





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد گرانی سنجی

تفسیر داده‌های میدان پتانسیل محدوده اکتشافی کرومیت شرق سبزوار به روش

گرادیان کل نرمال و مدل سازی مستقیم و معکوس داده‌ها

نگارنده : شهرزاد کوثری

اساتید راهنما

دکتر حمید آقاجانی

دکتر سوسن ابراهیمی

استاد مشاور

مهندس مهدی زارعی

شهریور ۱۳۹۵



تقدیم به

روح پاک پدرم که به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را  
تجربه کنم.

و به مادرم، دریای بیکران فداکاری، مهربانی و عشق که وجودم برایش همه  
رنج بود و وجودش برایم همه مهر  
و به خواهر و برادران عزیزم

تنها انگیزه‌های من برای زندگی کردن

## تشکر و قدردانی

قدر استاد نکو دانستن حیف که استاد به من یاد داد...

از خدای مهربانم به خاطر فرصتی که به من برای زندگی و تلاش د ادبی نهایت سپاسگزارم.

از مادر عزیزم اولین راهنمای من، در تمام مراحل زندگیم بسیار سپاسگزارم.

از الطاف اساتید راهنمای بنده آقای دکتر آقا جانی و خانم دکتر ابراهیمی و استاد مشاور کرامت‌ر آقایی

مهندس زارعی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ‌کلی در این عرصه بر من دریغ ننمودند، از

اساتید کرامت‌ر جناب دکتر نجاتی و دکتر عرب امیری که افتخار دانش‌آموزی در محضرشان را داشتم و

زحمات داورانی این پایان‌نامه به‌کردنشان افتاد کمال تشکر و قدردانی را دارم.

بر خود لازم می‌دانم از تمامی دوستانم که در این مسیر همراه من بوده‌اند و راهنمایی و وجودشان مایه دلگرمی و

انگیزه من بوده است تشکر نمایم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید.

## تعهد نامه

اینجانب شهرزاد کوثری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک- گرانی سنجی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تفسیر داده‌های میدان پتانسیل محدوده اکتشافی کرومیت شرق سبزوار به روش گرادیان کل نرمال و مدل سازی مستقیم و معکوس داده‌ها تحت راهنمایی جناب آقای دکتر حمید آقاجانی - سرکار خانم دکتر سوسن ابراهیمی 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

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

امروزه تلاش برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی و منابع معدنی با ارزش، گسترش پیدا کرده است. روش‌های ژئوفیزیکی ابزارهایی هستند که با استفاده از اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی در روی سطح یا بالای سطح زمین اطلاعات ارزشمندی را حاصل می‌نمایند. از آن‌جا که کانی کرومیت دارای اختلاف چگالی قابل ملاحظه‌ای با سنگ‌های میزبان است، می‌توان از روش گرانی‌سنجی جهت اکتشاف این کانسارها بهره گرفت. از اهداف اصلی در تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی تعیین عمق و محدوده توده آنومال می‌باشد. برآورد عمق و ژرفای افقی اجسام بی‌هنجار نقش به‌سزایی در انتخاب بهینه محل حفر گمانه‌های اکتشافی داشته و از سوی دیگر باعث کاهش هزینه‌های حفاری و استخراج می‌گردد. روش‌های مختلفی جهت برآورد عمق وجود دارد که در این تحقیق روش گرادیان کل نرمال به‌کار گرفته شده است. این روش با به‌کارگیری سری فوریه معایب فیلتر گسترش به سمت پایین را در عبور از مرکز جسم بی‌هنجار بر طرف می‌نماید. جهت تفسیر داده‌های گرانی مدل‌سازی داده‌ها از موفق‌ترین روش‌های تفسیر می‌باشد. در این تحقیق به تفسیر، تخمین عمق و مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی پرداخته شده است. از آن‌جا که در روش‌های ژئوفیزیکی به منظور بررسی کارایی هر روش، ابتدا بر روی داده‌های مصنوعی اعمال می‌گردد؛ لذا ابتدا روش گرادیان کل نرمال بر روی دو سری داده مصنوعی اعمال گردید و مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌ها انجام گرفت. هدف اصلی از این تحقیق تفسیر و مدل‌سازی داده‌های محدوده کرومیت‌زایی سبزوار می‌باشد. علاوه بر آن مطالعات روی محدوده کرومیت‌زایی کوبا نیز انجام گرفت. ابتدا با استفاده از روش توابع چندجمله‌ای آنومالی ناحیه‌ای و محلی از هم تفکیک و سپس با استفاده از روش گرادیان کل نرمال دوبعدی آنومالی‌های گرانی تفسیر شد. برای تعیین وضعیت توده‌های معدنی مدل‌سازی مستقیم با استفاده از نرم‌افزار Winglink، مدل‌سازی دوبعدی وارون با استفاده از نرم‌افزار Modelvision Pro انجام گرفت. الگوریتمی که برای مدل‌سازی در این نرم‌افزارها استفاده شد، بر پایه روش‌های تکرار می‌باشد.

همچنین به منظور بررسی وضعیت ساختارها در فضای سه بعدی، مدل سازی وارون مقید سه بعدی با استفاده از الگوریتم لی - اولدنبرگ (Grav3D نرم افزار) انجام گرفت. نتایج به دست آمده از مدل سازی منطقه کاماگائی کوبا با نتایج حفاری های انجام شده در محدوده آنومالی ها انطباق بالایی دارد. همچنین نتایج حاصل از مدل سازی داده های گرانی سنجی محدوده اکتشافی سبزوار نیز به طور قابل قبولی با اطلاعات زمین شناسی منطقه هم خوانی دارد.

**کلیدواژه ها:** آنومالی گرانی، تخمین عمق، گرادیان کل نرمال شده (NFG)، مدل سازی مستقیم،

مدل سازی معکوس دوبعدی، مدل سازی معکوس مقید سه بعدی، کانسار کرومیت شرق سبزوار، کانسار

کرومیت کاماگائی کوبا.



## مقالات استخراجی از پایان نامه

۱- شهرزاد کوثری، حمید آقاجانی، سوسن ابراهیمی، ۱۳۹۴، آشکارسازی توده‌های معدنی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال شده و مدل‌سازی مستقیم داده‌های گرانی، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، ایران، تهران.

۲- شهرزاد کوثری، حمید آقاجانی، سوسن ابراهیمی، ۱۳۹۵، تفسیر آنومالی‌های گرانی به روش گرادیان کل نرمال و مدل‌سازی مستقیم، مجموعه مقالات هفدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.

## فهرست مطالب

### فصل اول ( کلیات )

|     |                        |   |
|-----|------------------------|---|
| ۱-۱ | مقدمه                  | ۲ |
| ۲-۱ | هدف از تحقیق           | ۳ |
| ۳-۱ | سابقه تحقیق            | ۴ |
| ۴-۱ | ضرورت انجام پایان نامه | ۷ |
| ۵-۱ | روش تحقیق              | ۸ |
| ۶-۱ | ساختار پایان نامه      | ۸ |

### فصل دوم ( روش شناسی تحقیق )

|       |                                                                 |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------|----|
| ۱-۲   | مقدمه                                                           | ۱۰ |
| ۲-۲   | روش گرانی سنجی                                                  | ۱۰ |
| ۳-۲   | مراحل اجرای روش گرانی سنجی برای اکتشاف مواد معدنی               | ۱۲ |
| ۱-۳-۲ | جمع آوری داده های گرانی سنجی                                    | ۱۲ |
| ۲-۳-۲ | تصحیحات روش گرانی سنجی                                          | ۱۳ |
| ۳-۳-۲ | پردازش داده های گرانی و تفکیک آنومالی ها                        | ۱۶ |
| ۴-۳-۲ | تفسیر داده های گرانی سنجی                                       | ۱۸ |
| ۴-۲   | تخمین گسترش افقی و عمقی                                         | ۱۸ |
| ۵-۲   | روش های مدل سازی داده های گرانی سنجی                            | ۲۱ |
| ۲-۵-۲ | مدل سازی معکوس                                                  | ۳۰ |
| ۳-۵-۲ | حل مسائل معکوس خطی فرابآورد                                     | ۳۲ |
| ۴-۵-۲ | حل مسائل معکوس خطی فرو برآورد                                   | ۳۳ |
| ۶-۲   | روش مدل سازی معکوس در نرم افزار Model Vision Pro                | ۳۵ |
| ۷-۲   | روش مدل سازی معکوس در نرم افزار Grav3D (الگوریتم لی - اولدنبرگ) | ۳۸ |

### فصل سوم (مدل سازی داده های مصنوعی)

|       |                                                          |    |
|-------|----------------------------------------------------------|----|
| ۱-۳   | مقدمه                                                    | ۴۴ |
| ۲-۳   | مدل مصنوعی دو مکعب و دو کره                              | ۴۴ |
| ۱-۲-۳ | مدل سازی مستقیم                                          | ۴۶ |
| ۲-۲-۳ | محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال داده های گرانی مدل مصنوعی | ۴۸ |
| ۳-۲-۳ | مدل سازی معکوس                                           | ۵۳ |
| ۳-۳   | مدل مصنوعی سه بیضوی                                      | ۵۵ |
| ۱-۳-۳ | مدل سازی مستقیم                                          | ۵۷ |
| ۲-۳-۳ | محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال داده های گرانی مدل مصنوعی | ۵۸ |

|    |                                  |
|----|----------------------------------|
| ۶۲ | ..... مدل سازی معکوس ۳-۳-۳       |
| ۶۲ | ..... مدل سازی معکوس سه بعدی ۴-۳ |

### فصل چهارم (مدل سازی داده های واقعی)

|     |                                                                                                   |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۶۸  | ..... ۱-۴ مقدمه                                                                                   |
| ۶۸  | ..... ۲-۴ زمین شناسی ذخایر کرومیت                                                                 |
| ۶۹  | ..... ۱-۲-۴ کرومیت نوع لایه ای (بوشولد)                                                           |
| ۶۹  | ..... ۲-۲-۴ کرومیت نوع آلپی (افیولیتی)                                                            |
| ۷۰  | ..... ۳-۴ محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا                                                        |
| ۷۰  | ..... ۱-۳-۴ زمین شناسی محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا                                           |
| ۷۲  | ..... ۲-۳-۴ داده های گرانی سنجی                                                                   |
| ۷۵  | ..... ۳-۳-۴ تفسیر آنومالی های گرانی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال                            |
| ۷۹  | ..... ۴-۳-۴ مدل سازی مستقیم داده های گرانی منطقه کاماگائی کوبا در راستای پروفیل های P1 و P2       |
| ۸۱  | ..... ۵-۳-۴ مدل سازی معکوس داده های گرانی منطقه کاماگائی کوبا در راستای پروفیل های P1 و P2        |
| ۸۵  | ..... ۶-۳-۴ مدل سازی معکوس سه بعدی مقید داده های گرانی کاماگائی کوبا                              |
| ۸۷  | ..... ۴-۴ مدل سازی داده های گرانی محدوده کرومیت شرق سبزوار                                        |
| ۸۸  | ..... ۱-۴-۴ معرفی منطقه مورد مطالعه                                                               |
| ۹۰  | ..... ۲-۴-۴ موقعیت جغرافیایی و ژئومورفولوژی منطقه                                                 |
| ۹۱  | ..... ۳-۴-۴ زمین شناسی منطقه مورد مطالعه                                                          |
| ۹۴  | ..... ۵-۴ روش کار در گرانی سنجی                                                                   |
| ۹۶  | ..... ۶-۴ پیش پردازش یا تصحیح داده های گرانی سنجی                                                 |
| ۱۰۱ | ..... ۷-۴ تخمین گسترش افقی و عمقی آنومالی های گرانی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال شده        |
| ۱۰۳ | ..... ۸-۴ مدل سازی مستقیم داده های گرانی محدوده اکتشافی مورد مطالعه در راستای پروفیل های مذکور    |
|     | ..... ۹-۴ مدل سازی معکوس داده های گرانی منطقه کرومیت زایی شرق سبزوار در راستای پروفیل های P1 و P2 |
| ۱۰۵ | .....                                                                                             |
| ۱۰۵ | ..... ۱-۹-۴ مدل سازی معکوس دوبعدی داده های گرانی سنجی محدوده کرومیت زایی شرق سبزوار               |
| ۱۱۰ | ..... ۲-۹-۴ مدل سازی سه بعدی مقید داده های کرومیت سبزوار                                          |

### فصل پنجم (نتیجه گیری و پیشنهادات)

|     |                      |
|-----|----------------------|
| ۱۱۶ | ..... ۱-۵ نتیجه گیری |
| ۱۱۷ | ..... ۲-۵ پیشنهادات  |

### منابع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: پروفیل آنومالی گرانی روی یک کانسار معدنی با چگالی بالا..... ۱۲
- شکل ۲-۲: اثر توپوگرافی بر میزان گرانی اندازگیری شده. الف- اثر کوه ب- اثر دره..... ۱۶
- شکل ۳-۲: یک جسم سه بعدی با چگالی  $\rho(x', y', z')$ ..... ۲۴
- شکل ۴-۲: الف) نمودار تغییرات گرانی قائم یک کره از یک نقطه دلخواه P و ب) یک کره فرضی مدفون..... ۲۶
- شکل ۵-۲: تقریب یک جسم دوبعدی به وسیله یک  $n$  ضلعی..... ۲۸
- شکل ۶-۲: الگوریتم برنامه مدل سازی معکوس داده های میدان پتانسیل..... ۳۵
- شکل ۷-۲: گسسته سازی زمین از طریق شبکه بندی عمود بر هم..... ۳۹
- شکل ۱-۳: مدل مصنوعی تولید شده در محیط نرم افزار Matlab..... ۴۵
- شکل ۲-۳: مدل سازی مستقیم داده های گرانی پروفیل شماره (۱)..... ۴۷
- شکل ۳-۳: مدل سازی مستقیم داده های گرانی پروفیل شماره (۲)..... ۴۸
- شکل ۴-۳: نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد مختلف جملات هارمونیک پروفیل ۱..... ۴۹
- شکل ۵-۳: مقطع دوبعدی مقادیر گرادیان کل نرمال داده های گرانی ( $N=25$ ) - پروفیل ۱..... ۴۹
- شکل ۶-۳: مقطع دوبعدی مقادیر گرادیان کل نرمال داده های گرانی ( $N=35$ ) - پروفیل ۱..... ۵۰
- شکل ۷-۳: مقطع دوبعدی مقادیر گرادیان کل نرمال داده های گرانی ( $N=45$ ) - پروفیل ۱..... ۵۱
- شکل ۸-۳: نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد مختلف جملات هارمونیک - پروفیل ۲..... ۵۲
- شکل ۹-۳: مقطع دوبعدی مقادیر گرادیان کل نرمال داده های گرانی ( $N=82$ ) - پروفیل ۲..... ۵۳
- شکل ۱۰-۳: مدل سازی معکوس داده های گرانی پروفیل شماره (۱) مدل اول..... ۵۴
- شکل ۱۱-۳: مدل سازی معکوس داده های گرانی پروفیل شماره (۲) مدل اول..... ۵۵
- شکل ۱۲-۳: مشخصات توده ها در مدل سه بیضوی..... ۵۶
- شکل ۱۳-۳: مدل سازی مستقیم داده های گرانی پروفیل مربوط به مدل سه بیضوی..... ۵۷
- شکل ۱۴-۳: محل پروفیل های انتخابی جهت اعمال روش گرادیان کل نرمال..... ۵۸

- شکل ۳-۱۵: نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد مختلف جملات هارمونیک پروفیل اول مدل مصنوعی سه بیضوی. ۵۹.....
- شکل ۳-۱۶: مقطع گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی روی پروفیل اول مدل مصنوعی سه بیضوی به ازای  $N=23$ . ۶۰.....
- شکل ۳-۱۷: نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال پروفیل اول مدل مصنوعی سه بیضوی نسبت به تعداد مختلف جملات هارمونیک. ۶۱.....
- شکل ۳-۱۸: مقطع گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی روی پروفیل اول مدل مصنوعی سه بیضوی به ازای  $N=23$ . ۶۱.....
- شکل ۳-۱۹: مدلسازی معکوس داده‌های گرانی روی پروفیل شمال شرق - جنوب غرب. ۶۲.....
- شکل ۳-۲۰: نمای دوبعدی از مدل مصنوعی. ۶۳.....
- شکل ۳-۲۱: الف) شبکه حاصل از داده‌های خام بدون نویز. ب) شبکه حاصل از داده‌های مدل مصنوعی با ۳ درصد نویز. ۶۳.....
- شکل ۳-۲۲: مدلسازی معکوس در حالت پیشفرض - بدون اعمال قید. ۶۴.....
- شکل ۳-۲۳: مقطع عرضی مدلسازی معکوس مدل مصنوعی با اعمال قید مثبت بودن. ۶۵.....
- شکل ۳-۲۴: نتیجه حاصل از مدلسازی معکوس داده‌های گرانی مدل مصنوعی با اعمال قید هموارسازی. ۶۵.....
- شکل ۴-۱: مناطق کاوش شده در محدوده کرومیت‌زایی کاماگائی، کوبا [ Davis et al, 1957 ]. ۷۱.....
- شکل ۴-۲: نقشه آنومالی بوگه گرانی منطقه کرومیت‌زایی کاماگائی کوبا. ۷۳.....
- شکل ۴-۳: الف) نقشه آنومالی باقیمانده گرانی از محدوده کرومیتی در کاماگائی کوبا. محل رخنمون در روی نقشه نشان داده شده است. ب) آنومالی گرانی در محل پروفیل ۱، ج) آنومالی گرانی در محل پروفیل دوم. ۷۴.....
- شکل ۴-۴: مقطع نقاط حفاری محدوده توده معدنی کرومیت - فواصل بر حسب متر. ۷۵.....
- شکل ۴-۴-۵: تعیین تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه نسبی (پروفیل P1). ۷۶.....

- شکل ۴-۶: نتیجه بررسی عمق و گسترش افقی آنومالی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال دوبعدی داده‌های گرانی روی پروفیل P1. (الف- اثر گرانی در راستای پروفیل ب- مقطع حاصل از محاسبه گرادیان کل نرمال). ..... ۷۷
- شکل ۴-۷: تعیین تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه نسبی (پروفیل P2). ..... ۷۸
- شکل ۴-۸: گسترش افقی و عمقی آنومالی گرانی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال دوبعدی داده‌های گرانی روی پروفیل P2 (الف- اثر گرانی در راستای پروفیل ب- مقطع حاصل از محاسبه گرادیان کل نرمال). ..... ۷۸
- شکل ۴-۹: نتیجه مدل‌سازی مستقیم روی پروفیل گرانی P1 در محیط نرم افزار WingLink. ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۰: نتیجه مدل‌سازی مستقیم پروفیل P2 در محیط نرم‌افزار WingLink. ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۱: مدل اولیه جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا در نرم افزار Modelvision. ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۲: مشخصات تعدادی از توده‌ها در مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا. ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۳: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا. ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۴: مدل اولیه جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P2 محدوده کرومیت زایی کوبا در نرم‌افزار Modelvision. ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۵: مشخصات توده‌ها جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P2 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا. ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۶: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا در نرم‌افزار Modelvision. ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۷: مقطع حاصل از مدل‌سازی در حالت پیش فرض. ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۸: مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های گرانی در راستای پروفیل P1. ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۹: مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های گرانی در راستای پروفیل P2. ..... ۸۷

- شکل ۴-۲۰: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه [برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ۱: سلطان‌آباد].. ۸۹
- شکل ۴-۲۱: چهار گوش نقاط برداشت محدوده مورد مطالعه و موقعیت امام‌زاده حیدر روی قله کوه [آقاجانی، ۱۳۹۱]..... ۹۰
- شکل ۴-۲۲: راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه [آقاجانی، ۱۳۹۱]..... ۹۱
- شکل ۴-۲۳: واحدهای سنگی اولترابازیکی (مجموعه افیولیتی) که در بیشتر موارد به سرپانتین تبدیل شده است..... ۹۲
- شکل ۴-۲۴: آثار کانیزایی کرومیت و منیزیت، در واحدهای سنگی اولترابازیکی سرپانتینی شده..... ۹۳
- شکل ۴-۲۵: محل شبکه برداشت در محدوده مورد مطالعه..... ۹۴
- شکل ۴-۲۶: عملیات نقشه‌برداری، شبکه برداشت داده‌های گرانی با فواصل  $20 \times 20$  روی نقشه توپوگرافی محدوده..... ۹۵
- شکل ۴-۲۷: محل ایستگاه کمکی برای انتقال اطلاعات نقطه مبنا به محدوده اکتشافی از ایستگاه ۲۵۲۹..... ۹۶
- شکل ۴-۲۸: نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های اندازه-گیری گرانی سنجی (زون نزدیک)..... ۹۸
- شکل ۴-۲۹: نقشه توپوگرافی منطقه اطراف محدوده مورد بررسی برای تصحیح اثر زون دور توپوگرافی..... ۹۸
- شکل ۴-۳۰: نقشه آنومالی بوگه کامل داده‌های گرانی منطقه کرومیت‌زایی سبزوار (مقدار گرانی بر حسب میلی‌گال)..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۱: نقشه آنومالی باقیمانده گرانی از محدوده کرومیت‌زایی شرق سبزوار - مقدار گرانی بر حسب میلی‌گال. محل دو پروفیل با حروف P1 و P2 مشاهده می‌شود..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۲: تعیین تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه‌نسبی (پروفیل P1)..... ۱۰۱
- شکل ۴-۳۳: تعیین تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه‌نسبی (پروفیل P2)..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۴: گسترش افقی و عمقی آنومالی گرانی به روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی در محل پروفیل P1..... ۱۰۲

- شکل ۴-۳۵: گسترش افقی و عمقی آنومالی گرانی به روش گرادیان کل نرمال داده‌های  
 ۱۰۳.....P2. گرانروی روی پروفیل
- شکل ۴-۳۶: مقطع حاصل از مدل‌سازی مستقیم داده‌های گرانی سنجی شرق سبزوار (پروفیل  
 ۱۰۴.....Winglink. P1) در نرم‌افزار
- شکل ۴-۳۷: مقطع حاصل از مدل‌سازی مستقیم پروفیل P2 محدوده کرومیت‌زایی شرق  
 ۱۰۵.....Winglink. سبزوار در نرم‌افزار
- شکل ۴-۳۸: مدل اولیه انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت‌زایی  
 ۱۰۶.....شرق سبزوار. مدل اولیه انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت‌زایی  
 ۱۰۷.....شکل ۴-۳۹: مشخصات تعدادی از توده‌های انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P1.
- ۱۰۷.....شکل ۴-۴۰: مدل نهایی به دست آمده از مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 کرومیت‌زایی شرق  
 ۱۰۷.....سبزوار. مدل اولیه انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P2 کرومیت‌زایی شرق  
 ۱۰۸.....سبزوار. مشخصات تعدادی از توده‌های انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس محدوده  
 ۱۰۹.....کرومیت‌زایی شرق سبزوار. شکل ۴-۴۳: مدل نهایی به دست آمده از مدل‌سازی معکوس پروفیل P2 کرومیت‌زایی شرق  
 ۱۱۰.....سبزوار. شکل ۴-۴۴: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی، در حالت پیش‌فرض. .... ۱۱۱
- شکل ۴-۴۵: مقطع عرضی (دید از بالا) حاصل از مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی داده‌های  
 ۱۱۲.....گرانروی سنجی منطقه سبزوار، با استفاده از افزایش وزن توده‌های سطحی. شکل ۴-۴۶: نمای سه‌بعدی مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی نهایی (جهت نمایش بهتر سلول‌ها با  
 ۱۱۳.....چگالی کمتر از ۰/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب نشان داده شده‌اند). شکل ۴-۴۷: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی داده‌های گرانی در راستای پروفیل  
 ۱۱۳.....P1



شکل ۴-۴۸: مقطع حاصل از مدل سازی معکوس سه بعدی داده های گرانی در راستای پروفیل  
P2.....۱۱۴

## فهرست جداول

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| جدول ۱-۳: مشخصات توده‌ها در مدل مصنوعی اول.....               | ۴۴ |
| جدول ۲-۳: مشخصات توده‌ها در مدل مصنوعی دوم.....               | ۵۶ |
| جدول ۱-۴: مختصات نقاط حفاری در این منطقه.....                 | ۷۵ |
| جدول ۲-۴: موقعیت جغرافیایی محدوده.....                        | ۸۹ |
| جدول ۳-۴: مختصات نقطه مبنایی ۲۵۲۹.....                        | ۹۶ |
| جدول ۴-۴: بخشی از داده‌های برداشتی و نتیجه انجام تصحیحات..... | ۹۷ |

## علائم اختصاری مورد استفاده در متن

U: مقدار پتانسیل گرانی

V: مقدار پتانسیل مغناطیسی

g: شتاب گرانی

$\rho$ : چگالی

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

$\Delta g_z$ : شتاب گرانش قائم

$\Psi(p, Q)$ : تابع گرین

W: معرف توابع وزنی

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

$g_{\text{obs}}$ : مقدار گرانی مشاهده‌ای یا اندازه‌گیری

$\gamma_\varphi$ : مقدار گرانی نرمال (تئوری)

$\varphi$ : عرض جغرافیایی

$\delta g_{\text{FA}}$ : تصحیح هوای آزاد

$\delta g_{\text{B}}$ : تصحیح بوگه

$\delta g_{\text{T}}$ : تصحیح توپوگرافی

$\delta g_{\text{DC}}$ : تصحیح دریافت

DR: دریافت دستگاه

$g_{\text{res}}$ : آنومالی باقی‌مانده

$g_{\text{reg}}$ : آنومالی ناحیه‌ای

$\lambda$ : چگالی سطحی یک جسم

$\Delta g$ : میدان گرانی

$B_n$ : ضرایب فوریه یک‌بعدی

$B_{mn}$ : ضرایب فوریه دوبعدی

$G(x,z)$ : گرادیان کل در صفحه  $x$ - $z$  (Full Gradient: FG)

$G_m(z)$ : گرادیان کل متوسط در یک افق در راستای پروفیل

$V_{xz}(x,y)$ : مشتق افقی داده‌های گرانی

$V_{zz}(x,y)$ : مشتق قائم داده‌های گرانی

$G_N(x,z)$ : گرادیان کل نرمال (Normalized Full Gradient: NFG)

$Q(\mu)$ : تابع هموارساز لانکزوس

$\mu$ : توان تابع هموارساز لانکزوس

$v$ : عملگر تابع گرادیان کل

$N$ : تعداد جملات هارمونیک

$W_i$ : توابع وزنی وابسته فضایی

$W_r$ : توابع وزنی عمقی

$\alpha_i$ : ضرایب مربوط به وزن‌دهی

$\phi_m$ : تابع هدف

$\|\dots\|^2$ : نرم یا اندازه اختلاف بین دو مدل یا دو گروه داده

$d_i^{obs}$ : امین داده مشاهده‌ای

$d_i^{pre}$ : امین داده پیش‌بینی شده به وسیله مدل

$\varepsilon_i$ : بیان گر انحراف معیار  $i$  امین داده

# فصل اول

## کلیات

## ۱-۱ مقدمه

ژئوفیزیک اکتشافی یکی از راه‌های اولیه شناسایی و اکتشاف غیر مستقیم منابع زیرسطحی است؛ که به مطالعه ویژگی‌های فیزیکی زمین و محیط اطراف آن می‌پردازد. امکان انجام برداشت‌های ژئوفیزیکی از هوا، دریا، سطح زمین و داخل حفریات زیرسطحی نشانگر توانمندی این روش‌ها در تمامی مراحل اکتشاف از مرحله شناسایی اولیه تا مرحله تفصیلی است. این روش‌ها در آشکارسازی منابع زیرزمینی، اعم از منابع هیدروکربنی، کانسارهای فلزی و غیرفلزی، آب‌های زیرزمینی و منابع زمین‌گرمایی نقشی اساسی دارند. از آن‌جا که اساس کار آن‌ها بر پایه خواص فیزیکی مختلف استوار است؛ لذا در هر پروژه، انتخاب روش مناسب بسیار حائز اهمیت است [Renolds, 1997]. روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی از روش‌های میدان پتانسیل هستند؛ که بر پایه اختلاف در ویژگی فیزیکی چگالی و مغناطیس‌شوندگی ساختار مورد مطالعه با محیط اطراف آن بنا شده‌اند. با استفاده از داده‌های حاصل از این روش‌ها، می‌توان به طور غیرمستقیم به اکتشاف مواد معدنی پرداخت.

روش گرانی‌سنجی همان‌گونه که اشاره شد به وجود اختلاف چگالی میان سنگ‌های هدف و زمینه وابسته است. کانسنگ کروم تباین چگالی در حدود  $2 - 1/5$  گرم بر سانتی‌متر مکعب با سنگ میزبان دارد؛ که انتظار آنومالی‌های مثبت از کانسنگ‌های کرومیت می‌رود [Hammer, 1945].

بنابراین بر مبنای تمام پروژه‌های اکتشاف محلی گرانی‌سنجی، در مرحله اول محدوده اکتشافی باید به صورت کاملاً دقیق پیمایش صحرایی شود و حتی کوچک‌ترین اندیس‌های کروم باید مشخص شود و در مرحله دوم، در قسمت کوچکی از منطقه که چگالی اندیس‌ها زیاد و قابل توجه می‌باشد و همچنین دارای یک نظام‌بندی می‌باشند پروفیل‌ها را به صورت عمود بر آن‌ها باید طراحی کرد. به علت چگالی کم توده‌های سنگ مادر و درصد کم ماده معدنی کرومیت تعبیر و تفسیر آنومالی حاصل از این روش، ممکن است با اشکالاتی همراه باشد. چون ممکن است آنومالی حاصله ناشی از اختلاف چگالی اولیه سنگ‌ها و یا اختلاف‌ها ناشی از عمل سرپانتینی‌شدن باشد. مشکل دیگر در مورد این روش، تغییرات توپوگرافی است؛ که در مواردی کاربرد روش گرانی‌سنجی را غیرممکن می‌سازد. این روش غالباً در

مراحل اکتشافات مقدماتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی بر اساس نوع و دقت هدف اکتشافی قابل استفاده در مراحل تفضیلی و تکمیلی اکتشاف است.

در این تحقیق با استفاده از این ویژگی، روش گرانی‌سنجی بر روی ذخایر کرومیت منطقه سبزوار برداشت شده و مورد پردازش و تفسیر قرار می‌گیرد.

## ۲-۱ هدف از تحقیق

هدف از این تحقیق تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی روی محدوده اکتشافی کرومیت با استفاده از روش گرادیان کل نرمال شده و مدل‌سازی داده‌های مربوطه می‌باشد. در مدل‌سازی داده‌های میدان پتانسیل تعیین محل توده و عمق قرارگیری ماده معدنی از مهم‌ترین پارامترها است؛ که مورد توجه است. هنگامی که تمام نوفه‌های قابل پیش‌بینی در میدان‌های گرانی از داده‌های مشاهده‌ای حذف شوند؛ میدان‌های آنومالی حاصل می‌گردد؛ که طیف وسیعی از منابع زمین‌شناسی در اعماق مختلف را شامل می‌شوند. این میدان‌ها دارای دانسیته متفاوت می‌باشند و می‌بایست این آنومالی‌ها از یکدیگر جدا شوند و آنومالی مربوط به منبع مورد مطالعه آشکار گردد. این کار با استفاده از بسیاری از روش‌ها، نظیر روش روند سطح انجام شود. با این روش می‌توان محل منبع آنومالی محلی که همان محل کانسار کرومیت است را شناسایی کرد. به منظور درک بهتر وضعیت زیرسطحی ماده معدنی (تفسیر بهتر داده‌ها) باید بر روی داده‌ها مدل‌سازی انجام گیرد و مدل ژئوفیزیکی به یک مدل مفهومی زمین‌شناسی تبدیل شود.

امروزه روش‌های گوناگونی جهت تعبیر و تفسیر آنومالی‌های گرانی مثل تعیین عمق تقریبی توده‌ی معدنی به کار می‌رود که می‌توان به روش‌های اوایلر<sup>۱</sup>، حداقل مربعات<sup>۲</sup>، روش واهمامیخت ورنر<sup>۳</sup>

---

<sup>۱</sup> Euler

<sup>۲</sup> least-square

<sup>۳</sup> Wernner

و شبکه‌های عصبی<sup>۱</sup> اشاره کرد [ Salem et al, 2004 ]. جهت تعیین گسترش افقی و عمقی توده‌ها با استفاده از داده‌های میدان پتانسیل، از روش گرادیان کل نرمال شده استفاده می‌شود، که برزکین<sup>۲</sup> (۱۹۶۷، ۱۹۷۳، ۱۹۹۸) آن را ارائه داد و توسط محققین و پژوهشگران زیادی استفاده شده است [ آقاجانی، ۱۳۸۸؛ آقاجانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ Zeng et al, 2002 ]. این روش در مواردی که سایر اطلاعات ژئوفیزیکی و حفاری وجود ندارد نقش مهمی برای تخمین عمق اولیه عارضه‌های زیرسطحی ایفا می‌نماید.

### ۳-۱ سابقه تحقیق

هامر<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۴۵) با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی به بررسی توده‌های کرومیتی در کوبا پرداختند. تفسیر و پردازش داده‌های گرانی در این منطقه انجام گرفت و با اطلاعات حفاری موجود در منطقه مقایسه گردید. نتایج حاصل از این تحقیق کارایی نسبی این روش را برای اکتشاف کانسارهای کرومیت نشان داد.

داویس<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۵۷) از روش گرانی‌سنجی برای اکتشاف ذخایر کرومیت منطقه کاماگائی کوبا استفاده کردند. مطالعات نشان داد که با توجه به اختلاف قابل قبول چگالی توده‌های کرومیتی با سنگ‌های اطراف در منطقه، توده‌های کرومیتی تا عمق ۶۰ متری و با شیب به سمت جنوب غرب کشیده شده‌اند، همچنین کاهش عمق کرومیت را در بخشی از منطقه نمایان ساخت. نتایج حاصل از این تحقیق با حفاری‌های موجود در منطقه مقایسه گردید و تطابق قابل قبولی از خود نشان داد.

نجاتی‌کلاته و همکاران (۱۳۸۴) برای بررسی وضعیت ماده معدنی کرومیت در استان هرمزگان از داده‌های گرانی‌سنجی به روش وارون‌سازی فشرده استفاده کردند. از آن‌جا که توده‌های کرومیتی

---

<sup>۱</sup> Natural Network

<sup>۲</sup> Berzkin

<sup>۳</sup> Hammer

<sup>۴</sup> Davis



معمولاً به لحاظ زمین‌شناسی به صورت عدسی دیده می‌شوند؛ نتایج وارون‌سازی به روش فشرده‌سازی در این تحقیق، این شکل را برای توده‌های کرومیتی تأیید کرد.

کامکار روحانی (۱۳۸۷) به منظور اکتشاف کرومیت در منطقه فاریاب به پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های میدان پتانسیل پرداخت. این مطالعات نشان داد که به دلیل بالا بودن میدان گرانی در مناطق شمالی (شمال شرقی، شمال غربی)، شرق و جنوب شرق و نیز پایین بودن میدان گرانی در مناطق غرب و جنوب‌غرب، احتمال وجود عدسی‌های کرومیت در مناطق شمالی و شرقی بالا بوده و اکثر مناطق مرکزی و جنوبی فاقد عدسی‌های کرومیت می‌باشند.

کامکار روحانی و همکاران (۱۳۸۸) به منظور پی‌جویی ذخایر کرومیت در منطقه سبزوار، به تفسیر و پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد پرداختند. در این بررسی پی‌جویی ذخایر کرومیت با ردیابی کانی‌های مغناطیسی همراه با کرومیت صورت گرفت. با بررسی‌های زمین‌شناسی و اکتشافی، توده‌های سطحی، عمیق و نیمه عمیق از یکدیگر تفکیک شدند و الگوی مغناطیسی حاصل گردید که به این وسیله ۲۰ منطقه امیدبخش شناسایی شد.

شهبازی (۱۳۹۲) در تحقیق خود برای بررسی وضعیت توده معدنی کرومیت چشمه‌سیر سبزوار از روش گسترش میدان به سمت بالای توسعه‌یافته برای تفکیک آنومالی‌های گرانی استفاده کرد. داده‌های برداشت‌شده گرانی چشمه‌سیر سبزوار با استفاده از روش ادامه فراسو مورد تفسیر قرار گرفت. با مقایسه این روش‌ها و کیفیت جداسازی آن‌ها در نهایت چند جسم آنومال سطحی از نقشه‌ی آنومالی باقی‌مانده حاصل از ادامه فراسوی توسعه‌یافته نتیجه شد.

جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از پردازش و تفسیر داده‌های گرانی سنجی کانسار کرومیت شرق سبزوار به مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی با فیلترهای فاز محلی پرداختند. در این روش، روند مدل‌سازی مانند مسائل بهینه‌سازی بوده و هدف، پیدا کردن مدلی بود که تابع هدف مدل را کمینه نماید و داده‌های آن تا میزان معینی بر داده‌های برداشتی منطبق باشد. برای مقایسه هر فیلتر با نتایج مدل‌سازی، سعی شده بود تا بهترین نمای مدل نهایی متناسب با آن

فیلتر انتخاب شود. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داده است که همخوانی قابل قبولی بین نتایج حاصل از اعمال فیلترهای فاز محلی در تعیین مرز آنومالی با نتایج مدل سازی وجود دارد.

گرامی و همکاران (۱۳۹۴) به تخمین عمق و تفسیر داده های گرانی سنجی مربوط به کانسار کرومیت در منطقه کاماگائی کوبا پرداختند. در این مقاله از دو روش واهمامیخت اوپلر و روش سیگنال تحلیلی استفاده گردید. نتایج حاصله تطابق قابل قبولی را با نتایج مربوط به حفاری های موجود در این منطقه نشان می دهد.

آقاجانی و همکاران (۱۳۹۱) با هدف تعیین محدوده های آنومالی کانی کرومیت در محدوده شرق سبزوار و تعیین محل های مناسب برای ادامه اکتشافات زیرسطحی به برداشت گرانی سنجی و تفسیر و مدل سازی آن پرداختند. بر اساس این مطالعات ۱۰ آنومالی مثبت در منطقه شناسایی و معرفی گردید.

نجاتی کلاته و همکاران (۲۰۱۳) برای تخمین مدل زیرسطحی، به مدل سازی توده های کرومیت رودان در بندرعباس با استفاده از آنومالی های گرانی پرداختند. در این تحقیق با ایجاد زمین به صورت بلوک های مستطیلی با چگالی ثابت و با استفاده از کمینه کردن تابع هدف برازش شده بر داده های مشاهده ای مقدار چگالی تخمین زده شد و بر اساس نتایج حاصله، مدل سه بعدی کانسار تهیه گردید.

علی پور و همکاران (۱۳۹۳) برای تخمین عمق ساختارهای زیرسطحی کرومیت در منطقه کاماگائی کوبا، به مقایسه روش های طیف توان شعاعی و اوپلر دیکانولوشن پرداختند. آن ها در این تحقیق به نتیجه رسیدند که به دلیل تباین چگالی کرومیت با محیط اطراف، می توان با ترکیب نتایج روش های مختلف آشکارسازی لبه و تخمین عمق، اطلاعات مفیدی در ارتباط با ساختار زیرسطحی مورد مطالعه به دست آورد. هم چنین در این مورد خاص روش های طیف توان پاسخ مناسب تری را در تعیین عمق آنومالی های سطحی تر ارائه داده است و این نتایج تطابق قابل قبولی با نتایج حفاری های موجود را نشان می دهد.

آقاجانی (۱۳۸۸) با استفاده از داده‌های گرانی به بررسی و شناسایی گنبد نمکی هومبل و توده معدنی ماسیوسولفید، به کمک روش گرادیان کل نرمال پرداخت و در نتیجه موقعیت افقی و عمق توده‌ها برآورد شد. همچنین آقاجانی و همکاران (۱۳۸۹) جهت تعیین عمق کف یک لندفیل مدفون از روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی استفاده کردند. نتایج عمق تخمینی به دست آمده با این روش، با نتایج حفاری و داده‌های دیگر تطابق کامل داشت.

عابدی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از روش گرادیان کل نرمال (NFG) به تعیین عدد هارمونیک مناسب جهت برآورد عمق بالا و مرکز توده پرداختند و این مقادیر را بر روی داده‌های مصنوعی اعمال کردند. پس از بررسی عملکرد، نهایتاً به صورت دوبعدی و سه‌بعدی بر روی داده‌های واقعی توده زغال بیتومینه امتحان کردند.

## ۴-۱ ضرورت انجام پایان‌نامه

وجود ذخایر معدنی با ارزش مانند کرومیت یکی از عوامل مؤثر در توسعه هر کشور می‌باشد، از طرفی به علت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص عنصر کروم در صنایع مختلف، این کانی جزء کانی‌های استراتژیک در جهان است. در بسیاری از کشورهای جهان نظیر آفریقا، آمریکا، ایران و کوبا معادن کرومیت فعالی وجود دارد؛ که در این میان کمپلکس بوشولد در آفریقای جنوبی، بزرگ‌ترین کمپلکس دنیاست که ۶۷۰۰۰ کیلومتر مربع وسعت و ۹ کیلومتر ضخامت داشته و سن آن ۲۰۵۰-۲۰۰۰ میلیون سال است. این کمپلکس واقع در آفریقای جنوبی بزرگ‌ترین ذخیره کرومیت جهان را تشکیل می‌دهد. از آن‌جا که بسیاری از این ذخایر در سنگ‌های افیولیتی واقع شده‌اند، در بسیاری از موارد اکتشاف و پی‌جویی این ذخایر به دلیل پیچیدگی و در هم ریختگی واحدهای آن دشوار می‌باشد؛ بنابراین استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی جهت شناسایی این ماده معدنی، سبب شناخت بهتر آن شده و هزینه عملیاتی و اجرایی استخراج را کاهش خواهد داد. بنابراین روش‌های اکتشافی ژئوفیزیکی جهت تعیین محدوده تقریبی توده‌های کرومیتی می‌تواند

به کاهش هزینه‌های عملیات حفاری کمک کرده و در تعیین عمق تقریبی کانسارها مؤثر واقع گردد. هم‌چنین مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی می‌تواند الگویی ارائه دهد که منجر به درک بهتری از توزیع زیرسطحی کانسارها گردد. با توجه به پیچیده بودن ساختار زمین‌شناسی توده‌های کرومیتی، اگر بتوان مدل اکتشافی خوبی برای شناسایی این‌گونه کانسارها ارائه داد، این الگو می‌تواند نقش مؤثری در اکتشاف این ماده معدنی در سطح کشور داشته باشد.

## ۵-۱ روش تحقیق

جهت انجام این تحقیق یعنی مدل‌سازی ساختارها و توده‌های کرومیتی با استفاده از نرم‌افزارهای WingLink، Modelvision و Grav3D، ابتدا با استفاده از اشکال هندسی ساده به مدل‌سازی مستقیم و معکوس پرداخته شده است. سپس داده‌های گرانی منطقه معدنی کاماگائی کوبا که توسط پژوهشگران زیادی کار شده است، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و در محیط نرم‌افزار Surfer و Oasis Montaj نقشه آنومالی باقی‌مانده آن تهیه گردید. سپس از روی پروفیل‌های استخراجی از آن به مدل‌سازی مستقیم و معکوس پرداخته شد. هم‌چنین این کار بر روی داده‌های گرانی محدوده معدنی کرومیت شرق سبزوار، پس از اعمال تصحیحات و پردازش‌های لازم، انجام شد.

## ۶-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در قالب پنج فصل تهیه و تنظیم شد. فصل اول شامل کلیاتی در مورد هدف، ضرورت و روش تحقیق می‌باشد. فصل دوم به معرفی اجمالی روش گرانی‌سنجی، روش‌های مختلف مدل‌سازی و روش گرادیان کل نرمال اختصاص یافته است. در فصل سوم به بررسی مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌های مصنوعی پرداخته شده است. فصل چهارم به معرفی مناطق مورد مطالعه و انجام مدل‌سازی بر روی داده‌های مورد مطالعه اختصاص داده شده است و در نهایت در فصل پنجم به نتیجه‌گیری و پیشنهادات حاصل از این تحقیق پرداخته شده است.

در ادامه در فصل بعد به روش‌شناسی کار تحقیق حاضر پرداخته می‌شود.

## فصل دوم

# روش‌شناسی تحقیق

## ۱-۲ مقدمه

ژئوفیزیک علمی است که با کمک اندازه‌گیری‌های یک پارامتر فیزیکی در سطح، می‌توان به اطلاعاتی سودمند در مورد ذخایر پنهان در زیر زمین دسترسی پیدا کرد [Telford et al, 1991]. روش‌های ژئوفیزیکی کاربردهای متعددی از جمله اکتشاف معدن، نفت، بررسی‌های باستان‌شناسی، بررسی‌های مهندسی و نظیر آن را دارند. از اهداف مهم در اکتشاف منابع معدنی شناخت وضعیت عمقی، شیب و جهت گسترش کانسار می‌باشد، بدین منظور از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود. این روش‌ها با برداشت داده‌های سطحی، سعی در شناسایی عوارض و پدیده‌های زیرسطحی دارند. روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در حکم روش‌های میدان پتانسیل، از پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی هستند که در جهت اهداف گسترده‌ای چون تهیه نقشه ژئوفیزیکی عوارض زمین‌شناسی و اکتشاف معادن به کار گرفته می‌شوند [آقاجانی، ۱۳۸۸]. در این دو روش اثرات میدان مغناطیسی و گرانی زمین بر توده‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی مختلف بررسی و با یکدیگر مقایسه می‌شود. عامل فیزیکی تأثیرگذار در روش گرانی‌سنجی چگالی توده‌های زیرسطحی و اختلاف خودپذیری توده‌ها با جوانب، وجه تمایز بین توده‌ها در روش مغناطیس‌سنجی است. در صورتی‌که کانسار یا ساختار زمین‌شناسی دارای اختلاف وزن مخصوص و خودپذیری مغناطیسی با محیط دربرگیرنده خود باشد، این روش‌ها می‌توانند توزیع تقریباً مشخص و قابل قبولی از آنومالی‌ها را در سطح زمین به وجود آورند.

## ۲-۲ روش گرانی‌سنجی

هر جسم زمینی تحت تأثیر نیروی جاذبه گرانشی زمین قرار گرفته و این نیرو موجب ایجاد یک شتاب گرانش متغیر با زمان و مکان می‌شود. این نیرو به طور کلی وابسته به شکل و توزیع جرم داخل

زمین و هم‌چنین جاذبه اجرام سماوی ویژه ماه و خورشید است. گرانی‌سنجی به عنوان شاخه‌ای قدیمی از علوم کلاسیک، برای مطالعه نظری و تجربی میدان جاذبه زمین استفاده و شامل ابداع روش‌های اندازه‌گیری این تغییرات است. گالیله<sup>۱</sup> در اوایل سده شانزدهم میلادی (۱۶۴۲-۱۵۶۴) قانون سقوط آزاد اجسام را کشف کرد و برای اولین بار شتاب گرانی را اندازه گرفت [ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۸۹]. در سال ۱۶۸۷ اسحاق نیوتون<sup>۲</sup> با ارائه رساله خود تحت عنوان "اصول ریاضی فلسفه طبیعی"<sup>۳</sup> بیان کرد که روش گرانی‌سنجی جایگاه بسیار توانمندی را در بین علوم دارد. اتووش<sup>۴</sup> در سال ۱۹۰۸ به امکان استفاده از داده اندازه‌گیری شده توسط ترازوی کششی<sup>۵</sup> برای مطالعه زمین-شناسی پوسته بالایی اشاره کرد [Jakosky, 1950]. این روش در ابتدا برای تعیین محل گنبد‌های نمکی در مکزیک و آمریکا و بعدها برای یافتن ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی مانند طاق‌دیس‌ها در جنوب غرب آمریکا به کار برده شد. امروزه با کمک آن برای اکتشافات مقدماتی که هیچ‌گونه اطلاعات قبلی موجود نیست با صرف وقت و هزینه کم، می‌توان مشخصات ساختاری منطقه را بررسی کرد [Dobrin and Savit, 1988]. با پیشرفت فناوری، گرانی‌سنج‌های سبک‌تر و دقیق‌تری در حد میکروگال ساخته شده است، که برای اکتشاف‌های معدنی و زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه حوزه عمل گرانی‌سنجی از ابعاد بزرگ بی‌هنجاری (چند صد متر تا چند کیلومتر) که بیش‌تر برای بررسی‌های زمین‌شناسی و شناسایی منابع هیدروکربوری و منابع ژئوترمال است تا ابعاد کوچک (چند ده متر) در مطالعات معدنی (شکل ۱-۲) و ابعاد بسیار کوچک (چند متر) در کاربردهای زمین-شناسی سطحی، شناسایی آثار باستانی و مهندسی عمران متغیر است.

---

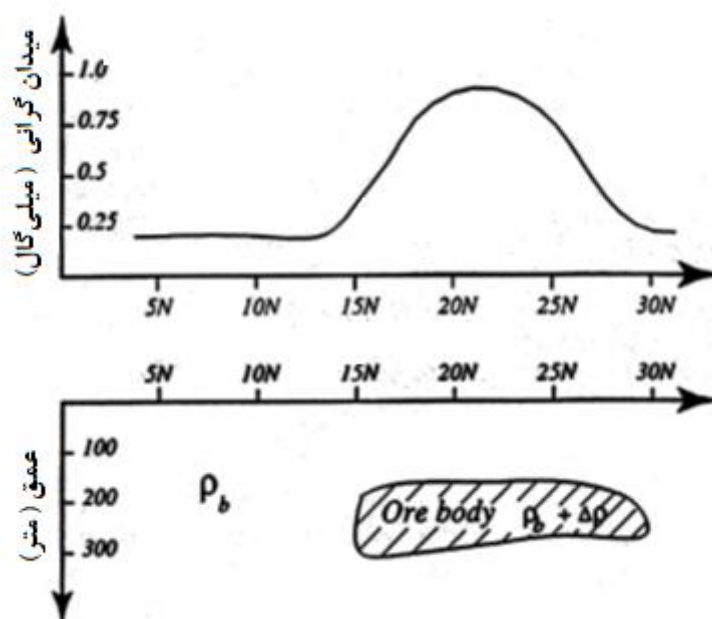
<sup>۱</sup> Galileo Galilei

<sup>۲</sup> Isaac Newton

<sup>۳</sup> Philosophiae Naturalis Principia Mathematica

<sup>۴</sup> Roldand Von Eotvos

<sup>۵</sup> Tension Balance



شکل ۱-۲: پروفیل آنومالی گرانی روی یک کانسار معدنی با چگالی بالا [ After Zhdanov, 2002 ].

واحد اندازه‌گیری شتاب جاذبه گال ( $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/sec}^2$ ) است که در عمل معمولاً از واحد

کوچک‌تری به نام میلی‌گال ( $1 \text{ gal} = 1000 \text{ mgal}$ ) استفاده می‌شود.

## ۲-۳ مراحل اجرای روش گرانی‌سنجی برای اکتشاف مواد معدنی

### ۲-۳-۱ جمع‌آوری داده‌های گرانی‌سنجی

طراحی شبکه برداشت و جمع‌آوری داده‌ها، اولین مرحله از یک کار اکتشافی ژئوفیزیکی است. پس از تعیین نوع برداشت اعم از زمینی، دریایی و هوایی، مطابق با نوع برداشت و مشخصات منطقه مورد مطالعه، شبکه برداشت طراحی و پارامترهای مربوطه تعیین می‌گردد. در برداشت‌های زمینی گرانی‌سنجی، مسائلی از قبیل شبکه‌بندی منطقه، فاصله ایستگاه‌ها، طول خطوط برداشت و ... مدنظر است. پس از طراحی شبکه، نقشه‌برداری نقاط برداشت انجام شده و سپس مقادیر گرانی نقاط اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند.



## ۲-۳-۲ تصحیحات روش گرانی‌سنجی

عموماً تصحیحاتی از قبیل تصحیح رانه (دریفت)<sup>۱</sup>، جذر و مد<sup>۲</sup>، تصحیح هوای آزاد<sup>۳</sup>، تصحیح بوگه<sup>۴</sup>، تصحیح عرض جغرافیایی<sup>۵</sup> و تصحیح توپوگرافی<sup>۶</sup> بر روی مقادیر اولیه گرانی اندازه‌گیری شده روی هر ایستگاه در یک شبکه برداشت اعمال شود، که در ادامه به اختصار توضیح داده می‌شوند.

### الف) تصحیح دریفت

میزان اندازه‌گیری میدان گرانی در یک ایستگاه با گذشت زمان تغییر می‌کند. این مقدار اختلاف، دریفت دستگاه نام دارد. عوامل مختلفی در ایجاد دریفت نقش داشته که مهم‌ترین آن‌ها خستگی و تغییر خواص الاستیسیته ماده حساس در گرانی‌سنج می‌باشد.

برای محاسبه دریفت دستگاه در شروع کار مقدار گرانی در ایستگاه اصلی اندازه‌گیری و سپس ایستگاه فرعی برداشت می‌شود و در نهایت مجدداً به ایستگاه اصلی رفته و مقدار گرانی اندازه‌گیری می‌شود. این عمل معمولاً هر دو ساعت یک بار انجام می‌شود. برای محاسبه دریفت سایر ایستگاه‌ها به این طریق عمل می‌شود که اختلاف زمان قرائت ایستگاه مبنا در شروع عملیات و زمان قرائت هریک از ایستگاه‌های گرانی دیگر محاسبه می‌شود. مقدار دریفت (رانه) دستگاه به صورت زیر است:

$$DR = (g_1 - g_2) / (T_2 - T_1) \quad (1-2)$$
$$\delta g_{DC(i)} = DR * (T_i - T_1)$$

$g_1$ : گرانی قرائت شده مربوط به ایستگاه اصلی بر حسب میلی‌گال در زمان  $T_1$ .

$g_2$ : گرانی قرائت شده مربوط به ایستگاه اصلی بر حسب میلی‌گال در زمان  $T_2$ .

---

<sup>۱</sup> Drift Correction

<sup>۲</sup> Tide Correction

<sup>۳</sup> Free air Correction

<sup>۴</sup> Bouger Correction

<sup>۵</sup> Latitude Correction

<sup>۶</sup> Terrain Correction

$\delta g_{DC}$ : دریافت دستگاه بر حسب میلی گال. اگر مقدار دریافت بیشتر از مقدار مجاز باشد برنامه قرائت تکرار می شود،  $T_i$  زمان قرائت سایر ایستگاه ها است، DR نرخ دریافت بر حسب میلی گال بر ساعت است. مقدار تصحیح دریافت که بدین ترتیب به دست می آید می تواند منفی یا مثبت باشد و از مقدار میدان اندازه گیری شده در ایستگاه مورد نظر کم می شود.

### ب) تصحیح عرض جغرافیایی

این تصحیح ناشی از شکل و متغیر بودن شعاع زمین با توجه به برآمدگی جزئی در استوا و فرورفتگی در قطبین می باشد که این عوامل باعث کاهش گرانی در استوا می گردد. زیرا شتاب گرین از مرکز در قطبین صفر و در استوا بیشینه می باشد [ Telford, 1991 ]. مقدار تصحیح عرض جغرافیایی برای داده های برداشت شده روی یک شبکه یا پروفیل غیر شرقی - غربی الزامی است و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\delta g_{\varphi} = 0.00812 \sin 2\varphi \times \Delta y \quad (2-2)$$

که در آن  $\delta g_{\varphi}$  مقدار تصحیح عرض جغرافیایی بر حسب میلی گال و  $\varphi$  عرض جغرافیایی مربوط به خط مبنا است. مقداری که بدین ترتیب به دست می آید، از مقدار گرانی ایستگاه اندازه گیری واقع در شمال ایستگاه مبنا کم در حالت عکس به مقدار گرانی ایستگاه اندازه گیری اضافه می شود.

### ج) تصحیح ارتفاعی (هوای آزاد + تخته بوگه)

معمولاً ایستگاه های گرانی بر روی نقاط با ارتفاع های مختلف قرار دارند و این اختلاف ارتفاع موجب تغییر در میزان گرانی اندازه گیری شده خواهد شد. با انجام تصحیح ارتفاعی کلیه مقادیر اندازه گیری شده به یک سطح مبنا انتقال داده می شود. تصحیح ارتفاعی دارای دو مؤلفه تصحیح هوای آزاد و تخته بوگه است.

مقدار تصحیح هوای آزاد از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\delta g_{FA} = 0.3086h \quad (3-2)$$

$h$  ارتفاع ایستگاه‌های اندازه‌گیری نسبت به سطح مبنا برحسب متر.

$\delta g_{FA}$  مقدار تصحیح هوای آزاد بوده و برحسب میلی‌گال.

با اعمال این تصحیح تمام ایستگاه‌های اندازه‌گیری به یک سطح مبنا انتقال می‌یابند. اگر نقطه اندازه‌گیری بالاتر از سطح دریاها 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 [دولتی، ۱۳۷۲].

مقدار تصحیح تخته بوگه نیز از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$dg_B = 0.0419ph \quad (2-4):$$

$\rho$  چگالی بر حسب گرم بر سانتی‌مترمکعب

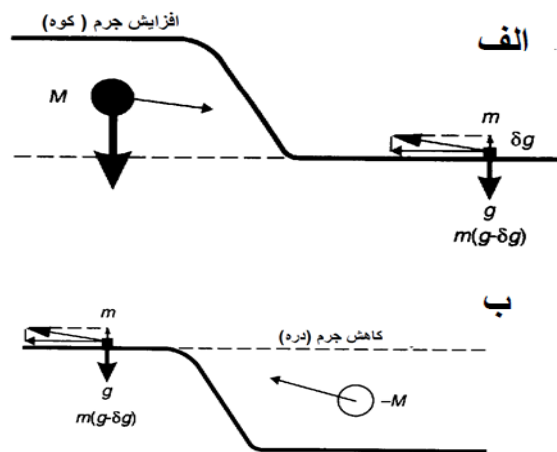
$h$  ارتفاع ایستگاه‌ها نسبت به سطح مبنا بر حسب متر

$\delta g_B$  تصحیح بوگه و برحسب میلی‌گال

اگر نقطه اندازه‌گیری بالاتر از سطح مبنا باشد، تصحیح بوگه از مقدار گرانی کم می‌گردد و چنان‌چه نقطه اندازه‌گیری پایین‌تر از سطح مبنا باشد، این مقدار تصحیح به مقادیر قرائت شده اضافه می‌شود.

#### (د) تصحیح توپوگرافی

مقدار جاذبه اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه تحت تأثیر جرم‌های ناشی از تپه‌ها و دره‌های اطراف آن قرار می‌گیرد (شکل ۲-۲). پس علاوه بر تصحیح بوگه، تصحیحی تحت عنوان تصحیح توپوگرافی لازم است تا اثرات این بی‌نظمی‌ها بر روی ایستگاه اندازه‌گیری محاسبه شده و از داده‌های مشاهده‌ای حذف شود [نوروزی، ۱۳۸۸]. این تصحیح همواره مثبت بوده و به گرانی قرائت‌شده در هر ایستگاه اضافه می‌گردد [Reynolds, 1997].



شکل ۲-۲: اثر توپوگرافی بر میزان گرانی اندازه‌گیری شده [After Reynolds, 1997]. الف- اثر کوه ب- اثر دره.

## ۲-۳-۳ پردازش داده‌های گرانی و تفکیک آنومالی‌ها

از آن‌جا که برداشت‌های میدان پتانسیل برای مقاصد مختلفی مانند کشف امتدادهای ساختمانی، بررسی پی‌سنگ منطقه و کشف و تحلیل منابع آنومالی مربوط به توده‌های معدنی استفاده می‌شوند؛ نقشه‌های تهیه‌شده از برداشت‌های میدان گرانی سنجی مجموع اثرات توده‌های با چگالی متفاوت و در اعماق متفاوت می‌باشد [Reynolds, 1997]. این نقشه‌ها نشانگر شکل یا ساخت زیرسطحی نیستند؛ بلکه فرم میدان پتانسیل حاصل از اشکال زیرسطحی را مشخص می‌کنند.

بسته به هدف و همچنین مقیاس برداشت داده‌های میدان پتانسیل، آنومالی‌های ناحیه‌ای و یا باقی‌مانده به کار گرفته می‌شوند [Grant and west, 1965]. در نقشه‌های میدان پتانسیل، تأثیرات سنگ بستر که آنومالی ناحیه‌ای نامیده می‌شود، با تغییرات ملایم و خطی مشخص می‌شوند. این آنومالی‌ها دارای فرکانس پایین و طول موج بلند هستند. در حالی که آنومالی‌های باقی‌مانده ناشی از منابع سطحی کم عمق که از کم کردن مقادیر آنومالی برداشت شده از آنومالی ناحیه‌ای به دست می‌آیند، دارای فرکانس بالا و طول موج کوتاه می‌باشد [ Nettleton, 1976 ]. در کارهای اکتشافی برای تفکیک و مشخص نمودن آنومالی‌های محلی یا باقی‌مانده، آنومالی‌های مشاهده‌ای از آنومالی‌های ناحیه‌ای کم می‌شوند. زمانی که هدف برداشت، شناسایی و تحلیل آنومالی‌های محلی

گرانی سنجی باشد، نقشه آنومالی باقیمانده مورد استفاده قرار می گیرد. داده های برداشت شده در یک منطقه، طیفی از آنومالی های سطحی یا باقی مانده تا آنومالی های عمیق یا ناحیه ای (توده ها و منابع معدنی در اعماق مختلف) را شامل می شود؛ بنابراین لازم است این دو دسته آنومالی ها از یکدیگر تفکیک شوند تا بدین ترتیب آنومالی های مورد نظر آشکارسازی شوند.

$$g_{res} = g_{obs} - g_{reg} \quad (2-5):$$

$g_{res}$  آنومالی باقی مانده

$g_{obs}$  آنومالی میدان گرانی

$g_{reg}$  آنومالی ناحیه ای

تخمین درست و حذف میدان ناحیه ای از داده های مشاهده ای، میدان باقی مانده تولید شده که به منابع هدف مربوط می شود را نتیجه می دهد. در اغلب کارهای اکتشافی تفسیر و مدل سازی عددی برای داده های میدان باقی مانده انجام می شود و اعتبار تفسیر به درجه تفکیک آنومالی های باقی مانده و ناحیه ای بستگی دارد.

روش های متفاوتی برای جداسازی آنومالی های ناحیه ای و محلی از یکدیگر وجود دارد؛ که یکی از انعطاف پذیرترین روش های تحلیلی، روش روند سطحی است [ Unwin, 1975; Miller, 1956 ]. در این روش بر داده های گرانی سنجی، سطحی عبور داده می شود که پیچیدگی معادله ریاضی سطح مورد نظر به روند حاکم بر داده ها بستگی دارد [ Robinson and Coruh, 1988 ].

در حالت کلی معادله سطح مذکور برای حالت دوبعدی به صورت زیر است:

$$T(x, y) = A_{00} + A_{10}x + A_{01}y + A_{11}xy + \dots + A_{mn}x^m y^n \quad (2-6):$$

پس از عبور دادن سطح مزبور بر داده های گرانی، مقدار باقی مانده گرانی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R_i = G_i - T_i \quad (7-2)$$

که در آن،  $T_i$  پاسخ سطح مربوط به عنوان معرف سطح ناحیه‌ای مورد نظر،  $G_i$  داده‌های اندازه‌گیری شده و  $R_i$  بیانگر آنومالی باقی‌مانده گرانی می‌باشد.

## ۲-۳-۴ تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی

در نهایت، مدل فیزیکی حاصل از اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی با کمک اطلاعات زمین‌شناسی مربوط به منطقه مورد مطالعه و نیز اطلاعات کمکی دیگر به صورت مدل زمین‌شناسی تفسیر خواهد شد.

## ۲-۴ تخمین گسترش افقی و عمقی

یکی از مسائل مرتبط با مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، عدم یکتایی پاسخ است و برای حل این مشکل دو راه حل وجود دارد:

۱- استفاده از فرض‌های ساده برای مدل، مانند این که توضیح چگالی یکنواخت در نظر گرفته شود و یا از اجسام ساده استفاده شود. این فرض ممکن است تعدادی از معادلات را کاهش دهد؛ اما هنوز پاسخ مسئله غیریکتاست.

۲- راه دوم تلاش جهت به دست آوردن اطلاعاتی راجع به منبع آنومال است؛ که شامل اطلاعاتی درباره عمق منبع، تشخیص لبه‌ها و غیره می‌شود.

از اهداف اصلی در تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی و نیز شرط مهم برای دستیابی به یک مدل‌سازی درست، انتخاب پارامترهای هندسی مناسب برای مدل است. پس از تعیین مدل مناسب، پاسخ آن تعیین و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌گردد. تعیین عمق و محدوده توده آنومال از جمله این پارامترهای هندسی می‌باشند. امروزه روش‌های گوناگونی برای این منظور وجود دارد. اغلب روش‌های تخمین عمق خودکار محدود به داده‌های پروفیلی و فرض دوبعدی بودن منابع می‌باشد. برخی از این روش‌ها، در جهت کاربرد بر روی داده‌های شبکه‌ای بهبود یافتند. یکی از این روش‌ها،

روش گرادیان کل نرمال می‌باشد؛ که در تشخیص گسترش افقی و برآورد عمق توده‌های آنومال میدان پتانسیل مفید است [Zeng et al, 2002].

### گرادیان کل نرمال شده<sup>۱</sup> (NFG)

با توجه به این که در روش گرانی‌سنجی، یکی از اهداف، آشکارسازی ذخایر کوچک موجود در ساختارهای بزرگ زیرسطحی است، لازم است از فیلترهای مشتق میدان گرانی برای آشکارسازی آنومالی‌های گرانی ناشی از اجرام کوچک و روش گسترش رو به پایین برای آشکارسازی آنومالی‌های گرانی در عمق استفاده شود. روش گرادیان کل نرمال با در نظر گرفتن مشتق داده‌های گرانی سبب کاهش نوفه‌های ناشی از روش گسترش رو به پایین می‌شود. این روش اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط برزکین ارائه گردید [آقاجانی، ۱۳۸۵]. این روش به طور گسترده در روش‌های میدان پتانسیل، به خصوص روش‌های گرانی‌سنجی کاربرد دارد. از آن جا که در تهیه نقشه‌های فروسو، محاسبات در حوزه بسامد انجام می‌شود؛ بنابراین اثر نوفه باعث تخریب این نقشه‌ها می‌شود، استفاده از روش NFG باعث انجام محاسبات به صورت درست می‌گردد.

این روش راهی آسان برای تخمین عمق اولیه برای ساختارهای زیرسطحی به خصوص در مواردی که اطلاعات ژئوفیزیکی دیگر و یا اطلاعات حفاری وجود ندارد می‌باشد و با استفاده از آن می‌توان عمق بالا و مرکز توده را برآورد کرد. مقدار گرادیان کل نرمال دوبعدی به صورت زیر تعریف می‌شود [Berzkin, 1973]:

$$G_N(x,y) = \frac{G(x,y)}{G_m(z)} = \frac{\sqrt{\bar{V}_{xz}^2(x,y) + \bar{V}_{zz}^2(x,y)}}{\frac{1}{M} \sum_0^M \sqrt{V_{xz}^2(x,y) + \bar{V}_{zz}^2(x,y)}} \quad (۸-۲)$$

<sup>۱</sup> Normalized Full Gradient (NFG)

که در آن:  $V_{xz}(x, y)$  مشتق افقی داده‌های گرانی،  $V_{zz}(x, y)$  مشتق اول قائم داده‌های گرانی،

$G(x, y)$  گرادیان کامل داده‌های گرانی،  $G_m(z)$  میانگین گرادیان کامل در عمق  $z$  و  $M$  تعداد نقاط

است،  $G_N(x, y)$  گرادیان کل نرمال برای داده‌های گرانی است.

برزکین (۱۹۷۳)، بی‌هنجاری‌های گرانی را به صورت سری فوریه سینوسی در دامنه  $(-L, L)$

چنین بیان کرد:

$$\Delta g(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin \frac{n\pi x}{L} \exp\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \quad (9-22)$$

که در آن:

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L \Delta g(x, 0) \sin \frac{n\pi x}{L} dx$$

$$V_{xz}(x, z) = \frac{\partial g(x, z)}{\partial x}, V_{zz}(x, z) = \frac{\partial g(x, z)}{\partial z} \quad (10-2)$$

در معادله بالا پارامتر  $L$  طول پروفیل داده‌های گرانی و  $N$  تعداد جملات است.

با توجه به آن در فضای دوبعدی می‌توان نوشت:

$$G(x_i, z) = \sqrt{\left[\frac{\partial g(x_i, z)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial g(x_i, z)}{\partial z}\right]^2}$$

$$G_m(z) = \frac{1}{M} \sum [G(x_i, z)] \quad (11-2)$$

$$V_{xz}(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^N n B_n \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(\frac{n\pi z}{L}\right)$$

$$V_{zz}(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^N n B_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(\frac{n\pi z}{L}\right)$$

برای حذف اثر نوفه‌های با بسامد زیاد ناشی از گسترش به سمت پایین و حذف اثر گیبس، از

فاکتور هموارسازی استفاده می‌شود:



$$Q_{\mu} = \left( \frac{\sin(\frac{n\pi}{N})}{\frac{n\pi}{N}} \right)^{\mu} \quad (2-12):$$

پارامتر  $\mu$  توان تابع هموارساز بوده و مقدار آن در بهترین حالت برای داده‌های گرانی ۲ منظور می‌شود [آقاجانی، ۱۳۸۸]. با استفاده از NFG دوبعدی روی یک مقطع می‌توان مرز توده هدف با زمینه و محدوده تقریبی عمق توده را به دست آورد. در این روش مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال به ازای مقادیر مختلف از جملات هارمونیک سری فوریه محاسبه و نمودار تغییرات رسم می‌گردد. تغییرات نمودار مذکور به لحاظ شیب و مقادیر بیشینه و کمینه محدوده‌هایی را در نمودار به نمایش می‌گذارد و محدوده اول با شیب یکسان و به صورت خطی تغییرات را نشان می‌دهد و محدوده دوم از انتهای محدوده خطی تا اولین کمینه نسبی را در برمی‌گیرد و به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته بر روی تعدادی مدل، این نتیجه حاصل گردید که تعداد جملات متناظر با اولین بیشینه نسبی موجود در محدوده دوم نمودار تغییرات گرادیان کل نرمال با تعداد جملات هارمونیک، عدد بهینه‌ای جهت محاسبه گرادیان کل نرمال می‌باشد. بر این اساس می‌توان عنوان کرد که تعداد جملات هارمونیک عددی است مساوی یا کوچک‌تر از عددی که اولین بیشینه نسبی را بعد از محدوده خطی نمودار تولید می‌کند [آقاجانی، ۱۳۸۸].

## ۲-۵ روش‌های مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی

هدف اصلی در ارتباط با تفسیر داده‌های میدان پتانسیل برآورد یک یا چند پارامتر از منبع با ترکیب همه اطلاعات در دسترس زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و سایر اطلاعات مستقل است. به طور کلی روش‌های تفسیر را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد که در این پایان‌نامه از دو روش آن استفاده شده است. هدف هر سه روش یکی است؛ اما هریک از آن‌ها با فرآیندهای متفاوتی این هدف را دنبال می‌کنند و در همه روش‌ها استفاده از اطلاعات مستقل اهمیت بالایی دارد. بنابراین هریک از اطلاعات از

قبیل اطلاعات زمین‌شناسی، حفاری و یا اطلاعات به دست آمده از روش‌های دیگر که در دسترس باشد بایستی مورد استفاده قرار گیرد. از آن‌جا که ذات روش‌های مدل‌سازی غیر منحصربه‌فرد بودن است، لذا بهره‌گیری از اطلاعات ذکر شده در روند کار با کنترل پارامترهای مدل، به کاهش مجموعه‌ای از بی‌نهایت راه‌حل‌های ریاضی می‌انجامد. با توجه به موارد توضیح داده شده ممکن است این‌گونه به نظر آید که روش‌های معکوس‌سازی راحت‌تر از روش‌های مستقیم می‌باشد؛ اما این مسئله همیشه صادق نیست. در روش‌های معکوس نیز استفاده از مدل ساده ضروری است و البته گنجاندن اطلاعات مستقل نیز ممکن است دشوار باشد، از سوی دیگر فرآیند تکرار شونده در روش مستقیم موجب تسهیل در ادغام اطلاعات اولیه می‌شود [Blakely, 1996].

در تفسیر آنومالی‌های گرانی‌سنجی، روش‌های مدل‌سازی مورد نیاز می‌باشند. نتیجه مدل‌سازی، مدل فیزیکی‌ای می‌باشد که با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی مربوط به منطقه، نهایتاً به صورت مفهوم زمین‌شناسی تفسیر می‌شود.

مدل‌سازی یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل تفسیر داده‌ها می‌باشد که بین داده‌های مشاهده‌ای، تغییر خواص فیزیکی اجرام زیرسطحی مختلف و یا ناپیوستگی‌هایی که این تغییرات را به وجود آورده‌اند ارتباط برقرار کرده و پارامترهای فیزیکی و هندسی منابع زمین‌شناسی که اصطلاحاً به آن‌ها پارامترهای مدل می‌گویند را محاسبه می‌کند [Blakely, 1996].

پس از ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه با خصوصیات و مشخصات آنومالی‌ها و تخمین اولیه پارامترهای مدل، یک مدل فیزیکی که در برگیرنده خصوصیات آنومالی است، پیشنهاد شده و با روش‌های مدل‌سازی به بهترین تطبیق با آنومالی مشاهده‌ای اصلاح می‌گردد.

مدل‌سازی داده‌ها بسته به مورد مطالعه به صورت دوبعدی و سه‌بعدی انجام می‌شود. وقتی که نمایش ساختمان‌های زمین‌شناسی توسط یک سری توده‌های دوبعدی که در یک جهت گسترش دارند امکان‌پذیر باشد، از سیستم محاسبات دوبعدی استفاده می‌شود. اگر نتوان تغییرات فیزیکی توده‌ای که مدل می‌شود را در یک جهت یکنواخت در نظر گرفت یا اینکه ساختارش به قدری پیچیده

باشد که با توده‌های به شکل هندسی ساده نتوان تخمین زد، ضروری است که محاسبات سه‌بعدی انجام شود. مدل‌سازی داده‌های میدان پتانسیل به‌طور کلی در دو دسته مستقیم و معکوس شناخته می‌شوند [Won et al, 1987].

معمولاً مدل‌سازی از طریق مقایسه میدان حاصل از مدل با آنومالی‌های باقی‌مانده یا مشاهده‌ای انجام می‌شود. چنانچه مقادیر محاسبه‌ای با مقادیر مشاهده‌ای برازش نگردد، پارامترهای مدل تغییر داده می‌شود و فرآیند تا زمانی که برازش کافی بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برقرار گردد ادامه می‌یابد [ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۸۹].

## ۲-۵-۱-۱ مدل‌سازی مستقیم

فرآیند مدل‌سازی مستقیم شامل محاسبه یک آنومالی از یک مدل فرضی و تکرار محاسبات بر پایه تغییر پارامترهای مدل مثل اختلاف دانسیته، مغناطیس‌پذیری، عمق و غیره است تا انطباق مناسب بین آنومالی محاسبه‌شده و آنومالی مشاهده‌شده ایجاد شود. در گرانی‌سنجی به منظور انجام مدل‌سازی مستقیم یک مدل اولیه در نظر گرفته می‌شود، آن‌گاه با استفاده از روش‌های مختلف گرانی‌سنجی اثر گرانی مدل محاسبه می‌گردد. برای محاسبه مقدار شتاب گرانی باید از پتانسیل مشتق گرفت. برای محاسبه مقدار پتانسیل گرانی  $U$  و شتاب گرانی  $g$  یک جسم از یک نقطه مشخص  $P$  می‌توان نوشت [Blakely, 1995; Telford et al, 1991].

$$U(p) = G \int_R \frac{\rho}{r} dv \quad (۲-۱۳):$$

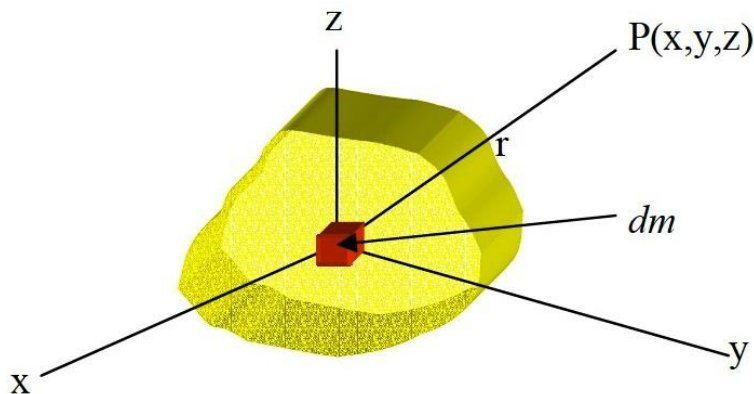
$$g(p) = \nabla U(p) = -G \int_R \frac{\rho \cdot \hat{r}}{r^2} dv \quad (۲-۱۴):$$

که در آن  $\rho$  چگالی جامد و  $r$  فاصله از نقطه  $P$  تا یک المان کوچکی از توده جسم به حجم  $dv$ ،  $\hat{r}$  بردار واحد از یک المان کوچک جسم تا نقطه  $P$  بوده که فاصله آن به صورت

است:  $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$  محاسبه می‌شود و پارامتر  $G$  مقدار ثابت جهانی شتاب جاذبه

$$G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{KgS}^2$$

جهت مثبت محور  $z$  را به طرف پایین و قائم و محوره‌های  $x$  و  $y$  به صورت شکل (۳-۲) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳-۲: یک جسم سه‌بعدی با چگالی  $\rho(x', y', z')$  و شکل دلخواه با نقطه مشاهده‌ای  $P(x, y, z)$ . [Blakley, 1995]

گرانی‌سنج‌ها مقدار شتاب گرانی را (در جهت افزایش محور  $z$ ) اندازه‌گیری می‌کنند، بنابراین در مختصات کارتزین می‌توان نوشت [Blakley, 1995]:

$$g(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial z} = -G \iiint_{x', y', z'} \rho(x', y', z') \frac{(z - z')}{r^3} dx' dy' dz' \quad (۱۵-۲)$$

لازم است  $g(x, y, z)$  به طور مستقیم طبق معادله (۱۵-۲) محاسبه گردد اما این در عمل کار ساده‌ای نیست، بنابراین مقدار تقریبی این انتگرال برای ساختارها و شکل‌های زمین‌شناسی پیچیده تعیین می‌گردد، به این ترتیب که منابع گرانشی به  $N$  بخش ساده تقسیم و در نهایت معادله (۱۵-۲) به معادله (۱۶-۲) تبدیل می‌شود.

$$g_m = \sum_{n=1}^N \rho_n \psi_{mn} \quad (۱۶-۲)$$

برای تعیین و تشخیص اجسام با اشکال پیچیده، در مدل سازی مستقیم داده ها، از اثرات گرانشی اجسام با اشکال ساده هندسی مفید استفاده می شود. به منظور معادل سازی ساختارهای زمین شناسی با اجسام ساده هندسی در این مدل سازی ها سعی شده که با تلفیق برخی اجسام ساده هندسی با هم دیگر شرایط واقعی تری روی مدل ها بررسی شود. این مدل ها شاید واقع گرایانه نباشند اما معمولاً هم ارزی خوبی را جهت بررسی اینکه آیا اثر گرانش ناشی از شکل و عمق آن به داده های مشاهده ای نزدیک بوده و اینکه بتوان تفسیر زمین شناسی منطقی داشت به ما می دهد. مزیت استفاده از اشکال با هندسه مشخص به جای روش های مدل سازی مستمر این است که نیاز به اطلاعات چگالی و عمق ندارد و با اطلاعات کم و حتی زمانی که اطلاعات واقعی در دسترس نباشد می توان نتایج قابل قبولی را به دست آورد. جهت تفسیر اجسامی که از منبع آنومال دور شده اند با استفاده از روش هندسه ثابت می توان سریع تر و دقیق تر به نتیجه رسید.

مدل سازی مستقیم در یک روند سه مرحله ای انجام می شود، به این ترتیب که ابتدا بی هنجاری مدل مفروض محاسبه گردیده، سپس با داده های واقعی مقایسه شده و پارامترهای مدل جهت کمینه کردن اختلاف موجود، تعدیل می گردند و این فرآیند تا زمانی که نتایج راضی کننده باشند، ادامه می یابد. تعدادی از الگوریتم های کامپیوتری نیز از همین روند منطقی استفاده می کنند. با این تفاوت که می توان آن ها را جزء روش های معکوس دانست، زیرا پارامترهای مدل در این الگوریتم ها به طور خودکار تغییر می یابند و کنترل شخصی در آن ها حداقل است.

## ۲-۵-۱-۲ پاسخ گرانی توده های با شکل منظم هندسی

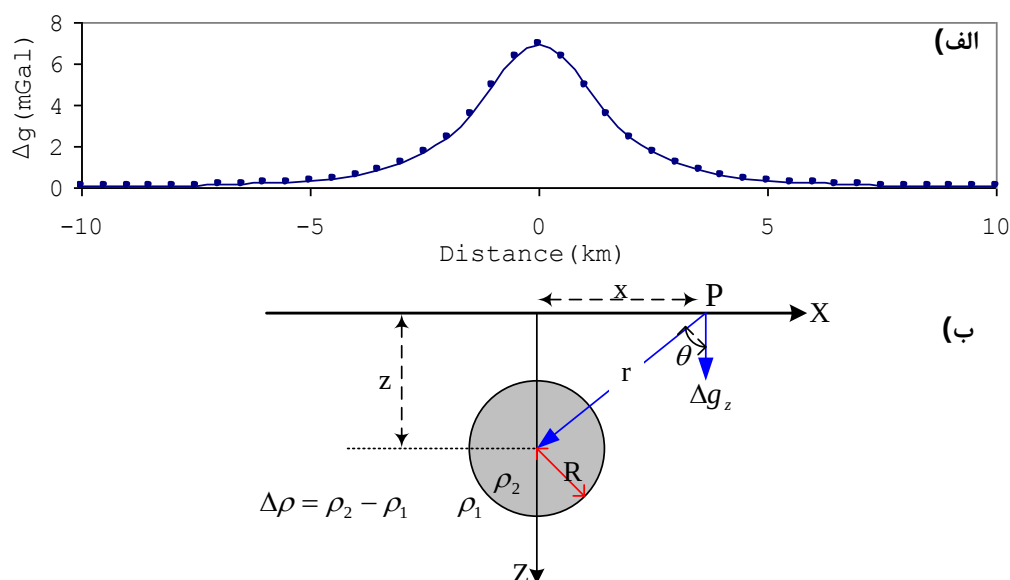
برای تعیین و تشخیص اجسام با اشکال پیچیده با آنومالی های گرانی سنجی، شناخت اثرات گرانشی اجسام با اشکال ساده هندسی مفید است. به منظور معادل سازی ساختارهای زمین شناسی با اجسام ساده هندسی در این مدل سازی ها سعی می شود که با تلفیق برخی اجسام ساده هندسی با هم دیگر شرایط واقعی تری روی مدل ها بررسی شود.

### الف- اثر گرانی ناشی از وجود یک کره مدفون

فرمول محاسبه اثر گرانی قائم،  $\Delta g_z$ ، یک کره از یک نقطه فرضی P (شکل ۲-۴) به صورت زیر است [Telford et al, 1991]:

$$\Delta g_z = \frac{4\pi G \Delta \rho \cdot R^3}{3} \times \frac{z}{r^3} \quad (2-17)$$

که در آن؛  $r = \sqrt{x^2 + z^2}$  در صفحه x-z، اثر گرانشی قائم کره،  $\Delta \rho$  اختلاف چگالی بین کره مدفون و مواد اطراف آن، G ثابت جاذبه زمین، R شعاع کره فرضی، x فاصله افقی نقطه اندازه‌گیری از مرکز کره و z عمق مرکز کره.



شکل ۲-۴: الف) نمودار تغییرات گرانی قائم یک کره از یک نقطه دلخواه P و ب) یک کره فرضی مدفون [Robinsons and Coruh, 1988].

### ب- اثر گرانی ناشی از وجود یک مکعب مدفون

اثر گرانی یک مکعب با ابعادی که بین مختصات  $(z_1, y_1, z_1)$  و  $(z_2, y_2, x_2)$  قرار دارد. از رابطه زیر به دست می‌آید [Gerken, 1989].

$$y = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[ z_k \operatorname{arctg} \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \cdot \log(R_{ijk} + y_i) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (2-18)$$

که در این رابطه:

$$R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$$

$$\mu_{ijk} = (-1)^i (-1)^j (-1)^k \quad (2-19)$$

### ۳-۱-۵-۲ پاسخ گرانی توده‌های با شکل نامنظم هندسی

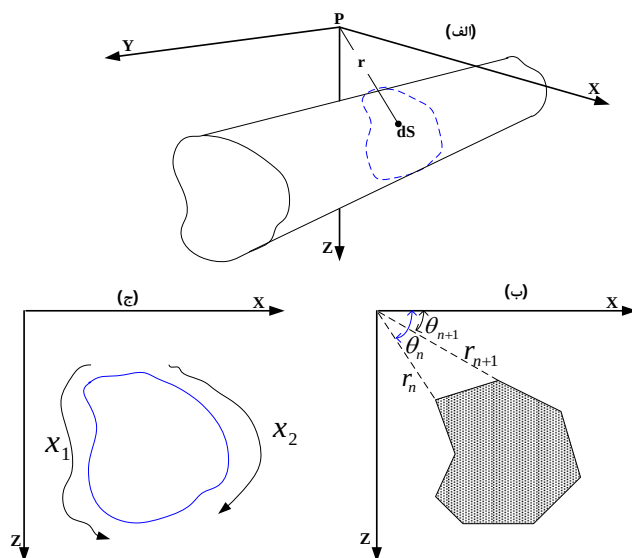
زمانی که توده موجود در زمین از یک شکل نامنظم پیروی کند برای محاسبه میزان آنومالی گرانی آن باید از مدل‌های ساده استفاده شود، متأسفانه در این راستا همواره انطباق مدل‌های ساده امکان‌پذیر نبوده و باید از روش‌های خاصی جهت محاسبه میزان گرانی آن‌ها استفاده نمود. یکی از این روش‌ها روش تالوانی می‌باشد. نرم‌افزاری که جهت مدل‌سازی مستقیم در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته است بر پایه این روش عمل می‌کند.

#### محاسبه اثر گرانی اجسام دوبعدی به روش تالوانی

ساختارهای زمین‌شناسی اغلب دارای طول بیشتر از عرض هستند که اغلب در یک جهت افقی خاص واقع شده‌اند. اگر آنومالی گرانی به اندازه کافی خطی باشد می‌توان منابع گرانشی را در جهت موازی با امتداد کشیدگی بعد طویل آنومالی در نظر گرفت. به طوری که در راستای محور  $y$  که موازی با امتداد آنومالی بوده اثر گرانی ثابت بوده و فقط در دو بعد  $x$  و  $z$  تغییرات چگالی دیده می‌شود. به این دسته از توده‌ها، اجسام دوبعدی می‌گویند. چگالی این اجسام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho(x, y, z) = \rho(x, z) \quad (2-20)$$

راه مفید برای تقریب ویژگی‌های پدیده‌های زمین‌شناسی جایگزینی یک چندضلعی ساده به جای شکل دوبعدی و مقطع عرضی آن‌ها می‌باشد (شکل ۵-۲). به این ترتیب، روش مناسب‌تری برای سازگاری با الگوریتم‌های کامپیوتری فراهم می‌شود.



شکل ۵-۲: تقریب یک جسم دوبعدی به وسیله یک  $n$  ضلعی [Talwani et al, 1959].

در این روش که توسط تالوانی و همکارانش (۱۹۵۹) ارائه شده، می‌توان معادلات محاسبه شتاب گرانشی اجسام دوبعدی با چگالی حجمی  $\rho(x, z)$  را به صورت زیر تعریف نمود [Talwani et al, 1959].

$$U = 2G \int_s \rho(s) \cdot \log \frac{1}{r} ds \quad (۲-۲۱):$$

که در آن انتگرال‌گیری در یک سطح  $S$  انجام شده و  $r$  فاصله المان مورد نظر تا مرکز مختصات می‌باشد.

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (z - z')^2}$$

حال برای ساده‌سازی بیشتر و راحت‌تر نقطه مشاهده‌ای به مبدأ مختصات انتقال یافته و مقدار چگالی در راستای محور  $y$  ثابت فرض می‌شود. بنابراین مقدار شتاب قائم گرانی به صورت زیر محاسبه می‌شود.



$$g(p) = \frac{\partial U}{\partial z} = 2G\rho \iint \frac{z' dx' dz'}{x'^2 + z'^2} \quad (2-22):$$

و انتگرال بالا پس از حذف متغیر  $X$  به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$g = 2G\rho \int [\tan^{-1}(\frac{x'_2}{z'}) - \tan^{-1}(\frac{x'_1}{z'})] dz' \quad (2-23):$$

که در آن  $x'_1$  و  $x'_2$  دو تابع از  $z'$  می‌باشند که در شکل (2-5) ارائه شده است و بیانگر دو راه مجزا حول بخشی از محیط سطح مقطع می‌باشد. این دو راه جزئی می‌باشد که وقتی که با هم منظور شوند دارای مقدار یکسان و علامت متفاوت هستند. انتگرال گیری هر کدام از این اجزای انتگرال جداگانه در جهت عقربه‌های ساعت حول محیط مقطع به صورت زیر است.

$$g = 2G\rho \int \tan^{-1}(\frac{x'}{z'}) dz' \quad (2-24):$$

حال اگر محیط منحنی گونه و صاف سطح مقطع، با یک چندضلعی دلخواه ( $n$ ) جایگزین گردد (شکل 2-5)، آن‌گاه معادله (2-24) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$g = 2G\rho \sum_{n=1}^N \int_{z_n}^{z_{n+1}} \tan^{-1}(\frac{x'}{z'}) dz' \quad (2-25):$$

که در آن  $z_n, z_{n+1}$  مختصات  $z$  در نقاط انتهایی یک ضلع  $n$  ام می‌باشد. قبل از محاسبه لازم است

که مقدار  $x'$  را برحسب  $z'$  به وسیله معادله یک خط راست بیان نماییم:  $x' = \alpha_n z' + \beta_n$ .

که در آن:

$$\alpha_n = \frac{x_{n+1} - x_n}{z_{n+1} - z_n} \quad \beta_n = x_n - \alpha_n z_n \quad (2-26):$$

با جایگذاری معادله (2-25) در معادله (2-23): خواهیم داشت [Talwani et al, 1959]:

$$g = 2G\rho \sum_{n=1}^N \int_{z_n}^{z_{n+1}} \tan^{-1} \left( \frac{\alpha_n z' + \beta_n}{z'} \right) dz' =$$

$$2G\rho \sum_{n=1}^N \left\{ \left[ \frac{\pi}{2} (z_{n+1} - z_n) + z_n \cdot \tan^{-1} \left( \frac{z_n}{x_n} \right) - z_{n+1} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{z_{n+1}}{x_{n+1}} \right) \right] + \right.$$

$$\left. \frac{\beta_n}{1 + \alpha_n^2} \left[ \log \frac{\sqrt{x_{n+1}^2 + z_{n+1}^2}}{\sqrt{x_n^2 + z_n^2}} - \alpha_n \cdot \left( \tan^{-1} \left( \frac{z_{n+1}}{x_{n+1}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{z_n}{x_n} \right) \right) \right] \right\} \quad (27-2)$$

اگر چندضلعی مورد بررسی بسته باشد، مجموع جملات کروشه اول صفر می‌شود، بنابراین معادله

(27-2) به معادله (28-2) ساده می‌شود:

$$g = 2G\rho \sum_{n=1}^N \frac{\beta_n}{1 + \alpha_n^2} \left[ \log \frac{r_{n+1}}{r_n} - \alpha_n \cdot (\theta_{n+1} - \theta_n) \right] \quad (28-2)$$

مقدار شتاب گرانشی یک جسم دوبعدی به موقعیت  $n$  گوشه یک  $n$  ضلعی در مقطع عرضی آن بستگی دارد. اگر تصور شود  $n$  خط که از نقطه مشاهده‌ای به هر یک از گوشه‌های  $n$  ضلعی رسم شده است، مقدار شتاب گرانش به طول این خط‌ها و زاویه‌های که با خط افق می‌سازند، بستگی دارد (شکل ۵-۲).

## ۲-۵-۲ مدل سازی معکوس

مدل سازی معکوس با استفاده از داده‌های مربوط به آنومالی مشاهده‌ای صورت می‌گیرد که در ساختار و شکلی که مؤثر است تغییر ایجاد کرده تا پاسخ مناسب فراهم گردد. به عبارت دیگر در این روش مدل اولیه تخمین زده می‌شود و تعدیل‌های بعدی بر مدل، بر پایه برقراری معیارهایی انجام می‌شود تا زمانی که داده‌های محاسبه شده بر داده‌های مشاهده‌ای در سطح دقت تعیین شده‌ای منطبق شود [Hinz, 1990]. به این ترتیب پارامترهای هندسی مدل به عنوان پاسخ نهایی محاسبه می‌گردند. به طور خلاصه می‌توان این‌گونه بیان کرد که در این روش از داده‌های مشاهده‌ای به مدل رسیده و یا در محاسبات کامپیوتری، خروجی برنامه پارامترهای هندسی مدل می‌باشند.

در اغلب مسائل معکوس ژئوفیزیکی توصیفی از داده‌ها به عنوان اولین گام برای فرمول‌بندی مسئله محسوب می‌شود. داده‌ها معمولاً مجموعه‌ای از مقادیر عددی به صورت عناصر یک بردار هستند. به عنوان مثال  $N$  اندازه‌گیری در یک تجربه مشخص به عنوان داده با یک بردار مانند  $d$  با طول  $N$  مشخص می‌شود. به صورت مشابه پارامترهای مدل نیز مؤلفه‌های بردار  $m$  با طول  $M$  هستند.

بردار داده‌ها به صورت زیر است:

$$d = [d_1 d_2 d_3 \dots d_M]^T \quad (29-2)$$

هم‌چنین بردار پارامترهای مدل:

$$m = [m_1 m_2 m_3 \dots m_M]^T \quad (30-2)$$

نماد  $T$  بیانگر بردار ترانپو<sup>۱</sup> است. مفهوم بنیادی یک مسئله معکوس رابطه میان داده‌ها و پارامترهای مدل است، این رابطه همان مدل نامیده می‌شود. معمولاً مدل یک یا چند فرمول است که انتظار است داده‌ها و پارامترهای مدل از آن پیروی کنند. به طور کلی مسائل وارون‌سازی به دو دسته مسائل معکوس خطی<sup>۲</sup> و مسائل معکوس غیرخطی<sup>۳</sup> قابل تقسیم‌بندی هستند، در مسائل معکوس خطی ارتباط بین پارامترهای مدل و داده‌ها خطی است در حالی که در مسائل غیرخطی این ارتباط خطی نبوده اما قابل تبدیل به مسائل خطی با استفاده از روش‌هایی مانند بسط تیلور، گرادیان و ... هستند. در تئوری پتانسیل معادلات انتگرالی‌ای بین میدان و منشأهای ایجادکننده وجود دارد، که می‌توان به فرم کلی زیر نوشت [Meju, 1994]:

$$f(P) = \int_D s(Q) \psi(P, Q) dv \quad (31-2)$$

---

<sup>۱</sup>. Transpose

<sup>۲</sup>. Linear inverse problems

<sup>۳</sup>. Non-linear inverse problems

در معادله  $f(P)$  میدان پتانسیل در  $P$ ، معرف کمیت‌های فیزیکی مربوطه (چگالی) در  $Q$  و  $\psi(P, Q)$  نیز تابعی است که به مکان هندسی نقطه‌ی مشاهده‌ای  $P$  و نقطه‌ی  $Q$  از منشأ بستگی دارد. تابع  $\psi(P, Q)$  به عنوان تابع گرین نیز معرفی می‌شود [Blakley, 1996].

با استفاده از رابطه (۳۱-۲) می‌توان مفهوم روش‌های معکوس و مستقیم را به این صورت بیان کرد که روش مستقیم شامل محاسبه مقدار  $f(P)$  از توابع معلوم  $s(Q)$ ،  $\psi(P, Q)$  است که در این حالت محاسبه مذکور دارای حلی یکتا می‌باشد و در روش مدل‌سازی معکوس به طور مستقیم داده‌ها را در طرف چپ معادله (۳۱-۲) قرار داده و برای بعضی مقادیر  $s(Q)$  معادله را حل می‌نماید. در این روش، محاسبه  $s(Q)$  به عنوان یک مسئله خطی مطرح است در حالی که تعیین پارامترهای حجم  $D$  در محدوده مسائل غیرخطی قرار می‌گیرد.

برای معادله مفروض می‌توان رابطه ماتریسی معادل آن را به صورت ذیل معرفی نمود، یعنی:

$$f_i = \sum_{j=1}^M S_j \psi_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2-32)$$

که در آن اگر  $M < N$ ، (مسئله فرابرآورد باشد) آن‌گاه می‌شود از روش کمترین مربعات برای یافتن  $M$  پارامتر مربوط به استفاده کرد. هم‌چنین اگر  $N < M$  یعنی در این حالت تعداد داده‌ها از تعداد پارامترهای مجهول کمتر است، مسئله فرو برآورد نامیده می‌شود.

## ۲-۵-۳ حل مسائل معکوس خطی فرابرآورد

یک مسئله معکوس خطی به شکل  $d = Am$  مطرح می‌شود. منظور از مدل‌سازی معکوس حل این معادله برای  $m = [m_1 m_2 m_3 \dots m_M]^T$  می‌باشد. در عمل بین داده‌های مشاهده‌ای ( $d$ ) و داده‌های پیش‌بینی شده ( $d^{pre} = Am$ ) ناشی از پارامترهای مدل تخمینی، اختلاف وجود دارد. چنان‌چه این اختلاف با بردار خطای  $e$  نمایش داده شود، می‌توان نوشت [Meju, 1994]:

$$e = d - d^{pre} = d - Am \quad (2-33)$$

واضح است که بایستی پارامترهای مدلی را به دست آورد که به ازای آن‌ها بردار خطای  $e$  کمینه شود. به این منظور تابع خطای  $q$ <sup>۱</sup> که عبارت است از مجموع مربعات باقی‌مانده (فاصله اقلیدسی)، تعریف می‌شود [Meju,1994]:

$$q = e^T e = \sum_{i=1}^N (d_i - \sum_{j=1}^M A_{ij} m_j)^2 \quad (2-34):$$

هدف در اینجا پیدا کردن برداری از پارامترهای مدل،  $m$  است به طوری که تابع خطای  $q$  کمینه شود. به این منظور از این تابع نسبت به هر کدام از پارامترهای مدل  $m_j$ ، مشتق‌گیری نموده و نتیجه برابر با صفر قرار داده می‌شود بدین ترتیب رابطه زیر حاصل می‌شود: [Meju,1994]:

$$m = [A^T A]^{-1} A^T d \quad (2-35)$$

رابطه (۲-۳۵) جواب کمترین مربعات برای معادله  $d - Am$  است. عبارت  $[A^T A]^{-1} A^T$ ، معکوس تعمیم‌یافته کمترین مربعات نامیده می‌شود که با عمل کردن روی  $d$  (داده‌ها)،  $m$  (پارامترهای مدل) حاصل می‌شود.

## ۲-۵-۴ حل مسائل معکوس خطی فرو برآورد

اگر فرض شود که معادله خطی ( $d - Am$ ) یک مسئله فرو برآورد باشد (یعنی  $N < M$ ). بر این اساس می‌توان بیش از یک دسته از پارامترهای مدل را یافت که با داده‌های مشاهده‌ای تطابق داشته باشند. بنابراین، سعی می‌شود که جوابی از فضای پارامترهای مدل انتخاب گردد که تا حد امکان ساده‌تر بوده و برای مثال دارای طول بردار کمینه باشد یعنی [Meju,1994]:

$$L(m) = \|m\|^2 = m^T m = \text{Min} \quad (2-36):$$

---

<sup>۱</sup> Misfit function

به این ترتیب، چنین راهکاری در پی آن است که پارامترهای مدل ( $m^{est}$ ) را تخمین بزند که تابع  $L(m)$  را کمینه نماید. این مسئله کمینه‌سازی مشروط می‌تواند با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ<sup>۱</sup> حل شود، در این صورت بایستی تابع زیر کمینه‌سازی گردد [Meju,1994]:

$$\phi(m) = m^T m + \lambda(d - Am)^T \quad (2-37)$$

که در آن،  $\lambda$  یک ماتریس قطری شامل ضرایب لاگرانژ است. تغییرات درجه اول تابع  $\phi(m)$  محاسبه می‌شود، شرط لازم برای کمینه‌سازی  $\phi(m)$  آن است که [Meju,1994]:

$$\delta\phi(m) = \delta m^T (2m - A^T \lambda) = 0 \quad (2-38)$$

در نهایت برای تخمین پارامترهای مدل،  $m^{est}$ ، رابطه (2-39) به دست می‌آید [Meju,1994]:

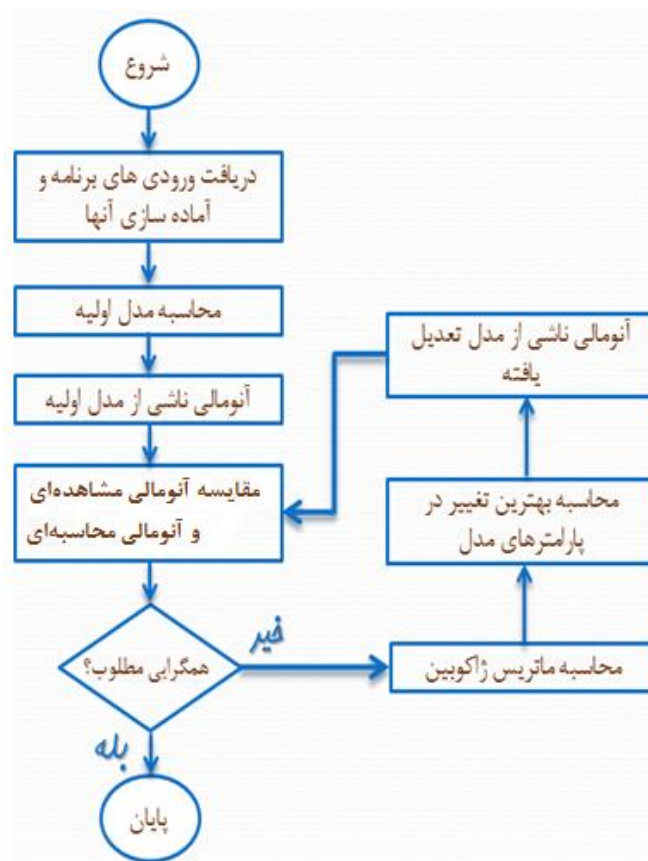
$$m^{est} = A^T (AA^T)^{-1} d \quad (2-39)$$

که در آن ماتریس  $A^T A$  ماتریس مربعی با ابعاد  $N \times M$  است که می‌تواند به وسیله رابطه  $\lambda = 2(AA^T)^{-1} d$  و  $\lambda$  وارون گردد [Meju,1994]. در این رابطه حلی با حداقل طول برداری برای پارامترهای مدل در مسائل فرو برآورد به دست خواهد داد. همچنین ماتریس  $A^T (AA^T)^{-1}$  به عنوان ماتریس وارون تعمیم‌یافته نیز گفته می‌شود.

در شکل (2-6) روند مدل‌سازی معکوس ارائه شده است [Paterson and Reeves, 1985].

---

<sup>۱</sup> Lagrange Multiplier



شکل ۲-۶: الگوریتم برنامه مدل سازی معکوس داده های میدان پتانسیل

## ۲-۶ روش مدل سازی معکوس در نرم افزار Model Vision Pro

بر اساس تقسیم بندی دیگر، مسائل مدل سازی معکوس به دو دسته پارامتری و هموار تقسیم می شوند. لازم به ذکر است که نرم افزار Modelvision قابلیت اجرای هر دو نوع مدل سازی را دارد. در این پایان نامه از روش پارامتری جهت مدل سازی دوبعدی داده ها استفاده شده است. جهت مدل سازی سه بعدی داده ها در نرم افزار Grav3D از مدل سازی هموار استفاده شده است. مدل سازی مستقیم طی یک روند سه مرحله ای انجام می شود. اثر میدان گرانی یک مدل ساخته شده به صورت آنومالی گرانی محاسبه می شود، سپس آنومالی محاسبه شده با آنومالی مشاهده ای مقایسه می شود و در نهایت پارامترهای مدل جهت بهبود این مقایسه داده شده و این فرآیند تا زمانی که انطباق مناسب ایجاد شود و نتایج راضی کننده باشد ادامه می یابد.

تعدادی از نرم افزارها و الگوریتم های کامپیوتری نیز همین روند را برای مدل سازی معکوس استفاده می کنند که به آن ها روش های تکرار می گویند به این صورت که یک مدل اولیه انتخاب شده و مراحل بعدی همانند روش مستقیم طی می شود. تفاوتی که بین این روند در مدل سازی مستقیم و معکوس وجود دارد این است که در این روش در تغییر پارامترهای مدل، طراح مدل اولیه نقشی ندارد و این کار با حداقل کنترل کاربر صورت می گیرد.

در نرم افزار مدل ویژن<sup>۱</sup> روش مدل سازی معکوس بر پایه این سه مرحله است. بعد از ساخت مدل اولیه توسط کاربر، مقایسه انجام و مقدار خطا محاسبه می شود. در مرحله بعد کاربر بایستی نوع پارامتری را که در نظر دارد تغییرات روی آن صورت بگیرد تا مدل به مدل واقعی نزدیک تر شود را انتخاب کند. تغییرات به صورت خودکار بسته به تعداد پارامترهای انتخابی در چندین مرحله تکرار و در نهایت یک مقدار خطا به دست آید که تابعی از پارامترهای مدل است. این مقدار خطا به عنوان تابع هدف مدل معرفی می شود. پارامترهای هر بلوک توسط به حداقل رساندن تابع هدف با برآزش داده های تولید شده به داده های مشاهده ای، به دست خواهد آمد [ Li and Oldenburg, 1998 ].

روش های مختلفی جهت کمینه کردن تابع هدف وجود دارد. از جمله روش های کمترین مربعات<sup>۲</sup>، روش شبه نیوتنی<sup>۳</sup>، روش گاوسی - نیوتن<sup>۴</sup> و یا روش رگرسیون ریدج<sup>۵</sup> [ Lok and Barker, 1996; Inman, 1975 ]. این روش ها از نظر سرعت و دقت متفاوت می باشند. در نرم افزار مدل ویژن از روش رگرسیون ریدج به منظور کمینه کردن تابع هدف مدل سازی معکوس استفاده می کند. استفاده از روش رگرسیون ریدج در مدل سازی پارامتری باعث افزایش پایداری این روش در حضور نوفه می گردد و با یک حدس اولیه ضعیف هم به سوی مدل واقعی همگرا می شود [ مرادزاده و عربامیری، ۱۳۸۳ ].

---

<sup>۱</sup> Modelvision Pro

<sup>۲</sup> Least-Square

<sup>۳</sup> Quasi - Newton

<sup>۴</sup> Gauss-Newton

<sup>۵</sup> Ridge Regression



## رگرسیون ریج

تخمین گر رگرسیون ریج یک روش قدرتمند برای تفسیر می‌باشد که توسط مارکوارت<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۰ پیشنهاد شده است. این روش جهت یافتن مدلی که برازش خوبی با داده‌های مشاهده‌ای داشته باشد و نیز برای نمایش صحت برازش مرتبط با سطوح نوفه مختلف در داده‌ها و علاوه بر آن جهت پیش‌بینی صحت هر پارامتر تخمین زده شده کاربرد دارد [Inman, 1975]. روش رگرسیون ریج توسعه یافته‌تر و کامل‌تر از روش کم‌ترین مربعات معمولی است، زیرا روش کم‌ترین مربعات به ندرت قادر به نمایش تعدادی از مدل‌ها می‌باشد که در یک درجه اعتماد مورد نظر با داده‌های مشاهده‌ای برازش داشته باشند. از طرفی برآوردهای کم‌ترین مربعات ریج پایدار است و تحت تأثیر تغییرات جزئی داده‌ها قرار نمی‌گیرد [Lok and Barker, 1996; Inman, 1975].

## نحوه محاسبه روش رگرسیون ریج

مسائل میدان‌های پتانسیل در پارامترهای مجهول (از جمله دانسیته هر بلوک و ...) غیرخطی می‌باشند. به عنوان مثال مؤلفه قائم میدان گرانی در  $i$  امین موقعیت مشاهده‌ای  $r_i$  به صورت زیر تعریف می‌شود [Li and Oldenburg, 1998]:

$$F_x(r_i) = G \int_v \rho(r) \frac{z - z_i}{|r - r_i|} dv \quad (۴۰-۲)$$

که در آن  $\rho(r)$  توزیع آنومالی توده،  $G$  ثابت جهانی گرانش می‌باشد. به طور کلی می‌توان خروجی مدل را به صورت یک تابع غیرخطی از پارامترهای معلوم و مجهول طبق رابطه زیر نشان داد [Inman, 1975]:

$$C = F(p, x) \quad (۴۱-۲)$$

که در آن:  $C$  خروجی مدل،  $P$  پارامتر مجهول،  $x$  پارامتر معلوم مدل می‌باشد.

---

<sup>۱</sup> Marquardt

معادلات غیرخطی را می‌توان به وسیله بسط سری تیلور به معادلات خطی تبدیل نمود. بسط

تیلور درجه اول بر حسب پارامترهای مجهول به صورت زیر نوشته می‌شود [ Inman, 1975 ]:

$$\Delta F = A\Delta p + \varepsilon$$

$$[\Delta F]_i = F(p, x^i) - F(p^0, x^i); i = 1, \dots, N$$

$$[A]_{ij} = \left. \frac{\partial F(p, x)}{\partial p_i} \right|_{p=p^0, x=x^i} \quad (2-42):$$

$$[\Delta p]_j = p_j - p_j^0; j = 1, \dots, M$$

که در آن؛  $p$  بردار پارامتر مجهول،  $p^0$  حدس اولیه برای پارامترهای مجهول،  $x^i$  پارامترهای

معلوم،  $F(p^0, x^i)$  گرانی پیش‌بینی شده بر اساس حدس اولیه،  $F(p, x^i)$  گرانی اندازه‌گیری شده،

$\varepsilon$  بردار خطا در نقاط داده‌ای،  $\Delta F$  اختلاف بین گرانی اندازه‌گیری شده و گرانی محاسبه شده در  $i$

امین داده،  $\Delta p$  اختلاف بین پارامترهای مجهول و حدس اولیه برای این پارامترها می‌باشد.

در معکوس‌سازی، هدف یافتن پارامترهای مجهول می‌باشد به نحوی که  $\Delta F$  حداقل شود.

## ۷-۲ روش مدل‌سازی معکوس در نرم‌افزار Grav3D (الگوریتم لی - اولدنبرگ)

مؤلفه قائم میدان گرانی در نقطه مشاهده‌ای  $i$  ام که به فاصله  $r_i$ ، از جسم بی‌هنجار است، به

صورت زیر تعریف می‌شود [ Li & Oldenberg, 1998 ]:

$$g_z(r_i) = \gamma \int_V \rho(r) \frac{z - z_i}{|r - r_i|^3} dv \quad (2-43):$$

که در آن  $\rho(r)$  توزیع چگالی غیر متشابه و  $\gamma$  ثابت جهانی گرانش است. هدف از مدل‌سازی

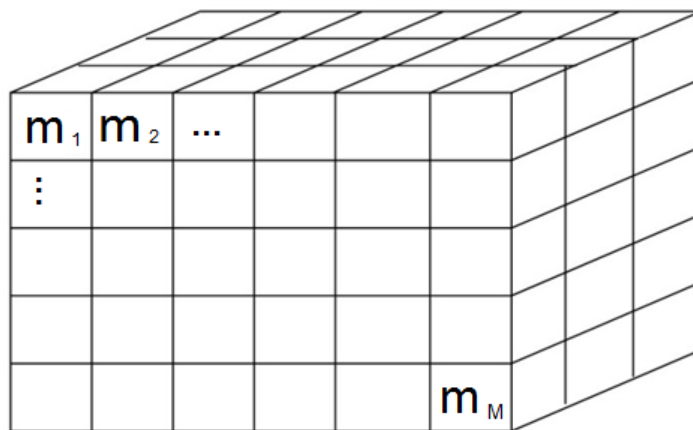
معکوس، محاسبه مستقیم  $\rho$ ، از داده‌های گرانی به دست آمده از  $g_z$  می‌باشد.

برای مدل‌سازی، زمین به تعداد زیادی سلول مکعبی که دارای ویژگی فیزیکی ثابتی هستند،

تقسیم می‌شود. این سلول‌ها درون یک دستگاه متعامد (۷-۲)، یک سیستم شبکه‌ای سه‌بعدی تشکیل

می‌دهند. در این سیستم، زمین به وسیله بردار ستونی  $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T$  با طول  $M$  (تعداد

سلول‌ها) معرفی می‌شود. هر درایه این بردار، مربوط به ویژگی فیزیکی هر سلول در مدل است. بر اساس توزیع ویژگی فیزیکی زمین گسسته، جهت محاسبه پاسخ در هر نقطه مشاهده‌ای، حل مسئله مستقیم که شامل حل یک سیستم از معادلات است، انجام می‌شود [ Philips, 2002 ].



شکل ۷-۲: گسسته‌سازی زمین از طریق شبکه‌بندی عمود بر هم [ Philips, 2002 ].

از آن‌جا که مسائل ژئوفیزیکی معمولاً از نوع فروبرآورد می‌باشد، لذا پاسخ مدل بی‌نهایت می‌شود [ Lelievre, 2009 ].

در میان این مدل‌ها مدلی مطلوب است که با ساختار و خصوصیات زمین‌شناسی مطابقت داشته باشد. در الگوریتم لی - اولدنبرگ تابع هدف مدل به صورت رابطه (۴۴-۲) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \phi_m = & \alpha_s \int_V W_s [W_r(z)(m - m_{ref})]^2 dV + \alpha_x \int_V W_x \left[ \frac{\partial}{\partial x} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \\ & + \alpha_y \int_V W_y \left[ \frac{\partial}{\partial y} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV + \alpha_z \int_V W_z \left[ \frac{\partial}{\partial z} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \end{aligned} \quad (44-2)$$

قسمت اول این معادله، معیار نزدیکی مدل به دست آمده به مدل مرجع ( $m_{ref}$ ) است و عبارات بعد، میزان همواری مدل را در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$  را کنترل می‌کند. ضرایب  $\alpha_s$ ،  $\alpha_x$ ،  $\alpha_y$  و  $\alpha_z$  جهت وزن‌دهی قسمت‌های مختلف معادله است که تابع هدف مدل را قادر می‌سازد تا با تغییر یک یا دو پارامتر، موفق به بازسازی مدل‌هایی گردد که به مدل مرجع نزدیک‌تر و یا ترجیحاً در یک راستای

خاص هموارتر است. توابع وزنی وابسته فضایی  $W_s$ ،  $W_x$ ،  $W_y$  و  $W_z$ ، تابع هدف مدل و تابع  $W_r$  ماتریس وزنی عمقی است که هدف آن خنثی کردن میرایی هندسی حساسیت با فاصله می باشد. بنابراین تمامی سلول ها دارای احتمال یکسان برخورداری اثر منشأ هستند و از تمرکز مدل در سطح جلوگیری می شود. از طریق توابع وزندهی و مدل مرجع، می توان اطلاعات اولیه قابل اعتماد که از زمین شناسی یا دیگر روش های ژئوفیزیکی حاصل می شوند را وارد روند مدل سازی معکوس کرد. نتیجه این کار هدایت عملی مدل سازی به سمت مدلی است که علاوه بر برازش نسبی بر داده ها، با ساختارهای زمین شناسی انطباق دارد. شکل ماتریسی رابطه (۲-۴۴) به صورت رابطه (۲-۴۵) است:

$$\phi_m = \|W_m(m - m_{ref})\|^2 \quad (2-45)$$

$W_m$  یک ماتریس وزنی با ابعاد  $M \times M$  است که تمام توابع مشتق و وزندهی های تابع هدف مدل درون آن جای می گیرند و  $\|\dots\|^2$  نرم دو است.

جهت اندازه گیری میزان انطباق داده های پیش بینی شده با داده های مشاهده ای یک تابع عدم برازش تعریف می گردد که به صورت زیر است:

$$\phi_d = \sum_{i=1}^N \left( \frac{d_i^{obs} - d_i^{pre}}{\varepsilon_i} \right)^2 \quad (2-46)$$

شکل ماتریسی آن به صورت زیر می باشد:

$$\phi_d = \|W_d(d^{obs} - d^{pre})\|^2 \quad (2-47)$$

در آن ها،  $N$  تعداد داده ها،  $d_i^{obs}$ ،  $d_i^{pre}$  امین داده مشاهده ای،  $d_i^{pre}$ ،  $i$  امین داده پیش بینی شده به وسیله مدل و  $\varepsilon_i$  بیان گر انحراف معیار  $i$  امین داده است. در واقع می توان گفت هدف یافتن مدلی است که تابع هدف مدل را کمینه و تا مقدار معینی بر داده های مشاهده ای منطبق باشد.

مراحل به کار رفته در این روش را می توان شامل مراحل مدل سازی مستقیم، انتخاب تابع هدف مدل، شامل وزندهی عمقی مناسب، تعیین تابع برازش بین داده های مشاهده ای و محاسبه ای،

مشخص کردن ضریب تعیین‌کنندگی چگونگی تطابق داده‌ها با یکدیگر و نیز اعمال قیود مختلف است. علاوه بر ضرایب هموارسازی در جهات مختلف و توابع وزنی عمقی، می‌توان با استفاده از قیدهای مدل مرجع<sup>۱</sup> و مدل کرانه‌ای<sup>۲</sup>، اطلاعات به دست آمده از زمین‌شناسی، حفاری و دیگر روش‌های ژئوفیزیکی را وارد روند مدل‌سازی کرد. داده‌ها استفاده شده از این طریق، از اهمیت و اعتماد بالاتری برخوردار بوده و در نتیجه مدل نهایی مقید شده و نتایج مهم‌تری را ارائه می‌دهد [ Williams, 2008 ]. در این تحقیق از نتایج به دست آمده از روش گرادیان کل نرمال و اطلاعات زمین‌شناسی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Reference Model

<sup>۲</sup> Bounded Model



فصل سوم

مدل سازی داده های

مصنوعی

### ۱-۳ مقدمه

استفاده از داده‌های مصنوعی همراه با نويز، قدم اول جهت بررسی کارایی یک روش ژئوفیزیکی، تحلیل نتایج و همچنین بررسی مزایا و معایب این روش می‌باشد. نتایج حاصل از روش مصنوعی با داده‌های اصلی تطابق داده می‌شود و سپس تغییرات لازم در روش به کار رفته اعمال می‌گردد و در نهایت بر روی داده‌های واقعی منطقه مورد نظر اعمال می‌شود. در روش‌های ژئوفیزیکی سعی بر آن است که با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، حفاری و یا اطلاعات حاصل از سایر روش‌ها، قیدهایی جهت مدل‌سازی اعمال گردد تا مدل نهایی از اعتبار و اعتماد بالایی برخوردار شود.

در این تحقیق به منظور بررسی شرایط مدل‌سازی، آشنایی با روند مدل‌سازی و پارامترهای مؤثر در آن، چهار مدل مصنوعی طراحی گردید. روی دو مدل آن روش گرادیان کل نرمال اعمال گردید. همچنین اقدام به مدل‌سازی این مدل‌ها شده است.

### ۲-۳ مدل مصنوعی دو مکعب و دو کره

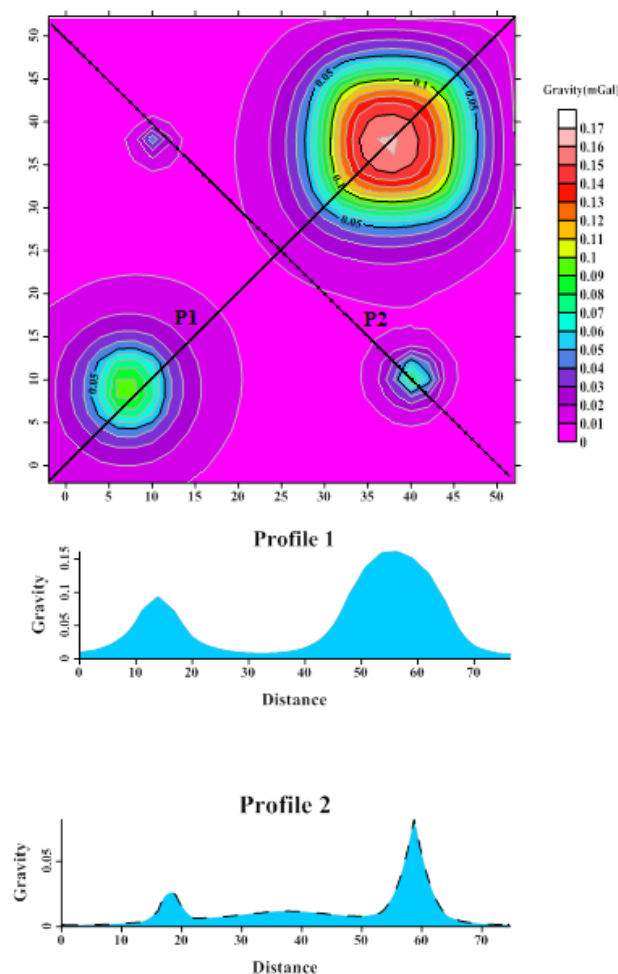
مدل مصنوعی استفاده شده در این قسمت شامل یک شبکه ۵۰ متر در ۵۰ متر شامل دو مکعب و دو کره می‌باشد که در محیط Matlab تولید شده است (جدول ۱-۳). میزان نويز مورد استفاده برای داده‌ها ۳ درصد می‌باشد.

جدول ۱-۳: مشخصات توده‌ها در مدل مصنوعی دو مکعب و دو کره.

| توده مورد بررسی | گسترده‌گی در راستای x (متر)        | گسترده‌گی در راستای y (متر)        | عمق (متر)           |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| مکعب شماره ۱    | ۴-۱۰                               | ۵-۱۲/۵                             | ۲-۱۱                |
| مکعب شماره ۲    | ۳۰-۴۵                              | ۳۰-۴۵                              | ۲/۵-۶/۵             |
| توده مورد بررسی | مختصات مرکز کره در راستای x- (متر) | مختصات مرکز کره در راستای y- (متر) | عمق مرکز توده (متر) |
| کره شماره ۱     | ۴۰                                 | ۱۰                                 | ۵                   |
| کره شماره ۲     | ۱۰                                 | ۳۸                                 | ۳                   |



مدل ساخته شده دارای ۲۶۰۱ داده می‌باشد. اختلاف چگالی در نظر گرفته شده برای هریک از اجسام ۲-۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. هدف از ساخت این مدل اعمال روش گرادیان کل نرمال بر روی داده و تخمین عمق توده‌ها است. از آن‌جا که مدل‌سازی انجام گرفته بر روی این مدل، دوبعدی است لذا لازم است پروفیل بر روی داده‌ها زده شده و پاسخ آن مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گیرد شکل (۳-۱).



شکل ۳-۱: مدل مصنوعی تولید شده در محیط نرم‌افزار Matlab.

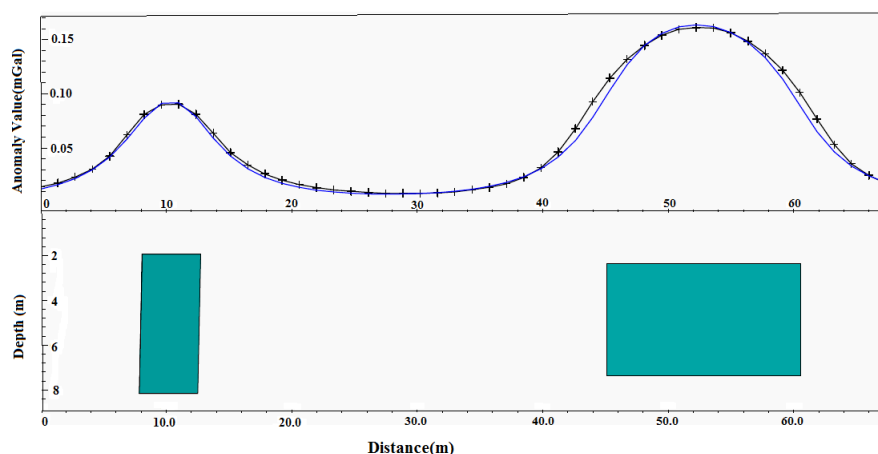
بر روی هریک از پروفیل‌ها به صورت مجزا مدل‌سازی مستقیم و معکوس انجام گرفت. همچنین خروجی مربوط به داده‌های هر پروفیل جهت اعمال روش گرادیان کل نرمال آماده‌سازی شده و این روش بر روی داده‌ها اعمال گردید.

### ۳-۲-۱ مدل سازی مستقیم

مدل سازی مستقیم بر روی این پروفیل در نرم افزار Model Vision Pro انجام شد. در این نرم افزار استفاده از اجسام هندسی ساده امکان پذیر است. با قرار دادن هر توده و مشخص کردن پارامترهای فیزیکی و هندسی آن جسم از جمله چگالی، طول، عرض، موقعیت قرارگیری، زاویه قرارگیری، شیب و امتداد، پاسخ مربوط به آن به وسیله نرم افزار محاسبه و نمایش داده می شود. بدین ترتیب با توجه به اطلاعات موجود، اجسام مناسب انتخاب و آنومالی مربوط به آن محاسبه می شود. با جابه جایی آن ها می توان پاسخ بهینه را به دست آورد. در مدل سازی مستقیم سعی بر این است با استفاده از اطلاعات جانبی موجود مدلی طراحی شود که پاسخ حاصل از آن شباهت قابل قبولی به پاسخ مدل مصنوعی داشته باشد. از آن جا که اطلاعات مربوط به توده ها در مدل مصنوعی مانند محل قرارگیری، شکل و عمق آن مشخص است؛ لذا انتخاب اجسام مربوطه دقت بالایی دارد و نتیجه خوبی خواهد داشت، اما در ارتباط با داده های واقعی این گونه نیست.

### الف: پروفیل شماره ۱

شکل آنومالی مربوط به پروفیل شماره ۱ در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. در گام اول داده های هر پروفیل جهت مدل سازی مستقیم وارد نرم افزار Model Vision Pro گردید. از آن جا که مشخصات توده ها برای ما مشخص بود، لذا از جسم مکعب با مشخصات متناسب با مدل اولیه استفاده شد. بعد از آن که اجسام در محل بیشینه منحنی ها که نشان دهنده تباین مثبت چگالی بوده است قرار داده شد. پاسخ آن (منحنی آبی رنگ) به دست آمد.

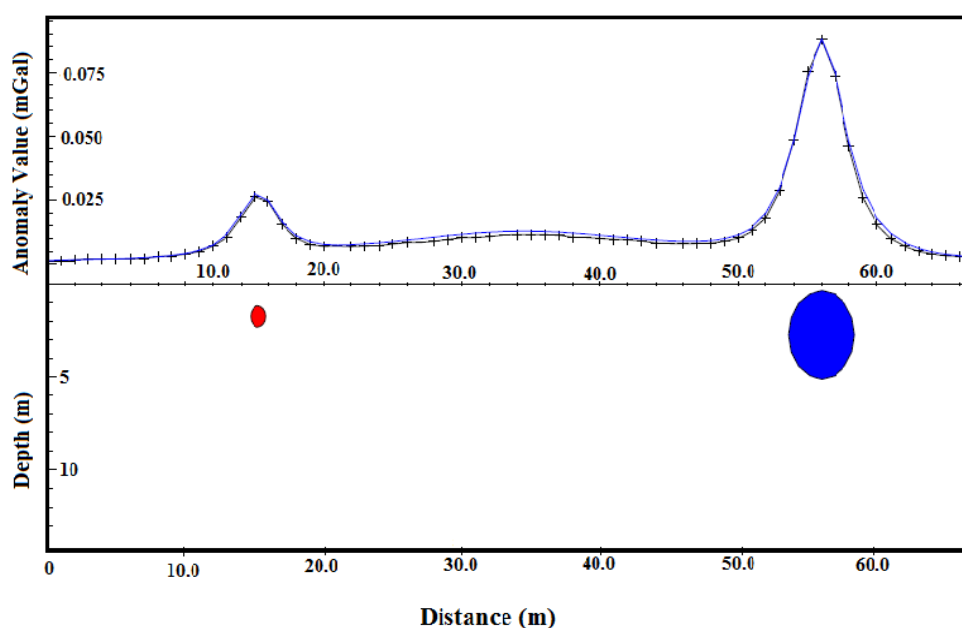


شکل ۳-۲: مدل سازی مستقیم داده های گرانی پروفیل شماره (۱).

در شکل ۳-۲ (۲-۳) نمودار سیاه رنگ آنومالی گرانی پروفیل شماره (۱) است و نمودار آبی رنگ نمودار حاصل از مدل سازی مستقیم است که تطابق نسبتاً خوبی را با نمودار داده های اصلی نشان می دهد. علت آن که تطابق کامل امکان پذیر نیست میزان نوفه ای است که به مدل اضافه شده است. تخمین عمق برای توده سمت راست تقریباً دقیق است اما برای توده سمت چپ، عمقی که به دست آمده است از عمق پایینی توده کمتر است. لازم است مدل سازی معکوس بر روی این پروفیل انجام گیرد تا مدل دقیق تری تولید شود.

## ب: پروفیل شماره ۲

در شکل (۳-۳) مدل سازی مستقیم بر روی پروفیل شماره دو ارائه شده است. منحنی سیاه رنگ پاسخ مربوط به مدل مصنوعی و منحنی آبی رنگ پاسخ مربوط به توده هایی است که در مدل سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. منحنی سیاه رنگ در واقع پاسخ دو کره است که در عمق های مختلف قرار داده شده اند. دو کره با ویژگی هایی از جمله عمق مرکز توده، مختصات محل قرارگیری و شعاع آنها با توجه به اطلاعات اولیه ای که داشتیم، برای مدل اولیه انتخاب گردید. مدل تولید شده از لحاظ عمقی هم خوانی مناسبی با عمق توده های اصلی نداشت. جهت بهبود این امر نیاز به مدل سازی معکوس (تغییر پارامترهای مدل و تکرار فرآیند) دارد که در گام های بعدی به آن اشاره خواهد شد.



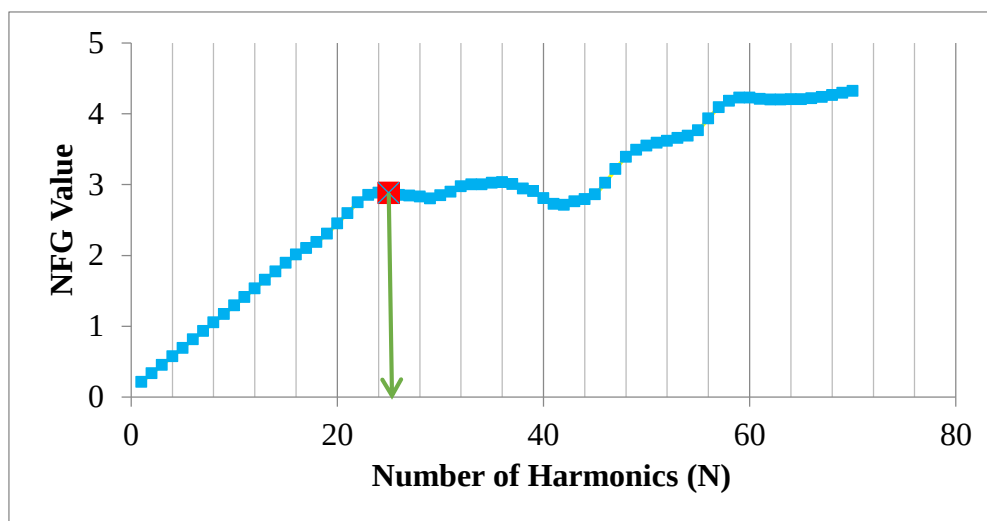
شکل ۳-۳: مدل سازی مستقیم داده های گرانی پروفیل شماره (۲).

### ۳-۲-۲ محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال داده های گرانی مدل مصنوعی

گام نخست در اعمال این روش آن است که فواصل بین نقاط روی یک پروفیل منظم باشد، بنابراین با استفاده از منوی CF Toolbox در محیط Matlab، نقاط با فواصل ۱ متری منظم سازی گردیدند. بعد از آماده سازی پروفیل ها، داده های مربوط به هر پروفیل به صورت فایل ورودی جداگانه جهت تعیین تعداد جملات هارمونیک بهینه و نیز اجرای روش گرادیان کل نرمال در نرم افزار Matlab فراخوانی شد.

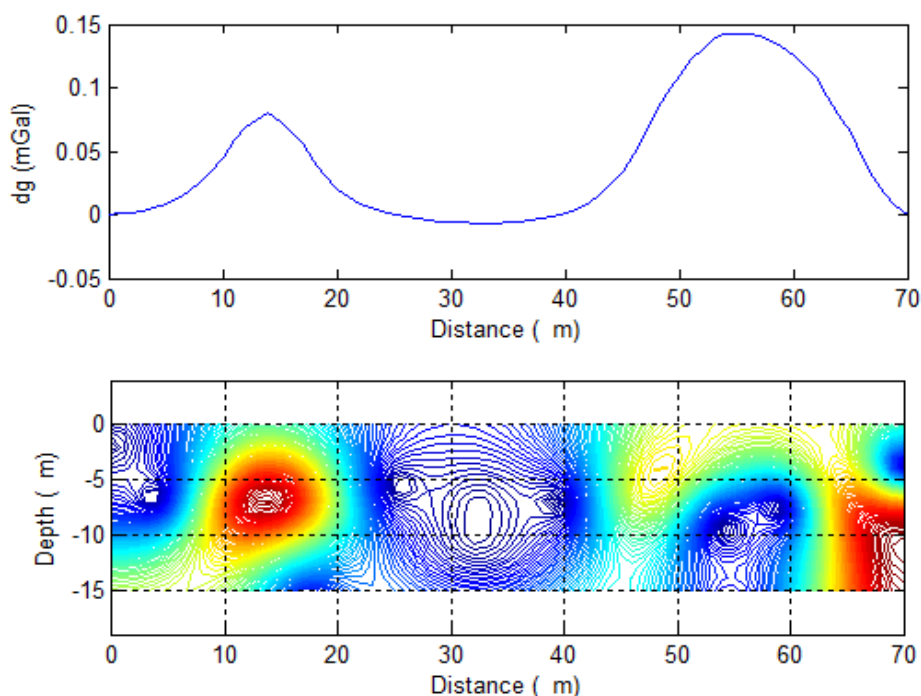
#### الف: پروفیل ۱

بعد از آن که داده های هر پروفیل منظم سازی شد و وارد محیط Matlab گردید، گام نخست و اساسی انتخاب تعداد جملات هارمونیک می باشد، همان گونه که قبلاً اشاره گردید، تعداد جملات هارمونیک تأثیر زیادی در مقدار گرادیان کل نرمال و در نتیجه صحت کار دارد. بنابراین محاسبات به ازای مقادیر مختلف N (تعداد جملات هارمونیک) برای پروفیل شماره ۱ انجام گردید. شکل (۳-۴) مقادیر گرادیان کل نرمال به ازای تعداد مختلف جملات هارمونیک نشان می دهد.



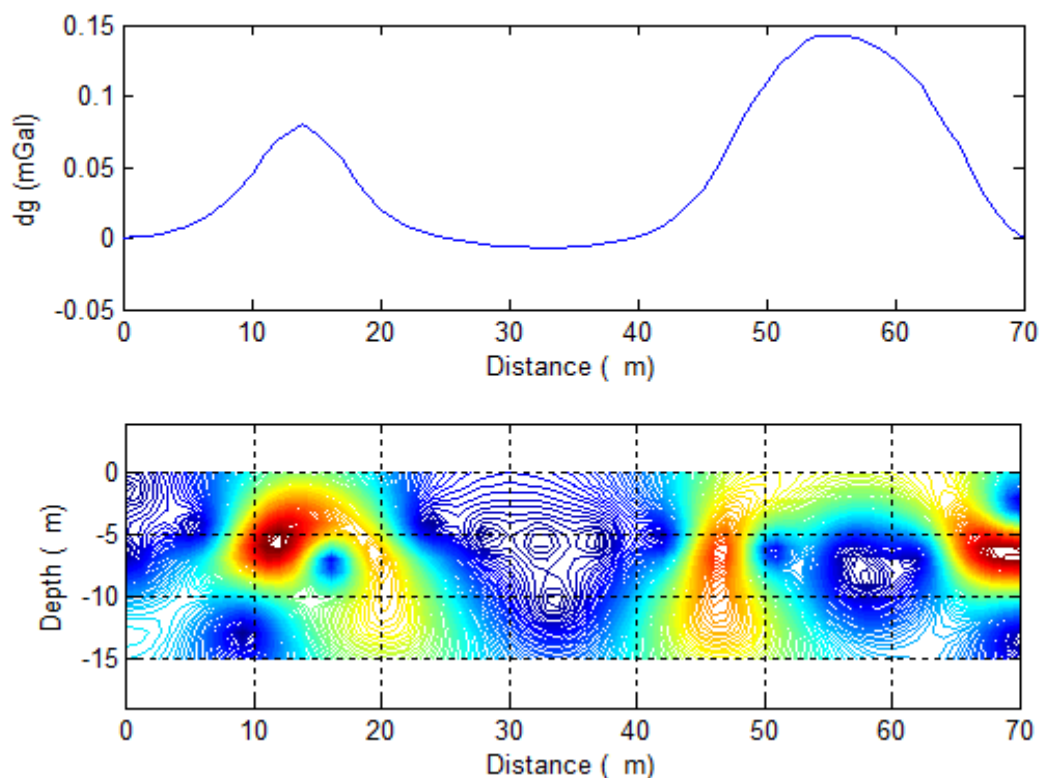
شکل ۳-۴: نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد مختلف جملات هارمونیک پروفیل ۱.

با استفاده از روش بیشینه نسبی [آقاجانی، ۱۳۸۸] تعداد جملات هارمونیک برای این پروفیل برابر با ۲۵ انتخاب گردید. بعد از تعیین تعداد جملات بهینه مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های حاصل در صفحه  $x-z$  و به فواصل مشخص  $dx = dz = 1$  متری محاسبه گردید.

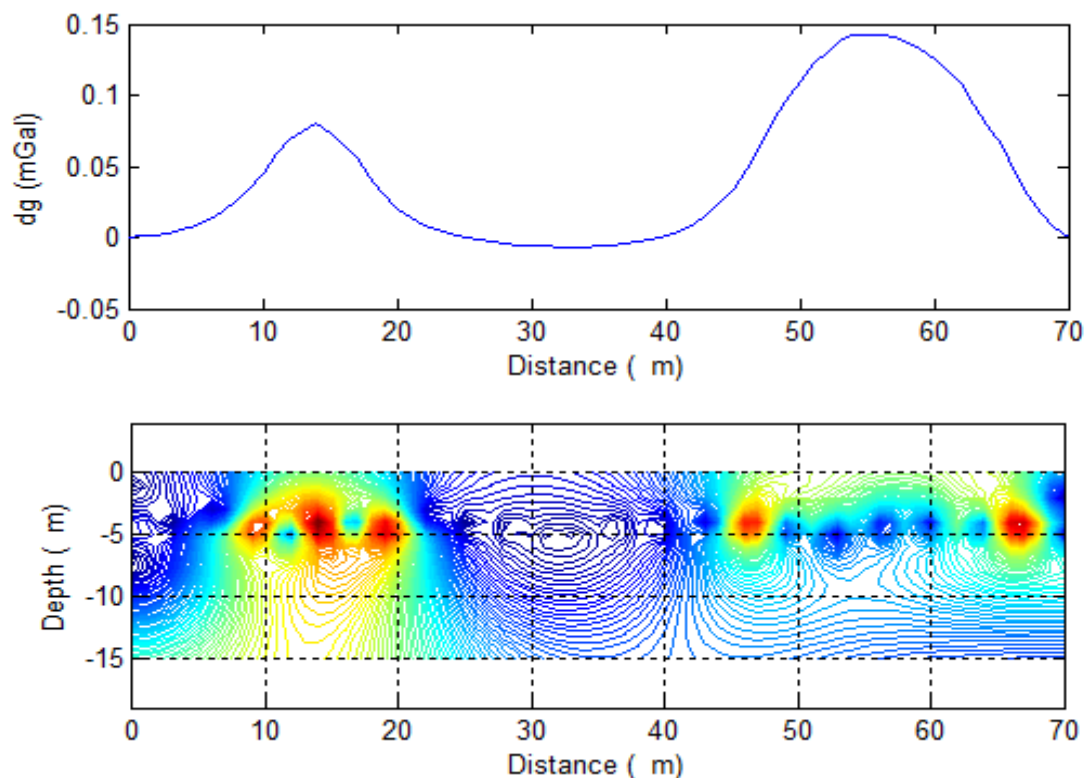


شکل ۳-۵: مقطع دوبعدی مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی ( $N=25$ ) - پروفیل ۱

همان‌طور که در شکل (۳-۵) مشخص است به ازای تعداد جملات ۲۵ مرکز توده اول در ۷ متری به طور قابل قبولی شناسایی شده است اما محاسبه گرادیان کل نرمال با این تعداد جملات برای توده دوم نتیجه قابل قبولی ندارد. علت این موضوع می‌تواند عمق کم توده برای مدل باشد. هم‌چنین نکته‌ای که در اعمال این روش حائز اهمیت است آن است که حتی‌امکان بهتر است بر روی پروفیل‌هایی که پاسخ یک توده آنومال است اعمال گردد، زیرا به علت آن که مقدار گرانی در هر نقطه بر روی اطراف خود اثر می‌گذارد مقداری خطا ایجاد می‌گردد، بنابراین لازمه اکثر روش‌های تخمین و بررسی داده‌های ژئوفیزیکی آن است که ساده‌ترین شکل برای توده آنومال در نظر گرفته شود. مقاطع حاصل از محاسبه گرادیان کل نرمال به ازای  $N=30$  و  $N=45$  نیز برای نمایش اثر  $N$  بر روی نتایج به ترتیب در شکل (۳-۶) و شکل (۳-۷) آورده شده است.



شکل ۳-۶: مقطع دوبعدی مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی ( $N=35$ ) - پروفیل ۱

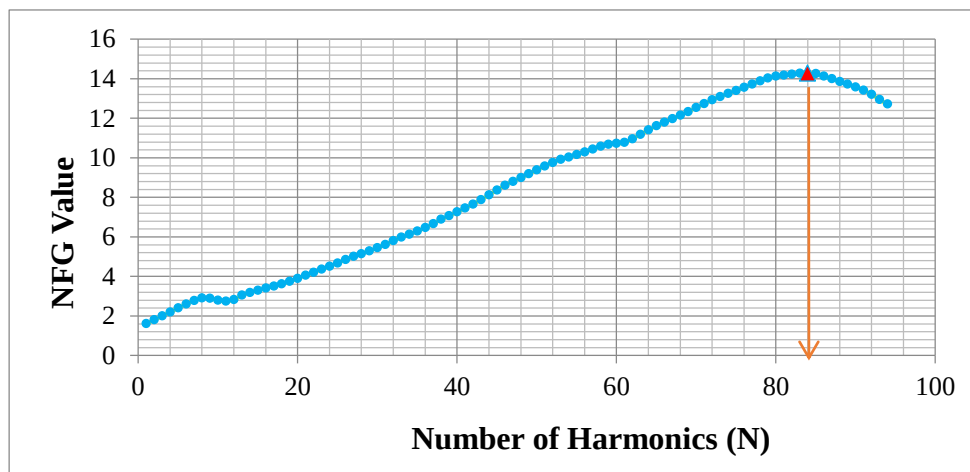


شکل ۳-۷: مقطع دوبعدی مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی ( $N = 45$ ) - پروفیل ۱.

با افزایش تعداد جملات هارمونیک شکل توده‌ها به هم ریخته و نمی‌توان به خوبی عمق مرکز توده را شناسایی کرد. زیرا مقدار گرادیان کل نرمال به تعداد جملات هارمونیک، وابسته است و سبب تغییر و جابه‌جایی موقعیت جسم آنومال می‌شود.

## ب: پروفیل ۲

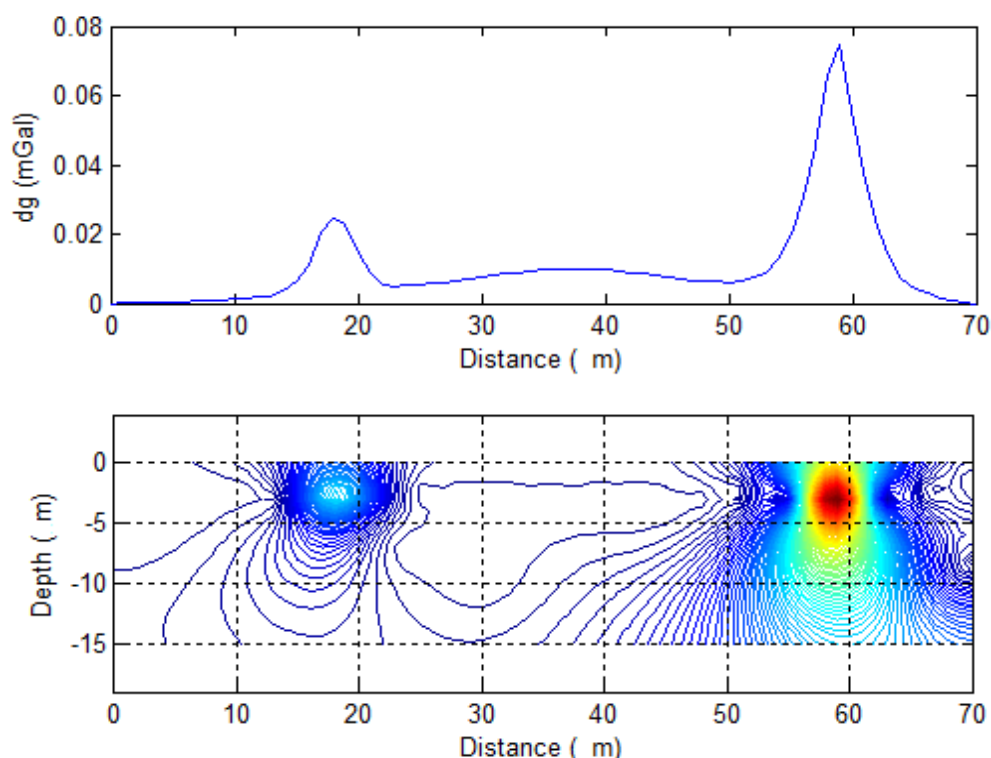
همان‌گونه که در پروفیل قبل اشاره گردید، انتخاب مقدار  $N$  مناسب و محاسبات برای پروفیل دوم نیز انجام گرفت. ابتدا فاصله بین نقاط روی پروفیل منظم شده، سپس به ازای مقادیر مختلف  $N$  مقدار گرادیان کل نرمال محاسبه گردید. شکل (۳-۸) نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال به ازای مقادیر مختلف  $N$  را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸: نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد مختلف جملات هارمونیک - پروفیل ۲.

با استفاده از روش بیشینه نسبی تعداد بهینه جملات هارمونیک برابر با ۸۲ تعیین گردید. آن‌گاه به ازای این تعداد مقدار گرادیان کل نرمال محاسبه و نتیجه به صورت نقشه کنتموری مقادیر گرادیان کل نرمال شده داده‌های گرانی در راستای پروفیل رسم گردید. همان‌طور که در شکل (۳-۹) دیده می‌شود با اعمال این روش بر روی پروفیل شماره دو مرکز توده سمت راست به طور قابل قبولی تخمین زده شده است. اما متأسفانه در ارتباط با تخمین عمق توده سمت چپ موفق نبوده است. احتمالاً با افزایش تعداد جملات هارمونیک این امکان وجود داشت که عمق این توده نیز تشخیص داده شود. دلیل دیگر آن نیز می‌تواند اثر گرانی توده سمت راست بر روی آن باشد و منحنی حاصله تأثیر پذیرفته از هر دو جسم باشد، به این خاطر اطلاعات عمقی مناسبی مرتبط با این توده به دست نیامد.





شکل ۳-۹: مقطع دوبعدی مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی (N = 82) - پروفیل ۲.

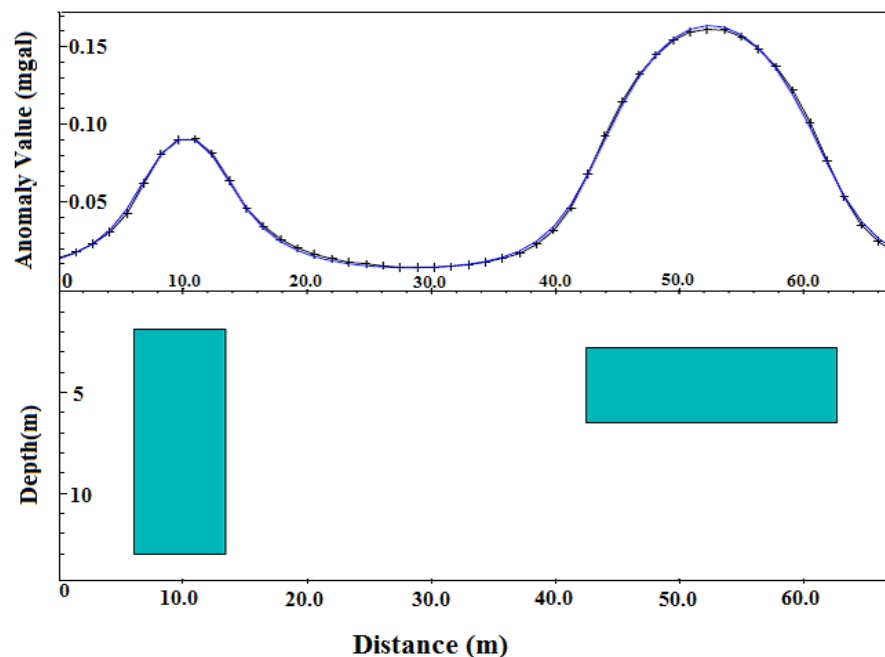
### ۳-۲-۳ مدل سازی معکوس

جهت بهبود نتیجه حاصل از مدل سازی مستقیم، لازم است پارامترهای مدل تغییر داده شده و مجدداً پاسخ مدل با پاسخ داده‌های مصنوعی مقایسه گردد، که این فرآیند همان مدل سازی معکوس است که با الگوریتم‌های مختلفی انجام می‌گیرد. در نرم‌افزار ModelVision Pro لازم است جهت انجام فرآیند مدل سازی معکوس ابتدا یک مدل اولیه ساخته شود، سپس با انتخاب حداقل یک پارامتر آزاد مدل سازی معکوس به روش تکرار به صورت خودکار انجام گیرد و نتیجه آن همراه با گزارش مقدار خطای تخمینی به دست می‌آید. انتخاب پارامترهای آزاد و کیفیت مدل اولیه ساخته شده، در کاهش مقدار خطا و نتایج نهایی مؤثر است. هرچه تعداد پارامترهای آزاد کمتر و نیز اطلاعات جانبی در ارتباط با مدل بیش تر و صحیح تر باشد، مدل مقیدتر شده و نتیجه قابل قبول تری برای ارائه به دست خواهد آمد. برای داده‌های مربوط به پروفیل‌های ۱ و ۲ از مدل به دست آمده در مدل سازی مستقیم به عنوان مدل اولیه در فرآیند مدل سازی معکوس استفاده شد. از آن جا که شکل و محل

توده‌ها در مدل مصنوعی مشخص است لذا این فرآیند مقید بوده و تعداد پارامترهای آزاد لازم جهت انجام آن حداقل است.

### الف: مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی روی پروفیل شماره ۱

در مدل‌سازی معکوس مربوط به این پروفیل، از آن‌جا که در مدل مستقیم آن عمق توده سمت چپ به خوبی شناسایی نشده بود لذا با تعیین محدوده برای عمق این توده با توجه به اطلاعات موجود، پارامتر عمق به عنوان پارامتر آزاد انتخاب شد، نتیجه حاصل بعد از سه مرحله تکرار<sup>۱</sup> گزارش گردید. مقدار خطا در این مرحله ۱/۲۳۴ بود. در مرحله بعد ضخامت توده‌ها، با انتخاب محدوده با توجه به اطلاعات مربوط به هریک از توده‌ها که در جدول (۳-۱) گزارش شده است، به عنوان پارامتر آزاد انتخاب گردید که مجموعاً با ۸ پارامتر آزاد فرآیند انجام شد و مقدار خطای تخمینی ۰/۱۴۱۴ به دست آمده است. در شکل (۳-۱۰) نتیجه نهایی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی-سنجی پروفیل شماره ۱ مدل اول ارائه شده است.

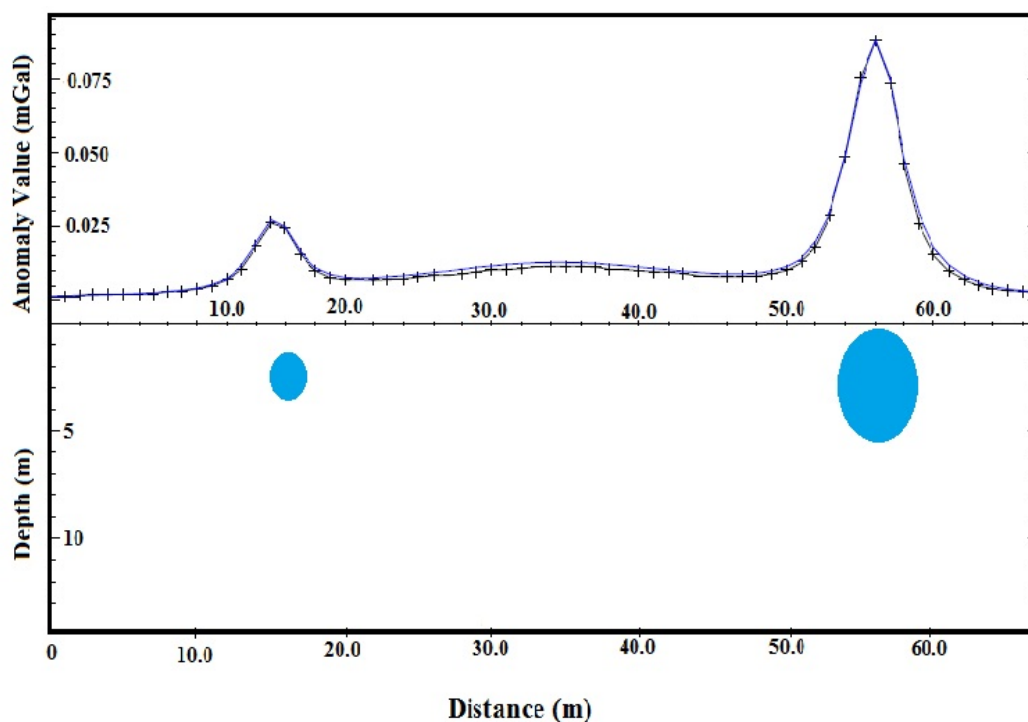


شکل ۳-۱۰: مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی پروفیل شماره (۱) مدل اول RMS=0.1414

<sup>۱</sup> Iteration

### ب: مدل سازی معکوس داده های گرانی روی پروفیل شماره ۲

همان طور که در مدل اول توضیح داده شد بعد از تولید یک مدل اولیه، مدل سازی معکوس با انتخاب تعدادی پارامتر آزاد انجام گرفت. در ارتباط با این پروفیل، پارامتر آزاد عمق و فاصله توده ها از هم انتخاب شد. سپس ۵ مرحله تکرار مدل نهایی به دست آمد. نتایج عمقی که این مدل نشان می دهد (شکل ۳-۱۱) تطابق مناسبی با مقادیر پارامترهای انتخاب شده برای این مدل ها دارد. مقدار خطای تخمینی (RMS) برابر ۰/۸۶۷ به دست آمد.



شکل ۳-۱۱: مدل سازی معکوس داده های گرانی پروفیل شماره (۲) مدل اول RMS=0.867

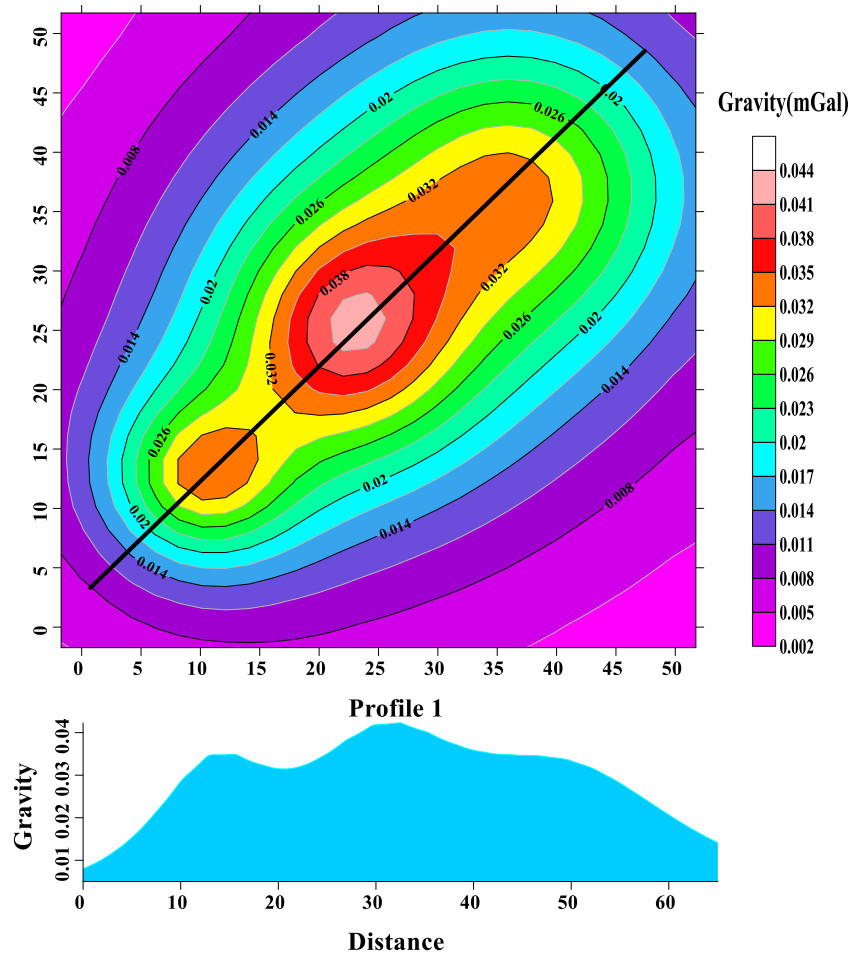
### ۳-۳ مدل مصنوعی سه بیضوی

در مدل مصنوعی دوم که در یک شبکه ۵۰ متر در ۵۰ متر طراحی شده است، سه بیضوی وجود دارد. استفاده از شکل بیضوی جهت تداعی شکل عدسی کانسارهای کرومیتی استفاده شده است. این مدل در محیط نرم افزار Grav3D تولید شده و میزان نویز مورد استفاده برای بررسی این داده ها ۲ درصد و با حداقل مقدار ۰/۰۵ میلی گال می باشد. مشخصات اجسام در جدول (۳-۲) آورده شده است.

شکل (۱۲-۳) پاسخ توده‌ها را در این مدل نشان می‌دهد. میزان اختلاف چگالی برای بلوک‌ها در این مدل ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد.

جدول ۲-۳: مشخصات توده‌ها در مدل مصنوعی سه بیضوی.

| توده مورد بررسی | گسترده‌گی در راستای x (متر) | گسترده‌گی در راستای y (متر) | عمق (متر) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| بیضوی شماره ۱   | ۵-۱۵                        | ۱۰-۱۵                       | ۵-۱۰      |
| بیضوی شماره ۲   | ۲۵-۳۵                       | ۲۰-۳۰                       | ۶-۲۳      |
| بیضوی شماره ۳   | ۳۵-۴۵                       | ۳۰-۳۵                       | ۱۰-۲۶     |

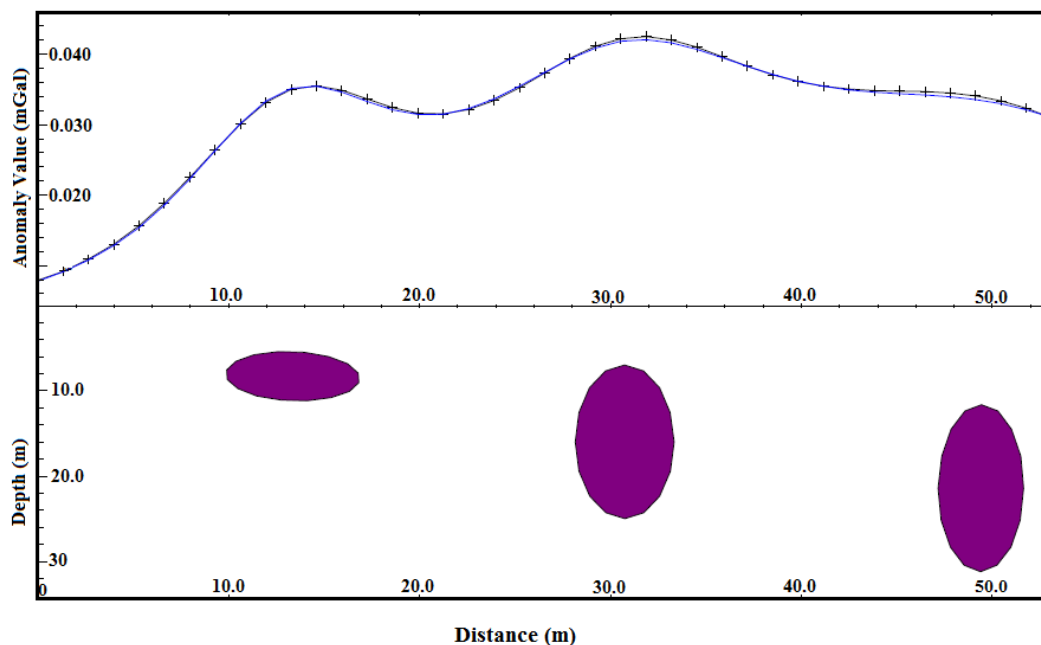


شکل ۱۲-۳: مشخصات توده‌ها در مدل سه بیضوی.

جهت انجام مدل‌سازی یک پروفیل بر روی نقشه آنومالی مورد نظر در راستایی که بیش‌ترین تغییرات آنومالی مورد نظر است، انتخاب و بررسی و مدل‌سازی بر روی آن انجام شد.

### ۳-۳-۱ مدل سازی مستقیم

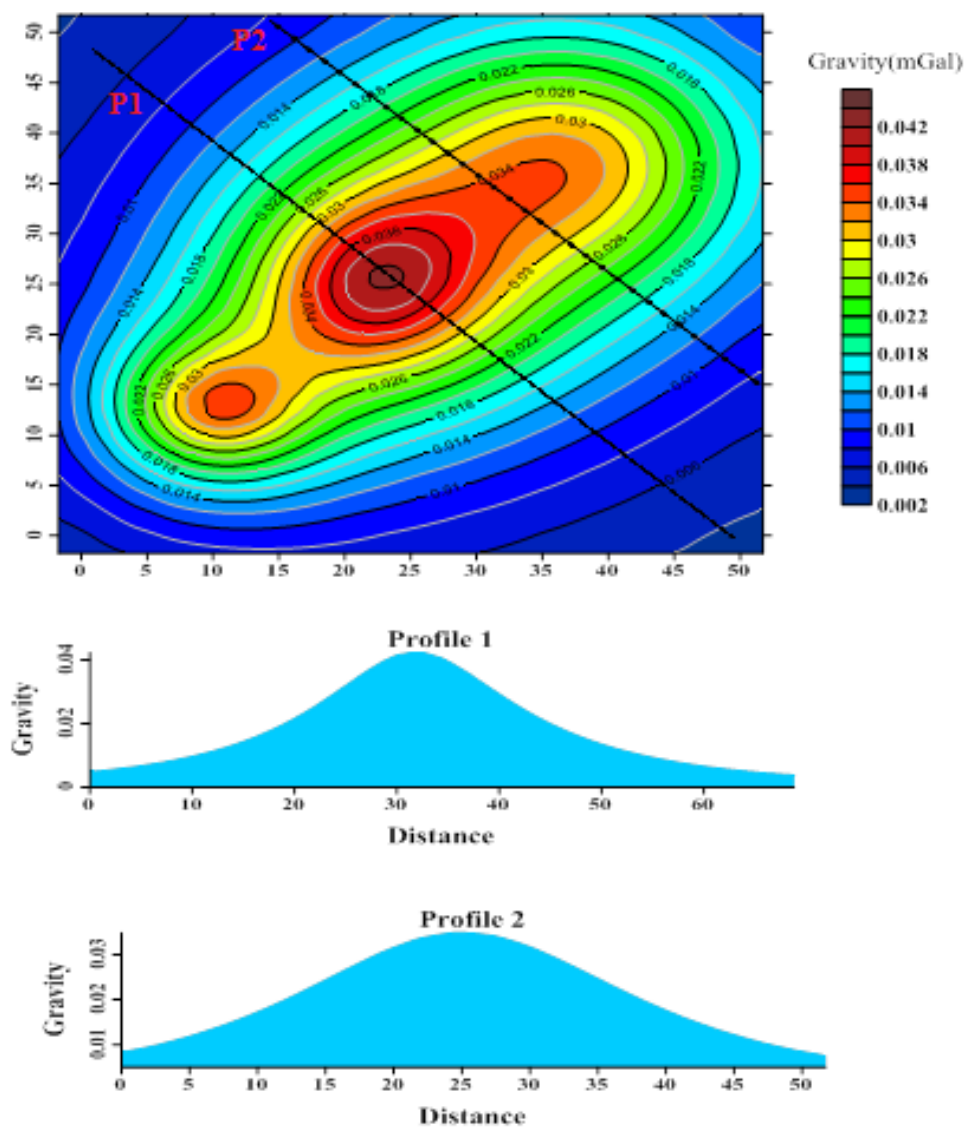
از آن جا که شکل توده ها در مدل مصنوعی تهیه شده به صورت بیضوی است لذا جهت مدل سازی مستقیم از بیضوی استفاده شد. با جابه جا کردن اجسام به صورت دستی مقدار آنومالی حاصل از آن به طور خودکار محاسبه و نمایش داده می شود. نمودار آبی رنگ نمایانگر آنومالی حاصل از مدل سازی و منحنی سیاه رنگ آنومالی حاصل از مدل اصلی را نشان می دهد (شکل ۳-۱۳) بعد از تغییر پارامترهای مختلف مربوط به هر توده که شامل محل قرارگیری، طول محورهای مختلف بیضوی ها، عمق، شیب و کشیدگی می باشد، مدل زیر با تطابق ظاهراً مناسب حاصل گردید البته بایستی به این نکته توجه داشت که تطابق مناسب دلیلی بر صحت مدل مورد استفاده نیست، ویژگی عدم یکتایی در مدل سازی داده های ژئوفیزیکی موجب شده است، به ازای یک آنومالی تعداد زیادی مدل بتوان در نظر گرفت که هریک از تطابق قابل قبولی برخوردار می باشند. بنابراین همواره سعی بر این است که با استفاده از اطلاعات جانبی پاسخ های احتمالی را محدودتر و به پاسخ اصلی نزدیک تر گرداند.



شکل ۳-۱۳: مدل سازی مستقیم داده های گرانی پروفیل مربوط به مدل سه بیضوی.

### ۳-۳-۲ محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی مدل مصنوعی

جهت اعمال روش گرادیان کل نرمال بر روی پاسخ این مدل دو پروفیل ترسیم شد، به گونه‌ای که هر پروفیل بر روی یک توده مجزا قرار گیرد (شکل ۳-۱۴). زیرا جهت تخمین عمق معمولاً ساده‌ترین شکل ممکن در نظر گرفته می‌شود تا میزان خطا کاهش یابد و سعی بر این است توده‌ها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۳-۱۴) محل دو پروفیل انتخابی جهت اعمال این روش را نشان می‌دهد. دو پروفیل به ترتیب از محل بیضوی‌های شماره ۲ و ۳ عبور کرده‌اند. در جدول (۳-۲) مشخصات و پارامترهای هریک از این توده‌ها گزارش شده است.

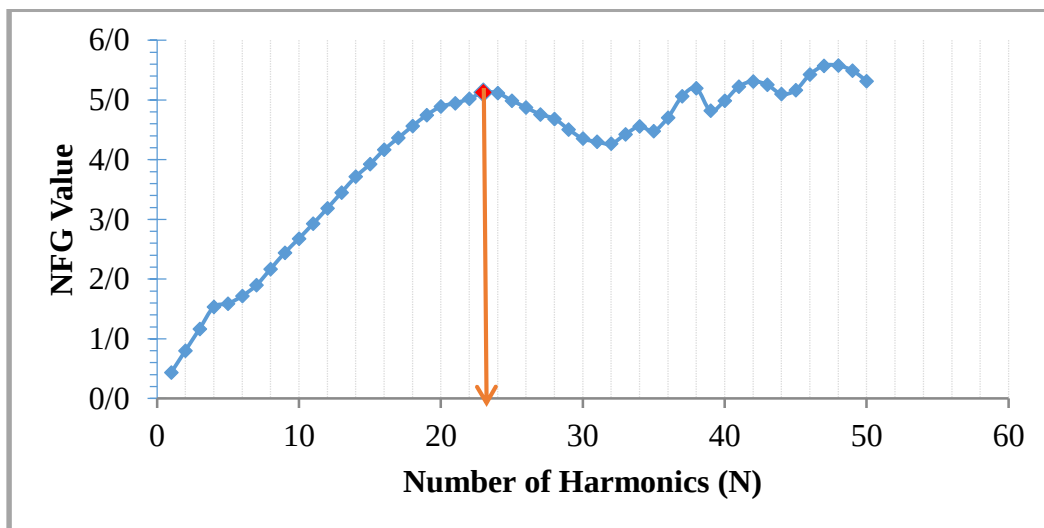


شکل ۳-۱۴: محل پروفیل‌های انتخابی جهت اعمال روش گرادیان کل نرمال.

در اعمال روش گرادیان کل نرمال لازم است فواصل بین نقاط روی یک پروفیل منظم باشد. بنابراین با استفاده از منوی CF Toolbox در محیط Matlab، نقاط با فواصل ۱ متری منظم‌سازی گردیدند. بعد از آماده‌سازی پروفیل‌ها، داده‌های مربوط به هر پروفیل به صورت فایل ورودی جداگانه جهت تعیین تعداد جملات هارمونیک بهینه و نیز اجرای روش گرادیان کل نرمال در نرم‌افزار Matlab فراخوانی شد.

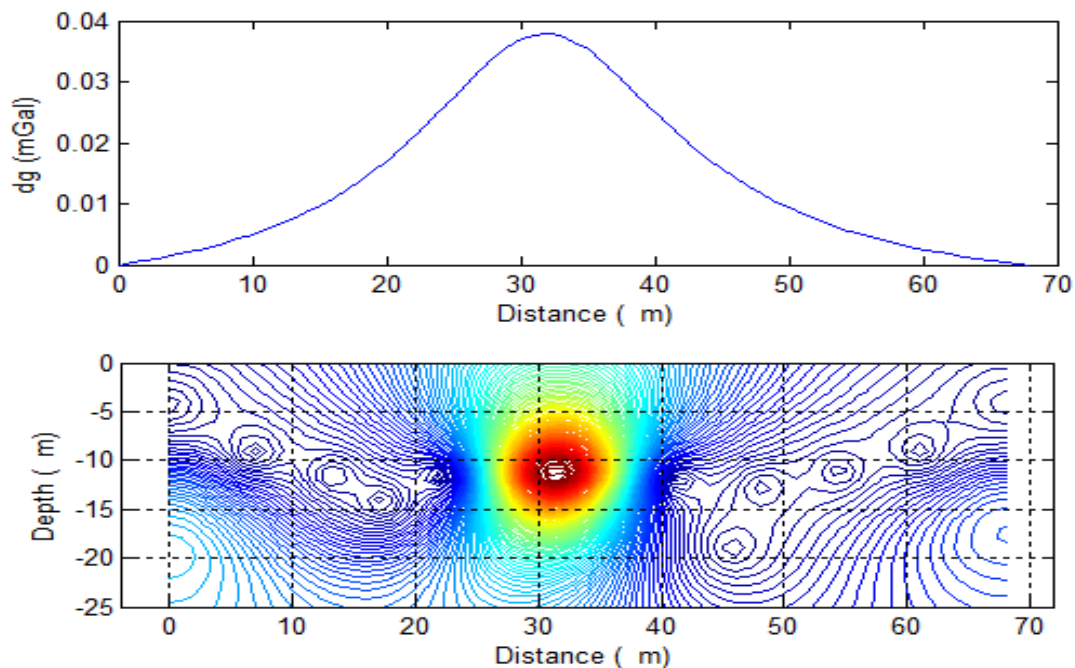
### الف: پروفیل ۱

همان‌طور که اشاره گردید گام اول در اعمال این روش انتخاب تعداد جملات هارمونیک می‌باشد. از آن‌جا که شکل توده‌های انتخابی به صورت بیضوی می‌باشد علاوه بر اینکه برای مقادیر مختلف  $N$  (تعداد جملات هارمونیک) محاسبات انجام شد، بلکه مقادیر  $\mu$  نیز تغییر داده شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. محاسبات به ازای مقادیر ۲، ۳ و ۴ برای  $\mu$  محاسبه گردید. شکل (۳-۱۵) مقادیر گرادیان کل نرمال به ازای تعداد مختلف جملات هارمونیک را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۵: نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد مختلف جملات هارمونیک پروفیل اول مدل مصنوعی سه بیضوی.

با استفاده از روش بیشینه نسبی تعداد جملات هارمونیک به ازای  $\mu = 2$  انتخاب گردید. بعد از تعیین تعداد جملات بهینه مقادیر گرادیان کل نرمال دوبعدی داده‌های حاصل در صفحه X-Z و به فواصل مشخص  $dx = dz = 1$  متری محاسبه گردید و نقشه مقاطع رسم گردید (شکل ۳-۱۶).



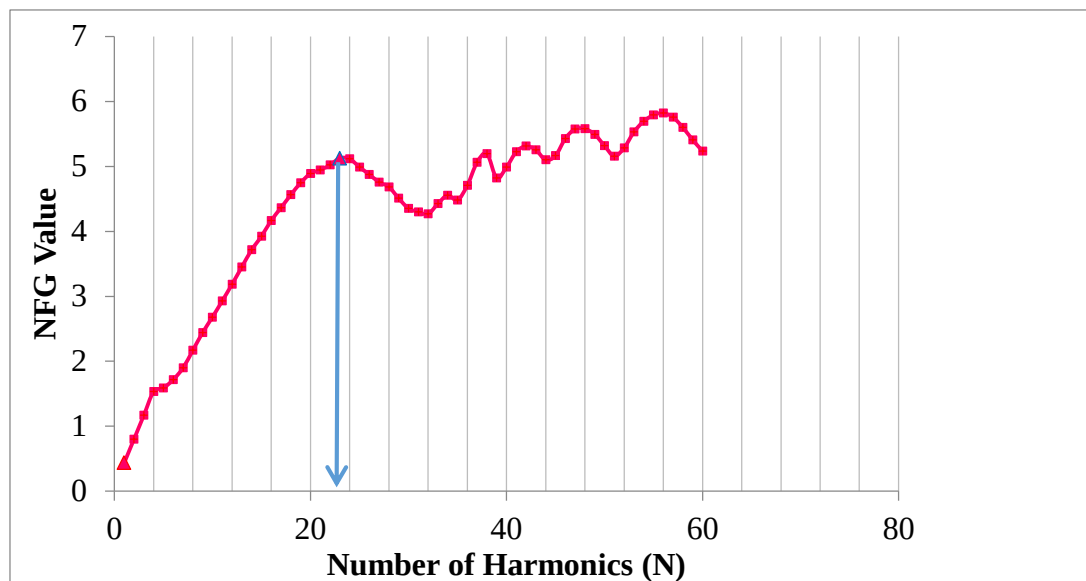
شکل ۳-۱۶: مقطع گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی روی پروفیل اول مدل مصنوعی سه بیضی به ازای  $N=23$ .

با انتخاب  $N=23$ ، نتیجه حاصل از محاسبه گرادیان کل نرمال به خوبی عمق مرکز توده مورد نظر را شناسایی می‌کند. نتایج نشان‌دهنده کشیدگی توده از عمق ۶ تا ۲۳ متر می‌باشد. که مرکز توده حدوداً در عمق ۱۳-۱۴ متری قرار دارد.

## ب: پروفیل ۲

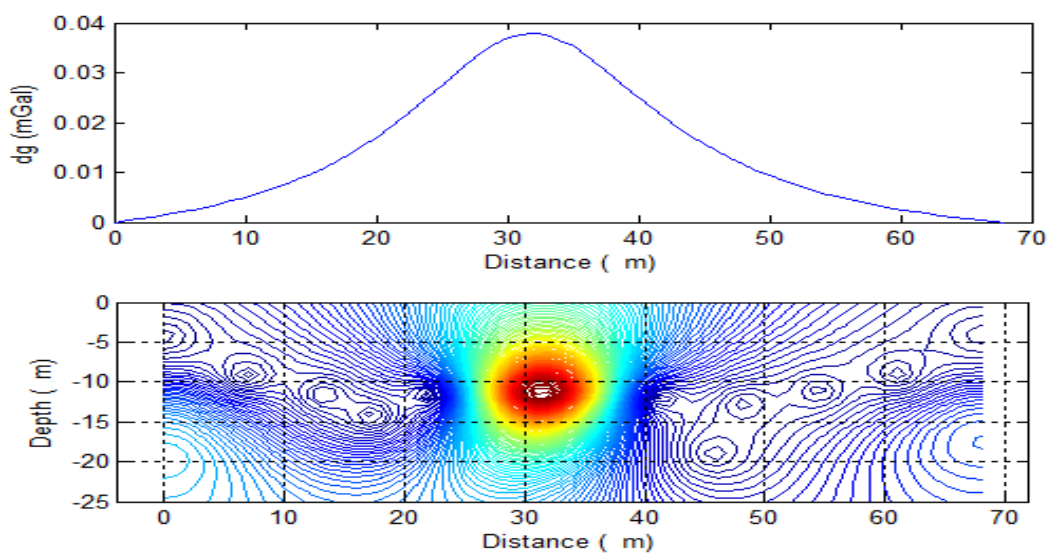
به همین ترتیب محاسبات برای پروفیل دوم نیز انجام گرفت. ابتدا فاصله بین نقاط روی پروفیل منظم شده، سپس به ازای مقادیر مختلف  $N$  مقدار گرادیان کل نرمال محاسبه گردید. شکل (۳-۱۷) مقدار گرادیان کل نرمال به ازای مقادیر مختلف  $N$  را نشان می‌دهد.





شکل ۳-۱۷: نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال پروفیل اول مدل مصنوعی سه بیضوی نسبت به تعداد مختلف جملات هارمونیک.

بنابراین با توجه تعداد جملات بهینه برابر ۲۳ مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی روی این پروفیل محاسبه و مقطع آن رسم گردید (شکل ۳-۱۸).

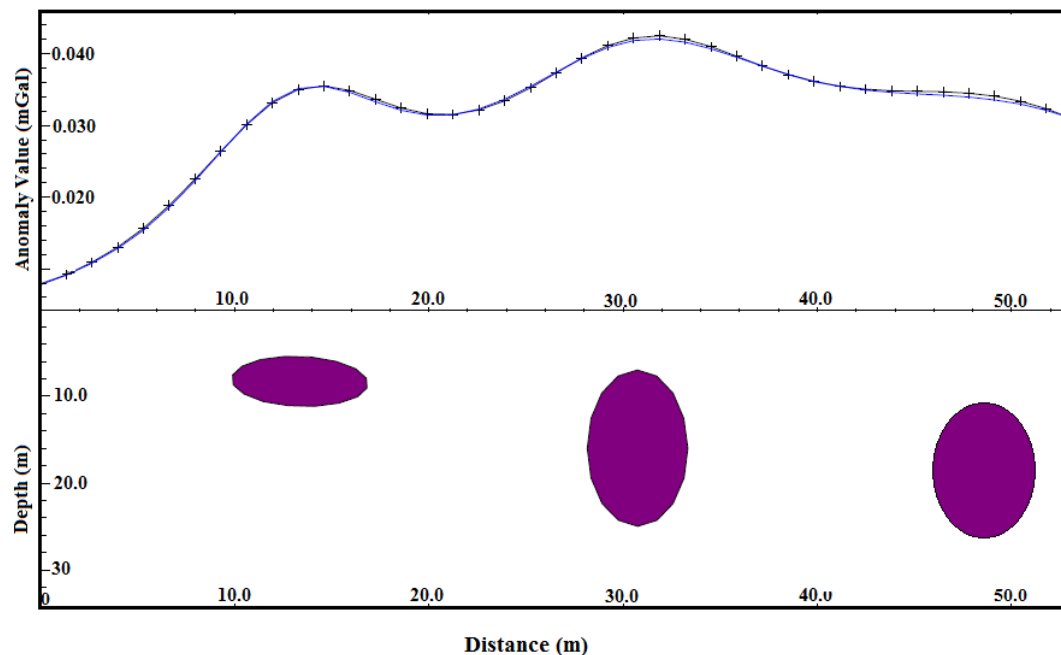


شکل ۳-۱۸: مقطع گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی روی پروفیل اول مدل مصنوعی سه بیضوی به ازای  $N = 23$ .

همان‌طور که در شکل بالا مشخص است به ازای تعداد جملات  $N=23$  عمق مرکز توده که در حدود ۱۴/۵ متری است شناسایی شده است.

### ۳-۳-۳ مدل سازی معکوس

برای مدل سازی معکوس با استفاده از نرم افزار مدل ویشن، یک پروفیل در راستای جنوب غرب به شمال شرق تهیه شد و سپس با انتخاب فاصله توده ها به عنوان پارامتر آزاد، مدل سازی انجام گرفت. فرآیند مدل سازی معکوس با ۱۰ مرحله تکرار و میزان خطای ۱/۰۲۲ به اتمام رسید (شکل ۳-۱۹).



شکل ۳-۱۹: مدل سازی معکوس داده های گرانی روی پروفیل شمال شرق - جنوب غرب.

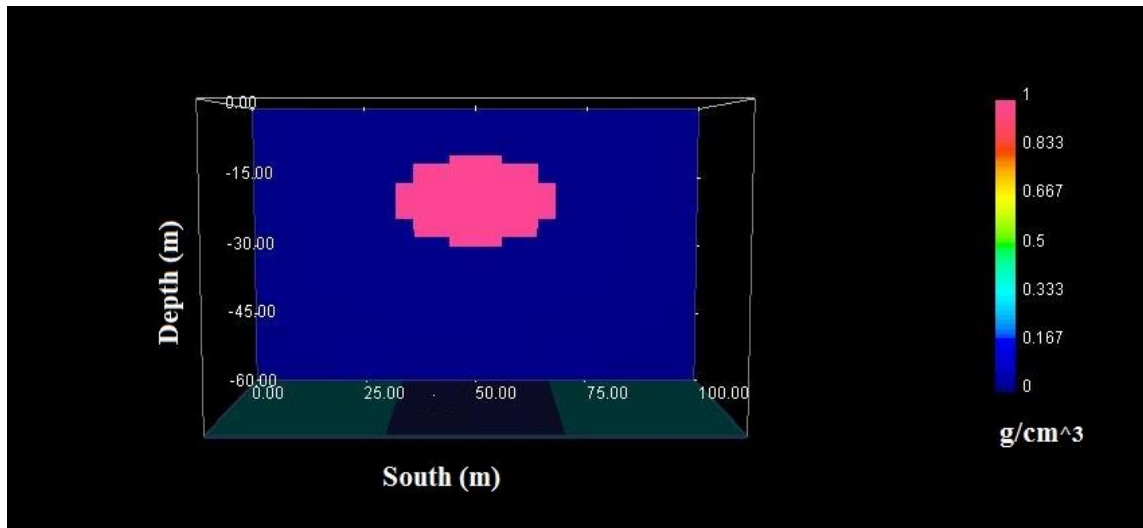
جهت مدل سازی سه بعدی داده ها در این پایان نامه از الگوریتم لی - اولدنبرگ (نرم افزار Grav3D) استفاده شد. ابتدا بر روی داده مصنوعی این روش اعمال گردید. در قسمت های ۳-۴ و ۳-۵ نتایج حاصل از این روش بر روی دو مدل مصنوعی نشان داده شده است.

### ۳-۴ مدل سازی معکوس سه بعدی

علاوه بر مدل های مصنوعی و مدل سازی مستقیم و معکوس دوبعدی، از نرم افزار Grav3D برای مدل سازی سه بعدی داده های گرانی روش الگوریتم لی - اولدنبرگ استفاده شده است.

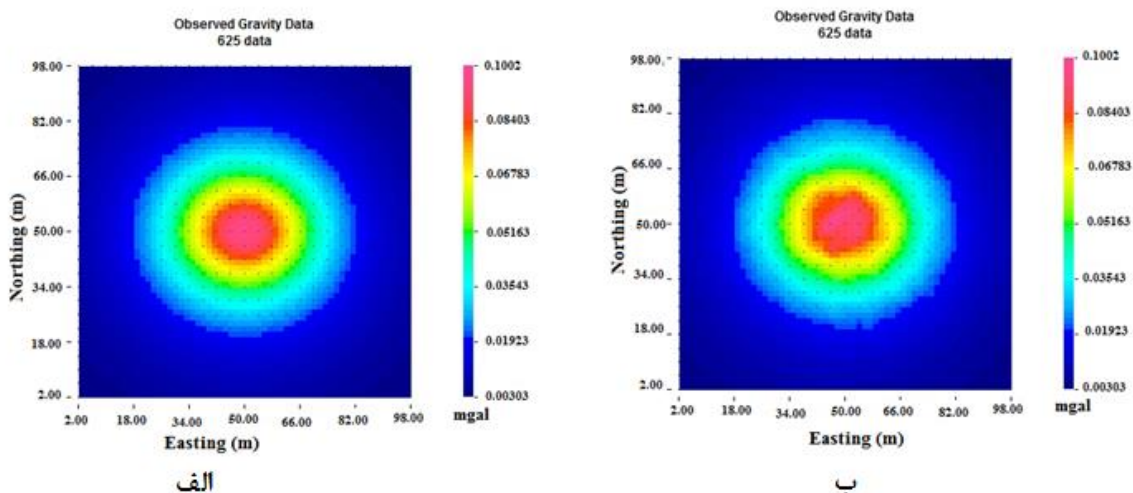
مدل مصنوعی که در این قسمت استفاده گردید یک بیضی با گسترش طولی ۳۴ و عرضی ۲۰ متر می باشد و گسترش عمقی آن ۲۰ متر است به طوری که عمق بالای آن ۱۰ متر و عمق پایین آن

۲۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۳-۲۰). این مدل مصنوعی با استفاده از ۱۸۷۵۰ سلول با ابعاد  $4 \times 4 \times 2$  محاسبه شده است. ابعاد شبکه‌بندی برای این مدل  $100 \times 100 \times 60$  متر منظور شده است.



شکل ۳-۲۰: نمای دوبعدی از مدل مصنوعی.

تعداد داده‌های حاصل از این مدل ۶۲۵ می‌باشد. ۳ درصد نویز گوسی به داده‌ها اضافه شد. شبکه حاصل از داده‌های بدون نوفه و با نوفه در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است.

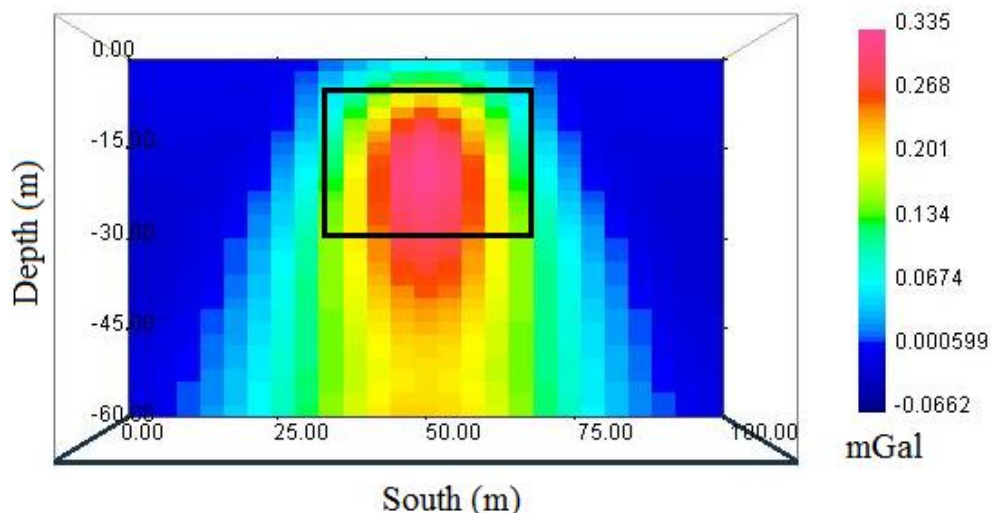


شکل ۳-۲۱: الف) شبکه حاصل از داده‌های خام بدون نویز. ب) شبکه حاصل از داده‌های مدل مصنوعی با ۳ درصد نویز.

در ابتدا مدل‌سازی معکوس داده‌ها در نرم‌افزار به حالت پیش‌فرض و بدون اعمال هیچ قیدی انجام

گرفت. همان‌طور که در شکل (۳-۲۲) مشخص است، در صورت نبود اطلاعات اولیه زمین‌شناسی و

صرفاً با استفاده از داده‌های برداشتی، به طور تقریبی می‌توان از ساختار زیرسطحی اطلاعاتی به دست آورد.

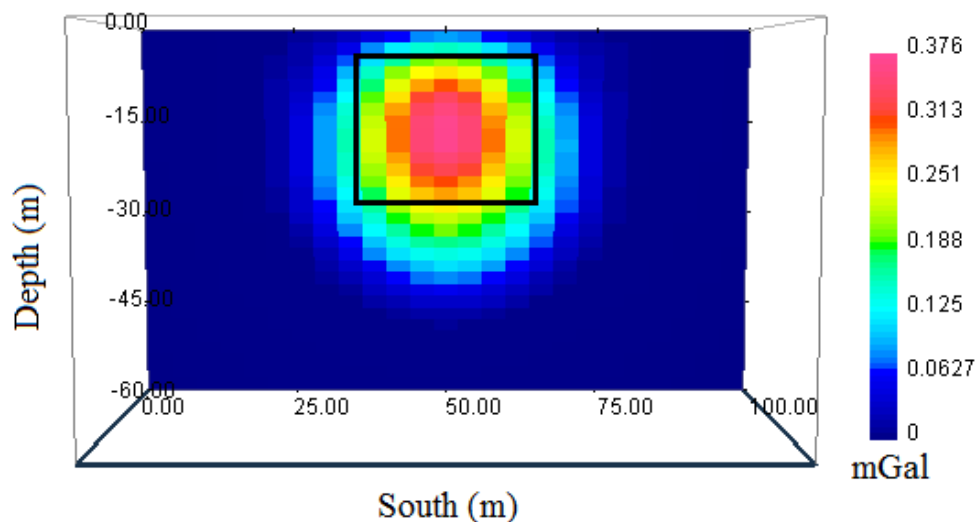


شکل ۳-۲۲: مدل‌سازی معکوس در حالت پیش‌فرض - بدون اعمال قید.

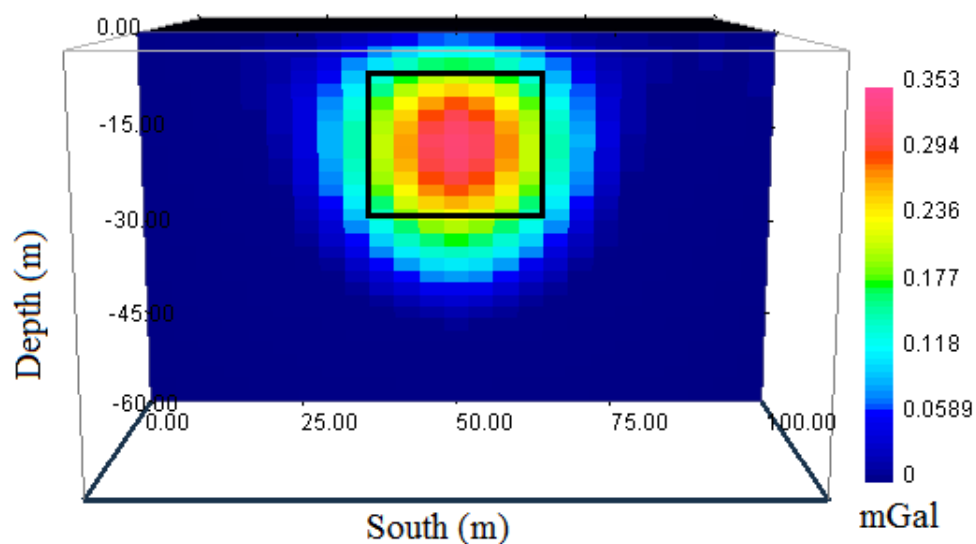
کادر سیاه رنگ در شکل (۳-۲۲) مکان صحیح مدل مصنوعی مورد نظر را نشان می‌دهد. با توجه به حساسیت روش گرانی‌سنجی به تغییرات جانبی چگالی مرز افقی توده به طور قابل قبولی مشخص است. اما قسمت زیرین مدل به عمق کشیده شده است. مدل‌سازی طی ۶ مرحله تکرار با مقدار خطای برازش<sup>۱</sup> برابر ۷ به اتمام رسیده است. به منظور جمع‌کردن بخش زیرین مدل، در مرحله بعد از قید مثبت در فرآیند مدل‌سازی معکوس استفاده شد. این قید در جاهایی کاربرد دارد که تباین چگالی توده مورد نظر ما با محیط اطراف آن مثبت است. پس از اعمال این قید مدل‌سازی مجدداً انجام شد. نتیجه حاصل از آن در شکل (۳-۲۳) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۳-۲۳) مشخص است با اعمال این قید، الگوی مدل چگالی بهبود یافته و به طور صحیح‌تری عمق توده را نشان می‌دهد. بعد از ۱۸ مرتبه تکرار میزان خطای عدم برازش برابر با ۶/۱۵۲ بوده است. کاهش میزان این خطا در صورت همگرا شدن مدل به مدل واقعی نشانه خوب بودن مدل به دست آمده است. از سوی دیگر می‌توان با افزایش میزان همواری در جهات مختلف مدل به دست آمده را بهبود بخشید. در این مدل کشیدگی

<sup>۱</sup> Misfit

در راستای x و نیز در راستای عمق از راستای عرضی بیش‌تر است، بنابراین با افزایش ضرایب وزنی در این راستا می‌توان مدل بهتری به دست آورد. نتیجه حاصل از اعمال قیود همواری در شکل (۳-۲۴) ارائه شده است. نهایتاً بعد از ۲۲ مرحله تکرار با اعمال قید هموارسازی خطای عدم برازش به ۴/۸۲۰۶۶ کاهش یافت.



شکل ۳-۲۳: مقطع عرضی مدل‌سازی معکوس مدل مصنوعی با اعمال قید مثبت بودن.



شکل ۳-۲۴: نتیجه حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی مدل مصنوعی با اعمال قید هموارسازی.



## فصل چهارم

### مدل سازی داده‌های

### واقعی

## ۴-۱ مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی به عنوان روش‌های کارآمد در اکتشافات و پی‌جویی ذخایر کرومیت به رسمیت شناخته شده‌اند. از طرف دیگر، تفاوت بین گراویتی کرومیت با وزن مخصوص  $4/3-4$  گرم بر سانتی‌متر مکعب و سنگ‌های سرپانتینی با وزن مخصوص  $2/9-2/5$  گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث شناسایی آنومالی‌های ماده معدنی کرومیت با استفاده از دستگاه‌های مدرن گرانی‌سنجی شده است. با استفاده از این روش، مناطق معدنی کرومیت در بسیاری از کشورها مانند ترکیه، آلبانی و صربستان تعیین و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند [ Kospiri et al, 1999 ]. هامر<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۴۵)، دیویس<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۵۷) در کوبا، ارگین<sup>۳</sup> (۱۹۵۲) و یونگل<sup>۴</sup> (۱۹۵۶) در ترکیه، نجاتی (۱۳۸۳)، کامکار روحانی (۱۳۸۷)، کامکار روحانی و بیگی (۱۳۸۸)، آقاجانی (۱۳۹۱) و آزاد و همکاران (۱۳۹۲) در ایران، با استفاده از پردازش داده‌های گرانی‌سنجی، توانستند بی‌هنجاری‌های کرومیتی مختلفی را شناسایی کنند. در این فصل به تعبیر و تفسیر داده‌های گرانی و مدل‌سازی داده‌های میدان پتانسیل محدوده کرومیت‌زایی کاماگائی کوبا و منطقه اکتشافی کرومیت شرق سبزوار پرداخته می‌شود.

## ۴-۲ زمین‌شناسی ذخایر کرومیت

کانسارهای کرومیت با وجود تنوع در شکل ماده معدنی، همواره در سنگ‌های آذرین اولترامافیک تشکیل می‌شوند. مقدار سیلیس این سنگ‌ها کمتر از ۴۵ درصد بوده و ترکیب کانی‌شناسی آن‌ها شامل اولیوین، ارتوپیروکسن‌ها و کلینوپیروکسن‌ها می‌باشد؛ که در مواردی آمفیبول و فلدسپات‌های قلیایی نیز در این سنگ‌ها حضور دارند.

---

<sup>۱</sup> Hammer

<sup>۲</sup> Davis

<sup>۳</sup> Ergin

<sup>۴</sup> Yuenguel



این سنگ‌ها، شامل انواعی مانند سرپانتینت، گابرو، پیروکسینت، پریدوتیت و دونیت هستند. از دیدگاه زمین‌شناسی کانه کرومیت وابسته به سنگ‌های نفوذی اولترامافیک و مرتبط به پوسته اقیانوسی و شکافت‌های دریایی بوده که در پی باز شدن گودال‌های ژرف و نفوذ توده‌ها در پوسته قاره‌ای، به سطح زمین می‌رسد.

کانسارهای کرومیت که از نظر اقتصادی اهمیت دارند، به دو دسته لایه‌ای و آلپی تقسیم می‌شوند [کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۹]:

#### ۴-۲-۱ کرومیت نوع لایه‌ای (بوشولد)

از نمونه‌های بارز کانسارهای کرومیت نوع لایه‌ای که از نظر اقتصادی ارزش زیادی دارند، می‌توان به کانسارهای کرومیت کمپلکس بوشولد (آفریقای جنوبی) و کمپلکس استیل واتر (آمریکا) اشاره کرد. کمپلکس بوشولد آفریقای جنوبی به‌عنوان معروف‌ترین نمونه توده آذرین لایه‌ای در دنیا شناخته شده است. این توده در ترانسوال مرکزی قرار گرفته و سن سنگ‌های آن پرکامبرین است. از دیگر کمپلکس‌های معروف دنیا که از نوع لایه‌ای است، کمپلکس دایک بزرگ در جنوب رودزیا است.

#### ۴-۲-۲ کرومیت نوع آلپی (افیولیتی)

کرومیت‌های نوع آلپی به صورت لایه‌ای و عدسی شکل و به‌صورت هم‌شیب و گاه شیب‌دار نسبت به سنگ‌های مجاور خود یافت می‌شوند، اما همبری آن‌ها با سنگ‌های مجاور تقریباً غیرعادی و همراه با گسستگی است. ترکیب کانی‌شناسی این سنگ‌ها به دلیل دگرسانی سیالات داغ اغلب تغییر یافته و به سرپانتین، کلریت و اپیدوت تبدیل شده‌اند و به رنگ سبز دیده می‌شوند، مجموعه این سنگ‌ها افیولیت نامیده می‌شوند. مجموعه افیولیتی معمولاً از دونیت، پریدوتیت، گابرو، گدازه‌های بازیک (معمولاً با ساخت بالشی)، چرت‌های رادیولاریتی و رسوبات فلیش تشکیل شده است [کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۹].

ذخایر کرومیت شناخته شده در ایران از نوع آلپی (عدسی شکل) بوده و بر اساس شواهد موجود زمین‌شناسی وجود ذخایر تیپ لایه‌ای غیرمحمتمل است. با توجه به گسترش توالی‌های افیولیتی و افیولیت ملانژها و مشخص بودن موقعیت جغرافیایی آن‌ها مناطق دارای رخنمون نوارهای افیولیتی را می‌توان به عنوان مناطق پتانسیل‌دار معرفی کرد. با توجه به اطلاعات نسبتاً مناسب در مورد توالی‌های افیولیتی و افیولیت ملانژها و ناچیز بودن اطلاعات در مورد توده‌های نفوذی مافیک-اولترامافیک اولویت اصلی با بررسی نوارهای افیولیتی است [ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۹ ].

#### ۳-۴ محدوده کرومیت‌زایی کاماگائی کوبا

محدوده معدنی کاماگائی در نزدیکی شهر کاماگائی در کشور کوبا قرار داشته و در محدوده کرومیت‌زایی ایالت کاماگائی در نزدیکی شهرهای آتاگراسیا<sup>۱</sup>، کروما<sup>۲</sup> و میناس<sup>۳</sup> قرار دارد. اولین تحقیقات جامع از معادن کرومیت کوبا در طی سال‌های ۱۹۴۰-۱۹۴۱ توسط تایلر<sup>۴</sup> انجام گرفت و این تحقیقات کمابیش در این منطقه ادامه یافت [ Davis et al, 1957 ]. در طی دو سال (۱۹۵۴ تا ۱۹۵۶)، حدود ۴۱۹۲۱ ایستگاه گرانی در ۹ ناحیه از این منطقه برداشت شده است که مساحتی در حدود ۳۰/۵۶ کیلومتر مربع را شامل می‌شود [ Davis et al, 1957; Hammer et al, 1945 ].

#### ۱-۳-۴ زمین‌شناسی محدوده کرومیت‌زایی کاماگائی کوبا

سنگ میزبان کانی‌سازی در این منطقه از توده‌های نفوذی پریدوتیتی تا گابرو تغییر می‌کند. این مجموعه قبل از زمان کرتاسه بالایی به درون مجموعه سنگ‌های بلوری شیستی نفوذ کرده است. عمده این توده‌ها در جنوب غربی محدوده تمرکز دارند و در سایر بخش‌ها پراکندگی‌های کمتری نشان

---

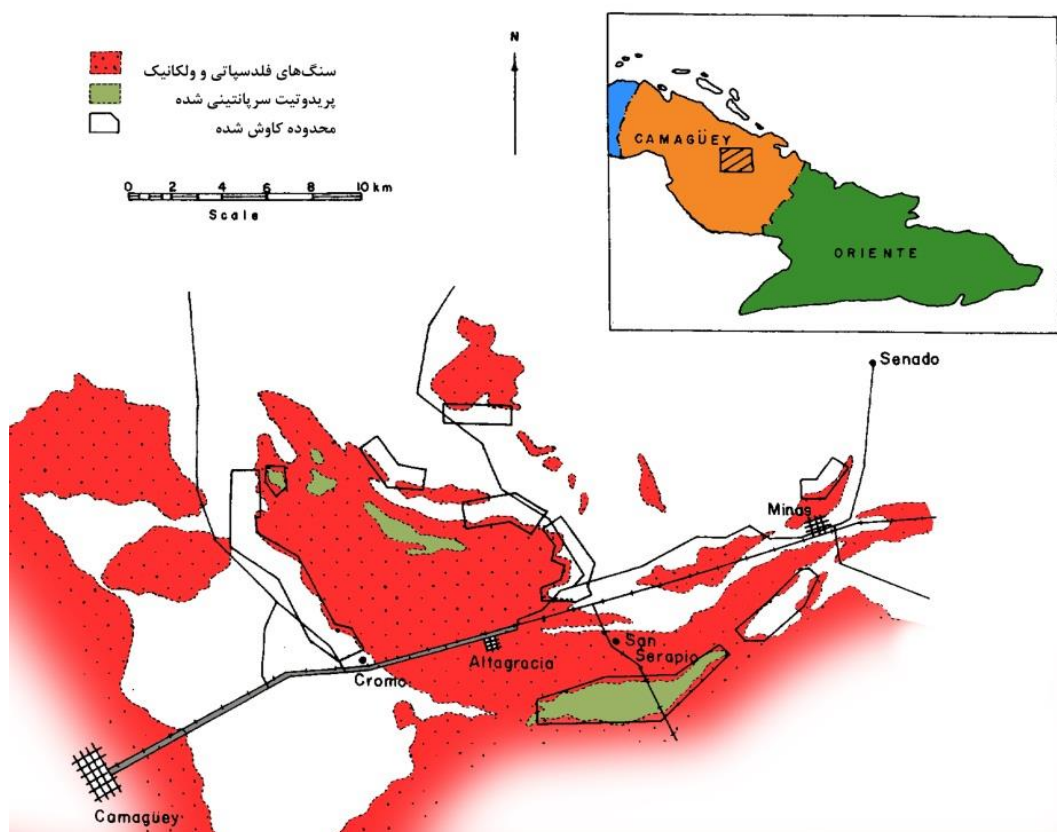
<sup>۱</sup> Altagracia

<sup>۲</sup> Cromo

<sup>۳</sup> Minas

<sup>۴</sup> Thayer

می‌دهند. محدوده معدنی عمدتاً شامل پریدوتیت‌های سرپانتینی و دونیت بوده که با کمی گابرو، تراکتولیت و آنورتیت همراه می‌باشد. این مجموعه به وسیله سنگ‌های آتشفشانی مانند چرت و سنگ آهکی دوره کرتاسه پوشانده شده است. گابروئیت‌ها و توف‌ها در قسمت بالایی توده چینه‌سان کمابیش دیده می‌شود. توده‌های نفوذی میزبان ذخایر کرومیت به دو گروه تقسیم می‌شوند؛ پریدوتیت‌های سرپانتینی و دونیت‌ها که میزبان توده‌های کرومیتی با ابعاد بزرگ‌تر هستند و توده‌های کوچک‌تر کرومیتی که درون سنگ‌های مافیک فلدسپات‌دار شامل گابرو، تراکتولیت و آنورتیت‌ها قرار دارند. شکل توده‌های کرومیتی در این منطقه به صورت توده‌های عدسی شکل بوده و عمدتاً در مرز بین پریدوتیت‌ها و سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده‌اند [Felint et al, 1948]. محدوده‌های کاوش شده جهت کانسارها و معادن کرومیت در ایالت کاماگانی کوبا در شکل (۴-۱) دیده می‌شود.



شکل ۴-۱: مناطق کاوش شده در محدوده کرومیت‌زایی کاماگانی، کوبا [ Davis et al, 1957 ].

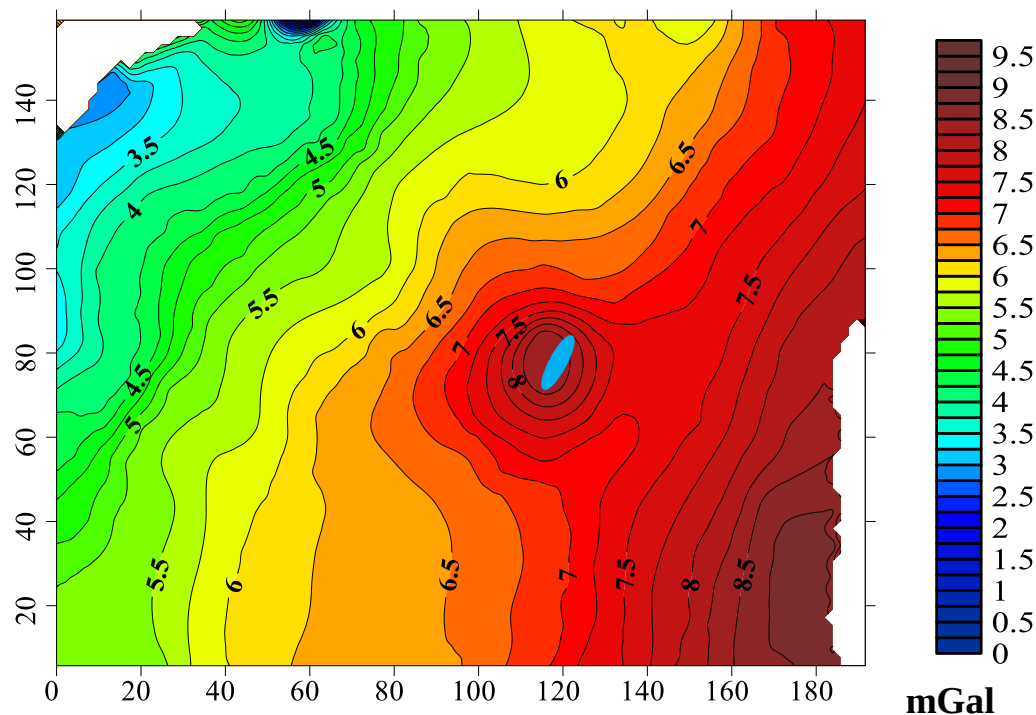
## ۴-۳-۲ داده‌های گرانی‌سنجی

بر اساس مطالعات و بررسی‌های ژئوفیزیکی دیویس و همکاران (۱۹۵۷)، نقشه آنومالی بوگه تهیه شده است. با استفاده از نقشه مربوطه و اطلاعات موجود، داده‌های مربوطه تهیه و نقشه آنومالی بوگه کامل گرانی در محیط نرم‌افزار Oasis Montaj و WingLink رسم گردید (شکل ۴-۲).

اولین کار در ارتباط با پردازش داده‌های گرانی‌سنجی، تفکیک آنومالی‌های ناحیه‌ای از محلی می‌باشد. به منظور بارزسازی آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای، یکی از روش‌های متداول روش روند سطح می‌باشد. در این تحقیق جهت حذف اثر آنومالی‌های ناحیه‌ای از این روش استفاده شده است. جهت تفکیک آنومالی باقیمانده از ناحیه‌ای، روی داده‌های نقشه آنومالی بوگه منطقه روند سطح از درجه ۱ تا ۴ اعمال شد. پس از بررسی نتایج، آنومالی باقیمانده درجه ۲ انتخاب و نقشه آنومالی آن رسم شد (شکل ۴-۳).

گام بعدی در روند پردازش، انتخاب محدوده مناسب و مستعد جهت تخمین عمق و مدل‌سازی می‌باشد. با توجه به اختلاف چگالی مثبت، بین کرومیت و سنگ‌های میزبان، محدوده بیشینه در نقشه آنومالی گرانی باقیمانده، به عنوان منطقه امیدبخش در نظر گرفته شد. بر اساس مطالعات هامر و همکاران (۱۹۴۵) دیویس و همکاران (۱۹۵۷) در این محدوده رخنمونی از ماده معدنی تعدادی حفاری گمانه اکتشافی وجود دارد که در طراحی پروفیل‌ها از آن‌ها استفاده شد.

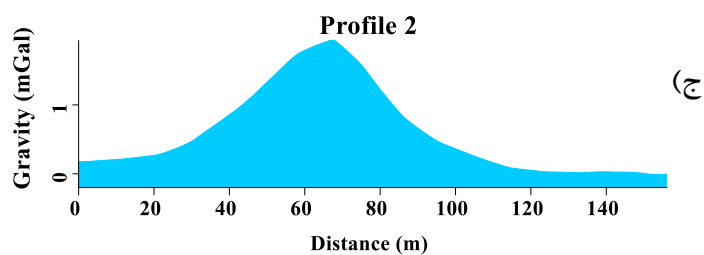
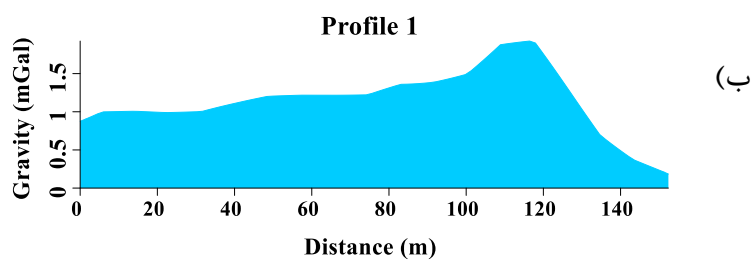
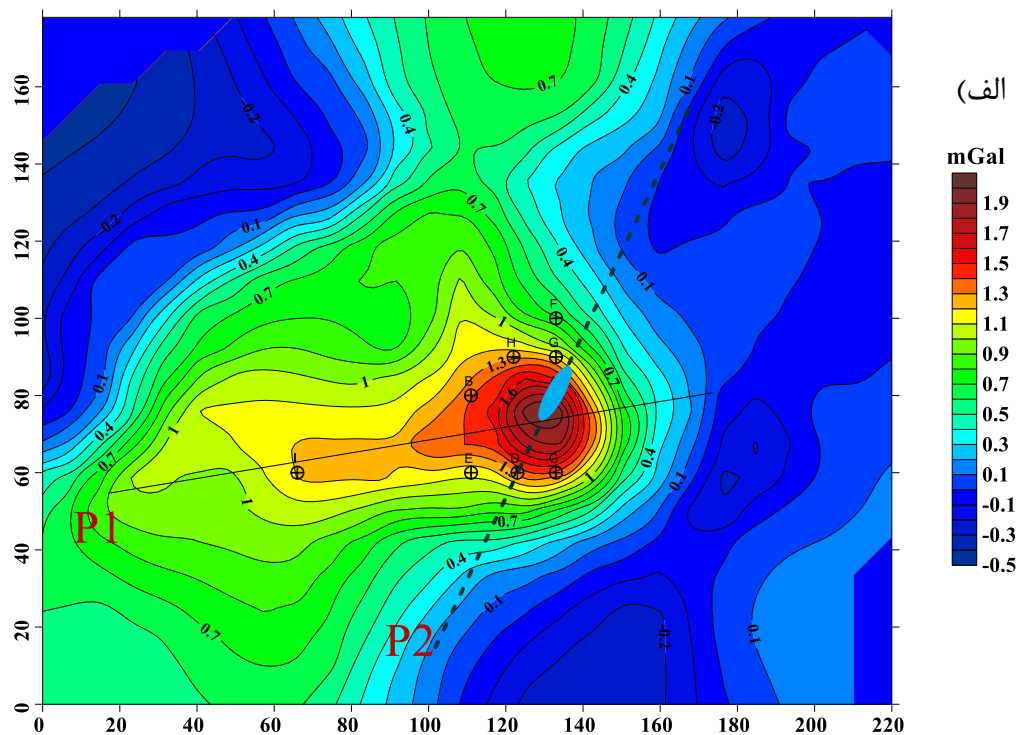
در ادامه جهت بررسی گسترش افقی و عمقی ماده معدنی و مدل‌سازی، دو پروفیل مجزا (P1 و P2) با راستای جنوب غرب - شمال شرق در دو بخش با احتمال بالای کانی‌سازی در نظر گرفته شد، به طوری که روی این پروفیل‌ها از اطلاعات زمین‌شناسی و گمانه‌های اکتشافی استفاده شود.



شکل ۴-۲: نقشه آنومالی بوگه گرانی منطقه کرومیت‌زایی کاماگائی کوبا.

در شکل (۳-۴) محل پروفیل‌ها، نقاط حفاری و رخنمون ماده معدنی در نزدیکی پروفیل دوم نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل شماره ۲ از محل دو گمانه A و D عبور کرده است.

در این محدوده نقاط حفاری C و E به ماده معدنی برخورد نکرده‌اند. نقطه حفاری A در نزدیکی توده معدنی قرار دارد. جهت اعتبارسنجی تخمین عمق و مدل‌سازی‌ها پروفیل‌های به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که یا از محل حفاری عبور کنند مانند پروفیل شماره ۲ (محل گمانه A و D) و یا در نزدیکی گمانه‌ها (پروفیل شماره ۱) باشند.



شکل ۳-۴: الف) نقشه آنومالی باقی مانده گرانی از محدوده کرومیتی در کاماگانی کوبا. محل رخنمون در روی نقشه نشان داده شده است. ب) آنومالی گرانی در محل پروفیل ۱، ج) آنومالی گرانی در محل پروفیل دوم.

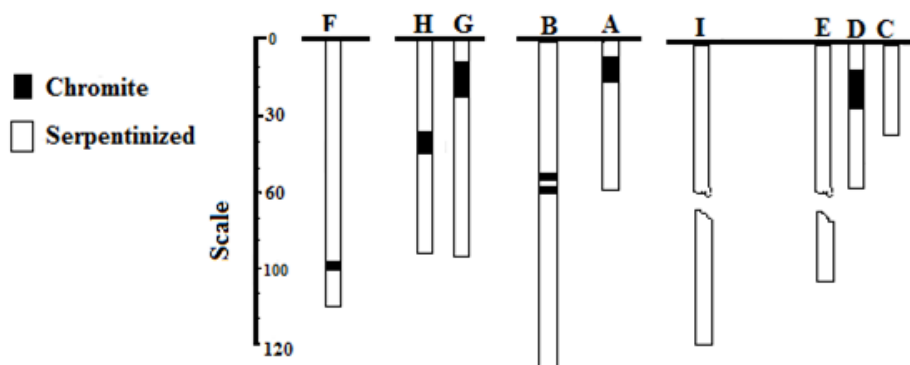
براساس اطلاعات حفاری، گمانه‌های اکتشافی [ Davis et al, 1957 ] و نقشه مربوط به مختصات

نقاط و عمق حفاری و برخورد به ماده معدنی به دست آمد که در جدول (۴-۱) و شکل

(۴-۴) گزارش شده است.

جدول ۴-۱: مختصات نقاط حفاری در این منطقه [ اقتباس از Davis et al, 1957 ].

| نقاط حفاری | طول (X) - متر | عرض (Y) - متر | عمق برخورد گمانه به توده - متر |
|------------|---------------|---------------|--------------------------------|
| A          | ۱۳۳           | ۸۰            | ۶-۲۰                           |
| B          | ۱۱۱           | ۸۰            | ۵۱-۶۱                          |
| C          | ۱۳۳           | ۶۰            | ۰                              |
| D          | ۱۲۳           | ۶۰            | ۹-۲۷                           |
| E          | ۱۱۱           | ۶۰            | ۰                              |
| F          | ۱۳۳           | ۱۰۰           | ۹۸-۱۰۱                         |
| G          | ۱۳۳           | ۹۰            | ۹-۲۷                           |
| H          | ۱۲۲           | ۹۰            | ۳۷-۴۶                          |
| I          | ۶۶            | ۶۰            | ۰                              |



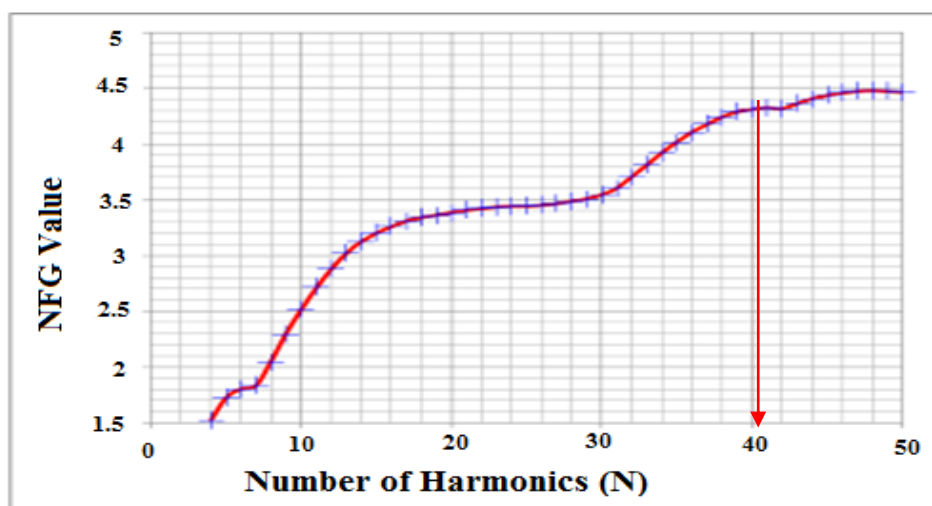
شکل ۴-۴: مقطع نقاط حفاری محدوده توده معدنی کرومیت - فواصل بر حسب متر [اقتباس از Davis et. al, 1957].

#### ۴-۳-۳ تفسیر آنومالی‌های گرانی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال

به منظور تعیین عمق قرارگیری و گسترش افقی کانی‌زایی در این محدوده، از روش گرادیان کل نرمال استفاده گردید. فواصل نقاط بایستی در محاسبات مربوط به این روش یکسان باشد، بنابراین ابتدا با استفاده از Cf-ToolBox داده‌های خروجی مربوط به پروفیل‌های P1 و P2 در محیط Matlab جهت ایجاد فایل ورودی در برنامه NFG2D آماده‌سازی شد و در محیط Matlab مورد استفاده قرار گرفت.

## الف: پروفیل P1

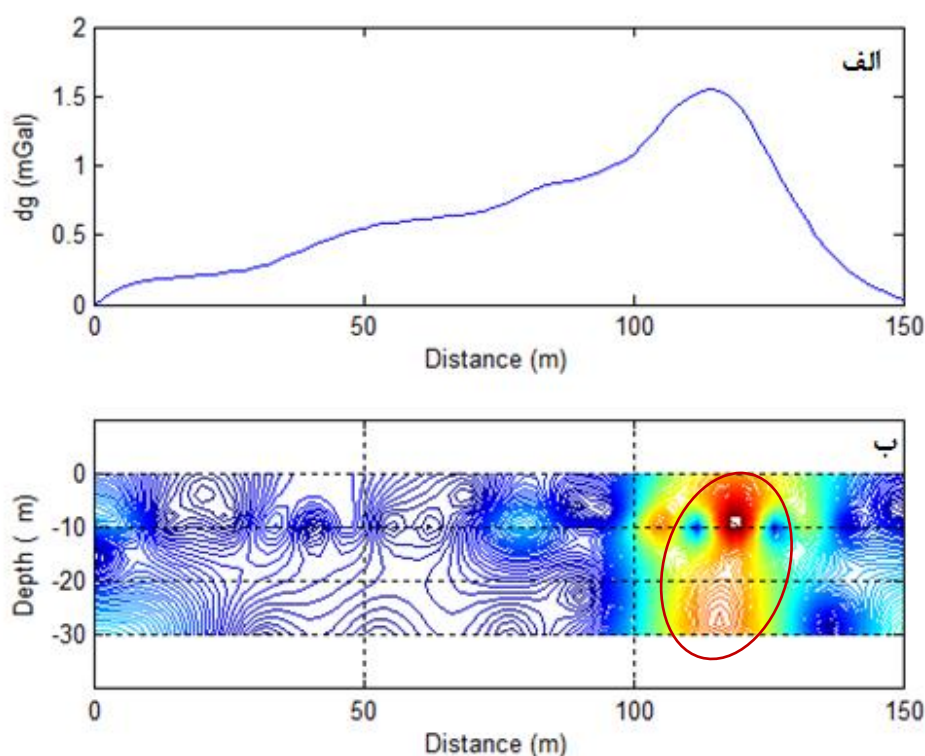
اثر گرانی در راستای پروفیل P1 در شکل (۴-۴-الف) ارائه شده است. به منظور محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی روی این پروفیل لازم است که تعداد جملات هارمونیک تخمین و تعیین گردد. بر اساس روشی که در فصل دوم گفته شد از روش تغییرات مقدار بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات و رسم نمودار آن، مقدار جملات بهینه به اندازه ۴۱ تعیین گردید (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۴-۵: تعیین تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه نسبی (پروفیل P1).

بعد از تعیین تعداد بهینه جملات هارمونیک مقدار گرادیان کل نرمال دوبعدی در راستای این پروفیل محاسبه و مقطع آن رسم گردید (شکل ۴-۶-ب).



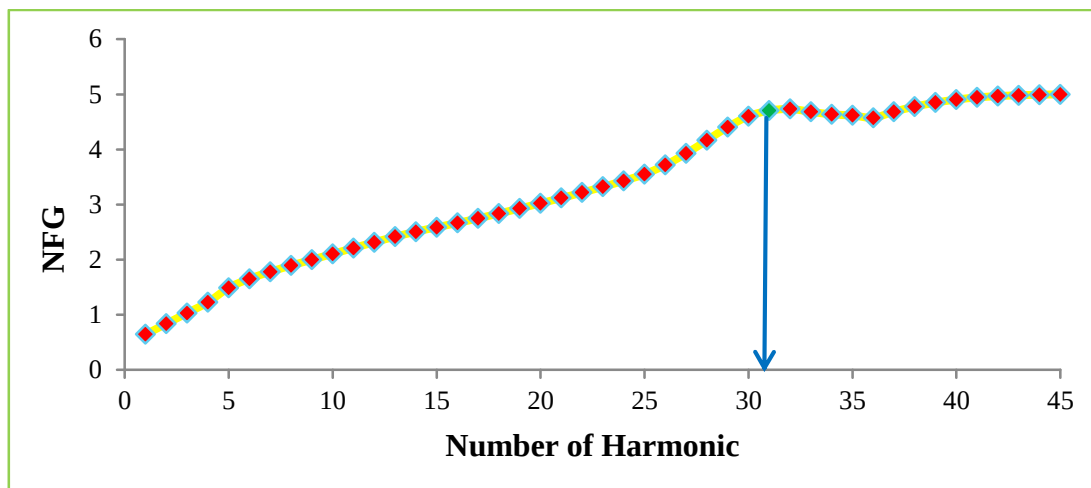


شکل ۴-۶: نتیجه بررسی عمق و گسترش افقی آنومالی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال دوبعدی داده‌های گرانی روی پروفیل P1. (الف- اثر گرانی در راستای پروفیل ب- مقطع حاصل از محاسبه گرادیان کل نرمال).

مطابق شکل مذکور، مقدار بیشینه گرادیان کل نرمال در بخش در انتهای سمت راست پروفیل دیده می‌شود که بخش غربی آن یک عدسی کوچک‌تر به لحاظ گسترش سطحی و عمقی بوده ولی توده سمت راست علاوه بر گسترش عمقی در عمق حدود ۱۰ متری متمرکز است، مختصات این نقطه تقریباً در ۱۱۴ متری پروفیل است. مقطع گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی تا حد زیادی راستای کشیدگی توده آنومال را هم نشان می‌دهد.

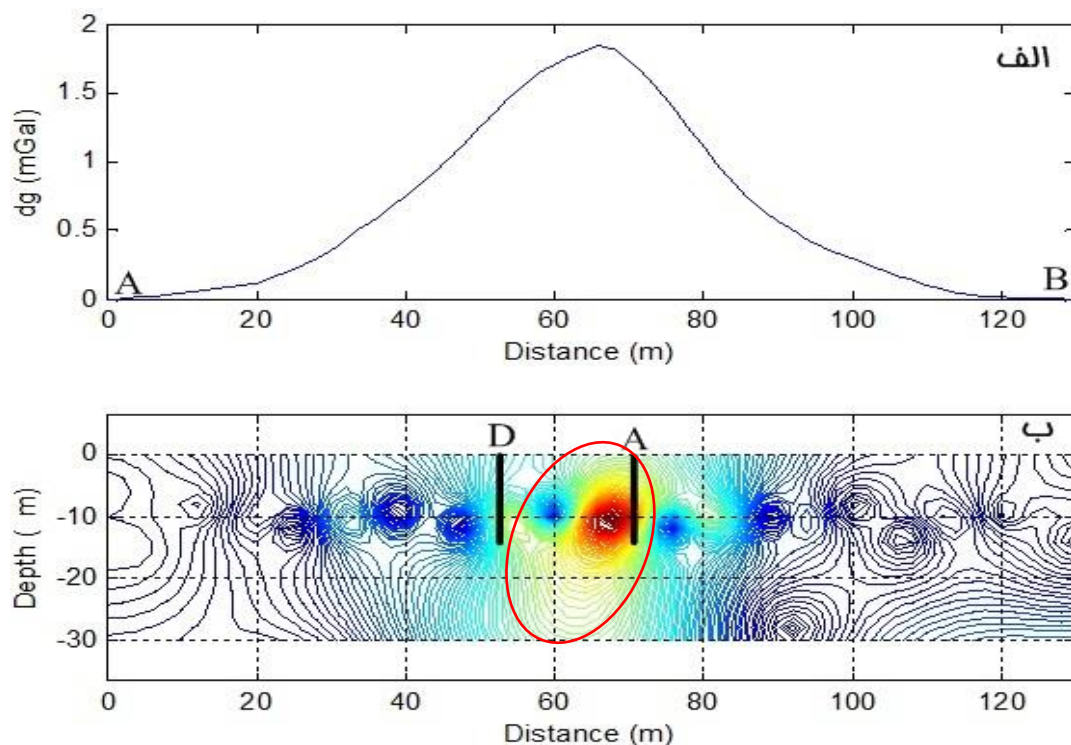
### ب: پروفیل P2

به همین ترتیب مقدار گرادیان کل نرمال برای پروفیل P2 به ازای تعداد جملات هارمونیک مختلف محاسبه گردید و نهایتاً تعداد بهینه ۳۱ منظور شد.



شکل ۴-۷: تعیین تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه نسبی (پروفیل P2).

بعد از تعیین تعداد جملات بهینه مقادیر گرادیان کل نرمال دوبعدی داده‌های حاصل در صفحه  $x-z$  و به فواصل مشخص  $dx = dz = 2$  متری محاسبه گردید. نقشه کنتوری مقادیر گرادیان کل نرمال شده داده‌های گرانی در راستای پروفیل تا عمق ۳۰ متری رسم گردید (شکل ۴-۸-ب). محل برخورد دو گمانه A و D به ماده معدنی در این مقطع نمایش داده شده است.



شکل ۴-۸: گسترش افقی و عمقی آنومالی گرانی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال دوبعدی داده‌های گرانی روی پروفیل P2 (الف- اثر گرانی در راستای پروفیل ب- مقطع حاصل از محاسبه گرادیان کل نرمال)

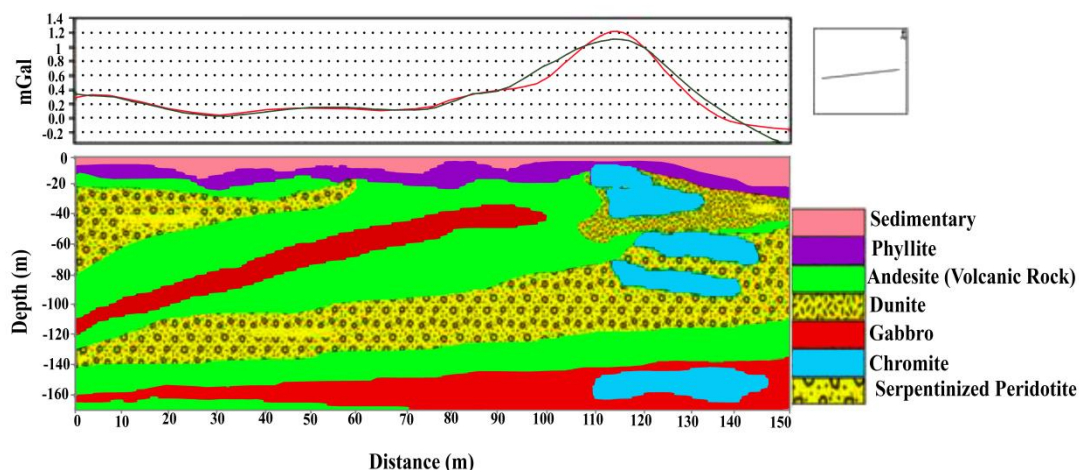
محدوده‌ای که در شکل با رنگ قرمز دیده می‌شود، دارای مقادیر بالای گرادیان کل نرمال است و محل تقریبی توده‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات مربوط به رخنمون توده‌های کرومیت در این منطقه علاوه بر آن که عمق مرکز توده آنومال با استفاده از روش گرادیان کل نرمال به خوبی به دست آمده است، راستای کشیدگی و گسترش توده آنومال را هم با دقت قابل قبولی نشان می‌دهد.

## ۴-۳-۴ مدل‌سازی مستقیم داده‌های گرانی منطقه کاماگائی کوبا در راستای

### پروفیل‌های P1 و P2

حال بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، حفاری و نتایج روش گرادیان کل نرمال به مدل‌سازی مستقیم داده‌های گرانی روی دو پروفیل مذکور به وسیله نرم‌افزار وینگ‌لینک پرداخته شده است. داده‌های گرانی به عنوان فایل ورودی به نرم‌افزار فراخوانی شده و در راستای هر کدام از پروفیل‌ها مدل‌سازی انجام گرفت.

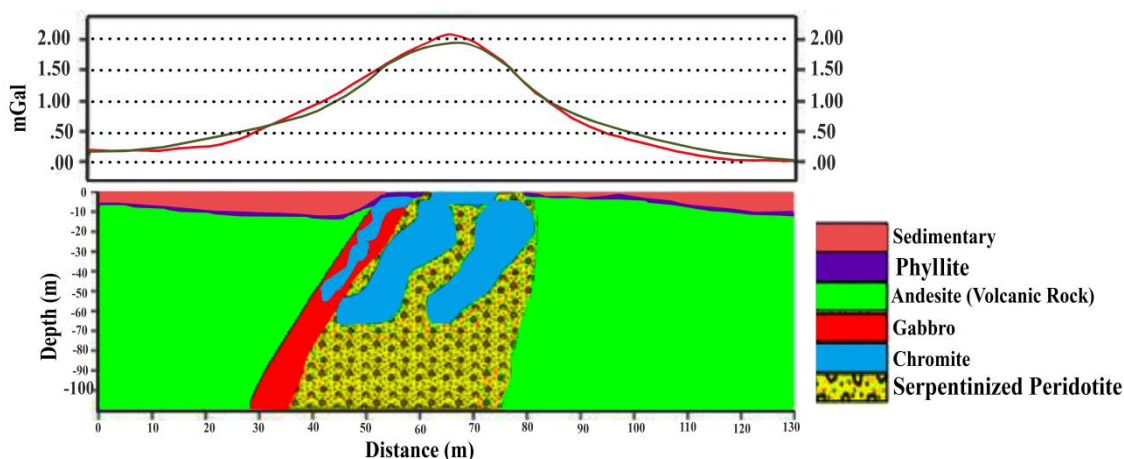
در این قسمت جهت انجام فرآیند مدل‌سازی و دستیابی به مدل هرچه دقیق‌تر سعی بر این است که از اطلاعات خروجی روش گرادیان کل نرمال، اطلاعات حفاری که از منطقه مورد نظر موجود بوده و نیز گزارش‌های زمین‌شناسی استفاده شود تا بتوان با دقت هرچه بیشتر مدل‌سازی را انجام داده و خطاهای ناشی از مدل‌سازی مستقیم که برگرفته از نقایص این نوع مدل‌سازی است تا حد امکان برطرف گردد. نحوه مدل‌سازی مستقیم در این نرم‌افزار به این صورت است که ساختارها و توده‌ها توسط کاربر رسم می‌گردد و پاسخ آن محاسبه و به صورت منحنی در کنار پاسخ مربوط به داده‌های اصلی رسم می‌گردد. هرچه اطلاعات جانبی بیش‌تری در اختیار باشد مقطع رسم شده از دقت بالاتری برخوردار است. در طی فرآیند مدل‌سازی لازم است ساختارها و توده‌ها به نحوی جابه‌جا گردند که منحنی پاسخ آن‌ها به انطباق قابل قبولی با پاسخ مربوط به داده‌های مشاهده‌ای برسد. وجود اطلاعات حفاری و نیز نتایج حاصل از اعمال روش گرادیان کل نرمال باعث افزایش دقت و انطباق منحنی پاسخ مدل و داده‌های مشاهده‌ای گردید (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹: نتیجه مدل سازی مستقیم روی پروفیل گرانی P1 در محیط نرم افزار WingLink.

مطابق شکل (۴-۹) منحنی قرمز رنگ آنومالی گرانی ناشی از داده های گرانی اندازه گیری شده در محدوده و منحنی سبز رنگ نتیجه مدل سازی مستقیم آنومالی گرانی است.

پروفیل شماره ۲ از دو نقطه حفاری گذشته و در نزدیکی محل رخنمون انتخاب گردید. شیب لایه پریدوتیتی از شیب رخنمون کرومیت پیروی می کند؛ لذا سعی شد لایه بندی توده ها در این پروفیل به تبعیت از شیب رخنمون کرومیتی باشد (شکل ۴-۱۰).



شکل ۴-۱۰: نتیجه مدل سازی مستقیم پروفیل P2 در محیط نرم افزار WingLink.

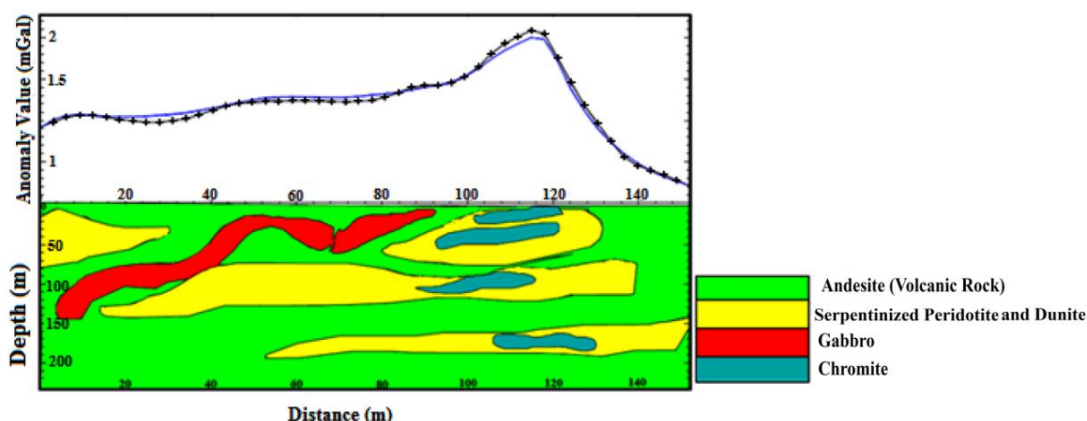
#### ۴-۳-۵ مدل سازی معکوس داده های گرانی منطقه کاماگائی کوبا در راستای پروفیل -

##### های P1 و P2.

برای مدل سازی معکوس داده های گرانی سنجی کرومیت کوبا از نرم افزار Modelvision استفاده شد. همانند مرحله قبل داده های مربوط به پروفیل های P1 و P2 در نرم افزار فراخوانی شد و مقطع طولی آن رسم گردید. همان طور که گفته شد. با توجه به اطلاعات زمین شناسی موجود، نتایج مدل سازی مستقیم در نرم افزار Winglink و نیز اطلاعات عمقی به دست آمده از روش گرادیان کل نرمال ابتدا مدل اولیه ای طراحی گردید. با رسم توده هایی با چگالی های مختلف و منطبق با اطلاعات زمین شناسی، پاسخ مربوط به آن محاسبه و نمایش داده می شود. هرچه مدل اولیه بهتر باشد، خطای محاسبه شده هنگام مدل سازی معکوس کاهش می یابد. بعد از ساخت مدل اولیه، مدل سازی برای هریک از پروفیل ها انجام شد، نتایج مدل سازی معکوس برای هر پروفیل در ادامه آورده شده است.

##### الف: مدل سازی معکوس آنومالی گرانی روی پروفیل P1:

نتیجه مدل اولیه برای پروفیل P1 در نرم افزار مدل ویژن جهت مدل سازی معکوس در شکل (۴-۱۱) ارائه شده است. در این شکل منحنی آبی رنگ پاسخ مدل و منحنی سیاه رنگ نشان دهنده آنومالی گرانی مشاهده ای می باشد. مطابق شکل همان گونه که مشاهده می شود، نتیجه با مدل سازی مستقیم قدری متفاوت است.



شکل ۴-۱۱: مدل اولیه جهت مدل سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا در نرم افزار Modelvision.

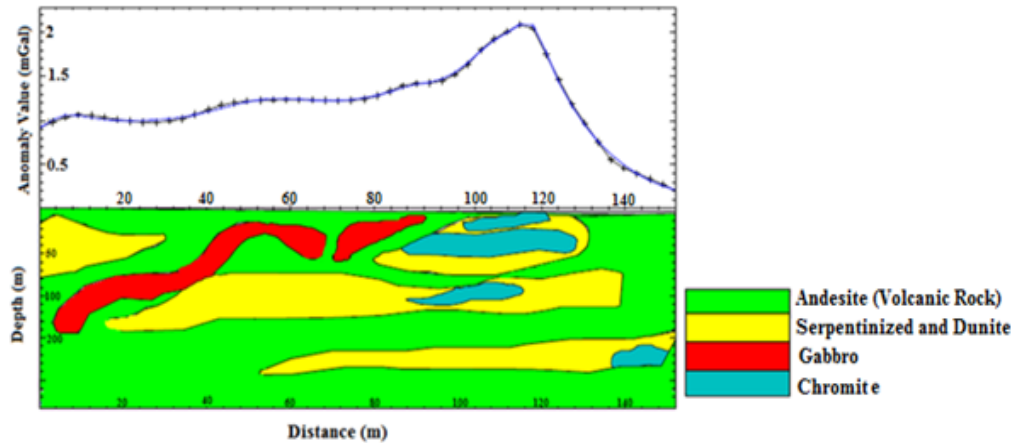
شکل ۴-۱۲) ویژگی هریک از توده های انتخابی را نشان می دهد. در این جا سنگ های رسوبی، فیلیت ها و سنگ های آتشفشانی به صورت یک مجموعه و با چگالی متوسط ۱/۸ در نظر گرفته شدند.

|   | Label                     | Type    | G | Colour | Suscept | Density | Depth | Active                              | Lock                     | Vis                                 | Reg                      |
|---|---------------------------|---------|---|--------|---------|---------|-------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1 | Serpentinized Peridotite  | polygon | 1 | Yellow | 0.0010  | 2.80    | 106.9 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2 | Chromite                  | polygon | 1 | Blue   | 0.0010  | 4.1     | 98.0  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 | Donite                    | polygon | 1 | Yellow | 0.0010  | 2.60    | 168.3 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4 | Andesite (Volcanice Rock) | polygon | 1 | Green  | 0.0010  | 1.80    | 200.0 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5 | Serpentinized Peridotite1 | polygon | 1 | Yellow | 0.0010  | 2.75    | 40.5  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6 | Chromite1                 | polygon |   | Blue   | 0.0010  | 4.1     | 6.0   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7 | Chromite2                 | polygon | 1 | Blue   | 0.0010  | 4.0     | 20.0  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8 | Donite1                   | polygon | 1 | Yellow | 0.0010  | 2.75    | 42.5  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9 | Gabbro                    | polygon | 1 | Red    | 0.0010  | 2.50    | 79.7  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

شکل ۴-۱۲: مشخصات تعدادی از توده ها در مدل سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا.

این مدل با استفاده از اطلاعات جانبی ساخته شد. جهت انجام مدل سازی معکوس همان گونه که قبلاً اشاره گردید لازم است پارامترهای آزاد جهت مدل سازی انتخاب گردد. برای این پروفیل فاصله به عنوان پارامتر آزاد انتخاب گردید. خطایی که برای این مدل اولیه گزارش شد  $RMS=2.127$  بوده است؛ پس از انتخاب پارامترهای آزاد برای مدل، مدل سازی معکوس انجام گردید. پس از ۱۱ مرحله تکرار مدل سازی به پایان رسیده و مقدار خطا  $RMS=1.15$  گزارش شد (شکل ۴-۱۳). همان طور که در شکل مذکور مشاهده می شود انطباق تا حد زیادی انجام شده است. به علت وجود اطلاعات حفاری و نیز اطلاعات حاصل از روش گرادیان کل نرمال برای تخمین عمق، انتخاب عمق به عنوان پارامتر آزاد خطای زیادی را ایجاد می کرد و با وجود اینکه میزان انطباق بیشتر و خطای گزارش شده کمتر

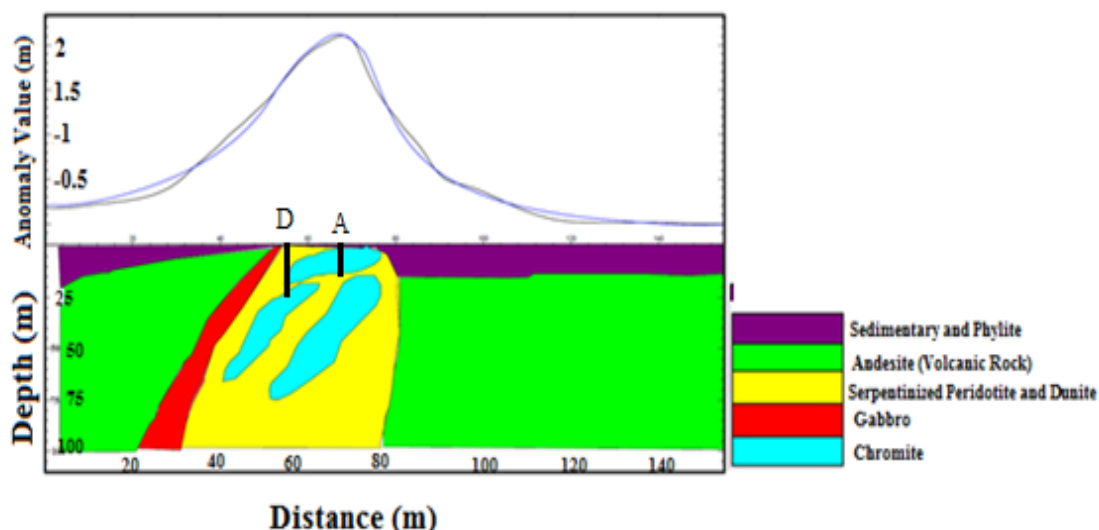
بود اما اطلاعات عمقی مقطع به دست آمده تطابقی با اطلاعات حفاری نداشت. بنابراین از انتخاب این پارامتر به عنوان پارامتر آزاد صرف نظر شد.



شکل ۴-۱۳: مقطع حاصل از مدل سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت زایی کاماگانی کوبا.

#### ب: مدل سازی معکوس آنومالی گرانی روی پروفیل P2:

جهت مدل سازی معکوس این پروفیل مطابق با پروفیل قبل ابتدا، یک مدل اولیه ساخته شد (شکل ۴-۱۴). منحنی آبی رنگ پاسخ مدل در نظر گرفته شده و منحنی سیاه رنگ مربوط به آنومالی گرانی داده های پروفیل است. جهت ساخت مدل اولیه از اطلاعات زمین شناسی، حفاری، نتایج اعمال روش گرادیان کل نرمال و نیز مدل سازی مستقیم انجام شده در نرم افزار WingLink استفاده شد. مدل تطابق قابل قبولی با داده های واقعی را نشان می دهد و این امر موجب گردید مدل سازی معکوس این پروفیل با سرعت و دقت بالاتری انجام شود. همچنین در شکل (۴-۱۵) پارامترهای عمقی و مقادیر چگالی که برای واحدهای مختلف انتخاب گردید، ارائه شده است.



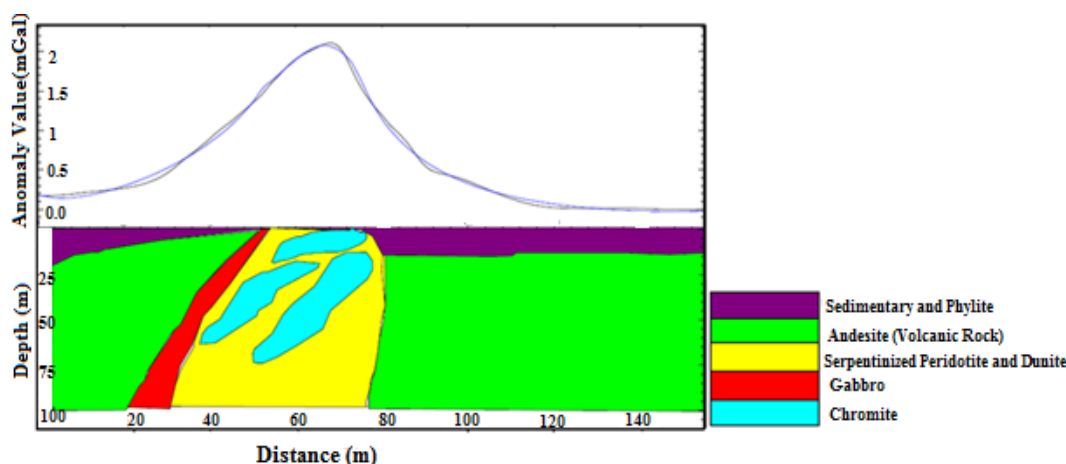
شکل ۴-۱۴: مدل اولیه جهت مدل سازی معکوس پروفیل P2 محدوده کرومیت زایی کوبا در نرم افزار Modelvision.

|   | Label           | Type    | G | Colour | Suscept | Density | Depth | Active                              | Lock                     | Vis                                 | Reg                      |
|---|-----------------|---------|---|--------|---------|---------|-------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1 | andesite        | polygon | 1 |        | 0.0010  | 2.00    | 49.8  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2 | filit           | polygon | 1 |        | 0.0010  | 1.80    | 3.5   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 | serpentinized p | polygon | 1 |        | 0.0010  | 2.75    | 42.6  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4 | gabro           | polygon | 1 |        | 0.0010  | 2.50    | 43.3  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5 | andesite2       | polygon | 1 |        | 0.0010  | 2.00    | 44.6  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6 | filit2          | polygon | 1 |        | 0.0010  | 1.79    | 0.89  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7 | Chromite        | polygon |   |        | 0.0010  | 4.0     | 6.0   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8 | Chromite2       | polygon |   |        | 0.0010  | 4.2     | 10.0  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9 | Chromite1       | polygon | 1 |        | 0.0010  | 4.2     | 37.0  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

شکل ۴-۱۵: مشخصات توده ها جهت مدل سازی معکوس پروفیل P2 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا.

جهت انجام مدل سازی معکوس پارامتر آزاد فواصل بین توده ها انتخاب شد. خطایی که برای این مدل اولیه گزارش شد  $RMS=2.69$  بوده است. پس از انتخاب پارامتر آزاد برای مدل، مدل سازی انجام گردید. پس از ۱۴ مرحله تکرار مدل سازی به پایان رسد. مقدار خطا  $RMS=1.8$  گزارش شد (شکل ۴-۱۶). همان طور که در شکل مذکور مشاهده می شود، انطباق تا حد زیادی انجام شده است. به علت وجود اطلاعات حفاری (پروفیل از محل دو گمانه رسم گردیده است) و نیز اطلاعات حاصل از روش گرادیان کل نرمال برای تخمین عمق، همانند پروفیل P1 از انتخاب این پارامتر به عنوان پارامتر آزاد صرف نظر شد. محل گمانه های A و D بر روی مدل مشخص شده است.



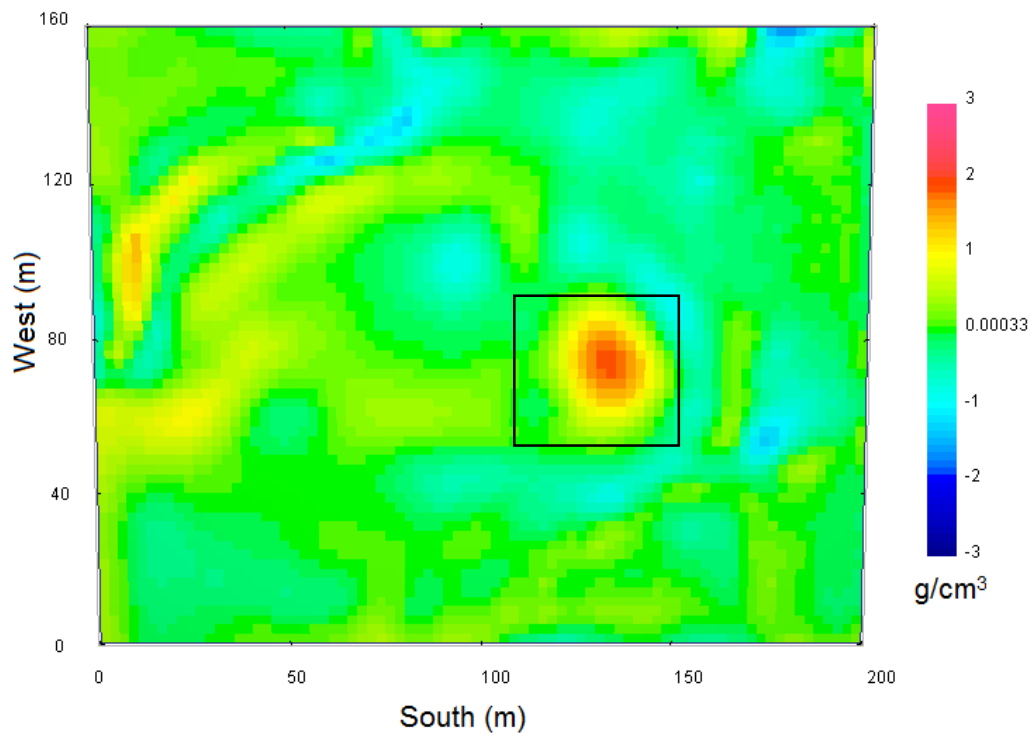


شکل ۴-۱۶: مقطع حاصل از مدل سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت زایی کاماگائی کوبا در نرم افزار Modelvision.

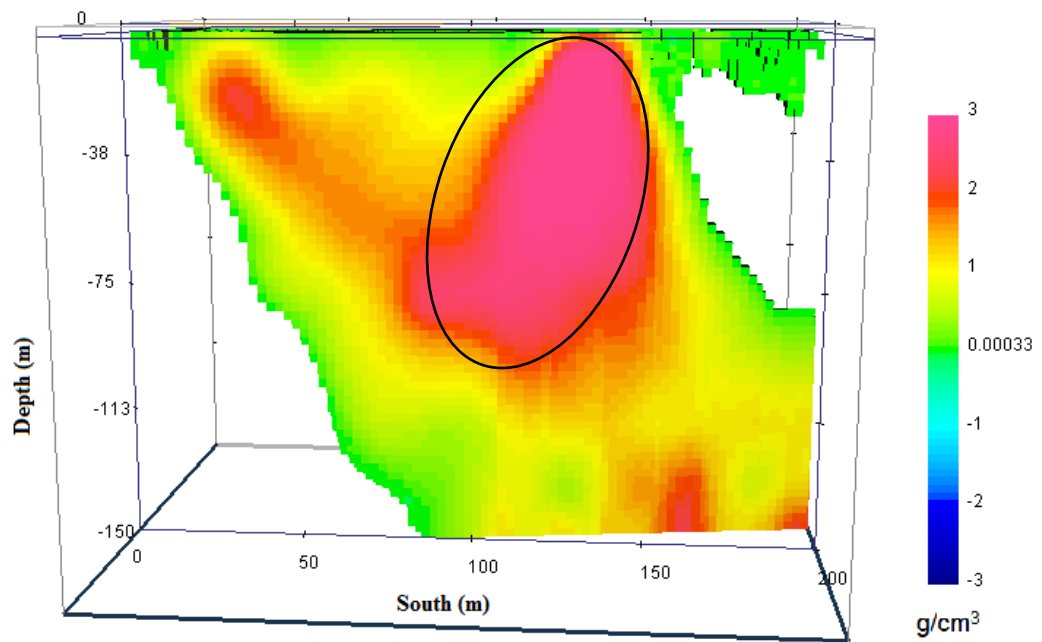
#### ۴-۳-۶ مدل سازی معکوس سه بعدی مقید داده های گرانی کاماگائی کوبا

علاوه بر مدل سازی مستقیم و معکوس داده های گرانی این منطقه، جهت بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی دوبعدی و مدل سازی سه بعدی، مدل سازی معکوس سه بعدی با استفاده از الگوریتم لی - اولدنبرگ (نرم افزار Grav3D) انجام شد. در گام اول مدل سازی بدون اعمال هیچ قید و در حالت پیش فرض انجام گرفت (شکل ۲-۱۷). در مدل به دست آمده، به طور کلی محدوده رخنمون آنومال به طور کلی مشخص شده است. در ادامه، با استناد به اطلاعات زمین شناسی و حفاری، با مقید ساختن فرآیند مدل سازی سعی شد مدل بهتری به دست بیاید. جهت مقایسه نتایج حاصل از مدل - سازی دوبعدی و سه بعدی در محل پروفیل های انتخابی P1 و P2 دو مقطع تهیه گردید (شکل ۴-۱۸ و ۴-۱۹).

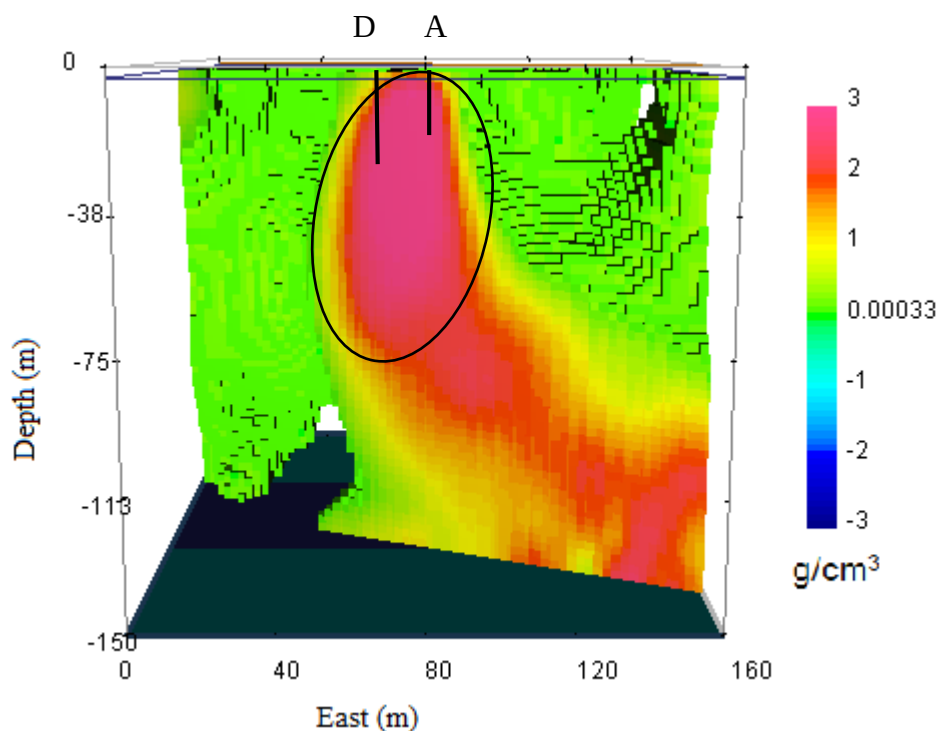
نتایج حاصل از مدل سازی دوبعدی و سه بعدی در محدوده ای که با کادر مشخص شده است. دارای هماهنگی هستند و عمق توده کرومیت را تا حدود ۱۰۰ متری تخمین زده اند. نقاط حفاری که در محدوده پروفیل ۱ وجود دارد، حضور کرومیت را تا عمق حدود ۳۰ متری تأیید می کند که در مدل سازی دوبعدی و سه بعدی این مسئله لحاظ گردیده است. اطراف توده اصلی که تغییرات گرانی بالاتری را نسبت به زمینه نشان می دهد؛ ناشی از حضور پریدوتیت های سرپانتینی و گابروها می باشد.



شکل ۴-۱۷: مقطع حاصل از مدل سازی در حالت پیش فرض.



شکل ۴-۱۸: مقطع حاصل از مدل سازی داده های گرانی در راستای پروفیل P1.



شکل ۴-۱۹: مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های گرانی در راستای پروفیل P2.

محدوده‌ای که با کادر سیاه رنگ مشخص شده است انطباق مناسبی را با نتایج مدل‌سازی دوبعدی نشان می‌دهد. توده اصلی تا عمق حدود ۱۰۰ متری در مدل دوبعدی مدل‌سازی گردید. نتیجه مدل‌سازی سه‌بعدی نشان دهنده ریشه‌دار بودن توده نفوذی تا عمق بیش از ۱۰۰ متر می‌باشد. شیب توده اصلی از شیب رخنمون منطقه که در گزارش زمین‌شناسی این منطقه به آن اشاره شده بود تبعیت می‌کند.

#### ۴-۴ مدل‌سازی داده‌های گرانی محدوده کرومیت شرق سبزوار

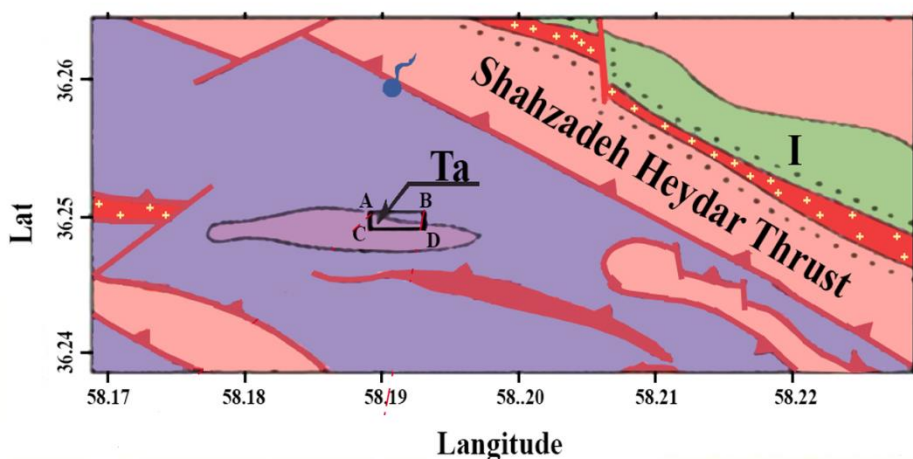
سنگ‌های میزبان کرومیت در ایران از نوع سنگ‌های آذرین غنی از آهن و منیزیم یعنی سنگ‌های اولترابازیک مانند پریدوتیت، سرپانتینیت و پیروکسینیت بوده و ذخایر کرومیت در داخل توده اولترابازیک به شکل عدسی‌های بزرگ و کوچک دیده می‌شود. چنین شرایطی در جنوب شرق تا شرق و شمال شرق ایران (در امتداد زون فیلیش - افیولیت ملانژ بیرجند - ایرانشهر، افیولیت‌های سبزوار، فریمان و تربت حیدریه)، ایران مرکزی (نائین)، زاگرس (شمال نیریز) و جنوب ایران (فاریاب و

اسفندقه) مشاهده می‌شود. توده‌های کرومیت ایران مانند بسیاری از کانسارهای مشابه در دنیا از نوع کانسارهای نامنظم است. تقریباً تمام این کانسارها در ایران در مجموعه‌های افیولیتی و افیولیت - ملانژها واقع شده‌اند و در بخش‌های زیرین سکانس افیولیتی قرار می‌گیرند و از نظر تیپ کانساری مشابه منطقه بالکان و ترکیه می‌باشند. وضع ظاهری نامنظم بوده و شکل لایه‌ای کانسارهای آفریقایی جنوبی در آن‌ها دیده نمی‌شود. ولی در برخی از این کانسارها و معادن (جنوب ایران) نوعی نظم و پیوستگی در توده‌های کرومیت گزارش شده است. بنابراین استفاده از روش‌های اکتشافی مرتبط با ویژگی‌ها و مشخصه‌های فیزیکی و محیطی کرومیت می‌تواند نقش مؤثری در پی‌جویی و شناسایی کانسارهای کرومیت داشته باشد. این تحقیق حاصل کار صحرایی برداشت‌های گرانی سنجی در منطقه شرق سبزوار است.

#### ۴-۴-۱ معرفی منطقه مورد مطالعه

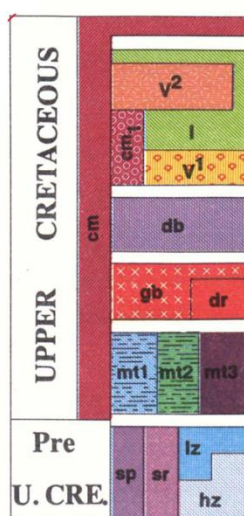
داده‌های گرانی‌سنجی مورد مطالعه، در راستای مطالعات گرانی‌سنجی محدوده کرومیت شرق سبزوار [آقاجانی، ۱۳۹۱] برداشت شده است. پس از دریافت داده‌ها، کلیه مراحل تصحیح و تفکیک و پردازش داده‌های گرانی که در یک شبکه مستطیلی به تعداد ۳۱۸ ایستگاه بود انجام شد. محدوده مورد مطالعه، تقریباً در بخش میانی نقشه یک‌صد هزارم زمین‌شناسی سلطان‌آباد در شرق سبزوار در استان خراسان رضوی واقع می‌شود. قسمتی از نقشه زمین‌شناسی برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان‌آباد، در شکل (۴-۲۰) آورده شده است.

محدوده مورد مطالعه به مساحت ۵ هکتار و به صورت ۴ ضلعی منظم ABCD با ضلع بزرگ ۳۵۰ متر و ضلع کوچک ۱۴۰ متر است که مختصات مندرج در جدول (۴-۲) مختصات رئوس چندضلعی را نشان می‌دهد. تصویر ماهواره‌ای از محدوده مربوطه از گوگل ارث نیز در شکل (۴-۲۱) ارائه شده است.



### OPHIOLITIC COMPLEX

### مجموعه افیولیتی:

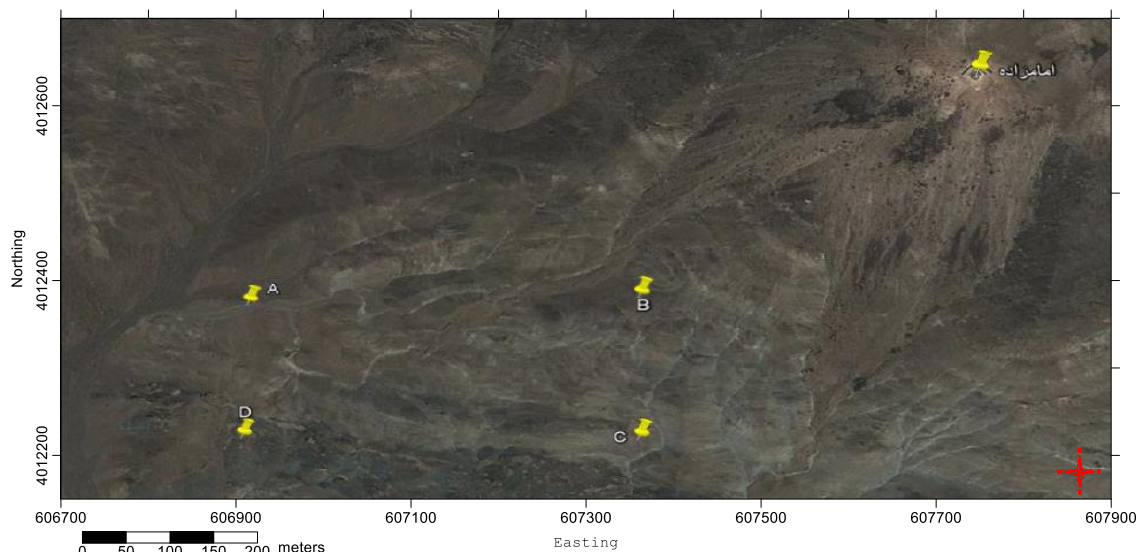


- v<sup>2</sup>**: Basalt, Andesitic basalt, trachyandesite, agglomerate, tuff. بازالت ، بازالت آندزیتی ، تراکی آندزیت، آگلومرا و توف.
- I**: Globotruncana limestone, chert. سنگ آهک گلوبیرو ترو نکانادار، چرت.
- cm**: Colored melange including I and v<sup>1</sup>. آمیزه رنگین شامل واحدهای I و v<sup>1</sup>.
- v<sup>1</sup>**: Basalt, spilite. (Pillow lava) بازالت، اسپیلیت. (گدازه بالشی)
- cm**: Coloured melange (undifferentiated). آمیزه رنگین کامل (غیر قابل تفکیک). دیاباز.
- db**: Diabase. گابرو ، مونزویدوریت
- gb**: Gabbro, monzodiorite, pegmatite gabbro. گابرو پگماتیتوئیدی.
- dr**: Diorite, quartz diorite, granodiorite. دیوریت ، کوآرتز دیوریت ، گرانودیوریت.
- mt1**: Epidote, muscovite, chlorite schist; epidote, tremolite, actinolite schist; marble. اپیدوت، مسکویت شیسست؛ اپیدوت، تره مولیت ، اکتینولیت شیسست؛ مرمر.
- mt2**: Epidote, hornblende schist; garnet, muscovite schist. اپیدوت ، هورنبلند شیسست ؛ گارنت ، مسکویت شیسست.
- mt3**: Glaucophene schist. گلوکوفان شیسست.
- sp**: Serpentinized peridotite. پریدوتیت سرپانتینیتی شده.
- sr**: Serpentinite. سرپانتینیت
- lz**: Lherzolite. لرزولیت
- hz**: Harzburgite. هارزبورژیت

شکل ۴-۲۰: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه [برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان‌آباد].

جدول ۴-۲: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.

| نقطه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی |
|------|---------------|---------------|
| A    | ۶۰۶۸۴۰        | ۴۰۱۲۳۶۰       |
| B    | ۶۰۷۱۹۰        | ۴۰۱۲۳۶۰       |
| C    | ۶۰۷۱۹۰        | ۴۰۱۲۲۲۰       |
| D    | ۶۰۶۸۴۰        | ۴۰۱۲۲۲۰       |



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

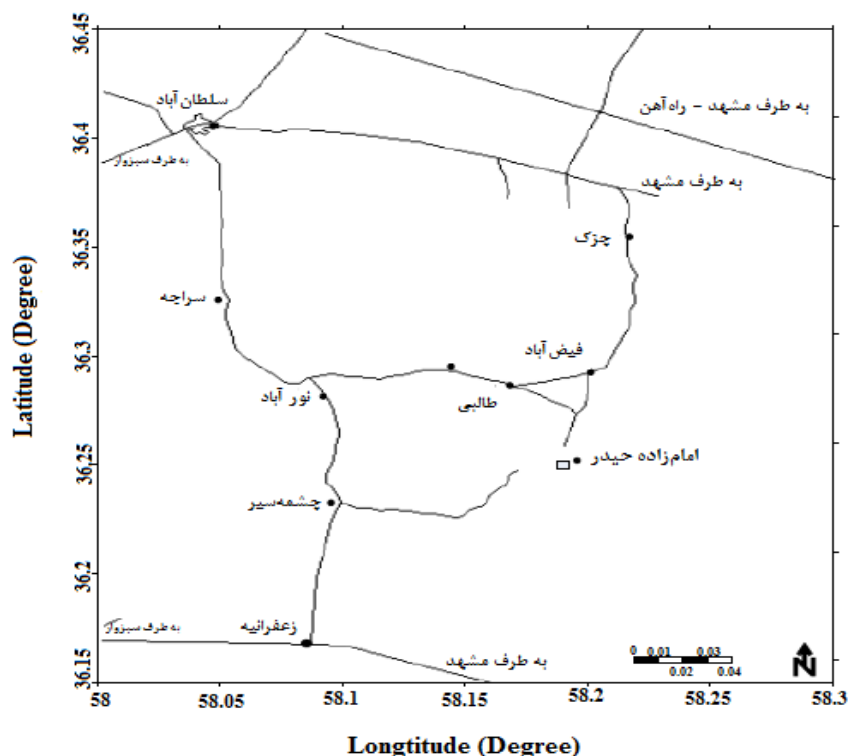
#### ۴-۴-۲ موقعیت جغرافیایی و ژئومورفولوژی منطقه

مهم‌ترین راه‌های ارتباطی این منطقه جاده آسفalte مشهد- سبزوار- تهران و جاده قدیم مشهد - سبزوار و راه آسفalte سلطان‌آباد به اتوبان مشهد- قوچان است.

دسترسی به منطقه مورد مطالعه به دو شکل امکان‌پذیر است. اول از طریق جاده سبزوار - نیشابور حدود ۳۵ کیلومتر حرکت کرده و پس از رسیدن به روستای زعفرانیه به سمت شمال تغییر مسیر داده و از طریق یک جاده خاکی به مسافت ۸ کیلومتر به روستای چشمه‌سیر رسید. از روستای چشمه‌سیر با طی مسیر نامناسب و جاده درون رودخانه‌ای پر پیچ و خم و سنگلاخی با باغاتی در اطراف آن به محدوده اکتشافی نزدیک شده و پس از طی بیش از یک ساعت پیاده‌روی وارد محدوده برداشت داده‌های گرانی (محدوده اکتشافی) می‌شود. از این طریق به محدوده غربی کار وارد شده و تا پای کوه امامزاده حیدر در شرق ادامه دارد.

راه دیگر دسترسی به منطقه استفاده از دشت شمال رشته‌کوه‌ها یعنی دشت وسیع سلطان‌آباد می‌باشد. به این ترتیب که پس از حرکت از شهر سبزوار به طرف قوچان و طی ۴۰ کیلومتر به شهر سلطان‌آباد رسیده و آن‌جا تغییر مسیر به سمت شرق و طی حدود ۱۹ کیلومتر در راستای جاده آسفalte نیشابور ادامه مسیر داده و پس از عبور از روستای چزک و فیض‌آباد به دامنه شمالی کوه امام-

زاده حیدر و محل تفریحگاهی در پای کوه رسیده که حدوداً از سلطان آباد به طالبی از طریق راه آسفالت به مسافت ۲۰ کیلومتر و از طالبی به محل تفریحگاه پای کوه امامزاده حیدر حدود ۷ کیلومتر و خاکی می باشد.



شکل ۴-۲: راههای دسترسی به منطقه مورد مطالعه [آجانی، ۱۳۹۱].

#### ۳-۴-۴ زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

افیولیت زون سبزوار در شمار افیولیت های نوار حلقوی پیرامون خرد قاره مرکز و خاور ایران است. رویداد بازشدگی و زایشی اقیانوس باریک حاشیه خرد قاره در دوره ژوراسیک رخ داده است و در روند مزوزوئیک این قاره یک چرخش خلاف عقربه های ساعت داشته است. در کرتاسه حرکت کردن ورقه عربستان به سوی شمال خاور به بسته شدن این اقیانوس انجامیده و افیولیت های کنار شمال خاور این خرد قاره بر روی پوسته قاره ای جایگزین شده اند. فرو رانش لیتوسفر اقیانوسی به سوی شمال خاور رخ داده است. در روند این رخداد، بخشی از لیتوسفر اقیانوسی در پیکره ورقه سرپانتینی شده برجای مانده ای از واحدهای رانده شده با مرز خرد شده و برشی را می توان مشاهده کرد. مجموعه

افیولیتی در محدوده مورد نظر دگرگونی ندارد. واحدهای تشکیل دهنده افیولیت، همان بخش‌های ستون افیولیتی هستند، که دچار درهم ریختگی شده و توالی و ترتیب اولیه خود را از دست داده‌اند و در مواردی حتی به پیکر آمیزه‌های رنگین در آمده‌اند. سنگ‌های پریدوتیتی سالم و بخش‌های سرپانتینیته شده آن‌ها قدیمی‌ترین بخش‌های ردیف افیولیتی هستند [ Stocklin, 1974 ].



شکل ۴-۲۳: واحدهای سنگی اولترابازیکی (مجموعه افیولیتی) که در بیشتر موارد به سرپانتین تبدیل شده است.

### پریدوتیت سرپانتینی شده

این واحد با گسترش زیاد، از پریدوتیت (شامل هارزبورژیت و لرزولیت) سرپانتینی شده و به شدت تکتونیزه سبز رنگ تشکیل شده است. به دلیل درهم ریختگی شدید حاصل از سازوکارهای تکتونیکی، جدا نمودن بخش‌های سرپانتینیته شده در پیکر هارزبورژیت سرپانتینی و لرزولیت سرپانتینیته شده در مقیاس مورد نظر امکان‌پذیر نیست.

### هارزبورژیت

این واحد بخش‌های به نسبت سالم پریدوتیتی به رنگ سیاه و سبز تیره است که درون واحد sp جای دارد. کانی کرومیت، بیشتر در این بخش جای دارد. مطالعات سنگ‌شناسی نشان می‌دهد، کانی‌های اصلی شامل الیوین و ارتوپیروکسن بوده که با مقادیری کرومیت و اسپینل به عنوان کانی‌های فرعی همراه هستند، کانی ثانوی عمده در این سنگ‌ها سرپانتین است.



## لرزولیت

این واحد با رنگ سیاه و سبز خیلی تیره در داخل واحد sp قرار دارد. مطالعات نشان می‌دهد، کانی‌های اصلی این سنگ الیوین و کلینوپیروکسن به همراه کرومیت و اسپینل به عنوان کانی‌های فرعی است. میزان سرپانتینی شدن در آن‌ها محدود است و در بیشتر موارد این پدیده را در راستای شکستگی‌های پدید آمده در دانه‌های الیوین می‌توان دید.

## سرپانتینیت

این واحد در بخش‌های با رنگ سبز روشن در درون واحد sp دیده می‌شود. این واحد بخش‌های به شدت سرپانتینی شده پریدوتیت‌ها هستند، به گونه‌ای که تقریباً همه سنگ از سرپانتین تشکیل شده است. سرپانتینیت‌ها گاه با افی کلسیت (سنگی متشکل از قطعات افیولیتی در خمیره‌ای آهکی) همراه هستند. بخشی از سرپانتینیت‌ها همراه با سنگ‌های دگرگونی سلطان‌آباد هستند که هم به صورت توده‌ای و هم جهت یافته وجود دارند. از نشانه‌های معدنی می‌توان حضور تالک درون بخش‌های به شدت سرپانتینی شده پریدوتیتی و منیزیت را اشاره نمود (شکل ۴-۲۴).



شکل ۴-۲۴: آثار کانی‌زایی کرومیت و منیزیت، در واحدهای سنگی اولترابازیکی سرپانتینی شده.

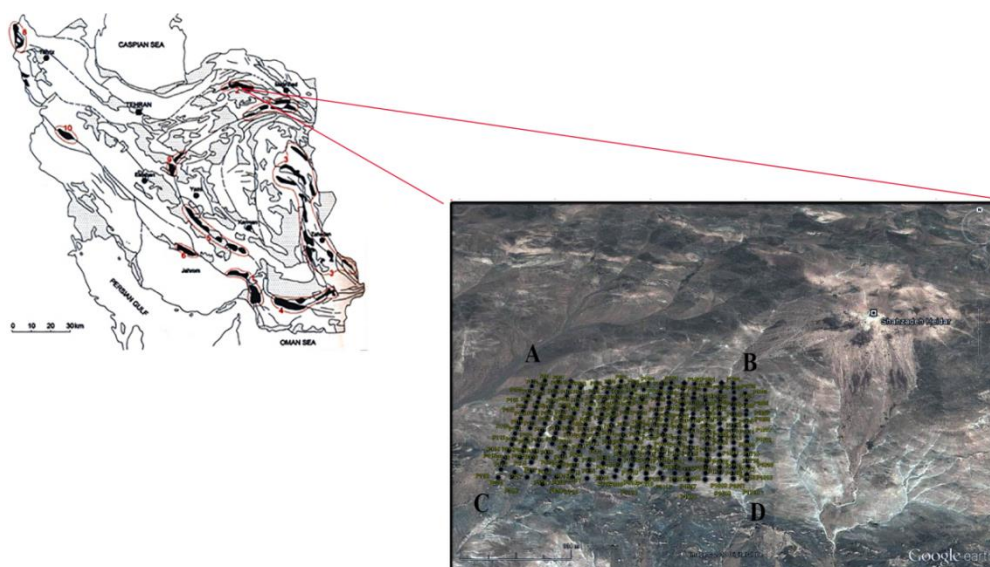
## گابرو

این واحد با رنگ خاکستری روشن تا تیره از سنگ‌های گابرو، مونزودیوریت (بخش تفریق یافته‌تر ماگمای گابرویی)، دیوریتی گابرو و همچنین گابروی پگماتیتوئیدی تشکیل شده است. بزرگ‌ترین توده گابرویی منطقه را در جنوب غرب روستای نورآباد در بخش کوه پیر می‌توان مشاهده نمود.

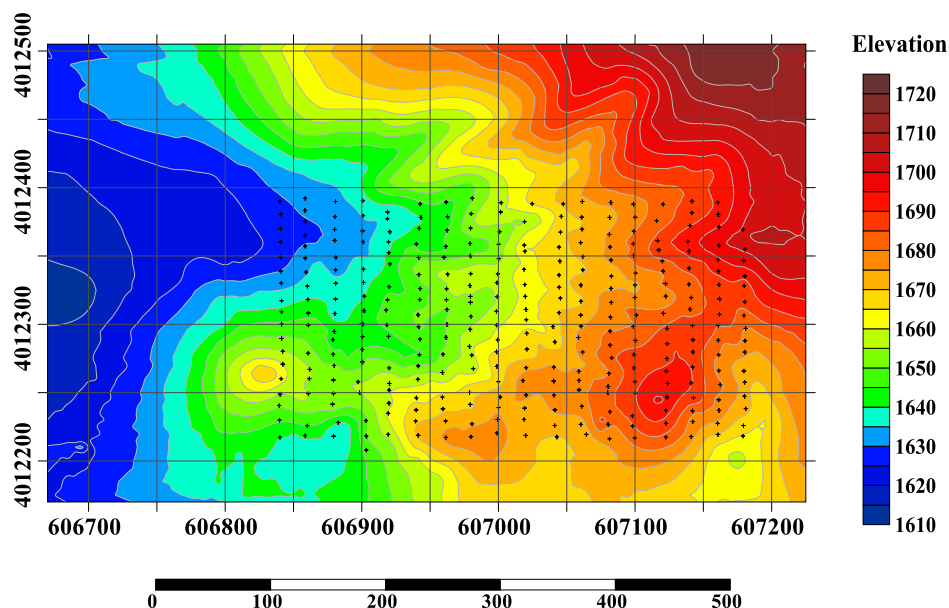
## ۴-۵ روش کار در گرانی‌سنجی

به منظور انجام عملیات گرانی‌سنجی در یک ناحیه، اولین گام مشخص کردن شبکه برداشت می‌باشد، به این صورت که هر گره نمایان گر یک ایستگاه اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. ساختار شبکه برداشت شامل نقاط اندازه‌گیری و فواصل پروفیل‌ها به نوع کاوش وابسته است.

در منطقه مورد بررسی پس از انتقال نقطه مبنایی گرانی و تعیین نقاط ایستگاهی از چهارگوش مبنا، ایستگاه‌های برداشت گرانی با یک دستگاه GPS گارمین پیاده‌سازی شده (شکل ۴-۲۵) و بعد از آن مختصات و ارتفاع کلیه نقاط ایستگاهی و نقاط عارضه‌ای برای تهیه مختصات دقیق نقاط ایستگاهی و نقشه توپوگرافی با یک دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن نقشه‌برداری و محاسبه شد (شکل ۴-۲۶).



شکل ۴-۲۵: محل شبکه برداشت در محدوده مورد مطالعه [آقاجانی، ۱۳۹۱].



شکل ۴-۲۶: عملیات نقشه‌برداری، شبکه برداشت داده‌های گرانی با فواصل  $20 \times 20$  روی نقشه توپوگرافی محدوده.

در برداشت‌های گرانی‌سنجی، علاوه بر ایستگاه‌های اندازه‌گیری، تعدادی ایستگاه مبنا، بایستی انتخاب شود و پس از هر، یک الی دو ساعت اندازه‌گیری، بایستی دستگاه به این نقاط انتقال داده شده و مقدار گرانی در آن اندازه‌گیری شود. علت این کار آن است که فنر دستگاه‌های گرانی‌سنجی نسبت به دمای روزانه و حرکت حساس است و تصحیح رانه ضروری است.

داده‌های گرانی‌سنجی این محدوده به وسیله دستگاه گرانی‌سنج CG5، ساخت شرکت سینترکس کانادا برداشت شده است. برداشت‌ها به صورت ۱۸ خط برداشت به فاصله ۲۰ متری و ایستگاه‌های اندازه‌گیری ۱۰ متری، انجام گرفته است. از آن جایی که دستگاه‌های اندازه‌گیری مانند CG-5 گرانی نسبی را اندازه‌گیری می‌کنند، لذا برای مقدار قرائت‌ها و تعیین گرانی مطلق ایستگاه‌های فرعی لازم است از ایستگاه‌هایی که میزان شتاب جاذبه آن‌ها توسط سازمان نقشه‌برداری تعیین شده است، استفاده و گرانی مطلق نقاط ایستگاهی را به دست آورد.

به منظور این کار در محدوده مورد مطالعه با بررسی اندکس نقشه نقاط گرانی‌سنجی ایستگاهی سازمان نقشه‌برداری کشور نقطه ۲۵۲۹ در نزدیکی محدوده اکتشافی تعیین گردید و اطلاعات مبنایی

آن از سازمان نقشه‌برداری خریداری شد. نقطه مذکور در حوالی جنوب شرق شهر سلطان‌آباد و در جنوب روستای چزگ و در شمال روستای فیض‌آباد بوده است [ آقاجانی و همکاران، ۱۳۹۱ ].

مختصات نقطه مبنایی و اطلاعات گرانی‌سنجی این نقطه به شرح زیر است:

جدول ۳-۴: مختصات نقطه مبنایی ۲۵۲۹ [تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری کشور].

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| عرض جغرافیایی (شمالی)       | 36°18'42.5934" |
| طول جغرافیایی (شرقی)        | 58°13'8.99454" |
| ارتفاع نقطه - متر           | 1534.6329      |
| مقدار گرانی مطلق (میلی‌گال) | 979426.7564    |



شکل ۴-۲۷: محل ایستگاه کمکی برای انتقال اطلاعات نقطه مبنای به محدوده اکتشافی از ایستگاه ۲۵۲۹.

#### ۴-۶ پیش‌پردازش یا تصحیح داده‌های گرانی‌سنجی

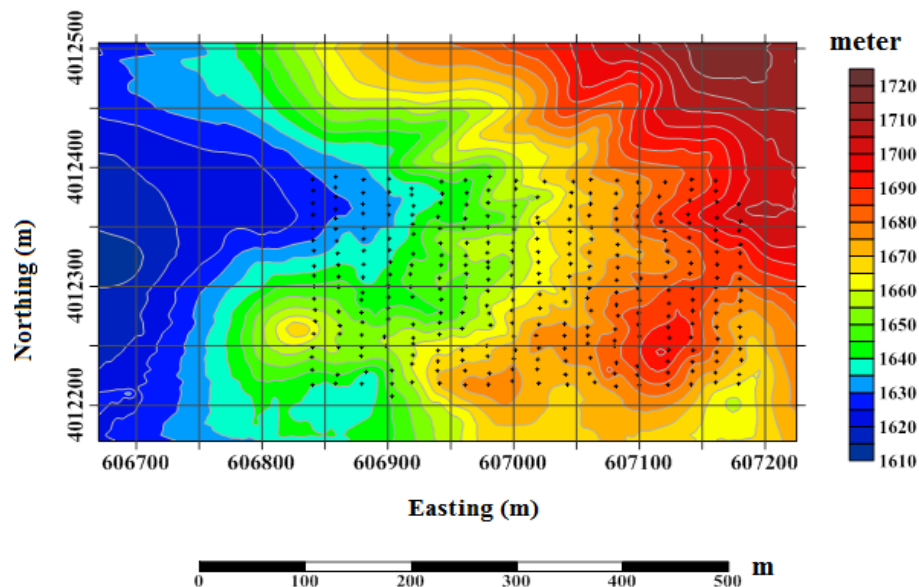
برای تفکیک مقدار آنومالی گرانی ناشی از تغییرات دانسیته از اثرات ناحیه‌ای، لازم است بر روی داده‌های گرانی‌سنجی برداشت شده تصحیحاتی اعمال گردد تا داده‌ها جهت پردازش و تفسیر آماده شوند. با توجه به توضیحات و روش‌هایی که در فصل دوم به تفصیل بیان شد، بر روی داده‌های خام برداشت شده در منطقه سبزوار، تصحیحات عرض جغرافیایی، دریفت، هوای آزاد و بوگه اعمال گردید و نقشه آنومالی بوگه این منطقه تهیه گردید. در جدول (۴-۴) بخشی از داده‌ها و تصحیحات انجام گرفته بر روی آن‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۴-۴: بخشی از داده‌های برداشتی و نتیجه انجام تصحیحات بر روی آن‌ها برای دست آمدن مقادیر آنومالی بوگه.

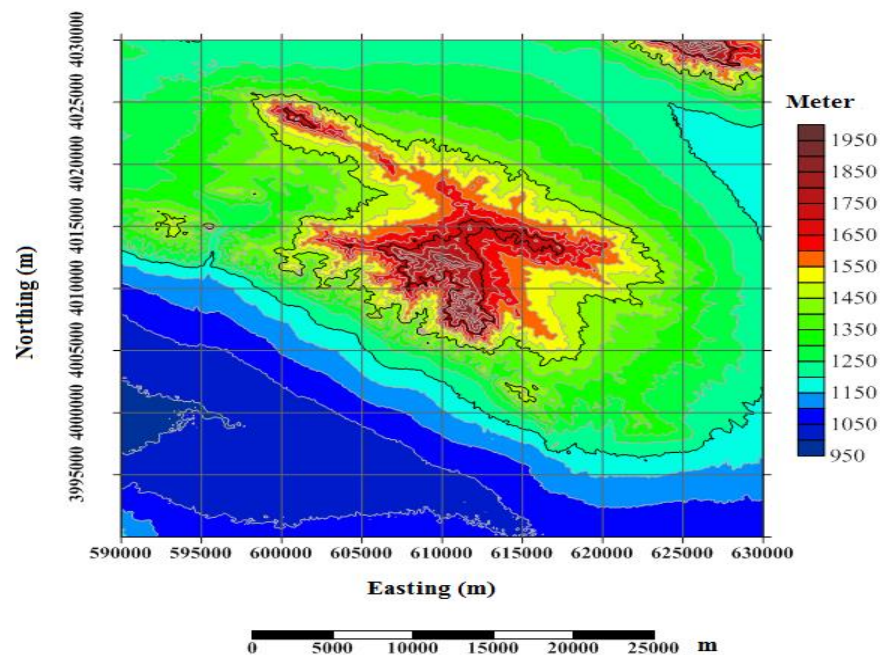
| Station | Xcoord     | YCoord      | Elevation | Drift Corrected | dg     | Absolute Gravity | Normal     | Obs-Normal | Delta (free air) | Delta Bouger | Bouger Anomaly |
|---------|------------|-------------|-----------|-----------------|--------|------------------|------------|------------|------------------|--------------|----------------|
| P101    | 606840.000 | 4012390.000 | 1629.000  | 4913.105        | 0.000  | 979397.775       | 979840.663 | -442.888   | 502.710          | 211.591      | -151.769       |
| P102    | 606840.708 | 4012380.558 | 1628.375  | 4913.273        | 0.168  | 979397.943       | 979840.656 | -442.712   | 502.517          | 211.510      | -151.698       |
| P103    | 606840.429 | 4012370.051 | 1627.259  | 4913.904        | 0.799  | 979398.574       | 979840.647 | -442.073   | 502.172          | 211.365      | -151.250       |
| P104    | 606840.568 | 4012360.237 | 1626.829  | 4913.595        | 0.490  | 979398.264       | 979840.640 | -442.375   | 502.040          | 211.310      | -151.621       |
| P105    | 606840.555 | 4012349.274 | 1627.554  | 4913.413        | 0.308  | 979398.083       | 979840.631 | -442.548   | 502.263          | 211.403      | -151.656       |
| P106    | 606840.699 | 4012338.880 | 1630.071  | 4912.914        | -0.191 | 979397.584       | 979840.623 | -443.039   | 503.040          | 211.730      | -151.690       |
| P107    | 606841.060 | 4012330.105 | 1632.997  | 4912.336        | -0.769 | 979397.006       | 979840.616 | -443.610   | 503.943          | 212.110      | -151.731       |
| P108    | 606841.248 | 4012317.255 | 1638.202  | 4911.190        | -1.915 | 979395.860       | 979840.606 | -444.747   | 505.550          | 212.786      | -151.927       |
| P109    | 606841.295 | 4012309.119 | 1641.049  | 4910.598        | -2.507 | 979395.268       | 979840.600 | -445.332   | 506.428          | 213.156      | -151.100       |
| P110    | 606841.270 | 4012300.051 | 1645.859  | 4909.403        | -3.702 | 979394.073       | 979840.593 | -446.520   | 507.912          | 213.781      | -152.319       |
| P111    | 606841.321 | 4012289.631 | 1650.874  | 4908.371        | -4.734 | 979393.041       | 979840.585 | -447.544   | 509.460          | 214.432      | -152.438       |
| P112    | 606842.106 | 4012280.229 | 1655.238  | 4907.279        | -5.826 | 979391.949       | 979840.578 | -448.629   | 510.810          | 214.100      | -152.736       |
| P113    | 606842.144 | 4012270.863 | 1659.939  | 4906.075        | -7.030 | 979390.745       | 979840.570 | -449.825   | 512.257          | 215.610      | -153.085       |
| P114    | 606841.013 | 4012260.182 | 1661.748  | 4905.618        | -7.487 | 979390.287       | 979840.562 | -450.275   | 512.815          | 215.844      | -153.202       |
| P115    | 606840.133 | 4012248.882 | 1654.748  | 4907.417        | -5.688 | 979392.087       | 979840.553 | -448.466   | 510.655          | 214.940      | -152.636       |
| P116    | 606839.530 | 4012240.619 | 1650.430  | 4908.528        | -4.577 | 979393.197       | 979840.547 | -447.349   | 509.323          | 214.374      | -152.284       |
| P117    | 606839.771 | 4012229.860 | 1645.713  | 4909.534        | -3.571 | 979394.204       | 979840.538 | -446.335   | 507.867          | 213.762      | -152.104       |
| P118    | 606840.108 | 4012217.246 | 1639.430  | 4910.637        | -2.468 | 979395.307       | 979840.529 | -445.221   | 505.928          | 212.946      | -152.104       |
| P218    | 606858.434 | 4012218.568 | 1641.147  | 4910.503        | -2.602 | 979395.173       | 979840.529 | -445.356   | 506.458          | 213.169      | -151.933       |
| P217    | 606860.133 | 4012225.787 | 1645.383  | 4908.347        | -4.758 | 979393.017       | 979840.535 | -447.518   | 507.765          | 213.719      | -153.344       |
| P215    | 606860.867 | 4012249.275 | 1654.864  | 4907.560        | -5.545 | 979392.230       | 979840.553 | -448.323   | 510.691          | 214.950      | -152.472       |
| P214    | 606861.574 | 4012260.265 | 1655.057  | 4907.598        | -5.507 | 979392.268       | 979840.562 | -448.294   | 510.751          | 214.9754     | -152.41766     |
| P213    | 606861.795 | 4012267.015 | 1654.889  | 4907.598        | -5.507 | 979392.268       | 979840.567 | -448.299   | 510.699          | 214.954      | -152.458       |



پس از اعمال تصحیحات فوق لازم است تا اثر نامطلوب توپوگرافی از روی داده‌ها برداشت شود، لذا تصحیح توپوگرافی بر روی داده‌ها اعمال گردید. لازم است که از نقشه‌های توپوگرافی برای مناطق نزدیک (شکل ۴-۲۸) و مناطق دور (شکل ۴-۲۹) استفاده شود. برای تهیه نقشه زون دور از داده‌های مدل ارتفاعی رقومی SRTM استفاده شده است.

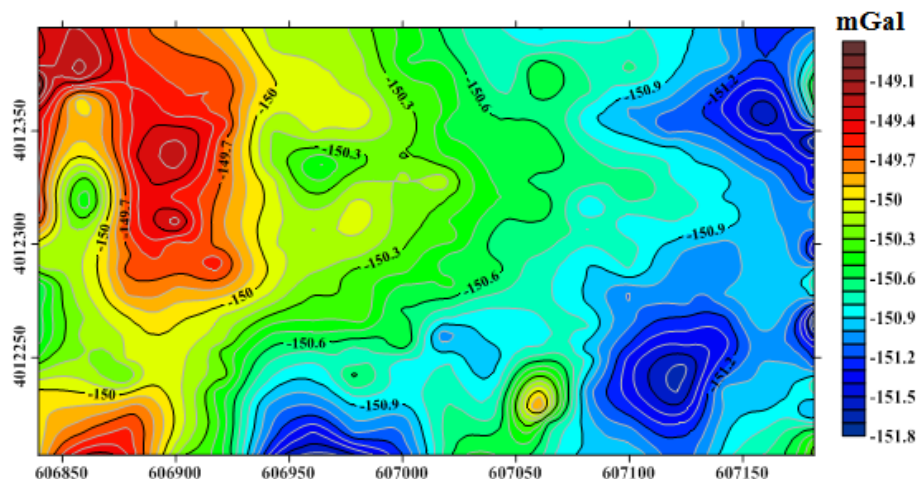


شکل ۴-۲۸: نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری گرانی‌سنجی (زون نزدیک).

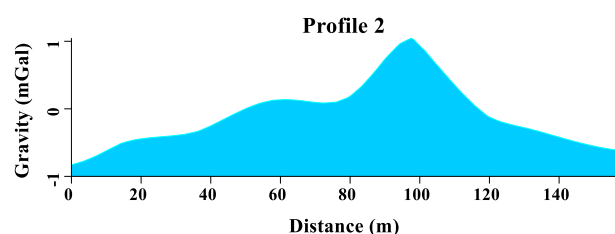
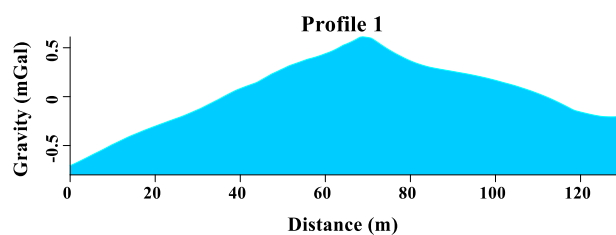
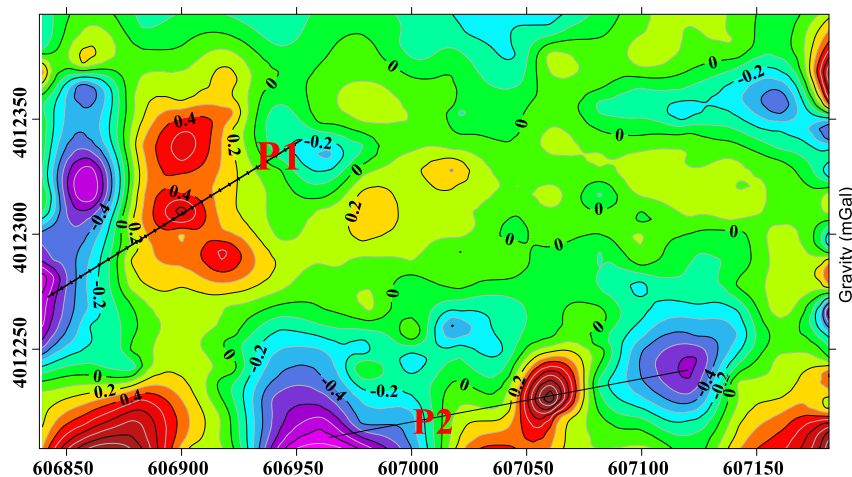


شکل ۴-۲۹: نقشه توپوگرافی منطقه اطراف محدوده مورد بررسی برای تصحیح اثر زون دور توپوگرافی.

پس انجام تصحیح توپوگرافی در نرم افزار Oasis Montaj نقشه بوگه کامل محدوده مورد بررسی نیز رسم گردید (شکل ۴-۳۰). در نقشه مذکور یک روند تغییر مقدار آنومالی گرانی از سمت شرق به غرب کاملاً مشهود است، به طوری که در بخش شرقی محدوده مقادیر گرانی با روند شمالی - جنوبی کاهشی بوده و با عبور از مرکز محدوده مقادیر زیاد می شود به گونه ای که در غرب کاملاً مقادیر مثبت آنومالی گرانی نشان دهنده محدوده احتمالی مرتبط با اختلاف چگالی موجود در منطقه و یا کانی زایی باشد. این نقشه با روند منطقی توپوگرافی هم خوانی زیادی دارد، به طوری که در بخش های مرتفع در شرق ناحیه آنومالی گرانی کم می باشد. آنومالی های با مقدار کم احتمالاً ناشی از تأثیرات سطحی و اجسام آنومال نزدیک سطح می باشد. همان طور که می دانیم، مهم ترین پارامتر در روش های میدان پتانسیل حذف اثرات ناحیه ای از آنومالی های کم عمق که مبین تأثیرات سطحی ناشی از اثرات ساختمانی موجود در منطقه است می باشد [Robinson & Coruh, 1988]. به منظور حذف آنومالی های ناحیه ای و به دست آوردن نقشه آنومالی باقیمانده، بر روی داده ها روند سطح زده شد. اعمال فیلتر روند سطح درجات ۱ تا ۶ بر روی داده ها در نرم افزار Winglink انجام شد. پس از بررسی نتایج حاصل از بکارگیری فیلترهای درجه های مختلف و به دلیل عدم تغییر زیاد در روند داده ها، چند جمله ای درجه دوم در نظر گرفته شده و نقشه آنومالی باقیمانده آن به دست آمد (شکل ۴-۳۱). گام بعد انتخاب نواحی امیدبخش که احتمال وجود کانی سازی در آن ها زیاد می باشد، است. با توجه به اختلاف چگالی مثبت، بین کرومیت و سنگ های میزبان، محدوده بیشینه در نقشه آنومالی گرانی باقیمانده، به عنوان منطقه امیدبخش در نظر گرفته شد. به منظور بررسی وضعیت عمقی ماده معدنی و مدل سازی، دو پروفیل مجزا در بخش های آنومال انتخاب گردید (شکل ۴-۳۱).



شکل ۳۰-۴: نقشه آنومالی بوگه کامل داده‌های گرانی منطقه کرومیت‌زایی سبزوار (مقدار گرانی بر حسب میلی‌گال).



شکل ۳۱-۴: نقشه آنومالی باقی‌مانده گرانی از محدوده کرومیت‌زایی شرق سبزوار - مقدار گرانی بر حسب میلی‌گال.  
محل دو پروفیل با حروف P1 و P2 مشاهده می‌شود.

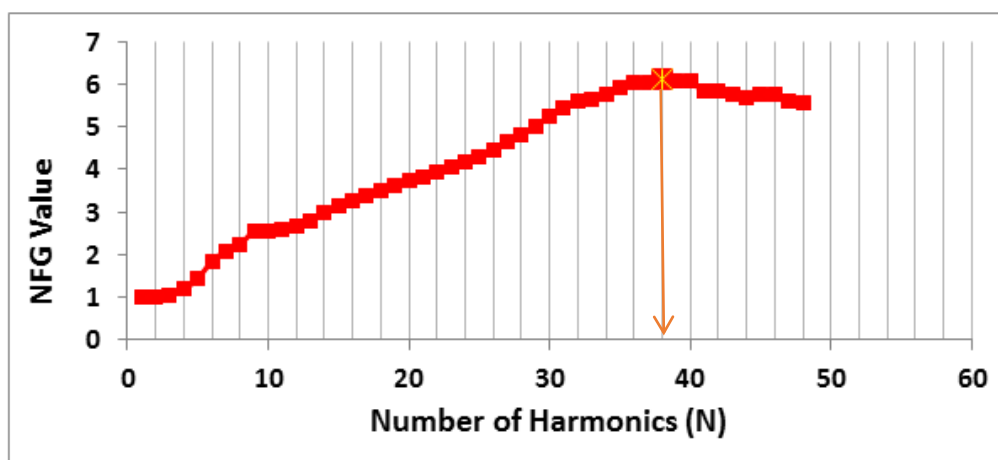


## ۷-۴ تخمین گسترش افقی و عمقی آنومالی‌های گرانی با استفاده از روش

### گرادیان کل نرمال شده

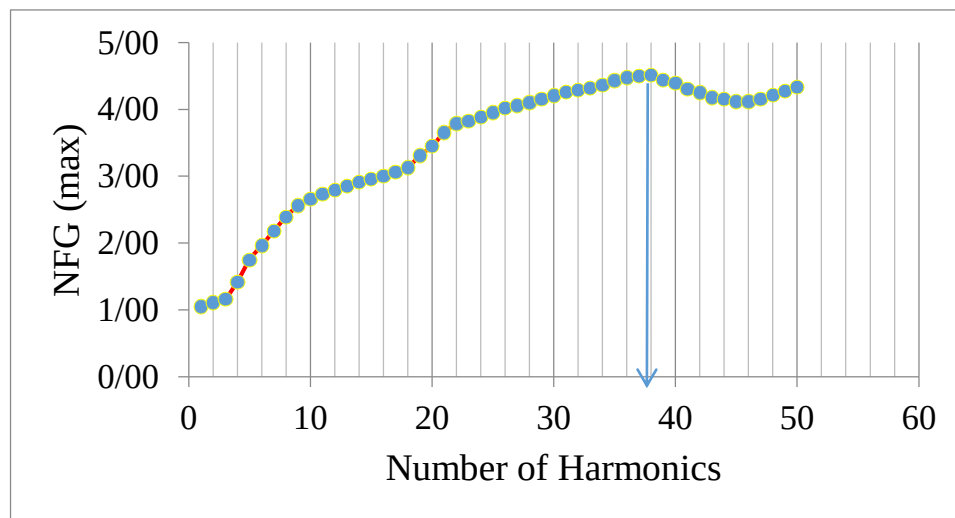
به منظور مدل‌سازی داده‌های واقعی به علت پیچیدگی ساختارهای زمین‌شناسی همواره بایستی از اطلاعات جانبی مانند اطلاعات حفاری، زمین‌شناسی، سایر روش‌های ژئوفیزیکی و یا روش‌ها تخمین عمق استفاده کرد تا بتوان مدل دقیق‌تری را محاسبه نمود. در محدوده اکتشافی با توجه به اینکه حفاری مغزه‌گیری و اطلاع دقیق جهت عمق وجود ندارد، لذا جهت مقیدسازی و افزایش دقت در روند مدل‌سازی، از اطلاعات حفاری پودری، اطلاعات صحرایی زمین‌شناسی و نتایج حاصل از پردازش و تفسیر داده‌های گرانی به روش گرادیان کل نرمال استفاده شد.

جهت اعمال روش NFG بر روی داده‌های مربوط به هر پروفیل ابتدا با استفاده از دستور CFTool و یک ماتریس داده به فواصل ۵ متری منظم‌سازی شد و در نهایت داده‌ها با فرمت داده، در محیط Matlab فراخوانی گردید. پس از آن جهت انتخاب تعداد بهینه جملات هارمونیک، مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال برای تعیین جملات هارمونیک مختلف N محاسبه گردید. شکل (۴-۳۲) و شکل (۴-۳۳) به ترتیب نمودار تغییرات گرادیان کل نرمال بر حسب تعداد جملات هارمونیک N را برای پروفیل‌های P1 و P2 نشان می‌دهند.



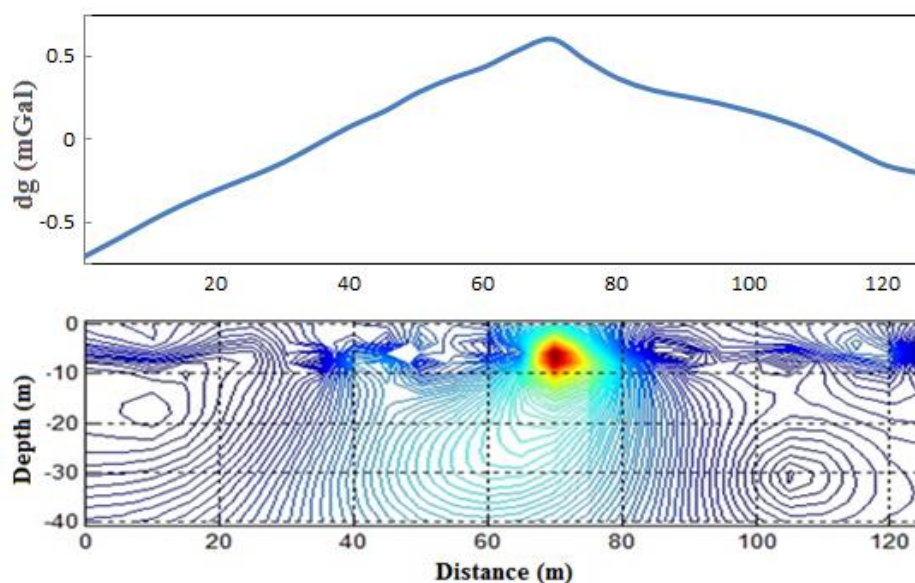
شکل ۴-۳۲: تعیین تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه نسبی (پروفیل P1).

مطابق شکل‌های (۴-۳۲) و (۴-۳۳)، مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه نسبی ۳۸ تعیین گردید. مطابق دو شکل، به نظر می‌رسد توده آنومال در محل پروفیل یک روند تغییری کم دارد، ولی در پروفیل دو این موضوع متفاوت بوده و احتمالاً ناشی از تغییرات شکل توده در عمق زیاد خواهد بود.



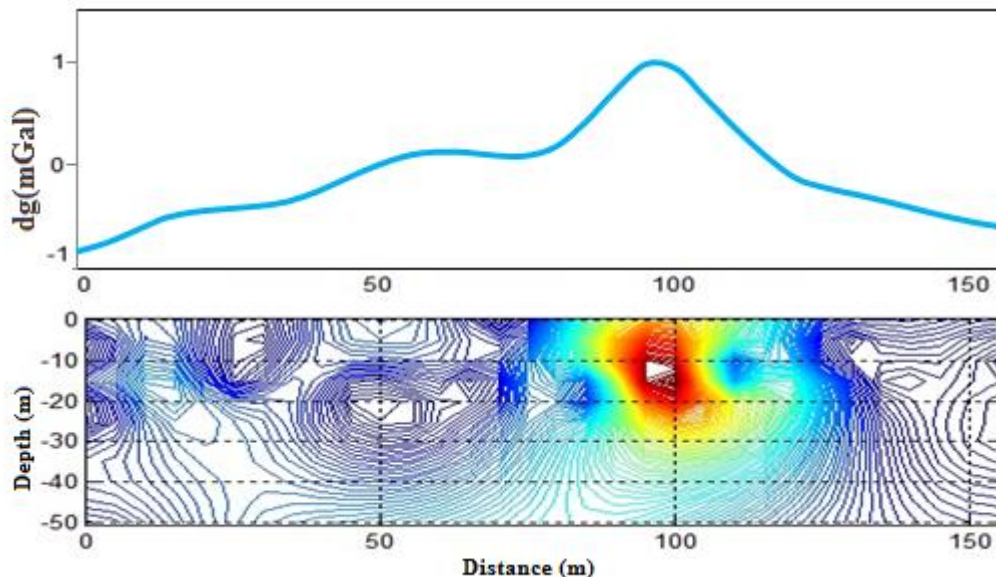
شکل ۴-۳۳: تعیین تعداد جملات هارمونیک به روش بیشینه نسبی (پروفیل P2).

پس از تعیین تعداد جملات هارمونیک بهینه، گرادیان کل نرمال برای دو پروفیل محاسبه و مقطع حاصل از آن رسم گردید (شکل ۴-۳۴ و ۴-۳۵).



شکل ۴-۳۴: گسترش افقی و عمقی آنومالی گرانی به روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی در محل پروفیل P1.

بر اساس مقطع حاصل از محاسبه گرادیان کل نرمال برای پروفیل اول، گستره عمقی ۳ تا ۳۵ متری برای این توده برآورد می‌شود، به طوری که تمرکز عمق سطحی آن در حدود ۷ متری می‌باشد.



شکل ۴-۳۵: گسترش افقی و عمقی آنومالی گرانی به روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی روی پروفیل P2.

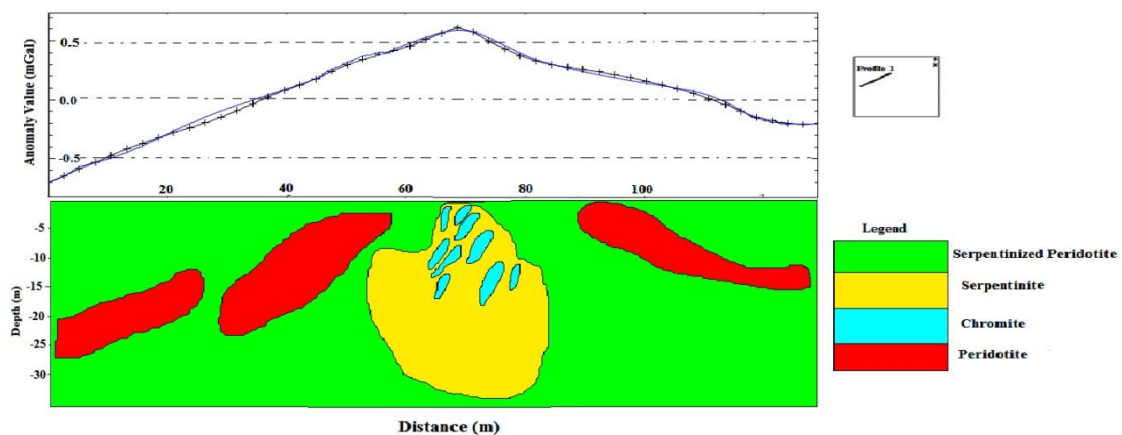
مقطع گرادیان کل نرمال برای پروفیل ۲ نشان می‌دهد که توده معدنی دارای گسترش از عمق حدود ۴ تا عمق ۴۰ متری می‌باشد و تمرکز ماده معدنی در محدوده عمقی ۱۰ الی ۱۵ متری و در حدود فاصله ۸۰ تا ۱۲۰ متری پروفیل می‌باشد. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از این قسمت به مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌ها پرداخته شد.

#### ۴-۸ مدل‌سازی مستقیم داده‌های گرانی محدوده اکتشافی مورد مطالعه در راستای پروفیل‌های مذکور

##### الف: پروفیل P1

مدل‌سازی دوبعدی با استفاده از اطلاعات صحرایی و اطلاعات به دست آمده از NFG در نرم‌افزار وینگ‌لینک انجام شد (شکل ۴-۳۶). همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق مناسبی بین آنومالی گرانی و آنومالی حاصل از مدل‌سازی به دست آمده است. البته انطباق کامل نیز شرایط ایده‌آلی نمی‌باشد و

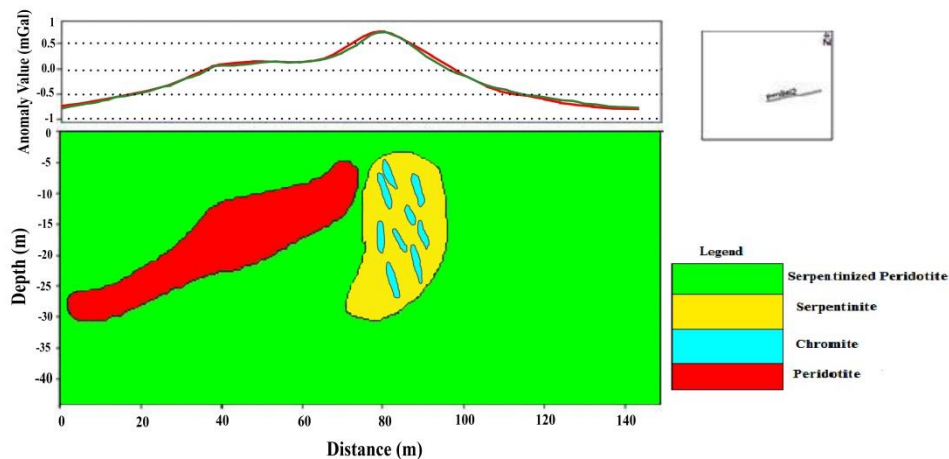
در واقع درست بودن مدل و مدل سازی را تضمین نمی کند، چرا که هرچقدر هم که داده های واقعی به خوبی برداشت شده باشند اما همواره نویز در داده ها وجود دارد و انطباق کامل یعنی مدل کردن آنومالی و نویزها باهم و این اشکال کار روش های مدل سازی است و به میزان زیادی بستگی به مفسر دارد. جهت تعیین کشیدگی و شکل توده های معدنی از نتایج روش گرادیان کل نرمال استفاده شده است.



شکل ۴-۳۶: مقطع حاصل از مدل سازی مستقیم داده های گرانی سنجی شرق سبزوار (پروفیل P1) در نرم افزار Winglink.

## ب: پروفیل P2

مدل سازی مستقیم این پروفیل با استفاده از اطلاعات به دست آمده از روش گرادیان کل نرمال و نیز اطلاعات زمین شناسی منطقه در محیط نرم افزار Winglink انجام شد (شکل ۴-۳۷). با توجه به اطلاعات زمین شناسی مربوط به این منطقه که شامل پریدوتیت های سرپانتینی و نیز سرپانتینیت ها و هارزبورژیت ها می باشد، وضعیت کانی سازی کرومیت به صورت رگچه ای، عدسی های کوچک و تا حدی استوک ورکی درون توده های سرپانتینی است. سعی شد در مدل سازی این مسئله در نظر گرفته شود و بر اساس اطلاعات زمین شناسی مدلی با بیشترین شباهت همخوانی با اطلاعات موجود به دست آید. همچنین اختلاف گرانی کمتر از ۰/۵ میلی گال در محدوده به تفاوت در سرپانتینی شدن پریدوتیت ها نسبت داده شد.



شکل ۴-۳۷: مقطع حاصل از مدل سازی مستقیم پروفیل P2 محدوده کرومیت زایی شرق سبزوار در نرم افزار Winglink.

#### ۹-۴ مدل سازی معکوس داده های گرانی منطقه کرومیت زایی شرق سبزوار در راستای پروفیل های P1 و P2.

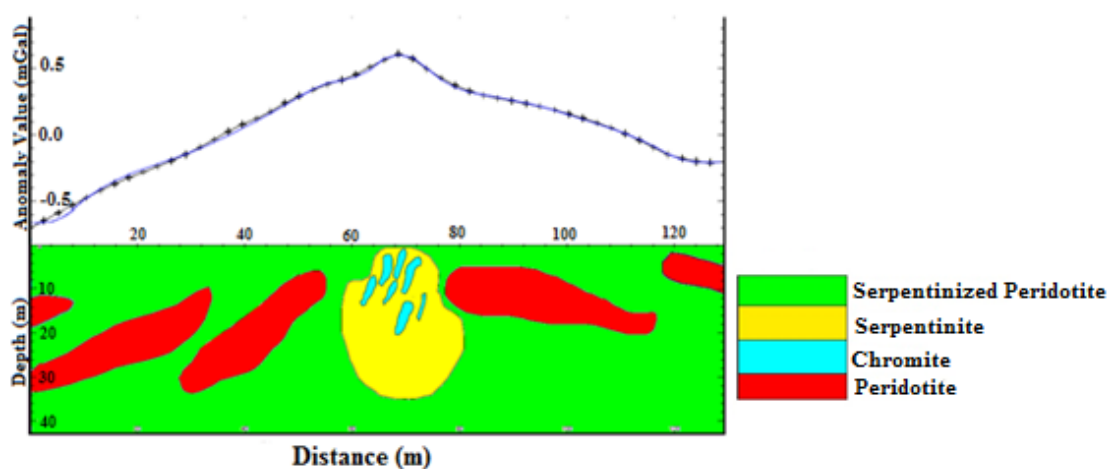
در مدل سازی معکوس داده های واقعی با توجه به اینکه اطلاعات چندانی در مورد ساختارهای زیرسطحی وجود ندارد، مشکل عدم یکتایی جواب دیده می شود. چرا که برای یک آنومالی تعداد زیادی مدل قابل معرفی کردن است، بنابراین برای بهبود بخشیدن مدل نهایی، نزدیک شدن به مدل زمین شناسی و نیز برای آن که خطای برازش کاهش یابد به اطلاعات اضافی نیاز است. لازم به ذکر است برای هریک از پروفیل ها مقدار چگالی زمینه ۲/۸۷ گرم بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته شده است. توده های آبی رنگ معرف کرومیت، زرد رنگ معرف سرپانتینیت و قرمز رنگ معرف پریدوتیت می باشند، زمینه که شامل پریدوتیت های سرپانتینیتی می باشد با رنگ سبز نمایش داده شده است.

#### ۹-۴-۱ مدل سازی معکوس دوبعدی

##### الف: پروفیل P1

با کمک اطلاعات زمین شناسی، عمقی و نیز اطلاعاتی که درباره نحوه گسترش کانی سازی از روش NFG و مدل سازی مستقیم به دست آمد. مدل سازی معکوس برای پروفیل شماره یک انجام گرفت

شکل (۴-۳۸). طبق روالی که در بخش‌های قبل گفته شد، جهت مدل‌سازی معکوس در نرم‌افزار Modelvision ابتدا یک مدل اولیه انتخاب و بعد با تغییر پارامترهای مختلف مدل مذکور مدل‌سازی به سمتی هدایت شد که مدل اولیه به مدل واقعی نزدیک‌تر گردد. هرچه مدل ابتدایی با دقت و صحت بیش‌تری انتخاب گردد، سرعت و دقت مدل‌سازی معکوس افزایش یافته و همگرایی به مدل صحیح افزایش می‌یابد.



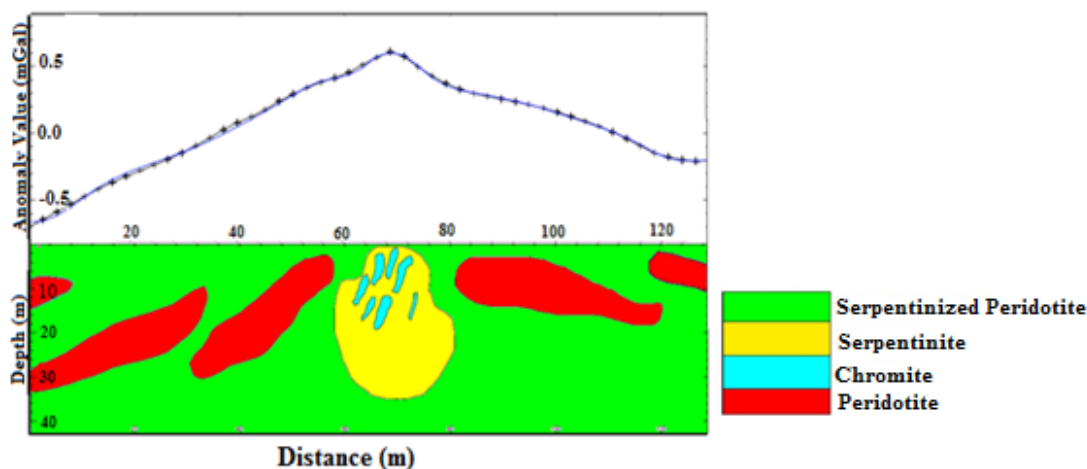
شکل ۴-۳۸: مدل اولیه انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 محدوده کرومیت‌زایی شرق سبزوار.

پس از اینکه مدل اولیه تهیه گردید، مقدار خطای این مدل  $1/805$  به دست آمد. بعد از آن که اثر انتخاب پارامترهای مختلف به عنوان پارامتر آزاد بررسی گردید و نیز با توجه به اطلاعات حاصل از مقطع گرادیان کل نرمال پارامترهای شیب و فاصله و یک بار هم مختصات نقاط به عنوان پارامترهای آزاد در نظر گرفته شدند. بعد از ۲۰ مرحله تکرار برای اجرای اول نرم‌افزار و ۱۵ مرحله تکرار برای بار دوم مدل نهایی مطابق شکل (۴-۴۰) به دست آمد. میزان خطا (RMS) برای این مدل  $1/052$  به دست آمد. مقادیر منفی در سمت چپ منحنی‌ها، احتمال حضور شکستگی و یا گسل در منطقه می‌باشد. مشخصات مربوط به چگالی و عمق توده‌ها در شکل (۴-۳۹) گزارش شده است.

به علت تباین چگالی کم و مقادیر کم گرانی در دو طرف بیشینه منحنی‌ها، احتمال دارد لایه‌های اطراف فاقد کرومیت بوده و یا لایه‌های سرپانتینی شده همراه با کرومیت و منیزیت باشند. این تفاوت در مقادیر گرانی علاوه بر آن می‌تواند به علت تفاوت شیب و ضخامت لایه‌ها باشد.

| Body Parameters |                          |         |   |        |         |         |       |        |
|-----------------|--------------------------|---------|---|--------|---------|---------|-------|--------|
|                 | Label                    | Type    | G | Colour | Suscept | Density | Depth | Active |
| 1               | Serpentinized Peridotite | polygon |   | ■      | 0.0010  | 3.00    | 50.0  | ✓      |
| 2               | Serpentinite             | polygon |   | ■      | 0.0010  | 2.78    | 35.0  | ✓      |
| 3               | Chromite1                | polygon |   | ■      | 0.0010  | 4.3     | 5.0   | ✓      |
| 4               | Peridotite1              | polygon |   | ■      | 0.0010  | 3.20    | 20.6  | ✓      |
| 5               | Peridotite2              | polygon |   | ■      | 0.0010  | 3.20    | 30.0  | ✓      |
| 6               | Peridotite3              | polygon |   | ■      | 0.0010  | 3.15    | 10.1  | ✓      |
| 7               | Chromite2                | polygon |   | ■      | 0.0010  | 4.3     | 3.00  | ✓      |
| 8               | Chromite                 | polygon |   | ■      | 0.0010  | 4.2     | 15.0  | ✓      |
| 9               | Chromite4                | polygon |   | ■      | 0.0010  | 4.6     | 25.5  | ✓      |
| 10              | Chromite5                | polygon |   | ■      | 0.0010  | 4.3     | 20.0  | ✓      |
| 11              | Chromite6                | polygon |   | ■      | 0.0010  | 4.3     | 14.6  | ✓      |

شکل ۴-۳۹: مشخصات تعدادی از توده‌های انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P1.

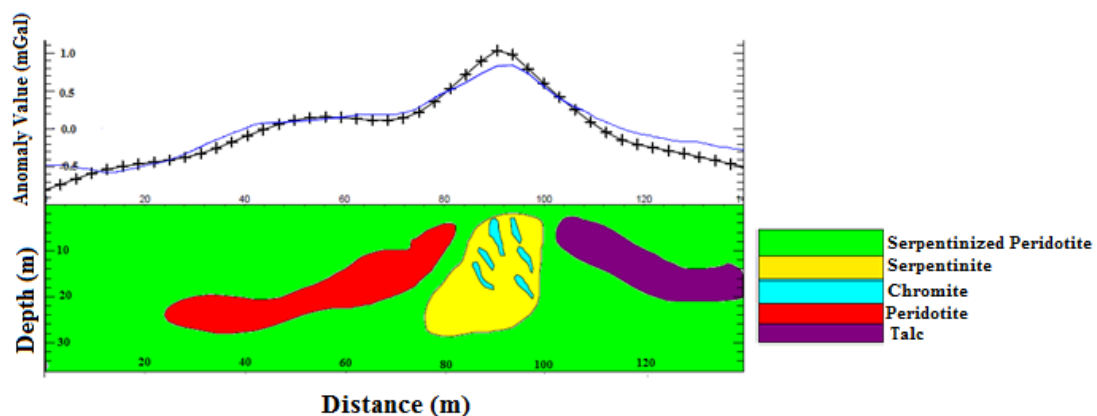


شکل ۴-۴۰: مدل نهایی به دست آمده از مدل‌سازی معکوس پروفیل P1 کرومیت‌زایی شرق سبزوار.

## ب: پروفیل P2

برای مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی روی پروفیل P2 در محدوده مورد نظر مدل اولیه تهیه شد (شکل ۴-۴۱). این مدل برای دو ابتدا و انتهای پروفیل‌ها تطابق مناسب ندارد. منحنی آبی رنگ پاسخ مدل و منحنی سیاه رنگ آنومالی مربوط به داده‌های واقعی می‌باشد. کشیدگی و تمرکز

کرومیت‌ها در مدل با توجه به اطلاعات به دست آمده از روش گرادیان کل نرمال می‌باشد. طبق اطلاعات مربوط به مقطع گرادیان کل نرمال و نیز مدل‌سازی وارون این پروفیل، نتایج نشان می‌دهد توده اصلی تا حدود عمقی ۴۵ متر کشیده شده است که با نتایج حاصل از مدل‌سازی وارون سه‌بعدی بر روی این منطقه هم‌خوانی دارد [جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۴]. همچنین طبق شواهد زمین‌شناسی توده‌ها کرومیتی به صورت عدسی‌های پراکنده در توده‌های سرپانتینی قرار دارند که مدل معکوس به دست آمده حدود تمرکز ماده معدنی در ۱۰ الی ۱۵ متری است که با نتایج حاصل از گرادیان کل نرمال هم‌خوانی دارد.



شکل ۴-۴: مدل اولیه انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس پروفیل P2 کرومیت‌زایی شرق سبزوار.

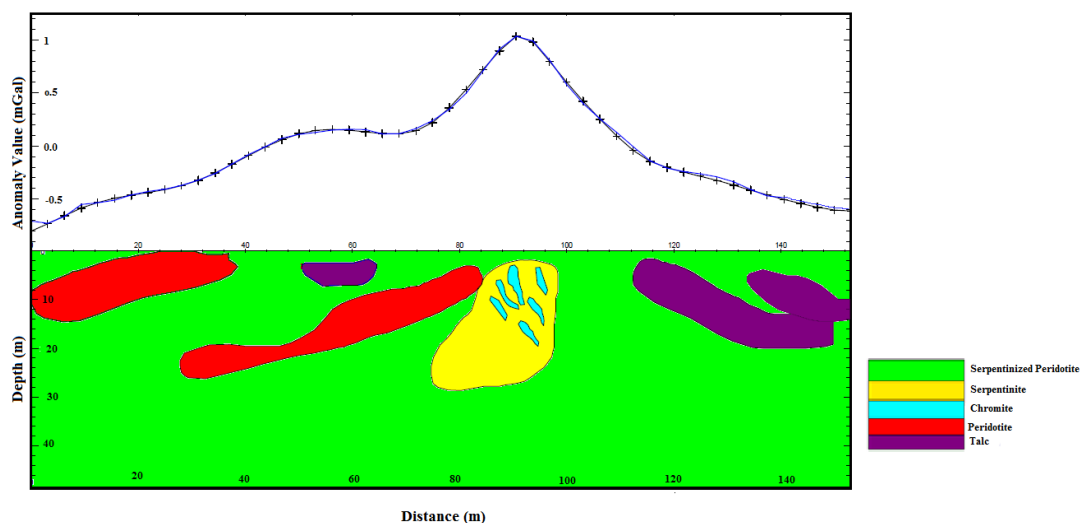
شکل (۴-۴۲) مشخصات پارامترهای انتخابی برای توده‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است ساختاری که تحت عنوان تالک (Talc) نام‌گذاری گردیده است، در واقع پریدوتیت‌ها و کرومیت‌های آغشته به تالک و منیزیت زیاد که در گزارش زمین‌شناسی و بازدید منطقه گزارش شده هستند. اما صرفاً جهت سهولت در نام‌گذاری در نرم‌افزار به این شکل نوشته شده است.



| Body Parameters |                          |         |   |        |         |         |       |                                     |
|-----------------|--------------------------|---------|---|--------|---------|---------|-------|-------------------------------------|
|                 | Label                    | Type    | G | Colour | Suscept | Density | Depth | Active                              |
| 1               | Serpentinized Peridotite | polygon |   |        | 0.0010  | 3.00    | 50.0  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2               | Serpentinite             | polygon |   |        | 0.0010  | 2.78    | 29.8  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3               | Peridotite1              | polygon |   |        | 0.0010  | 3.15    | 14.5  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4               | Peridotite               | polygon |   |        | 0.0010  | 3.16    | 25.5  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5               | Talc                     | polygon |   |        | 0.0010  | 3.16    | 16.3  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 6               | Body:4                   | polygon |   |        | 0.0010  | 4.3     | 17.6  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 7               | Body:6                   | polygon |   |        | 0.0010  | 4.2     | 5.6   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 8               | Body:7                   | polygon |   |        | 0.0010  | 4.6     | 4.3   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 9               | Body:8                   | polygon |   |        | 0.0010  | 4.2     | 6.8   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 10              | Body:9                   | polygon |   |        | 0.0010  | 4.3     | 10.3  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11              | Body:10                  | polygon |   |        | 0.0010  | 4.0     | 14.6  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 12              | Body:11                  | polygon |   |        | 0.0010  | 4.2     | 15.3  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 13              | Body:12                  | polygon |   |        | 0.0010  | 4.3     | 21.3  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 14              | Talc2                    | polygon |   |        | 0.0010  | 2.84    | 19.5  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 15              | Talc3                    | polygon |   |        | 0.0010  | 2.80    | 7.1   | <input checked="" type="checkbox"/> |

شکل ۴-۴۲: مشخصات تعدادی از توده‌های انتخابی جهت مدل‌سازی معکوس محدوده کرومیت‌زایی شرق سبزوار.

بعد از ایجاد و تهیه مدل اولیه با میزان خطای  $RMS=4.814$  و با انتخاب پارامترهای آزاد مدل‌سازی صورت می‌گیرد. برای مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی روی این پروفیل بعد از امتحان تأثیر هریک از پارامترها، در پاسخ مدل، در نهایت پارامترهای فاصله و نیز عمق به عنوان پارامترهای آزاد قرار گرفتند و مدل‌سازی انجام شد (شکل ۴-۴۳). بعد از اتمام فرآیند مدل‌سازی، مدل با ۱۵ مرحله تکرار، میزان خطای  $RMS=1.622$  به دست آمد (شکل ۴-۴۳). مقادیر آنومالی در دو طرف بیشینه بیانگر احتمال حضور لایه‌ای با چگالی بالاتر از چگالی سرپانتینیت‌ها و یا نزدیک شدن توده‌ها به سطح دارد. از آن‌جا که ابعاد کرومیت‌ها در منطقه کم بوده و توده‌ها کرومیت به صورت پراکنده در منطقه وجود دارد لذا اختلاف چگالی کمی را با سنگ‌های اطراف نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴۳: مدل نهایی به دست آمده از مدل سازی معکوس پروفیل P2 کرومیت زایی شرق سبزوار.

#### ۴-۹-۲ مدل سازی سه بعدی مقید داده های کرومیت سبزوار

با توجه به اینکه عمده ساختارهای زیرسطحی و توده های معدنی به شکل سه بعدی هستند، بعد از مدل سازی دوبعدی داده های گرانی سنجی برای آن که دید کلی مرتبط با ساختار زیرزمینی توده ها به دست آید، اقدام به مدل سازی سه بعدی معکوس داده ها شد. مدل سازی سه بعدی معکوس با استفاده از الگوریتم لی - اولدنبرگ در محیط نرم افزار Grav3D انجام گرفت.

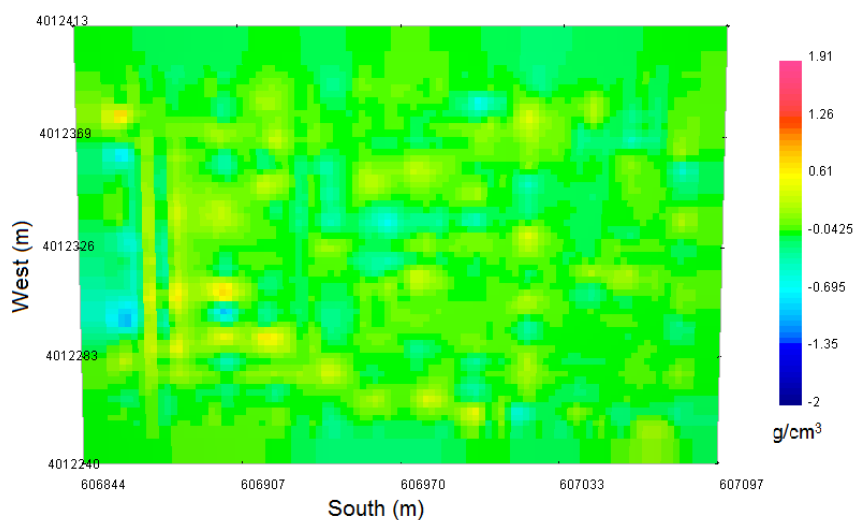
طبق روال قبل ابتدا مدل سازی بدون اعمال هیچ قیدی انجام شد ( شکل ۴-۴۴) در مرحله اول جهت مدل سازی از روش خودکار <sup>۱</sup>GCV استفاده گردید. در ارتباط با داده های منطقه سبزوار تنها اطلاعات زمین شناسی موجود وجود رخنمون هایی در قسمت های جنوبی و غربی محدوده بوده است که در بازدیدهای زمین شناسی محدوده تأیید شده اند [ آقاجانی، ۱۳۹۱]. در این مدل سازی رخنمون ماده معدنی در سطح زمین به شکل بارز وجود نداشت، لذا با افزایش وزن سلول های سطحی تر سعی بر آن شد مدل به سمتی هدایت شود که به مدل واقعی نزدیک تر باشد. بعد از آن که مدل اولیه به دست آمد، اگر میزان خطای عدم برازش معقول بود در مرحله بعد مدل سازی به وسیله روش Chifactor انجام می شود. مقدار آن از طریق رابطه (۴-۱) به دست می آید:

<sup>۱</sup> General Cross Regulation

$$\chi^2 = \frac{\|Gm - d\|_2^2}{N}$$

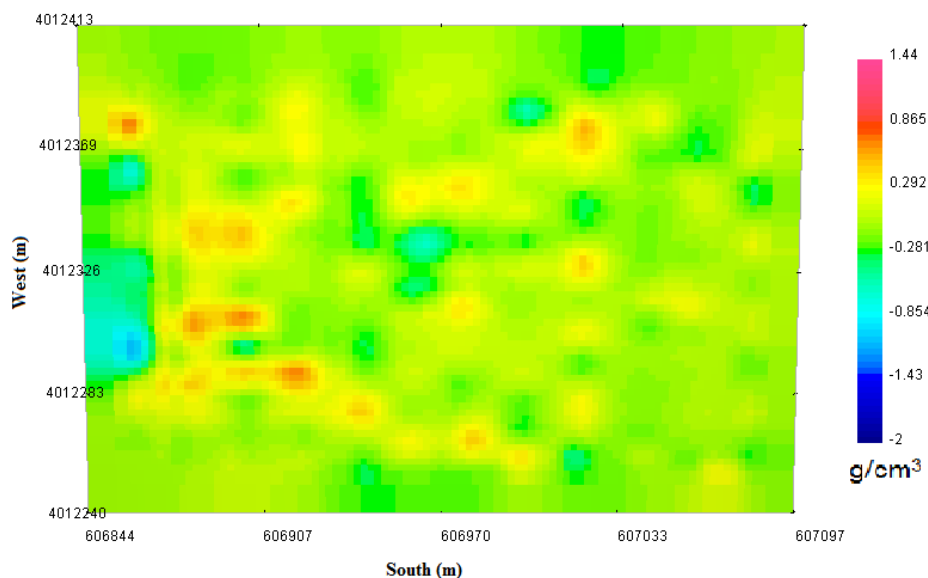
$$\text{Chifact} = \sqrt{\chi^2}$$

(۴-۱):



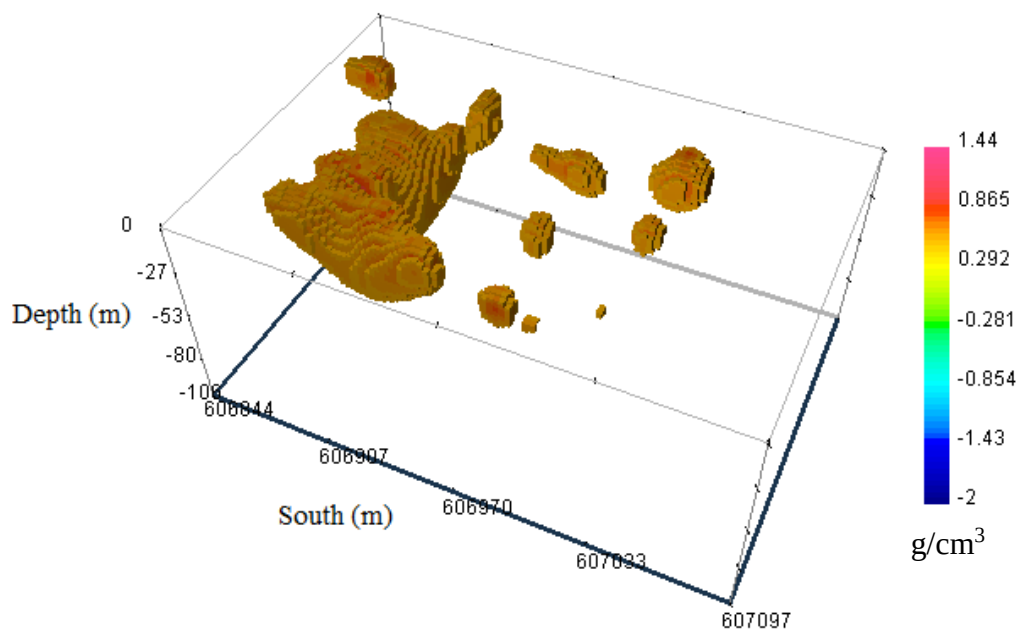
شکل ۴-۴: مقطع حاصل از مدل سازی معکوس داده های گرانی، در حالت پیش فرض.

همان گونه که در شکل (۴-۴) مشخص است، تعدادی بی هنجاری کوچک پراکنده که تا نزدیکی سطح بالا آمده اند در این شکل دیده می شوند. این مرحله در ۱۶ مرتبه تکرار و با خطای عدم برازش ۰/۱۴۸۳۲۹ انجام شد. در گام بعدی وزن بیشتری به سلول های سطحی داده شد. با اعمال این قید و نیز محاسبه پارامتر منظم سازی با استفاده از Chifact مدل نهایی حاصل از مدل سازی معکوس به دست آمد (شکل ۴-۴۵).



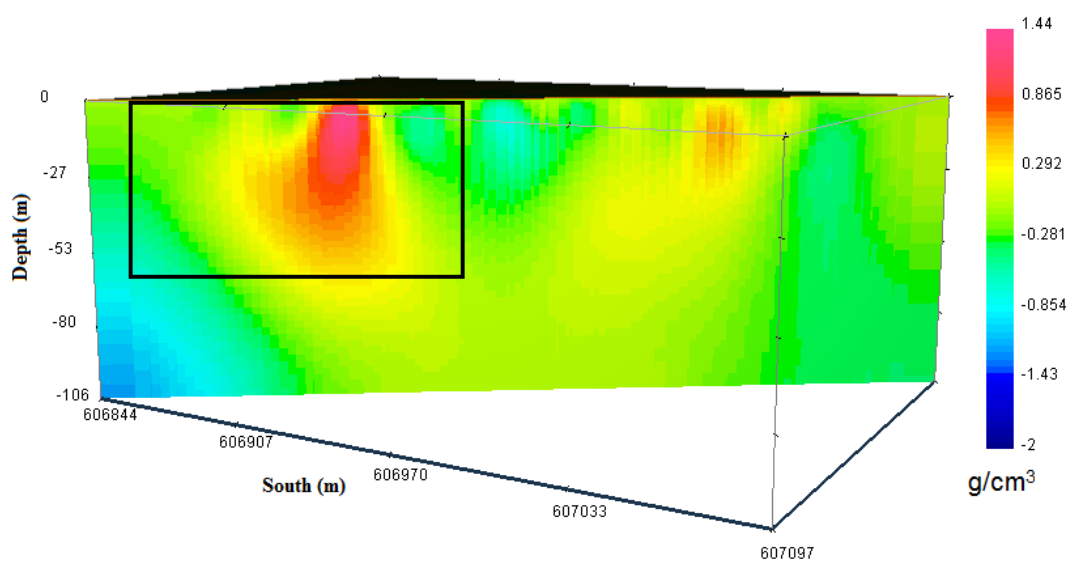
شکل ۴-۴۵: مقطع عرضی (دید از بالا) حاصل از مدل سازی معکوس سه بعدی داده های گرانی سنجی منطقه سبزوار، با استفاده از افزایش وزن توده های سطحی.

مطابق شکل (۴-۴۵) با افزایش وزن سلول های سطحی رخنمون های سطحی در غرب و جنوب به شکل بارزتری نمایان شده اند. تعداد تکرار ۵ مرحله و با خطای عدم برازش ۰/۱۴۱۰۷ به دست آمد. پس از اعمال قیود مختلف مانند قید مثبت بودن و همواری بر روی داده ها، نتیجه به صورت اجسام مجزا در شکل (۴-۴۶) به صورت مدل سه بعدی دیده می شود. به منظور بررسی وضعیت توده های وجود در فضای دوبعدی مدل سازی های انجام شده بلوک های سه بعدی از مقاطع مورد نظر تهیه شده است (شکل ۴-۴۷ و شکل ۴-۴۸).



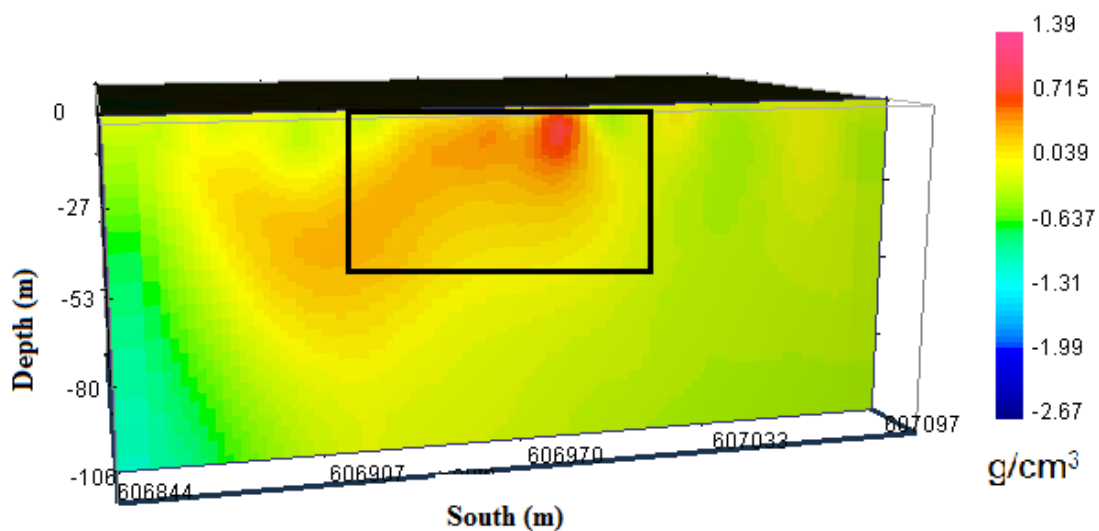
شکل ۴-۴۶: نمای سه‌بعدی مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی نهایی (جهت نمایش بهتر سلول‌ها با چگالی کمتر از ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب نشان داده شده‌اند).

نتایج نشان می‌دهد که احتمالاً عمق توده‌های بزرگ در نواحی غرب در حدود ۴۰ تا ۴۵ متر و توده‌های پراکنده در حدود ۲۵ متر است. نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی در این تحقیق با نتایج تحقیقات قبلی هم‌خوانی قابل قبولی دارد [ آقاجانی، ۱۳۹۱؛ جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۴ ].



شکل ۴-۴۷: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی داده‌های گرانی در راستای پروفیل P1.

کادر سیاه رنگ محدوده مرتبط با مقطع مدل سازی دوبعدی برای این پروفیل را نشان می دهد. همان گونه که در شکل (۴-۳۱)، در محل پروفیل P1 و نیز در مقطع مدل سازی این پروفیل مشخص است وجود مناطق گرانی مثبت و منفی در کنار هم احتمال شکستگی و یا وجود گسل می باشد. اما چون در حاشیه نقشه آنومالی بوگه است، نمی توان به طور قطع درباره آن اظهار نظر کرد.



شکل ۴-۴۸: مقطع حاصل از مدل سازی معکوس سه بعدی داده های گرانی در راستای پروفیل P2.

در این فصل مدل سازی داده های گرانی ناشی از برداشتهای گرانی سنجی بر روی دو نمونه داده واقعی انجام شد. نتایج نشان می دهد که روش های به کار رفته تا حد زیادی توانسته اند ساختارهای زیرسطحی را مشخص نمایند. اما لازم به یادآوری است که یک روش ژئوفیزیکی مثل گرانی سنجی بدون داده های اضافی به تنهایی نمی تواند نتایج کاملاً مثبتی را ارائه دهد.

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵-۱ نتیجه‌گیری

به منظور تفسیر کمی و کیفی داده‌های میدان پتانسیل معمولاً از مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌ها استفاده می‌شود. در این تحقیق با مدل‌سازی داده‌های گرانی به بررسی وضعیت آنومالی‌های گرانی ناشی از کانی‌زایی کرومیت در دو منطقه کوبا و سبزوار پرداخته شده است. برای نیل به این هدف ابتدا اقدام به مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌های گرانی حاصل از داده‌های مصنوعی شد. در مدل‌سازی معمولاً داده‌های جانبی مثل حفاری و اطلاعات زمین‌شناسی اهمیت بالایی دارد. بنابراین با توجه به مدل‌های مصنوعی و معلوم بودن ابعاد و مشخصات آن‌ها، از روش گرادیان کل نرمال شده استفاده شد تا روند کار روی داده‌های مصنوعی بررسی و روی داده‌های واقعی اعمال گردد. نتایج مدل‌سازی مصنوعی نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های کمکی نقش مهمی در مدل‌سازی کمی داده‌ها دارد. تخمین عمق و گسترش افقی داده‌های منطقه کوبا با استفاده از روش گرادیان کل نرمال انجام شد، نتایج حاصل از اعمال روش گرادیان کل نرمال در این منطقه با اطلاعات حفاری موجود تطابق خوبی را نشان داد. پس از شناسایی وضعیت اجسام آنومال در منطقه، به مدل‌سازی دوبعدی داده‌ها پرداخته شد، جهت بررسی جامع‌تر علاوه بر مدل‌سازی دوبعدی داده‌های گرانی پروفیل‌های P1 و P2 کوبا، مدل‌سازی سه‌بعدی بر روی داده‌های این منطقه صورت گرفت. نتایج حاصل از این مدل‌سازی با زدن مقاطعی در جهت پروفیل‌های انتخابی با مدل‌سازی دوبعدی مربوط به آن مقایسه شد. نتایج هم‌پوشانی قابل قبول داشته و با اطلاعات مربوط به گمانه‌های حفاری مخصوصاً در محل پروفیل دوم مطابقت داشت.

پس از انجام مدل‌سازی داده‌های گرانی منطقه کوبا، همان روند کار بر روی داده‌های منطقه شرق سبزوار اعمال شد. با توجه به این که در منطقه سبزوار اطلاعات کمتری نسبت به منطقه کوبا وجود داشت، لذا نتایج روش گرادیان کل نرمال موجب کمک فراوانی در روند مدل‌سازی داده‌های این منطقه شد. در ارتباط با پروفیل اول (P1) نتایج نشان‌دهنده وجود یک توده آنومال کانی‌زایی شده در حدود ۸۰ تا ۱۰۰ متری پروفیل و با گسترش عمقی ۳ تا ۳۵ متر می‌باشد. ابعاد کرومیت‌ها طبق اطلاعات



زمین‌شناسی در این منطقه کم است، این مسئله موجب تفاوت چگالی کم توده‌ها نسبت به سنگ‌های اطراف شده است. تمرکز ماده معدنی در عمق حدود ۷ متری تخمین زده شد. هم‌چنین به علت تغییر ناگهانی در مقدار گرانی و وجود نقاط بیشینه و کمینه در کنار هم در بخشی از این پروفیل احتمال دارد که در آن قسمت شکستگی اتفاق افتاده باشد و یا احتمال وجود گسل است، اما با توجه به نبود داده‌های کافی در بخش‌های انتهایی نقشه نمی‌توان به قطعیت در ارتباط با آن اظهار نظر کرد. هم‌چنین در مقاطع مدل‌سازی، تغییرات گرانی مثبت اطراف توده اصلی را به وجود سنگ‌های پریدوتیتی کم سرپانتینی شده می‌توان نسبت داد که چگالی بیشتری را نسبت به سنگ‌های اطراف خود دارد.

طبق اطلاعات زمین‌شناسی در محدوده پروفیل P2 منطقه، آغشتگی زیادی به کرومیت در این منطقه وجود دارد اما به صورت توده‌های پراکنده است. مناطقی که در اطراف توده اصلی مقادیر آنومالی گرانی بالایی را نشان می‌دهد را می‌توان به وجود پریدوتیت‌های سرپانتینی و یا کرومیت‌های آغشته با منیزیت نسبت داد. عمق توده اصلی در محل این پروفیل در حدود ۴ تا ۳۵ الی ۴۰ متری تخمین زده شد که در فاصله ۴۰ تا ۶۰ متری پروفیل قرار دارد. تمرکز ماده معدنی در حدود عمق حدود ۱۰ الی ۱۵ متری به دست آمده است.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان برای مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌های گرانی ابتدا از روش ساده‌تر گرادیان کل نرمال استفاده و نتایج آن را در مدل‌سازی به کار برد که نتیجه مناسب‌تری را ارائه می‌دهد.

## ۲-۵-۲ پیشنهادات

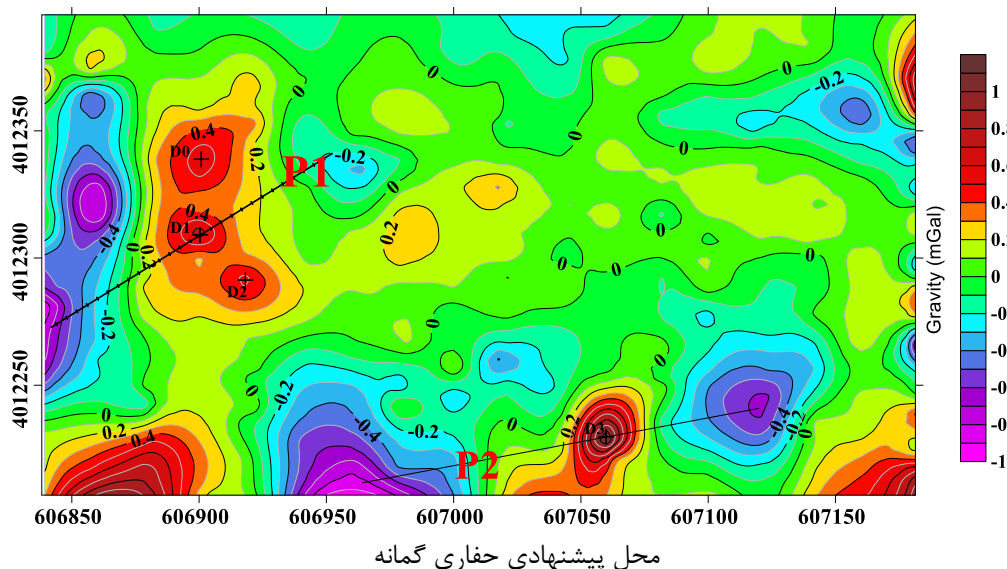
۱- از آن‌جا که هدف از تفسیر و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی دستیابی به اطلاعات عمقی و نحوه گسترش توده‌های زیرسطحی، به منظور کاهش هزینه‌های حفاری است، پیشنهاد

می‌شود تا مدل‌سازی معکوس و تخمین عمق بر روی داده‌های این منطقه با روش‌های دیگر انجام شود تا بتوان از تلفیق آن‌ها به نتایجی با دقت بالا دست یافت.

۲- بر اساس اطلاعات به دست آمده، نقاط به مختصات زیر برای حفاری گمانه پیشنهاد می‌شود:

مختصات نقاط پیشنهادی محل حفاری گمانه

| گمانه پیشنهادی | X        | Y       |
|----------------|----------|---------|
| D0             | ۶۰۶۹۰۰/۸ | ۴۰۱۲۳۳۹ |
| D1             | ۶۰۶۹۰۰/۴ | ۴۰۱۲۳۰۹ |
| D2             | ۶۰۶۹۱۸/۲ | ۴۰۱۲۲۹۱ |
| D3             | ۶۰۷۰۶۷   | ۴۰۱۲۲۲۶ |



۳- با توجه به عدم داده کافی در بخش غربی و جنوبی محدوده و نیز وجود آنومالی‌های مثبت و منفی در این محدوده، جهت بررسی آنومالی‌ها پیشنهاد می‌شود شبکه برداشت از سمت غرب و جنوب محدوده نیز گسترش یابد تا بتوان اطلاعات دقیق‌تری مبنی بر وجود ماده معدنی و گسل‌ها و شکستگی‌های احتمالی به دست آورد.

۴- با برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی علاوه بر داده‌های گرانی‌سنجی قطعاً می‌توان تفسیر دقیق‌تری را ارائه داد.

## منابع:

- ابراهیمزاده اردستانی و، (۱۳۸۹)، "گرانی سنجی کاربردی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۲۳۰.
- آزاد، م.، کنشلو، م.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۹۲)، "به کارگیری روش آنالیز کریجینگ فاکتوری در فیلتر کردن ساختارهای داده‌های گرانی سنجی منطقه معدنی کرومیت فاریاب"، فصل‌نامه فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۹، شماره ۴، ص ۶۱-۷۲.
- آقاجانی، ح.، (۱۳۸۸)، "بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله‌های نفتی"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.
- آقاجانی، ح. و مرادزاده، ع.، (۱۳۸۵)، "تشخیص گنبدیهای نمکی به روش گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی"، ۲۵ امین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- آقاجانی، ح.، مرادزاده، ع. و هوآلین، ز.، (۱۳۸۹)، "برآورد موقعیت افقی و عمق بی‌هنجاری‌های گرانی با استفاده از گرادیان کل بهنجارشده" فصل‌نامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور، شماره ۷۶، ص ۱۶۹-۱۷۶.
- اکرمی، م. ع.، عسگری، ع.، نقشه زمین‌شناسی یک‌صد هزارم سلطان آباد، سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۷۹.
- آقاجانی، ح.، (۱۳۹۱) "انجام پیمایش و مطالعات ثقل سنجی در محدوده اکتشافی کرومیت شرق سبزوار" طرح پژوهشی، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- جعفرزاده، و.، نجاتی کلاته، ع.، آقاجانی، ح.، (۱۳۹۴)، "مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های گرانی با استفاده از روش لی - اولدنبرگ (مطالعه موردی: منطقه سبزوار)"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، شاهرود، ایران.
- دولتی ارده جانی، ف.، (۱۳۷۲)، "برداشت اطلاعات خام و تعبیر و تفسیر گرانی سنجی منطقه اکتشافی مروودشت"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیرکبیر (دانشکده معدن)، تهران، ص ۲۲.

-شهبازی، ا.، آقاجانی، ح.، (۱۳۹۲)، " گسترش میدان رو به بالای توسعه یافته و تخمین ارتفاع بهینه آن برای تفکیک آنومالی گرانی حاصل از کرومیت چشمه سیر سبزوار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شاهرود. کنفرانس ژئوفیزیک ایران، دوره ۱۳، صفحه ۲۵۸-۲۶۱.

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

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

-کریم پور، م.ح.، سعادت، س.، کدکنی، م.، (۱۳۸۹)، " زمین شناسی اقتصادی کاربردی"، انتشارات مشهد.

-کلاگری، ع. ا.، (۱۳۷۱)، " اصول اکتشافات ژئوفیزیکی" چاپ اول، انتشارات تابش، ص ۵۸۵.

-گرامی صادقیان، ف.، کوثری، ش.، آقاجانی، ح.، (۱۳۹۴)، " تخمین عمق و تفسیر داده های گرانی حاصل از کانسار کرومیت با استفاده از روش واهمامیخت اوپلر و سیگنال تحلیلی"، دومین کنگره بین المللی زمین شناسی کاربردی، ص ۱۱۴۲-۱۱۴۸.

-عابدی، م.، افشار، ا.، ابراهیم زاده اردستانی و.، نوروزی، غ.، (۱۳۹۱)، " تفسیر بی هنجاری های گرانی توده های کم عمق با استفاده از روش گرادیان کل نرمال شده" **مجله فیزیک زمین و فضا**، دوره ۳۸، ص ۱۰۷-۱۲۱.

-علی پور، ا.، محمدیان سرون دانی، م.ح.، خالدزاده، م.، آقاجانی، ح.، (۱۳۹۳)، " مقایسه روش های طیف توان شعاعی و اوپلر دیکانولوشن برای تخمین عمق ساختارهای زیر سطحی کرومیت" اولین همایش ملی زمین شناسی و اکتشافات معدنی، موسسه آموزش عالی کرمان.

- مرادزاده، ع.، عرب امیری، ع. ر.، (۱۳۸۳)، "مدل سازی معکوس پارامتری داده های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه اندیس معدنی پاینده"، هشتمین همایش زمین شناسی ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- نجاتی کلاته، ع.، (۱۳۸۳)، "مدل سازی دوبعدی و سه بعدی داده های گرانی سنجی با استفاده از روش وارون سازی فشرده"، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران.

-نجاتی کلاته، ع.، ابراهیمزاده اردستانی، و.، زمردیان، ح.، شاهین، ا.، (۱۳۸۴)، "مدل سازی سه بعدی وارون داده های گرانی با استفاده از روش وارون سازی فشرده"، **فصلنامه علوم زمین**، شماره ۵۵، ص ۱۸-۲۹.

-نوروزی، غ.، (۱۳۸۸)، "ژئوفیزیک اکتشافی" چاپ اول، مؤسسه دانشگاه تهران، تهران، ص ۵۹۳.

-Aghajani, H. Moradzadeh, A. and Zeng, H., (2009), "Estimation of Depth to Anomalous Body from Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly", **Journal of Earth Science**, 20, 6, pp 1012-1016.

-Arfken, G., (1985), "Mathematical Methods for Physicists, Chapter 14: Fourier series", 3th edition. Orlando, FL: Academic Press, pp 760-793.

- Aydin, A., (2007), "Interpretation of Gravity Anomalies with the Normalized Full Gradient (NFG) Method and an Example", **Pure and Applied Geophysics** 64, pp 2329-2344.

-Berezkin, V. M., (1963), "Application of the full vertical gravity gradient to determination to sources causing gravity anomalies (in Russian)", **Expl. Geophys.**, 18, 69-76.

-Blakely, R. J. (1995-1996), "**Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, English**", 440 p.

-Davis W. E., Jackson W. H., and Richter D. H. (1957), "Gravity prospecting for chromite deposite in Camaguey province, Cuba", **Geophysics**, vol. XXII, No. 4, PP. 848-859.

-Dobrin M. B. and Savit C. H. (1988), "**Introduction geophysical prospecting**", McGraw-Hill, 867pp.

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

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

-Gerkens, J.C., (1989), "Foundation of exploration geophysics", **Elsevier science publishers**, pp 667.

-Grant, F.S., and West, G.F. (1965), "**Interpretation Theory in Applied Geophysics**", McGraw-Hill Book Company, pp 583.

- Hanna, W. F., (1990), "Some historical notes on early magnetic surveying in the U.S. Geological Survey," in Geologic Application of Modern Aeromagnetic Surveys, W. F. Hanna (ed.), 63-73, U. S., Geological Survey Bulletin.

- Hammer, S., Nettleton, L. L., Hastings, W. K., (1945)," Gravimeter prospecting for chromite in Cuba", **Geophysics**, 10(1), 34-49.
- Hinze, W.J. (1990), "The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies. In: Stanley H.W. (Ed.)", Geotechnical and Environmental geophysics, **Society of exploration geophysics (SEG)**, 398 p.
- Inman, J. R., (1975)," Resistivity inversion with ridge regression", **Geophysics**, 40, 798-817.
- Jakosky, J. J., (1950), " **Exploration Geophysics**", Trija Publishing Company, Newport Beach, CA.
- Kospiri, A., Kosho, P., & Vukzaj, N., (1999), "Case histories of the application of geophysical methods to chromite exploration in the Balkans", In Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition. Istanbul, 07-3, pp. 38-40.
- Li, Y.G., and Oldenburg, D.W. (1998). "Separation of regional and residual magnetic field data", **Geophysics**, 63. 2.pp 431-439.
- Lok, M. H., Barker, R. D., (1996), " Rapid Least-Square Inversion od Apparent Resistivity Pseudosections by a Quasi – Newton Method", **Geophysical Prospecting**, 44, pp 131-152.
- Meju, M.A., (1994), "Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice", **Society of Exploration Geophysics**,pp.360.
- Miller, R. L. (1956), "Trend surfaces: their application to analysis and description of environments of sedimentation", **The Journal of Geology**, 425-446.
- Nejati Kalate, A., Roshandel Kahoo, A. (2013), " Estimation of 3D density distribution of chromites deposit using gravity data", **Journal of Mining and Environment**, Vol.4, No.2, 97-104.
- Nettleton, L. L. (1976), "Gravity and magnetics in oil prospecting", McGraw-Hill Companies.
- Paterson, N. R. and Reeves, C. V. (1985), "Applications of gravity and magnetic surveys: The state-of-the-art", **Geophysics**, 50 (12): 2558–2594.
- Phillips, N., (2002), "Geophysical inversion in an integrated exploration program: examples from the San Nicolas deposit", University of British Columbia. Vancouver, Canada: Master's Thesis.
- Reynolds, J.M. (1997), "**An introduction to applied and environmental geophysics**", John Wiley & Sons, pp. 796.
- Robinson, E. S., & Coruh, C., (1988), "Electromagnetic surveying Basic Exploration", **Geophysics**, 490-500.

- Salem, A., Ravat, D., Mushayandebvu, M. F., and Ushijima, K., (2004), "Linearized least-squares method for interpretation of potential-field data from sources of simple geometry", **Geophysics**, 69(3), 783-788.
- Stocklin, J., (1974), "Nortehr Iran:Alborz Mountains, in Spencer, A.M., ed., Mesozoic-Cenozoic orogenic belts; data for orogenic studies", Alpine Himalayan.
- Talwani, M. Worzel, J.L. and Landisman, M., (1959), "Rapid gravity computation for two dimensional bodies with application to the Mendicino submarine fracture zone", **Geophysical Research**, 64, pp. 49-59.
- Telford, W.M. Geldart, L.P. and Sheriff, R.C., (1991), "**Applied geophysics**", 2nd edition, Cambridge University Press, pp. 770.
- Yuenguel, S., (1956), " Prospecting for chromite with gravimeter and magnetometer over rugged topography in east Turkey", **Geophysics**, 21(2), 433-454.
- Unwin, D. J. (1975), "An introduction to trend surface analysis", Geo Abstracts, University of East Anglia.
- Won, I. J. and Bevis, M., 1987, "Computing the gravitational and magnetic anomalies due to polygon: Algorithms and Fortran subroutines", **Geophysics**, 52, 232-238.
- Zhdanov, M. S. (2002), "Geophysical inverse theory and regularization problems", **Elsevier**, 36.

## **Abstract**

Nowdays, the Efforts to Identify Valuable Subsurface Structures and Mineral Resources have been extended. Geophysical methods are the tools that provide valuable information through measuring physical quantities on the surface or above ground level. Because the density of the mineral chromite has substantial differences with the host rocks, the gravimetric method can be used to explore these deposits. The main objectives in the interpretation of gravimetric data include determining the depth and range of anomalous masses. Estimating the horizontal depth of anomalous bodies plays a significant role in the optimal selection of exploratory wells location and on the other hand, reduces the cost of drilling and extraction. There are several methods for estimating the depth, and in this study, the normalized full gradient (NFG) method was used. Using Fourier series, this method overcomes the disadvantages of downward continuation filter for passing through the center of the anomalous body. To interpret gravimetric data, data modeling is one of the most successful methods of interpretation. This study deals with interpretation, estimating the depth and modeling gravimetric data. Because in the geophysical methods to evaluate the effectiveness of each method, they are first applied on artificial data, so the NFG method was applied on two series of artificial data and both direct and inverted data modeling took place. The main purpose of this research is to interpret and model data in chromite-forming zone of Cuba and in chromite-forming zone of Sabzevar. First, using polynomial functions, regional and local anomalies were separated and then, using the 2D normalized full gradient method, the gravity anomalies were interpreted. To determine the status of mineral masses, direct modeling using Winglink software and 2D inverted modeling using Modelvision Pro software was performed. The algorithm used for modeling in these software is based on iterative methods; also, to examine the structures in 3D space, three-dimensional constrained inverted modeling using Lee - Oldenburg algorithm (Grav3D software) was performed. The results of modeling the Cuba zone are in good agreement with those of excavations in the anomalous zones. Moreover, the results obtained from modeling the gravimetric data in Sabzevar exploration zone are reasonably consistent with the geological information of the area.

**Keywords:** gravity anomalies, depth estimation, normalized full gradient (NFG), Forward modeling, 2D inverted modeling, 3D constrained inverted modeling, Cuba chromite deposits, Sabzevar chromite deposits.





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**  
**M.Sc. Thesis in Gravimetry**

**Interpretation of potential field data in Sabzevar chromite  
exploration area by the NFG method, forward and inverse  
modeling.**

By: Shahrzad Kosari

**Supervisors:**

Dr. Hamid Aghajani

Dr. Susan Ebrahimi

**Advisor:**

Mehdy Zarei

**September 2016**