

اللَّهُ
الرَّحْمَنُ الرَّحِيمُ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته ژئوفیزیک گرایش گرانی سنجی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی وارون داده های گرانی سنجی جهت شناسایی ساختارهای زیر سطحی

فرزاد غلامیان

استاد راهنما

دکتر حمید آقاجانی

دکتر محمود میرزایی

شهریور ۱۳۹۴

تقدیم به

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

مواشیان سپید شد تا ما رو سفید شویم...

وعاشقانه سوختند تا گرما بخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدر مهربانم، مادر دلسوزم و، همسر فداکارم که با تمام وجود مرا در مسیر

پیشرفت هدایت کردند... تقدیم با تمام وجودم.

تقدیر و تشکر

اینک که به توفیق پروردگار، این پایان نامه را به پایان رسانده ام و وظیفه خود می دانم تا از زحمات کراتقدر
عزیزانی که در مراحل مختلف این تحقیق کمک های شایانی نموده اند، تشکر و قدردانی کنم. در ابتدا لازم
می دانم که از زحمات جناب آقای دکتر حمید آقاجانی و جناب آقای دکتر محمود میرزایی که زحمت
راهشایی این پایان نامه را بر عهده داشتند و بار سنبودهایشان مرا تا پایان مسیر کمک کردند، کمال تشکر و
سپاسگزاری را داشته باشم. همچنین از جناب آقای مهندس محمد رضایی جهت همکاری های لازم تشکر و
قدردانی می نمایم. در انتها نیز جادارو که از زحمات بی دریغ آقای مهندس زارعی و دوستانم آقایان وحید
جعفرزاده، ناصر فارسی، رامین اسدی و بهزاد سرلک که در عملیات صحرائی برداشت داده های کرانی سنجی،
مرباری کرده اند، صمیمانه کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

تعهد نامه

اینجانب فرزاد غلامیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش گرانی سنجی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی وارون داده های گرانی سنجی جهت شناسایی ساختارهای زیرسطحی تحت راهنمایی آقای دکتر حمید آقاجانی و آقای دکتر محمود میرزایی 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 صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا 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 اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها 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:

شناسایی ساختارهای زیرسطحی نظیر حفرات، تونل‌های معدنی، اتاقک‌های باستانی، رگه‌ها و نهشته‌های معدنی از جمله مواردی هستند که مورد توجه پژوهشگران حوزه معدن، علوم زمین، عمران و باستان‌شناسان قرار دارد. تعیین موقعیت چنین ساختارهایی تنها از طریق داده‌ها و اطلاعات سطحی زمین‌شناسی امکان‌پذیر نبوده و بدون استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی بسیار سخت و پرهزینه خواهد بود. به همین منظور در ابتدای کار اکتشافی از روش‌های ژئوفیزیکی در شناسایی اینگونه ساختارها می‌توان بهره برد. یکی از مناسب‌ترین روش‌های تعیین این چنین پدیده‌هایی که تباین چگالی قابل قبولی با محیط اطرافشان دارند، روش گرانی‌سنجی می‌باشد.

در تفسیر داده‌های گرانی پس از حذف بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و تهیه نقشه باقی مانده آنها، جهت تعیین پارامترهای هندسی ساختار مربوطه، از مدل‌سازی استفاده می‌شود. در این تحقیق به منظور شناسایی و مدل‌سازی تونل معدنی-آموزشی زغال‌سنگ ده‌ملا-شاهرود، عملیات برداشت داده‌های میکروگرانی‌سنجی بر روی بخشی از محدوده تونل اصلی (عمود بر لایه^۱) و انحرافی (دنباله لایه^۲) انجام شد. پس از انجام تصحیحات و پردازش‌های لازم، داده‌های بی‌هنجاری محلی برای انجام مدل‌سازی آماده شد. همچنین به منظور بررسی و تحقیق بیشتر، از داده‌های گرانی‌سنجی یک سوله زیرسطحی در منطقه نوادا آمریکا نیز استفاده شد.

برای انجام مدل‌سازی از روش وارون‌سازی غیرخطی کاماچو^۳ استفاده شد؛ که توانایی وارون‌سازی بصورت متمرکز^۴ را دارا می‌باشد. جهت ارزیابی این روش، از داده‌های مدل مصنوعی دو منشور متوازی‌السطوح افقی در دو عمق مختلف استفاده شد که نتایج حاصل با عمق و راستای دو منشور تطابق خوبی داشت.

^۱ Adit

^۲ Drift

^۳ Camacho

^۴ Focusing inversion

با توجه به پیچیدگی‌های منطقه مورد مطالعه، نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های واقعی نشان می‌دهد که تفکیک مناسبی بین تونل، دوپل‌های حفاری شده با ساختارهای اطراف آنها وجود دارد. همچنین لایه زغال‌داری که در راستای تونل انحرافی (شرقی-غربی) وجود دارد تا حد مطلوبی شناسایی و مدل‌سازی شده است. خصوصیات شبکه برداشت، تعداد ایستگاه‌ها و دقت در اندازه‌گیری داده‌ها می‌تواند در به دست آوردن یک مدل مطلوب و مناسب بسیار پر اهمیت باشد.

کلمات کلیدی: میکروگرانی‌سنجی، مدل‌سازی وارون، تونل معدنی، دهملا، شاهرود

مقالات مستخرج از پایان نامه:

- Gholamian, F., Aghajani, H. & Mirzaei, M., (2015), "Detecting abandoned mine tunnel using 3D inverse modeling of microgravity data", Near Surface Geophysics, (revision submitted)
- غلامیان ف.، آقاجانی ح. و میرزایی م.، (۱۳۹۴) "مدلسازی معکوس سه بعدی داده های میکروگرانی جهت شناسایی حفریات معدنی" مجله مهندسی منابع معدنی و هی دروکربوری دانشگاه بین المللی قزوی، پذیرفته شده.
- غلامیان ف. و آقاجانی ح.، (۱۳۹۲) "تعیین عمق و مرز ساختارهای زیرسطحی به روش سیگنال تحلیلی و اویلر دیکانولوشن"، اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی، دانشگاه شاهرود.
- غلامیان ف.، آقاجانی ح. و میرزایی م.، (۱۳۹۳) "مدل سازی معکوس سه بعدی داده های میکروگرانی جهت شناسایی تونل زیرسطحی"، هجدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- غلامیان ف.، آقاجانی ح. و میرزایی م.، (۱۳۹۳) "شناسایی لایه زغال سنگ با استفاده از تفسیر داده های میکروگرانی"، هفتمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه دامغان.

فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ روش گرانی سنجی	۲
۳-۱ شناسایی حفره‌ها (کارستی)، چاله‌ها و تونل‌ها	۵
۴-۱ سوابق مطالعات انجام شده	۶
۵-۱ ضرورت انجام پایان‌نامه	۸
۶-۱ هدف از انجام پایان‌نامه و روش تحقیق	۸
۷-۱ ساختار پایان‌نامه	۹
۲- فصل دوم: مبانی روش گرانی سنجی، پردازش و وارون‌سازی داده‌ها	۱۱
۱-۲ مقدمه	۱۲
۲-۲ شتاب جاذبه	۱۲
۳-۲ تغییرات جاذبه در سطح زمین	۱۴
۱-۳-۲ عرض جغرافیایی نقاط	۱۴
۲-۳-۲ اختلاف ارتفاع بین ایستگاه‌های اندازه‌گیری و سطح مبناء	۱۴
۳-۳-۲ اثر جذر و مد	۱۵
۴-۳-۲ عوامل توپوگرافی	۱۵
۵-۳-۲ تغییرات در ساختارهای زیرسطحی و زمین‌شناسی	۱۵
۴-۲ مراحل کاربرد روشگرانی سنجی در اکتشافات ژئوفیزیکی	۱۶
۱-۴-۲ مرحله برنامه‌ریزی	۱۶
۲-۴-۲ اندازه‌گیری صحرائی	۱۶
۳-۴-۲ پردازش داده‌ها	۱۶

- ۲-۴-۴ تفسیر مدل فیزیکی به مفهوم زمین‌شناسی..... ۱۷
- ۲-۵-۵ پردازش داده‌های میدان پتانسیل..... ۱۷
- ۲-۵-۱ تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و باقیمانده..... ۱۹
- ۲-۵-۲ نقشه‌ی روند سطحی..... ۲۰
- ۲-۵-۳ روش گسترش میدان به سمت بالا (ادامه فراسو)..... ۲۱
- ۲-۵-۴ تخمین گسترش افقی (سطحی) و عمقی بی‌هنجاری‌ها..... ۲۳
- أ- فیلتر مشتق قائم..... ۲۳
- ب- محاسبه فیلتر مشتق قائم..... ۲۳
- ج- سیگنال تحلیلی..... ۲۴
- د- تخمین عمق به روش اویلر دیکانولوشن..... ۲۵
- ه- انتخاب ابعاد پنجره..... ۲۸
- و- انتخاب شاخص ساختاری..... ۳۰
- ۲-۶-۶ مقدمه‌ای بر مسائل وارون و مستقیم در ژئوفیزیک..... ۳۱
- ۲-۷-۷ فرمول بندی مسائل وارون..... ۳۲
- ۲-۸-۸ پتانسیل گرانشی اساس مسائل وارون گرانی‌سنجی..... ۳۳
- ۲-۹-۹ مسائل وارون خطی..... ۳۵
- ۲-۱۰-۱۰ مسائل وارون گسسته خطی..... ۳۶
- ۲-۱۱-۱۱ تخمین‌های اندازه بردار خطا..... ۳۷
- ۲-۱۲-۱۲ معیارهای اندازه‌گیری‌های طول..... ۳۹
- ۲-۱۳-۱۳ راه حل کمترین مربعات برای مسائل وارون خطی..... ۴۰
- ۲-۱۴-۱۴ وارون‌سازی سه‌بعدی خطی به روش کاماچو..... ۴۱
- ۳- فصل سوم: مدل‌سازی مصنوعی جهت بررسی توانمندی روش..... ۴۹
- ۳-۱-۱ مقدمه..... ۵۰
- ۳-۲-۲ تولید مدل مصنوعی..... ۵۰
- ۳-۳-۳ اعمال نوفه دو درصد به داده‌های مدل مصنوعی..... ۵۲
- ۳-۴-۴ وارون‌سازی داده‌های مدل مصنوعی..... ۵۳

۵۳	..... ۱-۴-۳ مدل سازی با نوفه دو درصد
۵۵	..... ۵-۳ نتایج مدل سازی
	۴- فصل چهارم: برداشت، پردازش و مدل سازی داده های گرانی تونل معدنی دهملا-شاهرود و سوله
۵۷	..... زیرسطحی نوادا آمریکا
۵۸	..... ۱-۴-۱ محدوده مورد مطالعه
۵۹	..... ۲-۴-۲ زمین شناسی منطقه
۶۴	..... ۳-۴-۳ برداشت داده های گرانی منطقه مورد مطالعه
۶۵	..... ۱-۳-۴ تهیه مختصات ایستگاه ها و نقشه توپوگرافی منطقه
۶۶	..... ۲-۳-۴ کالیبره کردن دستگاه گرانی سنجی
۶۷	..... ۳-۳-۴ قرائت ایستگاه ها
۶۷	..... ۴-۴-۴ تصحیح داده های گرانی سنجی
۷۰	..... ۱-۴-۴ تصحیح رانه دستگاه
۷۱	..... ۲-۴-۴ شتاب گرانی ناشی از بیضوی مرجع (گرانی نرمال)
۷۲	..... ۳-۴-۴ تصحیح عرض جغرافیایی
۷۳	..... ۴-۴-۴ تصحیح ارتفاعی (هوای آزاد + بوگه)
۷۴	..... ز- تصحیح هوای آزاد
۷۶	..... ح- تصحیح بوگه
۷۷	..... ۵-۴-۴ تصحیح توپوگرافی
۸۰	..... ۶-۴-۴ نقشه بی هنجاری بوگه
۸۰	..... ۵-۴-۵ پردازش و تفسیر داده های گرانی منطقه دهملا
۸۰	..... ۱-۵-۴ مقدمه
۸۱	..... ۲-۵-۴ روند سطحی
۸۳	..... ۳-۵-۴ روش گسترش میدان گرانی به سمت بالا
۸۵	..... ۴-۵-۴ فیلتر مشتق قائم
۸۵	..... ۵-۵-۴ فیلتر سیگنال تحلیلی

- ۴-۵-۶ تخمین عمق با استفاده از روش اویلر دیکانولوشن ۸۶
- ۴-۶ مدل سازی وارون داده های تونل معدنی دهملا ۸۷
- ۴-۷ مطالعه موردی داده های گرانی سوله زیر سطحی نوادا ۹۲
- ۴-۷-۱ فیلترهای مشتق قائم و سیگنال تحلیلی ۹۵
- ۴-۷-۲ تخمین عمق به روش اویلر دیکانولوشن ۹۵
- ۴-۸ مدل سازی وارون سوله زیر سطحی ۹۶
- ۵- فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات ۹۹
- ۵-۱ جمع بندی و نتایج ۱۰۰
- ۵-۲ پیشنهادات ۱۰۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ارزیابی روش‌های مختلف ژئوفیزیکی در شناسایی ساختارهای کارستی ۴
- شکل ۱-۲: نیروی گرانش بین دو جرم M1 و M2 ۱۳
- شکل ۲-۲: بردار نیروی گرانی حاصل از برآیند بردار نیروهای گریز از مرکز و گرانش زمین ۱۴
- شکل ۳-۲: نحوه‌ی حرکت پنجره روی داده‌های شبکه ۲۹
- شکل ۴-۲: فرم کلی مسایل مستقیم و وارون ۳۱
- شکل ۵-۲: برازش کمترین مربعات یک خط راست ۳۸
- شکل ۶-۲: خط راست برازش شده ۴۰
- شکل ۷-۲: نمایی از سلول‌بندی و محاسبه اثر گرانی هر سلول در سطح زمین ۴۲
- شکل ۱-۳: مقطع افقی و قائم از دو منشور مدل مصنوعی ۵۱
- شکل ۲-۳: نمای سه‌بعدی از دو منشور مدل مصنوعی ۵۱
- شکل ۳-۳: نقشه بوگه کامل مدل مصنوعی دو منشور ۵۲
- شکل ۴-۳: نقشه بوگه کامل مدل مصنوعی همراه با نوفه دو درصد ۵۳
- شکل ۵-۳: نتیجه مدل‌سازی داده‌های مصنوعی با نوفه دو درصد ۵۴
- شکل ۶-۳: نتیجه مدل‌سازی داده‌های مصنوعی با نوفه دو درصد ۵۴
- شکل ۱-۴: موقعیت جغرافیایی محدوده معدن زغال‌سنگ دهملا و راه‌های دسترسی به منطقه ۵۸
- شکل ۲-۴: نمایی از اردوگاه آموزشی تفریحی دهملا ۵۸
- شکل ۳-۴: تونل معدنی آموزشی زغال‌سنگ (در سمت چپ محدوده) - دید به سمت غرب ۵۹
- شکل ۴-۴: تونل معدنی آموزشی زغال‌سنگ (محدوده مورد نظر) - دید به سمت شمال غرب ۵۹
- شکل ۵-۴: توالی لایه‌های ماسه‌سنگ، شیل و زغال‌سنگ - دید به سمت شرق محدوده ۶۰
- شکل ۶-۴: نمایی از رگه زغال‌سنگ در انتهای تونل دنباله لایه ۶۱
- شکل ۷-۴: نمایی از دویل‌های حفاری شده در سطح محدوده دهملا - دید به سمت جنوب ۶۲
- شکل ۸-۴: نقشه موقعیت تونل‌های معدنی دهملا، دویل‌ها، ترانشه‌ها، لایه‌های زغال و توپوگرافی محدوده ۶۳
- شکل ۹-۴: برداشت داده‌های توپوگرافی و مختصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری ۶۵

- شکل ۴-۱۰: نقشه توپوگرافی محدوده برداشت و ایستگاه اندازه‌گیری ۶۶
- شکل ۴-۱۱: نقشه توپوگرافی زون نزدیک ۶۶
- شکل ۴-۱۲: قرائت ایستگاه‌های گرانی در منطقه برداشت ۶۷
- شکل ۴-۱۳: فلوجارت تصحیح مقادیر گرانی مشاهده‌ای در ایستگاه اندازه‌گیری ۶۹
- شکل ۴-۱۴: برنامه گرافیکی تصحیح داده‌های گرانی سنجی در محیط متلب ۷۰
- شکل ۴-۱۵: تصحیح هوای آزاد ۷۵
- شکل ۴-۱۶: نقشه بی‌هنجاری هوای آزاد محدوده تونل دهملا ۷۵
- شکل ۴-۱۷: تصحیح تخته بوگه ۷۶
- شکل ۴-۱۸: نقشه بی‌هنجاری بوگه ساده محدوده دهملا ۷۷
- شکل ۴-۱۹: اثر میدان جاذبه توپوگرافی اطراف یک ایستگاه روی مقدار گرانی اندازه‌گیری شده ۷۸
- شکل ۴-۲۰: نقشه توپوگرافی زون نزدیک منطقه دهملا - شاهرود ۷۹
- شکل ۴-۲۱: نقشه توپوگرافی زون دور ۷۹
- شکل ۴-۲۲: نقشه بی‌هنجاری بوگه کامل - محدودی معدنی دهملا ۸۰
- شکل ۴-۲۳: نقشه بی‌هنجاری باقیمانده درجه ۲ ۸۲
- شکل ۴-۲۴: نقشه بی‌هنجاری باقیمانده درجه ۳ ۸۲
- شکل ۴-۲۵: نقشه فیلتر ادامه فراسو در ارتفاع‌های ۴ الی ۱۴ متری با فاصله ۲ متر ۸۴
- شکل ۴-۲۶: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم بر روی داده‌های گرانی منطقه دهملا ۸۵
- شکل ۴-۲۷: نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های گرانی منطقه دهملا ۸۶
- شکل ۴-۲۸: تخمین عمق با استفاده از روش اویلر ۸۷
- شکل ۴-۲۹: نتایج مدل‌سازی وارون تونل معدنی دهملا ۸۸
- شکل ۴-۳۰: نتایج مدل‌سازی وارون تونل معدنی دهملا ۸۸
- شکل ۴-۳۱: نتایج مدل‌سازی وارون تونل معدنی دهملا ۸۹
- شکل ۴-۳۲: مدل سه‌بعدی تونل معدنی دهملا؛ نما از بالا (محدود شده به دامنه چگالی ۰ تا ۲۰۰۰-) ۹۱
- شکل ۴-۳۳: مدل سه‌بعدی تونل معدنی دهملا (محدود شده به دامنه چگالی ۰ تا ۲۰۰۰-) ۹۱
- شکل ۴-۳۴: مدل سه‌بعدی تونل معدنی دهملا؛ راستای تونل فرعی و اصلی ۹۱

- شکل ۴-۳۵: مدل سه‌بعدی تونل معدنی ده‌ملا؛ مکان دوپیل انتهای تونل..... ۹۲
- شکل ۴-۳۶: نمایی از سوله زیرسطحی نوادا امریکا..... ۹۳
- شکل ۴-۳۷: نقشه بی‌هنجاری بوگه کامل سوله زیرسطحی منطقه نوادا..... ۹۴
- شکل ۴-۳۸: نقشه توپوگرافی محدوده سوله زیرسطحی منطقه نوادا..... ۹۴
- شکل ۴-۳۹: نقشه بی‌هنجاری محلی از درجه دوم..... ۹۴
- شکل ۴-۴۰: نقشه بی‌هنجاری محلی از درجه سوم..... ۹۴
- شکل ۴-۴۱: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم بر روی داده‌های سوله زیرسطحی نوادا..... ۹۵
- شکل ۴-۴۲: نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های سوله زیرسطحی نوادا..... ۹۵
- شکل ۴-۴۳: تخمین عمق با استفاده از روش اویلر..... ۹۶
- شکل ۴-۴۴: نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی به روش کاماچو..... ۹۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲: تعیین شاخص ساختاری معادله اوپلر برای مدل‌های ساده..... ۳۰

جدول ۱-۳: خصوصیات هندسی و فیزیکی مدل مصنوعی..... ۵۰

علائم اختصاری مورد استفاده در متن

U: مقدار پتانسیل گرانی

g: شتاب گرانی

ρ : چگالی

G: ثابت جهانی شتاب جاذبه $G = 6.672 \times 10^{-11} N.m^2/kg^2$

g_m : شتاب گرانش قائم

b_n : ضرایب لژاندر

N: تعداد داده‌ها

M: پارامترهای مدل

A: عملگر خطی

$\Psi(p, Q)$: تابع گرین

W: معرف توابع وزنی

$\Delta\rho$: اختلاف چگالی جسم بی‌هنجار و سنگ‌های اطراف آن

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

ارزیابی خطرات ناشی از فرو ریزش حفره‌ها و تونل‌ها در مناطق شهری، فرودگاه‌ها، کارخانه‌ها و معادن باعث شده است تا با شناسایی اینگونه ساختارها از بروز خسارت‌های جانی و مالی جلوگیری شود. چنین محیط‌هایی اغلب در سنگ‌های رسوبی با نفوذ آب باران و کارستی شدن آن و یا به دست بشر ساخته می‌شود. کاهش این مخاطرات می‌تواند از طریق مطالعات دقیق علوم زمین حاصل شود. بطور سنتی، مهندسين از تکنیک‌های جستجوی مخرب در سرتاسر یک شبکه به طور منظم و یا تصادفی استفاده می‌کنند. اینگونه کاوش‌ها به دلیل عدم اطمینان از شناسایی تمامی حفره‌ها، به خودی خود کافی نبوده و تعداد زیاد جستجوها و حفر گمانه (طی زمانی طولانی و کند)، باعث بالا رفتن هزینه‌ها گشته و در نهایت هیچ تصویری جانبی کاملی از بخش‌های زیر این سطح زمین ارائه نمی‌دهد. این چنین ساختارهای نزدیک به سطح را می‌توان با دقت بسیار خوبی به روش‌های ژئوفیزیکی شناسایی نمود [De Giorgi & Leucci, 2014].

۱-۲ روش گرانی‌سنجی

موثرترین روش در تعیین ساختارهایی با تباین چگالی مناسب، استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی است. از داده‌های اندازه‌گیری شده گرانی با وضوح و دقت بالا (میکروگرانی‌سنجی)، جهت بررسی بی‌نظمی-های سنگ بستر، گسل‌ها، مناطق شکستگی، حفره‌ها، تونل‌ها، کانل‌های مدفون و غیره، به عنوان یک روش مستقل در کنار سایر روش‌های ژئوفیزیکی (مانند لرزه‌نگاری انکساری، مقاومت ویژه و یا رادار نفوذی به زمین) می‌توان استفاده نمود [Butler, 1980; Franklin et al., 1980]. از این روش می‌توان در اکتشافات مقدماتی مناطق فلات قاره که امکان دستیابی به اطلاعات زمین‌شناسی سطحی وجود ندارد، نیز استفاده نمود. همچنین در اکتشاف منابع معدنی به طور محدود و تنها برای اهدافی که دارای اختلاف چگالی قابل توجهی نسبت به سنگ‌های میزبان می‌باشند، مورد استفاده قرار می‌-

گیرد. علاوه بر کارهای اکتشافی، با این روش می‌توان در مقیاس ناحیه‌ای جهت تشخیص ناهم‌واری- های ناحیه‌ای مثل انفصال موهوروویچ، گسل‌های بزرگ و عمیق و نیز تعیین سطح دقیق ژئوئید صفر (سطح آب‌های آزاد) و یا بیضوی مرجع استفاده کرد [Heiskanen and Moritz, 1967]. در بیشتر مطالعات و بررسی‌های گرانی مقدار شتاب جاذبه واقعی اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه تغییرات جانبی این شتاب مد نظر می‌باشد؛ که تابع تغییرات چگالی سنگ‌های درون زمین می‌باشد [Dobrin and Savit, 1988]. تئوری تفسیر روش‌های میدان پتانسیل در طی مراحل مختلفی از حدود دهه ۴۰ میلادی تاکنون توسعه یافته است. این توسعه از یک سو به فرآیند اکتشاف و نیازمندی‌های اکتشافی وابسته بوده و از طرف دیگر متأثر از پیشرفت انقلابی صنایع الکترونیکی و کامپیوتری بوده است. اکتشاف به روش گرانی‌سنجی براساس قانون نیوتن بنا شده است؛ که بیان می‌کند بین دو جرمی که به فاصله مشخص از یکدیگر قرار گرفته‌اند، نیرویی حاکم خواهد بود. مقدار نیروی میان این اجرام را شتاب جاذبه خوانده می‌شود؛ که اگر یکی از اجرام زمین فرض شود، مقدار نیروی مذکور شتاب جاذبه زمین گفته می‌شود [Dobrin and Savit, 1988; Telford et al., 1991]. واحد شتاب در سیستم CGS حدود ۹۸۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است؛ که به افتخار گالیه مقدار واحد آن گال گفته می‌شود.

ژئوفیزیک زمینی		شایستگی روش با پوشش رسوبی		بدون پوشش رسوبی		پوشش رسوبی	
روش	روش اندازه گیری	محدوده ای	مسر ممتاز	زون شکسته	حفرات		نوع ضخامت
					آب- پوشده	آب- پوشده	
ژئوالکتریک	ES	+++	+	+++	+	0	+++
	ERT	++	++	+++	++	++	+++
	Mise-a-la-masse	0	+++	0	+	0	0
	SP	0	+++	0	++	0	0
الکترومغناطیس	Slingram	++	++	++	++	++	+++
	TDEM	+++	+	++	+	0	+++
	GPR	0	+	+++	+	+++	+
	CSAMT	+++	++	+++	+++	+	+++
	VLf res.- RMT	++	++	+++	+++	+	+++
لرزه نگاری	VLf EM	+++	+++	++	+++	+	+
	Tomography	+++	++	+++	++	++	++
	MASW	++	++	++	+++	++	++
میکروگرانی سنجی	Profiling or mapping	0	+	0	+	+++	0
	Profiling or mapping	0	0	0	0	0	++
مغناطیس سنجی	Profiling or mapping	0	0	0	0	0	++
	Sounding	0	0	0	0	0	+
MRS		0	0	0	0	0	0

+++ : پیشنهادی ؛ ++ : مناسب اما ناکافی ؛ + : مناسب اما محدود ؛ 0 : پیشنهاد نمی شود

شکل ۱-۱: ارزیابی روش های مختلف ژئوفیزیک در شناسایی ساختارهای کارستی [Chalikakis et al., 2011].

۱-۳ شناسایی حفره‌ها (کارستی)، چاله‌ها و تونل‌ها

دو عامل مهم در منشأ حفره‌های زیرسطحی در بسیاری از مناطق جهان، فعالیت‌های انسانی نظیر حفر تونل‌های راه و معدنی و چاه‌های آب بوده و یا به دلیل کارستی شدن همچون غارها، چاله‌ها و کانال‌های زه‌کشی زیرسطحی می‌باشد. بطور کلی حفره‌ها، چاله‌ها و تونل‌ها را می‌توان به دو دسته خالی از ماده (پر شده از هوا) و دارای ماده (بطور مثال آب) تقسیم‌بندی نمود. چگالی حفره‌های خالی بیشترین بی‌هنجاری را به دلیل تباین چگالی بالا با محیط اطراف ایجاد می‌کنند. حفره‌های پر شده از آب در حدود ۶۰ درصد از میزانی که حفره خالی باشد، تباین چگالی دارند و این مقدار برای حفره‌های پر شده از گل و لای چیزی در حدود ۴۰ درصد می‌باشد. در صورتی که این حفره‌ها در محیطی با چگالی متوسط پوسته زمین (۲/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) قرار گرفته باشند، حداقل تباین چگالی برای حفره‌های خالی ۲/۵- گرم بر سانتی‌متر مکعب، برای حفره‌های پر شده از آب ۱/۵- گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای حفره‌های پر شده از گل و لای ۱- گرم بر سانتی‌متر مکعب خواهد بود [Bishop et al., 1997]. شناسایی این ساختارها به روش میکروگرانی نیازمند سنجش بی‌هنجاری‌های منفی کوچک در مقیاس با یک زمینه گرانی بزرگ می‌باشد. برداشت داده‌ها با دقت بالا و حذف آثار توپوگرافی و نوفه‌های منطقه می‌تواند این پدیده‌ها را شناسایی نماید. تصور ساده‌ای که درباره شناسایی حفره‌ها و تونل‌های انفرادی (ساخت انسان و یا طبیعی) وجود دارد صحیح نیست. زیرا تخریب و شکستگی‌های زیاد سنگ‌های اطراف این ساختارها، بویژه در مورد تونل‌های معدنی، که تابعی از اندازه و قدرت سنگ است باعث افزایش قطر تونل یا حفره به میزان دو برابر و یا بیشتر می‌شود [Daniels, 1988]. در نتیجه اندازه موثر هدف مورد نظر، نه تنها بستگی به حجم دقیق حفره دارد، بلکه شامل تاثیر دیگری است که آن حفره بر سنگ‌های اطراف می‌گذارد. این پدیده که معمولاً هاله‌ی اثر نام دارد و باعث افزایش موثر اندازه هدف می‌شود؛ تضمین می‌کند که می‌توان حفره را بطور غیر مستقیم شناسایی کرد. البته گاهی اوقات ممکن است این اثر توسط بی‌هنجاری‌ها مختل شده و

۴-۱ سوابق مطالعات انجام شده

کاربرد روش گرانی‌سنجی در اکتشافات ساختارهای زیرسطحی نظیر حفره‌ها و تونل‌ها توسط محققین زیادی گزارش شده و روش‌های مختلفی جهت پردازش و تفسیر کمی و کیفی و مدل‌سازی این داده‌ها ارائه شده است. برخی از این روش‌ها به تخمین عمق و برخی دیگر به گستردگی و تشخیص لبه و مرزهای بی‌هنجاری تأکید داشته‌اند. از سال ۱۹۶۰ میلادی روش‌های ژئوفیزیکی بطور کل در ارزیابی مشکلات ژئوتکنیکی که عمده‌اً مربوط به شناسایی حفره‌ها، فروچاله‌ها و ساختارهای توخالی شبه کارست (تونل) دخیل بوده‌اند [Colley, 1963; Neumann, 1965; Arzi, 1975; Fajkiewicz, 1976; Blizkovsk'y, 1979; Butler, 1980 and 1984; Benderitter, 1997]. توماس و روس (۱۹۹۹) یک مطالعه مقایسه‌ای بین دوازده روش ژئوفیزیکی برای شناسایی حفرات ارائه دادند. ریباکوو و همکاران (۲۰۰۱) حفره‌های زیرسطحی را با دقت بالایی به روش میکروگرانی تعیین نمودند. برس و همکاران (۲۰۰۱) با تلفیق روش‌های میکروگرانی و رادار نفوذی به زمین، موفق به شناسایی حفره‌های کم عمق شدند. هاتیچسون و همکاران (۲۰۰۲) یک مقایسه مفید از چندین روش ژئوفیزیکی برای شناسایی حفره‌ها ارائه دادند. فاوچارد و پوترات (۲۰۰۴) یک دستورالعمل برای شناسایی حفره‌های خالی (پر شده از هوا مانند تونل) با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی تهیه و ارائه دادند. گوتیرز و همکاران (۲۰۰۸) روش‌های ژئوفیزیکی را در تشخیص فروچاله در مناطق تبخیری جهت اکتشاف کارست که توسط هوور (۲۰۰۳) پیشنهاد شده بود؛ را ارزیابی و بررسی نمودند. همچنین هر چند سال یکبار؛ موسسه استاندارد آمریکا^۱ ASTM (۲۰۰۶) راهنمای استاندارد را برای انتخاب ابزارهای ژئوفیزیکی ارائه می‌کند.

در زمینه مدل‌سازی ساختارهای زیرسطحی نیز تحقیقات بسیاری توسط پژوهشگران ارائه شده است.

^۱American Society for Testing and Materials

کاماچو و همکاران (۱۹۹۴) روش وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی را جهت شناسایی حفره‌های خالی (پر شده از هوا) ارائه دادند. تیری و همکاران (۲۰۰۵) و دبگلیا و همکاران (۲۰۰۶) با اندازه‌گیری میکروگرانی موفق به شناسایی ساختارهای کارستی در یک محیط شهری شدند. سیخون و بایکسو (۲۰۱۰) توانستند حفره‌های زیرسطحی را با اعمال داده‌های مقاوت ویژه به عنوان اطلاعات اولیه در وارون‌سازی بیزوی داده‌های میکروگرانی، شناسایی و مدل‌سازی کنند. سوو و لی (۲۰۱۰) یک روش وارون‌سازی مشترک مقید برای داده‌های گرانی سطحی و درون گمانه‌ای ارائه داده‌اند که باعث افزایش کیفیت وارون‌سازی و تعیین بهتر چگالی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی شد. شمسی‌پور و همکاران (۲۰۱۲) به منظور برآورد چگالی و خودپذیری مغناطیسی ساختارهای نزدیک به سطح، یک روش جدید وارون‌سازی مشترک تصادفی بر اساس کریجینگ با استفاده از داده‌های میدان کل مغناطیس و گرانی‌سنجی ارائه دادند. ژادونف و کوکس (۲۰۱۳) با ارائه روش وارون‌سازی مولتی‌نری که از طریق بهینه‌سازی قطعی داده‌های نوفه‌دار گرانی، که بطور صریح تضاد خواص فیزیکی بین ساختار مورد نظر و محیط در برگیرنده آن را تعیین می‌کند، توانستند تونل‌های زیرسطحی را مدل‌سازی کنند. کیس و همکاران (۲۰۱۳) به روش المان محدود سه‌بعدی داده‌های گرانی، حفره‌های زیرسطحی را شناسایی و مدل‌سازی کردند. پیوتا و بریتنبرگ (۲۰۱۵) با ارائه یک روش خلاقانه و استفاده از اسکن لیزری سقف و کف یک غار کارستی به عنوان قید اولیه برای وارون‌سازی و محاسبه چگالی آزمایشگاهی توانستند با دقت بسیار بالایی مدل این ساختار را به دست آورند.

در ایران نیز از روش مدل‌سازی وارون در تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی استفاده شده است. عابدی و همکاران (۱۳۹۰) با مدل‌سازی دوبعدی داده‌های گرانی و استفاده از روش وارون‌سازی فشرده و معیار توقف تغییر چگالی توانستند عمق بالا و پایین زغال‌های بیتومینه دهلران را تعیین کنند. مرادزاده و همکاران (۱۳۸۴) از طریق روش وارون‌سازی سه‌بعدی کمترین مربعات، تله‌های هیدروکربنی را در منطقه طبس مدل‌سازی کردند. نجاتی و همکاران (۱۳۸۳ و ۱۳۸۸) توانستند مدل‌سازی وارون دو و سه‌بعدی داده‌های گرانی‌سنجی را با استفاده از روش وارون‌سازی فشرده و داده‌های مغناطیسی با

استفاده از روش زیرفضا به خوبی انجام دهند. جهاننداری (۱۳۸۸) از روش لونبرگ-مارکوآرت^۱ برای مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی و داده‌های گرانی کاذب استفاده نموده است. اردستانی (۲۰۰۸) زون-های کارستی را با کمک وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های میکروگرانی به روش گسترش سلولی شناسایی و مدل‌سازی کرد. اردستانی (۲۰۰۹) چاله‌ها و حفرات زیرسطحی در زیر یک نیروگاه برق را با وارون-سازی سه‌بعدی داده‌های میکروگرانی به روش لست و کوبیک^۲ مدل‌سازی کرد.

۱-۵ ضرورت انجام پایان‌نامه

شناسایی دقیق موقعیت، عمق و شکل ساختارهای زیرسطحی نظیر حفرات کارستی شده، چاله‌ها و تونل‌های معدنی متروکه به صورت یک مدل سه‌بعدی، جهت اجرای عملیات عمرانی، اکتشافی و استخراج بسیار اهمیت دارد. مدل‌سازی وارون به عنوان یکی از کارآمدترین ابزارهای ژئوفیزیکی در بدست آوردن مدل‌های دو و سه بعدی ساختارهای زیرسطحی و تفسیر آنها مطرح است. موفقیت روش‌های وارون‌سازی تا حدود زیادی به نوع روش به کار برده شده در مدل‌سازی وابسته‌اند. با توجه به مرور سوابق مطالعات انجام شده در مورد مدل‌سازی ملاحظه می‌شود که همواره ارائه یک مدل صریح که بتواند مرز اینگونه ساختارها را به خوبی و بدون پخش‌شدگی ارائه نماید، مورد جستجو بوده است. به همین منظور در این مطالعه سعی شده است با استفاده از روش وارون‌سازی کاماچو^۳، مدل سه‌بعدی دو تونل معدنی متروکه و دوپیل‌های حفر شده اطراف آن تهیه و مورد تفسیر و بررسی قرار گیرد.

۱-۶ هدف از انجام پایان‌نامه و روش تحقیق

هدف از این مطالعه، بررسی روش کاماچو در وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های میکروگرانی جهت مدل-سازی ساختارهای زیرسطحی نظیر حفره‌ها و تونل‌های متروکه نزدیک به سطح می‌باشد. به همین

¹ Marquard-Levenberg

² Last and Qubic

³ Camacho

منظور، تونل‌های متروکه منطقه معدنی آموزشی دهملا-شاهرود به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب شده است. پس از برداشت صحرایی داده‌های میکروگرانی و انجام تصحیحات و پردازش‌های لازم، نقشه بوگه کامل و بی‌هنجاری محلی محاسبه خواهد شد. سپس با استفاده از کدبسته Growth2.0 در محیط فرترن، سطح زیر محدوده مورد نظر به منشورهای متوازی‌السطوح تقسیم بندی و طی یک فرآیند تکراری، مدل سه‌بعدی ساختارهای مذکور بدست خواهد آمد.

۷-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل اول این مجموعه ابتدا به طور مختصر درباره‌ی روش گرانی‌سنجی، اهمیت شناسایی حفره‌ها و تونل‌ها و مدل‌سازی آنها، پیشینه تاریخی مطالعه، ضرورت و اهداف انجام این مطالعه تشریح شده است.

با توجه به استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی و وارون‌سازی آنها، در ادامه بحث در فصل دوم، به بیان تعاریف، مفاهیم روش گرانی‌سنجی و فرمول‌بندی مساله وارون و اصول وارون‌سازی به روش کاماچو پرداخته خواهد شد. در فصل سوم به منظور بررسی کارایی روش کاماچو از مدل‌های مصنوعی استفاده شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم به شرح زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، برداشت داده‌های صحرایی و تصحیحات آنها و سپس اعمال فرآیند وارون‌سازی بر روی داده‌های واقعی پرداخته شده است. در خاتمه نتایج و پیشنهادات حاصل از مطالعه حاضر در قالب فصل پنجم ارائه گردیده است.

فصل دوم

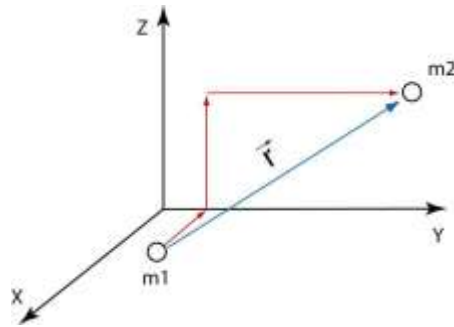
مبانی روش کرانی سنجی، پردازش و وارون سازی داده‌ها

۱-۲ مقدمه

اساس کار روش گرانی‌سنجی اندازه‌گیری تغییرات میدان گرانی حاصل از تباین چگالی بین هدف مورد نظر و سنگ میزبان می‌باشد. از قرن هفدهم تا بیستم میلادی به طور مستمر از روش گرانی جهت مطالعات زمین استفاده شده و عمده اکتشافات آن مربوط به شناسایی ساختارهای بزرگ مقیاس بوده است. در دو، سه دهه‌ی اخیر با پیشرفت تجهیزات اندازه‌گیری و توسعه برنامه‌های رایانه‌ای این روش در زمینه‌های هوایی، زمینی، دریایی و ماهواره‌ای به جهت اکتشاف منابع هیدروکربنی، معدنی و ساختارهای زمین‌شناسی، تونل‌ها و حفرات زیرسطحی استفاده می‌شود. از گرانی‌سنجی در اکتشاف منابع معدنی به طور محدود و تنها برای اهدافی که دارای اختلاف چگالی قابل توجهی نسبت به سنگ‌های میزبان می‌باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای شناسایی تونل‌ها، کانال‌های مدفون و رسوبات آبرفتی سنگ نشده که در پی‌جویی آبهای زیرزمینی اهمیت دارند، حفرات و فضاهای خالی موجود در سنگها به ویژه در سنگ آهک‌های کارستی و در آشکارسازی آثار باستانی مدفون می‌توان از این روش استفاده نمود. زیرا چگالی این رسوبات نسبت به سنگ‌های اطراف و سنگ بستر کم بوده و قابل آشکارسازی به وسیله این روش می‌باشد. با استفاده از این روش در مرحله اکتشاف مقدماتی که هیچ گونه اطلاعات قبلی موجود نیست با صرف وقت و هزینه کم، می‌توان مشخصات ساختاری منطقه را بررسی کرد [Dobrin and Savit, 1988].

۲-۲ شتاب جاذبه

نیروی گرانش با قانون نیوتن بیان می‌شود که مبنای کارهای گرانی‌سنجی است. طبق این قانون نیروی موجود بین دو ذره (شکل ۱-۲) به جرم‌های m_1 و m_2 با حاصل ضرب جرم آن‌ها نسبت مستقیم و با مجذور فاصله آن‌ها رابطه عکس دارد [Telford et al., 1991]:



شکل ۱-۲: نیروی گرانش بین دو جرم m_1 و m_2

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{r}_1 \quad (1-2)$$

که در آن \vec{F} نیروی وارد بر جرم m_1 ، \vec{r}_1 بردار واحد در راستای m_1 به m_2 ، r فاصله بین جرم‌های m_1 و m_2 و G ثابت عمومی جاذبه می‌باشد و مقدار آن برابر است با:

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot \text{s}^2 \quad (2-2)$$

طبق قانون دوم حرکت نیوتن شتاب جرم m_2 ناشی از حضور جرم m_1 از تقسیم F بر m_2 به دست می‌آید. در حالت خاص اگر m_1 را برابر با M_e یعنی جرم زمین در نظر گرفته شود، با توجه به معادله (۱-۲) اندازه شتاب جاذبه در سطح زمین برابر است با [Telford et al., 1991]:

$$g = \frac{F}{m_2} = G \frac{M_e}{R_e^2} \quad (3-2)$$

مقداری را که دستگاه‌های گرانی‌سنج نسبی اندازه‌گیری می‌کنند شتاب جاذبه زمین نمی‌باشد بلکه برآیند برداری شتاب گریز از مرکز و شتاب جاذبه زمین می‌باشد که تحت عنوان شتاب گرانی خوانده می‌شود.

۲-۳-۳ اثر جذر و مد

اجسام سطح زمین تحت تأثیر جاذبه ماه و خورشید نیز می‌باشند و موقعیت نسبی این دو کره در فضا در زمان اندازه‌گیری باعث مشاهده تغییراتی جرم و در نتیجه در شتاب جاذبه می‌شود.

۲-۳-۴ عوامل توپوگرافی

وجود عوارض توپوگرافی مانند کوه‌های مرتفع و دره‌های عمیق در نزدیکی محل اندازه‌گیری در شتاب اندازه‌گیری شده مؤثر می‌باشد. هر دو این آثار توپوگرافی در یک جهت روی مقدار گرانی اثر می‌گذارند. زیرا کشش به سمت بالا (در مورد تپه‌ها) و عدم کشش به سمت پایین (در مورد دره‌ها) هر دو باعث کاهش مقدار گرانی در نقطه اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین هر دو حالت سبب می‌شوند تا مقدار شتاب جاذبه در ایستگاه‌های گرانی، کمتر از مقدار واقعی اندازه‌گیری شود (توکلی، ۱۳۷۵).

۲-۳-۵ تغییرات در ساختارهای زیرسطحی و زمین‌شناسی

تغییرات در وزن مخصوص سنگ‌ها و یا ساختارهای نسبتاً سطحی زمین مانند حفره‌ها و تونل‌ها در محل اندازه‌گیری و یا وجود پدیده‌های زمین‌شناسی نظیر گنبد‌های نمکی، طاق‌دیس‌ها، ناودیس‌ها، گسل‌ها باعث اختلافاتی بین مقادیر گرانی قرائت شده در ایستگاه‌های مختلف می‌شوند. شتاب گرانی در نقاط فراوانی از منطقه مورد مطالعه به فاصله چند متر و یا چند کیلومتر از یکدیگر اندازه‌گیری شده و سپس نتایج حاصله برای تغییرات سایر عوامل مزاحم مانند تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه، تصحیح توپوگرافی، تصحیح جزر و مد تصحیح می‌شوند. در صورتی که هنوز اختلافی بین مقادیر تصحیح شده باقی مانده باشد، مربوط به دسته پنجم خواهد بود. مطالعه و تعبیر و تفسیر این مقادیر که بی‌هنجاری نامیده می‌شوند برای مکان‌یابی توده‌های زیرسطحی هر منطقه‌ای به کار می‌رود. شدت این بی‌هنجاری‌ها بستگی به میزان اختلاف تباین ساختار مورد نظر با محیط در برگیرنده و عمق آن‌ها دارد.

۲-۴ مراحل کاربرد روش گرانی سنجی در اکتشافات ژئوفیزیکی

به کارگیری روش‌های گرانی‌سنجی برای اکتشافات ژئوفیزیکی را می‌توان در چهار مرحله زیر خلاصه نمود:

۲-۴-۱ مرحله برنامه‌ریزی

مرحله برنامه‌ریزی شامل بررسی طیف وسیعی از ویژگی بی‌هنجاری‌ها می‌باشد. با توجه به ساختار مورد مطالعه و استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و پیش‌بینی عمقی اولیه، نوع برداشت (زمینی، هوایی و یا دریایی) و پارامترهای شبکه برداشت (طول پروفیل‌ها و فاصله بین آنها، فاصله ایستگاه اندازه‌گیری، ارتفاع پرواز و غیره)، روش‌های پردازش و تفسیر و غیره محاسبه و طراحی می‌شوند که در تمامی این مراحل باید ملاحظات هزینه و سود در نظر گرفته شود.

۲-۴-۲ اندازه‌گیری صحرائی

جمع‌آوری داده‌ها با توجه به روش مشخص شده در مرحله برنامه‌ریزی (مرحله قبل)، به طوری که مشاهدات همراه با دقت و تراکم مناسب باشند، انجام می‌شود. تراکم بالای داده‌ها منجر به افزایش هزینه می‌شود، در نتیجه لازم است با توجه به هدف مورد مطالعه و گسترش طولی و عمقی آن، حالت بهینه شبکه برداشت را در نظر گرفت.

۲-۴-۳ پردازش داده‌ها

پردازش داده‌های به دست آمده به طور کلی شامل دو مرحله است. اول کاهش (تصحیح) داده‌ها به یک شکل تفسیری با حذف تمام اثرات گرانش قابل پیش‌بینی و باقی گذاشتن تنها شتاب گرانی از منابع زیرسطحی (بی‌هنجاری) ناشناخته است. این مرحله با مقایسه داده‌های مشاهده‌ای با یک مدل نظری از شتاب گرانی در هر ایستگاه مشاهده‌ای انجام می‌شود. بخش دوم شامل تقویت بی‌هنجاری‌های مورد نظر با روابط ریاضی و آماری است به طوری که بتوان آنها را شناسایی و تجزیه و تحلیل

کرد. داده‌های برداشت شده در یک منطقه، طیفی از بی‌هنجاری‌های سطحی یا باقی‌مانده تا بی-هنجاری‌های عمیق یا ناحیه‌ای را شامل می‌گردد. بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای دارای طول موج بلند می‌باشند، در حالی که بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده دارای طول موج کوتاه هستند [Reynolds, 1997]. بنابراین با توجه اهداف مورد مطالعه لازم است این دو دسته بی‌هنجاری‌ها از یکدیگر تفکیک شوند.

۴-۴-۲ تفسیر مدل فیزیکی به مفهوم زمین‌شناسی

این بخش ممکن است تنها با یک بیان ساده در رابطه با تشخیص محل منابع بی‌هنجاری انجام شود، اما معمولاً شامل یک تفسیر کمی به شکل وارون‌سازی از منابع ایجاد کننده بی‌هنجاری‌های است. روند وارون‌سازی معمولاً نه تنها محل و پیکربندی منبع، بلکه عمق و تباین آن را در مقابل با سنگ‌های اطراف تخمین می‌زند. بطور کلی فرآیند وارون‌سازی دارای ابهام ذاتی است، اما ترکیب دیگر داده‌ها همچون زمین‌شناسی و ژئوفیزیک به تجزیه و تحلیل وارون‌سازی، طیف وسیعی از منابع احتمالی (ابهام مساله) را محدود می‌کند و یک مدل مفهومی نهایی ارائه می‌شود. در نهایت مدل فیزیکی نتیجه شده از فرآیند وارون‌سازی بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و مشاهدات منطقه به صورت یک گزارش زمین‌شناسی ارائه می‌شود. تجزیه و تحلیل خطای کار و بیان روشن هزینه‌های انجام شده بخش مهمی از یک گزارش گرانی‌سنجی است.

۵-۲ پردازش داده‌های میدان پتانسیل

یکی از مهم‌ترین مراحل در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل، تفکیک عمودی بی‌هنجاری‌های ناشی از منابع محلی و منطقه‌ای و شناسایی مرزهای افقی آن‌ها است. روش‌هایی چون فیلترهای گسترش به سمت بالا^۱ و گسترش به سمت پایین^۲ بر اساس طول موج‌های متفاوت بی‌هنجاری‌ها (توده‌های عمیق

^۱ Upward continuation

^۲ Downward continuation

طول موج بلندتری نسبت به توده‌های سطحی دارند)، تفکیک عمودی توده‌های بی‌هنجار را انجام می‌دهند اما کمکی به تفکیک جانبی آن‌ها نمی‌کنند.

در بررسی ناهمگنی جانبی توده‌های زمین‌شناسی، به ویژه موقعیت لبه‌ی آن‌ها، داده‌های میدان پتانسیل مزایای منحصر به فردی دارند. زمانی که صحبت از لبه‌ها یا مرزهای زمین‌شناسی می‌شود، به‌طور عمده منظور مرز گسل‌ها، شکستگی‌ها و یا واحدهای زمین‌شناسی و یا واحدهای سنگی با چگالی متفاوت می‌باشد (حدادیان، ۱۳۹۰).

فیلترهای متعددی برای شناسایی مرزهای افقی توده‌های بی‌هنجار وجود دارد. این فیلترها می‌توانند مرز بین واحدهای زمین‌شناسی را با وضوح بیشتری مشخص کنند و ساختمان‌های سطحی و عمیق را برجسته نمایند و یا عوارض را از زوایای مختلف نمایش دهند. روش‌ها بر اساس مکان نقاط ماکزیمم و یا صفر حاصل از به‌کارگیری مشتقات افقی یا قائم و یا ترکیبات متفاوت آن‌ها می‌باشند. اما به هر حال تفاوتی بین لبه‌های بدست آمده و لبه‌های واقعی وجود دارد که این تفاوت با شکل مرز، عمق، اندازه و دیگر فاکتورهای توده‌ی زمین‌شناسی تغییر می‌کند.

بعد از برداشت داده‌های میدان پتانسیل، نتیجه کار یک سری داده گسسته با ماهیت عددی است که در نقاط پروفیل یا شبکه برداشت (حوزه مکان) حاصل شده است. فیلترها بعد از اینکه داده‌ها گردآوری و به برخی فرمت‌های استاندارد (برای مثال بی‌هنجاری بوگه) جمع‌آوری شدند به داده‌های میدان پتانسیل اعمال می‌شوند. عمل فیلتر کردن اغلب شامل قرار دادن یک یا چند پنجره متحرک بر روی داده‌ها و آنالیز داده‌های محاط در هر پنجره است. این آنالیز شامل عملیات ریاضی پیچیده مانند تبدیل فوریه و یا متوسط‌گیری ریاضی ساده می‌باشد. بعد از اعمال فیلتر، داده‌ها به صورت یک فایل جدید ذخیره می‌شوند. امروزه به کارگیری روش‌های جدید با استفاده از کامپیوتر به علت صرفه‌جویی در زمان و سهولت در به کارگیری این روش‌ها برای حجم وسیعی از داده‌ها، رواج یافته است که می‌توان از جمله به روش‌های خودکار مانند روش اویلر دیکانولوشن اشاره کرد.

۲-۵-۱ تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و باقی‌مانده

نقشه‌های میدان‌های پتانسیل تهیه شده از برداشت‌های گرانی، مجموع اثرات توده‌هایی با دانسیته متفاوت در اعماق مختلف می‌باشند. به عبارت دیگر نتیجه برداشت به کلیه بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه مربوط می‌شود. در نقشه میدان‌های پتانسیل، تأثیرات سنگ بستر با تغییرات خطی و ملایم مشخص می‌شوند (دولتی ارده‌جانی، ۱۳۷۲)، که به آن‌ها بی‌هنجاری ناحیه‌ای گفته می‌شود. بی‌هنجاری ناحیه‌ای دارای یک فرکانس پایین و طول موج بلند است، در حالی که بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده که مربوط به اجسام زیرسطحی کم عمق می‌شوند دارای فرکانس بالا و طول موج کوتاه می‌باشند [Reynolds, 1997].

در مطالعات ناحیه‌ای گرانی به منظور واضح‌تر شدن بی‌هنجاری‌های حاصله از اشکال بزرگ مقیاس (بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای)، باید بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده (حاصله از منابع زیرسطحی با گسترش جانبی محدود) را از روی بی‌هنجاری‌های مشاهده حذف نمود (کلاگری، ۱۳۷۱). برعکس، در کارهای اکتشافی گرانی و بزرگ مقیاس معمولاً بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای را به منظور خوب نمایان شدن بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده از روی بی‌هنجاری‌های مشاهده حذف می‌نمایند.

در نقشه‌های میدان‌های پتانسیل تأثیرات توده‌های عمیق محدوده وسیعی را در نقشه بی‌هنجاری در برگرفته و برعکس تأثیرات سطحی مناطق کوچکی را شامل می‌شوند. بنابراین مقادیر بی‌هنجاری باقی‌مانده طبق رابطه زیر بیان خواهد شد.

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{reg} \quad (۴-۲)$$

که در آن gres بی‌هنجاری باقی‌مانده، Δg بی‌هنجاری میدان گرانی و greg بی‌هنجاری ناحیه‌ای می‌باشد. تخمین درست و حذف میدان ناحیه‌ای از داده‌های مشاهده‌ای، میدان باقی‌مانده تولید شده که به منابع هدف مربوط می‌شود، را نتیجه می‌دهد. در اغلب کارهای اکتشافی تفسیر و مدل‌سازی عددی برای داده‌های میدان باقی‌مانده انجام می‌شود و اعتبار تفسیر به درجه تفکیک بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده و ناحیه‌ای بستگی دارد.

در این پایان‌نامه برای تفکیک بی‌هنجاری‌های گرانی‌سنجی منطقه معدنی دهملا، فیلترهای روند سطحی و گسترش به سمت بالا با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت^۱ روی داده‌ها اعمال شد. اگر چه تفکیک بی‌هنجاری‌ها با استفاده از نرم‌افزار صورت پذیرفته است اما برای درک چگونگی و عملکرد آن‌ها، تئوری هر یک از آن‌ها لازم و مفسر باید کاملاً آگاهی داشته باشد.

۲-۵-۲ نقشه‌ی روند سطحی

یکی از انعطاف‌پذیرترین تکنیک‌های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای، روش روندسطحی می‌باشد. در این روش میدان ناحیه‌ای از مقادیر مشاهده شده بوسیله روش حداقل مربعات تقریب زده می‌شود [Hinze, 1990]. این روش بر اساس محاسبه سطحی (به روش ریاضی) استوار است که بهترین تطابق را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای داشته باشد. در حالت کلی معادله سطح مذکور برای حالت دو بعدی به شرح زیر است [Dobrin and Savit, 1988]:

$$T(x, y) = A_{00} + A_{01}x + A_{01}y + A_{11}xy + A_{20}x^2 + A_{21}x^2y + \dots + A_{pq}x^p y^q \quad (۵-۲)$$

که در آن $T(x, y)$ مقدار بی‌هنجاری ناحیه‌ای، A_{ij} ضرایب سطح مذکور، x و y مختصات نقاط برداشت شده می‌باشد. بعد از عبور سطح فوق‌الذکر بر داده‌های مشاهده شده، بی‌هنجاری باقی‌مانده به صورت زیر محاسبه می‌شود [Dobrin and Savit, 1988]:

$$R_i = G_i - T_i \quad (۶-۲)$$

که در آن G_i اطلاعات مشاهده‌ای، T_i مقدار گرانی محاسبه‌ای براساس رابطه (۵-۲) به عنوان اثر ناحیه‌ای و R_i بی‌هنجاری باقی‌مانده می‌باشند. برای انجام این روش مربع تفاضل اطلاعات مشاهده شده و اطلاعات سطح انتخابی با استفاده از روش حداقل مربعات کمینه می‌گردد تا سطح مناسب جهت محاسبه اثرات ناحیه‌ای به دست آید.

درجه روند سطحی به پیچیدگی زمین‌شناسی ناحیه‌ای بستگی دارد [Dobrin and Savit, 1988]. از

¹ Geosoft

درجه‌های بیشتر روند سطحی برای حالت‌های پیچیده‌تر استفاده می‌شود. هرچه درجه روند بیشتر باشد بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده کوچک‌تر و برجسته‌تر می‌شوند و هم‌پوشانی بین مقادیر سطح مذبور و مشاهده‌ای بیشتر خواهد شد. بنابراین مقادیر باقی‌مانده به سمت صفر میل خواهند نمود. در این حالت تفکیک اطلاعات به دو مؤلفه باقی‌مانده و ناحیه‌ای مفهومی نخواهد داشت و به این ترتیب هدف اصلی ما نادیده گرفته می‌شود (دولتی ارده‌جانی، ۱۳۷۵).

۲-۵-۳ روش گسترش میدان به سمت بالا (ادامه فراسو)

روش گسترش به سمت بالای داده‌های میدان پتانسیل در سطح وسیعی در ژئوفیزیک استفاده می‌شود. این روش به عنوان مثال برای افزایش و آشکارسازی پاسخ‌های منابع عمیق‌تر در جایی که منابع کم عمق‌تر نیز موجودند، به کار برده می‌شوند [Reynolds, 1997].

در این روش داده‌های میدان پتانسیل از یک سطح مبنا به طریق ریاضی بر روی سطوح ترازوی در بالای سطح مبنای اصلی تصویر می‌شوند. بدین ترتیب تأثیرات سطحی حذف شده و تأثیرات عمیق به وضوح مشخص می‌شوند. در واقع این روش بی‌هنجاری‌های با طول موج کوتاه‌تر را حذف کرده و دامنه بی‌هنجاری‌ها را تضعیف و نویز را کاهش می‌دهد. بنابراین، این روش مانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند [Reynolds, 1997]. گسترش داده‌های گرانی به سطوح بالاتر در مقایسه با روش گسترش به سمت پایین، افزایش نویز ندارد. برای این تبدیلات از رابطه زیر که به انتگرال فراسو معروف است، استفاده می‌شود [Blakely, 1995].

$$U(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x', y', z_0) dx dy}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + \Delta z^2]^{3/2}} \quad (7-2)$$

با در نظر گرفتن رابطه کانولوشن،

$$f * g = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) g(x - x') dx \quad (8-2)$$

رابطه (۷-۲) را می‌توان به صورت آتی بازنویسی نمود.

$$U(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x', y', z_0) \psi_n(x - x', y - y', \Delta z) dx' dy' \quad (9-2)$$

که در آن ψ_n و Γ به ترتیب از رابطه‌های زیر قابل محاسبه است.

$$\psi_n = \frac{\Delta z}{2\pi} \frac{1}{(x^2 + y^2 + \Delta z^2)^{3/2}} = \frac{-1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial \Delta z} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (10-2)$$

$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \quad (11-2)$$

با انتقال رابطه (9-2) به حوزه فرکانس می‌توان نوشت:

$$F[U_n] = F[U]F[\psi_n] \quad (12-2)$$

$$F[\psi_n] = \frac{-1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial \Delta z} F\left(\frac{1}{r}\right) = -\frac{\partial}{\partial \Delta z} \frac{e^{-|k|\Delta z}}{|k|} = e^{-|k|\Delta z} \quad (13-2)$$

که در آن جمله‌ی $e^{-|k|\Delta z}$ را فیلتر ادامه فراسو می‌گویند. حال با گرفتن فوریه معکوس، می‌توان U_n را به دست آورد.

$$U_n = F^{-1}(F[U_n]) \quad (14-2)$$

به این ترتیب می‌توان مراحل انجام تبدیل میدان گرانی با استفاده از فیلتر گسترش میدان به سمت بالا را به شرح زیر خلاصه نمود:

۱- تبدیل فوریه داده‌ها و انتقال آنها به حوزه فرکانس.

۲- ضرب نتیجه مرحله یک در عبارت $e^{-|k|\Delta z}$ که در آن Δz ارتفاع گسترش به متر و k عدد موج است.

۳- برگرداندن نتایج مرحله دو به حوزه مکان به وسیله تبدیل فوریه معکوس.

در صورتی که مقدار Δz در این رابطه مثبت باشد گسترش به سمت بالا و در صورتی که مقدار Δz منفی باشد گسترش به سمت پایین نامیده می‌شود.

با توجه به هدف مساله که مدل‌سازی ساختارهای زیرسطحی می‌باشد، تعیین و تشخیص گستردگی افقی (سطحی) و نیز عمقی توده‌های بی‌هنجار نقش موثری دارد. بنابراین پس از تفکیک بی‌هنجاری باقیمانده از ناحیه‌ای، از روش‌های مختلفی مانند فیلتر گرادیان قائم، سیگنال تحلیلی و روش اویلر استفاده شده است که در ادامه به اختصار توضیح داده می‌شود.

۲-۵-۴ تخمین گسترش افقی (سطحی) و عمقی بی‌هنجاری‌ها

أ- فیلتر مشتق قائم

یکی از پرکاربردترین فیلترهای مورد استفاده در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل، فیلترهای مشتق است و نقش آن‌ها در جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و باقی‌مانده و تخمین مرز است [Verduzco et al., 2004]. اندازه مشتق قائم در محل لبه‌های توده‌های زیرسطحی صفر است و از این خاصیت برای تخمین مرز این ساختارها استفاده می‌شود. فیلتر مشتق قائم با افزایش مرتبه مشتق مرزها و بی‌هنجاری‌ها را برجسته‌تر نشان می‌دهد؛ ولی چون در گروه فیلترهای بالاگذر جای می‌گیرد، همراه با بی‌هنجاری‌ها نوفه‌های موجود در نقشه‌ها نیز برجسته می‌شود. به همین دلیل معمولاً از مشتقات مرتبه اول و دوم بیشتر استفاده می‌شود.

ب- محاسبه فیلتر مشتق قائم

اگر تابع $g(x, y)$ بیانگر داده‌های میدان پتانسیل گرانی باشد، آنگاه با استفاده از خواص تابع لاپلاس می‌توان مشتق قائم داده‌های میدان پتانسی گرانی را محاسبه کرد. بر طبق این تئوری اگر $g(x, y)$ یک میدان پتانسیل باشد؛ آنگاه $\nabla^2 g = 0$. بنابراین می‌توان نوشت [Verduzco et al., 2004]:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right) \quad (15-2)$$

به علاوه هنگامی که داده‌ها در یک سطح افقی برداشت شده باشند، می‌توان تابع لاپلاس را به حوزه فوریه منتقل و سپس مشتق قائم مرتبه n ام داده‌های میدان پتانسیل را نیز محاسبه کرد که هر مقدار

حقیقی می تواند باشد.

$$F\left[\left(\frac{\partial^n \varphi}{\partial x^n}\right)\right] = |k|^n F[\varphi] \quad (16-2)$$

در این رابطه $k = 2\pi/\lambda$ عدد موج، λ طول موج و F بیانگر تبدیل فوری می باشد.

ج- سیگنال تحلیلی

سیگنال تحلیلی یا گرادیان کامل به صورت ترکیب مشتقات افقی و قائم داده‌های میدان پتانسیل تعریف می‌شود. ماکزیمم مقدار سیگنال تحلیلی بر روی لبه‌های توده قرار می‌گیرد. یکی از نکات این روش این است که مشتقات افقی و قائم یک تابع پتانسیل، تبدیل هیلبرت یکدیگر هستند. تبدیل هیلبرت دامنه تابع ورودی را بدون تغییر ولی فاز آن را به اندازه ۹۰ درجه تغییر می‌دهد. در نتیجه تبدیل هیلبرت مشتق افقی داده‌های میدان پتانسیل، مشتق قائم داده‌ها را ارائه می‌دهد [Nabighian, 1972].

سیگنال تحلیلی تابع $g(x)$ کمیتی مختلط است و در حالت دو بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود [Li, 2006]:

$$A(x) = g(x) - iH[g(x)] \quad (17-2)$$

که در آن $A(x)$ سیگنال تحلیلی و $H[g(x)]$ تبدیل هیلبرت تابع $g(x)$ است. تبدیل هیلبرت تابع $g(x)$ و معکوس آن که در محاسبات مربوط به سیگنال تحلیلی نقش اساسی دارد، به صورت زیر تعریف می‌شوند [Blakely, 1995]:

$$F_1(x) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(x')}{x-x'} dx' \quad (18-2)$$

$$g(x') = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F_1(x)}{x'-x} dx \quad (19-2)$$

تبدیل هیلبرت $g(x)$ مشابه کانولوشن $g(x)$ با تابع $-1/\pi x$ است. بنابراین تبدیل هیلبرت دارای تبدیل فوری‌ای یک بعدی است که از ضرب تبدیل فوری $g(x)$ در تبدیل فوری $-1/\pi x$ محاسبه می‌شود

[Blakely, 1995]:

$$F[F_1] = i \operatorname{sgn}(k) F[g] \quad (20-2)$$

$$\operatorname{sgn}(k) = \begin{cases} 1 & \text{for } k > 0 \\ 0 & \text{for } k = 0 \\ -1 & \text{for } k < 0 \end{cases} \quad (21-2)$$

$$F(a) = F(g)[1 + \operatorname{sgn}(k)] \quad (22-2)$$

در این رابطه $F(a)$ تبدیل فوریه سیگنال تحلیلی و $F(g)$ تبدیل فوریه تابع $g(x)$ می باشد. از رابطه (22-2) نتیجه گیری می شود که تبدیل هیلبرت تأثیری بر روی دامنه $g(x)$ ندارد، اما فاز این تابع را اگر $k > 0$ باشد، به اندازه $\pi/2$ و در صورتی که $k < 0$ باشد، به اندازه $-\pi/2$ تغییر می دهد. با توجه به مطالب بالا سیگنال تحلیلی تابع به دو روش قابل محاسبه است:

الف) محاسبه تبدیل هیلبرت تابع و ترکیب با تابع مطابق با رابطه (2-17).

ب) محاسبه تبدیل فوریه تابع و سپس به ازاء $k > 0$ تبدیل فوریه تابع دو برابر، به ازاء $k < 0$ تبدیل فوریه مساوی با صفر و به ازای $k = 0$ بدون تغییر گذاشته می شود و در نهایت عکس تبدیل فوریه نتایج محاسبه می شود [Blakely, 1995].

مقادیر بیشینه سیگنال تحلیلی نسبت به عمق بسیار حساس می باشد و تنها زمانی بر روی مرزهای چشمه بی هنجار قرار می گیرد که عمق آن کم باشد و هرچه عمق جسم بی هنجار بیشتر می شود از قدرت تفکیک سیگنال تحلیلی کاسته می شود.

د- تخمین عمق به روش اویلر دیکانولوشن

مهم ترین خصوصیتی که در بسیاری از کارهای مهندسی و اکتشافی نقشی اساسی دارد، عمق ناهنجاری ها است، تا جایی که در بعضی از کاوش ها، عمق بی هنجاری تنها پارامتری است که در تفسیر مورد توجه قرار می گیرد. به همین دلیل، روش های بسیاری برای برآورد عمق بی هنجاری های میدان

پتانسل ارائه شده است. بیشتر این روش‌ها هم برای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و هم برای بی-هنجاری‌های گرانی، قابل قبول هستند.

یکی از این روش‌ها که در تخمین عمق اجسام بی‌هنجار مورد استفاده زیادی قرار می‌گیرد، روش اویلر دیکانولوشن است که یک روش تفسیر خودکار و سریع برای بررسی داده‌های میدان پتانسیل است. روش اویلر دیکانولوشن به اطلاعات اولیه درباره‌ی بردار مغناطیس‌شدگی و چگالی چشمه‌های گرانی، نیاز ندارد و مخصوص مدل‌های ویژه‌ی هم نیست؛ بنابراین در تفسیر داده‌های مغناطیسی و گرانی به کار می‌رود. استفاده از معادله‌ی اویلر برای تخمین عمق، ابتدا توسط هود^۱ (۱۹۶۳) معرفی شد و سپس به وسیله‌ی تامپسون^۲ (۱۹۸۲)، رید^۳ (۱۹۹۰) و دیگران توسعه یافت و اویلر دیکانولوشن نام گرفت. اساس این روش بر مبنای معادلات دیفرانسیل جزئی اویلر بنا شده و تنها برای معادلات همگن، معتبر است [FitzGerald et al., 2004]. تابع $g(v)$ با متغیرهای (v_1, v_2, v_3, \dots) زمانی همگن از درجه‌ی n است، که در آن شرط زیر صادق باشد:

$$g(tV) = t^n g(V) \quad (23-2)$$

که در آن n ، یک عدد حقیقی است. اگر تابع g نسبت به v مشتق پذیر باشد، آنگاه می‌توان نوشت:

$$v \nabla_v g(V) = n g(V) \quad (24-2)$$

رابطه‌ی بالا معادله اویلر نامیده می‌شود و تابع g به صورت $g(x, y, z)$ در نظر گرفته می‌شود، در

نتیجه می‌توان روابط (۲۳-۲) و (۲۴-۲) را بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$g(tx, ty, tz) = t^n g(x, y, z) \quad (25-2)$$

¹ Hood

² Thompson

³ Reid

$$x \frac{\partial g}{\partial x} + y \frac{\partial g}{\partial y} + z \frac{\partial g}{\partial z} = ng \quad (26-2)$$

اثر گرانی یا مغناطیسی اشکال مختلف هندسی به صورت کلی زیر قابل بیان است:

$$g = \frac{a}{r^N} \quad (27-2)$$

از این رابطه، نتیجه گرفته می‌شود که تابع میدان گرانی و مغناطیسی یک تابع همگن از درجهی N (-) هستند. با توجه به شرایط هندسی چشمه‌ی پتانسیل، می‌توان N را تغییر داد.

تامپسون (۱۹۸۲) نشان داد که می‌توان معادله‌ی اوپلر را به صورت رابطه‌ی زیر نوشت:

$$(x - x_0) \frac{\partial g}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial g}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial g}{\partial z} = N(B - g) \quad (28-2)$$

که در آن (x_0, y_0, z_0) موقعیت چشمه‌ی پتانسیل و (x, y, z) مختصات نقطه‌ای است که چشمه‌ی پتانسیل در آن باعث ایجاد بی‌هنجاری میدان کل g شده است. میدان کل را می‌توان به صورت مجموع یک میدان ناحیه‌ای (زمینه، سطح پایه‌ی بی‌هنجاری) و میدان مربوط به چشمه‌ی پتانسیل نشان داد [Durrheim and Cooper, 1998]. میدان ناحیه‌ای در رابطه‌ی (۲۸-۲) با B نشان داده شده و به جمله‌ی متعادل کننده معروف است.

$$x_0 \frac{\partial g}{\partial x} + y_0 \frac{\partial g}{\partial y} + z_0 \frac{\partial g}{\partial z} + NB = x \frac{\partial g}{\partial x} + y \frac{\partial g}{\partial y} + z \frac{\partial g}{\partial z} + Ng \quad (29-2)$$

$$g(x) = A(x) + B(x) \quad (30-2)$$

مطابق روابط (۲۸-۲) و (۲۹-۲) می‌توان نوشت که هرگاه در معادلات، جمله‌ی میدان ناحیه‌ای وجود داشته باشد، g مربوط به میدان کل است. در حالی که وقتی میدان ناحیه‌ای، صفر باشد؛ g مربوط به میدان تولید شده توسط چشمه است.

پارامتر N که به طبیعت و هندسه‌ی چشمه‌ی پتانسیل وابسته است، شاخص ساختاری (SI) نامیده می‌شود. شاخص ساختاری، هندسه‌ی چشمه، شکل، اندازه و موقعیت آن را در بر می‌گیرد. رید

(۱۹۹۰) شاخص ساختاری را نرخ کاهش میدان پتانسیل نسبت به افزایش فاصله از چشمه‌ی سبب شونده، تعریف کرده است. تامپسون (۱۹۸۲)، نرخ کاهش را متناسب با $1/r_N$ می‌داند که در آن r ، فاصله‌ی بین نقطه‌ی مرزی چشمه و نقطه‌ی مشاهده است.

در معادله‌ی (۲-۲۸) موقعیت چشمه (x_0, y_0, z_0) و مقدار میدان ناحیه‌ای (B) مجهول است. از آنجا که گرادیان‌های میدان کل (به خصوص در درجات بالا) اندازه‌گیری نمی‌شوند، آنها را به روش‌های مختلف عددی محاسبه می‌کنند. از این روش‌ها می‌توان به فرمول پنج نقطه‌ای مشتق لاگرانژ برای محاسبه‌ی گرادیان افقی و تبدیل هیلبرت برای محاسبه‌ی گرادیان قائم اشاره کرد [Cooper, 2006].

برای تعیین چهار مجهول B و x_0, y_0, z_0 ابتدا یک پنجره با پهنا‌ی مناسب انتخاب می‌شود. پنجره‌ی مذکور روی داده‌های دوبعدی یا سه بعدی به حرکت در می‌آید و در هر پنجره، معادله‌ی اوپلر با استفاده از داده‌های درون پنجره حل می‌شود. اگر فرض شود در هر پنجره، n داده وجود دارد، می‌توان رابطه (۲-۲۹) را در هر پنجره به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_1} & \frac{\partial g}{\partial y_1} & \frac{\partial g}{\partial z_1} & N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g}{\partial x_n} & \frac{\partial g}{\partial y_n} & \frac{\partial g}{\partial z_n} & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \frac{\partial g}{\partial x_1} + y_1 \frac{\partial g}{\partial y_1} + z_1 \frac{\partial g}{\partial z_1} + Ng_1 \\ \vdots \\ x_n \frac{\partial g}{\partial x_n} + y_n \frac{\partial g}{\partial y_n} + z_n \frac{\partial g}{\partial z_n} + Ng_1 \end{bmatrix} \quad (۳۱-۲)$$

معادله‌ی ماتریسی بالا در هر پنجره به روش کمترین مربعات حل می‌شود و مقادیر مجهول به دست می‌آیند. در واقع بدین ترتیب اوپلر دیکانولوشن به صورت یک وارون‌سازی خطی، اجرا می‌شود.

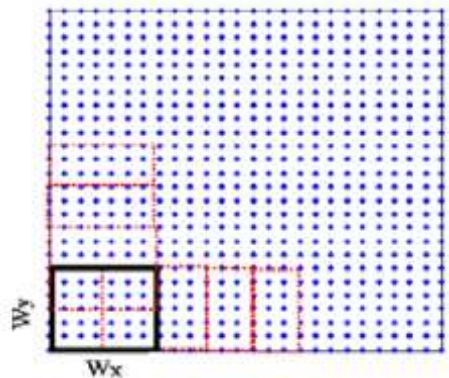
۵- انتخاب ابعاد پنجره

معادله‌ی اوپلر با داشتن داده‌ها و گرادیان‌های میدان کل در سه نقطه، قابل حل است. اما به دلیل وجود نوفه در داده‌های واقعی و امکان به وجود آمدن خطای زیاد در نتایج، این معادله را با استفاده از تعداد نقاط بیشتر حل می‌کنند [Durrheim and Cooper, 1998].

ابعاد پنجره‌ی مورد استفاده، تاثیر مهمی روی نتایج حاصل از اوپلردیکانولوشن دارد. ابعاد پنجره، تابع عمق چشمه است. ابعاد پنجره بزرگتر از نصف گسترش بی‌هنجاری در نظر گرفته می‌شود

[FitzGerald et al., 2004]. در حالتی که از شبکه استفاده می‌گردد، حداقل عمق، به وسیله‌ی ابعاد پنجره‌ای معادل با فاصله‌ی شبکه‌بندی و حداکثر عمق، توسط ابعاد پنجره‌ای برابر با دو برابر فاصله‌ی شبکه‌بندی به دست می‌آید. معمولاً با استفاده از ابعاد پنجره‌ی بزرگ، امکان ورود نوفه تصادفی به درون نتایج کاهش می‌یابد و خطای برآورد مشخصات چشمه کم می‌شود. هم‌چنین پنجره‌ی بزرگ، احتمال کشف چشمه‌های عمیق را بیشتر می‌کند؛ چون توده‌های عمیق، بی‌هنجاری‌های وسیع‌تری را ایجاد می‌کنند.

به دلیل اینکه بی‌هنجاری تولید شده توسط چشمه‌های گرانی، وسیع‌تر از بی‌هنجاری ایجاد شده به وسیله‌ی چشمه‌های مغناطیسی است، ابعاد پنجره‌ی مناسب برای کشف چشمه‌های گرانی عمیق، بزرگ‌تر از ابعاد پنجره‌ی مناسب برای چشمه‌های عمیق مغناطیسی می‌باشد. قابل ذکر است که برای داده‌های قدرت تفکیک بالا، نتایج بهتر با پنجره‌های کوچک‌تر به دست می‌آیند [FitzGerald et al., 2004].



شکل ۲-۳: نحوه‌ی حرکت پنجره روی داده‌های شبکه. نقاط آبی بیانگر داده‌ها و جابجایی پنجره در هر بار به اندازه نصف طول و عرض آن (علمدار، ۱۳۸۸).

ابعاد پنجره مورد استفاده تأثیر مهمی بر روی نتایج حاصله دارد و معمولاً گفته می‌شود که باید ابعاد بهینه پنجره مورد استفاده قرار گیرد. اویلردیکانولوشن بر این فرض استوار است که در هر پنجره، تنها داده‌های مربوط به یک بی‌هنجاری وجود دارد. بنابراین هنگام استفاده از پنجره‌های بزرگ باید توجه داشت که داده‌های بی‌هنجاری‌های هم‌جوار درون یک پنجره قرار نگیرند؛ چون در این صورت، نتایج

به دست آمده، غیرقابل قبول خواهند بود. برخی پژوهشگران معتقدند که اندازه‌ی پنجره، باید بیشتر از عمق مورد بررسی و همچنین در پنجره مورد نظر باید تعداد کافی از نقاط مشاهده‌ای قرار گیرد [Stavrev, 1997]. معمولاً اندازه‌ی پنجره به صورت تجربی و با توجه به کیفیت نتایج، انتخاب می‌شود. هنگام بررسی چشمه‌های کم‌عمق نیز باید دقت کرد که ابعاد پنجره، به حدی کم نباشد که مقدار داده‌ها و گرادیان میدان کل محاط در پنجره، تغییرات محسوس‌ی نداشته باشد.

و- انتخاب شاخص ساختاری

هنگام استفاده از روش اویلر دیکانولوشن، اساسی‌ترین عامل، انتخاب شاخص ساختاری مناسب است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، شاخص ساختاری به طبیعت و هندسه‌ی چشمه‌ی تولیدکننده‌ی بی-هنجاری وابسته است. بنابراین یکی از مشکلات غیرقابل اغماض روش مذکور، نیاز به اطلاعات قبلی درباره‌ی طبیعت و شکل توده‌ی تولیدکننده بی‌هنجاری است. جدول ۱-۲ شاخص ساختاری بعضی از مدل‌های ساده زمین‌شناسی برای داده‌های گرانی را نشان می‌دهد.

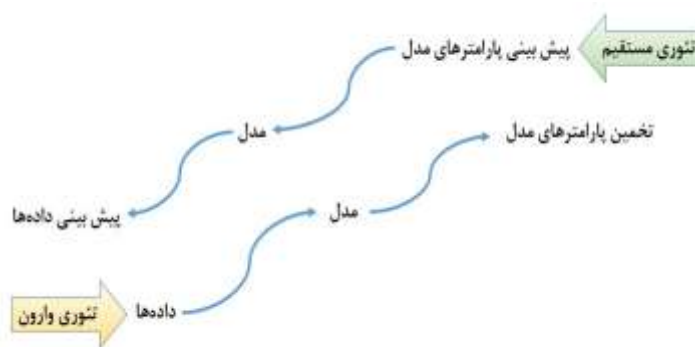
جدول ۱-۲: تعیین شاخص ساختاری معادله اویلر برای مدل‌های ساده [Reid et al., 1990].

کره	لوله	نوار (Ribbon)	سیل/دایک/کنتاکت	مدل گرانی
۲	۱	۰/۵	۰	شاخص ساختاری

پس از انجام پردازش‌های لازم، همواره ارائه یک مدل از ساختار زیرسطحی که خصوصیات هندسی و فیزیکی آن را بیان می‌کند، در تعیین و تفسیر بهتر بی‌هنجاری می‌تواند مفید واقع گردد، که این گام جزو آخرین مرحله پردازشی در عملیات گرانی‌سنجی می‌باشد. جهت انجام وارون‌سازی نیاز به تولید مدل اولیه‌ای از ساختار زیرسطحی می‌باشد که در مسیر وارون‌سازی بهینه شده و مدل نهایی به دست می‌آید. در اغلب مسایل وارون‌سازی برای تولید بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل‌های پیچیده با اشکال نامنظم از روش تالوانی استفاده شده که با نوشتن برنامه‌های رایانه‌ای و با تعیین مشخصات هر مدل، مقدار اثر گرانی آنها محاسبه می‌شود.

۲-۶ مقدمه‌ای بر مسائل وارون و مستقیم در ژئوفیزیک

اگر نظریه فیزیکی، شامل پارامترهای فیزیکی برای توصیف یک سیستم تحت مطالعه باشد، تئوری وارون در مورد قوانین کمی به جهت مقایسه بین پارامترهای پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای آن سیستم صحبت می‌کند [Tarantola, 2005]. تئوری وارون محدود به مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها یا داده‌ها) و سوالاتی است که می‌تواند به صورت عددی بیان گردند. در تئوری وارون پارامترهای مدل به صورت مقادیر عددی یا آماری بوده که خصوصیات هندسی و فیزیکی مدل را معین می‌کنند که برای ارتباط دادن پارامترهای مدل به داده‌ها، متدهای بخصوصی وجود دارد [Menke, 2012]. عبارت تئوری وارون در مقابل تئوری مستقیم به کار می‌رود. تئوری مستقیم روند پیش‌بینی نتایج اندازه‌گیری‌ها (پیش‌بینی داده‌ها) بر اساس بسیاری از اصول عمومی اثبات شده و یک مدل و دسته‌ای از شرایط خاص مربوط به مساله مورد مطالعه است. مساله وارون با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌ها و یک مدل بر اساس اصول منطقی پذیرفته شده به تخمینی از پارامترهای مدل می‌پردازد که به طور خلاصه می‌توان گفت:



شکل ۲-۴: فرم کلی مسایل مستقیم و وارون [Menke, 2012].

از مسائل وارون در بسیار از شاخه‌های علوم مانند پرتونگاری پزشکی، برازش منحنی، بهینه‌سازی تصویر، محل زلزله، تعیین ساختارهای زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی و مکان‌یابی و هدایت ماهواره استفاده می‌شود [Menke, 2012]:

۲-۷ فرمول بندی مسائل وارون

گام اول در اکثر مسائل وارون، توصیفی از فضای داده‌هاست. از این رو در بسیاری از مسائل وارون داده‌ها به صورت مجموعه‌ای از مقادیر عددی، که عناصر یک بردار را تشکیل می‌دهند، نشان داده می‌شوند. اگر N اندازه‌گیری در آزمایش بخصوصی انجام گیرد، این اعداد به صورت عناصری از بردار d به طول N مشخص می‌شوند. بطور مشابه پارامترهای مدل نیز به صورت عناصری از بردار m با طول M بیان می‌شوند.

$$d = [d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_N]^T \quad (۳۲-۲)$$

$$m = [m_1, m_2, m_3, m_4, \dots, m_M]^T \quad (۳۳-۲)$$

که نماد T بیانگر ترانهاده^۱ است. در مساله‌ی وارون اساس کار پیدا کردن رابطه‌ای بین پارامترهای مدل (ناشناخته) و داده‌ها می‌باشد. این رابطه را مدل کمی (که به اختصار مدل و یا تئوری) می‌گویند که شامل یک یا چند رابطه بوده که انتظار می‌رود داده‌ها و پارامترهای مدل از آن پیروی کنند [Menke, 2012].

به عنوان مثال، تلاش بر این است که چگالی یک جسم (مثلا سنگ) بوسیله حجم و جرم آن محاسبه شود، در نتیجه تعداد $N=2$ داده جرم و حجم (به ترتیب d_1 و d_2) و $M=1$ پارامتر ناشناخته چگالی (m_1) می‌باشند. چگالی‌های مختلفی با برابر قراردادن جرم در برابر حجم برای مدل طبق رابطه $d_2 m_1 = d_1$ می‌تواند به دست آید. بایستی توجه داشت که پارامترهای مدل، چگالی، به دلیل آنکه یک خاصیت ذاتی از ماده که وابسته شیمی آن است ارائه می‌دهند، از جرم و حجم آن ماده با اهمیت‌تر می‌باشند. داده‌ها (جرم و حجم) به راحتی اندازه‌گیری می‌شوند اما چون وابسته با اندازه جسم مورد نظر (بطور اتفاقی تعیین می‌شود) هستند، آنچنان بنیادی نخواهند بود [Menke, 2012].

^۱Transpose

در واقعیت و بطور کلی، داده‌ها و پارامترهای مدل بر طبق یک یا چند رابطه ضمنی بسیار پیچیده با هم مرتبط می‌باشند، رابطه (۲-۳۴):

$$\begin{aligned} f_1(d, m) &= 0 \\ f_2(d, m) &= 0 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ f_L(d, m) &= 0 \end{aligned} \quad (۲-۳۴)$$

که L بیانگر تعداد معادلات است. در مثال ذکر شده (اندازه‌گیری چگالی)، $L=1$ و $d_2 m_1 - d_1 = 0$ می‌توان یک معادله از حالت $f_1(d, m) = 0$ تشکیل داد. این معادلات ضمنی را می‌توان به صورت خلاصه با معادله برداری $f(d, m) = 0$ نشان داد. یکی از هدف‌های تئوری وارون حل و یا وارون‌سازی این معادلات برای بدست آوردن انواع جواب‌های ممکن و مطلوب با توجه به شرایط خاص یک مساله است. به طور کلی $f(d, m) = 0$ می‌تواند شامل توابع پیچیده و غیرخطی از داده‌ها و پارامترهای مدل باشد.

به طور کلی مسائل وارون به دو دسته‌ی مسائل وارون خطی و مسائل وارون غیرخطی تقسیم می‌شوند. در مسائل وارون خطی ارتباط بین پارامترهای مدل و داده‌ها خطی است، درحالی که در مسائل وارون غیرخطی این ارتباط به صورت خطی نبوده اما می‌توان با استفاده از روش‌های همچون گرادیان، بسط تیلور و ... به فرم معادلات خطی تبدیل کرد.

۲-۸ پتانسیل گرانشی^۱ اساس مسائل وارون گرانی سنجی

شتاب جاذبه یک میدان پایسته است در نتیجه می‌توان برای یک پخش سه‌بعدی با چگالی $\rho(r)$ روابط زیر را در مورد آن نوشت [Blakely, 1995]:

^۱ Gravitational potential or Newtonian potential

$$\nabla \times g = 0 \quad \text{و} \quad \nabla \cdot g = -4\pi\rho G \quad g = \nabla u \quad (35-2)$$

در نتیجه می‌توان پتانسیل گرانی U را بر این اساس بیان کرد [Blakely, 1995]:

$$\vec{g} = -\nabla U \quad (36-2)$$

که در معادله پواسون به صورت زیر صدق می‌کند [Blakely, 1995]:

$$\nabla^2 U = -4\pi\rho G \quad (37-2)$$

با توجه به این معادله، میدان پتانسیل گرانی ناشی از یک توزیع جرم در خارج از آن در معادله لاپلاس

صدق می‌کند [Blakely, 1995]:

$$\nabla^2 U = 0 \quad (38-2)$$

در نتیجه می‌توان حل معادله پواسون را به شکل انتگرال حجمی بیان نمود [Blakely, 1995]:

$$U(r') = G \iiint_D \frac{\rho(r)}{|r-r'|} dv \quad (39-2)$$

که در آن D محدوده تمرکز جرمی می‌باشد. از آنجا که :

$$\nabla' \cdot \frac{1}{|r-r'|} = \frac{r-r'}{|r-r'|^3} \quad (40-2)$$

می‌توان عبارت مربوط به میدان گرانی ناشی از هر توزیع جرمی در محدوده‌ی حجمی D در نقطه r'

به شکل زیر محاسبه کرد [Blakely, 1995]:

$$g(r') = A^g(\rho) = G \iiint_D \rho(r) \frac{r-r'}{|r-r'|^3} dv \quad (41-2)$$

در این رابطه $A^g(\rho)$ (41-2) عملگر مستقیم در مسائل گرانی نام دارد. در نتیجه می‌توان مولفه قائم

میدان گرانی را به صورت زیر بازنویسی کرد [Blakely, 1995]:

$$g_z(r') = G \iiint_D \rho(r) \frac{z-z'}{|r-r'|^3} dv \quad (42-2)$$

با توجه به مبنای روش گرانی‌سنجی که در آن اختلاف تباین‌های چگالی بی‌هنجار $\Delta\rho$ مورد نظر

است، اندازه گرانی این بی‌هنجاری Δg از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [Blakely, 1995]:

$$\Delta g(r') = A^g(\Delta\rho) = G \iiint_D \Delta\rho(r) \frac{r-r'}{|r-r'|^3} dv \quad (43-2)$$

بنابراین اساس مساله مستقیم در میدان گرانی شامل حل انتگرال بالا بر روی محدوده D می باشد که توسط جرم بی هنجار پر شده است:

$$\Delta g(r') = A^g(\Delta\rho) \quad (44-2)$$

در مسائل وارون هدف به دست آوردن توزیع چگالی بی هنجار $\Delta\rho$ در داخل زمین از طریق داده های مشاهده ای Δg می باشد که رابطه آن به صورت زیر بیان می شود:

$$\Delta\rho = (A^g)^{-1} \Delta g \quad (45-2)$$

در این رابطه پارمتر $(A^g)^{-1}$ عملگر مساله وارون در گرانی سنجی نامیده می شود. با محاسبه توزیع چگالی از اندازه گیری های میکروگرانی با دقت بالا و ارائه یک مدل مناسب می توان اطلاعات بسیار خوبی پیرامون ساختارهای نزدیک به سطح به دست آورد.

۲-۹ مسائل وارون خطی

ساده ترین مسائل وارون شامل مسائلی است که می توان با مجموعه ای از معادلات خطی به صورت $Gm = d$ بیان کرد. بنابراین این معادله فرمی از تابع معادله نظری وارون گسسته است. بسیاری از مسائل وارون مهم در علوم فیزیکی با این معادلات توصیف می شوند. در موارد دیگر وقتی که مساله در برگیرنده بسیاری از معادلات پیچیده و غیر خطی است، می توان با استفاده از تقریب های مختلف آن را خطی کرده و حل نمود.

در این معادلات G ماتریس کرنل داده ها^۱ یا مشخصه مدل است. در تئوری وارون پیوسته^۲، داده ها به صورت گسسته و توابع مدل به فرم پیوسته می باشند. در تئوری معادلات انتگرالی^۳ داده ها و پارامترهای مدل هر دو بوسیله تابع پیوسته $d(x)$ و $m(x)$ نشان داده می شود که x نماد متغیرهای

^۱Data kernel

^۲Continuous inverse theory

^۳Theory of integral equations

مستقل مدل است [Menke, 2012].

تئوری وارون گسسته:

$$d_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} m_j \quad (46-2)$$

تئوری وارون پیوسته:

$$d_i = \int G_i(x) m(x) dx \quad (47-2)$$

تئوری معادلات انتگرالی:

$$d(y) = \int G(y, x) m(x) dx \quad (48-2)$$

همواره مدل مورد نظر برای پارامترهای m و داده‌های d ، مانند توابع پیوسته و یا پارامترهای گسسته رفتار نمی‌کند که این مساله از اختلاف‌های اساسی بین نظریه وارون گسسته، نظریه وارون پیوسته و نظریه معادله انتگرالی می‌باشد. به همین دلیل داده‌های d_i در تئوری وارون لزوماً گسسته می‌باشند. از این رو تئوری وارون با نتایجی از اطلاعات داده‌های مشاهده‌ای مرتبط است که همیشه دارای طبیعتی گسسته هستند [Menke, 2012].

در بعضی از کاربردهای ژئوفیزیکی، مسائل وارون تنها بر اساس منشأهای میدان مشاهده‌ای فرمول-بندی می‌گردند. این گونه مسائل با نام مسائل وارون منشاء عنوان می‌گردند که در این موارد پارامترهای مدل (خصوصیات فیزیکی محیط) دانسته فرض می‌شود. مثال بارز این گونه روش، یافتن توزیع چگالی سنگ یا ساختار مورد نظر به عنوان منشاء بی‌هنجاری در میدان گرانی می‌باشد.

۲-۱۰ مسائل وارون گسسته خطی

شکل کلی مسائل وارون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d = G(m) \quad (49-2)$$

که در آن m معرف پارامترهای مدل، d داده‌های اندازه‌گیری شده و G معادلاتی برای ارتباط بین پارامترهای مدل و داده‌ها می‌باشد. همچنین فرض می‌گردد که N اندازه‌گیری ژئوفیزیکی در مساله

مورد نظر وجود داشته باشد بتوان با آنها مانند اعضای بردار N مولفه d رفتار کرد. به طور مشابه، پارامترهای مدل نیز می‌توانند به صورت اعضای یک بردار مانند m با ابعاد M محسوب شوند:

$$d = [d_1 d_2 d_3 \dots d_N]^T \quad (50-2)$$

$$m = [m_1 m_2 m_3 \dots m_M]^T \quad (51-2)$$

که در آنها T ، ترانهاده هر یک از این دو بردار می‌باشد. شکل ماتریسی عملگر خطی G را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$d = Gm \quad (52-2)$$

که در آن G ماتریس $N \times M$ برای عملگر خطی G در معادله $d = G(m)$ می‌باشد. این رابطه معرف سیستمی از N معادله خطی نسبت به M پارامتر مجهول $m_1 m_2 m_3 \dots m_M$ است که به شکل فرم گسسته رابطه (2-46) بیان می‌شود. بنابراین حل مساله وارون (2-52) معادل حل دسته‌ای از روابط خطی نسبت به پارامترهای مجهول $m_1 m_2 m_3 \dots m_M$ می‌باشد. اگر در سیستم معادله (2-46)، $N < M$ باشد، رابطه فرورآورد نامیده می‌شود که در این حالت تعداد داده‌ها از تعداد پارامترهای مجهول کمتر است. در صورتیکه $N > M$ باشد (تعداد داده‌ها از تعداد پارامترهای مدل بیشتر باشد)، این سیستم فرابراورد محسوب می‌گردد [Menke, 2012]. در مسائل وارون داده‌های گرانی سیستم معادلات فرابراورد است، زیرا در یک نقطه برداشت، تنها با یک داده می‌بایست پارامترهایی مدل نظیر عمق، چگالی، هندسه و ... را تعیین نمود ($N > M$).

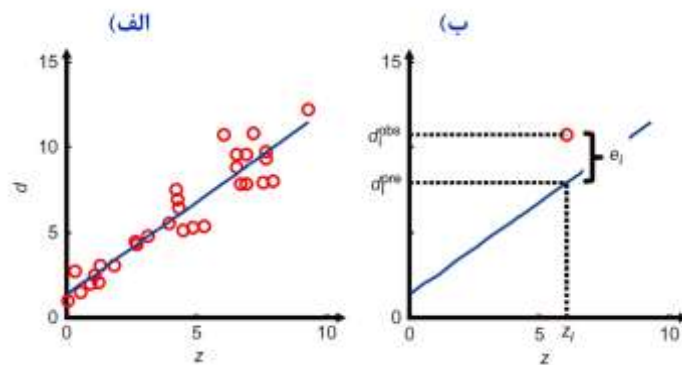
۲-۱۱ تخمین‌های اندازه بردار خطا

برای بررسی و ارتباط اندازه بردار خطا در حل مسائل وارون، یک مسئله ساده از برازش خط مستقیم بر داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مساله غالباً با روش کمترین مربعات^۱ (LS) حل می‌شود. در این

^۱ Least - squares

روش سعی می‌شود پارامترهای مدل (عرض از مبدأ و شیب) طوری انتخاب شوند که داده‌های پیش-بینی شده (d^{pre}) تا حد امکان به داده‌های مشاهده‌ای (d^{obs}) نزدیک شود. برای هر مشاهده یک خطای پیش‌بینی یا عدم برازش^۱ تعریف می‌شود [Menke, 2012]:

$$e_i = d_i^{pre} - d_i^{obs} \quad (۵۳-۲)$$



شکل ۵-۲: الف) برازش کمترین مربعات یک خط راست به جفت‌های (z, d) . ب) خطای e_i برای هر مشاهده برابر اختلاف بین داده مشاهده شده و پیش‌بینی شده است $e_i = d_i^{pre} - d_i^{obs}$ [Menke, 2012].

بهترین خط برازش داده شده خطی است که پارامترهای مدل آن دارای کمترین خطای کل (E) باشند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (۵۴-۲)$$

$E = \sum_{i=1}^N e_i^2$ خطای کل (مجموع مربعات خطاهای منفرد^۲) دقیقاً برابر مربع طول‌های هندسی از بردار e یا $E = e^T e$ است.

روش تخمین کمترین مربعات، پارامترهای مدلی که اندازه طول کمینه‌ای نسبت به داده‌های تخمین زده شده (d^{est}) دارند (فاصله هندسی مشاهدات) را به عنوان راه حل‌هایی برای مساله وارون بیان

^۱ misfit
^۲ individual

می‌کند.

۲-۱۲ معیارهای اندازه‌گیری‌های طول

راه دیگر برای محاسبه مقدار طول می‌تواند جمع کردن قدرمطلق مقادیر عناصر یک بردار با یکدیگر باشد. عبارت نرْم^۱ برای ارجاع به اندازه‌ای از طول به کار می‌رود ($\|e\|$ نرْم بردار e است). اغلب نرْم‌های به کار گرفته شده بر اساس مجموع توان عناصری از بردار بوده که L_n (n برابر توان) نام‌گذاری شده است [Menke, 2012].

$$L_1 \text{ norm: } \|e\|_1 = \left[\sum_i |e_i|^1 \right] \quad (۵۵-۲)$$

$$L_2 \text{ norm: } \|e\|_2 = \left[\sum_i |e_i|^2 \right]^{1/2}$$

.

.

.

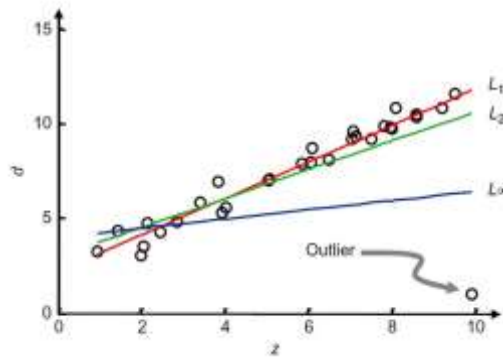
$$L_n \text{ norm: } \|e\|_n = \left[\sum_i |e_i|^n \right]^{1/n}$$

نرْم‌های مرتبه بالا بزرگترین وزن را به بزرگترین مولفه از e اختصاص می‌دهد.

روش کمترین مربعات از نرْم L_2 برای محاسبه طول استفاده می‌کند که در آن وزن داده‌هایی که به روند میانگین^۲ نزدیک است، انتخاب می‌گردد (شکل ۲-۶). اگر داده‌ها خیلی دقیق باشند، آن پیش-بینی‌ای که به مقدار مشاهده‌ای نزدیک باشد، اهمیت بیشتری خواهد داشت. از نرْم‌های مرتبه بالا در زمان وزن‌دهی بیشتر به خطاهای بالاتر استفاده می‌شود. از طرف دیگر اگر داده‌ها به صورت گسترده پراکنده باشند، روندی با کمترین خطای پیش‌بینی وجود نخواهد داشت. استفاده از نرْم مرتبه پایین به خطاهای با اندازه‌های مختلف وزن‌های یکسانی می‌دهد [Menke, 2012].

^۱ Norm

^۲ Average trend



شکل ۲-۶: خط راست برازش شده به جفت‌های (z, d) که خطا تحت نرم‌های L_1 ، L_2 و L_∞ اندازه‌گیری شده است. نرم L_1 کمترین وزن را به نقطه بیرونی می‌دهد [Menke, 2012].

۲-۱۳ راه حل کمترین مربعات برای مسائل وارون خطی

روش کمترین مربعات می‌تواند برای مسائل وارون خطی با رفتاری بسیار ساده گسترش یابد. با در نظر گرفتن پارامترهایی m_q و محاسبه مشتقات خطا و با قرار دادن نتایج برابر صفر، حل مساله حاصل می‌شود [Menke, 2012]:

$$E = e^T e = (d - Gm)^T (d - Gm) = \sum_i^N \left[d_i - \sum_j^M G_{ij} m_j \right] \left[d_i - \sum_k^M G_{ik} m_k \right] \quad (56-2)$$

فرم ساده شده رابطه:

$$E = \sum_j^M \sum_k^M m_j m_k \sum_i^N G_{ij} G_{ik} - 2 \sum_j^M m_j \sum_i^N G_{ij} d_i + \sum_i^N d_i d_i \quad (57-2)$$

مشتقات $\frac{\partial E}{\partial m_q}$ را مساوی با صفر قرار داده می‌شود:

$$\frac{\partial E}{\partial m_q} = 0 = 2 \sum_k^M m_k \sum_i^N G_{iq} G_{ik} - 2 \sum_i^N G_{iq} d_i \quad (58-2)$$

در نهایت معادله اخیر به صورت ماتریسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G^T G m - G^T d = 0 \quad (59-2)$$

کمیت $G^T G$ یک ماتریس $M \times M$ که حاصلضرب یک بردار m با طول M و کمیت $G^T d$ یک بردار با طول M است. بنابراین معادله به صورت یک ماتریس مربعی برای پارامترهای مدل مجهول

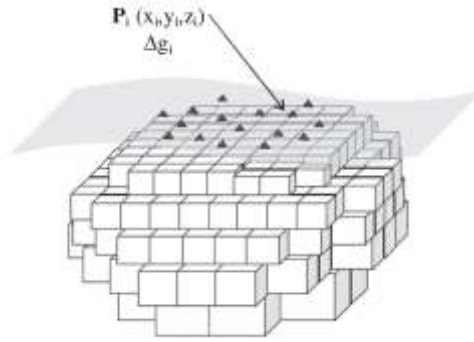
نوشته شد. با فرض وجود $[G^T G]^{-1}$ ، راه حل کمترین مربعات برای مساله وارون $Gm=d$ به دست می-آید [Menke, 2012]:

$$m^{est} = [G^T G]^{-1} G^T d \quad (۶۰-۲)$$

۱۴-۲ وارون سازی سه بعدی خطی به روش کاماچو

در روش کاماچو سطح زیرزمین به M سلول متوازی السطوح تقسیم بندی می شود. به هر کدام از این سلول ها طی فرآیند "رشد" و با توجه به داده های اندازه گیری شده، یک مقدار چگالی تخصیص می-یابد. در این روش شبکه برداشت داده های مشاهده ای می تواند یک شبکه منظم و یا نامنظم باشد. همچنین تباین چگالی مثبت و منفی و یک مقدار روند منطقه ای به طور همزمان در فرآیند رشد محاسبه و به دست می آید که از مزایای استفاده از این روش است. همچنین در این روش از ماتریس ژاکوبین و معکوس سازی ماتریس ها استفاده نمی شود.

اطلاعات پایه ای و اساسی این روش که ابتدا در سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ توسط کاماچو و همکاران ارائه و سپس به وسیله افراد دیگری مانند گاتسمن (۲۰۰۸) استفاده و توسعه داده شد. کاماچو و همکاران (۲۰۱۱) حالت انتخاب دستی و یا خودکار پارامترهای اصلی این روش را تعریف و روابط آن را بهبود بخشیدند که در ادامه این روش توضیح داده می شود. در این روش تعداد n داده گرانی در یک شبکه نامنظم (یا منظم) منظور می شود که (x_i, y_i, z_i) و $i=1, \dots, n$ مختصات سطحی (مختصات UTM) و P_i ارتفاع های ایستگاه های گرانی و Δg_i داده های گرانی مربوطه می باشند.



شکل ۲-۷: نمایی از سلول بندی و محاسبه اثر گرانی هر سلول در سطح زمین [Camacho et al., 2011].
 عدم قطعیت گوسی داده‌ها با استفاده از ماتریس کواریانس (n,n) Q_D [Trantola, 2005] جایی که معمولاً عناصر $q_{ij} = 0$ برای $i \neq j$ و $q_{ii} = e_i^2$ برای $i = 1, \dots, n$ به عنوان انحراف استاندارد مقادیر گرانی هستند، تعیین می‌شود. برای انجام مدل سازی، فضای زیرسطحی موجود در یک محدوده به m شبکه سلولی سه بعدی تقسیم بندی می‌شود که با تباین‌های چگالی $\Delta\rho_0^+$ و $\Delta\rho_0^-$ (مقادیر یکتا برای مدل نهایی و یا مقادیر محلی بر طبق یک معیار خاص) در طول مدل سازی تکمیل می‌شوند. رابطه وابسته به داده‌های اندازه گیری شده (Δg_i) در n ایستگاه (x_i, y_i, z_i) با پارامترهای مدل سازی و مقادیر باقی مانده v_i از رابطه (۲-۶۱) محاسبه می‌شود [Camacho et al., 2011]:

$$\Delta g_i = \sum_{j \in J^+} a_{ij} \Delta \rho_j^+ + \sum_{j \in J^-} a_{ij} \Delta \rho_j^- + \delta g_{reg} + \delta g_{top} \quad (۲-۶۱)$$

$$i = 1, \dots, n,$$

که در آن a_{ij} جاذبه گرانی قائم سلول متوازی السطوح پایه انتخاب شده زام، $(j = 1, \dots, m)$ با چگالی واحد در ایستگاه مشاهده‌ای نام طبق رابطه (۲-۶۲) [Pick et al., 1973]؛ $\Delta\rho_0^+$ ، $\Delta\rho_0^-$ تباین‌های چگالی تعیین شده برای سلول زام؛ J^+ ، J^- شاخص‌هایی برای پر کردن سلول‌ها با تباین‌های چگالی مثبت و منفی که هندسه توده بی‌هنجاری را با یک رابطه غیرخطی بیان می‌کند؛ δg_{reg} رابطه (۲-۶۳)، δg_{top} رابطه (۲-۶۴) عبارت‌های اختیاری برای اصلاح داده‌ها (روند منطقه‌ی خطی و تصحیح توپوگرافی اضافی) می‌باشند.

$$a_{ij} = -G \left[\left[x \ln(y + (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}) \right. \right. \quad (62-2)$$

$$+ y \ln(x + (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2})$$

$$+ z \arctan(z(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} x^{-1} y^{-1}) \left. \begin{matrix} u_2^j - x_i & v_2^j - y_i & w_2^j - z_i \\ u_1^j - x_i & v_1^j - y_i & w_1^j - z_i \end{matrix} \right]$$

$$i = 1, \dots, n,$$

$$\delta g_{reg} = g_0 + g_x(x_i - x_M) + g_y(y_i - y_M) \quad (63-2)$$

$$\delta g_{top} = \delta \rho_T C_i. \quad (64-2)$$

در رابطه بالا G ثابت گرانش جهانی؛ x_i ، y_i و z_i مختصات فضایی سطوح سلول z موازی با بردارهای پایه؛ u_1^j ، u_2^j محدوده مختصات x ؛ v_1^j ، v_2^j محدوده مختصات y ؛ w_1^j ، w_2^j محدوده مختصات z ؛ g_0 ، g_x و g_y پارامترهای روند منطقه‌ای گرانی؛ x_M ، y_M مختصات متوسط گیری شده؛ C_i ضریب متداول برای تصحیح توپوگرافی و $\delta \rho_T$ مقدار اضافی اختیاری نسبت به چگالی توپوگرافی اولیه می‌باشند [Camacho et al., 2002].

دو مشکل اساسی که در روش‌های مدل‌سازی معکوس وجود دارد، عدم یکتایی جواب و درجه آزادی سیستم غیرخطی داده‌ها می‌باشد. مساله اول به دلیل وجود مدل‌های مختلفی است که برازش خوبی با داده‌های واقعی می‌توانند داشته باشند [Al-Chalabi, 1971] که برای حل این مشکل می‌توان از اطلاعات زمین‌شناسی، حفاری و همچنین از تکنیک‌های آماری برای بهبود داده‌های واقعی کم‌دقت استفاده نمود. در اینجا از روش معکوس‌سازی حداقل مربعات که به عنوان ترکیبی از داده‌های قابل مشاهده با عدم قطعیت گوسی (داده شده توسط یک ماتریس کواریانس Q_D) و اطلاعات مدل ارائه شده بوسیله مدل قبلی m_{prev} که عدم قطعیت گوسی را در خود دارد (داده شده توسط یک ماتریس کواریانس Q_M) استفاده شده است. به منظور انتخاب یک راه حل مطلوب و با ارزش، در میان بی‌نهایت

راه حل ممکن برای معکوس‌سازی داده‌ها، یک رابطه کمینه‌سازی بر اساس برازش مدل (برازش حداقل مربعات) و هموارسازی آن (جرم بی‌هنجاری‌های نهایی) ارائه شده است (۲-۶۵).

$$v^T Q_D^{-1} v + \lambda m^T Q_M^{-1} m = \min, \quad (۲-۶۵)$$

که در آن $m = (\Delta\rho_1, \dots, \Delta\rho_m)^T$ مقادیر تباین چگالی تعیین شده برای m سلول از مدل (علامت T نشان‌دهنده ترانپوز است)؛ $v = (v_1, \dots, v_n)^T$ بردار مقادیر باقی‌مانده برای n نقطه داده؛ Q_D ماتریس کواریانس اولیه برای عدم قطعیت داده‌های گرانی؛ Q_M ماتریس کواریانس اولیه برای عدم قطعیت پارامترهای مدل و λ ضریب بدون بعد برای برقراری توازن بین برازش و هموارسازی مدل می‌باشند [Camacho et al., 2002].

در خصوص حل مساله تعداد درجه‌های آزادی زیاد برای توصیف مدل، می‌توان از یک روش جستجوگر استفاده نمود. رنه (۱۹۸۶) یک روش اکتشافی برای تکمیل مدل ارائه داده است که بر خلاف بررسی هر توزیع چگالی ممکن برای تکمیل یک مدل کامل، از تمامی امکانات مختلف برای بررسی و تکمیل یک سلول در هر مرحله از فرآیند رشد و ساختن مدل از نقطه اولیه استفاده می‌کند. کاماچو (۲۰۱۱) با بهبود روش رنه (۱۹۸۶) از یک رشد همگن تقریبی با سلول‌های اضافی برای توسعه مناسب ساختار تنظیم شده قبلی مدل استفاده نموده است که در آن به جای ادامه جستجوی تمام فضای مدل، امکان بررسی رشد سلول به سلول برای گسترش مدل بی‌هنجار مدنظر قرار می‌گیرد. در نتیجه در هر مرحله سلول‌های خالی طبق یک روش معین با تباین چگالی از قبل تعیین شده، بررسی می‌شوند. شرط برازش مناسب در هر مرحله به وسیله فاکتور مقیاس (شرایط مدل تکمیل نشده را برای رسیدن به یک مقدار گرانی مناسب و مدل کامل مورد بررسی قرار می‌دهد) بررسی شده تا سلول مناسب انتخاب شود.

برای مثال، در مرحله $(k+1)$ ام فرآیند رشد، تعداد k سلول با تباین چگالی مثبت و منفی محاسبه شده و تکمیل می‌شوند. مقادیر گرانی حاصل از مدل‌سازی با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\Delta g_i^c = \Delta g_i^0 + \sum_{J_k^+} A_{ij} \Delta \rho_j^+ + \sum_{J_k^-} A_{ij} \Delta \rho_j^-, \quad (66-2)$$

که در آن J_k^+ ، J_k^- مجموعه عبارت وابسته به سلول‌های اصلاح شده قبلی است. سپس فرآیند در میان $k-m$ سلول باقی‌مانده به جستجو برای پر کردن یک منشور جدید و متراکم سازی مدل می‌پردازد. به این منظور برای هر سلول خالی z ام و J_k^+, J_k^- ، رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\Delta g_i - (\Delta g_i^c + A_{ij} \Delta \rho_j) f - \delta g_{reg} - \delta g_{top} = v_i \quad i = 1, \dots, n, \quad (67-2)$$

که در آن $\Delta \rho_j$ شامل مقادیر $\Delta \rho_0^+$ ، $\Delta \rho_0^-$ ؛ $f \geq 1$ ضریب فاکتور برای برازش بی‌هنجاری‌های مدل-سازی شده $(\Delta g_i^c + A_{ij} \Delta \rho_j)$ با بی‌هنجاری‌های مشاهده‌ای می‌باشد. مقادیر تعیین شده مثبت و منفی برای رسیدن به یک شرایط کمینه مناسب بر طبق معادله (۶۵-۲) و با اضافه شدن فاکتور مقیاس f به آن جهت تخمین تباین چگالی اضافی $\Delta \rho_j$ پیاپی بررسی می‌شوند. پارامترهای ناشناخته f ، g_0 ، g_x ، g_y و δp_T در معادلات (۶۳-۲)، (۶۴-۲) و (۶۷-۲) برای یک معیار کمینه‌سازی مرکب مطابق با مرحله $(k+1)$ ام طبق رابطه زیر تنظیم می‌شوند:

$$v^T Q_D^{-1} v + \lambda f^2 m^T Q_M^{-1} m = \min, \quad (68-2)$$

که در آن بردار جواب m شامل سلول‌های تکمیل شده ما قبل و مقدار چگالی $\Delta \rho_j$ بوده که مورد بررسی قرار می‌گیرد (کاماچو و همکاران، ۲۰۰۷). برای محاسبه مقادیر باقی‌مانده v_i که وابسته به عبارت‌های انتخاب شده $\Delta \rho_j$ هستند، بار دیگر معادله قبل حل می‌شود. سپس مقدار خطای عدم برازش e_j^2 به عنوان معیاری برای متناسب بودن منشور z ام و تباین چگالی اختیار شده، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$e_j^2 = v^T Q_D^{-1} v + \lambda f^2 m^T Q_M^{-1} m \quad (69-2)$$

درواقع در مرحله $(k+1)$ ، احتمالات مدل برای هر یک از منشورهای بدون تغییر و همچنین برای تباین‌های چگالی منفی یا مثبت جستجو می‌شود و سپس منشور z ام با یک تباین چگالی که از مقدار

کمینه e_j^2 بدست می‌آید، انتخاب شده و سبب رشد مدل می‌شود. تاثیر مقدار این سلول به مقادیر مدل شده Δg_i^c اضافه می‌گردد.

در هر مرتبه تکرار، بهترین مدل برازش شده برای رشد بی‌هنجاری با رابطه کمینه‌سازی (۶۵-۲) به عنوان گسترش مناسب انتخاب می‌شود. این روند تا زمانی که تمامی سلول‌ها مورد جستجو قرار بگیرند و مقدار ضریب فاکتور به یک همگرا شود و همچنین پارامترهای g_0 ، g_x ، g_y و δp_T به مقادیر نسبتاً پایداری برسند، ادامه می‌یابد و در نهایت مدل مورد نظر ساخته می‌شود.

روش معکوس‌سازی کاماچو و همکاران (۲۰۱۱) دارای تکنیک‌ها و مزایای قابل توجه‌ای است، مانند:

- ۱- مدل‌سازی همزمان داده‌ها با تباین چگالی مثبت و منفی
- ۲- انتخاب خودکار و دستی پارامتر تعادل و هموارسازی مدل
- ۳- شناسایی و تعیین رفتار داده‌های خارج از روند مدل‌سازی
- ۴- انتخاب خودکار و دستی حداقل و حداکثر تباین چگالی
- ۵- انتخاب مد افزایش رو به پایین تباین چگالی در مدل‌سازی‌های لایه‌ای
- ۶- انتخاب خودکار مقدار تصحیح اثرات توپوگرافی.

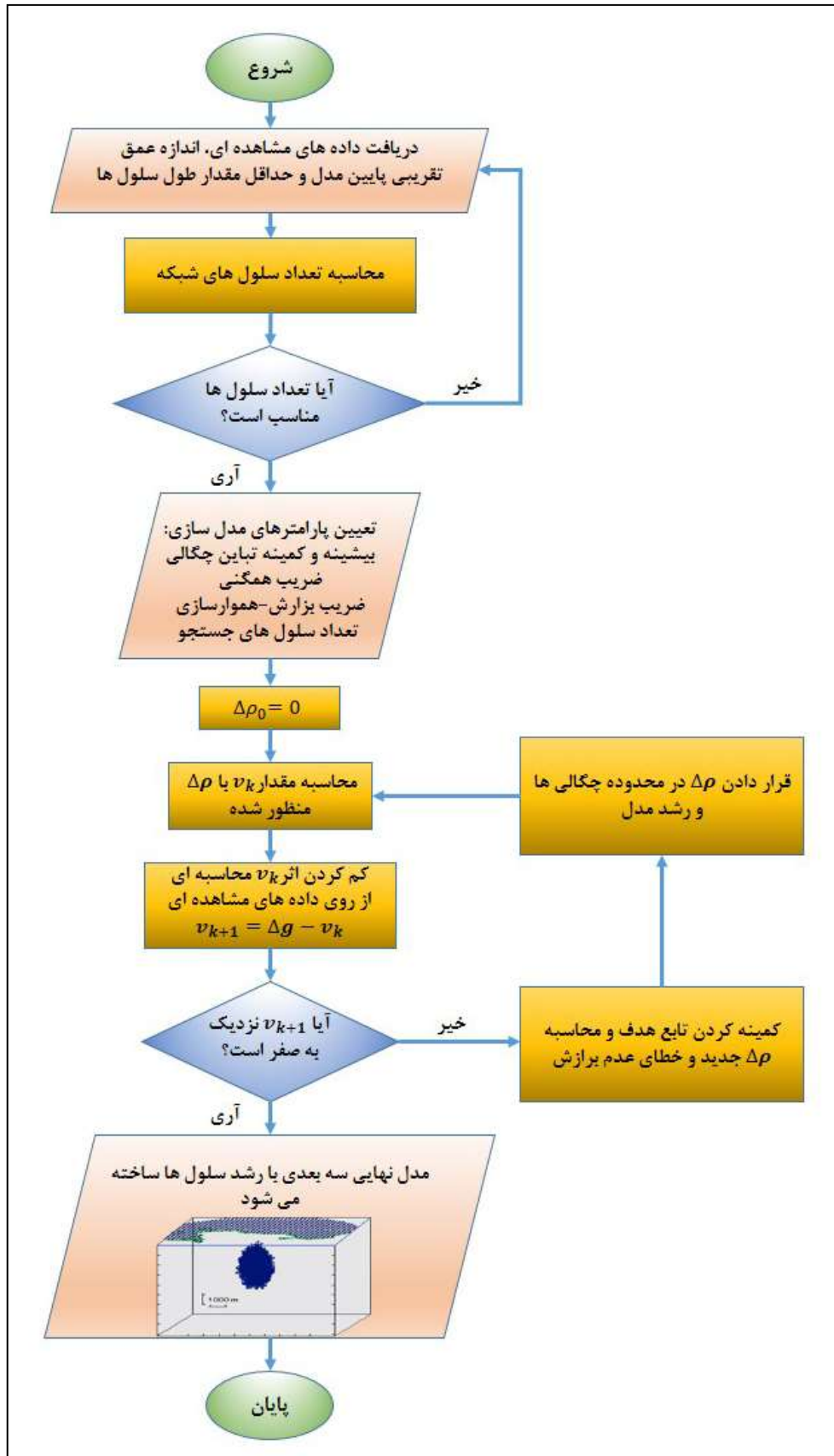
دو نکته قابل توجه در روش معکوس‌سازی کاماچو و همکاران (۲۰۱۱) انتخاب صحیح پارامتر همگنی، α ، $(0 \leq \alpha \leq 1)$ برای الگوی انتقال تباین چگالی در سرتاسر مرز مدل‌سازی و پارامتر تعادل بین برازش و هموارسازی مدل می‌باشد. ضریب همگنی بر روی تباین‌های چگالی اولیه $(\Delta\rho_0^-, \Delta\rho_0^+)$ که بصورت پیش‌فرض تعیین شده و در مسیر رشد مدل کاهش پیدا می‌کنند، بر طبق رابطه‌های (۷۰-۲) و (۷۱-۲) تاثیر می‌گذارد.

$$\Delta\rho^- = \Delta\rho_0^- (1 - e^{(1-f_k)/\alpha}), \quad (70-2)$$

$$\Delta\rho^+ = \Delta\rho_0^+ (1 - e^{(1-f_k)/\alpha}), \quad (71-2)$$

که در آن f ضریب مقیاس $(f \geq 1)$ در مرحله k ام فرآیند رشد می‌باشد؛ رابطه (۶۷-۲). برای مقادیر

کم پارامتر همگنی، تباین چگالی در مرزهای مدل به طور آنی تغییر می‌کند (مقادیر بدست آمده تباین چگالی نزدیک به مقادیر پیش فرض تعیین شده باقی می‌مانند) که این خاصیت برای مدل‌سازی ساختارهایی مانند گسل خردگی، تونل و حفرات مناسب است. انتخاب مقادیر بالا سبب کم شدن تغییرات تدریجی و آرام تباین چگالی (بر اساس الگوی کاهشی پارامتر f) در نقاط مرزی مدل در فرآیند مدل‌سازی می‌شود. تعیین مناسب ضریب تعادل در روند مدل‌سازی بسیار اهمیت دارد. با توجه به کیفیت داده‌های برداشت شده و عامل نوفه، اگر این مقدار کم لحاظ گردد، حاصل یک مدل پیچیده خواهد بود که علت آن برآزش بالای پارامترهای مدل با داده‌های برداشت شده می‌باشد که در نتیجه باعث مدل‌سازی نوفه‌های موجود در داده‌ها می‌گردد و اگر مقداری بالا برای ضریب تعادل در نظر گرفته شود، برآزش داده‌ها کم و هموارسازی آن بالا می‌رود و یک مدل نسبتاً ساده تولید می‌شود. در نتیجه انتخاب مناسب این دو پارامتر در بهینه‌سازی مدل نقشی بسیار اساسی دارند.



فلوچارت روند وارون سازی به روش کاماچو و همکاران (۲۰۱۱)

فصل سوم

مدل سازی مصنوعی جهت بررسی توانمندی روش

۱-۳ مقدمه

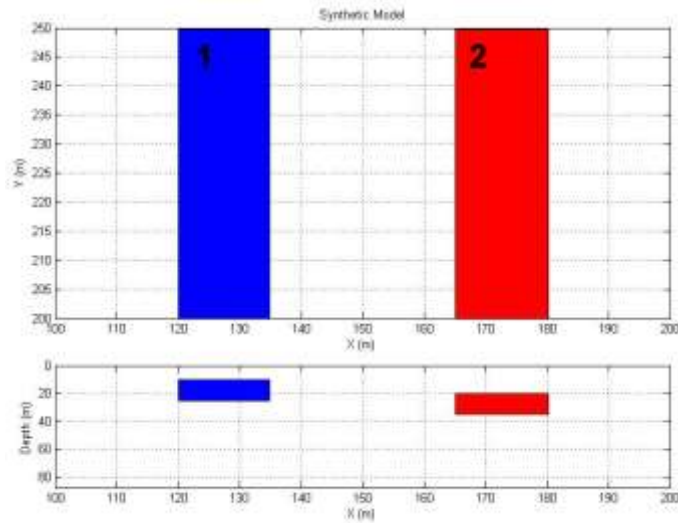
به طور معمول در ژئوفیزیک به جهت بررسی روش‌های پردازشی مانند تخمین لبه، عمق و مدل‌سازی از داده‌های مصنوعی که تمام پارامترهای هندسی و فیزیکی آن مشخص است، استفاده می‌شود. در این فصل به منظور بررسی و کارآیی روش کاماچو در وارون‌سازی ساختارهای نزدیک به سطح و کم‌چگال از داده‌های مصنوعی گرانی بدون نوفه و داده‌های مصنوعی گرانی حاوی نوفه استفاده شده است. از آنجا که ساختار مورد مطالعه، یک فضای خالی در میان سنگ‌های رسوبی همچون شیل و ماسه-سنگ با گستره‌ی چگالی بین ۱/۵ تا ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است، برای ایجاد مدل‌های مصنوعی از منشورهای متوازی‌السطوح با تباین چگالی منفی استفاده شد که روش ایجاد، مدل‌سازی و نتایج آن در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۳ تولید مدل مصنوعی

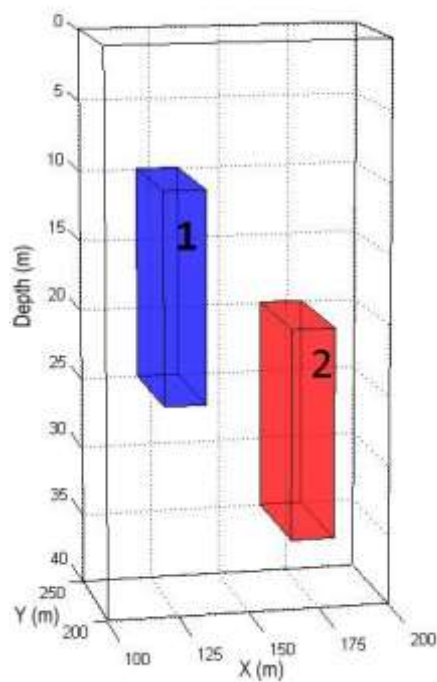
برای بررسی توانمندی روش وارون‌سازی کاماچو از دو منشور استوانه‌ای شکل به صورت افقی در عمق‌های مختلف در محیط متلب با استفاده از رابطه پارکر (۱۹۷۲) استفاده شد. پارامترهای هندسی و فیزیکی لحاظ شده در جدول ۱-۳ بیان شده است. همچنین نماهای دو و سه‌بعدی از منشورها در شکل ۱-۳ و ۲-۳ آورده شده است.

جدول ۱-۳: خصوصیات هندسی و فیزیکی مدل مصنوعی

منشور	عمق بالا (m)	عمق پایین (m)	ابعاد (m)	تباین چگالی (gr/cm^3)
۱	۱۰	۲۵	۱۵×۱۵×۵۰	-۱
۲	۲۰	۳۵	۱۵×۱۵×۵۰	-۲

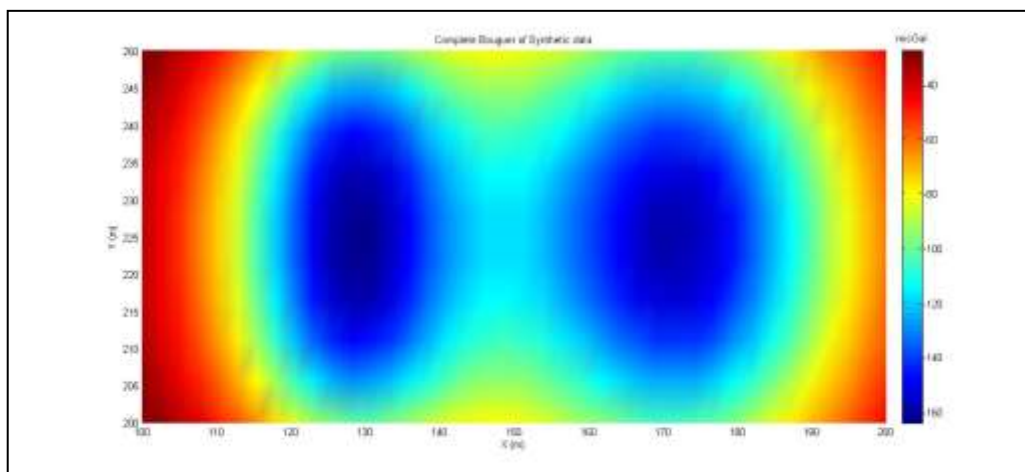


شکل ۳-۱: مقطع افقی و قائم از دو منشور مدل مصنوعی



شکل ۳-۲: نمای سه بعدی از دو منشور مدل مصنوعی

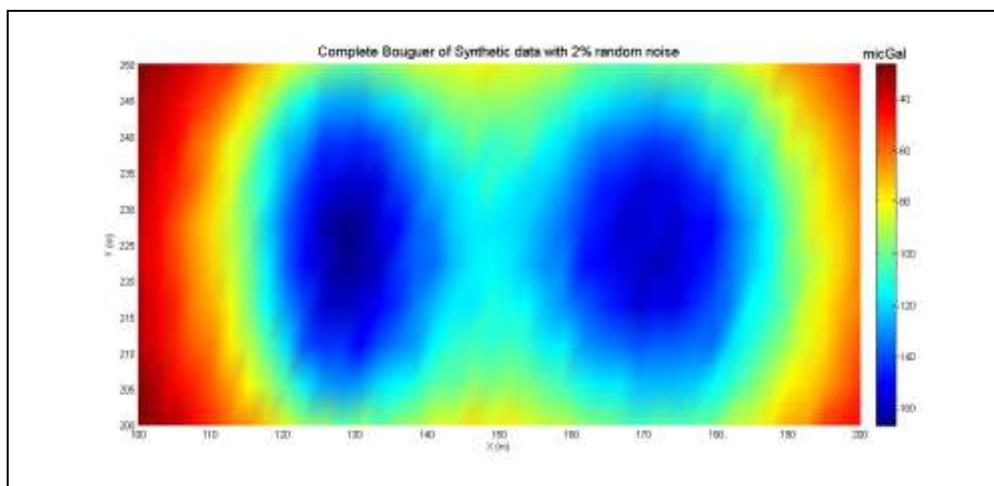
رابطه پارکر (۱۹۷۲) مدل تولید شده را به صورت بلوک‌های راست‌گوشه در می‌آورد و سپس مقدار گرانی را برای هر بلوک، بطور مجزا حساب می‌کند و سرانجام اثر تمامی بلوک‌ها را با هم جمع می‌کند. با محاسبه این رابطه تعداد ۴۰۰ داده گرانی به دست آمد و نقشه بوگه آن تهیه شد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳: نقشه بوگه کامل مدل مصنوعی دو منشور

۳-۳ اعمال نوفه دو درصد به داده‌های مدل مصنوعی

داده‌های برداشت شده صحرائی همواره دارای عوامل مزاحم نوفه که ناشی از خطای انسانی و ابزاری و همچنین عوامل محیطی (باد، رعد و برق و حرکت افراد و وسایل نقلیه و ...) می‌باشند. به همین دلیل برای انجام مدل‌سازی مناسب است که به داده‌های مصنوعی نوفه تصادفی اضافه شود. میزان درصد نوفه بستگی به شرایطی که داده‌های واقعی دارد، بدین معنی که هرچه عوامل مزاحم در برداشت داده‌های صحرائی بیشتر باشد، به همان میزان به داده‌های مصنوعی نوفه اضافه می‌گردد. هرچند رابطه‌ی ریاضی بین این دو عامل وجود ندارد اما می‌توان به طور تقریب این کار را انجام داد. به همین منظور به داده‌های مدل مصنوعی به میزان دو درصد نوفه تصادفی (شکل ۳-۴) اعمال شد و سپس فرآیند مدل‌سازی صورت گرفت.



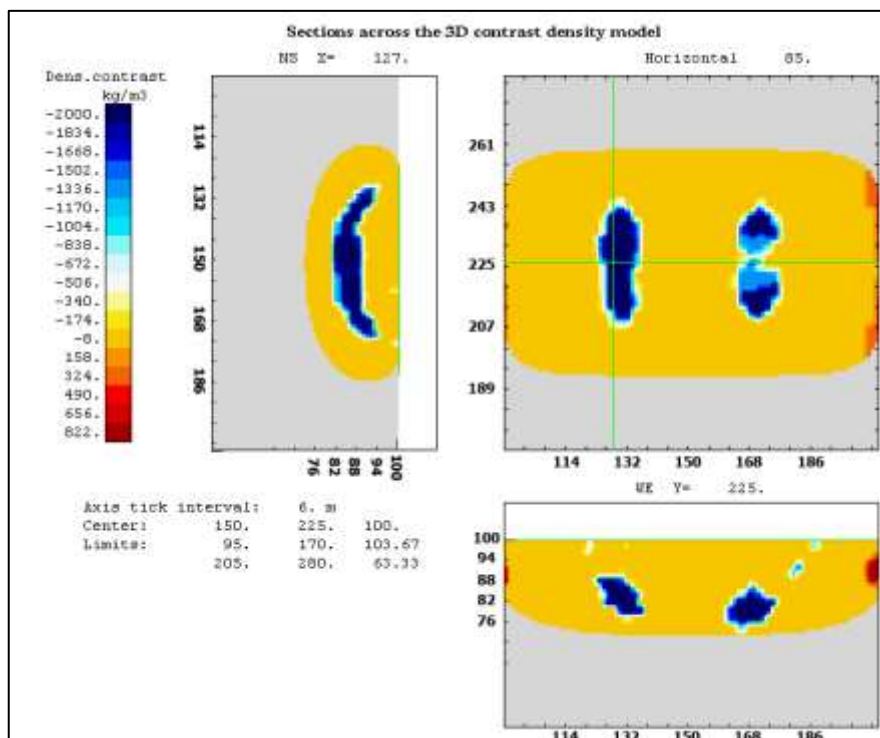
شکل ۳-۴: نقشه بوگه کامل مدل مصنوعی همراه با نوفه دو درصد

۳-۴ وارون سازی داده های مدل مصنوعی

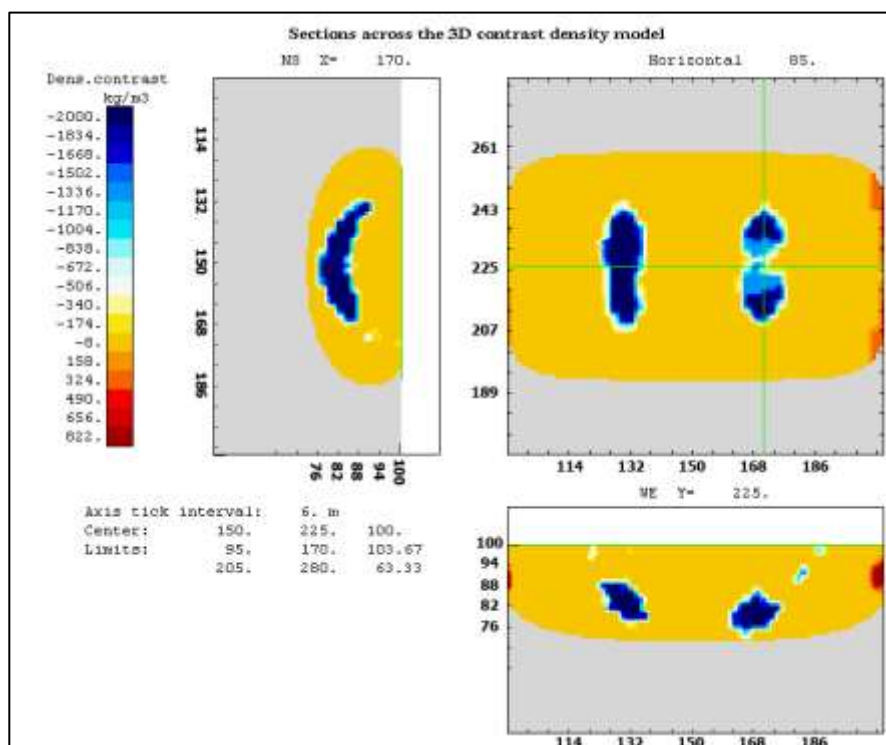
جهت انجام وارون سازی داده های مصنوعی تحت یک شبکه بندی یکسان، سطح زیر محدوده به منشورهای متوازی السطوح با حداقل طول ۱/۵ متر تقسیم بندی شدند؛ که در نتیجه تعداد ۴۰,۰۰۰ منشور برای شروع مدل سازی به دست آمد. محدوده تباین چگالی اولیه برای هر دو مقدار داده ی مصنوعی (نوفه دو درصد و ده درصد) ۲۰۰۰- و ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب نزدیک به مقدار واقعی آن انتخاب شد.

۳-۴-۱ مدل سازی با نوفه دو درصد

جهت انجام مدل سازی مقدار بخش برازش-هموار سازی ۲۰ انتخاب شد تا حداکثر برازش داده ها انجام گرفته و مدل نهایی به واقعیت نزدیک تر باشد. ضریب همگنی نیز ۰/۱ انتخاب گردید؛ تا تغییرات مدل سازی در مرز ساختار به شکل بارزتری تغییر کند. مقدار بخش جستجوی سلول جهت انجام وارون سازی به صورت سیستماتیک عدد یک لحاظ شد. با تخصیص مقادیر اولیه، وارون سازی صورت گرفت و مدل مصنوعی نهایی به دست آمد (شکل ۳-۵ و ۳-۶).



شکل ۳-۵: نتیجه مدل‌سازی داده‌های مصنوعی با نوفه دو درصد در مقاطع افقی ۸۵ متر (عمق ۱۵ متر)، قائم شمالی-جنوبی در طول ۱۲۷ متر و قائم شرقی-غربی در عرض ۲۲۵ متر.



شکل ۳-۶: نتیجه مدل‌سازی داده‌های مصنوعی با نوفه دو درصد در مقاطع افقی ۸۵ متر (عمق ۱۵ متر)، قائم شمالی-جنوبی در طول ۱۷۰ متر و قائم شرقی-غربی در عرض ۲۲۵ متر.

۳-۵ نتایج مدل سازی

انتخاب مقدار ۰/۱ برای پارامتر همگنی سبب می شود تا مدل های به دست آمده کاملاً بارز و متمرکز باشند که این مساله از خصوصیات مفید این روش است، هرچند در صورت عدم اطلاع از ساختار درونی زمین، انتخاب مقدار صحیح این پارامتر را می توان با چند تکرار و بررسی نتایج به دست آورد. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل سازی با نوفه دو درصد ملاحظه می شود دو منشور از نظر راستا، عمق و ابعاد تا حد قابل قبولی مشخص و تعیین شده اند و خطای مدل سازی در حدود ۰/۱۵ میلی گال برآورد شد.

فصل چهارم

برداشت، پردازش و مدل سازی داده های کرانی

تونل معدنی دهلا-شاهرود

وسوله زیر سطحی نوادا آمریکا

۱-۴ محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی تونل‌های زیرسطحی بوده که در محدوده معدن آموزشی زغال‌سنگ دهملا واقع شده است. این منطقه در ۲۰ کیلومتری شمال غرب شاهرود در دامنه جنوبی البرز خاوری قرار دارد. (شکل ۱-۴). از جمله اختصاصات این محدوده، دارا بودن پدیده‌های مهم زمین‌شناسی، تونل‌های آموزشی معدنی زغال‌سنگ، دسترسی آسان و امکانات رفاهی می‌باشد (شکل ۲-۴، شکل ۳-۴ و شکل ۴-۴). دسترسی به محدوده مورد مطالعه از طریق جاده شوسه معدن آموزشی زغال‌سنگ دهملا که از جاده شاهرود-دامغان به سوی شمال جدا شده است ممکن می‌باشد.



شکل ۱-۴: موقعیت جغرافیایی محدوده معدن زغال‌سنگ دهملا و راه‌های دسترسی به منطقه (Google Earth 2015)



شکل ۲-۴: نمایی از اردوگاه آموزشی تفریحی دهملا



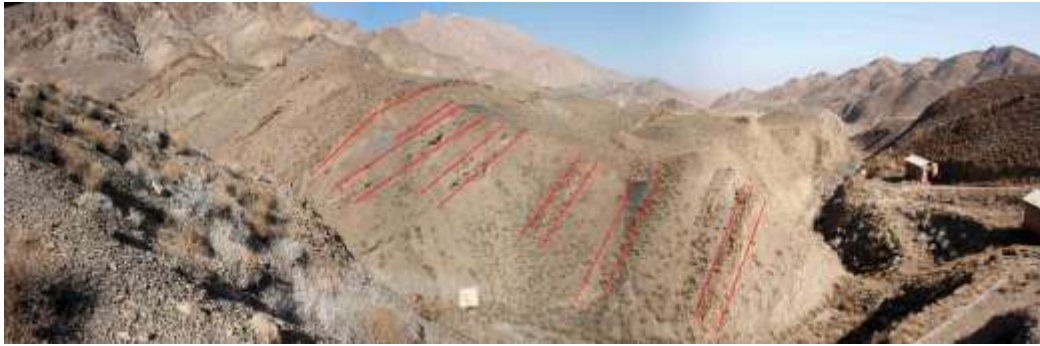
شکل ۳-۴: تونل معدنی آموزشی زغال سنگ (در سمت چپ محدوده) - دید به سمت غرب



شکل ۴-۴: تونل معدنی آموزشی زغال سنگ (محدوده مورد نظر) - دید به سمت شمال غرب

۲-۴ زمین شناسی منطقه

عمده فعالیت‌های سنگی محدوده مورد بررسی از نظر زمین شناسی وابسته به سازند شمشک می باشد. این سازند بعنوان یکی از گسترده ترین رسوبات شیلی / ماسه‌ای ایران و بسیاری از کشورهای دنیا، علاوه بر زغال خیزی، از غنی سازی عنصری همانند اورانیوم، روی، منگنز و غیره و همچنین پتانسیل هیدروکربن زایی خوبی، برخوردار است. لیتولوژی غالب محدوده شیلی، ماسه سنگ و لایه های زغال بوده که ماسه سنگ و شیلهای این سازند دارای ترکیب غالب کوارتز، فلدسپار و میکا می باشند (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵: توالی لایه‌های ماسه‌سنگ، شیل و زغال‌سنگ - دید به سمت شرق محدوده

حوضه‌های زغالی در ایران در دو بخش بزرگ زمین‌شناسی ایران یعنی البرز و ایران مرکزی با سن تریاس فوقانی تا ژوراسیک میانی گسترش یافته و اغلب در محیط‌های زمین‌ساختی فعال و عموماً ناودیس شکل (همانند ناودیس دهملا - منطقه مورد مطالعه) تشکیل شده‌اند. سازندهای نایبند و آق-دریوند در ایران مرکزی و کپه‌داغ و همچنین، سازند شمشک در حوضه البرز، دارندگان اصلی زغال-سنگ‌های ایران با سن مزوزوئیک میانی و همچنین لیتولوژی غالب شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سیلت به حساب می‌آیند.

سازند شمشک که یکی از گسترده‌ترین رسوبات زغال‌دار ایران را در اختیار دارد از لحاظ اقتصادی برای کشور ما از اهمیت بالایی برخوردار است. این سازند در منطقه مورد مطالعه نیز از گسترش قابل توجهی برخوردار می‌باشد (شکل ۴-۶).



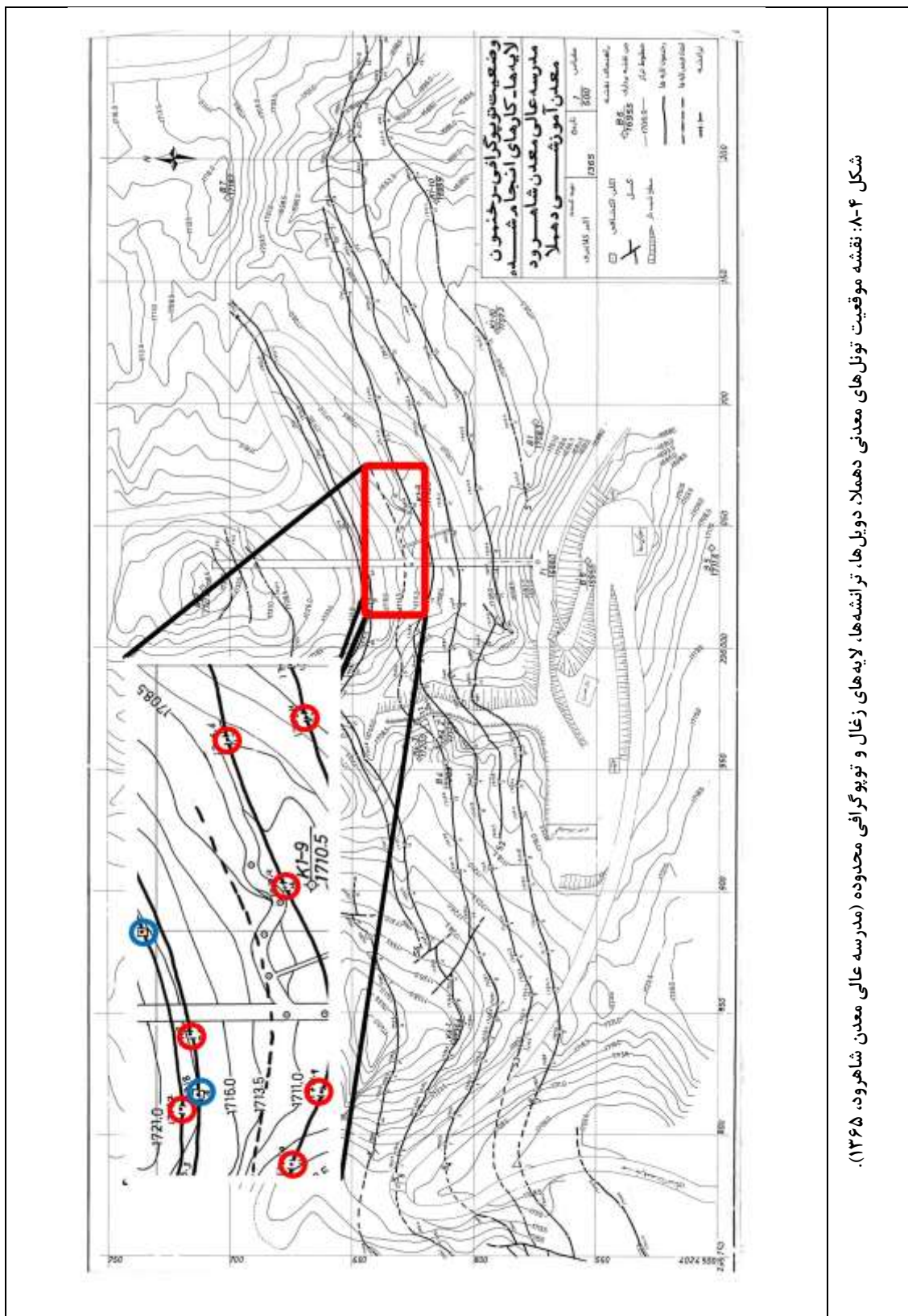
شکل ۴-۶: نمایی از رگه زغال سنگ در انتهای تونل دنباله لایه

طبق گزارش نیمه تفضیلی زغال سنگ البرز شرقی در سال ۱۳۶۰، زغال‌های سازند شمشک در منطقه مورد مطالعه ضخامت‌های متفاوتی را شامل می‌شوند که احتمالاً حضور گسل‌های فراوان به ویژه نوع رانده (گسل‌های شاهرود و مهماندوست) و گسستگی‌ها در این تغییر ضخامت نقش اصلی داشته، ضمن آنکه با تقسیم شدن بخش‌های مختلف زمین به بلوک‌های مختلف مشکلاتی در عملیات استخراجی آنها به وجود آمده است. ساختار مورد مطالعه یک تونل عمود بر امتداد لایه زغال بوده که در جهت شمال حفر شده و پس از طول ۴۰ متر از آن، یک انشعاب تقریباً شرقی-غربی به سمت شرق (دنباله لایه زغال سنگ) حفر شده است. همچنین بر روی سطح زمین دوپل‌هایی جهت استخراج لایه زغال سنگ و تهویه هوا حفر شده است (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷: نمایی از دویل‌های حفاری شده در سطح محدوده دهملا-دید به سمت جنوب

در محدوده‌ی مورد مطالعه، دو لایه‌ی زغال‌دار در راستای شرقی-غربی به همراه چندین ترانشه و حفاری‌های سطحی و نیز دو تونل اصلی و فرعی (شکل ۴-۸)، باعث پیچیده شدن مدل‌سازی داده‌های گرانی می‌شود، در نتیجه باید دقت کافی را در اندازه‌گیری داده‌ها و تصحیحات مربوط به آنها داشت.



شکل ۴-۸: نقشه موقعیت تونل های معدنی دهیلا، دویل ها، تزانسه ها، لاپه های زغال و توپوگرافی محدوده (مدرسه عالی معدن شاهرود، ۱۳۶۵).

۴-۳ برداشت داده‌های گرانی منطقه مورد مطالعه

در برداشت داده‌های گرانی‌سنجی به طور عمده از دو روش پروفیل‌زنی و شبکه‌ای استفاده می‌شود. در روش پروفیل‌زنی تغییرات پارامتر فیزیکی در راستای یک پروفیل در یک امتداد مشخص در سطح زمین انجام می‌پذیرد و نتایج به صورت یک مقطع یا برش ترسیم می‌گردد. در روش پیمایش شبکه‌ای داده‌های ژئوفیزیکی روی یک سری نقاط گرهی روی یک شبکه منظم با شکل هندسی مشخص یا نقاط پراکنده در یک محدوده برداشت شده و نتایج به صورت پربندی (کنتوری) ترسیم می‌شود. در تمام عملیات ژئوفیزیک اکتشافی زمینی یا هوایی که به منظور مشخص کردن محل توده بی‌هنجار و گسترش آن صورت می‌پذیرد، از برداشت‌های شبکه‌ای استفاده می‌شود. یکی از نیازهای اصلی در این گونه برداشت‌ها تعیین دقیق محل خطوط برداشت و ایستگاه‌های اندازه‌گیری است؛ که این کار توسط GPS های ایستگاهی و یا دوربین‌های نقشه‌برداری انجام می‌پذیرد. اگر اندازه شبکه برداشت (فاصله خطوط برداشت و ایستگاه‌ها) نسبت به ابعاد نهشته کانساری زیاد باشد یا ارتباط این فاصله‌ها با عمق دفن کانسار به صورت منطقی انتخاب نشده باشد؛ ممکن است قسمتی از اطلاعات ژئوفیزیکی مربوط به کانسار ثبت نشود؛ که در این صورت تفسیر نقشه‌های حاصل با خطا همراه خواهد بود (نوروزی، ۱۳۸۸).

در این مطالعه پس از بازدید و بررسی محدوده مورد نظر و با استفاده از اطلاعات و مشاهدات موجود و نیز با توجه به مدت زمان در نظر گرفته شده برای انجام پروژه، تعداد ۹ پروفیل با فاصله‌های ۵ متری از هم و به طول ۹۰ متر، عمود بر راستای تونل اصلی در قسمتی که شامل دوراهی تونل فرعی بود، در نظر گرفته شد. با توجه عمق بالای تونل و قطر متوسط آن، ایستگاه‌های اندازه‌گیری با فاصله‌های ۱/۵ متری از هم بر روی هر پروفیل طراحی شد.

با توجه به نیاز انجام تصحیحات ارتفاعی روی داده‌های گرانی، توپوگرافی نقاط اندازه‌گیری شبکه برداشت و همچنین عوارض طبیعی محدوده برداشت مورد نیاز است. در این راستا پس از طراحی

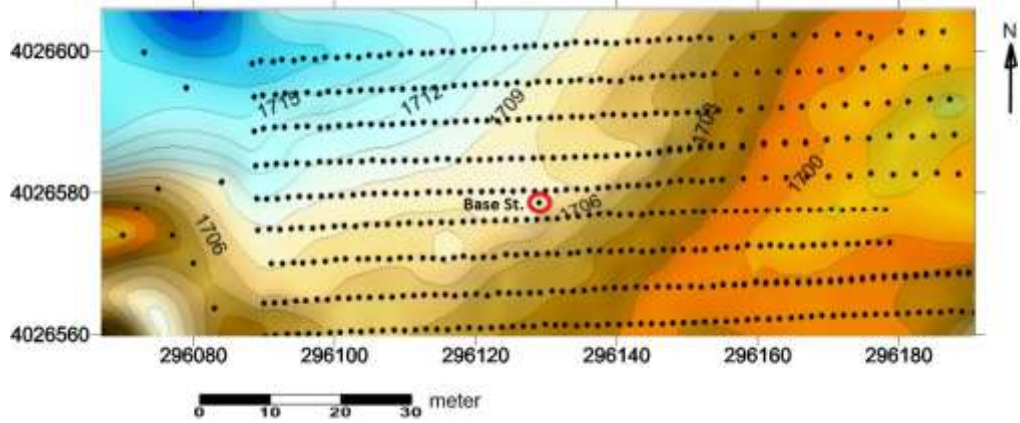
شبکه برداشت داده‌های گرانی، عملیات برداشت داده‌ها و همچنین نقشه‌برداری در محدوده مورد نظر انجام شد.

۴-۳-۱ تهیه مختصات ایستگاه‌ها و نقشه توپوگرافی منطقه

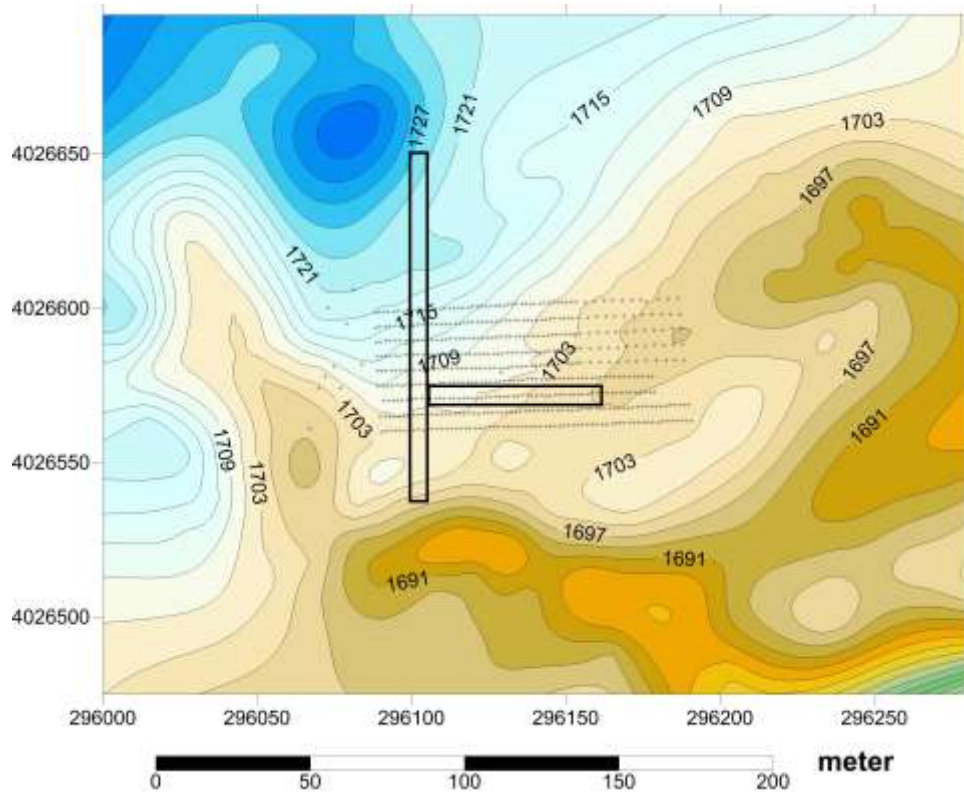
تعیین دقیق مختصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری گرانی جهت انجام تصحیحات آنها بسیار مهم است. همچنین اندازه‌گیری و آزمایش خواص و مشخصات زمین بدون در نظر گرفتن پارامتر موقعیت و مختصات آن بی‌فایده و ناقص بوده و لازم است که مختصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در یک سیستم شناخته شده ریاضی اندازه‌گیری و ثبت گردند. از این جهت مختصات تمامی ایستگاه‌های گرانی با دقتی که برآورد کننده نیازهای آن باشد محاسبه گردید. این مختصات شامل طول و عرض جغرافیایی ایستگاه و همچنین تصویر این مختصات در یک سیستم تصویری مشخص (UTM) می‌باشد. به منظور به دست آوردن مختصات نقاط گرانی قبل از برداشت گرانی، عملیات نقشه‌برداری با استفاده از یک دوربین توتال استیشن انجام شد (شکل ۴-۹ و شکل ۴-۱۰). همچنین تغییرات توپوگرافی محدوده مورد نظر به منظور استفاده در تصحیح توپوگرافی برداشت گردید (شکل ۴-۱۱).



شکل ۴-۹: برداشت داده‌های توپوگرافی و مختصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری



شکل ۴-۱۰: نقشه توپوگرافی محدوده برداشت و ایستگاه اندازه‌گیری



شکل ۴-۱۱: نقشه توپوگرافی زون نزدیک

۴-۳-۲ کالیبره کردن دستگاه گرانی‌سنجی

جهت بررسی کالیبراسیون دستگاه، قبل از شروع برداشت، گرانی‌سنج به مدت ۲۴ ساعت در یک نقطه ثابت در داخل آزمایشگاه روشن و تغییرات گرانی برای بررسی خطی بودن رانه دستگاه قرائت گردید.

بدین ترتیب میزان خطای بدست آمده، در طول برداشت روزانه با دستگاه به صورت خودکار بر روی داده‌ها اعمال شد.

۴-۳-۳ قرائت ایستگاه‌ها

پس از انجام نقشه‌برداری و تعیین محل پروفیل‌ها، برداشت ایستگاه‌های گرانی با گرانی‌سنج AUTOGRAV-CG5 انجام شد (شکل ۴-۱۲).



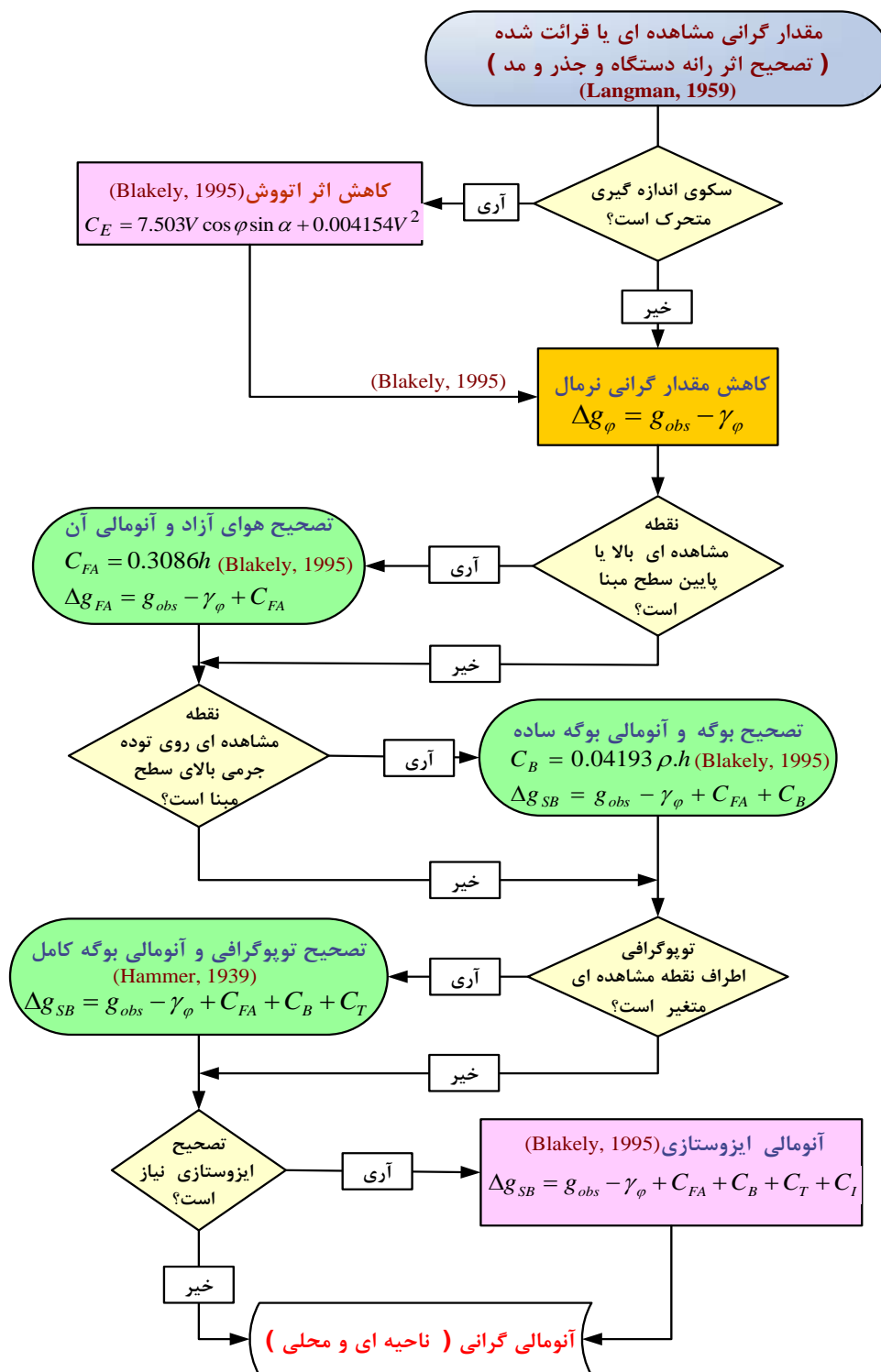
شکل ۴-۱۲: قرائت ایستگاه‌های گرانی در منطقه برداشت

مدت قرائت هر ایستگاه ۴۰ ثانیه تنظیم شد و انحراف معیار برای داده‌های برداشت شده به وسیله‌ی دستگاه در هر ایستگاه محاسبه شد. در صورتی‌که انحراف معیار عددی بیش از ۰/۰۱ می‌شد، قرائت تکرار می‌شد. به منظور دسترسی آسان، نقطه مبنا تقریباً در مرکز شبکه برداشت و در بین پروفیل چهارم و پنجم در نظر گرفته شد. بدین ترتیب در انتهای کار تعداد ۵۴۸ ایستگاه گرانی اندازه‌گیری شد.

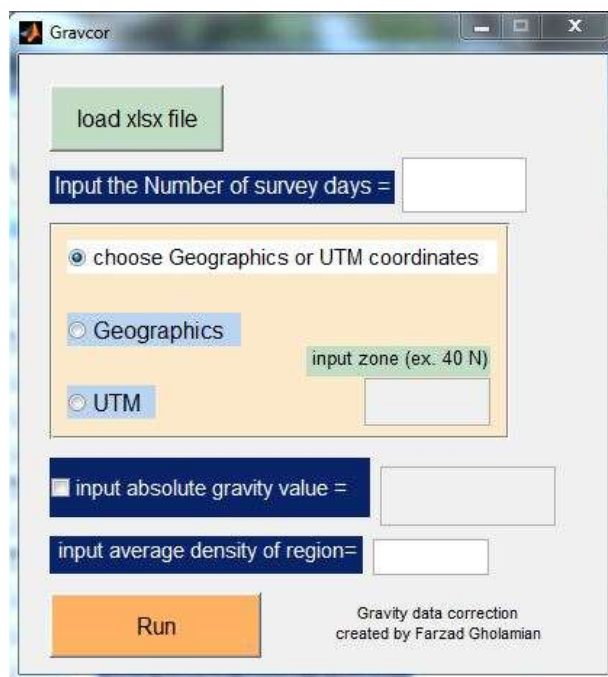
۴-۴ تصحیح داده‌های گرانی‌سنجی

همان‌طور که می‌دانیم شتاب جاذبه دقیقاً در همه جای سطح زمین یکسان نیست بلکه تحت تأثیر

چندین فاکتور است که در دو گروه عمده وابسته به زمان، مانند دریافت دستگاه و جزر و مد و وابسته به مکان، مانند ارتفاع نقاط از سطح میناء، عرض جغرافیایی، تخته‌ی بوگه، توپوگرافی و نهایتاً زمین-شناسی منطقه است. بنابراین برای به دست آوردن اطلاعات زمین‌شناسی باید تصحیحاتی از قبیل تصحیح دریافت، تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه و تصحیح توپوگرافی بر روی مقادیر اولیه اندازه‌گیری شده، اعمال شود (شکل ۴-۱۳). به همین منظور برای انجام تصحیحات لازم (رانه دستگاه، گرانی نرمال، هوای آزاد، تخته بوگه و عرض جغرافیایی)، یک برنامه گرافیکی "Gravcor" در محیط متلب نوشته شد که تمامی این مراحل را به صورت خودکار انجام می‌دهد (شکل ۴-۱۴).



شکل ۴-۱۳: فلوجارت تصحیح مقادیر گرانی مشاهده ای در ایستگاه اندازه گیری (آقاجانی، ۱۳۸۸)



شکل ۴-۱۴: برنامه گرافیکی Gravcor برای انجام تصحیح داده‌های گرانی‌سنجی در محیط متلب

۴-۴-۱ تصحیح رانه دستگاه

در صورتی که در یک برنامه گرانی‌سنجی پس از اندازه‌گیری در یک ایستگاه اصلی، مجدداً در انتهای برنامه این عمل اندازه‌گیری تکرار شود، نتیجه دو قرائت یکسان نبوده و با هم اختلاف خواهند داشت. این مقدار اختلاف، رانه دستگاه نام دارد؛ که عوامل مختلفی در ایجاد آن نقش دارند؛ که از مهمترین آنها خستگی و تغییر خواص الاستیسیته فنر گرانی‌سنج می‌باشد. از طرفی در اثر نیروهای جاذبه‌ی اجرام سماوی به ویژه ماه و خورشید مقدار گرانی اندازه‌گیری شده در طول شبانه روز با چرخش زمین و تغییر مکان اجرام سماوی تغییر می‌کند.

برای محاسبه رانه دستگاه در شروع کار و با انتخاب یک ایستگاه اصلی (مبنا)، مقدار گرانی آن اندازه‌گیری و سپس ایستگاه‌های فرعی برداشت شدند، سپس بطور متوسط هر دو ساعت یک بار به ایستگاه اندازه‌گیری مبنا مراجعه و اقدام به اندازه‌گیری مجدد آن شد. جهت انجام تصحیح رانه از رابطه آتی در محیط متلب استفاده شد:

$$\Delta g_{dc} = \frac{g_2 - g_1}{T_2 - T_1} (T_i - T_1) \quad (1-4)$$

در این رابطه g_1 ، گرانی قرائت شده مربوط به ایستگاه اصلی در شروع کار بر حسب میلی‌گال؛ g_2 ، گرانی قرائت شده مربوط به ایستگاه اصلی در خاتمه کار (یا پس از ۲ ساعت) بر حسب میلی‌گال؛ T_2 ، زمان اندازه‌گیری ایستگاه مبنا در زمان اول و T_2 در زمان دوم؛ T_i ، زمان اندازه‌گیری ایستگاه مربوطه. مقدار گرانی مطلق ایستگاه مبنا با دانستن مقدار گرانی مطلق نقطه‌ای در داخل دانشگاه شاهرود (روبروی سالن غذاخوری زیتون) و اندازه‌گیری‌های متوالی نسبی این دو ایستگاه و محاسبه اختلاف آنها، 979404.9737 میلی‌گال به دست آمد. برای مطلق‌سازی داده‌های برداشت شده از اختلاف مقدار نسبی بین آنها و ایستگاه مبنا و مقدار مطلق آن استفاده شد. بدین صورت که اگر این اختلاف منفی بود، به همان اندازه از مقدار مطلق ایستگاه مبنا کاسته می‌شد و بالعکس. مطلق‌سازی داده‌ها تاثیری در روند تصحیحات ندارد و تنها باعث می‌شود مقدار بوگه کامل نهایی یک مقدار استاندارد جهانی باشد.

چون عملیات برداشت صحرائی داده‌ها طی چهار روز انجام شد، نیاز بود تا بتوان داده‌هایی که در هر روز برداشت می‌شدند با هم قابل مقایسه باشند. بدین منظور در شروع و انتهای هر روز ابتدا ایستگاه مبنا قرائت می‌شد و میزان اختلاف آن با روز بعد محاسبه می‌گشت. این اختلاف به دست آمده بر روی همه‌ی داده‌های روز بعد اعمال می‌شد که در نتیجه باعث شد تمامی داده‌ها به گونه‌ای تصحیح شوند که گویی همه در یک روز برداشت شده‌اند.

۴-۲-۴ شتاب گرانی ناشی از بیضوی مرجع (گرانی نرمال)

در برداشت گرانی از آنجا که با توجه به هدف اکتشافی لازم است که تنها تغییرات گرانی ناشی از هدف مورد مطالعه مورد بررسی قرار گیرد، لذا باید با انجام تصحیحاتی اثر سایر عوامل مؤثر بر مقدار گرانی اندازه‌گیری شده حذف شود. به این ترتیب در گام نخست برای رسیدن به این هدف، ضروری است اثر گرانی نرمال از مقادیر داده‌های مشاهده‌ای حذف شود. برای این منظور سطح هم‌پتانسیلی

که منطبق به سطح آب‌های آزاد است به عنوان سطح مبنا در نظر گرفته می‌شود؛ که این سطح هم پتانسیل ژئوئید نامیده می‌شود. اما با توجه به این که سطح هم پتانسیل ژئوئید نامنظم و پیچیده است، به منظور ساده‌سازی در روابط از سطح بیضوی مرجعی که در یک توافق بین‌المللی پذیرفته شده است به عنوان سطح هم پتانسیل استفاده می‌شود و از اختلاف ناچیز بین سطح ژئوئید (سطح هم پتانسیل واقعی) و بیضوی مرجع (سطح هم پتانسیل فرضی) صرف نظر می‌شود.

با محاسبه‌ی پتانسیل گرانشی کل، گرانی نرمال در هر نقطه از زمین از گرادیان آن به دست می‌آید. به این منظور در سال ۱۹۸۰ میلادی انجمن ژئودزی (IAG) سیستم مرجع ژئودتیکی را ارائه کرد که در نهایت به سیستم مرجع ژئودتیک جهانی ۱۹۸۴ (WGS84) معروف شد؛ که رابطه کلی آن به صورت زیر است [Blakely, 1995]:

$$\gamma_{\Phi} = 9.7803267714 \frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2(\Phi)}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2(\Phi)}} \quad (2-4)$$

که در آن Φ عرض جغرافیایی ایستگاه اندازه‌گیری است.

با استفاده از رابطه (۲-۴) و مختصات عرض جغرافیایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری، گرانی نرمال تمام نقاط در برنامه متلب محاسبه و از داده گرانی مطلق مشاهده‌ای کسر گردیدند.

۴-۳-۴ تصحیح عرض جغرافیایی

مقادیر گرانی حتی اگر جرم‌های زیر زمین در همه جا یکسان می‌بود؛ باز هم در نقاط مختلف با هم فرق می‌کرد و این به خاطر اختلاف در عرض جغرافیایی هر نقطه خواهد بود. چون نیروی گرانی اندازه‌گیری شده مجموع جاذبه‌ی زمین و گریز از مرکز است و به دلیل اینکه نیروی گریز از مرکز در خلاف جهت جاذبه‌ی زمین و عمود بر محور دوران زمین است؛ لذا با توجه به اینکه نیروی گریز از مرکز در استوا بیشینه و در قطب‌ها کمینه (صفر) خود را دارا می‌باشد، شتاب جاذبه در استوا کمتر از قطب خواهد بود. به طوری که در استوا شتاب جاذبه حدود ۹۷۸ گال و در قطبین حدود ۹۸۳ گال

است.

رابطه زیر برای محاسبه‌ی شتاب گرانی در جهت شمال - جنوب برای عرض جغرافیایی مورد نظر داده می‌شود [Telford et al., 1991]:

$$\frac{dg_{\varphi}}{ds} = 0.811 \sin 2\varphi \frac{mGal}{km} \quad (3-4)$$

رابطه (۳-۴) مقادیر تغییرات گرانی را به ازای هر کیلومتر فاصله در روی زمین در راستای شمال- جنوب بر حسب میلی‌گال به دست می‌دهد. که در آن φ عرض جغرافیایی خط مبنا، ds تغییرات کیلومتری نقاط اندازه‌گیری نسبت به خط مبنا است. تصحیح عرض جغرافیایی برای هر نقطه‌ی گرانی اندازه‌گیری شده، نسبت به ایستگاه مبنا در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که هر دقیقه از تغییرات عرض جغرافیایی معادل فاصله‌ای در حدود $1/84$ کیلومتر روی سطح زمین است، می‌توان تغییرات گرانی زمین را برای هر ایستگاه واقع در فاصله $\Delta\gamma$ متر از ایستگاه مبنا با عرض جغرافیایی Φ به دست آورد. این تصحیح در صورتی که ایستگاه اندازه‌گیری در شمال ایستگاه مبنا قرار داشته باشد، مثبت (میدان گرانی زمین از استوا به طرف قطب افزایش پیدا می‌کند) و در حالتی که ایستگاه اندازه‌گیری در جنوب ایستگاه مبنا واقع شده باشد، منفی است. مقداری که بدین ترتیب به دست می‌آید، از مقدار گرانی ایستگاه اندازه‌گیری واقع در شمال ایستگاه مبنا کم می‌شود و در حالت عکس به مقدار گرانی ایستگاه اندازه‌گیری اضافه می‌شود. به منظور انجام این تصحیح، همه‌ی داده‌ها نسبت به پایین‌ترین عرض جغرافیایی (عرض $36/362547$ شمالی) در محدوده‌ی اکتشافی منظم شدند و سپس با استفاده از رابطه (۳-۴) مقدار تصحیح عرض جغرافیایی محاسبه شد. چون همه‌ی داده‌ها به عرض پایین‌تر یعنی خط مبنا منتقل شده‌اند، لذا مقدار تصحیح هر ایستگاه از گرانی مشاهده‌ای ایستگاه مربوطه کم گردید.

۴-۴-۴ تصحیح ارتفاعی (هوای آزاد + بوگه)

معمولاً ایستگاه‌های گرانی با ارتفاع‌های مختلفی اندازه‌گیری می‌شوند. اختلاف ارتفاع‌ها، سبب تغییراتی در شتاب جاذبه اندازه‌گیری شده می‌شوند. با انجام تصحیح ارتفاعی کلیه مقادیر اندازه‌گیری شده به

یک سطح مبنا انتقال داده می‌شود. تصحیح ارتفاعی دارای دو مولفه است: الف- تصحیح هوای آزاد
ب- تصحیح بوگه.

ز- تصحیح هوای آزاد

با توجه به این که مقدار شتاب جاذبه به صورت فرمول $g = G \frac{m}{r^2}$ روی سطح مبنا معین می‌شود، هرچه از این سطح مبنا به اندازه h ، به طرف بالا حرکت کنیم، مقدار شتاب جاذبه طبق رابطه $g = G \frac{m}{(r+h)^2}$ کاهش خواهد یافت (تلفورد، ۱۹۹۱). اختلاف دو شتاب جاذبه تاثیر هوای آزاد

می‌باشد. تصحیح هوای آزاد را می‌توان با مشتق‌گیری از رابطه $g = G \frac{m}{r^2}$ نسبت به r محاسبه نمود:

$$g = G \frac{m}{r^2} \quad (۴-۴)$$

$$dg = -2g \frac{h}{r} \quad (۵-۴)$$

اگر شعاع متوسط زمین ۶۳۶۷۰۰۰ متر در نظر گرفته شود و با توجه به مقدار تئوری گرانی در سطح دریا و عرض جغرافیایی ۴۵ درجه (۹۸۰۶۲۹ میلی‌گال)، در این صورت خواهیم داشت:

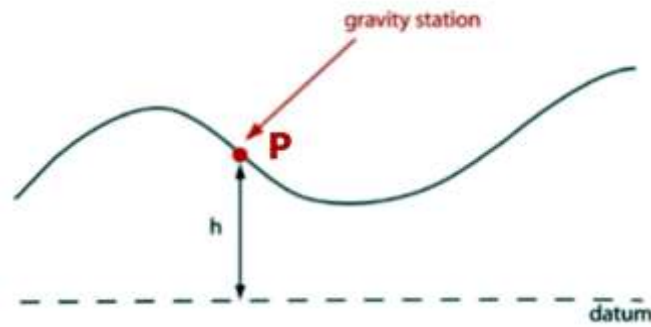
$$dg = -2g \frac{h}{r} = \frac{-2 \times 980629}{6.367 \times 10^6} \times h \quad (۶-۴)$$

$$dg = \partial g_{fa} = -0.3083 \times h \quad (۷-۴)$$

که در آن h ، ارتفاع ایستگاه‌ها نسبت به سطح مبنا بر حسب متر و dg_{fa} ، تصحیح هوای آزاد بوده و بر حسب میلی‌گال به دست می‌آید. در ایران مقدار تصحیح هوای آزاد ۰/۳۰۸۶ در نظر گرفته می‌شود:

$$\partial g_{fa} = -0.3086 \times h(mgal) \quad (۸-۴)$$

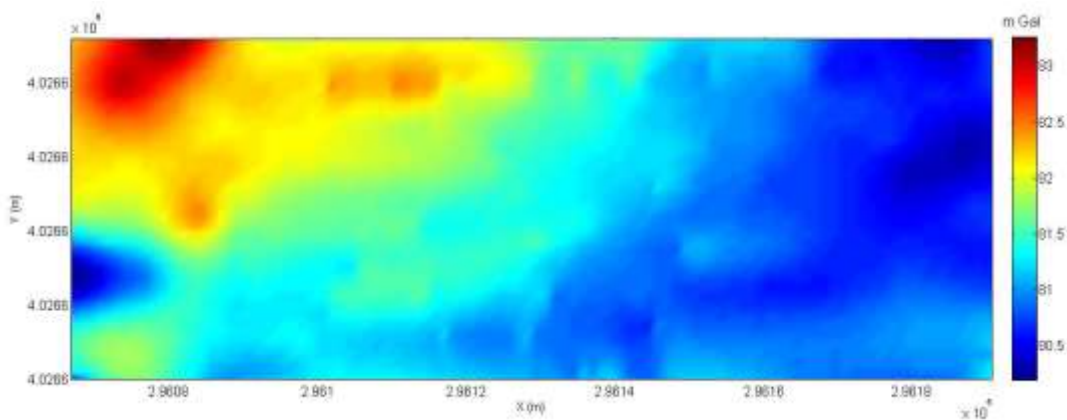
که در آن g_{fa} ؛ بی‌هنجاری هوای آزاد بر حسب میلی‌گال است و h اختلاف ارتفاع نقطه‌ی اندازه‌گیری از سطح دریا بر حسب متر است.



شکل ۴-۱۵: تصحیح هوای آزاد؛ P نقطه‌ی مشاهده‌ای و h ارتفاع از سطح دریا [Reynolds, 1997].

مطابق رابطه (۴-۸)، وقتی ارتفاع ایستگاهی افزایش می‌یابد، مقدار گرانی اندازه‌گیری شده نیز در هر متر به اندازه 0.3086 کاهش می‌یابد. بنابراین با اعمال این تصحیح تمام ایستگاه‌های اندازه‌گیری به یک سطح مبنا انتقال می‌یابند. اگر نقطه اندازه‌گیری بالاتر از سطح دریاهای آزاد باشد، تصحیح هوای آزاد به مقدار گرانی قرائت شده اضافه می‌گردد. چنانچه نقطه اندازه‌گیری پایین‌تر از سطح دریا باشد، این مقدار تصحیح از مقادیر قرائت شده کم می‌شود.

تصحیح هوای آزاد مطابق رابطه (۴-۸) در محیط متلب انجام شد و همگی داده‌ها به سطح مبنا که سطح آب‌های آزاد است، منتقل شد. از آنجا که سطح ارتفاع محدوده برداشت بالاتر از سطح آب دریا بوده، در نتیجه مقدار تصحیح هوای آزاد به داده‌های تصحیح شده از مرحله قبل اضافه گشت (شکل ۴-۱۶).



شکل ۴-۱۶: نقشه بی‌هنجاری هوای آزاد محدوده تونل دهملا

ح- تصحیح بوگه

فرض می‌شود که فضای بین دو صفحه افقی توسط موادی با چگالی ρ پر شده باشد. جرم محصور بین دو سطح نیز روی مقادیر اندازه‌گیری شده تاثیر خواهد گذاشت؛ که باید تاثیرات این جرم از مقادیر قرائت شده حذف شود و تصحیح مربوط به جاذبه این مواد با در نظر گرفتن یک تخته سنگ با گسترش طول و عرض بی‌نهایت و ضخامت h و با استفاده از فرمول زیر محاسبه شود (شکل ۴-۱۷).

$$\delta g_b = 2\pi G \rho h \quad (۹-۴)$$

اگر از شتاب جاذبه نسبت به h مشتق گرفته شود در نتیجه:

$$\frac{dg_b}{dh} = 2\pi G \rho \quad (۱۰-۴)$$

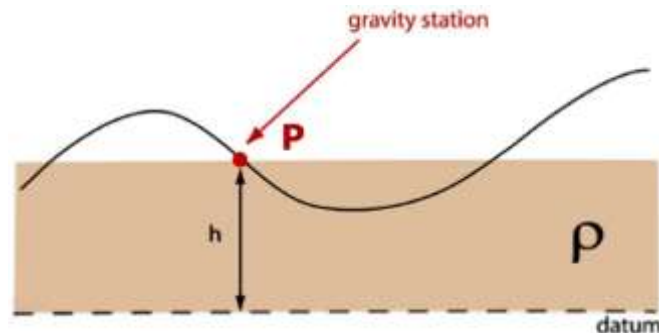
اگر به جای G مقدار ثابت آن قرار داده شود؛ رابطه (۴-۱۰) به صورت ساده زیر در می‌آید:

$$\frac{dg_b}{dh} = 0.0419 \rho \quad (۱۱-۴)$$

اگر فرض شود $dh = h$ بنابراین خواهیم داشت:

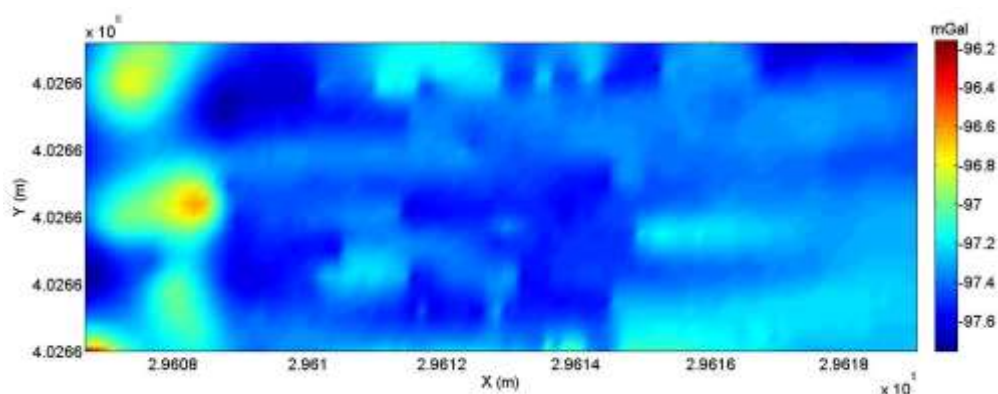
$$\partial g_b = 0.0419 \rho h \quad (\text{mgal}) \quad (۱۲-۴)$$

که در آن ρ ، چگالی رسوبات منطقه بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و h اختلاف ارتفاع نقطه‌ی اندازه‌گیری از سطح دریا بر حسب متر می‌باشد. اگر نقطه اندازه‌گیری بالاتر از سطح مبنا باشد، تصحیح بوگه از مقدار گرانی کم می‌شود و چنانچه نقطه اندازه‌گیری پایین‌تر از سطح مبنا باشد، این مقدار تصحیح به مقادیر قرائت شده اضافه می‌شود.



شکل ۴-۱۷: تصحیح تخته بوگه، P نقطه‌ی مشاهده‌ای و h ارتفاع از سطح دریا [Reynolds, 1997].

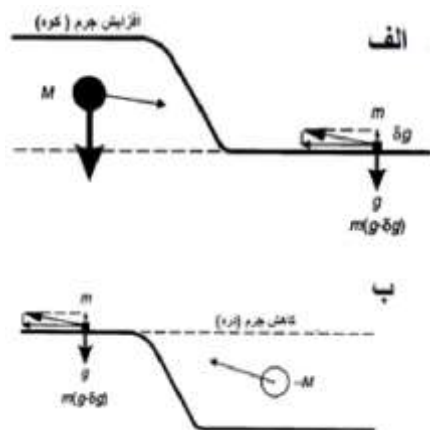
برای انجام تصحیح بوگه نیاز به متوسط چگالی منطقه است که بر اساس اطلاعات زمین-شناسی منطقه و وجود ساختارهای شیل و ماسه‌سنگ و زغال، در حدود ۲/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب در نظر گرفته شد. اثر گرانی تخته‌ی بوگه مطابق رابطه (۴-۱۲) در محیط متلب محاسبه شد و از مقادیر بی‌هنجاری هوای آزاد کم گردید (شکل ۴-۱۸).



شکل ۴-۱۸: نقشه بی‌هنجاری بوگه ساده محدوده دهملا

۴-۴-۵ تصحیح توپوگرافی

تصحیح بوگه گفته شده با فرض افقی بودن سطح زمین و پر شدن فاصله بین سطح ژئوئید و سطح زمین از مواد با چگالی ρ_b صورت گرفت، اما ممکن است در اطراف هر ایستگاه اندازه‌گیری نسبت به سطح افقی که از ایستگاه اندازه‌گیری می‌گذرد، سطح زمین دارای دره (حذف قسمتی از حجم مواد با چگالی ρ_b) و کوه (اضافه شدن حجمی از مواد با چگالی ρ_b) باشد. جاذبه اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه تحت تاثیر جرم‌های ناشی از تپه‌ها و دره‌ها قرار خواهد گرفت. پس علاوه بر تصحیح بوگه، بایستی اثرات این بی‌نظمی‌ها بر روی ایستگاه اندازه‌گیری با استفاده از تصحیح توپوگرافی محاسبه شود (شکل ۴-۱۹). با تقسیم توپوگرافی اطراف هر نقطه اندازه‌گیری به زون‌های دور و نزدیک، مقدار تصحیح در هر زون که همواره مثبت بوده محاسبه شده و به گرانی قرائت شده در هر ایستگاه اضافه می‌گردد [Reynolds, 1997].



شکل ۴-۱۹: اثر میدان جاذبه توپوگرافی اطراف یک ایستگاه روی مقدار گرانی اندازه‌گیری شده الف- اثر کوه ب- اثر دره [Reynolds, 1997].

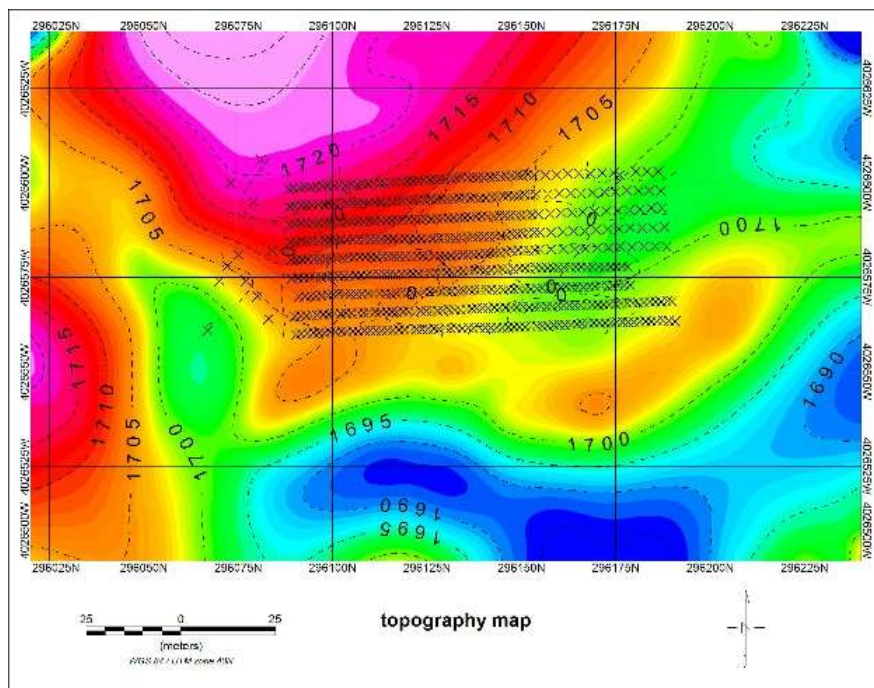
برای زون نزدیک، اثر گرانی هر یک از نقاط اطراف ایستگاه اندازه‌گیری از رابطه زیر استفاده می‌شود [Nagy, 1996]:

$$g = GD\phi \left(R - \sqrt{R^2 + H^2} + \frac{H^2}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right) \quad (۱۳-۴)$$

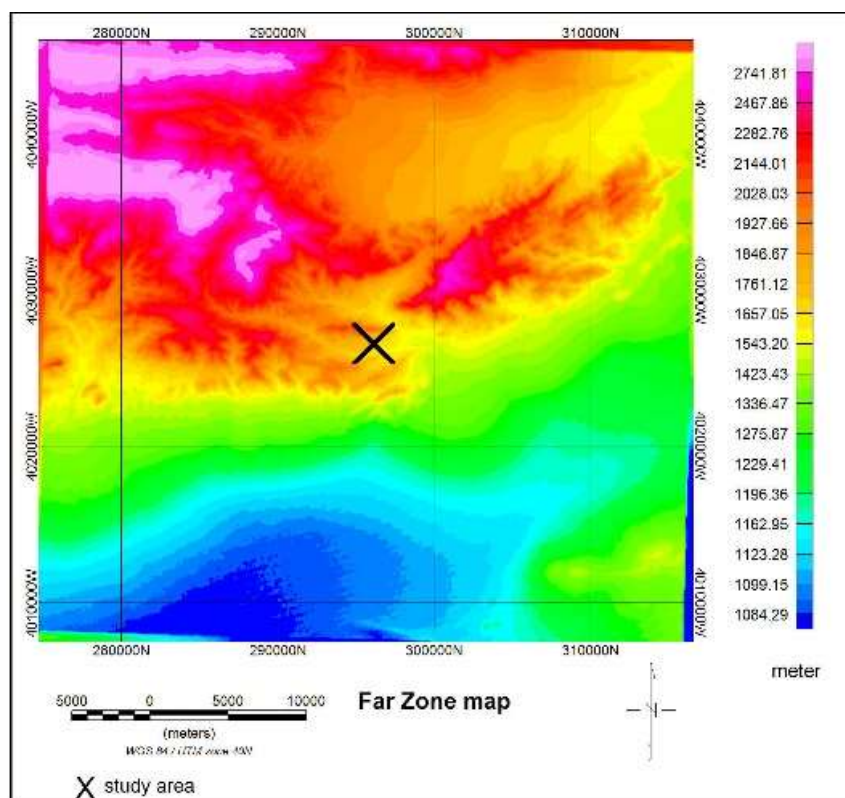
برای زون دور، اثر گرانی هریک از نقاط اطراف ایستگاه اندازه‌گیری با استفاده از منشور مربعی و با فرمول زیر محاسبه می‌شود [Kane, 1962]:

$$g = -GD \begin{vmatrix} z_2 & y_2 & x_2 \\ z_1 & y_1 & x_1 \end{vmatrix} x \cdot \ln(y + R) + y \cdot \ln(x + R) + Z \arctan \frac{Z \cdot R}{x \cdot y} \quad (۱۴-۴)$$

در این پژوهش برای تصحیح توپوگرافی منطقه، از داده‌های نقشه‌برداری با دوربین برای زون نزدیک و از داده‌های DEM با دقت ۳۰ متر برای زون دور (شکل ۴-۲۰ و شکل ۴-۲۱) در نرم‌افزار ژئوسافت استفاده شد.



شکل ۴-۲۰: نقشه توپوگرافی زون نزدیک منطقه دهملآ - شاهرود

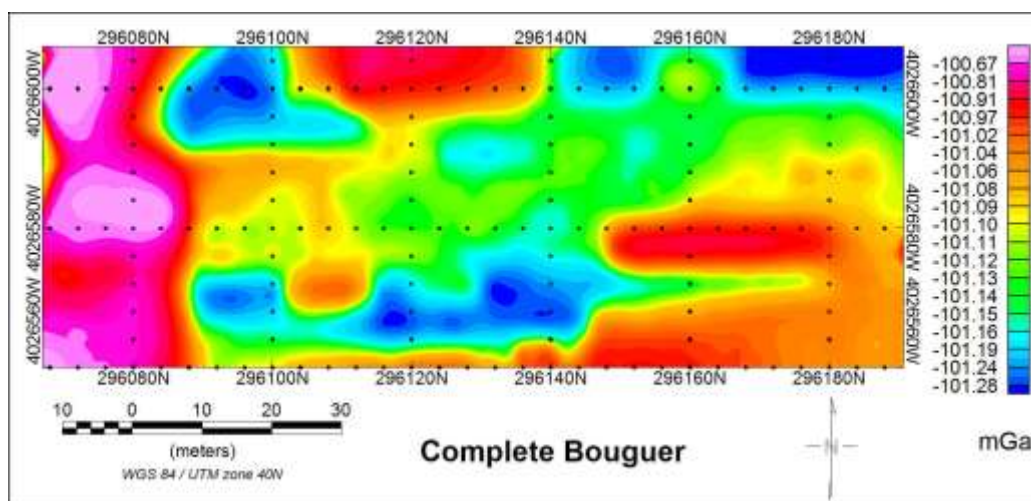


شکل ۴-۲۱: نقشه توپوگرافی زون دور

۴-۴-۶ نقشه بی‌هنجاری بوگه

هدف نهایی از برداشت‌های گرانی دستیابی به مقادیری است که بی‌هنجاری بوگه نامیده می‌شود. مقدار بی‌هنجاری بوگه تابعی از اختلاف چگالی سنگ‌ها و مواد و حجم آن‌ها است. بدین ترتیب با این پارامتر می‌توان اهدافی را شناسایی کرد؛ که دارای اختلاف چگالی مشخص با سنگ‌های میزبان اطراف خود باشند. باید توجه داشت که اثر افزایش اختلاف چگالی روی شدت بی‌هنجاری بوگه بسیار بیشتر از اثر افزایش حجم هدف مورد مطالعه است.

پس از برداشت داده‌های گرانی و اعمال تصحیحات مربوطه، نقشه بی‌هنجاری بوگه کامل محاسبه و ترسیم شد (شکل ۴-۲۲). بی‌هنجاری بوگه کامل ناشی از اثرات ساختارهای سطحی و عمیق می‌باشد که با توجه به هدف مورد نظر و با استفاده از روش‌های ریاضی و آماری، باید این دو اثر را از هم تفکیک نمود.



شکل ۴-۲۲: نقشه بی‌هنجاری بوگه کامل - محدودی معدنی دهملا

۴-۵ پردازش و تفسیر داده‌های گرانی منطقه دهملا

۴-۵-۱ مقدمه

مقدار گرانی بوگه از اثرات زمین‌شناسی زیادی به‌دست می‌آید. هر الگوی دیده شده در نقشه گرانی

بوگه مجموع گرانی‌های منابع محلی (نزدیک به سطح) و منابع منطقه‌ای (عمیق‌تر) است. به همین علت در اغلب موارد بی‌هنجاری‌های ساختمان‌های مورد توجه، به وسیله بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای پنهان می‌شود.

نقشه‌ی بی‌هنجاری بوگه داده‌های گرانی، مجموع اثرات توده‌هایی با چگالی متفاوت در اعماق مختلف می‌باشد که تأثیرات سنگ بستر با تغییرات خطی و ملایم مشخص می‌شوند. این اثرات خطی، بی‌هنجاری ناحیه‌ای نامیده می‌شوند. بی‌هنجاری ناحیه‌ای دارای فرکانس پایین و طول موج بلند می‌باشند، در حالی که بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده که به دلیل وجود اجسام زیرسطحی کم عمق هستند، دارای فرکانس بالا و طول موج کوتاه می‌باشند.

مطابق شکل (شکل ۴-۲۲)، در نقشه‌ی بی‌هنجاری بوگه کامل داده‌های گرانی محدوده‌ی مورد مطالعه، تعدادی ناحیه با مقدار گرانی منفی و آبی رنگ دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از ساختارهای کم چگال زیرسطحی باشد. برای تفکیک بهتر بی‌هنجاری‌های منطقه، از روش‌های مختلف مانند روند سطحی، گسترش به سمت بالا، مشتقات، فیلترهای فازی و تخمین عمق اولر استفاده گردید و نقشه-ی هر کدام رسم گردید.

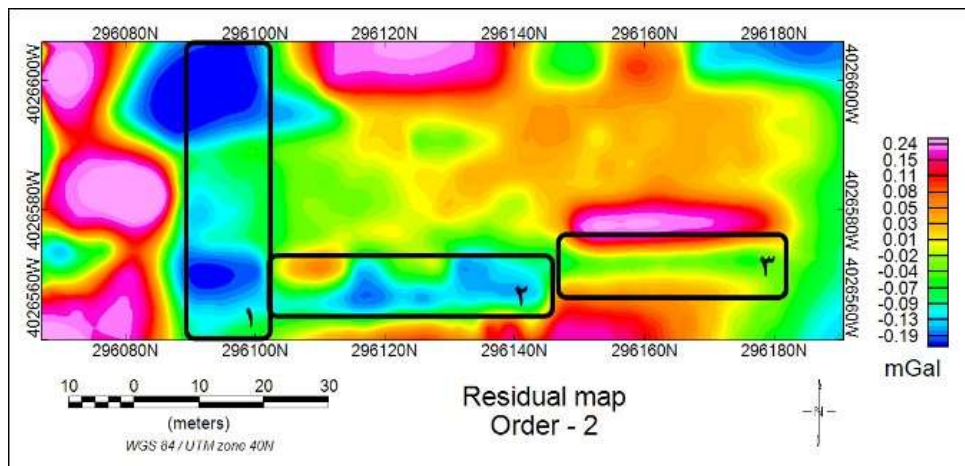
۴-۵-۲ روند سطحی

یکی از انعطاف پذیرترین روش‌های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای، روش روند سطحی است. در این روش، میدان ناحیه‌ای از مقادیر مشاهده‌ای به وسیله روش کمترین مربعات تقریب زده می‌شود. این روش براساس محاسبه سطحی (به روش ریاضی) استوار است که بهترین تطابق را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای داشته باشد.

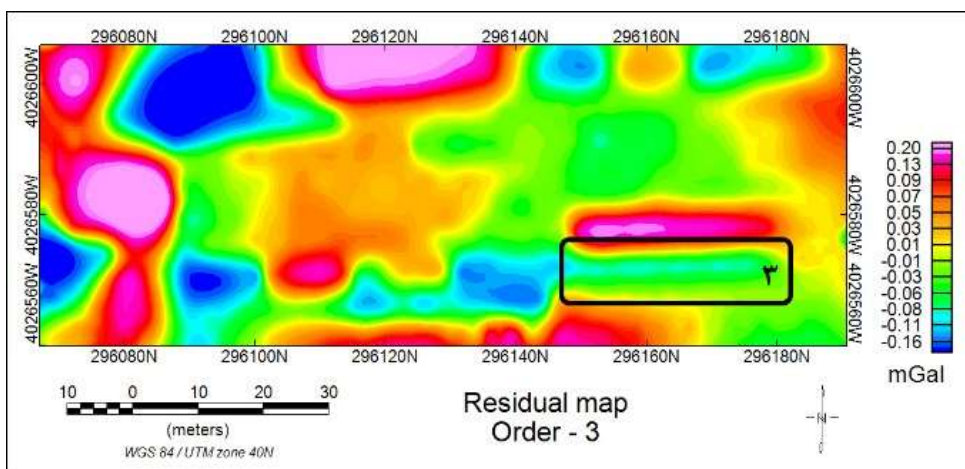
در این روش بر داده‌های گرانی مشاهده‌ای سطحی عبور داده می‌شود که پیچیدگی معادله ریاضی سطح مورد نظر به روند حاکم بر داده‌ها بستگی دارد. درجه روند سطحی به پیچیدگی زمین‌شناسی ناحیه‌ای بستگی دارد. از درجه روند سطحی بیشتر برای همپوشانی بین مقادیر سطح مزبور و مقادیر

داده‌های مشاهده‌ای در شرایط پیچیده‌تر زمین‌شناسی استفاده می‌شود.

برای تفکیک بی‌هنجاری‌ها با استفاده از این روش، در نرم افزار ژئوسافت (Geosoft) نقشه بی‌هنجاری بوگه ناحیه‌ای با اعمال روش روند سطحی در دو روند متفاوت ۲ و ۳ مورد تفکیک قرار گرفت و نقشه‌های باقی‌مانده‌ی حاصل از آن‌ها در شکل‌های (شکل ۴-۲۳) و (شکل ۴-۲۴)، آورده شده است. نقشه‌های باقی‌مانده به‌خوبی روند بی‌هنجاری محلی منطقه را مشخص می‌کنند که با بی‌هنجاری بوگه نیز تطابق خوبی دارد.



شکل ۴-۲۳: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده درجه ۲



شکل ۴-۲۴: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده درجه ۳

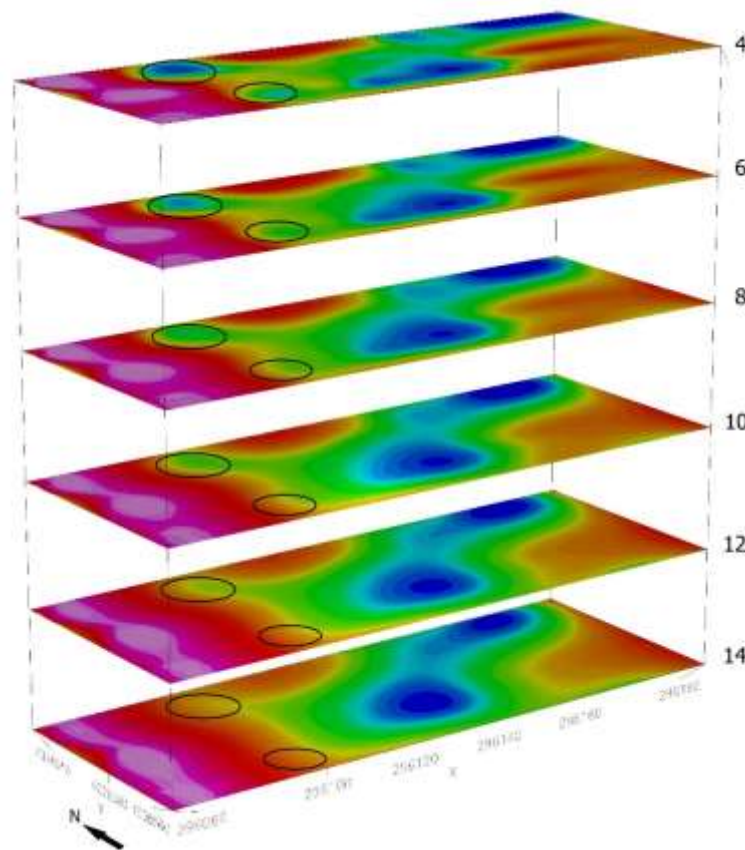
با توجه به نقشه باقیمانده (شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴) چندین بی‌هنجاری مثبت و منفی در شکل قابل تفکیک می‌باشند. از آنجا که مورد مطالعه تونل معدنی، دوپیل‌های حفاری شده و لایه زغال‌دار می‌باشند و اینگونه ساختارها دارای تباین چگالی منفی نسبت به زمینه اطراف خود هستند. در نتیجه محل‌های کم‌چگال آبی رنگ موقعیت این آثار را نشان می‌دهند. در مختصات طولی ۲۲۹۶۰۹۲ متر (محدوده شماره ۱ در شکل ۴-۲۳) که راستای تونل اصلی را تعیین کرده است، دو بی‌هنجاری با تباین چگالی منفی بالا در ابتدا و انتهای تونل مشاهده می‌شود. این دو بی‌هنجاری انطباق بسیار خوبی با دوپیل‌های حفاری شده در این ناحیه از منطقه برداشت دارد. همچنین در عرض جغرافیایی ۴۰۲۶۵۶۷ متر و از طول ۲۹۶۰۹۲ تا ۲۹۶۱۴۴ متر (محدوده شماره ۲ در شکل ۴-۲۳) راستای تونل فرعی را می‌توان با دقت خوبی شناسایی نمود. در قسمت ابتدایی تونل فرعی نیز یک دوپیل حفاری شده وجود دارد که اثر آن در نقشه باقیمانده مشخص شده است. از آنجا که تونل فرعی یک تونل دنباله است و درون لایه زغال‌دار حفر شده است، در مختصات عرضی ۴۰۲۶۵۷۰ متر و طول ۲۹۶۱۴۴ تا ۲۹۶۱۷۴ متر (محدوده شماره ۳ در شکل ۴-۲۴)، یک ناحیه باریک کم‌چگال دیده می‌شود که با توجه به تونل دنباله لایه‌ی حفر شده و توالی لایه بندی‌های شیل، زغال و ماسه‌سنگ (سازند شمشک) می‌توان نتیجه گرفت که این ناحیه ادامه لایه زغال‌دار باشد.

۴-۵-۳ روش گسترش میدان گرانی به سمت بالا

یکی از روش‌های تفکیک بی‌هنجاری میدان‌های پتانسیل، روش گسترش به سمت بالا می‌باشد. با کاربرد این روش تأثیرات سطحی حذف شده و تأثیرات عمیق به وضوح مشخص می‌گردند. در این روش داده‌های میدان پتانسیل به وسیله معادلات ریاضی از یک سطح مبنا بر روی سطوح ترازوی در بالای آن تصویر می‌شوند. در نقشه‌های به‌دست آمده با استفاده از این روش، هرچه از سطح مبنا دور شویم، بی‌هنجاری‌های کوچک با طول موج کوتاه ضعیف شده و در نتیجه بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای با

طول موج بلند باقی می‌ماند.

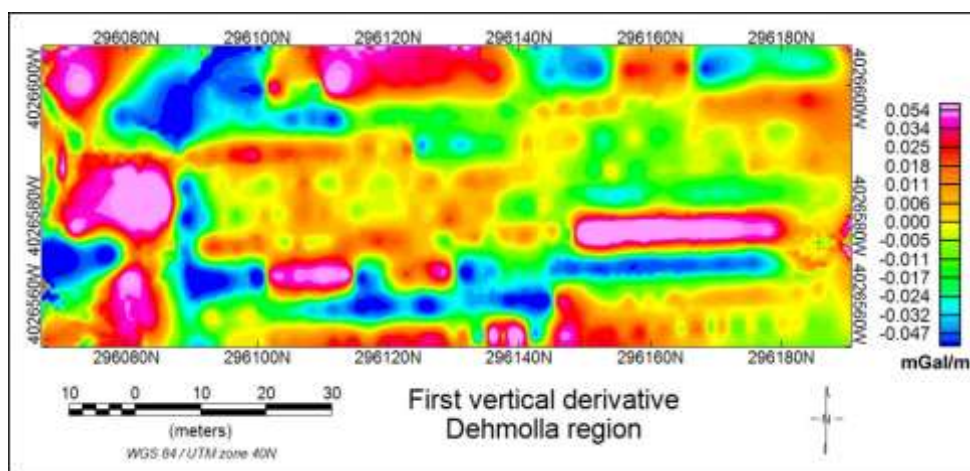
با استفاده از نرم‌افزار Geosoft، روش گسترش میدان گرانی به سمت بالا در ارتفاع‌های مختلفی از ۴ تا ۱۴ متری به فواصل ۲ متری بر روی نقشه بی‌هنجاری بوگه اعمال و نقشه‌ی آن‌ها رسم گردید. (شکل ۴-۲۵). نقشه‌های حاصل از این روش در ارتفاع‌های بیش از ۱۴ متر به بالا، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و این موضوع بیانگر این مطلب است که توده‌ی بی‌هنجار از ریشه بالایی برخوردار نبوده و جزء توده‌های سطحی محسوب می‌شود. در واقع در ارتفاعات بالاتر که به صورت روند خطی است، مربوط به اثرات ناحیه‌ای می‌باشد که تا عمق بالا گسترش یافته و بی‌هنجاری محلی منطقه به‌طور کامل حذف شده است.



شکل ۴-۲۵: نقشه فیلتر ادامه فراسو در ارتفاع‌های ۴ الی ۱۴ متری با فاصله ۲ متر.

۴-۵-۴ فیلتر مشتق قائم

با توجه به این نکته که بر روی مرز بی‌هنجاری، مشتق قائم صفر می‌باشد می‌توان از نتایج این فیلتر، برای تخمین مرز استفاده کرد. این روش به عنوان یک ابزار مناسب جهت آشکارسازی مولفه‌های میدان پتانسیل با طول موج کوتاه‌تر مربوط به بی‌هنجاری‌های کم عمق می‌باشد. با اعمال این فیلتر بر روی داده‌های گرانی منطقه مورد مطالعه (شکل ۴-۲۶)، مرز دو راستای تونل اصلی و فرعی با دقت قابل قبولی تعیین شده است، همچنین مرز لایه زغال‌دار در انتهای تونل فرعی نیز به خوبی بارز گردیده است. در نتیجه فیلتر مشتق قائم به خوبی مرز بی‌هنجاری مورد نظر را شناسایی کرده و به تفسیر آن کمک نموده است.

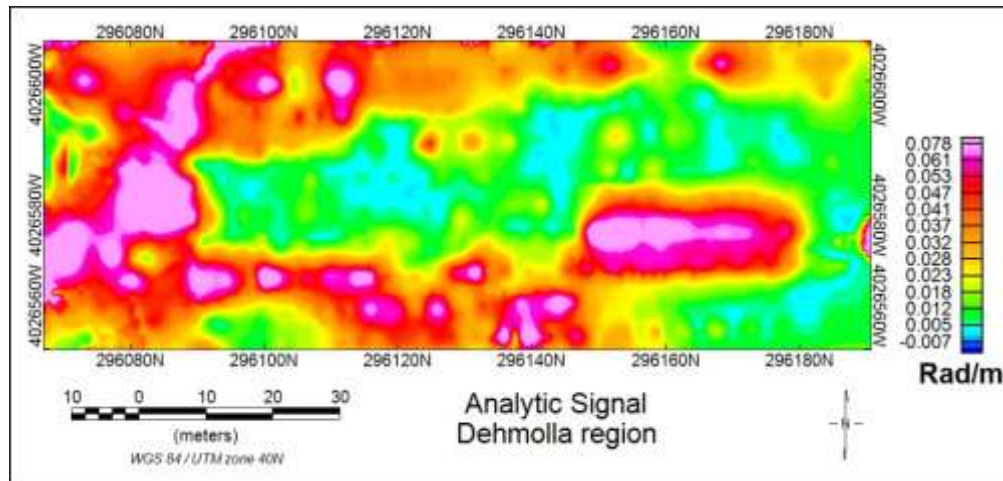


شکل ۴-۲۶: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم بر روی داده‌های گرانی منطقه دهمللا

۴-۵-۵ فیلتر سیگنال تحلیلی

با توجه به مفاهیم گفته شده در مورد سیگنال تحلیلی جهت تعیین مرز بی‌هنجاری‌ها، از این فیلتر برای شناسایی مرز تونل‌های معدنی استفاده شد (شکل ۴-۲۷). از آنجا که راستای بی‌هنجاری‌ها در امتداد شمالی-جنوبی و شرقی-غربی بوده و در تابع فیلتر سیگنال تحلیلی ترکیب مشتقات افقی و قائم وجود دارد؛ نقشه به دست آمده همانند نقشه مشتق قائم موفق به شناسایی مرز ساختارهای مورد نظر

نشده است. همچنین به دلیل نوفه‌ی موجود در داده‌های برداشت شده، محاسبه مشتقات افقی و قائم باعث تشدید این نوفه شده و مرزهای بی‌هنجاری به درستی تعیین نشده است.

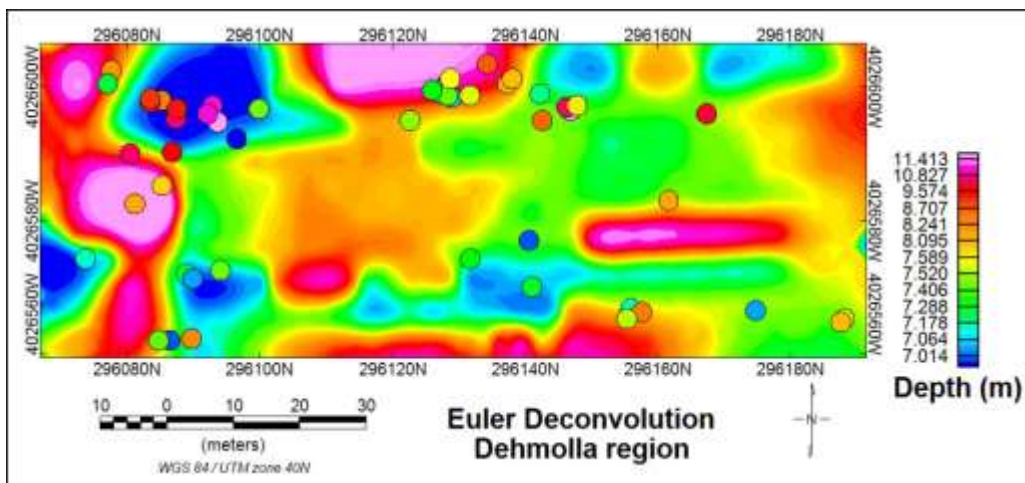


شکل ۴-۲۷: نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های گرانی منطقه دهملا

۴-۵-۶ تخمین عمق با استفاده از روش اویلر دیکانولوشن

همان‌طور که گفته شد، روش اویلر یک روش خودکار در تخمین عمق است و معمولاً برای بررسی یک حجم وسیع از داده‌ها به کار می‌رود. یکی از تفاوت‌های عمده روش اویلر با سایر روش‌های دیگر تخمین عمق، این است که در این روش هیچ فرض خاصی در مورد نوع ساختار زمین‌شناسی مورد مطالعه لحاظ نمی‌شود.

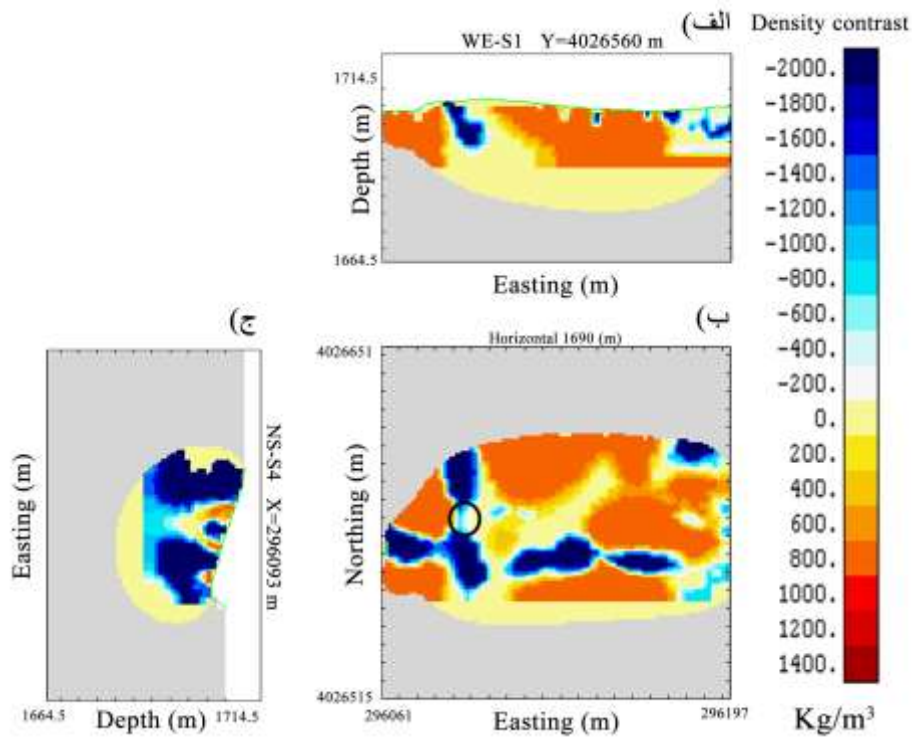
پس از تعیین مرز تونل‌های معدنی در این قسمت، با استفاده از روش اویلر دیکانولوشن عمق این ساختارها به طور کمی تخمین زده شد. در روش اویلر از ضریب ساختاری ۱ و اندازه‌ی پنجره‌ی 3×3 با توجه به مقدار اندازه شبکه‌بندی اولیه نقشه بوگه، استفاده شد. در شکل (شکل ۴-۲۸) نتایج روش اویلر مشخص شده است؛ که حداکثر عمق تخمین زده شده $11/5$ متر می‌باشد. از آنجا محدوده دارای دویل‌های سطحی متعدد بوده و ساختارهای نزدیک به سطح در آن زیاد بود، تخمین عمق تا حد قابل قبولی عمق بالای تونل اصلی را تعیین کرد.



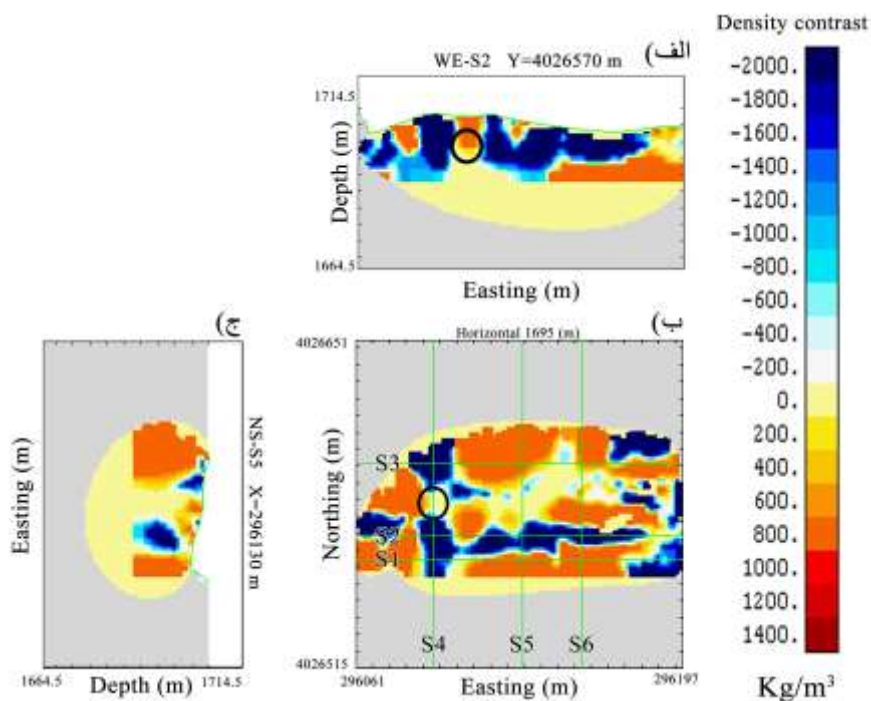
شکل ۴-۲۸: تخمین عمق با استفاده از روش اویلر (ضریب ساختاری ۱ و اندازه‌ی پنجره‌ی ۳×۳). نقاط رنگی مکان و عمق تخمین زده شده می‌باشند.

۴-۶ مدل‌سازی وارون داده‌های تونل معدنی دهملا

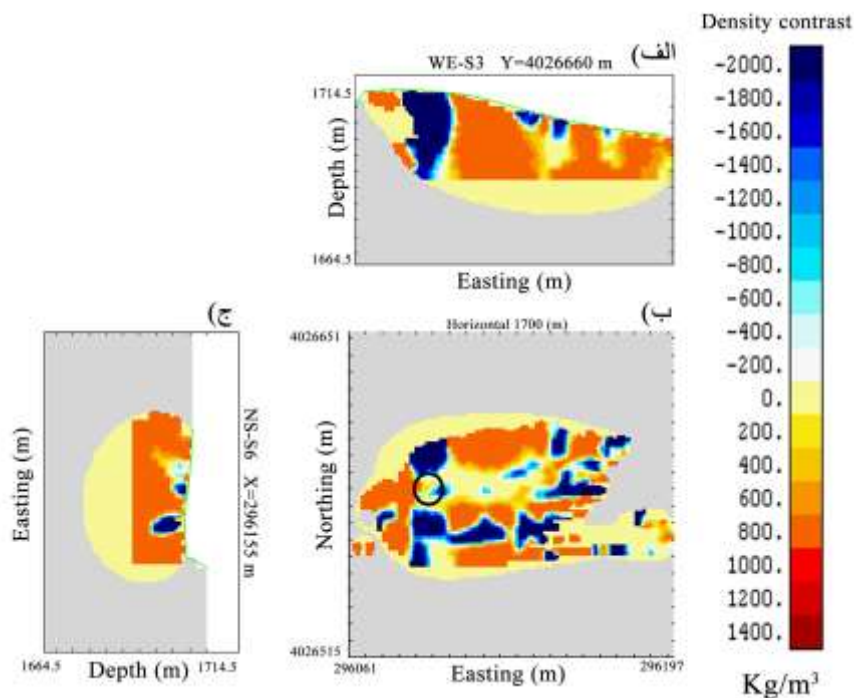
برای مدل‌سازی وارون داده‌ها محدوده دهملا، با توجه به اینکه اسکلت درونی تونل‌های معدنی از آهن ساخته شده است؛ که این مساله باعث کاهش تباین فضای خالی با محیط زمین می‌شود. حداقل و حداکثر تباین اولیه چگالی ۲۰۰۰- و ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب فرض شد و با لحاظ نمودن ساختار تونل و دویل‌های حفاری شده، ضرایب مرتبط با برآزش - هموارسازی و همگنی مورد نیاز به ترتیب ۳۰ و ۰/۱ منظور شد. همچنین حداکثر عمق لازم برای شبکه‌بندی سطح زیر زمین برای مدل‌سازی ۲۵ متر (ارتفاع ۱۶۸۵ متر نسبت به ارتفاع متوسط سطح زمین در ۱۷۱۰ متر) و اندازه سلول‌های متوازی‌السطوح در محدوده یک تا سه متر (از سطح زمین تا عمق ۲۵ متر) انتخاب گردید. بر این اساس محدوده مدل‌سازی به ۹۰۸۹ بلوک تقسیم و مدل‌سازی انجام شد.



شکل ۴-۲۹: نتایج مدل‌سازی وارون تونل معدنی ده‌ملا. الف- مقطع قائم در عرض‌های جغرافیایی ۴۰۲۶۵۶۰ متر. ب- مقطع افقی در ارتفاع ۱۶۹۰ متری (عمق ۲۰ متری). ج- مقطع قائم در طول جغرافیایی ۲۹۶۰۹۳ متر. فاصله بین خط‌نشان‌ها ۷ متر می‌باشد.



شکل ۴-۳۰: نتایج مدل‌سازی وارون تونل معدنی ده‌ملا. الف- مقطع قائم در عرض جغرافیایی ۴۰۲۶۵۷۰ متر. ب- مقطع افقی در ارتفاع ۱۶۹۵ متری (عمق ۱۵ متری). ج- مقطع قائم در طول جغرافیایی ۲۹۶۱۳۰ متر. فاصله بین خط‌نشان‌ها ۷ متر می‌باشد.



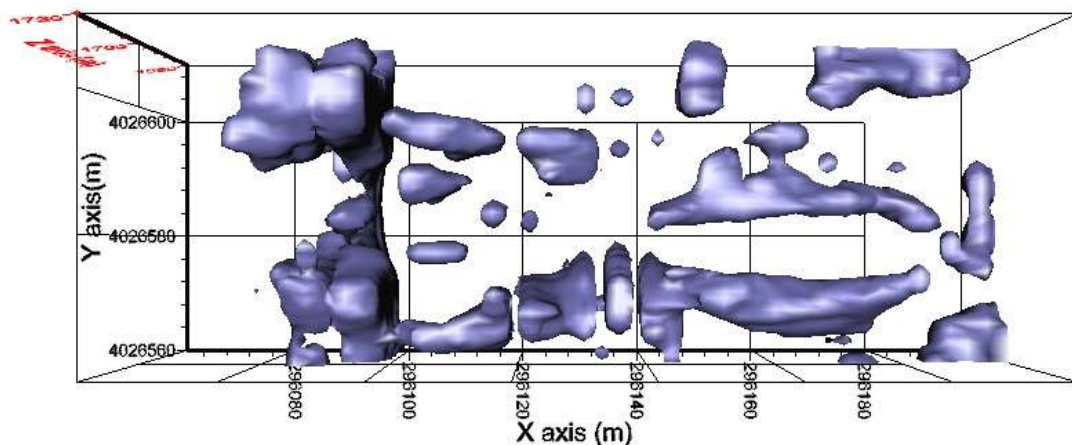
شکل ۴-۳۱: نتایج مدل‌سازی وارون تونل معدنی ده‌ملا. الف- مقطع قائم در عرض جغرافیایی ۴۰۲۶۶۶۰ متر. ب- مقطع افقی در ارتفاع ۱۷۰۰ متری (عمق ۱۰ متری - بالای تونل). ج- مقطع قائم در طول جغرافیایی ۲۹۶۱۵۵ متر. فاصله بین خط نشان‌ها ۷ متر می‌باشد.

پس از انجام مدل‌سازی وارون روی داده‌های گرانی محدوده مورد نظر، نتایج به صورت مقاطع افقی و قائم ارائه شده است. مطابق با شکل‌های شکل ۴-۲۹ ب، شکل ۴-۳۰ ب، شکل ۴-۳۱ ب؛ بخشی از سلول‌ها با تباين چگالی مثبت و بخش بیشتر آن با تباين چگالی منفي نمايش داده شده است؛ که مطابق با بی‌هنجاری گرانی باقیمانده محدوده مورد نظر است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که عمق تخمینی تونل اصلی که در امتداد شمال-جنوب بوده است در مقاطع مختلف در بازه ۱۰ تا ۲۰ متر نسبت به سطح شیب‌دار زمین برآورد شده است؛ که تایید کننده عمق واقعی تونل (مشاهدات صحرائی) است. این موضوع تایید کننده نتیجه مناسب مدل‌سازی در این بخش بوده است هرچند با وجود تعداد حفاریات معدنی در این محدوده، اثر تداخلی روی نتایج مدل‌سازی نیز وجود داشته است. یکی از این موارد وجود اثر گرانی بالا در میانه امتداد تونل است؛ که به علت تباين چگالی بالا سبب محوشدگی نتیجه مدل‌سازی در این بخش شده است (محدوده دایره‌ای مشکی رنگ در شکل ۴-۳۰ ب).

ب). چنین مساله‌ای نیز در مدل‌سازی تونل فرعی به دلیل وجود دوپل دیده می‌شود (محدوده دایره-ای مشکی رنگ در شکل ۴-۳۰-الف). همان گونه که پیشتر ذکر شد، تونل فرعی یک تونل دنباله لایه بوده و درون لایه زغال‌سنگ حفر شده است، که وجود لایه زغالی با چگالی پایین در مقایسه با لایه-های شیل و ماسه سنگ باعث کشیدگی و پهن‌شدگی نتیجه مدل‌سازی در این بخش شده است (شکل ۴-۲۹-ب، شکل ۴-۳۰-الف). برای نمایش مناسب تر اثر دوپل‌ها روی مدل‌سازی، سه مقطع قائم در ابتدا، انتها و در طول تونل اصلی تهیه شد که در آنها محل دوپل‌ها با تباین چگالی پایین به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۴-۲۹-ج، شکل ۴-۳۰-الف، شکل ۴-۳۱-الف). خطای مدل‌سازی با توجه به پیچیدگی‌های ذکر شده در حدود ۰/۱۲۱ میلی‌گال محاسبه شد. جهت نمایش مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی، با تبدیل قالب داده‌های وارون‌سازی شده به محیط نرم‌افزار وکسلر^۱ مدل نهایی با محدود کردن دامنه چگالی بین ۰ تا ۲۰۰۰- محاسبه و ترسیم گردید؛ (

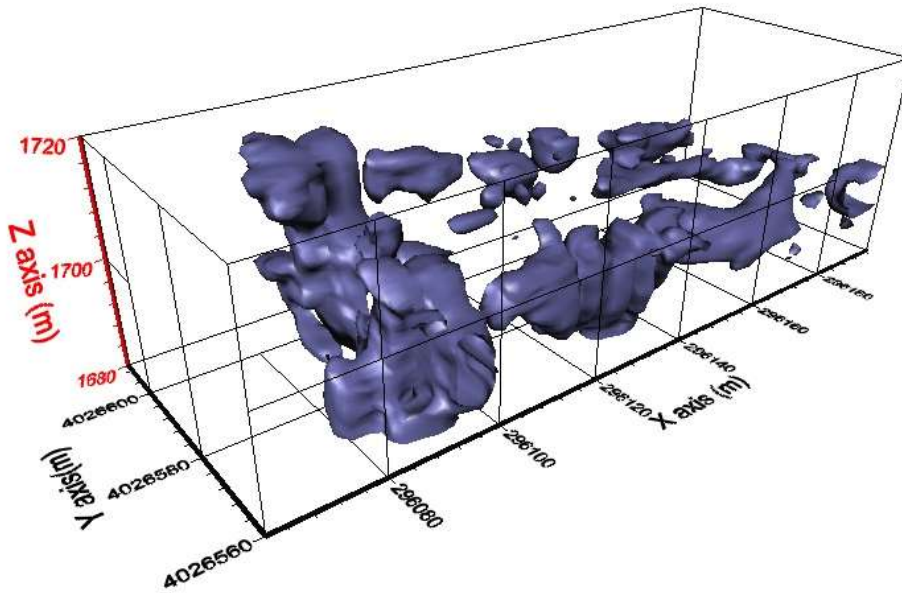
شکل ۴-۳۲ و

شکل ۴-۳۳). همچنین در راستای طولی ۲۹۶۱۰۰ متر و عرضی ۴۰۲۶۵۶۵ متر (شکل ۴-۳۴) و در راستای طولی ۲۹۶۱۰۰ متر و عرضی ۴۰۲۶۵۹۰ متر (شکل ۴-۳۵) مکان دوپل‌ها و راستای دو تونل نشان داده شده است.

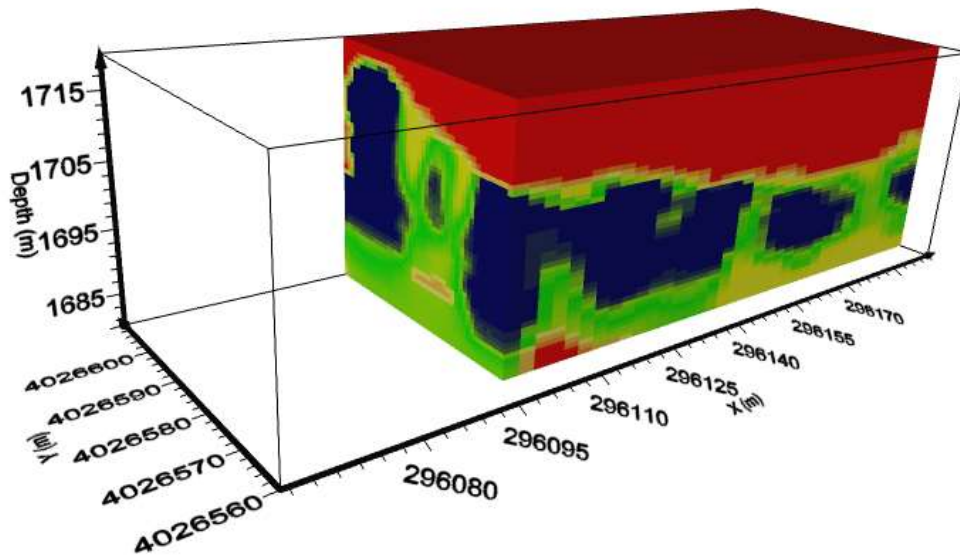


^۱ Voxler

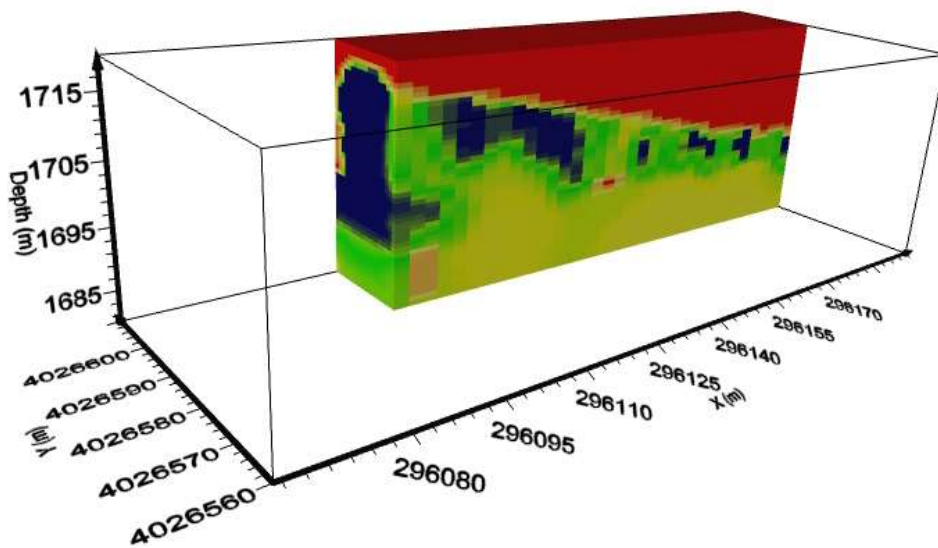
شکل ۴-۳۲: مدل سه بعدی تونل معدنی دهملا؛ نما از بالا (محدود شده به دامنه چگالی ۰ تا ۲۰۰۰-).



شکل ۴-۳۳: مدل سه بعدی تونل معدنی دهملا (محدود شده به دامنه چگالی ۰ تا ۲۰۰۰-).



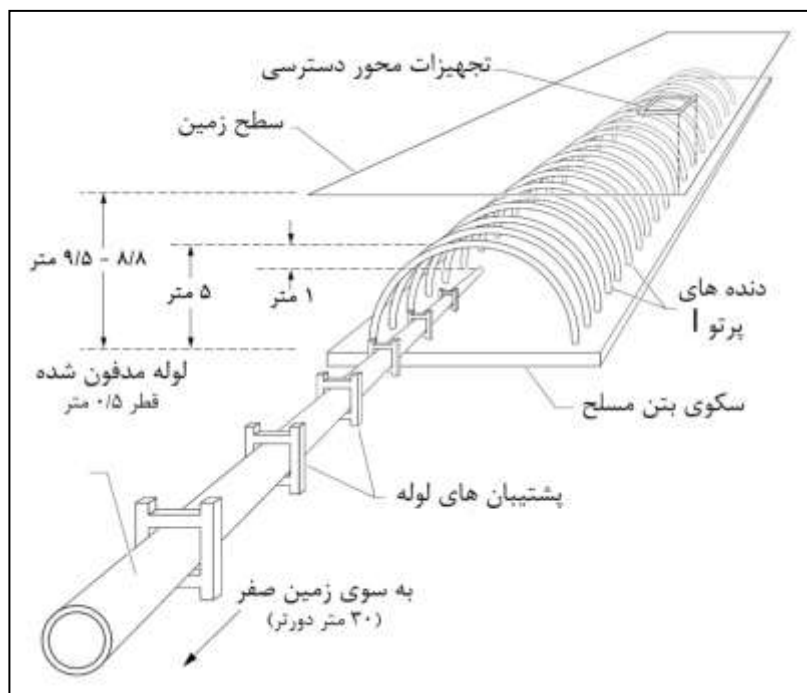
شکل ۴-۳۴: مدل سه بعدی تونل معدنی دهملا؛ راستای تونل فرعی و اصلی



شکل ۴-۳۵: مدل سه بعدی تونل معدنی دهملا؛ مکان دوپیل انتهای تونل و بخشی از لایه زغال‌دار به طور کامل مشخص است.

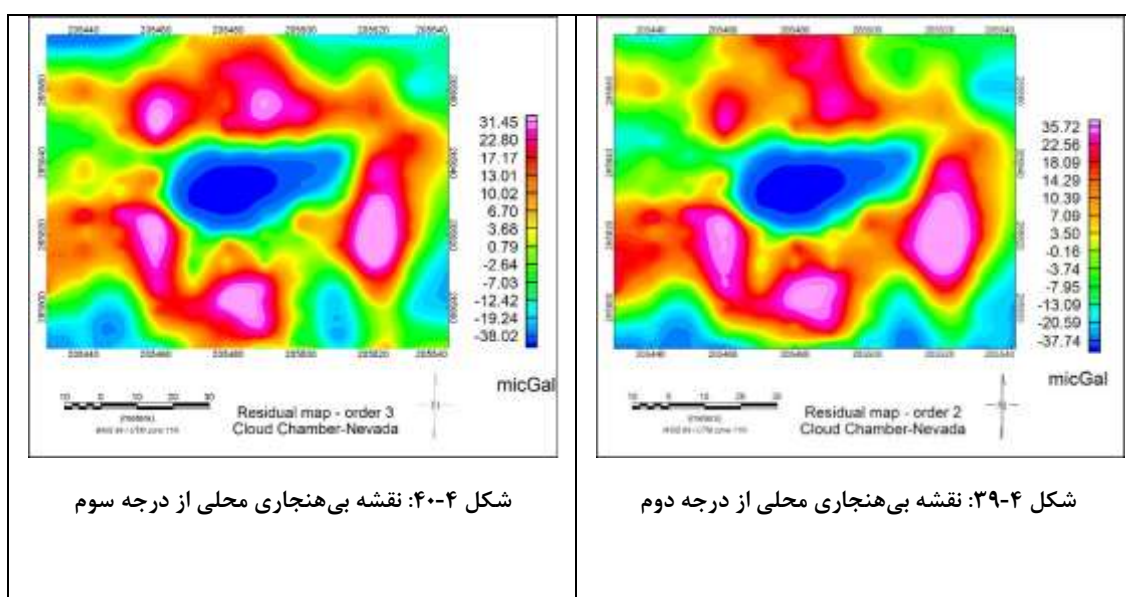
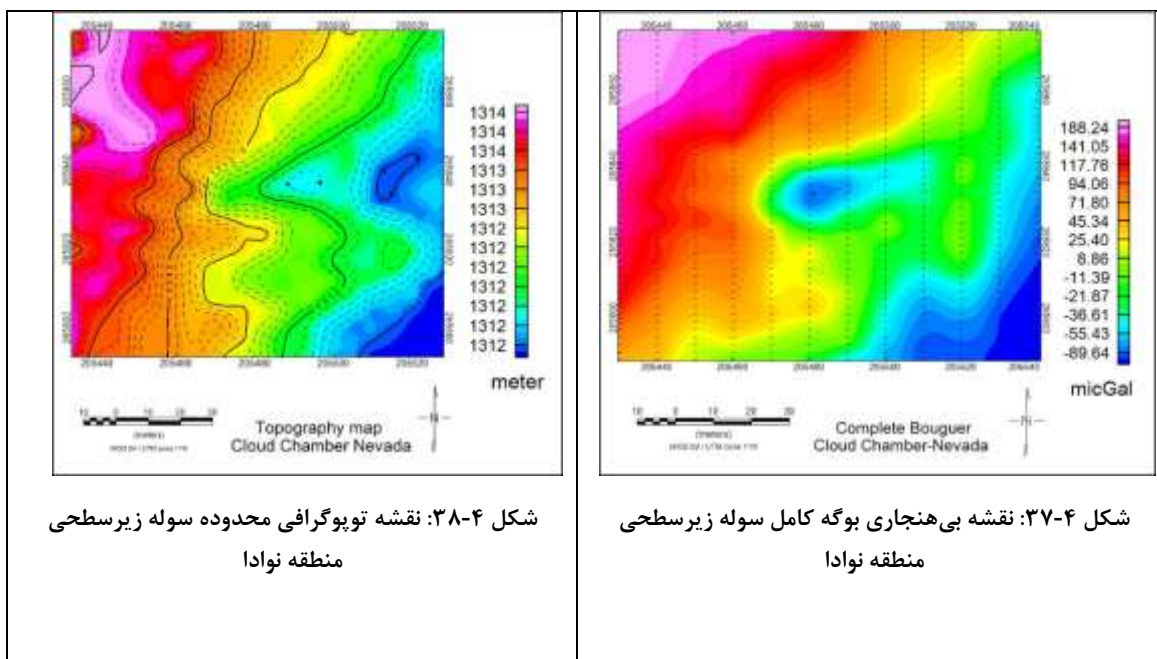
۴-۷ مطالعه موردی داده‌های گرانی سوله زیرسطحی نوادا

ساختار مورد مطالعه در این بخش یک سوله زیرسطحی می‌باشد که برای انجام یک سری آزمایش‌های هسته‌ای در سایت آموزشی نوادا-یوکا در آمریکا تاسیس شده است (شکل ۴-۳۶). طول این سوله ۴۳ متر، عمق بالا و پایین آن به ترتیب ۵ و ۱۰ متر و به شکل یک نیم استوانه افقی با شعاع ۵ متر و تباین چگالی ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به محیط اطراف است که در راستای ۷۰ درجه‌ی شمالی-شرقی احداث گردیده است. همچنین شبکه برداشت در محدوده‌ای به ابعاد ۹۴ متر در ۷۶ متر با فاصله خطوط برداشت ۱۰ متر و فاصله ایستگاه‌های ۲ متری انجام شده است [Cogbill, 2002].



شکل ۴-۳۶: نمایی از سوله زیرسطحی نوادا امریکا. پارامترهای هندسی این محفظه در شکل مشخص شده است [Cogbill, 2002].

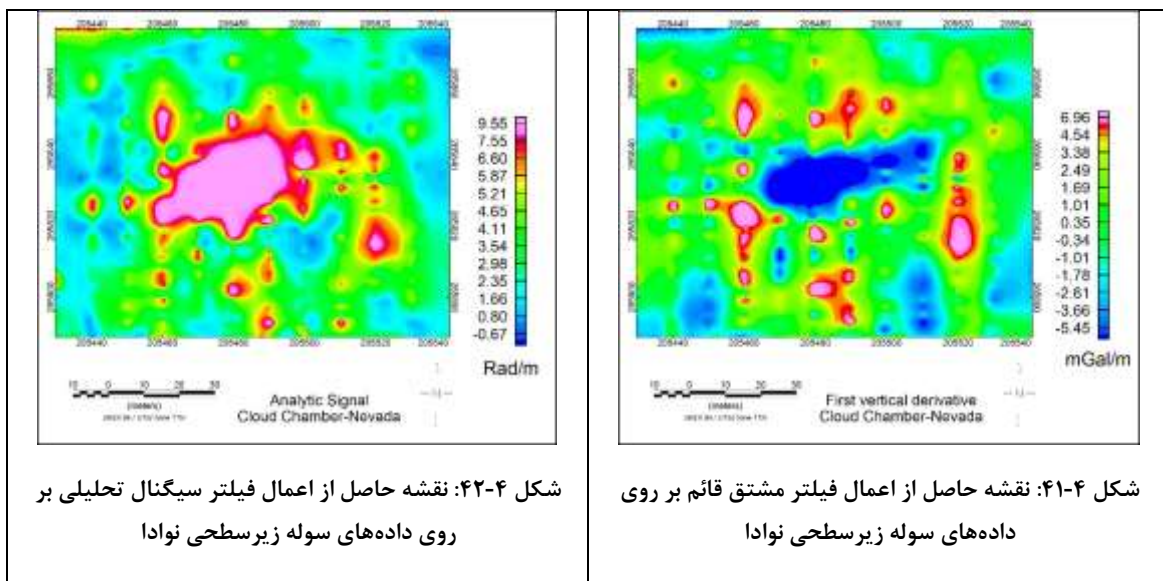
در این نوشتار با رقومی سازی داده‌های مربوط به محدوده مطالعه (از مقاله کابگیل، ۲۰۰۲)، ۵۲۸ ایستگاه گرانی بعنوان داده اولیه ایجاد و نقشه بی‌هنجاری بوگه و توپوگرافی محدوده تهیه گردید (شکل ۴-۳۷ و شکل ۴-۳۸). برای محاسبه نقشه بی‌هنجاری محلی از فیلتر روند سطحی درجه دوم و سوم استفاده شد و با جداسازی داده‌های بوگه کامل از این منحنی در نرم‌افزار ژئوسافت، نقشه بی-هنجاری باقیمانده به دست آمد (شکل ۴-۳۹ و شکل ۴-۴۰).



با توجه به نقشه بی‌هنجاری محلی، ناحیه کم چگال آبی رنگی در مرکز وجود دارد که متعلق به سوله مورد مطالعه بوده و تا حدودی راستای آن مشخص شده است. به دلیل آنکه تنها منشأ بی‌هنجاری با تباین چگالی منفی در مرکز نقشه مورد نظر به علت وجود سوله است. از آنجا که تمام پارامترهای هندسی و فیزیکی سوله مورد نظر در دسترس است، می‌توان از این بی‌هنجاری به عنوان یک مدل استاندارد استفاده نمود.

۴-۷-۱ فیلترهای مشتق قائم و سیگنال تحلیلی

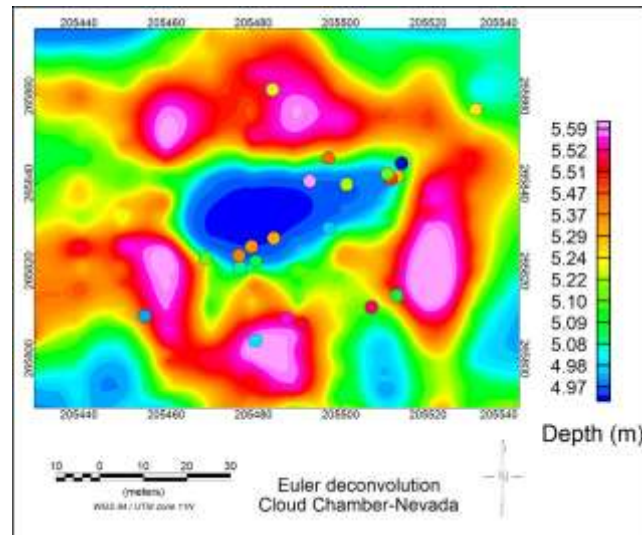
همانطور که در نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده ملاحظه شد، تنها ساختار با تباین چگالی منفی در محدوده مورد بررسی، مربوط به سوله زیرسطحی بوده است. در این بخش جهت تعیین و بارزسازی مرز این ساختار از فیلترهای مشتق قائم و سیگنال تحلیلی استفاده شده است. همانطور که در بخش قبل یاد شد، مقدار مشتق قائم در مرز بی‌هنجاری صفر و سیگنال تحلیلی بیشینه مقدار می‌شود. با اعمال این دو فیلتر بر روی داده‌های سوله زیرسطحی نوادا ملاحظه می‌شود که هر دو فیلتر در تعیین مرز بی‌هنجاری موفق بوده‌اند (شکل ۴-۴۱ و شکل ۴-۴۲). در خصوص فیلتر مشتق قائم می‌توان گفت که این فیلتر علاوه بر تعیین مرز ساختار مربوطه، توانسته است تا حدودی راستای آن را نیز مشخص نماید.



۴-۷-۲ تخمین عمق به روش اویلر دیکانولوشن

همانطور که در بخش‌های قبل ملاحظه شد، تخمین عمق به روش اویلر دیکانولوشن توانست با تمام عوامل مزاحم موجود در محدوده (نوفه و دوپل‌های سطحی) تا حدودی عمق تونل زیرسطحی تعیین کند. در نتیجه از این روش جهت تعیین عمق سوله زیرسطحی نیز استفاده شد (شکل ۴-۴۳). مقدار

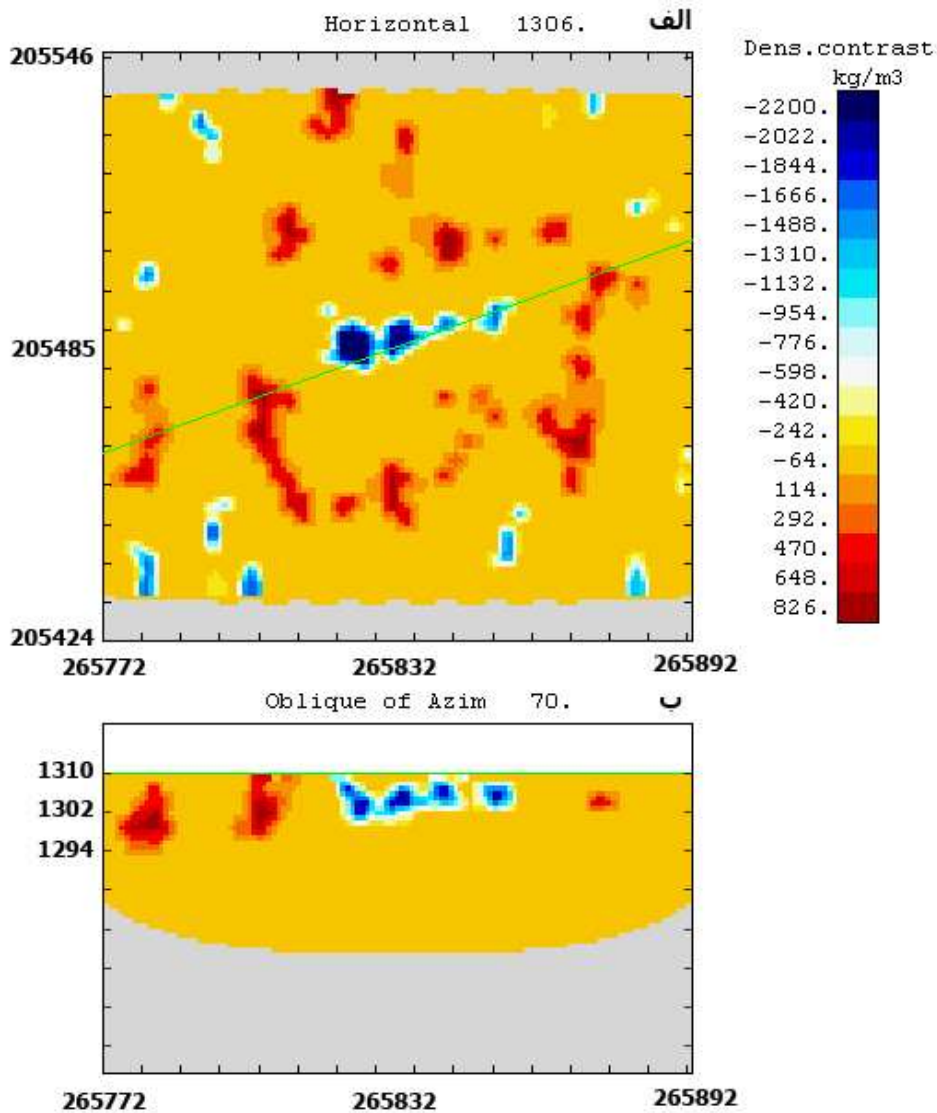
ضریب ساختاری با توجه به شکل استوانه‌ای سوله عدد یک و اندازه پنجره‌های تخمین 4×4 انتخاب شد. با توجه شکل ۴-۳۶، عمق بالای سوله در حدود ۵ متر می‌باشد که در این خصوص روش اویلر توانسته است با دقت خوبی عمق این ساختار را تخمین بزند (۵/۵ متر).



شکل ۴-۳۶: تخمین عمق با استفاده از روش اویلر (ضریب ساختاری ۱ و اندازه‌ی پنجره‌ی 4×4)، نقاط رنگی مکان و عمق تخمین‌زده شده می‌باشند.

۴-۸ مدل‌سازی وارون سوله زیرسطحی

به منظور انجام فرآیند وارون‌سازی سطح زیر زمین به تعداد 14003 سلول متوازی السطوح به ابعاد ۲ تا ۵ متر (از سطح زمین تا عمق ۲۰ متر) تقسیم‌بندی شد. مقدار حداقل و حداکثر تباین چگالی برای مدل‌سازی به ترتیب 2200 - و 800 کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شد که این مقدار را می‌توان به عنوان یک قید اولیه در نظر گرفت. همچنین مقادیر پارامترهای همگنی و برازش-هموارسازی به ترتیب $0/1$ و 10 لحاظ گردید. مقدار 10 به دلیل یک‌دست بودن داده‌های برداشت شده و نوفه ناچیز انتخاب شد تا برازش خوبی بین پارامترهای مدل و داده‌های مشاهده‌ای ایجاد شود. نتایج مدل‌سازی در شکل ۴-۴۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی به روش کاماچو. الف- مقطع افقی در ارتفاع ۱۳۰۶ متر نسبت به سطح دریا (عمق ۵ متری). ب- مقطع قائم در راستای آزیموت ۷۰ درجه شمالی-شرقی. فاصله بین خط نشان‌ها ۸ متر است.

با توجه نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود که در شکل ۴-۴-الف راستا و موقعیت سوله به خوبی تعیین شده است. همچنین مدل‌سازی سوله تا عمق ۱۲ متری (۱۲۹۹ متر نسبت به سطح دریا) انجام شده است که این مساله نشان می‌دهد فرآیند وارون‌سازی تا حد قابل قبولی توانسته است عمق پایین بی‌هنجاری (۱۰ متر) را معین نماید. مقطع قائم زده شده در راستای آزیموت ۷۰ درجه شمالی-شرقی، گسترش طولی محفظه مدل‌سازی شده را در حدود ۴۰ متر نشان می‌دهد که با مقدار واقعی آن ۴۳ متر اختلاف بسیار ناچیزی دارد (شکل ۴-۴-ب). همچنین خطای مدل‌سازی در حدود ۰/۰۳۴ میلی-

گال به دست آمد. از آنجا که تنها قید اعمال شده برای مدل‌سازی حداقل و حداکثر تباین چگالی بوده است، نتایج به خوبی تخمینی از شکل و عمق بی‌هنجاری را ارائه داده است که این مساله توانمندی این روش را در خصوص معکوس‌سازی داده‌های گرانی نشان می‌دهد.

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

۵-۱ جمع‌بندی و نتایج

از جمله روش‌های اکتشاف و شناسایی ساختارهای زیرسطحی نظیر حفره‌ها، تونل‌ها و قنات‌های مدفون استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی می‌باشد. نتایج حاصل از مدل‌سازی اینگونه ساختارها می‌تواند در تفسیر بهتر آنها موثر واقع شده و اهداف بعدی مطالعه را به شکل مطلوب‌تری نمایان سازد. بنابراین با توجه به ساختار مورد مطالعه که یک تونل معدنی است، پس از مطالعه و مشاهدات صحرائی، شبکه برداشت داده‌های گرانی در ۹ پروفیل طراحی شد و سپس عملیات اندازه‌گیری مقادیر گرانی صورت پذیرفت. پس از انجام تصحیحات و پردازش‌های لازم، با استفاده از روش وارون‌سازی کاماچو به صورت متمرکز، فرآیند مدل‌سازی انجام گرفت. البته لازم به ذکر است که هر چه قدر در طراحی شبکه برداشت، تعداد ایستگاه و نحوه اندازه‌گیری دقت بیشتری صورت گیرد، نتیجه حاصل از مدل‌سازی داده‌های گرانی مناسب‌تر خواهد شد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که روش کاماچو در وارون‌سازی داده‌های گرانی نزدیک به سطح و در حالت متمرکز تا حد بسیار خوبی کارا بوده و مدل ارائه شده با مشاهدات صحرائی تطابق بالایی دارد. تنظیم مقادیر اولیه مدل‌سازی به‌صورت خودکار و دستی در روش کاماچو این امکان را می‌دهد تا بتوان ابتدا در حالت خودکار معیاری نسبی از این مقادیر به‌دست آورد و سپس در حالت دستی آنها را بهینه کرد. از آنجا که محدوده مورد مطالعه دست‌خوش تغییرات و پیچیدگی‌های از جمله حفر چندین دوپل سطحی و لایه‌ی زغال‌دار می‌باشد، مدل نهایی در برخی مناطق دچار اختلال شده اما در مجموع عوامل یاد شده را نشان داده است. عمق تخمینی بالا و پایین تونل در راستای پروفیل اول به کمک روش وارون‌سازی کاماچو به ترتیب در حدود ۱۰ و ۱۵ متر برآورد شد که نزدیک به مقدار واقعی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین لایه زغال‌دار بین لایه‌های شیل و ماسه‌سنگ در انتهای تونل انحرافی، به دلیل تباین چگالی مناسب آن، شناسایی و مدل‌سازی گردید. در مدل نهایی موقعیت حفریات سطحی و گسترش عمقی آنها به خوبی مشخص شد که این نتیجه می‌تواند امکان استفاده از این روش را در چنین ساختارهای بالا ببرد. لازم به ذکر

است که خطای مدل‌سازی با این روش و در این مطالعه در حدود ۰/۱۲ میلی‌گال به دست آمد. در خصوص داده‌های سوله زیرسطحی نوادا، مدل‌سازی کاملاً به صورت متمرکز انجام گرفت. گسترش طولی، عرضی و عمقی سوله به خوبی با مقادیر واقعی آن تطابق داشت و به دلیل مدل‌سازی کامل سوله، ضریب برازش-هموارسازی پایین انتخاب شد که این مساله تا حدودی باعث مدل‌سازی نوفه نیز شد. خطای مدل‌سازی در این مطالعه در حدود ۰/۰۳۴ میلی‌گال به دست آمد. جهت به دست آوردن نتایجی بهتر می‌بایست ابعاد شبکه‌بندی زیرسطحی را کوچکتر انتخاب کرد که این کار مستلزم وجود داده‌های با دقت مناسب بر روی هر سلول در سطح برداشت است. با این وجود فواصل بین ایستگاه-های اندازه‌گیری کمتر می‌شود که این مساله در شناسایی حفرات زیرسطحی در یک محدوده کوچک توجیه‌پذیر است. از اقدامات لازم و اساسی جهت طراحی شبکه برداشت و اندازه‌گیری داده‌ها، مطالعه دقیق زمین‌شناسی منطقه و ساختار مورد مطالعه می‌باشد که نقش مهمی در تعیین ضرایب اولیه مدل‌سازی دارد.

۲-۵ پیشنهادات

- جهت مدل‌سازی دقیق‌تر ساختارهایی نظیر تونل‌ها و حفره‌ها استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی کمکی بسیار کارآمد است و پیشنهاد می‌شود با تلفیق داده‌های گرانی‌سنجی و ژئوالکتریک (و یا لرزه‌نگاری) اینگونه ساختارها را مدل‌سازی نمود.
- یکی از مهمترین بخش‌ها در مدل‌سازی، صحت داده‌های اندازه‌گیری شده و کاهش میزان خطا در آنهاست که به دلیل بسیاری از عوامل ناخواسته اجتناب ناپذیر است. به همین خاطر در وارون‌سازی ویژگی به نام ماتریس همبستگی داده‌ها وجود دارد که درایه‌های آن میزان خطای قرائت هر ایستگاه می‌باشد که برای راحتی کار میزان این خطا با متوسط‌گیری و اعمال تنها یک عدد برای کلیه داده‌ها انجام می‌شود. این مساله در مناطقی که نوفه بیشتری در داده‌ها وجود دارد ایجاد اختلال کرده و مدل ساخته شده از واقعیت دور خواهد بود. به

همین منظور پیشنهاد می‌شود برای انجام فرآیند مدل‌سازی با دقت بالا، مقادیر خطای اندازه-

گیری در هر ایستگاه بدون متوسط‌گیری و لحاظ تمامی آنها انجام شود.

- در برخی مناطق ساختارهای مورد مطالعه به خوبی مدل‌سازی نشدند. در این خصوص پیشنهاد می‌شود علاوه بر افزایش دقت در اندازه‌گیری (بویژه جلوگیری از لرزش دستگاه هنگام وزش باد) و افزایش تعداد دفعات قرائت، نسبت به طراحی شبکه برداشت چگال‌تر در مناطقی که اثر تونل مخدوش شده است اقدام نمود.
- همواره استفاده‌ی تنها از یک روش وارون‌سازی و حصول نتیجه کافی نبوده و پیشنهاد می‌شود فرآیند مدل‌سازی اینگونه ساختارها با کمک سایر روش‌های وارون‌سازی (سیخون، ژادونف و باربوسا) انجام و نتایج با هم مقایسه شود؛ تا بتوان بهترین تصمیم‌گیری را شناسایی اهداف بکار گرفت.

منابع و مأخذ

آقاجانی، ح.، مرادزاده، ع. و هوآلین، ز. (۱۳۸۸) " تخمین موقعیت افقی و عمق آنومالی‌های گرانی با استفاده از گردایان کل نرمال شده (NFG)" مجله علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور، شماره ۱۴، ص ۳۵.

ابراهیم زاده اردستانی، و. (۱۳۸۹) " گرانی‌سنجی کاربردی " چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۲۳۰ صفحه.

جهانداری، ه.، ۱۳۸۸، برگردان سه بعدی داده‌های مغناطیسی با استفاده از الگوریتم غیرخطی مارکوارت – لونبرگ و مقایسه آن با نتایج مدل‌سازی داده‌های گرانی کاذب، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ۱۳۸.

توکلی، ش.، (۱۳۷۵)، " ژئوفیزیک (رشته زمی شناسی)" انتشارات دانشگاه پیام نور، ۲۲۰. حدادیان آ، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، "شناسایی دقیق مرزهای توده‌های آنومال در اکتشاف روش‌های میدان پتانسیل با فیلترهای فاز محلی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود. دولتی ارده جانی، ف.، ۱۳۷۲، برداشت اطلاعات خام و تعبیر و تفسیر گرانی‌سنجی منطقه اکتشافی . مرودشت، پایان نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه امیر کبیر (دانشکده معدن)، تهران، ۲۲۱.

دولتی ارده جانی ف، (۱۳۷۵)، "تفکیک آنومالی‌های گرانی منطقه بابلسر به روش روند سطحی ارتونرمال" نهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.

عابدی، م، افشار، ا.، ابراهیم زاده اردستانی، و.، و نوروزی، غ. مدل سازی دوبعدی داده‌های گرانی با استفاده از روش معکوس سازی فشرده و معیار توقف تغییر چگالی. مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۵، شماره ۱، صفحه ۹۲، ۱۰۸-۱۳۹۰.

کلاگری، ع. ا.، ۱۳۷۱، اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، ۵۸۵.

نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۸۳، مدل‌سازی معکوس دو و سه بعدی داده های گرانی‌سنجی با استفاده از روش وارون سازی فشرده، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ۱۲۳.

نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۸۸، وارون‌سازی دوبعدی غیرخطی داده‌های مغناطیسی با استفاده از روش زیرفضا، پایان نامه دکتری، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ۱۴۲.

نوروزی، غ.، (۱۳۸۸) " ژئوفیزیک اکتشافی " چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۷۴ صفحه.

- Al-Chalabi M. (1971). Some studies relating to non-uniqueness in gravity and magnetic inverse problem. *Geophysics* 36, 835–855. DOI: 10.1190/ 1.1440219.
- Ardestani, V. E. (2008). Modelling the karst zones in a dam site through micro-gravity data. *Exploration Geophysics*, 39(4), 204-209.
- Ardestani E. V. (2009). Sink-hole modeling at a power plant site using microgravity data. *Journal of the Earth & Space Physics* 35(2), 1-8.
- Arzi AA. (1975). Microgravimetry for engineering applications. *Geophysics* 23, 408–425. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1975.tb01539.x
- Benderitter Y (1997). Karst et investigations géophysiques [Karst and geophysical investigations]. *Hydrogéologie* 3:19–30
- Beres M, Luetcher M, Paymond O (2001). Integration of penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves. *J Appl Geophys* 46:249–262
- Bishop, I., Styles, P., Emsley, S. J., & Ferguson, N. S. (1997). The detection of cavities using the microgravity technique: case histories from mining and karstic environments. Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publications*, 12(1), 153-166.
- Blakely, R.J., (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press, New York: 435pp.
- Blizkovský M., (1979). Processing and applications in microgravity surveys. *Geophysical Prospecting*, 27, 4, 848–861.
- Butler, D. K., and Murphy, W. L., (1980). Evaluation of geophysical methods for cavity detection at the WES cavity test facility: Tech. Rep. CL-80-4, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, MS.
- Butler D. K. (1984). Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities. *Geophysics* 49(7), 1084-1096. DOI:10.1190/1.1441723
- Camacho, A. G., Vieira, R., Montesinos, F. G., & Cuéllar, V. (1994). A gravimetric 3D global inversion for cavity detection. *Geophysical prospecting*, 42(2), 113-130.
- Camacho A. G., F. G. Montesinos and R. Vieira (2002). A 3-D gravity inversion tool based on exploration of model possibilities. *Computers and Geosciences* 28, 191–204. DOI: 10.1016/s0098-3004(01)00039-5
- Camacho, A. G., Nunes, J. C., Ortiz, E., França, Z., & Vieira, R. (2007). Gravimetric determination of an intrusive complex under the Island of Faial (Azores): some

- methodological improvements. *Geophysical Journal International*, 171(1), 478-494.
- Camacho A.G., Gottsmann J. and Ferná Ndez J. (2011a). The 3-D gravity inversion package GROWTH2.0 and its application to Tenerife Island, Spain. *Computers and Geosciences* 37, 621–633. DOI:10.1016/j.cageo.2010.12.003
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., & Bosch, F. P. (2011). Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, 19(6), 1169-1180.
- Cogbill, A.H. (2002). Gravity variations observed from a detailed gravity survey at the NTS cloud chamber. *Society of Exploration Geophysicists*, 794-797 pp.
- Colley G.C. (1963). The detection of caves by gravity measurements. *Geophysics Prospecting* 11, 1–9. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1963.tb02019.x
- Cooper G. R. J., (2006), Interpreting potential field data using continuous wavelet transforms of horizontal derivatives, *Comput, Geosci.* vol.32, pp. 984-992.
- DANIELS, J. (1988). Locating caves, tunnels and mines. *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, 7, 32-37.
- De Giorgi, L., & Leucci, G. (2014). Detection of hazardous cavities below a road using combined geophysical methods. *Surveys in Geophysics*, 35(4), 1003-1021.
- Dobrin, M.B. and Savit, C.H. (1988). *Introduction to geophysical prospecting*. 4th edition, McGraw-Hill (New York), pp 867.
- Durrheim R.J. and Cooper G.R.J. (1998). A Program for the Euler deconvolution of magnetic and gravity data. *Computers & Geosciences*, 24, NO.6, PP. 545-550.
- Fauchard C, Pothérat P (2004). Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques [Underground cavities detection using geophysical methods]. *Guide technique*, Laboratoire Central des Ponts ET Chaussées, Paris, 170pp
- Fajkiewicz Z., (1976). Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropogenic forms. *Geophysics*, 41, 5, 1016–1030.
- FitzGerald D., Reid A. and McInerney P. (2004). New Discrimination Techniques for Euler Deconvolution. *Computers and Geosciences*, 30, PP. 461-469.
- Franklin A. G., Patrick D. M., Butler D. K., StrOhm W. E. and Hynes-Griffin M. E. (1980). *Siting of Nuclear Facilities in Karst Terrains and other Areas Susceptible to Ground Collapse*. NUREG Report CR-2062, U. S. Nuclear Regulatory Commission.
- Gottsmann J., Camacho A. G., Martí J., Wooller L., Fernández J., Garcia A. & Rymer H. (2008). Shallow structure beneath the Central Volcanic Complex of Tenerife from

- new gravity data: Implications for its evolution and recent reactivation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 168(3), 212-230.
- Grant, F.S., and West, G.F. (1965). *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. McGraw-Hill Book Company, pp 583.
- Gutiérrez F, Cooper HA, Johnson KS (2008). Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporate karst areas. *Environ Geol* 53:1007–1022
- Heiskanen, W.A. and Moritz, H. (1967) *Physical Geodesy*, Freeman, San Francisco, 364p.
- Hinze W. J. (1990). The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies. In: Ward (Ed), *Geotechnical and environmental geophysics*” The Society of Exploration Geophysicists, 75-126.
- Hood P.J. (1963). Gradient measurements in aeromagnetic surveying. *Geophysics*, V, 30, NO. 1. PP. 891-902.
- Hoover RA (2003). Geophysical choices for karst investigations. In: Beck BF (ed) *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp 529–538
- Kane M. F. (1962). A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics* 27(4), 455-462. DOI: 10.1190/1.1439044
- Kis, M., Detzky, G., & Koppan, A. (2013). 3D FE Modelling of Gravity-driven Rock-deformations for the Estimation of Cavity Effect and Sensitivity. In 7th Congress of the Balkan Geophysical Society.
- Li X. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2) L13-L16.
- Menke, W. (2012). *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*. Academic press.
- Nabighian M. (1972). The analytic signal of two- dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37 (3), 507- 517.
- Nagy D. (1966). The prism method for terrain corrections using digital computers. *Pure and applied geophysics* 63(1), 31-39. DOI: 10.1007/bf00875156
- Neumann R (1965). La gravimètrie de haute precision: application aux recherches de cavités [High precision gravimetry: application to cavities research]. *Geophys Prospect* 15:116–134
- Oh, S., & Suh, B. (2010). Bayesian Inversion for Cavity Investigation. *Geosystem Engineering*, 13(3), 83-90.

- Pánisová, J., & Pašteka, R. (2009). The use of microgravity technique in archaeology: A case study from the St. Nicolas Church in Pukanec, Slovakia. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 39(3), 237-254.
- Parker R. L., (1972). The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 31, 447-55.
- Peters, L.J. (1949). The direct approach to magnetic interpretation and its practical application. *Geophysics* 14, pp. 290-320.
- Pick M., Picha J. and Vyskocil, V. (1973). *Theory of the Earth's gravitational field*. Amsterdam, 538pp.
- Pivetta, T., & Braitenberg, C. (2015). Laser-scan and gravity joint investigation for subsurface cavity exploration—The Grotta Gigante benchmark. *Geophysics*, 80(4), B83-B94.
- Reid A.B., Allsop J.M, Granser H., Millett A.J. and Somerton I.W. (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, V. 55, NO. 1, PP. 80-91.
- Rene', R.M., (1986). Gravity inversion using open, reject, and "shape-of-anomaly" fill criteria. *Geophysics* 51(4), 988–994.
- Rybacov M, Goldschmidt V, Fleischer L, Rostein Y (2001). Cave detection and 4-D monitoring: a microgravity case history near the Dead Sea. *Leading Edge* 20:896–900
- Reynolds, J.M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, pp. 796.
- Shamsipour, P., Marcotte, D., & Chouteau, M. (2012). 3D stochastic joint inversion of gravity and magnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 79, 27-37.
- Stavrev P.Y. (1997). Euler deconvolution using differential similarity transformations of gravity or magnetic anomalies. *Geophysical Prospecting*, V. 45, PP. 207-246.
- Sun, J., & Li, Y. (2010). Inversion of surface and borehole gravity with thresholding and density constraints. In 2010 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.
- Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. Telford W. M., Geldart L. P. and Sheriff R. C. (1991). *Applied geophysics*" 2nd edition, Cambridge University Press, pp. 770.
- Thierry P, Debeglia N, Bitri A (2005). Geophysical and geological characterisation of

karst hazards in urban environments: application to Orléans (France). *Bull Eng Geol Environ* 64:139–150

Thomas B, Roth MJS (1999). Evaluation of site characterization methods for sinkholes in Pennsylvania and New Jersey. *Eng Geol* 52:147–152

Thompson D. T. (1982). A new technique for making computer- assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37.

Verduzco B. J. D., Fairhead C. M., Green C., and MacKenzie (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23, 116–119.

Zhdanov, M. S., (2005). *Geophysical inverse theory and regularization problem*, Elsevier press.

Zhdanov, M. S., & Cox, L. H. (2013). Multinary Inversion for Tunnel Detection. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 10(5), 1100-1103.

Abstract:

Identifying the subsurface structures like cavities, mineral mines, historic rooms, streaks and mineral deposit is one of the most attractive majors for scientists in sciences like mine, geology, civil engineers and archaeologists. Determining the location of such structures only by data and surface geology information is impossible and it will be so complicated and over cost without geophysics methods. Therefore, in the beginning of an exploration work the geophysics methods can be used for such structures. One of the most prepare method to determine such phenomenon that have acceptable density contrast with their environment, is gravimetry method.

In gravity data interpretation, after eliminating regional anomalies and preparing remaining maps, modeling is used to determine geometry parameters of corresponding structure. In this paper to identify and modeling mineral-educational coal tunnel named Dehmola, the operation of microgravity data on a part of main tunnel region (Adit) and perverted (Drift) has been done. After corrections and required processes, the regional data anomalies for modeling prepared. Furthermore for more investigation, the gravimetry data of an undersurface niches in the area of Nevada in the United States has been used.

The Camacho linear inversion method is used to do modeling that has the ability of focusing inversion. To evaluate this method, the synthetics data of two horizontal parallelepiped prisms in two different depth has been used that the gained results have very good accommodation with depth and direction of two prisms.

Due to complication of studied field, the results of modeling real data shows that a good separation between tunnels, drilled arises with surrounding area has been gained. Besides coal layers that are in direction of diversion tunnel (eastern-western) in very acceptable way identified and modeled. Also the harvest network properties, number of stations and data measuring accuracy can be very vital in getting a favorable and proper model.

Key words: microgravity, inverse modeling, mineral tunnel, Dehmolla-Shahrood.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

**Inverse modeling of gravity data to detect
subsurface structures**

Farzad Gholamian

Supervisors:

Hamid Aghajani

Mahmoud Mirzaei

A thesis for the degree of M.Sc. in Geophysics (Gravity)

September 2015