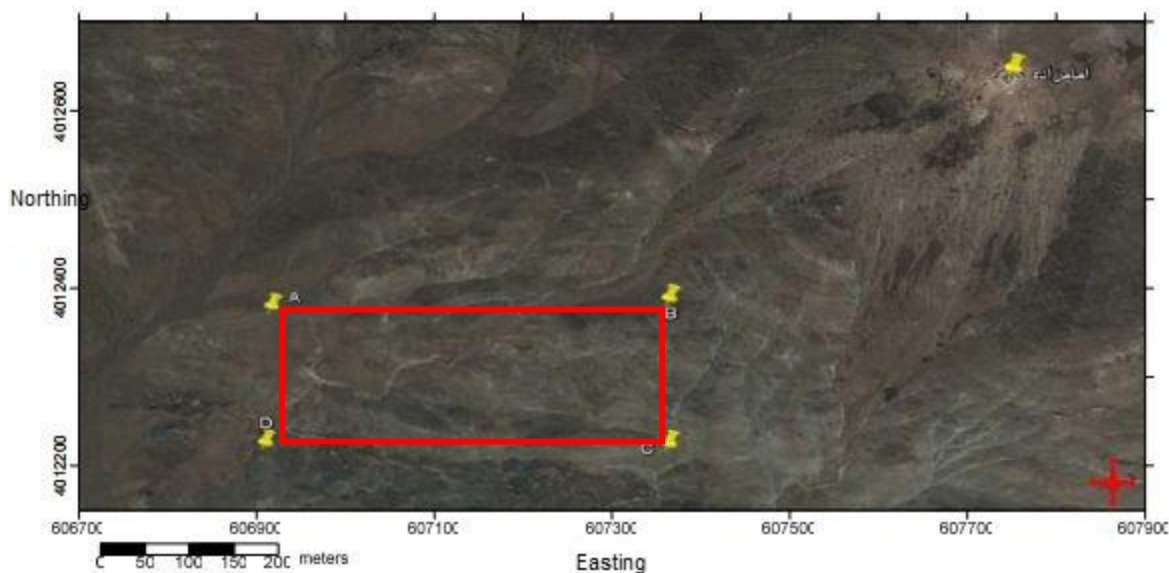
مورد تجزیه و تحلیل و مدل سازی قرار می گیرد. در مورد منطقه مورد مطالعه، به اختصار مطالبی آورده شده است و جهت اطلاعات بیشتر می توان به گزارش پروژه گرانی سنجی سبزوار (آقاجانی، ۱۳۹۱) مراجعه کرد.

محدوده‌ی مورد مطالعه، تقریباً در بخش میانی نقشه یکصد هزارم زمین شناسی سلطان آباد در شرق سبزوار در استان خراسان رضوی واقع می شود. قسمتی از نقشه زمین شناسی برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ سبزوار، در شکل (۱-۴) آورده شده است که محدوده مورد مطالعه با کادر زرد رنگ مشخص شده است.



شکل ۴-۱: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ سبزوار)

محدوده مورد مطالعه به مساحت ۵ هکتار بوده و تصویر آن با استفاده از نرم افزار Google Earth، در شکل (۴-۲) آمده است. برونزدهای سنگی محدوده، در برگیرنده سنگ های آذرین از جنس الترابازیک ها که بیشتر به سرپانتین و کانی هایی نظیر تالک و ورمیکولیت تبدیل شده می باشد؛ که در شکل های (۴-۳) و (۴-۴) آورده شده است (آقاجانی، ۱۳۹۱). داده های گرانی سنجی این محدوده توسط دستگاه گرانی سنج CG5، ساخت شرکت سینترکس کانادا، به صورت ۱۸ خط برداشت به فاصله ۲۰ متری و ایستگاه های اندازه گیری ۱۰ متری، برداشت شده است.



شکل ۴-۲: نقاط چهارگوش محدوده مورد مطالعه و موقعیت امامزاده حیدر روی قله کوه (آقاجانی، ۱۳۹۱).



شکل ۴-۴: واحدهای سنگی الترابازیکی سرپانتینی شده (آقاجانی، ۱۳۹۱).

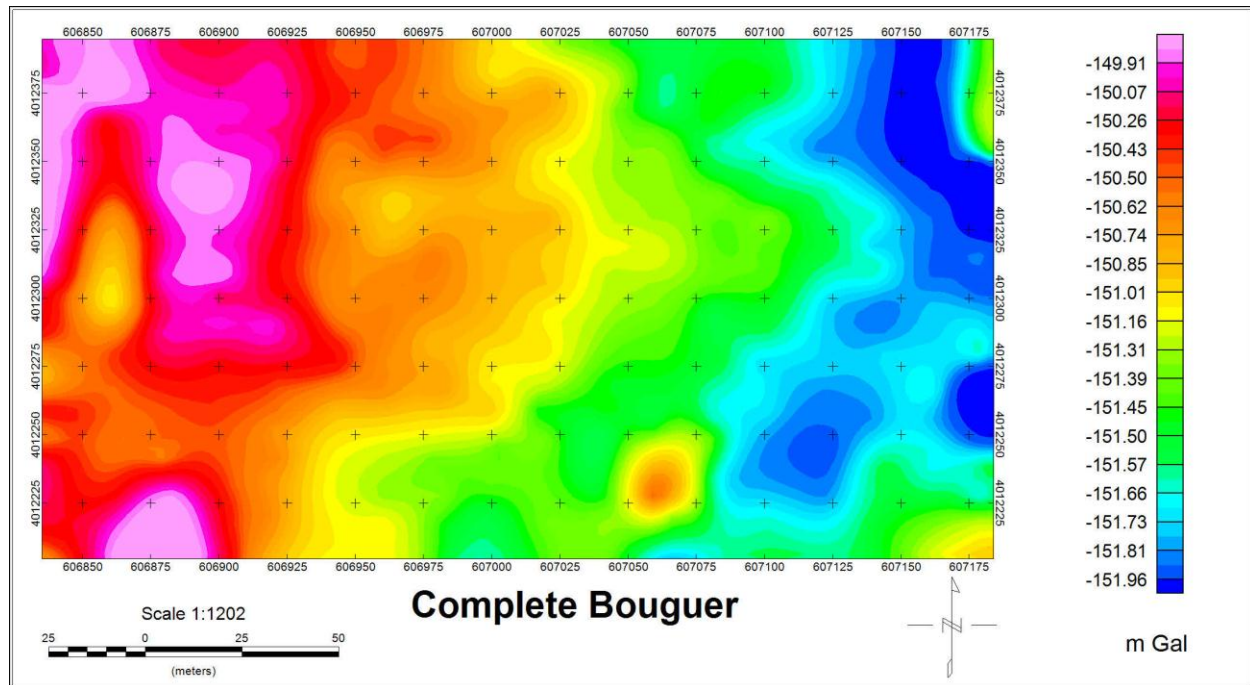


شکل ۴-۳: واحدهای سنگی الترابازیکی (مجموعه افیولیتی) که در بیشتر موارد به سرپانتین تبدیل شده است (آقاجانی، ۱۳۹۱).

۴-۲-۴- آمادہ سازی داده های واقعی

شکل (۴-۵)، نشان دهنده نقشه بوگه کامل داده های گرانی سنجی این محدوده است. اولین گام در پردازش روش های میدان پتانسیل، تفکیک آثار آنومالی ها از یکدیگر است؛ یعنی جداسازی آنومالی های کم عمق از منابع عمیق به وسیله تهیه نقشه آنومالی باقی مانده که مبین تاثیرات سطحی ناشی از اثرات ساختمانی موجود در

منطقه است (Robinson and Coruh, 1988).



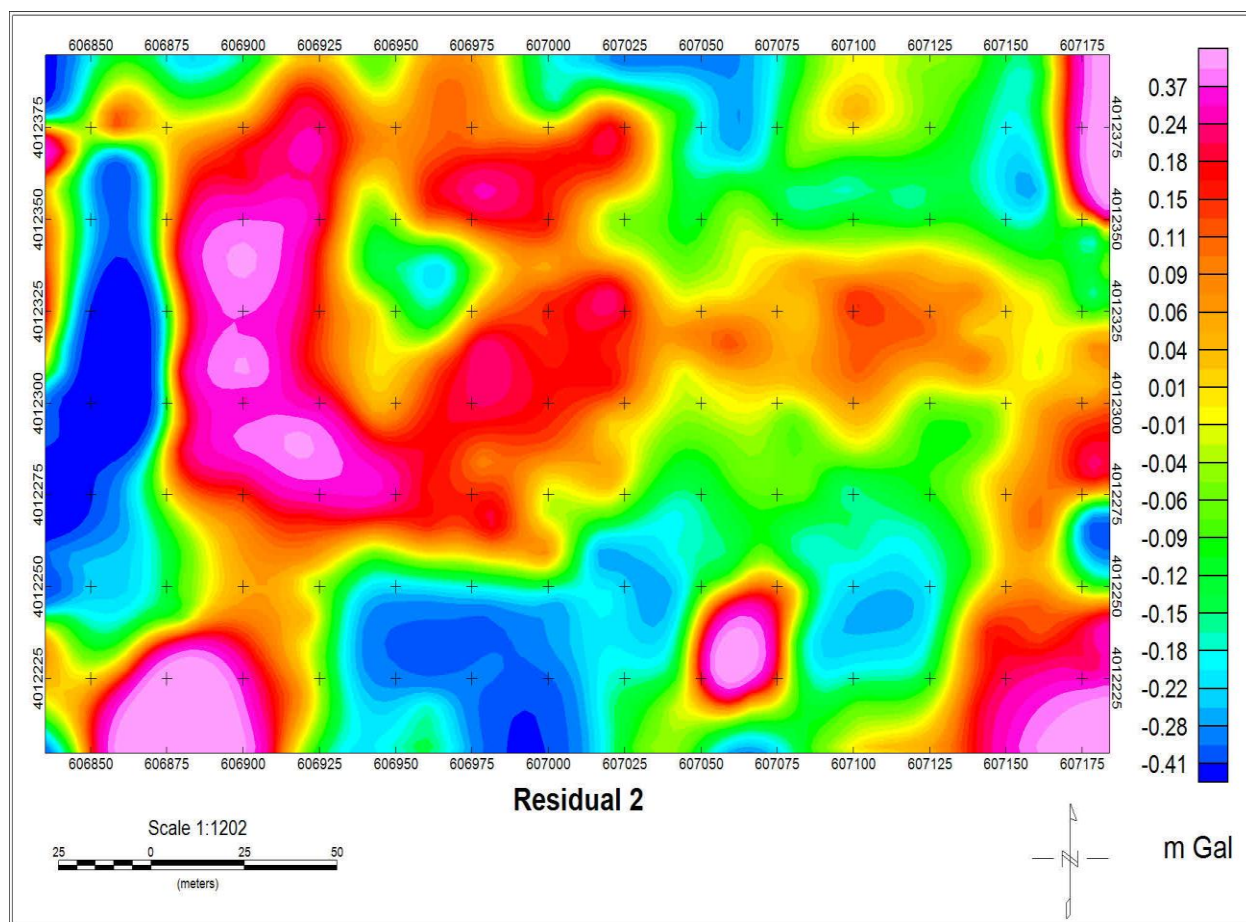
شکل ۴-۵: نقشه بوگه کامل محدوده اکتشافی سبزوار.

از آن جا که هدف، بارزسازی آثار سطحی است، برای جداسازی آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای، از روش حذف روند سطحی درجات ۱ تا ۸، با استفاده از نرم افزارهای آسیس مونتاژ شرکت ژئوسافت^۱ و وینگلینک^۲ استفاده شد و پس از بررسی نتایج حاصل از این روش و نبود تغییرات جدی در آنها، نقشه حاصل از روند ۲ برای تجزیه و تحلیل انتخاب گردید (شکل ۴-۶) (آقاجانی، ۱۳۹۱). قابل ذکر است که تمرکز این تحقیق بر روی قسمت کوچک‌تری از کل محدوده برداشتی، یعنی بی‌هنجاری اصلی موجود در غرب محدوده برداشتی است (شکل ۴-۷). با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و مشاهدات صحرایی، در جنوب و غرب محدوده برونزدگی‌هایی بر روی سطح زمین مشاهده شد که با روند کانی‌زایی کرومیت درون توده سرپانتینی به همراه منیزیت با دگرسانی تالکی، انطباق زیادی دارد که این رخنمون‌ها در شکل (۴-۷) با بیضی مشکی مشخص شده است

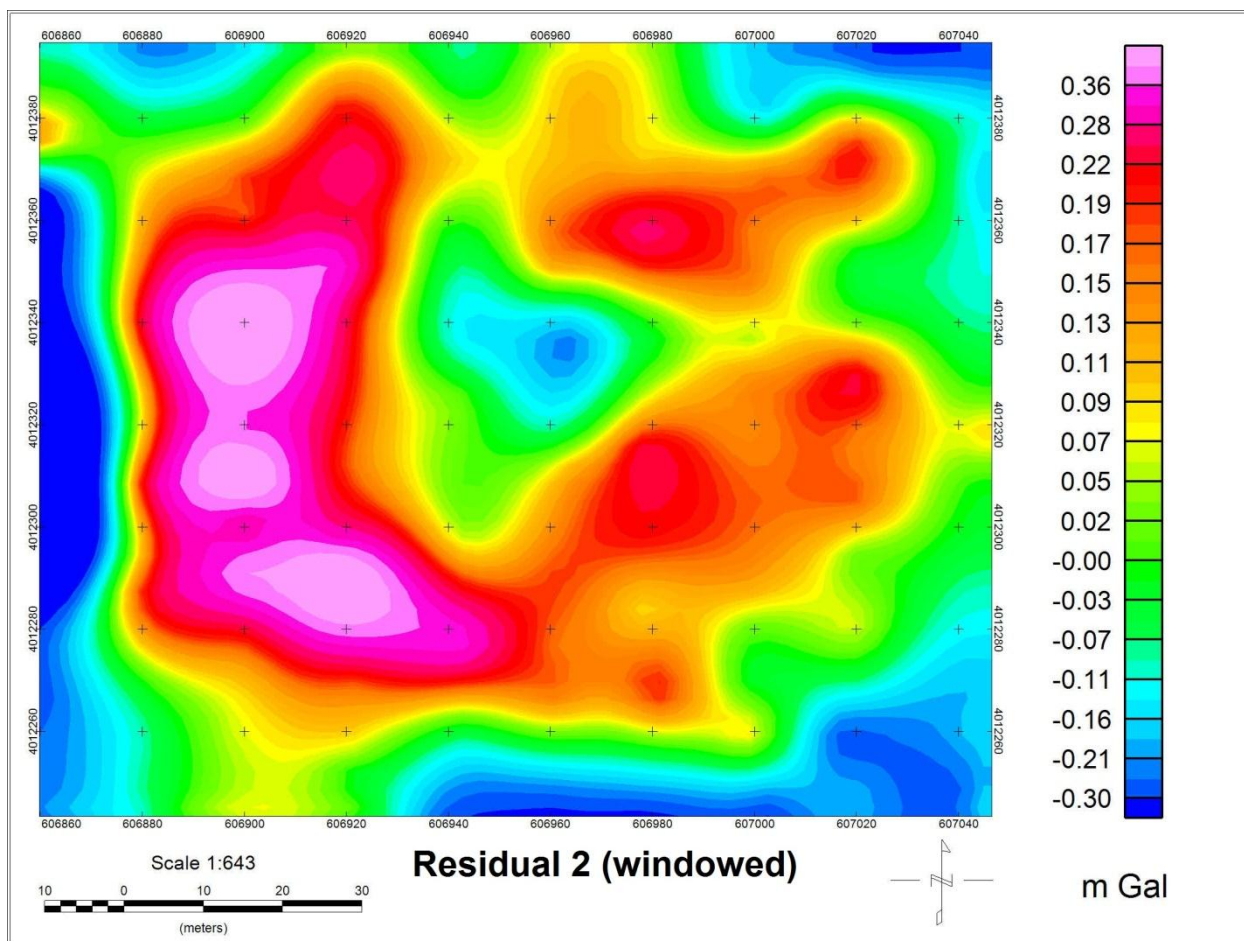
^۱ Geosoft, Oasis montaj 7.0.1

^۲ Winglink

(آقاجانی، ۱۳۹۱). برای تعیین مرز بی‌هنجاری‌ها و مقایسه و اعتبارسنجی وارون‌سازی با دیگر روش‌های تایید شده ژئوفیزیکی، فیلترهای زاویه تمایل و زاویه تمایل هایپربولیک به نقشه بی‌هنجاری باقیمانده درجه دو اعمال و نتایج آن در شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) آورده شده و با نتایج حاصل از وارون‌سازی مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها با پیکان‌های مشکی مشخص شده است، گسترش افقی آنومالی مورد توجه، از شمال به جنوب دارای روندی متغیر بوده که این نکته را به خوبی می‌توان در مدل‌سازی نیز مشاهده کرد (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۶: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده حاصل از حذف اثرات بی‌هنجاری ناحیه‌ای به روش روند سطحی با مرتبه دو.

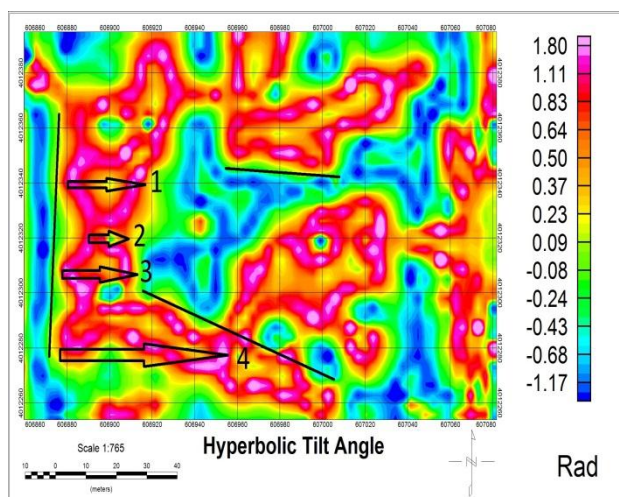


شکل ۴-۷: قسمتی از نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده حاصل از حذف اثرات بی‌هنجاری ناحیه‌ای به روش روند سطحی با مرتبه دو.

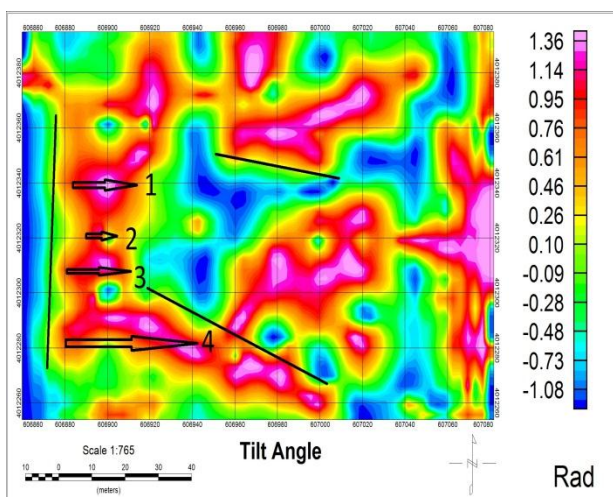
کاربرد دیگر فیلترهای مذکور، بارزکردن خطوارگی‌ها است که می‌تواند ناشی از تغییرات واحدهای سنگی یا وجود گسل‌های احتمالی باشد. در بازدید زمین‌شناسی، وجود دو گسل در جنوب و مرکز محدوده، تایید شد که با توجه به شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹)، این دو گسل در شکل شناسایی شده‌اند. در غرب محدوده نیز یک خطوارگی مشخص شده است که می‌تواند بیانگر تغییرات واحدهای سنگی یا یک گسل پنهان (بدون هیچ‌گونه رخنمون سطحی) باشد. این خطوارگی‌ها، در شکل‌های ذکر شده با خطوط مشکی مشخص شده‌اند و وجود آن‌ها در نتایج مدل‌سازی شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) نیز تایید شده است.

۴-۲-۵- وارون سازی داده های واقعی

داده های استفاده شده در وارون سازی، با روش درونیابی نرم افزار سرفر در یک شبکه منظم به فواصل ایستگاه ها و خطوط برداشت ۵ متری برداشت شده است که حاصل آن، تعداد ۱۲۶۰ داده می باشد. متوسط چگالی توده کرومیت برابر ۴/۳۶ گرم برسانتی متر مکعب است که به طور نسبی به میزان قابل توجهی از دونیت ها که دارای



شکل ۴-۹: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک.



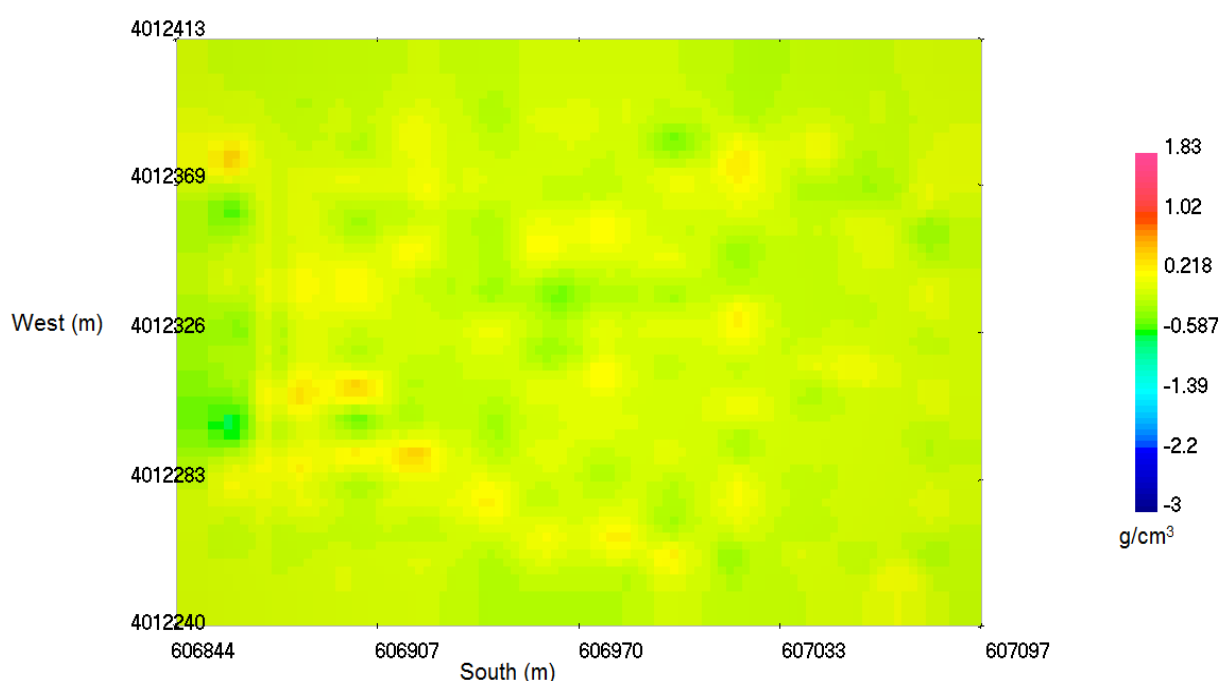
شکل ۴-۸: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل.

کرومیت برابر ۴/۳۶ گرم برسانتی متر مکعب است که به طور نسبی به میزان قابل توجهی از دونیت ها که دارای چگالی ۳/۱۵ گرم برسانتی متر مکعب و سرپانتین با چگالی نسبی ۲/۷۸ گرم برسانتی متر مکعب، بیشتر است. برای انجام وارون سازی مقید، تنها اطلاعات زمین شناسی راهنمای توده کرومیتی، وجود رخنمون های سطحی جنوبی و غربی محدوده است که در بازدید زمین شناسی محدوده تایید شده اند و در شکل (۴-۷) مشخص شده اند (آقاجانی، ۱۳۹۱).

در گام اول، وارون سازی در حالت پیش فرض و بدون قید انجام شد که در آن رخنمون ماده معدنی در سطح زمین، به شکل بارز وجود ندارد (شکل ۴-۱۰). در گام بعد، به استناد اطلاعات زمین شناسی، با افزایش وزن سلول های سطحی تر، وارون سازی به سمت مدلی نزدیک تر به واقعیت، راهنمایی شد (شکل ۴-۱۱) که رخنمون-

های سطحی بازسازی شده در این قسمت، با علامت مشکی مشخص شده‌اند و در انطباق با شکل (۴-۷) است. در شکل‌های (۴-۱۲) تا (۴-۱۶)، نماهای مختلفی از مدل‌سازی نهایی آورده شده است که هر کدام به طور جداگانه مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

شکل ۴-۱۲، نمای سه‌بعدی مدل‌سازی نهایی را نشان می‌دهد که در آن سلول‌های با تباین چگالی کمتر از ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، تعدادی بی‌هنجاری

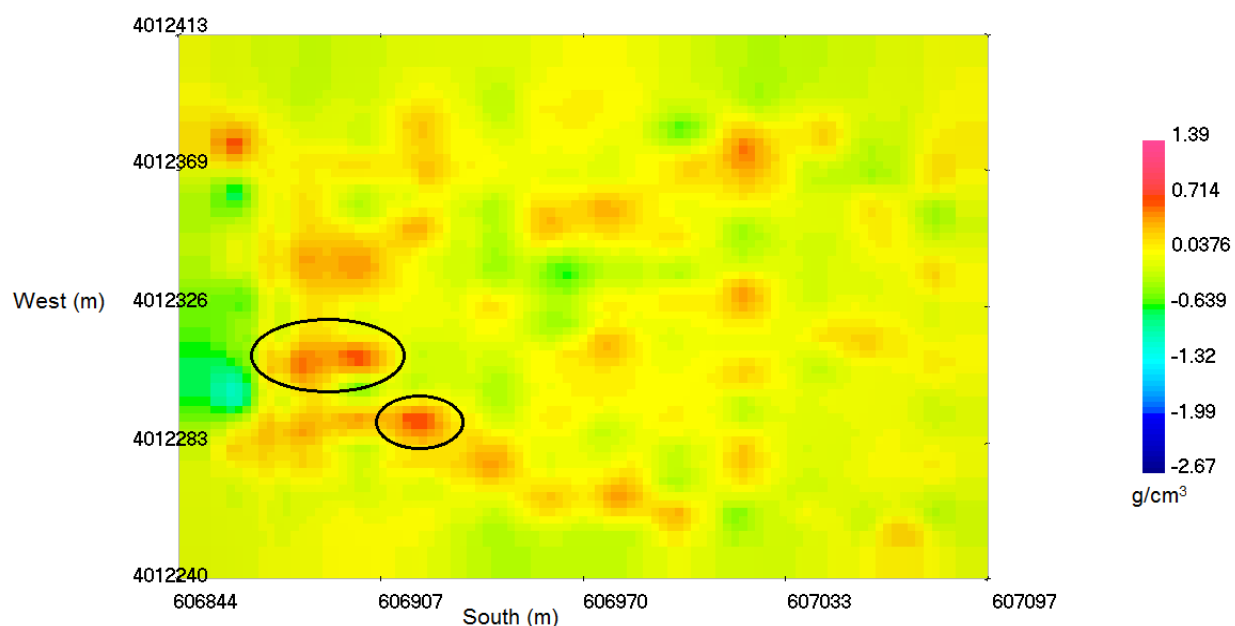


شکل ۴-۱۰: پلان وارون‌سازی (روی سطح زمین)، در حالت پیش‌فرض.

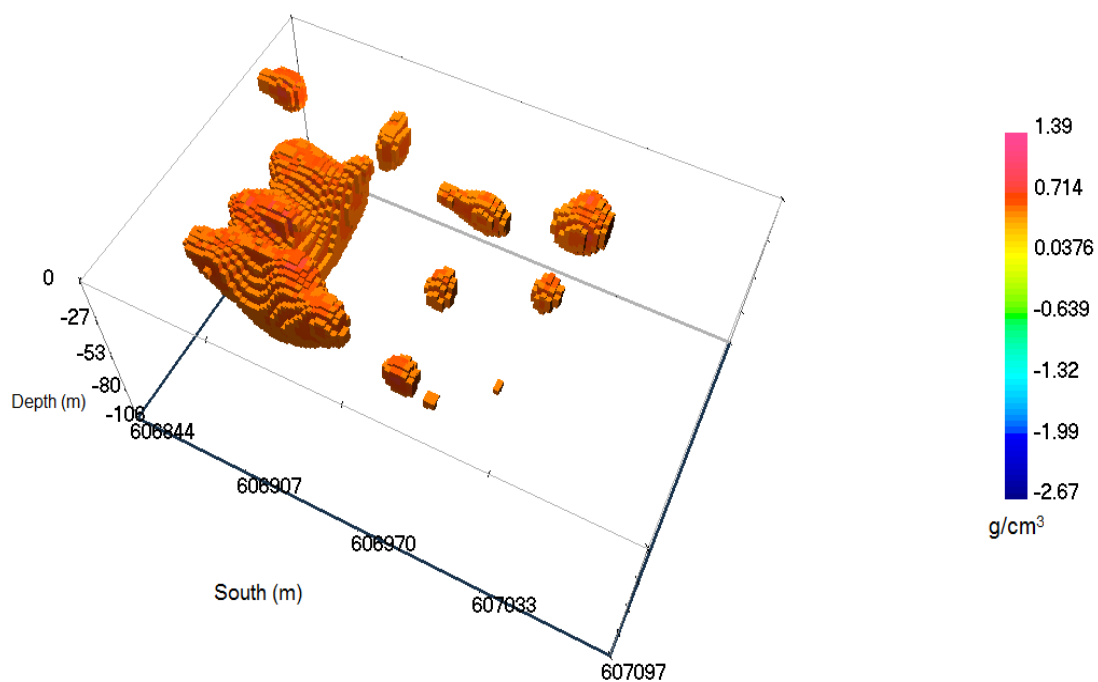
کوچک پراکنده وجود دارد که تا نزدیکی سطح زمین بالا آمده‌اند؛ همچنین یک بی‌هنجاری اصلی در غرب محدوده موجود است که حالت شاخه‌ای و گسترش عمقی و جانبی مناسبی داشته و قسمت‌هایی از آن بر سطح زمین رخنمون دارد. شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴)، نماهایی از مدل‌سازی نهایی است که از دو جهت برش خورده‌اند و جهت تعیین عمق پایین توده‌های کرومیتی موجود در محدوده آورده شده‌اند. مطابق این شکل‌ها عمق پایین توده بزرگ حدود ۴۰ تا ۴۵ متر و عمق دیگر توده‌های پراکنده محیط، کمتر از ۲۵ متر برآورد می‌-

شود که با نتایج استفاده از فیلتر ادامه فراسو موجود در گزارش گرانی‌سنجی سبزوار (آقاجانی، ۱۳۹۱)، انطباق مناسبی دارد.

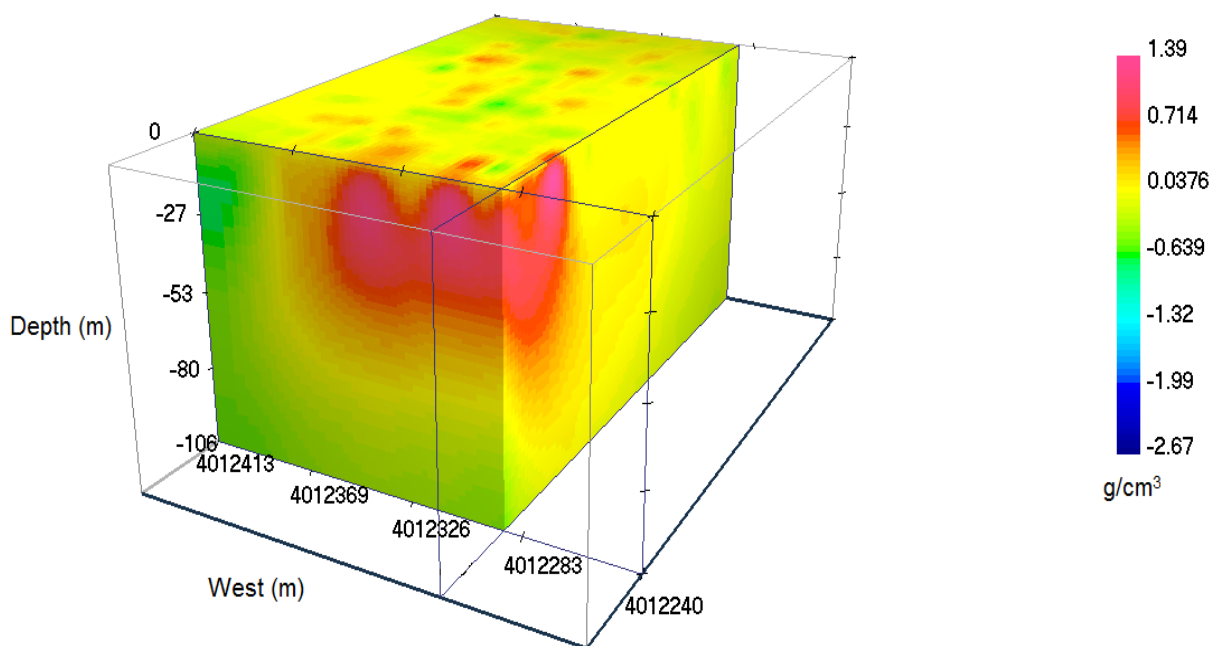
جهت مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج فیلترهای فاز محلی که در تشخیص ناپیوستگی و شکستگی‌ها به کار می‌روند (شکل‌های ۸-۴ و ۹-۴)، از شکل‌های ۱۵-۴ و ۱۶-۴ (نماهای دیگری از مدل‌سازی نهایی) استفاده شده است. در این شکل‌ها، ناپیوستگی موجود در غرب محدوده با روند شمالی-جنوبی در کنار توده بی‌هنجار اصلی، به راحتی قابل پی‌گیری بوده و دیگر گسل‌های تایید شده‌ی شکل‌های (۸-۴) و (۹-۴)، نیز مشخص شده‌اند.



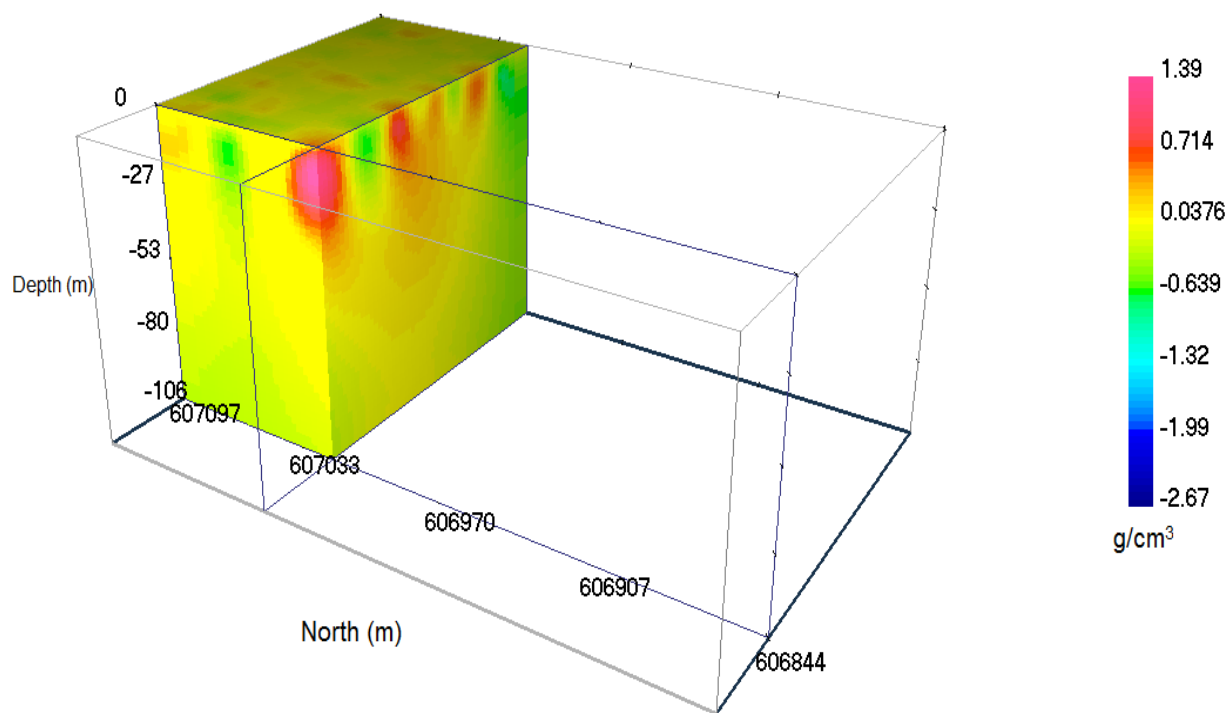
شکل ۴-۱۱: پلان وارون‌سازی مقید با استفاده از افزایش وزن سلول‌های سطحی‌تر.



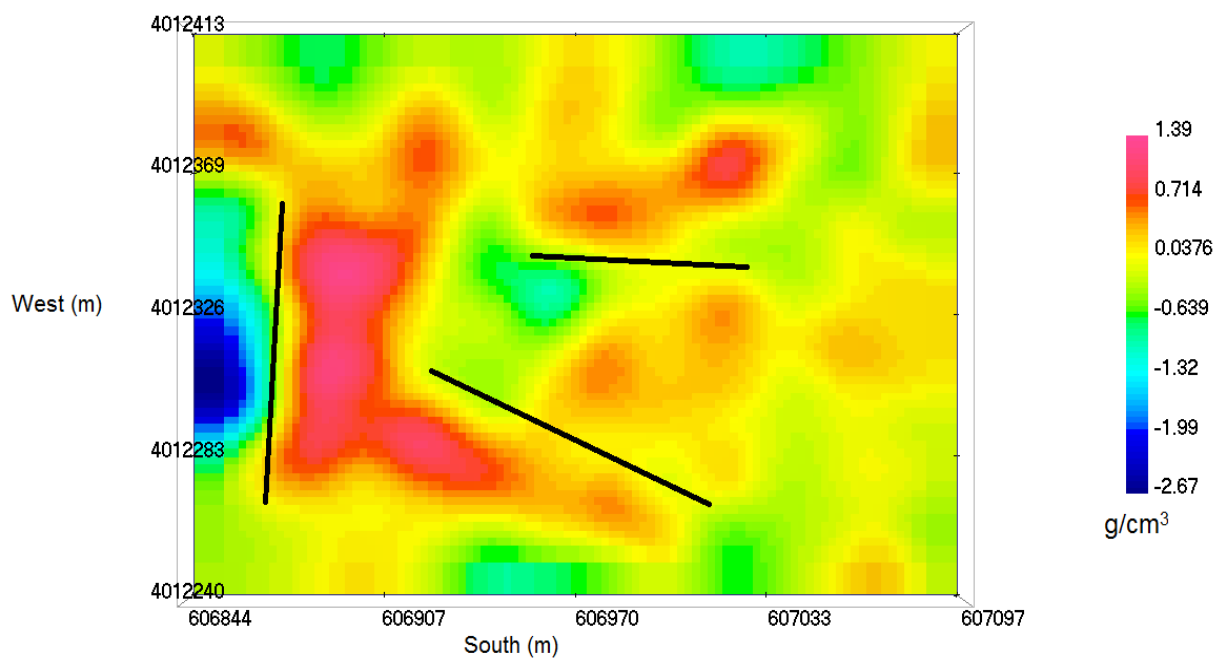
شکل ۴-۱۲: نمای سه‌بعدی مدل‌سازی نهایی (سلول‌های با تباین چگالی کمتر از ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).



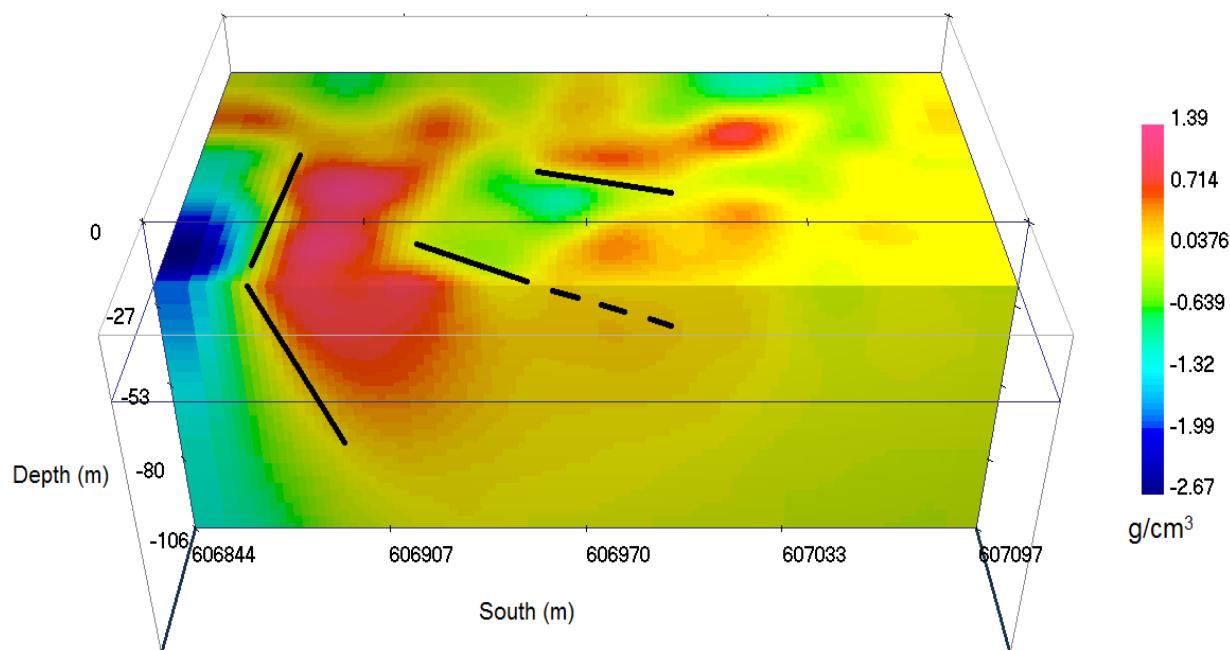
شکل ۴-۱۳: مقطع عرضی مدل‌سازی نهایی (جهت نمایش عمق پایین توده بزرگ موجود در غرب محدوده).



شکل ۴-۱۴: مقطع عرضی مدل سازی نهایی (جهت نمایش عمق پایین توده های کوچک موجود در شرق محدوده).



شکل ۴-۱۵: گسل های بازسازی شده در مدل سازی نهایی در عمق ۲۰ متری (دید از بالا).



شکل ۴-۱۶: نمایی از مقطع عرضی عمقی مربوط به شکل ۴-۱۵.

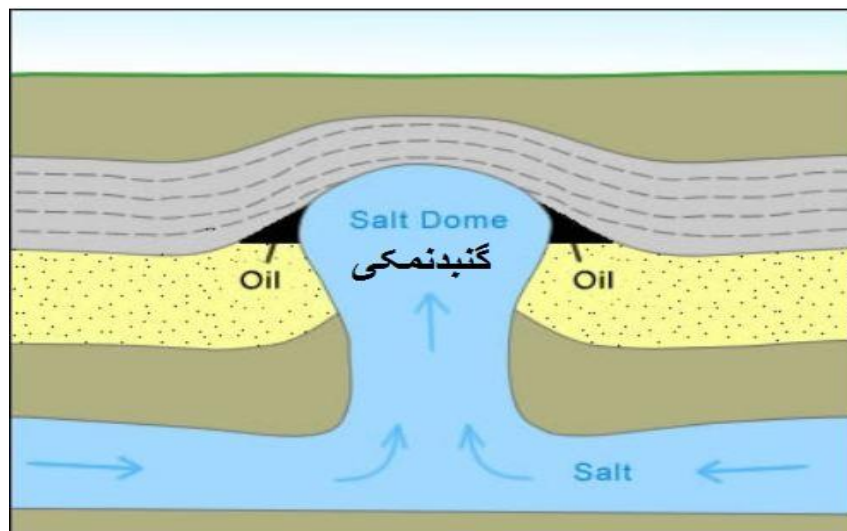
۴-۲-۶- نتیجه‌گیری وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی کرومیت سبزوار

در این تحقیق، داده‌های گرانی‌سنجی محدوده اکتشافی کانسار کرومیت سبزوار با فیلترهایی همچون روند سطحی، زاویه تمایل و زاویه تمایل هایپربولیک مورد پردازش و تفسیر قرار گرفته است. بر اساس این مطالعه، میزان گسترش افقی و عمقی آنومالی‌های موجود، تشخیص داده شد. در پایان هم جهت رسیدن به جزئیات کامل‌تری از شکل، کشیدگی عمقی و میزان گستردگی سطحی منشا، اقدام به مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های برداشتی با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبرگ شد. جهت مقایسه نتایج فیلترهای استفاده شده با نتایج مدل‌سازی، نماهای مختلف مدل نهایی متناسب با هر فیلتر تهیه گردید؛ که حاصل این مقایسه، هم‌خوانی قابل قبول فیلترهای فاز محلی با مدل‌سازی بود و در هر مرحله تایید کننده یکدیگر بودند. نتیجه نهایی بررسی منطقه، حاکی از وجود یک ناپیوستگی (تغییرات واحدهای سنگی یا یک گسل پنهان) در غرب محدوده با روندی شمالی-جنوبی است که یک توده نسبتاً بزرگ کرومیتی به موازات آن تشکیل شده است. گسترش سطحی این

توده از شمال به جنوب متغیر بوده و در جنوب، به سمت شرق تمایل دارد. همچنین توده‌های کرومیتی پراکنده دیگری در مرکز و شرق محدوده وجود دارد که تا نزدیکی سطح زمین بالا آمده‌اند. عمق پایین توده بزرگ، حدود ۴۵ متر و عمق دیگر توده‌های پراکنده محیط، کمتر از ۲۵ متر برآورد می‌شود.

۴-۳- وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی‌سنجی گنبد نمکی هامبل

گنبد نمکی، یک برآمدگی یا ستونی از نمک است که از اعماق به سمت سطح زمین صعود می‌کند. این صعود به واسطه چگالی کمتر نمک نسبت به سنگ‌های پیرامون و روی آن انجام می‌پذیرد (شکل ۴-۱۷). در اینجا نمک رفتاری مانند جریانی از یک روغن با گرانروی بالا دارد که به آرامی در حال صعود به لایه قطور آب فوقانی می‌باشد. سنگ نمک (کانی هالیت) ویژگی‌هایی دارد که آن را قادر می‌سازد تا گنبدهای نمکی را شکل دهد. زمانی که نمک در اعماقی بیشتر از چندین هزار متر دفن می‌گردد، چگالی هالیت بسیار پائین‌تر از اغلب سنگ‌های رسوبی دیگر است؛ همچنین نمک این قابلیت را دارد که تغییر شکل یافته و زمانی که تحت فشار قرارگیرد، مانند یک سیال با گرانروی بالا حرکت کند (<http://geology.com>, 2015).



شکل ۴-۱۷: طرحی از گنبدهای نمکی: نفوذ در میان دو واحد سنگی و تغییر شکل دادن واحدهای رسوبی رویی. رشد گنبد با مهاجرت نمک از محیط‌های پیرامون به درون گنبد تکمیل می‌گردد (<http://geology.com>, 2015).

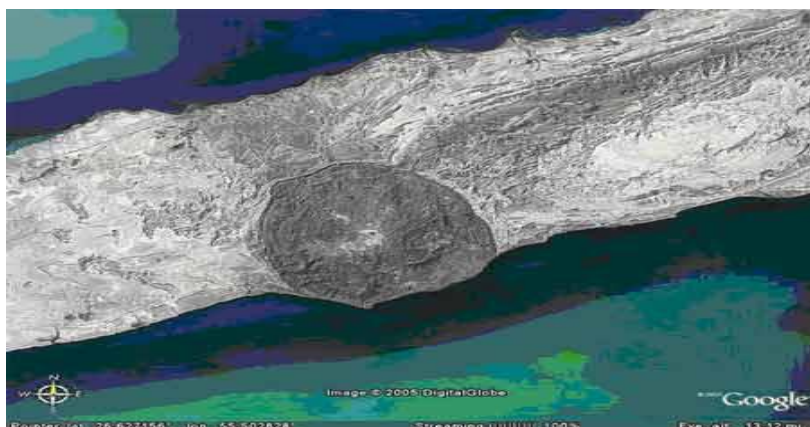
وقتی که لایه‌ای از نمک، کف یک پیکره آب^۱ در حال بخارشدن نهشته می‌گردد، وزن مخصوصی در حدود ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارد. دیگر سنگ‌های رسوبی مانند شیل و سنگ آهک، در زمان نهشته شدن وزن مخصوصی پائین‌تر دارند به این خاطر که گِل شکل دهنده آن‌ها حاوی مقادیر قابل ملاحظه‌ای آب است. هر اندازه که عمق محل دفن افزایش می‌یابد، وزن مخصوص نمک تقریباً ثابت باقی مانده اما وزن مخصوص شیل و سنگ آهک به واسطه خروج آب از فضای تخلخل میان آن‌ها تحت فشار، افزایش می‌یابد و سرانجام ممکن است وزن مخصوص برابر با ۲/۴ تا ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب داشته باشند؛ که به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از وزن مخصوص نمک است. این تفاوت در جایی که یک ماده با وزن مخصوص پائین‌تر، قادر است رفتاری مانند یک سیال داشته باشد و به‌وسیله موادی با یک وزن مخصوص بالاتر پوشیده شده است، وضعیتی ناپایدار را ایجاد می‌نماید. شروع حرکت نمک می‌تواند به دلیل حرکات و نیروهای تکتونیکی روی توالی‌های سنگی باشد (http://geology.com, 2015).

گنبد‌های نمکی در ساختارهایی بسیار بزرگ تا کوچک‌تر تشکیل می‌شوند به طوری که هسته‌های نمکی بین ۸۰۰ تا ۸۰۰۰ متر بزرگی دارند. واحدهای سنگ مادر که منبع تولید نمک به حساب می‌آیند، معمولاً چند صد تا چندین هزار متر ضخامت دارند. گنبد‌های نمکی در عمقی ما بین ۱۵۰ تا ۱۸۰۰ متری (یا بیشتر) زیر سطح زمین واقع می‌شوند و در صورتی که شرایط تکتونیکی فراهم شوند، به سطح می‌رسند (شکل ۴-۱۸).

۴-۳-۱- اهمیت اقتصادی گنبد‌های نمکی

گنبد‌های نمکی به عنوان مخازن نفت و گاز طبیعی، منابع سولفور، منبع نمک، سایت ذخیره‌ای زیرزمینی نفت و گاز طبیعی و سایت دفن زباله برای پسماندهای خطرناک عمل می‌کنند.

¹ Body of water



شکل ۴-۱۸: تصویری ماهواره‌ای از گنبد نمکی قشم واقع در ۱۱۰ کیلومتری جنوب باختری جزیره قشم که طبقات هم‌جوار آن را آهک‌های سفیدرنگی تشکیل داده‌اند (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، <http://ngdir.ir>)

گنبد‌های نمکی برای صنعت نفت اهمیت بسزایی دارند. هر اندازه یک گنبد نمکی رشد می‌نماید، سرپوش سنگ‌های بالایی به سمت بالا خم می‌گردند. این کلاهک سنگی می‌تواند به عنوان نگهدارنده نفت و گاز طبیعی در مخزن عمل نماید. هر اندازه که گنبد رشد کند، سنگ‌هایی که این گنبد به آن‌ها نفوذ می‌نماید در امتداد طرفین گنبد نمکی به سمت بالا خمیده‌تر می‌شوند. این کمان‌های رو به بالا، به نفت و گاز طبیعی اجازه می‌دهند که به سمت گنبد نمکی یعنی جایی که می‌توانند در یک تله ساختاری انباشته شوند، مهاجرت نمایند. یک گنبد نمکی به تنهایی می‌تواند چندین مخزن را در اعماق گوناگون و مکان‌های پیرامون گنبد با خود به همراه داشته باشد. نمک صعودکننده می‌تواند مسبب ایجاد گسل شود (2015, <http://geology.com>).

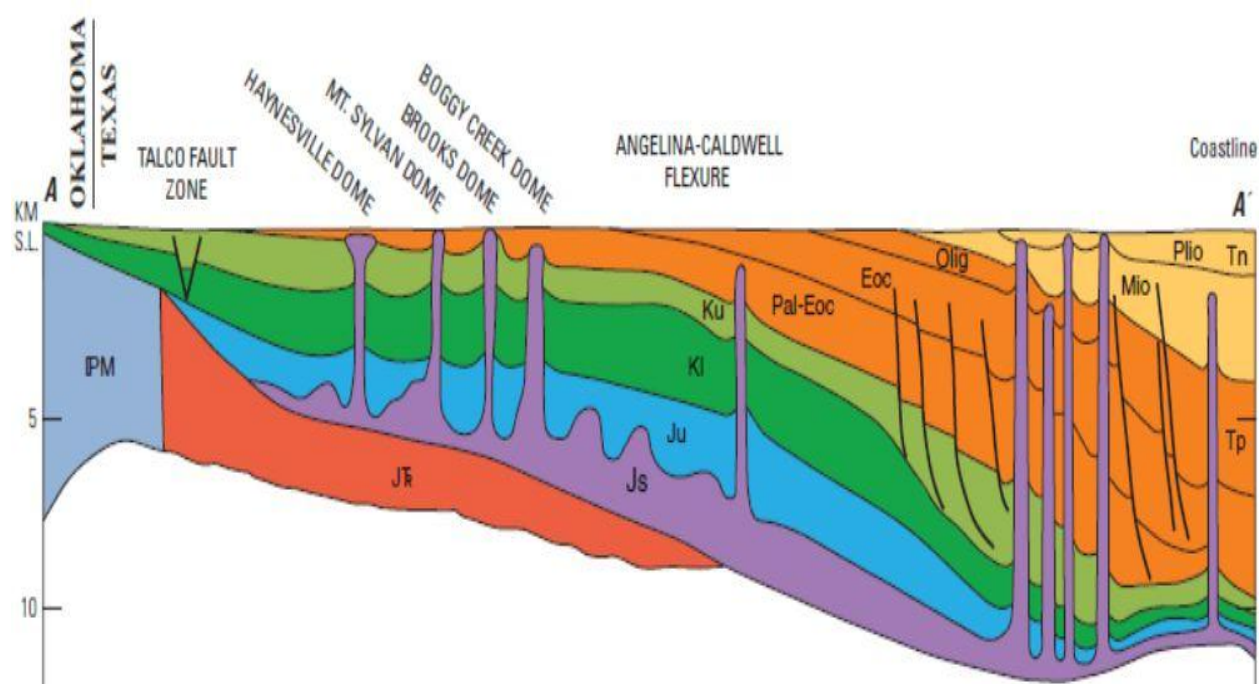
برخی از معادن توسعه یافته در گنبد‌های نمکی به دقت غیرقابل نفوذ گردیده سپس به عنوان محلی برای ذخیره نفت، گاز طبیعی و هیدروژن بکار گرفته شده‌اند. همچنین گنبد‌های نمکی در ایالات متحده و روسیه به عنوان انباشتگاه‌های ملی برای ذخیره‌های دولتی گاز هلیوم به انجام وظیفه می‌پردازند. سنگ نمک تنها گونه‌ای از سنگ است که نفوذپذیری بسیار پائینی داشته و می‌تواند اتم‌های بسیار کوچک هلیوم را در خود نگه دارد.

به دلیل خاصیت نفوذناپذیری، از گنبد‌های نمکی به عنوان محل دفع پسماندهای خطرناک استفاده شده است. غارهای ساخته‌ی دست بشر در گنبد‌های نمکی در ایالات متحده و دیگر کشورها به عنوان انباشتگاه‌های

مواد زائد حاصل از حفاری‌های نفتی و دیگر انواع پسماندهای خطرناک به‌کارگرفته شده‌اند همچنین از آن‌ها برای دفع ضایعات هسته‌ای سطح بالا استفاده می‌شود (http://geology.com, 2015).

۴-۳-۲- محل تشکیل گنبد‌های نمکی

گنبد‌های نمکی می‌توانند در حوضه‌های رسوبی جایی که کانسارهای ضخیمی از نمک حداقل با ۱۵۰ متر از دیگر انواع رسوبات مدفون گردیده‌اند، ایجاد گردند. یکی از بزرگترین مناطق گنبد نمکی جهان، خلیج مکزیک است. بیش از ۵۰۰ گنبد نمکی در ساحل و زیر کف دریای خلیج مکزیک کشف شده‌اند (شکل ۴-۱۹). همچنین میدان‌های بزرگی از گنبد‌های نمکی در آنگولا، برزیل، کانادا، آلمان، ایران و عراق کشف گردیده‌اند.



شکل ۴-۱۹: ستون‌هایی از نمک با چگالی پائین که از میان واحدهای سنگی فوقانی صعود می‌نمایند: مقطع عرضی سنگ‌های حوضه شرق تگزاس مابین مرز اوکلاهما و تگزاس (در سمت چپ) و خط ساحلی خلیج مکزیک (در سمت راست) (http://geology.com, 2015).

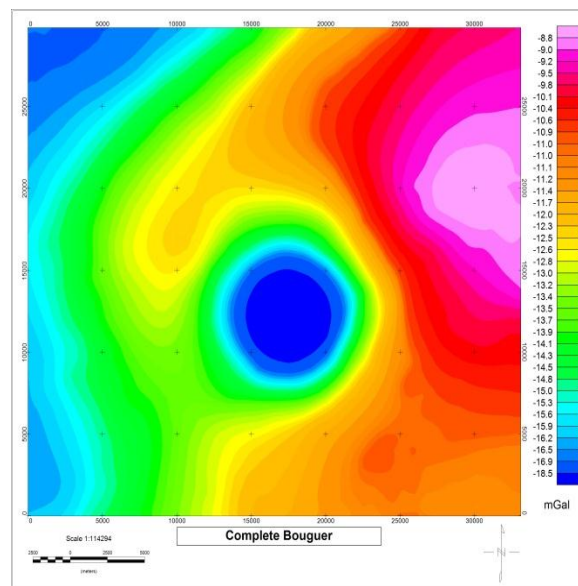
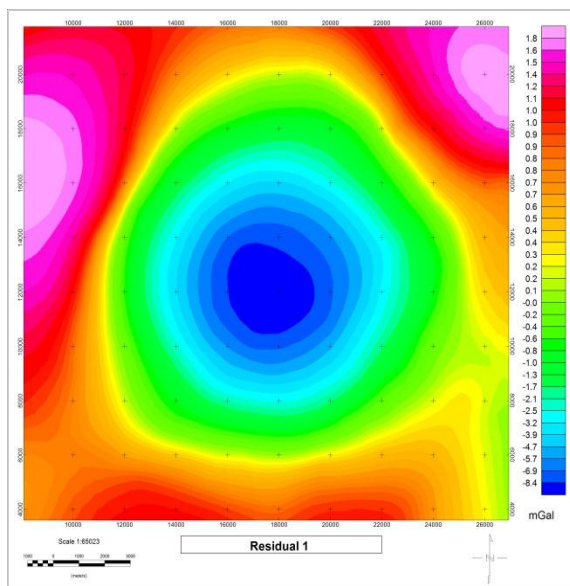
۴-۳-۳- معرفی منطقه مورد مطالعه

میدان نفتی گنبد نمکی هامبل یک میدان تولید نفت در آمریکا است که در دو کیلومتری شهر هامبل در ساحل شمالی خلیج تگزاس در منطقه کانزاس آمریکا واقع شده است. سنگ مخزن این میدان نفتی که مقدار ناچیزی گاز دارد، سنگ‌های آنیدریتی و آهکی سازندهای مربوط به دوره‌های ائوسن، میوسن، الیگوسن و پلیوسن می‌باشد. تله‌های نفتی گنبد نمکی هامبل هم در بخش سنگ پوشش و هم در بخش دامنه آن دیده می‌شود. هومبل دارای ذخیره‌ی قابل ملاحظه‌ای بوده که نزدیک به یک قرن از مخازن آن نفت استخراج می‌شود (USGS, 2009).

۴-۳-۴- وارون‌سازی داده‌های گنبد نمکی هامبل

نقشه آنومالی گرانی بوگه کامل محدوده (برگرفته از نتلتون، ۱۹۷۶) و قسمت کوچکتري از نقشه حذف‌روند سطحی درجه ۱، در شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) ارائه شده است. داده‌های گرانی‌سنجی مورد استفاده، از نقشه بی‌هنجاری مرتبه‌ی یک، در یک شبکه منظم به فواصل ایستگاه‌ها و خطوط برداشت ۵۰۰ متری برداشت شده است که حاصل آن، تعداد ۱۳۶۸ داده می‌باشد.

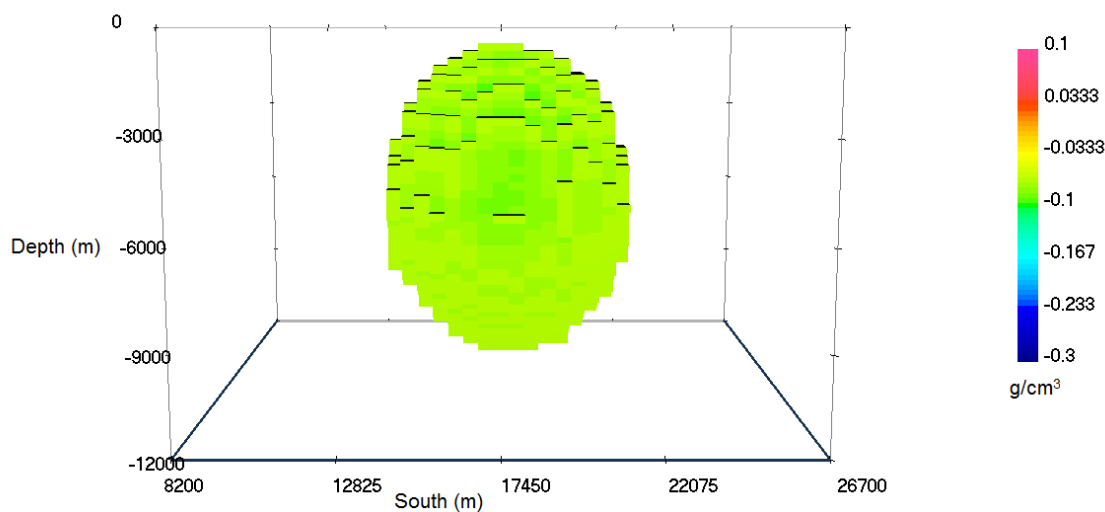
در ابتدا مسئله بدون اعمال هیچ‌گونه قیدی حل شده است که نتیجه آن در شکل (۴-۲۲) آورده شده است. جهت انجام وارون‌سازی مقید، از اطلاعات موجود منطقه استفاده شد که این اطلاعات شامل تعیین میزان گستردگی سطحی متوسط گنبد نمکی حاصل از فیلترهای تخمین لبه (شکل‌های ۴-۲۳ و ۴-۲۴)، نتایج به دست آمده از عمق مرکز بی‌هنجاری توسط پژوهش‌گران مختلف (جدول ۴-۱) و بالا آمدگی گنبدنمکی تا ارتفاع تقریبی ۳۰۰ متری (Carter et al, 1906; Nettleton and Lomax, 1971). با توجه به شکل‌های (۴-۲۳) و (۴-۲۴) مشخص می‌شود که بی‌هنجاری موردنظر، از مرکز به سمت شرق متمایل شده است. با استفاده از این اطلاعات، قید مدل کرانه‌ای طراحی شد (شکل ۴-۲۵).



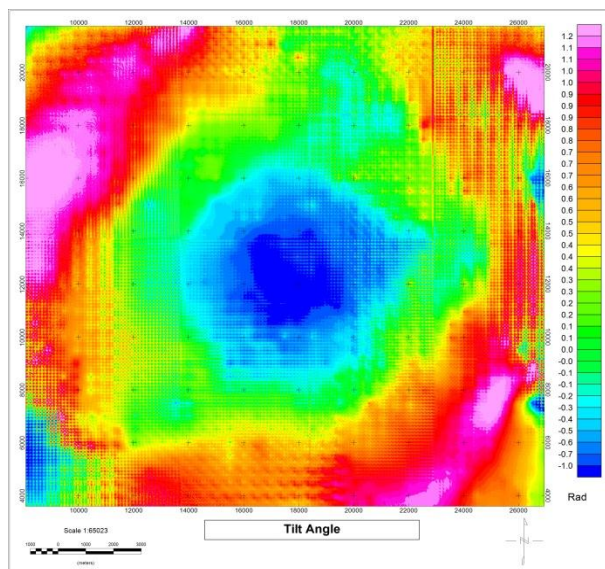
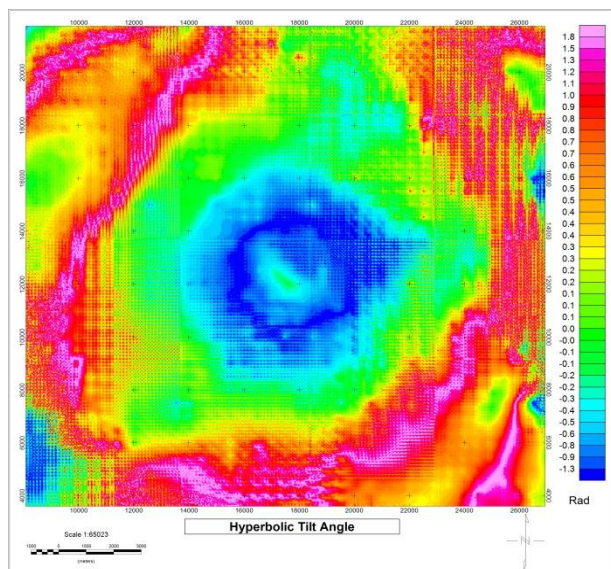
شکل ۴-۲۱: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده حاصل از حذف اثرات بی‌هنجاری ناحیه‌ای به روش روند سطحی با مرتبه یک.

شکل ۴-۲۰: نقشه بوگه کامل منطقه هامبل.

در وارون سازی پیش فرض (شکل ۴-۲۲)، شکل مدل تقریباً قرینه است و اثر کشیدگی مرکز بی‌هنجاری به سمت شرق بازسازی نشده است اما در وارون سازی مقید (شکل ۴-۲۶)، اثر کشیدگی مرکزی مدل به سمت شرق با مثلث قرمز در شکل به خوبی مشهود و عمق بالا و پایین مدل به ترتیب حدود ۲۵۰ و ۱۰۰۰۰ متر است.



شکل ۴-۲۲: وارون سازی در حالت پیش فرض (سلول‌هایی با تباین چگالی بیشتر از ۰/۰۶- گرم بر سانتی متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

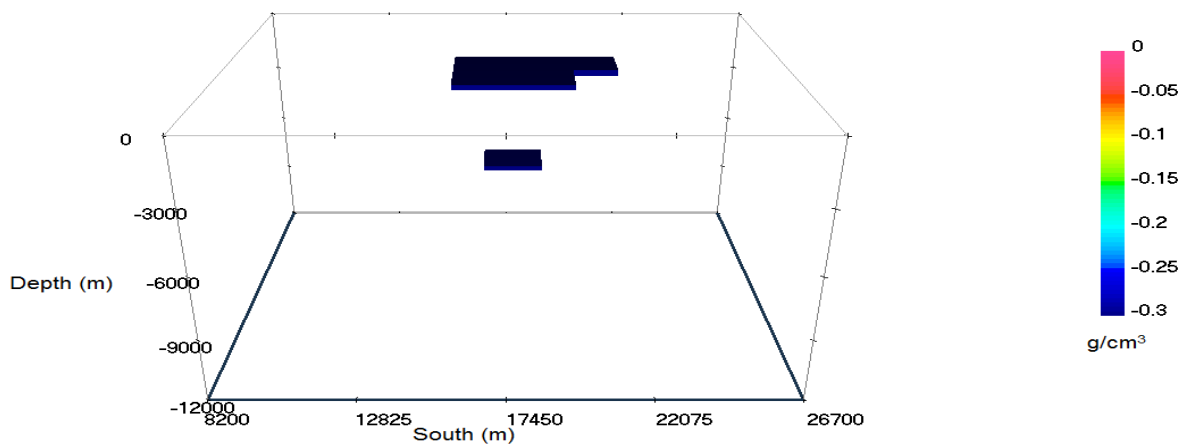


شکل ۴-۲۴: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک

شکل ۴-۲۳: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل

جدول ۴-۱: مقایسه نتایج حاصل از روشها برای تفسیر گنبد نمکی هومبل (آقاجانی، ۱۳۸۸).

عمق مرکز (کیلومتر)	مدل	پژوهشگر	روش
۴/۹۷	کره	نتلتون (۱۹۷۶)	منحنی‌های شاخص
۴/۹۶	کره	موهان و همکاران (۱۹۸۶)	تبدیل ملین
۴/۹۸	کره	شاو و اگراوال (۱۹۹۷)	تبدیل والش
۴/۹۲	کره	عبدالرحمان و ت. م. العربی (۱۹۹۳)	کمترین مربعات
۴/۶۰	کره	عبدالرحمان و ت. م. العربی (۱۹۹۳)	میانگین متحرک
۳/۰۵	کره	عبدالرحمان و همکاران (۱۹۹۹)	روش عددی تخمین عمق
۴/۹۶	کره	عبدالرحمان و همکاران (۲۰۰۱-a)	کمینه‌سازی کمترین مربعات سوم
۴/۹۵	کره	عبدالرحمان و همکاران (۲۰۰۱-b)	روش جدید تخمین عمق
۵/۱۵	کره	سالم (Salem, 2003)	فرمول ساده
۴/۸۰	کره	آقاجانی (۱۳۸۸)	گرادیان کل نرمال
۴/۷۳۴	کره	بر اساس روش‌های فوق	متوسط عمق

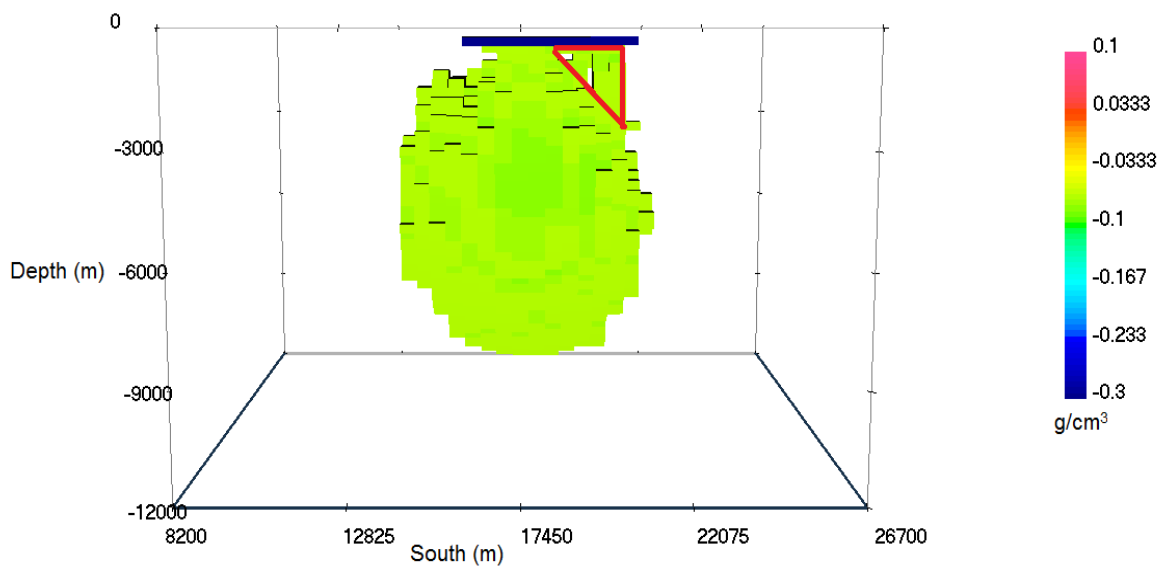


شکل ۴-۲۵: طراحی قید مدل کرانه‌ای با استفاده از اطلاعات اولیه

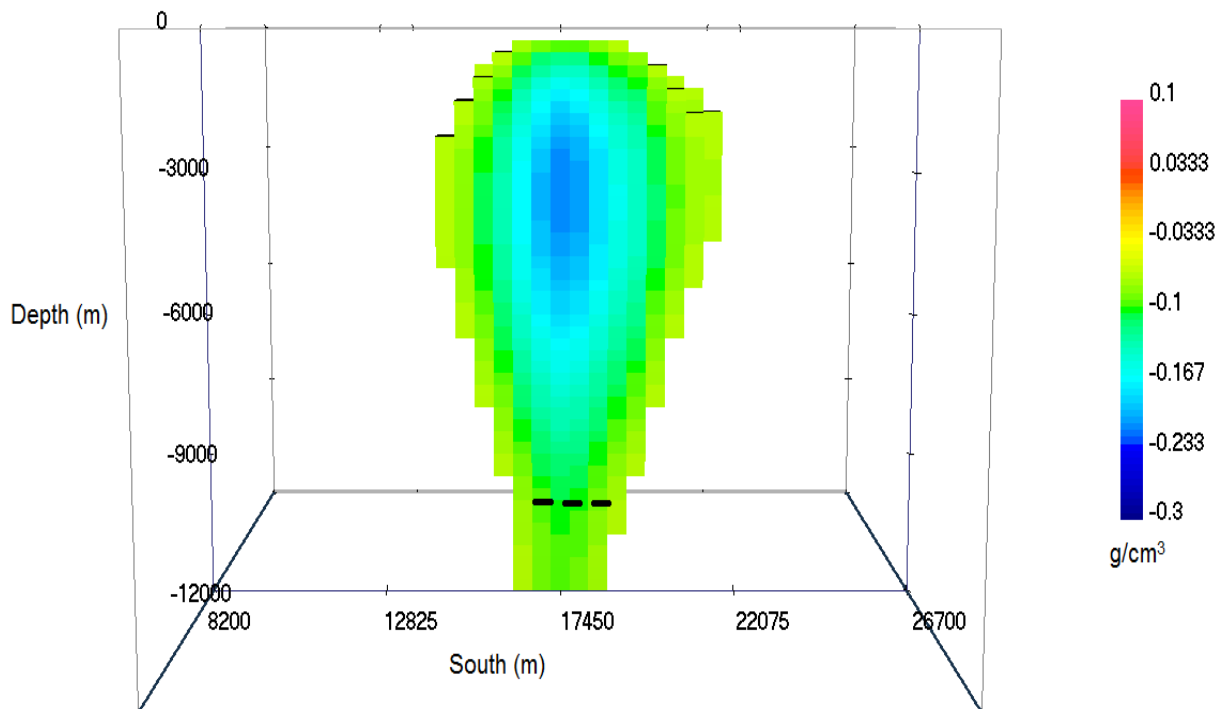
در قسمت آخر سعی بر این است تا اطلاعات اولیه را از طریق قیده‌های مثبت بودن، همواری در راستای قائم و افزایش وزن سلول‌های سطحی به وارون‌سازی اعمال شود که نتیجه آن در شکل (۴-۲۷) آمده است.

با توجه به مدل مصنوعی شماره ۳ در فصل ۳، اگر ساختار مورد نظر گنبدی شکل باشد (شکل ۳-۱۸)، نتیجه حاصل از وارون‌سازی آن، اصطلاحاً به شکل یک قطره برعکس آب در می‌آید (شکل ۳-۲۱). با استفاده از این نکته و این که گنبد‌های نمکی از پایین به بالا ضخیم‌تر می‌شوند، پس قطره‌ای شکل شدن شکل (۴-۲۷) نشان از وارون‌سازی صحیح دارد. مطابق این شکل، عمق بالا و پایین به ترتیب ۲۵۰ و ۱۰۰۰۰ متری آن، با خطوط مشکی مشخص شده است که این اعماق مطابق با نتیجه وارون‌سازی مقید (شکل ۴-۲۶) می‌باشد.

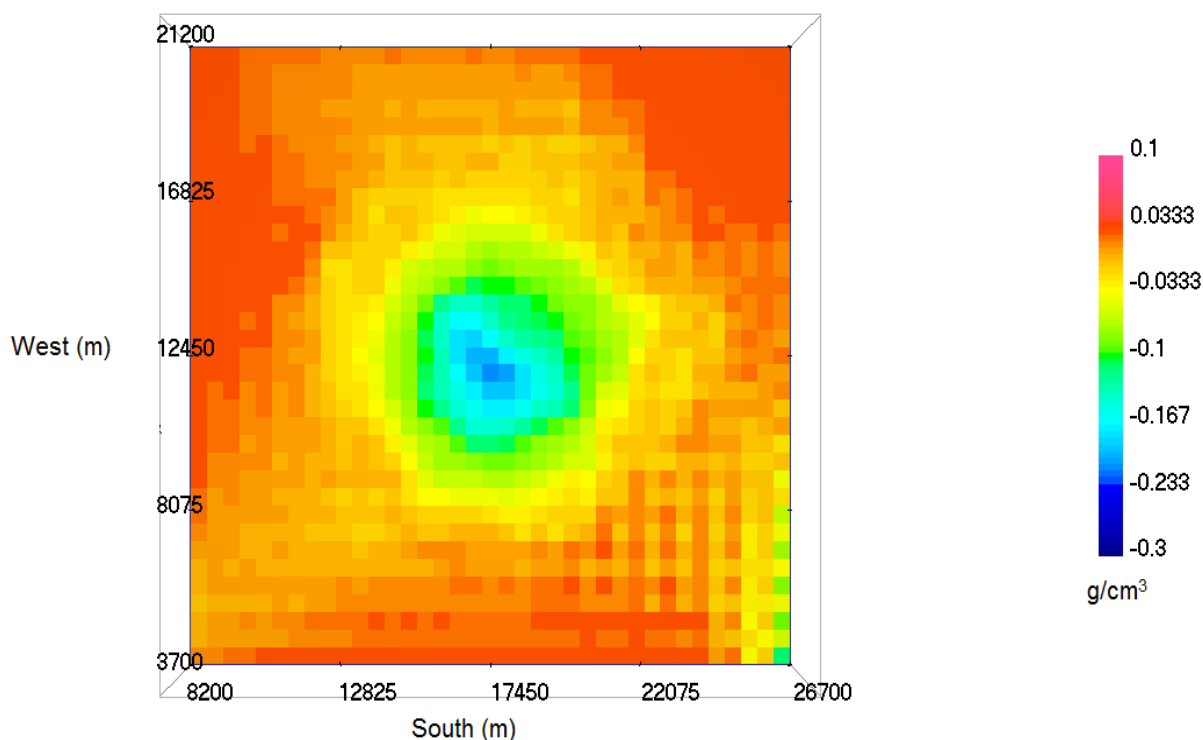
در شکل (۴-۲۸) نیز برش افقی در عمق ۴۰۰۰ متری از روی نتیجه مدل‌سازی (شکل ۴-۲۷) ارائه شده است که در آن کشیدگی مرکزی گنبد نمکی به سمت شرق دیده می‌شود.



شکل ۴-۲۶: وارون سازی مقید با استفاده از مدل کرانه‌ای (سلول‌هایی با تباین چگالی بیشتر از -0.06 گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).



شکل ۴-۲۷: وارون سازی با استفاده از قیدهای مثبت بودن، همواری در راستای قائم و افزایش وزن سلول‌های سطحی (سلول‌هایی با تباین چگالی بیشتر از -0.06 گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).



شکل ۴-۲۸: مقطع عمقی شکل (۴-۲۷) در عمق ۴۰۰۰ متری.

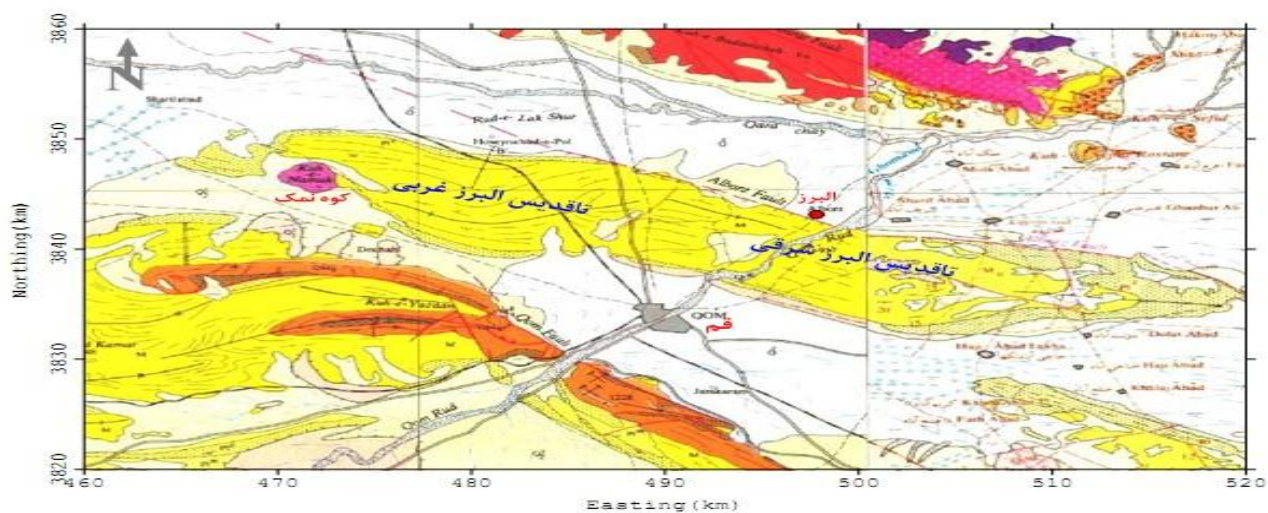
۴-۳-۵- نتیجه‌گیری وارون‌سازی داده‌های گنبدنمکی هامبل

در این قسمت، مقایسه‌ای بین وارون‌سازی‌های مقید انجام شد. یکی از انواع وارون‌سازی‌های مقید، با استفاده از قید مدل کرانه‌ای است که بدون قیده‌های دیگر به کار برده می‌شود. نوع دیگر وارون‌سازی مقید با استفاده از دیگر قیده‌های موجود است که در این جا به طور هم‌زمان از قیود هموارسازی، مثبت بودن و افزایش وزن سلول‌های سطحی‌تر استفاده شده است. نتایج حاصل از هر دو نوع وارون‌سازی مقید، عمق بالا و پایین یکسانی را نشان داده و در هر دو، کشیدگی مرکزی مدل به سمت شرق بارز بوده و شکل سه‌بعدی مدل نهایی نشان از یک ساختار گنبدنمکی دارد. در نهایت با کمک تمام نتایج مذکور، نتیجه می‌شود که گنبد نمکی هومبل از عمق ۲۵۰ متری شروع شده و تا عمق حدود ۱۰ کیلومتری ادامه دارد.

۴-۴- وارون سازی سه بعدی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم

۴-۴-۱ معرفی منطقه مورد مطالعه

گنبد نمکی قم معروف به کوه نمک، در انتهای شمال غربی تاقدیس البرز و در دماغه غربی آن در سطح زمین به صورت یک برآمدگی مرتفع با مساحتی دایره ای شکل برونزدگی دارد و بلندترین نقطه در منطقه مورد مطالعه می باشد (شکل ۴-۲۹). این ساختار، از گنبدهای ایران مرکزی (مانند گنبدهای نمک کویر جنوب سمنان و شمال شرقی اردکان) است که اساساً از نمک با ناخالصی هایی از رس تشکیل شده است. سطح گنبد نمکی توسط رس های قرمز مایل به زرد پوشیده شده است. در زمینه منشأ این گنبد نمکی تحقیقات کافی به عمل نیامده و نظر واحدی ابراز نشده است. به طور کلی در حوضه مرکزی ایران، دو منشأ برای گنبدهای نمکی می توان ذکر نمود؛ یکی سازند قرمز زیرین (زیر سازند قم) و دیگری واحد تبخیری قاعده سازند قرمز بالایی است (امیدی، ۱۳۶۹). آقاشاهی و زمردیان، با مطالعات گرانی سنجی گنبد نمکی قم نتیجه گرفتند که گنبد مذکور ریشه ای عمیق ندارد (Aghashahi and Zomorodian, 1981).



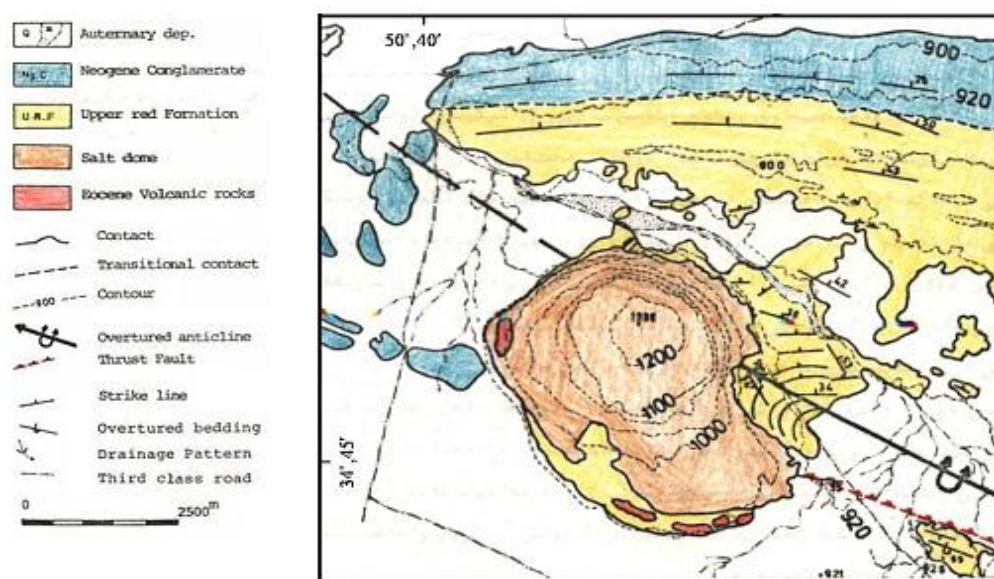
شکل ۴-۲۹: زمین شناسی حوضه نفتی البرز - سراج، نیمه شرقی برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ آران (امامی، ۱۳۷۱) و نیمه غربی آن از نقشه

۱/۲۵۰۰۰۰ قم می باشد (امامی و حاجیان، ۱۹۸۱) [آقاجانی، ۱۳۸۸].

عبایی و همکاران که سازند قرمز زیرین را به دو بخش تبخیری زیرین و لایه‌های قرمز بالایی تقسیم می‌کنند، به‌استناد سن‌یابی به روش رادیواکتیو و گرده‌شناسی، اعتقاد دارند که گنبد نمکی قم از واحد تبخیری زیرین مشتق شده و در امتداد یک منطقه گسلی (شکل ۴-۳۰)، به سمت بالا حرکت نموده است (Abaie et al, 1964). همچنین نقشه ترازساختاری رأس سازند قرمز زیرین، حاکی از وجود یک ساختمان گنبدی در این سازند در زیر زمین می‌نماید. بنابراین بر اساس داده‌های موجود می‌توان استنباط نمود که گنبد نمکی قم از واحدهای تبخیری قبل از سازند قم مشتق شده است و نظر آقاشاهی و زمردیان در این زمینه که گنبد نمکی قم دارای ریشه‌ای عمیق نیست چندان به واقعیت نزدیک نیست، ولی هنوز به درستی مشخص نشده است (امیدی، ۱۳۶۹). آقاجانی (۱۳۸۸)، با توجه به تحلیل داده‌های گرانی منطقه، عمق زیرین گنبد نمکی را حداقل بیش از ۴۰۰۰ متر تعیین نموده است (شکل ۴-۳۱).

۴-۴-۲- وارون‌سازی داده‌های گنبد نمکی قم

در این تحقیق، با توجه به دامنه تغییرات چگالی برای سنگ‌های منطقه که حدود ۲/۵۵ تا ۲/۷۵ گرم بر سانتی-



شکل ۴-۳۰: موقعیت گنبد نمکی قم در ساختمان چین خورده البرز (امیدی، ۱۳۶۹).

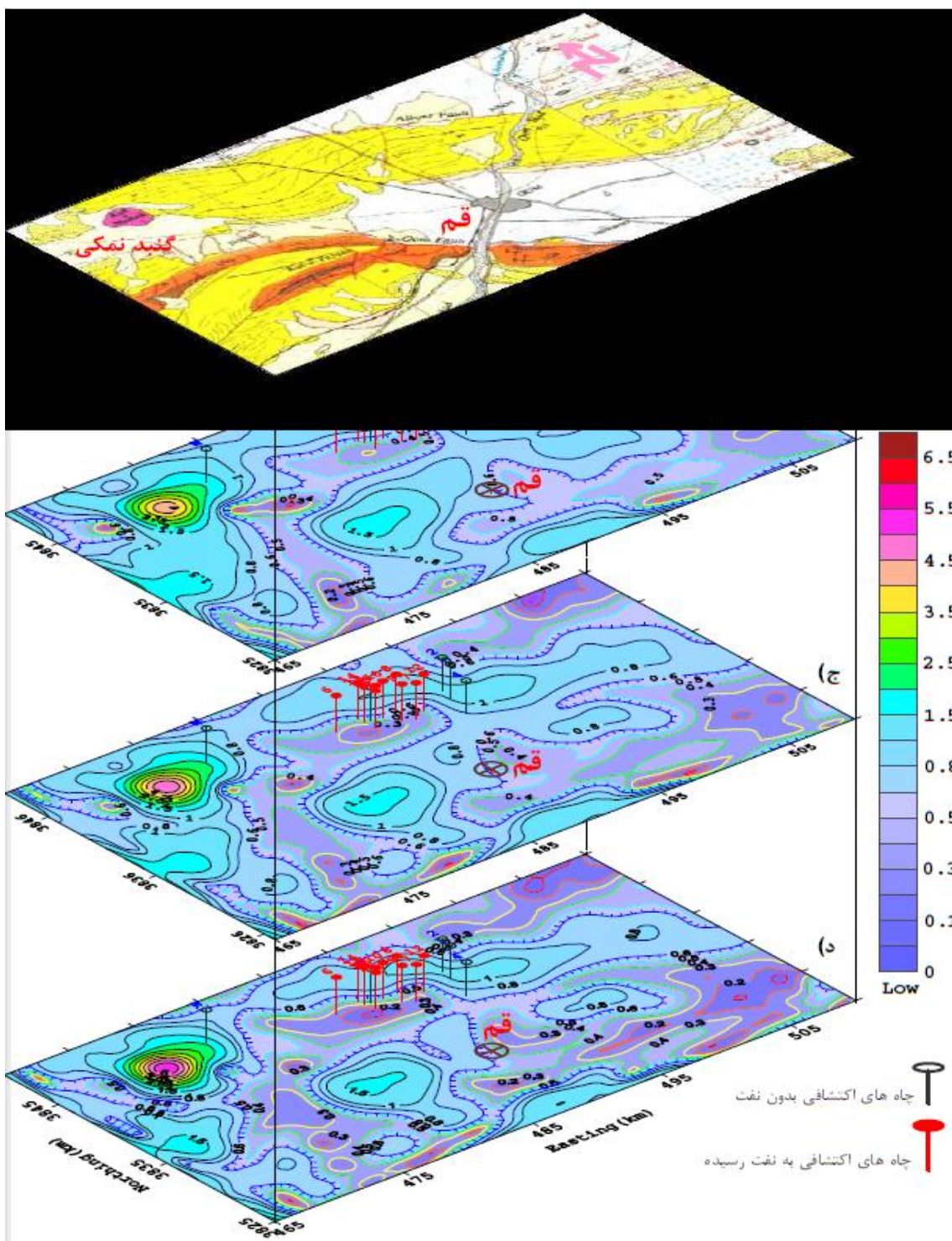
متر مکعب و برای گنبد نمکی ۱/۹۵ تا ۲/۱۵ است، مقدار اختلاف چگالی مطلوب، ۰/۶- گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. داده های گرانی سنجی مورد استفاده، در یک شبکه منظم به فواصل ایستگاه ها و خطوط برداشت ۵۰۰ متری برداشت شده است که حاصل آن، تعداد ۱۵۵۱ داده می باشد.

براساس روش روند سطحی مرتبه سه، بی هنجاری های باقیمانده گرانی در ناحیه قم از بی هنجاری های ناحیه ای تفکیک گردید (آقاجانی، ۱۳۸۸). نقشه بوگه کامل و حذف روند سطحی درجه ۳، در شکل های (۴-۳۲) و (۴-۳۳) ارائه شده است.

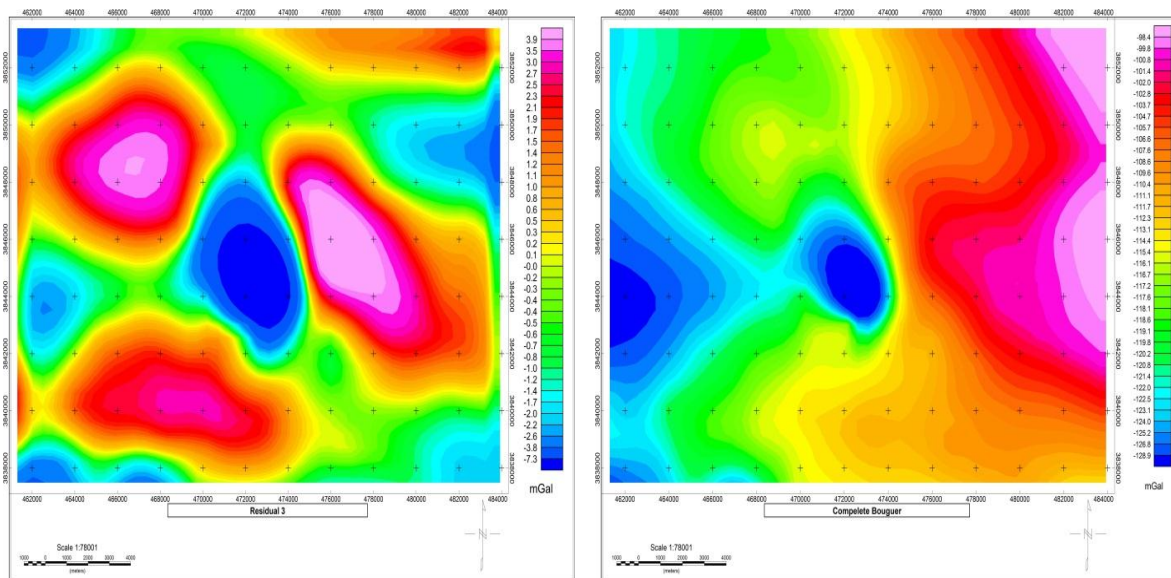
پس از حذف اثرات ناحیه ای و مشخص شدن آنومالی محلی، در ادامه کار مدل سازی گام به گام با تاثیر قیود مختلف صورت گرفته است. برای این منظور ابتدا مسئله بدون اعمال هیچ گونه قیدی حل شده است که نتیجه آن در شکل (۴-۳۴) آورده شده است.

جهت انجام وارون سازی مقید، از اطلاعات موجود منطقه استفاده شد که شامل تحقیقات آقاجانی (۱۳۸۸) مبنی بر کشیدگی عمق گنبد نمکی مذکور تا عمق ۴۰۰۰ متری، تعیین میزان گستردگی سطحی متوسط گنبد نمکی حاصل از فیلترهای تخمین لبه (شکل های ۴-۳۵ و ۴-۳۶) و وجود رخنمون در سطح زمین بود. با استفاده از این اطلاعات، قید مدل کرانه ای طراحی شد (شکل ۴-۳۷).

با توجه به شکل های (۴-۳۵) و (۴-۳۶)، مشخص می شود که بی هنجاری مورد نظر دارای کشیدگی شمال غربی - جنوب شرقی است. شکل (۴-۳۸) نیز نمای بالایی وارون سازی در حالت پیش فرض را نشان می دهد. در این شکل، مدل بازسازی شده دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی می باشد که نشان از هم خوانی نتایج مدل سازی با روش های تخمین مرز دارد.

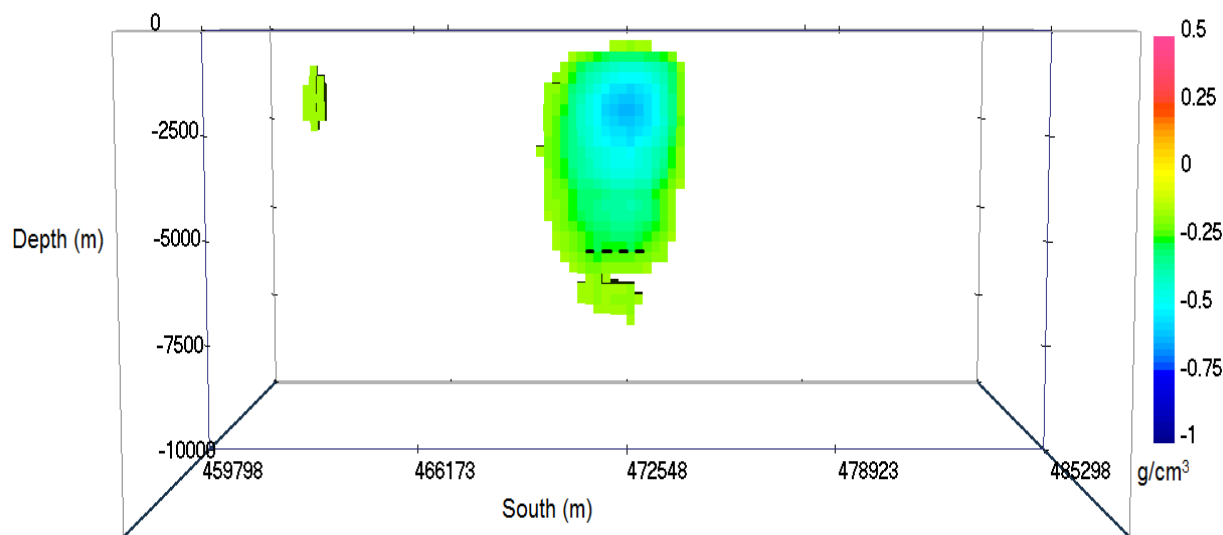


شکل ۴-۳۱: نقشه زمین شناسی محدوده حوضه نفتی البرز قم با مشخصه شهر قم، گنبد نمکی (الف) و گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی های گرانی در افق های (ب) ۲۰۰۰، (ج) ۲۵۰۰ و (د) ۳۰۰۰ متری، موقعیت چاه های اکتشافی با علامت مشخصه روی نقشه ها دیده می شود (آقاجانی، ۱۳۸۸).



شکل ۴-۳۳: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده حاصل از حذف اثرات بی‌هنجاری ناحیه‌ای به روش روند سطحی با مرتبه سه

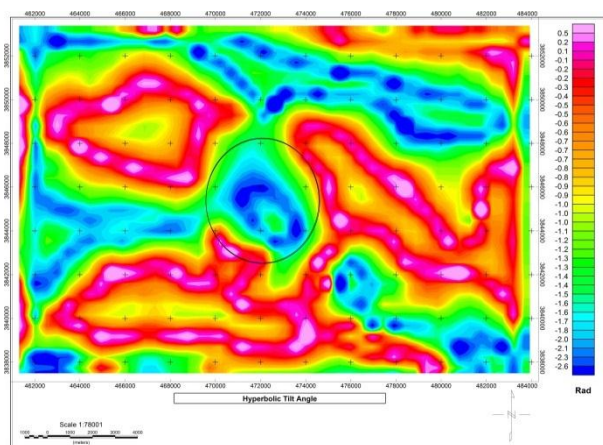
شکل ۴-۳۲: نقشه بوگه کامل منطقه گنبدنمکی قم.



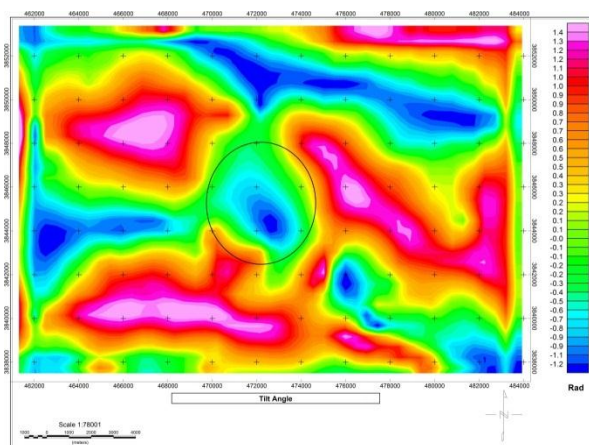
شکل ۴-۳۴: مقطع عرضی وارون‌سازی در حالت پیش‌فرض (سلول‌هایی با تباین چگالی بیشتر از ۰/۱۴ - گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

در شکل (۴-۳۹) وارون‌سازی مقید انجام شده است که در آن قید مدل کرانه‌ای با مستطیل قرمز مشخص شده‌اند. برای مقایسه صحیح وارون‌سازی پیش‌فرض (۴-۳۴) و وارون‌سازی مقید (۴-۳۹)، محدوده‌ی راهنمای نقشه

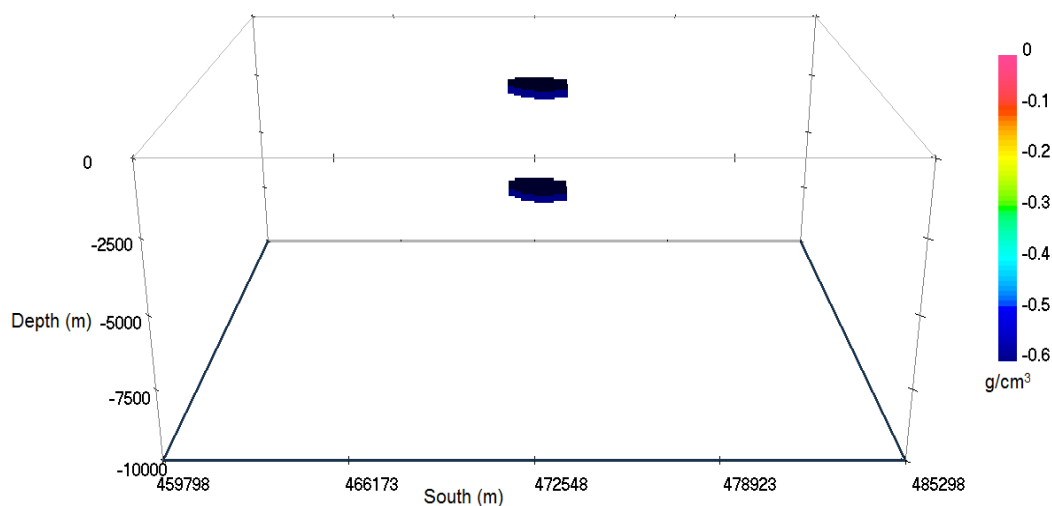
و همچنین میزان نمایش سلول‌ها در هر دو شکل یکسان است (سلول‌هایی با تباین چگالی بیشتر از ۰/۱۴ - گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند). همان‌طور که در شکل (۴-۳۴) مشخص است، عمق بالای مدل به سطح زمین نرسیده و کشیدگی عمقی مدل تا عمق تقریبی ۵۲۵۰ متری (نقطه چین مشکی) ادامه یافته است اما در شکل (۴-۳۹)، سطح بالای مدل به سطح زمین رسیده و از کشیدگی عمقی زیادی جلوگیری شده و تا عمق ۴۵۰۰ متری (نقطه چین مشکی) ادامه یافته است.



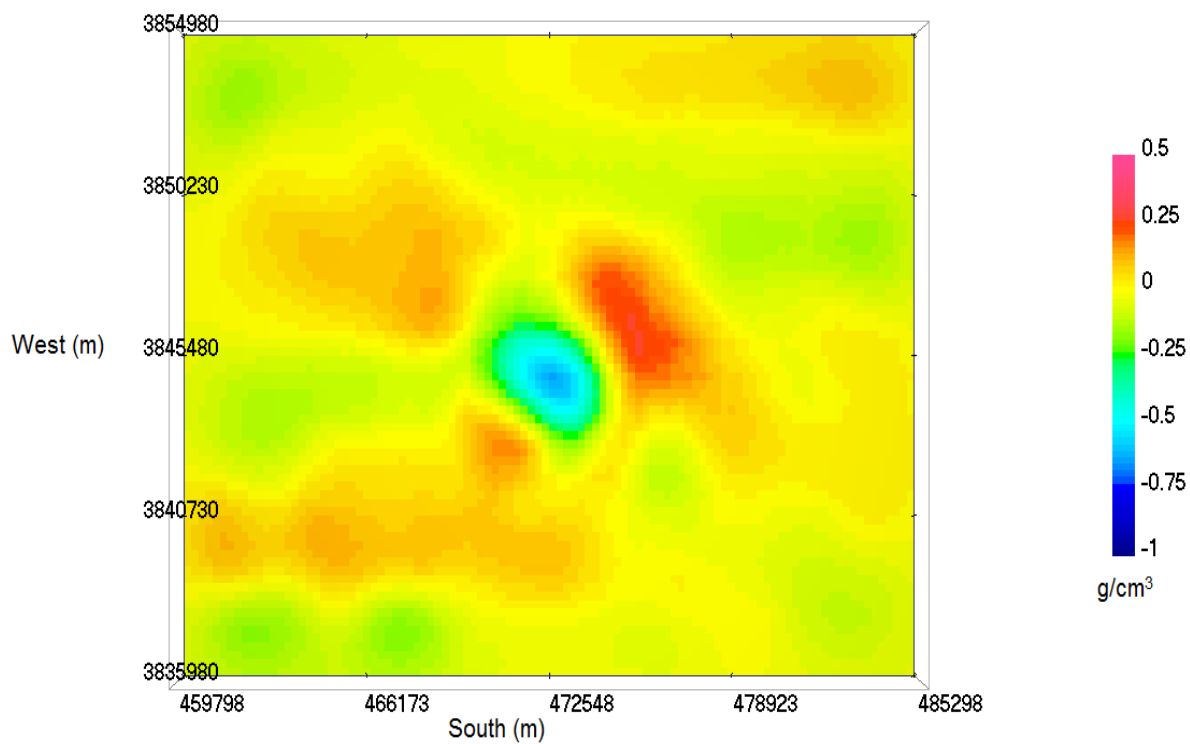
شکل ۴-۳۶: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک.



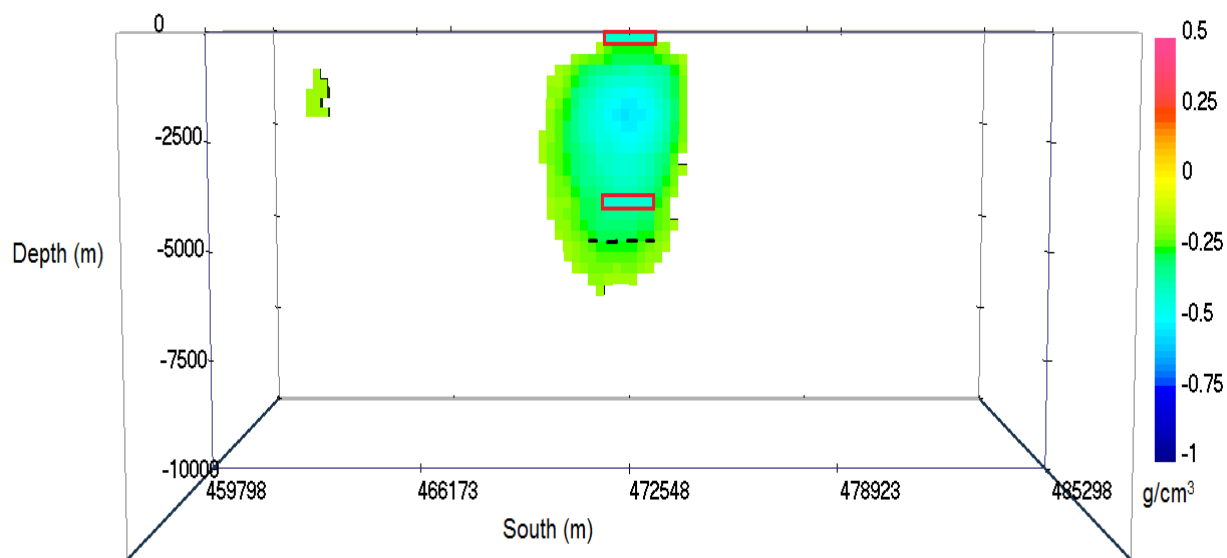
شکل ۴-۳۵: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل.



شکل ۴-۳۷: طراحی قید مدل کرانه‌ای با استفاده از اطلاعات اولیه.



شکل ۴-۳۸: وارون سازی در حالت پیش فرض (مقطع عمقی ۲۰۰۰ متری).



شکل ۴-۳۹: مقطع عرضی وارون سازی مقید با استفاده از مدل کرانه‌ای (سلول‌هایی با تباین چگالی بیشتر از ۰/۱۴ - گرم بر سانتی-متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

۴-۳-۳- نتیجه‌گیری وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی گنبد نمکی قم

در این روش، وارون‌سازی پیش‌فرض یعنی مدل‌سازی فقط با استفاده از داده‌های کم‌هزینه گرانی‌سنجی و بدون هیچ‌گونه داده حفاری، تصویر نسبتاً مناسبی از ساختار مورد نظر ارائه می‌دهد که می‌توان از آن اطلاعات بسیار مفیدی به دست آورد اما جهت رسیدن به مدلی با جزئیات بیشتر، مورد اعتمادتر و منطبق با اطلاعات زمین‌شناسی، لازم است که از وارون‌سازی مقید استفاده کنیم. نتایج نهایی وارون‌سازی سه‌بعدی، مشخص کرد که گنبد نمکی قم تا عمق حدود ۴۵۰۰ متری ادامه داشته و در نتیجه منشا آن، سازند قرمز زیرین می‌باشد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، بررسی، مدل‌سازی و تفسیر مجموعه‌ای از داده‌های واقعی با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی لی-اولدنبرگ بود. به منظور استفاده بهینه از این روش، ابتدا اقدام به وارون‌سازی داده‌های مدل‌های مصنوعی ساده تا مرکب و پیچیده و منطبق با ساختارهای زمین‌شناسی شد. با توجه به این که دو هدف اصلی این روش، تخمین شکل منشا و تعیین میزان تباین‌چگالی بی‌هنجاری با زمینه است، نتایج حاصل از وارون‌سازی داده‌های مصنوعی، نشان دهنده‌ی عمل‌کرد قابل‌قبول این روش در تخمین شکل بی‌هنجاری‌های مختلف بود؛ با این تفاوت که میزان تباین‌چگالی بی‌هنجاری با زمینه نسبت به اندازه واقعی، مقدار ناچیزی فاصله داشت.

نکته بسیار مهم در این الگوریتم، توانایی شرکت داده‌های جانبی (حاصل از مطالعات زمین‌شناسی یا دیگر روش‌های ژئوفیزیکی)، در روند وارون‌سازی است. این قابلیت توسط قیدهایی مانند همواری، مثبت بودن، مدل-مرجع، مدل‌کرانه‌ای و ... انجام می‌شود و حاصل وارون‌سازی، بازسازی مدل‌هایی است که از اعتماد بالاتری برخوردار بوده و با ساختارهای زمین‌شناسی انطباق بیشتری دارند. در پایان، داده‌های گرانی‌سنجی محدوده اکتشافی کرومیت واقع در شرق سبزوار، گنبدنمکی قم و گنبدنمکی هومبل (واقع در آمریکا)، مورد وارون‌سازی قرار گرفت که در ادامه، نتایج هر یک از این مجموعه داده به اختصار آورده می‌شود.

نتیجه نهایی بررسی محدوده اکتشافی کرومیت واقع در شرق سبزوار، حاکی از وجود یک ناپیوستگی (تغییرات واحدهای سنگی یا یک گسل پنهان) در غرب محدوده با روندی شمالی-جنوبی است که یک توده نسبتاً بزرگ کرومیتی به موازات آن تشکیل شده است. گسترش سطحی این توده از شمال به جنوب متغیر بوده و در جنوب، به سمت شرق تمایل دارد. همچنین توده‌های کرومیتی پراکنده دیگری در مرکز و شرق محدوده وجود دارد که تا نزدیکی سطح زمین بالا آمده‌اند. عمق پایین توده بزرگ، حدود ۴۵ متر و عمق دیگر توده‌های پراکنده محیط، کمتر از ۲۵ متر برآورد می‌شود. نتیجه وارون‌سازی داده‌های گنبدنمکی هامبل نشان می‌دهد که این گنبدنمکی از عمق حدود ۲۵۰ متری شروع شده و تا عمق حدود ۱۰ کیلومتری ادامه دارد. نتایج حاصل از

وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های گنبدنمکی قم، مشخص کرد که این گنبدنمکی، تا عمق حدود ۴۵۰۰ متری ادامه داشته و در نتیجه منشا آن، سازند قرمز زیرین می‌باشد.

در پایان ذکر این نکته ضروری است که فقط با استفاده از داده‌های کم‌هزینه گرانی‌سنجی و بدون هیچ‌گونه داده پرهزینه حفاری، با استفاده از این روش می‌توان اطلاعات نسبتاً جامعی از ساختارهای زیرسطحی حاصل کرد تا در مراحل بعدی بتوان با بهینه‌سازی شبکه حفاری، هزینه‌ها را کاهش و به مدل‌های جامع‌تری دست یافت.

۵-۲- پیشنهادات

در این روش، برای طراحی قید مدل کرانه‌ای لازم است تا برای تک‌تک سلول‌های مدل، حد بالا و پایین تباین-چگالی وارد شود؛ که کاری بسیار زمان‌بر است. پیشنهاد می‌گردد تا با تغییرات الگوریتم لی-اولدنبرگ، فایل مورد نیاز برای طراحی قید مدل کرانه‌ای تولید شود.

در استفاده از قید هموارسازی، تمام سلول‌ها در یک جهت خاص هموار می‌شوند. پیشنهاد می‌شود که استفاده از قید هموارسازی مانند قید مدل کرانه‌ای، به تک‌تک سلول‌ها اعمال شود تا بتوان بازسازی مدل‌های ترکیبی شامل ساختارهای عمودی و افقی را تکمیل کرد.

پیشنهاد می‌شود تا با انجام مدل‌سازی وارون به روش تمرکز یافته بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی این تحقیق، مقایسه کاملی بین وارون‌سازی هموار و تمرکز یافته^۱ انجام و مزایا، معایب، نقاط قوت و نقاط ضعف هر کدام بیان گردد.

در مورد منطقه سبزوار، پیشنهاد حفاری نویسنده‌گان، در نقطه‌ای به مختصات $x=606891$ و $y=4012312$ می‌باشد؛ همچنین توصیه می‌شود تا داده‌های حفاری محدوده تهیه و با استفاده از آن، قیدهایی مختلف از جمله

¹ Focused inversions

مدل مرجع و مدل کرانه‌ای طراحی و به وارون‌سازی اعمال شود؛ تا نتیجه نهایی هر چه بیشتر به توده زیرسطحی نزدیک گردد.

منابع

- ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، ۱۳۸۹، "گرانی‌سنجی کاربردی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.
- آزاد، م.، کنشلو، م.، کامکار روحانی، ا.، ۱۳۹۲، "به کارگیری روش آنالیز کریجینگ فاکتوری در فیلتر کردن ساختارهای داده‌های گرانی‌سنجی منطقه معدنی کرومیت فاریاب"، م. فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۹، شماره ۴، ۶۱-۷۲، تهران.
- آقاجانی، ح.، ۱۳۸۸، رساله دکتری، "بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله‌های نفتی"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- آقاجانی، ح.، ۱۳۹۱، "انجام پیمایش و مطالعات ثقل‌سنجی در محدوده کرومیت شرق سبزوار"، طرح پژوهشی، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- امامی، م.، ه.، حاجیان، ج.، ۱۹۸۱، "نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ قم"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- امامی، م.، ه.، ۱۳۷۱، "نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ آران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- امیدی، پ.، ۱۳۶۹، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "تحلیل خمیدگی ساختاری تاقدیس البرز- شمال قم"، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.
- قاسم‌العسگری، م.، ک.، ۱۳۸۳، "اصول ژئوفیزیک اکتشافی"، چاپ اول، انتشارات آییژ، تهران.

کامکار روحانی، ا.، ۱۳۸۷، "پردازش، مدل سازی، تحلیل و تفسیر داده های ژئوفیزیکی (گرانی و مغناطیس) برای اکتشاف کرومیت در منطقه فاریاب"، طرح پژوهشی، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

کامکار روحانی، ا.، بیکی، م.، ۱۳۸۸، "پردازش و تفسیر داده های مغناطیس هوایی به منظور پی جویی ذخایر کرومیت در منطقه سبزوار"، م. فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۵، شماره ۳، ۱۳-۳۴.

نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۸۳، پایان نامه کارشناسی ارشد، "مدل سازی دو و سه بعدی داده های گرانی سنجی با استفاده از روش وارون سازی فشرده"، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران.

نوروزی، غ.، ۱۳۸۸، "ژئوفیزیک اکتشافی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.

یعقوب پور، ع.، ۱۳۸۳، "اصول زمین شناسی ذخایر معدنی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، تهران.

Abaie, I., Ansari, H. J., Badakhshan, A., & Jaafari, A. (1964). "History and development of the Alborz and Sarajeh fields of Central Iran". **Bulletin of Iranian Petroleum Institute**, 15, 561-574.

Abdelrahman, E. S. M., & El-Araby, T. M. (1993). "A least-squares minimization approach to depth determination from moving average residual gravity anomalies". **Geophysics**, 58(12), 1779-1784.

Abdelrahman, E. M., Abo-Ezz, E. R., & Radwan, A. H. (1999). "A numerical approach to Depth determination from residual gravity anomaly due to two structures". **Pure and applied geophysics**, 154(2), 329-341.

Abdelrahman, E. M., El-Araby, H. M., El-Araby, T. M., & Abo-Ezz, E. R. (2001). "Three least-squares minimization approaches to depth, shape, and amplitude coefficient determination from gravity data". **Geophysics**, 66(4), 1105-1109.

Abdelrahman, E. S. M., El-Araby, T. M., El-Araby, H. M., & Abo-Ezz, E. R. (2001). "A new method for shape and depth determinations from gravity data". **Geophysics**, 66(6), 1774-1780.

Aghashahi, E., & Zomorodian, H. (1981). "Gravity study of Qum salt dome in Iran". **Journal of Earth and Space Physics**, 10, 21-24.

Arısoy, M. Ö., & Dikmen, Ü. (2011). "Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping". **Computers & Geosciences**, 37(7), 935-942.

Aster, R. C., Borchers, B., & Thurber, C. H. (2011). "**Parameter estimation and inverse problems**". Academic Press.

Barker, J., Kogel, J., Krukowski, S., & Trivedi, N. (2006). "**Industrial Minerals and Rocks-Commodities**", Markets, and Uses.

Blakely, R. J. (1996). "**Potential theory in gravity and magnetic applications**". Cambridge University Press.

Boulanger, O., & Chouteau, M. (2001). "Constraints in 3D gravity inversion". **Geophysical Prospecting**, 49(2), 265-280.

Carter, W. T., & Kocher, A. E. (1906). "**Soil Survey of Houston County, Texas**". US Government Printing Office.

Chasseriau, P., & Chouteau, M. (2003). "3D gravity inversion using a model of parameter covariance". **Journal of applied geophysics**, 52(1), 59-74.

Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). "Enhancing potential field data using filters based on the local phase". **Computers & Geosciences**, 32(10), 1585-1591.

Davis, W. E., Jackson, W. H., & Richter, D. H. (1957). "Gravity prospecting for chromite deposits in Camaguey province, Cuba". **Geophysics**, 22(4), 848-869.

Ebbing, J., Braitenberg, C., & Götze, H. J. (2001). "Forward and inverse modelling of gravity revealing insight into crustal structures of the Eastern Alps". **Tectonophysics**, 337(3), 191-208.

Edwards, R., & Atkinson, K. (1986). "**Ore deposits geology and its influence on mineral exploration**".

Ergin, K. (1952). "Gravity and magnetometer surveys for chromite ore deposits in Turkey". In 19th International Geologic Congress, Algeria, CR Sec(Vol. 9, pp. 123-130).

Flint, D. E., de Albear, J. F., & Guild, P. W. (1948). "**Geology and chromite deposits of the Camagüey district, Camagüey Province, Cuba**". US Government Printing Office.

Fullagar, P. K., & Pears, G. A. (2007). "**Towards geologically realistic inversion**". In Proceeding of Exploration (Vol. 7).

Gallardo, L. A., Pérez-Flores, M. A., & Gómez-Treviño, E. (2005). "Refinement of three-dimensional multilayer models of basins and crustal environments by inversion of gravity and magnetic data". **Tectonophysics**, 397(1), 37-54.

Gill, P. E., Murray, W., Ponceleon, D. B., & Saunders, M. A. (1991). "Solving reduced KKT systems in barrier methods for linear and quadratic programming (No. SOL-91-7)". **STANFORD UNIV CA SYSTEMS OPTIMIZATION LAB**.

Grant, F. S., & West, G. F. (1965). "**Interpretation theory in applied geophysics**". McGraw-Hill Book.

Green, W. R. (1975). "Inversion of gravity profiles by use of a Backus-Gilbert approach". **Geophysics**, 40(5), 763-772.

Guillen, A., Courrioux, G., Calcagno, P., Lane, R., Lees, T., & McInerney, P. (2004). "**Constrained gravity 3D litho-inversion applied to Broken Hill**". ASEG Extended Abstracts, 2004(1), 1-6.

Hammer, S., Nettleton, L. L., & Hastings, W. K. (1945). "Gravimeter prospecting for chromite in Cuba". **Geophysics**, 10(1), 34-49.

Hubbert, M. K. (1948). "A line-integral method of computing the gravimetric effects of two-dimensional masses". **Geophysics**, 13(2), 215-225.

Jackson, D. D. (1979). "The use of a priori data to resolve non-uniqueness in linear inversion". **Geophysical Journal International**, 57(1), 137-157.

Jakosky, J. J. (1950). "Exploration geophysics". **Trija Pub. Co.**

Kospiri, A., Kosho, P., & Vukzaj, N. (1999). "Case histories of the application of geophysical methods to chromite exploration in the Balkans". In Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition. Istanbul, O7-3 (pp. 38-40).

Last, B. J., & Kubik, K. (1983). "Compact gravity inversion". **Geophysics**, 48(6), 713-721.

Lelièvre, P. G., Oldenburg, D. W., & Williams, N. C. (2009). "Integrating geological and geophysical data through advanced constrained inversions". **Exploration Geophysics**, 40(4), 334-341.

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., & Oldenburg, D. W. (1996). "3-D inversion of magnetic data". **Geophysics**, 61(2), 394-408.

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

Li, Y., & Oldenburg, D. W. (2003). "Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method". **Geophysical Journal International**, 152(2), 251-265.

Mohan, N. L., Anandababu, L., & Rao, S. S. (1986). "Gravity interpretation using the Mellin transform". **Geophysics**, 51(1), 114-122.

Meju, M. A. (1994). "**Geophysical data analysis: understanding inverse problem theory and practice (Vol. 6)**". Tulsa,, OK: Society of Exploration Geophysicists.

Menke, W. (1989). "**Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory**". Orlando, Fla.: Academic Press. xii, 260.

Miller, R. L. (1956). "Trend surfaces: their application to analysis and description of environments of sedimentation". **The Journal of Geology**, 425-446.

Miller, H. G., & Singh, V. (1994). "Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources". **Journal of Applied Geophysics**, 32(2), 213-217.

Nettleton, L. L., & Lomax, L. (1971). "**Elementary gravity and magnetics for geologists and seismologists**". No. 1. SEG Books.

Nettleton, L. L. (1976). "**Gravity and magnetics in oil prospecting**". McGraw-Hill Companies.

Nocedal, J., & Wright, S. (2006). "**Numerical optimization**". Springer Science & Business Media.

Pedersen, L. B. (1977). "Interpretation of Potential Field Data a Generalized Inverse APPROACH". **Geophysical Prospecting**, 25(2), 199-230.

Peters, T. J., & Kramers, J. D. (1974). "Chromite deposits in the ophiolite complex of northern Oman". **Mineralium Deposita**, 9(3), 253-259.

Phillips, N. (2001). "Geophysical inversion in an integrated exploration program: examples from the San Nicolas deposit". **University of British Columbia**. Vancouver, Canada: Master's Thesis.

Portniaguine, O., & Zhdanov, M. S. (1999). "Focusing geophysical inversion images". **Geophysics**, 64(3), 874-887.

Portniaguine, O., & Zhdanov, M. S. (2002). "3-D magnetic inversion with data compression and image focusing". **Geophysics**, 67(5), 1532-1541.

Robinson, E. S., & Coruh, C. (1988). "Electromagnetic surveying Basic Exploration". **Geophysics**, 490-500.

Roy, I. G. (2002). "A robust descent type algorithm for geophysical inversion through adaptive regularization". **Applied Mathematical Modelling**, 26(5), 619-634.

Salem, A., Elawadi, E., & Ushijima, K. (2003). "Depth determination from residual gravity anomaly data using a simple formula". **Computers & geosciences**, 29(6), 801-804.

Saunders, M. A. (1996). "Cholesky-based methods for sparse least squares: The benefits of regularization". *Linear and Nonlinear Conjugate Gradient-Related Methods*, 92-100.

Shaw, R. K., & Agarwal, B. N. P. (1997). "A generalized concept of resultant gradient to interpret potential field maps". **Geophysical prospecting**, 45(6), 1003-1011.

Talwani, M., Worzel, J. L., & Landisman, M. (1959). "Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone". **Journal of Geophysical Research**, 64(1), 49-59.

Talwani, M., & Ewing, M. (1960). "Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape". **Geophysics**, 25(1), 203-225.

Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. Y. (1977). "**Solutions of ill-posed problems**. WH Winston, Washington", DC, 330.

Unwin, D. J. (1975). "**An introduction to trend surface analysis**". Geo Abstracts, University of East Anglia.

USGS, (2009) “**Humble oilfield**” U.S. Geological Survey, www.usgs.gov.

van Zon, T., & Roy-Chowdhury, K. (2006). “Structural inversion of gravity data using linear programming”. **Geophysics**, 71(3), J41-J50.

Wamalwa, A. M., Mickus, K. L., & Serpa, L. F. (2013). “Geophysical characterization of the Menengai volcano, Central Kenya Rift from the analysis of magnetotelluric and gravity data”. **Geophysics**, 78(4), B187-B199.

Williams, N. C. (2008). “Geologically-constrained UBC–GIF gravity and magnetic inversions with examples from the Agnew-Wiluna greenstone belt, Western Australia”. **University of British Columbia**. Vancouver, Canada.

Won, I. J., & Bevis, M. (1987). “Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines”. **Geophysics**, 52(2), 232-238.

Yuenguel, S. (1956). “Prospecting for chromite with gravimeter and magnetometer over rugged topography in east Turkey”. **Geophysics**, 21(2), 433-454.

Zhdanov, M. S. (1988). “**Integral transforms in geophysics**”. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo.

Zhdanov, M. S. (2002). “**Geophysical inverse theory and regularization problems (Vol. 36)**”. Elsevier.

<http://geology.com>

<http://ngdir.ir>

abstract

Nowadays attempts to detect and achieve buried structures and underground resources have developed widely and geophysics is a means of identifying these structures. The main goal of geophysical methods, including gravimetry, is incorporating additional information to the process of inversion to define the characteristics of geological structures as precisely as possible. Since our country is rich in mineral resources, using modern and efficient methods to optimize and prevent from additional costs is very important. So in the first step; i.e., exploration, we should try to collect as much comprehensive information about the underground structure as possible so that in the next costly step, that is extraction, all the necessary policies are chosen and the expenses are minimized. To reach this goal 2D and 3D modeling is one of the most successful methods of interpreting geophysical data. The outcome of modeling is to have a better understanding of target such as the shape and depth of source. Finding these parameters influences the subsequent decisions directly which can influence the management of major costs.

The aim of this study is 3D constrained inversion of gravity data to detect subsurface structures with Li-Oldenburg method (GRAV3D software). The two main objectives of this method are to identify the shape of source and determination of density contrast of the anomaly with the background. This algorithm includes a multi-coefficient objective function which is flexible enough to produce different kinds of models which are in good agreement with geological structures.

Incorporating additional information to the process of inversion is the strength of this algorithm which can be done with different constraints such as smoothness, positivity, reference model and bounded model. Constrained modeling leads inversion towards the production of logical models and as a result, the validity and reliability of the final model will increase. For optimized use of the algorithm at first it was tested on artificial models which were contaminated with noise, then according to the accommodation of the results with the right model it was used for the inversion of real data. In this research, gravity data of Sabzevar chromite exploratory area, Qom salt dome and Humble salt dome (located in the U.S.A) were inverted and the final results which have been shown in different views.

Key words: gravity, Li-Oldenburg inversion, 3D constrained inversion, Sabzevar chromite, Qom salt dome, Humble salt dome.



University of Shahrood

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

3D Inversion of gravity data based on Li-Oldenburg method

Vahid Jafarzadeh

Supervisor:

Dr. Ali Nejati Kalateh

Advisor:

Dr. Hamid Aghajani

September 2015