



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد گرانی سنجی

مطالعات و انجام عملیات گرانی سنجی در محدوده معدنی گرماب (سمنان) برای اکتشاف سولفات سدیم

نگارنده

علی عباسی

استاد راهنما

دکتر حمید آقاجانی

مقدس ترین واژه مادر لغت نامه دلم ...

پدر و مادر مهربانم، که زندگی ام را بدون مهر و عطف آن های دانم

برادر و خواهر، همراهم، ییگی و پستوانه های زندگی ام

و همه کسانی که دوستان دارم ...

تقدیر و تشکر

اکنون که به یاری خداوند موفق به دفاع از پایان نامه می خویش شدم بر خود لازم می دانم از زحمات بی منت و خالصانه استاد گران قدر جناب آقای دکتر حمید

آقا جانی که راهبانی این جانب را بر عهده داشته اند کمال تشکر را بنمایم. از جناب آقای مهندس حمید رضا باغزانی جهت کمک در برداشت داده ها تشکر می کنم. همچنین از

پدر و مادرتما می اساتید و دوستانی که با الطاف صمیمی خود طی این مسیر را بر من هموار کردند تشکر می نمایم. از زحمات داوران محترم آقای دکتر علی نجابتی کلاته و آقای دکتر

علیرضا عرب امیری که زحمت داور این پایان نامه را بر عهده گرفته و کمک به هر چه بهتر شدن این کار کردند تشکر می کنم.

تعهد نامه

این جانب علی عباسی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک- گرانی سنجی دانشکده مهندسی معدن،

نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مطالعات و انجام عملیات گرانی سنجی در محدوده معدنی**

گرماب (سمنان) جهت اکتشاف سولفات سدیم تحت راهنمایی آقای دکتر حمید آقاجانی متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده:

استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی . اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی سنگ‌های زیرسطحی راه‌حل مناسبی برای بررسی ساختارهای زیرسطحی و اکتشاف ذخایر مدفون در زیرزمین از قبیل نفت، گاز، آب و موادمعدنی هستند. روش گرانی‌سنجی به دلیل سادگی در برداشت و تفسیر و کم‌هزینه بودن از جمله روش‌های پرکاربرد ژئوفیزیکی است؛ که برای اکتشافات مقدماتی به کار می‌رود. با توجه به این‌که آنومالی‌های گرانی ناشی از اختلاف چگالی طبقات و غیرهمگن بودن آن‌ها است، از روش گرانی‌سنجی برای مطالعه آنومالی‌های گرانی استفاده می‌شود.

سولفات سدیم یک ماده معدنی کاربردی است؛ که در محیط‌های تبخیری تشکیل می‌شود. محدوده سولفات سدیم گرماب در جنوب شرق شهر سمنان واقع شده است. با توجه به این‌که سولفات سدیم با لایه‌های رسوبی اطراف آن اختلاف چگالی محسوسی دارد و چگالی آن بالاتر از سنگ‌های اطراف است؛ از روش گرانی‌سنجی استفاده شد. داده‌های گرانی‌سنجی محدوده معدنی گرماب سمنان با استفاده از دستگاه گرانی‌سنج CG5 در چندین پروفیل اندازه‌گیری و سپس تصحیحات لازم بر روی داده‌ها انجام شد.

در این مطالعه ارتفاع‌های بهینه برای ادامه فراسو تخمین زده شد. برای این منظور، ادامه فراسو تا ارتفاع‌های مختلف روی نقشه بوگه اعمال شد و در نهایت یک ارتفاع بهینه تخمین زده شد. برای این‌که مقایسه بهتری برای جداسازی آنومالی‌ها صورت گیرد؛ از روش روند سطحی نیز برای جداسازی استفاده شد و با نقشه‌های آنومالی باقی‌مانده ادامه فراسو مقایسه انجام شد، عمق آنومالی‌های گرانی با استفاده از روش اویلر تخمین زده شد و همچنین با استفاده از نرم‌افزار Geosoft داده‌ها به صورت دوبعدی مدل‌سازی شد؛ که با این روش شکل آنومالی‌ها تخمین زده شد. عمق توده حدود ۳۰ تا ۶۰ متر به دست آمد و ۴ نقطه برای حفر گمانه پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی: گرانی‌سنجی، اویلر، ارتفاع بهینه، مدل‌سازی، گرماب، سولفات سدیم

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: کلیات ۱
- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- سابقه موضوع ۳
- ۳-۱- ضرورت انجام تحقیق ۴
- ۴-۱- روش تحقیق ۵
- ۵-۱- ساختار پایان نامه ۵
- ۲- فصل دوم: اصول و مبانی روش گرانی سنجی ۷
- ۱-۲- مقدمه ۸
- ۲-۲- گرانش ناشی از شکل زمین (گرانی نرمال) ۱۰
- ۳-۲- دستگاه‌های اندازه‌گیری گرانی ۱۲
- ۱-۳-۲- گرانی‌سنج CG5 ساخت شرکت سینترکس کشور کانادا ۱۴
- ۴-۲- روش کار در گرانی‌سنجی ۱۴
- ۵-۲- کالیبره کردن دستگاه گرانی‌سنج ۱۵
- ۶-۲- تصحیحات و پیش‌پردازش داده‌های اندازه‌گیری شده از عملیات صحرایی ۱۶
- ۱-۶-۲- تصحیح رانه دستگاه ۱۹
- ۲-۶-۲- تصحیح اثر جزر و مد ۲۰
- ۳-۶-۲- تصحیح عرض جغرافیایی ۲۰
- ۴-۶-۲- تصحیح ارتفاعی ۲۱
- الف- تصحیح هوای آزاد ۲۲
- ب- تصحیح تخته بوگه ۲۳
- ۵-۶-۲- تصحیح زمینگان (توپوگرافی) ۲۴
- ۳- فصل سوم: زمین‌شناسی محدوده معدنی سولفات سدیم گرماب، عملیات گرانی‌سنجی ۳۱۱
- ۱-۳- مقدمه ۳۲۲

| | |
|-----|---|
| ۳۲۲ | ۲-۳- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی |
| ۳۳۳ | ۳-۳- زمین‌شناسی |
| ۳۴ | ۴-۳- پیشینه مطالعات اکتشافی منطقه |
| ۳۷ | ۵-۳- طراحی عملیات صحرایی |
| ۳۷ | ۶-۳- برداشت صحرایی |
| ۳۸ | ۳-۶-۱- کالیبراسیون دستگاه |
| ۳۷ | الف- کالیبراسیون استاتیکی |
| ۳۷ | ب- کالیبراسیون دینامیکی |
| ۴۱ | ۳-۷- پیش‌پردازش و تصحیح داده‌ها |
| ۴۷۷ | ۴- فصل چهارم: پردازش، تفسیر و مدل‌سازی داده‌های گرانی منطقه گرماب |
| ۴۸۸ | ۴-۱- پردازش و تفکیک آنومالی‌ها و تفسیر نتایج |
| ۵۰ | ۴-۲- روش روند سطحی |
| ۵۴ | ۴-۳- اعمال فیلتر گسترش میدان گرانی به سمت بالا |
| ۶۱ | ۴-۴- ارتفاع بهینه |
| ۶۲ | ۴-۴-۱- برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو |
| ۶۵ | ۴-۵- اعمال فیلتر مشتق مرتبه اول و دوم |
| ۶۸ | ۴-۶- اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی روی داده‌های گرانی |
| ۷۰ | ۴-۷- شناسایی گسل‌های محدوده و تعیین حدود آنومالی‌های گرانی سنجی |
| ۷۲ | ۴-۸- تفسیر کمی داده‌ها |
| ۷۳ | ۴-۹- مدل‌سازی |
| ۷۷۷ | ۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات |
| ۷۸۸ | ۵-۱- نتیجه‌گیری |
| ۸۱۱ | ۵-۲- پیشنهادات |
| ۸۳ | منابع |

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: الف: مقایسه بیضوی مرجع با کره‌وار مرجع با ژئوئید، ۱۲
- شکل ۲-۲: نحوه رفت و برگشت و قرائت نقاط برای کالیبره کردن دستگاه ۱۵
- شکل ۳-۲: مراحل مختلف تصحیحات داده‌های گرانی ۱۸
- شکل ۴-۲: روش حذف رانه دستگاه ۱۹
- شکل ۵-۲: تصحیح بوگه روی ایستگاه زمینی ۲۴
- شکل ۶-۲: تصحیح توپوگرانی داده‌های گرانی ۲۵
- شکل ۷-۲: منطقه‌بندی اطراف ایستگاه برداشت گرانی برای محاسبه اثر توپوگرافی ۲۷
- شکل ۸-۲: منشور و رابطه مدل شده برای به‌دست آوردن مقدار تصحیح توپوگرافی ۲۸
- شکل ۹-۲: منشور و رابطه مدل شده برای به‌دست آوردن مقدار تصحیح توپوگرافی ۲۹
- شکل ۱-۳: موقعیت شهر سمنان روی تصویر ماهواره‌ای و راه دسترسی به معدن گرماب ۳۲
- شکل ۲-۳: نقشه مناطق ساختاری ایران و محل معدن سولفات سدیم گرماب ۳۳
- شکل ۳-۳: نقشه آنومالی باقی‌مانده گرانی پس از به‌کارگیری فیلتر روند سطح مرتبه اول ۳۶
- شکل ۴-۳: شبکه برداشت داده‌های گرانی بر روی محدوده مورد مطالعه ۳۷
- شکل ۵-۳: نقشه‌برداری و قرائت ایستگاه‌های گرانی در محدوده گرماب (سمنان) ۴۰
- شکل ۶-۳: نقشه آنومالی بوگه ساده محدوده معدنی گرماب ۴۲
- شکل ۷-۳: نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌ها ۴۳
- شکل ۸-۳: نقشه توپوگرافی منطقه اطراف محدوده مورد بررسی برای تصحیح اثر زون ۴۴
- شکل ۹-۳: آنومالی بوگه کامل نسبی محدوده معدنی گرماب ۴۵
- شکل ۱-۴: نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده حاصل از اعمال فیلتر روند سطح مرتبه یک ۵۲
- شکل ۲-۴: نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده حاصل از اعمال فیلتر روند سطح مرتبه دوم ۵۳
- شکل ۳-۴: نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده حاصل از اعمال فیلتر روند سطح مرتبه سوم ۵۴
- شکل ۴-۴: نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۱۰ متر ۵۶
- شکل ۵-۴: نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۲۰ متر ۵۷
- شکل ۶-۴: نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۴۰ متر ۵۸
- شکل ۷-۴: نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۶۰ متر ۵۹
- شکل ۸-۴: نقشه گسترش میدان گرانی باقی‌مانده مرتبه اول به سمت بالا ۶۰
- شکل ۹-۴: نقشه گسترش میدان گرانی باقی‌مانده مرتبه اول به سمت بالا ۶۰
- شکل ۱۰-۴: مقدار انحراف از خط واصل میان دو نقطه ابتدایی و انتهایی ۶۳

- شکل ۴-۱۱: مقادیر همبستگی عرضی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای و نتایج ادامه فراسو..... ۶۳
- شکل ۴-۱۲: نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده از کسر گسترش میدان به سمت بالا..... ۶۴
- شکل ۴-۱۳: نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده از کسر گسترش میدان به سمت بالا..... ۶۴
- شکل ۴-۱۴: نقشه مشتق قائم مرتبه اول محدوده معدنی گرماب ۶۶
- شکل ۴-۱۵: نقشه مشتق قائم مرتبه دوم محدوده معدنی گرماب ۶۷
- شکل ۴-۱۶: نتیجه اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی روی داده‌های گرانی ۶۹
- شکل ۴-۱۷: نقشه زاویه تمایل داده‌های گرانی منطقه مورد مطالعه ۷۱
- شکل ۴-۱۸: تخمین عمق به روش اویلر بر روی نقشه باقی‌مانده گرانی ۷۳
- شکل ۴-۱۹: نقشه آنومالی باقی‌مانده ناشی از فیلتر روند سطح درجه دو ۷۴
- شکل ۴-۲۰: مدل‌سازی وارون بر روی پروفیل یک نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده ۷۵
- شکل ۴-۲۱: مدل‌سازی وارون بر روی پروفیل یک نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده با قید ۷۶
- شکل ۵-۱: نقشه آنومالی‌های گرانی باقی‌مانده در منطقه مورد مطالعه ۷۹
- شکل ۵-۲: موقعیت آنومالی‌های گرانی باقی‌مانده و محل حفر گمانه‌ها. ۸۰

فهرست جداول

جدول ۳-۱: نمونه‌ای از برداشت داده‌های گرانی در محدوده ۳۷

جدول ۵-۱: معرفی مختصات نقاط امیدبخش معدنی واقع در محدوده ۸۱

فصل اول:

کلیات

ژئوفیزیک علمی است که بر مبنای فیزیک حاکم بر زمین و جو اطراف آن عمل می‌کند [Telford et al., 1990]. این علم شامل مطالعاتی است با هدف جستجوی ذخایر پنهان سودمند که این امر به کمک اندازه‌گیری‌های یک پارامتر فیزیکی در سطح میسر می‌باشد. روش‌های ژئوفیزیکی بر اساس خواص مختلفی استوار هستند که در هر پروژه انتخاب روش مناسب بسیار حائز اهمیت است [Reynolds et al, 1977].

یکی از موارد مهم در اکتشاف منابع معدنی شناخت وضعیت عمقی، شیب و جهت گسترش کانسار می‌باشد. بدین منظور از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود. یکی از این روش‌ها گرانی‌سنجی است که با استفاده از تباين چگالی سنگ‌ها و اندازه‌گیری بی‌هنجاری گرانی به معدن‌کاران برای اکتشاف کمک می‌کند. معمولاً برای اکتشاف ذخایر غیرفلزی، با توجه به ارزش اقتصادی پایین‌تر آن‌ها نسبت به ذخایر فلزی از روش‌های پرهزینه اکتشافی استفاده نمی‌شود و تنها از روش‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی محدودی برای این مطالعات استفاده می‌شود. کانی سولفات سدیم از این دسته مواد است؛ که پیش‌تر از این برای اکتشاف آن از روش‌های ژئوشیمیایی استفاده می‌شد [جودی و عرب امیری، ۱۳۹۰].

روش‌های ژئوشیمیایی در اکتشاف ذخایر بزرگ این کانی تنها به تعیین محل‌های تقریبی قرارگیری آنومالی‌ها محدود می‌شود. ذخایر حاوی سولفات سدیم عمدتاً در حاشیه کویرها و پلایاها تشکیل می‌شود. شواهد نیز گویای آن است که در اطراف اغلب پلایاهای ایران نظیر حواشی کفه‌های ورامین، قم، گرمسار تا دامغان قابلیت تشکیل سولفات سدیم وجود دارد. تاکنون روش گرانی‌سنجی برای اکتشاف کرومیت، مس، سرب، روی، نمک، قیر طبیعی، پایش سطح آب زیرزمینی، پتاس و برای تعیین محل تله‌های نفتی، تعیین ضخامت پوسته، مورد استفاده قرار گرفته است، هدف این تحقیق به کار بردن روش گرانی‌سنجی برای اکتشاف سولفات سدیم در منطقه معدنی شرق سمنان است.

۱-۲- سابقه موضوع

دیویس و همکاران (۱۹۵۷) در ایالت کاماگوئی کوبا از روش گرانی سنجی برای اکتشاف کرومیت استفاده کردند که در نتیجه عمق کرومیت در محدوده مورد نظرشان تخمین زده شد. لی و الدنبرگ (۱۹۹۸) اگوریتیمی ارائه کردند و داده‌های گرانی را مدل‌سازی سه‌بعدی کردند. فدی و همکاران (۱۹۹۹) از روش گسترش میدان به سمت بالا جهت جداسازی داده‌های میدان پتانسیل استفاده کردند. زنگ و همکاران (۲۰۰۷) در شمال شرق چین به منظور جداسازی آنومالی بوگه گرانی ته‌نشست معدنی در شمال شرق چین از تخمین ارتفاع بهینه بر روی گسترش میدان به سمت بالا استفاده کرد. صمیمی (۱۳۷۸) مطالعه معدن سولفات سدیم گرماب جهت تهیه نقشه زمین‌شناسی محل معدن و برآورد و حفر ترانشه و اکتشافات عمقی و نمونه‌برداری و تعیین ذخیره اکتشافات به اجرا درآمد و نتایج آن تحت عنوان «ارزیابی لایه سولفات در ناحیه معدن سولفات سدیم گرماب» گزارش شد. مراد زاده و همکاران (۱۳۸۳) از داده‌های گرانی برای اکتشاف تله‌های هیدروکربوری استفاده کرد، از این عملیات نتیجه گرفته شد که روش گرانی‌سنجی در تعیین محل ساختارهای زیرسطحی پوشیده و همچنین تعیین ضخامت حوضه‌های رسوبی در مراحل اولیه اکتشاف نفتی بسیار مؤثر می‌باشد. قدیمی عروس‌محل (۱۳۸۳) وضعیت محیط رسوبی تشکیل‌دهنده سولفات سدیم را به لحاظ زمین‌شناسی محیط در کویر میقان اراک بررسی کرد و به لحاظ موارد اکتشافی ارزیابی نمود. انصاری (۱۳۸۵) قابلیت‌های روش گرانی‌سنجی را جهت تعیین مشخصات کانسارهای سنگ‌آهن بررسی کرد و توانست ضخامت توده معدنی را با استفاده از نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده مشخص کند. رشیدی گویا (۱۳۸۹) قیر طبیعی (گیلسونیت) را به‌وسیله روش‌های گرانی‌سنجی و مقاومت ویژه الکتریکی اکتشاف کرد.

جودی و عرب امیری (۱۳۹۰) تأثیر وجود سولفات سدیم بر مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه الکتریکی را بررسی کرد و توانست با مدل‌سازی، مناطق بی‌هنجار را شناسایی کند. روش‌شناسی و همکاران

(۱۳۹۳) ارتفاع بهینه در ادامه فراسو داده‌های گرانی را به منظور اکتشاف کرومیت در استان هرمزگان برآورد کردند که از این تحقیق پاسخ مناسبی جهت جداسازی بی‌هنجاری محلی و ناحیه‌ای حاصل شد. صیادی (۱۳۹۳) با به کار بردن روش گرانی‌سنجی در منطقه قره‌آغاج ویژگی‌های گنبد نمکی منطقه را بررسی کرد و در نتیجه توانست عمق و محدوده گنبد نمکی منطقه قره‌آغاج را تخمین زند. شرکت معدنی املاح ایران (۱۳۹۳) در معدن سولفات سدیم گرماب مطالعات زمین‌شناسی انجام داد و جهت طراحی استخراج شکل کانسارها را تعیین کرد.

شبانیان (۱۳۹۴) بررسی‌های تکمیلی زمین‌شناسی ساختاری در محدوده معدن گرماب را انجام داد و در نتیجه آن گزارش زمین‌شناسی ساختاری معدن سولفات سدیم گرماب تهیه و محدوده مورد بررسی کامل‌تری به لحاظ ژنزی قرار گرفت. مصطفایی (۱۳۹۴) برای اکتشاف کانسار سولفات سدیم منطقه گرماب از روش مقاومت الکتریکی استفاده کرد که نتیجه مثبتی نداشت. آقاجانی (۱۳۹۵) از روش گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف سولفات سدیم معدن گرماب استفاده کرد و نتایج مثبتی از روش گرانی-سنجی به دست آورد اما روش مغناطیس‌سنجی نتیجه قابل قبولی نداشت.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به این که سولفات سدیم ماده معدنی ارزشمندی است و به لحاظ صنایع مورد استفاده پرکاربرد می‌باشد و نیز برای صادرات قابل توجه است و با توجه به این که روش‌های مغناطیس‌سنجی و ژئوالکتریک روی منطقه انجام شده ولی نتایج مطلوبی به دست نیامده بود، شرکت معدنی املاح ایران تصمیم گرفت که به وسیله گرانی‌سنجی نیز این موضوع بررسی شود. باید ذکر شود که به علت اختلاف چگالی محسوسی که بین سنگ‌های دربرگیرنده منطقه (بر اساس مطالعات زمین‌شناسی انجام شده) و سولفات سدیم وجود دارد؛ پیش‌بینی می‌شود که به توان این کار را با روش گرانی‌سنجی انجام داد. با در نظر گرفتن شرایط ذکر شده مانند تباین چگالی‌ای که بین سولفات سدیم و سایر لایه‌های رسوبی وجود دارد، هدف این تحقیق بررسی

امکان استفاده از روش گرانی‌سنجی برای شناسایی لایه‌های سولفات سدیم می‌باشد.

روش گرانی‌سنجی یک روش سطحی و بدون تخریب منطقه و بدون نیاز انجام هزینه‌های زیاد به دلیل حفاری می‌باشد لذا با این روش می‌توان تا حدودی وضعیت مواد معدنی را شناسایی کرد و محل حفر گمانه‌های اکتشافی را برای عملیات اکتشافی بیشتر تعیین نمود.

۱-۴- روش تحقیق

ابتدا همه داده‌ها و اطلاعات موردنیاز و مطالعات کتابخانه‌ای در خصوص به‌کارگیری روش گرانی‌سنجی در اکتشاف مواد معدنی به‌ویژه سولفات سدیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس بر اساس اطلاعات موجود شبکه اکتشافی و برداشت داده‌ها طراحی و بر روی محل پیاده‌سازی می‌شود. پس از آن با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال، محدوده موردنظر نقشه‌برداری می‌شود؛ به‌طوری‌که مختصات نقاط برداشت و محدوده اطراف آن تعیین شود.

پس از انجام نقشه‌برداری، با استفاده از دستگاه گرانی‌سنج CG5 مقادیر گرانی نقاط، برداشت و سپس تصحیح می‌شوند. پس از تصحیح داده‌ها به‌منظور شناسایی آنومالی‌های منطقه، داده‌های برداشت‌شده پردازش و تفسیر می‌شوند.

در این مرحله با استفاده از نرم‌افزارهای Geosoft، Winglink و کدنویسی در محیط متلب، پردازش داده‌ها انجام می‌شود و سپس با استفاده از نتایج اولیه داده‌ها و مطالعات زمین‌شناسی منطقه، داده‌های گرانی محدوده مورد مطالعه تفسیر می‌شود.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

برای رسیدن به اهدافی که در پایان‌نامه مدنظر بوده، این پایان‌نامه در پنج فصل تنظیم شده است به‌طوری‌که در فصل اول کلیات مربوطه بیان شده است. در این فصل پس از مقدمه، ضرورت، هدف از تحقیق و روش انجام آن بیان شده است. در ادامه در فصل دوم مبانی و اصول روش گرانی‌سنجی بیان می‌گردد. در

فصل سوم، محدوده زمین‌شناسی گرماب، نحوه برداشت داده‌ها و تصحیحات ذکر شده است. در فصل چهارم پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های برداشت‌شده انجام گرفته و در نهایت نتایج تحقیق و پیشنهادات در فصل پنجم ارائه شده است.

۲- فصل دوم:

اصول و مبانی روش گرانی سنجی

۲-۱- مقدمه

امروزه روش‌های ژئوفیزیکی نقش بسیار مهمی را در اکتشاف ایفا می‌کنند. در حوزه مواد هیدروکربوری برای اکتشاف مقدماتی و در حوزه مواد معدنی برای اکتشاف نهشته‌های معدنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. روش گرانی‌سنجی در عملیات اکتشاف، برای اهدافی مانند شناسایی عمق سنگ‌بستر (در اکتشاف نفت و گاز) و چه برای شناسایی توده‌های معدنی به کار گرفته می‌شود [ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۹۰]. ویژگی روش گرانی‌سنجی که آن را از سایر روش‌های ژئوفیزیکی متمایز می‌سازد، پایستار بودن میدان‌های اندازه‌گیری شده است. با استفاده از این روش در مرحله اکتشاف مقدماتی که هیچ‌گونه اطلاعات قبلی موجود نیست با صرف وقت و هزینه کم، می‌توان مشخصات ساختاری منطقه را بررسی کرد [Dobrin and Savit, 1988] در کنار مزیت‌های گفته شده، این روش دارای معایبی نیز می‌باشند. از جمله این‌که آنومالی حاصله از یک منبع زیرسطحی منحصربه‌فرد نیست، یعنی تعداد بی‌شماری اشکال زیرسطحی مختلف می‌توانند آنومالی‌های یکسانی در سطح زمین ایجاد نمایند. برای کاستن از دامنه ابهامات باید از اطلاعات زمین‌شناسی بهره گرفت. هر چه میزان این اطلاعات بیشتر باشد از ابهامات کاسته شده و تعبیر و تفسیر مطمئن‌تری انجام می‌شود [کلاگری، ۱۳۷۱].

۲-۲- روش گرانی‌سنجی

گرانی‌سنجی اندازه‌گیری و مطالعه میدان گرانی زمین است. در ژئوفیزیک اکتشافی بررسی و مطالعه بی‌هنجاری‌های گرانی (بوگه) از دیرباز برای اکتشاف نفت و معدن مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای مطالعات گرانی در اکتشاف ناهمگونی محلی چگالی کانی‌ها سنگ‌ها است. تباین چگالی بین هدف موردنظر و سنگ میزبان به‌اضافه حجم آن بازتابی به‌صورت تغییر میدان گرانی خواهد داشت که معمولاً از مقدار زیادی برخوردار نیست [ابراهیم‌زاده اردستانی، ۱۳۹۰].

۲-۲-۱- قانون گرانش نیوتن^۱

نیروی گرانش با قانون نیوتن بیان می‌شود که مبنای کارهای گرانی‌سنجی است. با حاصل ضرب جرم‌ها نسبت m_1 و m_2 نیروی گرانشی توسط قانون نیوتن بیان می‌شود: نیروی میان دو ذره با جرم‌های مستقیم و با مربع فاصله میان مراکز دو جرم نسبت معکوس دارد. هرچه فاصله مراکز دو جسم بیشتر باشد، نیروی جاذبه کم‌تری بین آن‌ها وجود دارد [Telford, 1990].

$$F = \gamma \left(\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \right) r_1 \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

که در آن F نیروی وارده بر m_2 ، r_1 بردار واحدی که جهت آن از m_2 به m_1 می‌باشد، r فاصله میان m_1 و m_2 و γ ثابت جهانی گرانش می‌باشد. نکته مهم این است که نیروی F همواره جاذبه است. در سیستم SI، مقدار γ برابر است با $6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ که با مقدار $6.672 \times 10^{-8} \text{ dyn.cm}^2/\text{g}^2$ در سیستم cgs معادل است.

۲-۲-۲- شتاب جاذبه^۲

طبق قانون نیوتن، نیرو برابر است با حاصل ضرب جرم در شتاب. با تقسیم F بر m_2 ، شتاب جرم m_2 ناشی از حضور جرم m_1 به دست می‌آید:

$$g = \left(\gamma \frac{m_1}{r^2} \right) r_1 \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

در صورتی که m_1 جرم زمین باشد (M_e)، g برابر خواهد بود با شتاب گرانی و با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g = \left(\gamma M_e / R_e^2 \right) r_1 \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

که در آن R_e شعاع زمین بوده و در جهت r_1 به سمت مرکز زمین است. رابطه فوق نشان می‌دهد که

¹ Newton's Law of Gravitation

² Gravitational acceleration

بزرگی شتاب گرانشی درروی زمین، با جرم زمین نسبت مستقیم و با مربع شعاع زمین نسبت عکس دارد بنابراین، از نظر تئوری شتاب گرانشی باید در تمام نقاط زمین ثابت باشد، اما در واقعیت، گرانی در نقاط مختلف زمین متغیر است. دلیل این امر این است که شکل زمین یک کره نیست، همچنین توپوگرافی سطحی نامنظم زمین و توزیع متفاوت جرم درون زمین (به‌ویژه نزدیک سطح) و چرخش زمین بر تغییر شتاب گرانش تاثیر می‌گذارند.

۲-۳- گرانش ناشی از شکل زمین (گرانی نرمال)^۱

با توجه به اختلاف توپوگرافی، ناهمگن بودن زمین در نقاط مختلف و عوامل دیگر، نیروی گرانشی از یک نقطه به نقطه دیگر روی زمین متفاوت است. شکل ژئوئید متأثر از جرم‌های زیر آن است به‌طوری‌که شکل آن در بالای جرم‌های زیاد (به‌عنوان مثال رشته‌کوه‌ها و مناطق با دانسیته زیاد) حالت برآمده و در مناطق با جرم‌های کم (مثل دره‌ها و نقاطی با چگالی کم) فرورفته خواهد بود. مقدار گرانی به پنج عامل عرض جغرافیایی، ارتفاع، توپوگرافی زمین‌های اطراف، جزر و مدهای زمین، و تغییرات چگالی در زیر سطح بستگی دارد. هدف از اکتشاف گرانی، بررسی آنومالی‌های ناشی از عامل آخر می‌باشد که معمولاً این آنومالی‌ها بسیار کوچک‌تر از تغییرات ناشی از عرض جغرافیایی و ارتفاع، و بزرگ‌تر از آنومالی‌های مربوط به جزر و مد و توپوگرافی می‌باشند.

با توجه به پیچیدگی تغییرات چگالی در زمین و همگن نبودن کره آن و وجود نیروی گریز از مرکز عامل تخت‌شدگی در زمین به وجود می‌آید که؛ برای تعریف آن نیاز به یک بیضی گردان وجود دارد که به بیضوی مرجع گویند. شکل این بیضوی به‌وسیله دو پارامتر شعاع استوائی a و شعاع قطبی b توصیف می‌شود و اغلب برحسب پارامتر تخت‌شدگی $f = \frac{a-b}{a}$ بیان می‌گردند. مقدار گرانی روی این بیضوی که با فرمول اصلی و مبنایی زیر قابل محاسبه است، را گرانی نرمال گویند.

¹Normal Gravity

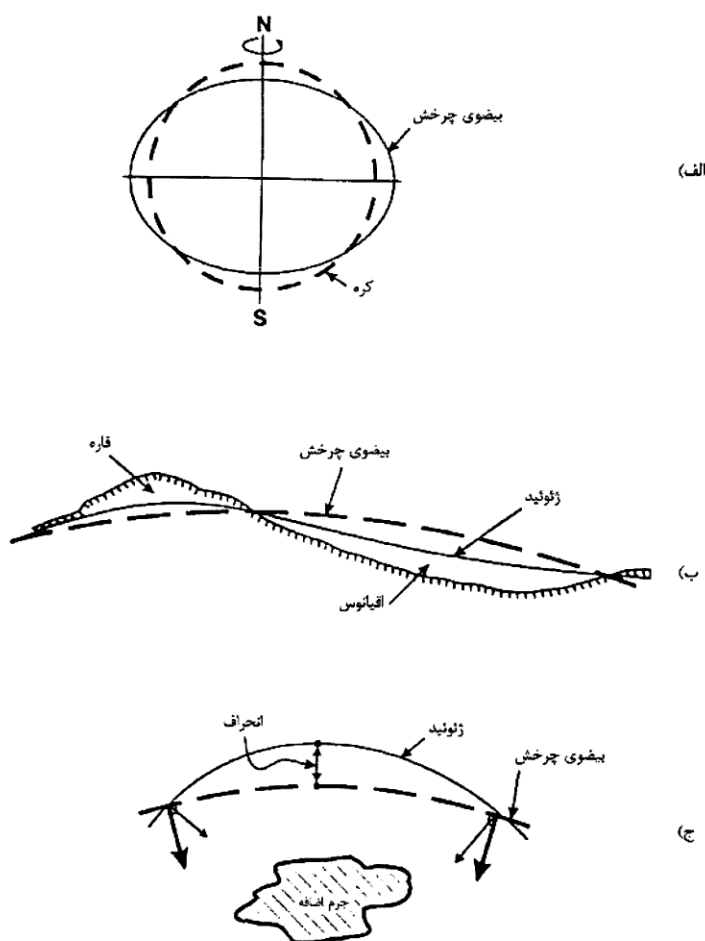
$$\gamma_{\varphi} = \gamma_e (1 + \alpha \sin^2 \varphi - \beta \sin^2 2\varphi) \quad (4-2)$$

که در آن، γ_e میزان شتاب جاذبه استوایی شبه کره می‌باشد و ضرایب α و β فقط به پارامترهای جرم زمین، میزان تخت‌شدگی، سرعت زاویه‌ای و نیم قطر بزرگ بیضوی بستگی دارند.

با پیشرفت روزافزون فناوری ماهواره‌ها و اندازه‌گیری‌های دقیق فضایی، تعداد بیضوی‌های مرجع نیز افزایش یافته است. به طوری که در سال ۱۹۸۰ میلادی انجمن ژئودزی جهانی (IAG) سیستم مرجع ژئودتیک جدیدی را ارائه داده که در نهایت به سیستم مرجع ژئودتیک جهانی ۱۹۸۴ منجر شده (WGS84) که فرمول کلی آن به صورت رابطه (۵-۲) است و در محاسبات تعیین گرانی نرمال نقاط از آن استفاده گردید [Moritz, 1984].

$$\gamma_{\varphi} = 9.7803267714 \times \frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 \varphi}} \quad (5-2)$$

تغییر گرانی از نواحی استوایی به قطبی حدود ۵ گال، یا ۵ درصد مقدار متوسط شتاب گرانی است و تأثیر ارتفاع نیز به اندازه یک‌دهم گال (۰/۱ گال) یا یک‌صدم صد مقدار شتاب گرانی می‌رسد. یک آنومالی گرانی که آنومالی بزرگی به حساب می‌آید، حدود ۱۰ میلی‌گال است. بنابراین، تغییرات شتاب گرانی که در اکتشاف حائز اهمیت هستند، در مقایسه با مقدار آن و همچنین اثر ارتفاع و عرض جغرافیایی بسیار کوچک می‌باشند. خوشبختانه می‌توان با دقت قابل قبولی تأثیر اکثر عواملی که در اکتشاف به‌عنوان نوفه به حساب می‌آیند را حذف کرد.



شکل ۲-۱: الف: مقایسه بیضوی مرجع با کره وار مرجع با ژئوئید.

ب: انحراف بزرگ مقیاس ژئوئید، ج: انحراف ژئوئید در اثر آنومالی‌های محلی [Blakely 1995]

۲-۴- دستگاه‌های اندازه‌گیری گرانی

به‌طور کلی چهار نوع و سیستم دستگاهی ترازوی پیچشی (مقاصد ژئودزی)، پاندول (شتاب مطلق)، گراویمتر یا گرانی‌سنج (اندازه‌گیری شتاب نسبی یا اختلاف شتاب گرانی) و دستگاهی که بر اساس سقوط وزنه کار می‌کند (اندازه‌گیری شتاب مطلق) در کاوش‌های گرانی به کار برده شده‌اند. متداول‌ترین وسایل اندازه‌گیری شتاب جاذبه زمین می‌باشد و به دو گروه عمده پایدار و ناپایدار تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول یا دستگاه‌های پایدار، معمولاً دارای عنصر حساسی (مثل فنر) هستند؛ که وزنه‌ای به آن آویزان شده است و

هنگامی که شتاب جاذبه تغییر کند، موقعیت آن نیز تغییر کرده و دستگاه از حالت تعادل خارج می‌گردد. به علت جابجایی کم لازم است ابتدا به روش نوری، مکانیکی و یا الکتریکی تقویت و سپس اندازه‌گیری کرد. در دسته ناپایدار، پس از آن که عضو حساس تغییر مکان داد، نیرویی به آن اعمال می‌شود که سبب افزایش تغییر مکان دستگاه می‌گردد [Telford et al, 1990]. از انواع گروه اول می‌توان به گرانی‌سنج اسکانیا و گرانی‌سنج گلف اشاره کرد و از گروه دوم نوع تیسن و لاکوست رومبرگ را می‌توان نام برد.

توسعه و کاربرد گرانی‌سنج برای اندازه‌گیری صحرایی میدان گرانی زمین به اوایل دهه ۱۹۳۰ مربوط است. دستگاه‌های اولیه از نوع پایدار بوده‌اند این دستگاه‌ها به‌طور کلی توسط نوع حساس‌تر ناپایدار جایگزین شده‌اند و فقط از لحاظ تاریخی اهمیت دارند. تمام گرانی‌سنج‌ها اساساً ترازوهای مکانیکی بسیار حساس هستند که در آن‌ها جرمی توسط یک فنر نگهداری می‌شود. تغییرات جزئی گرانی سبب حرکت وزنه در مقابل نیروی بازگرداننده فنر می‌شود. در نوع پایدار نیاز به تقویت قابل‌ملاحظه تغییرات بسیار کوچک فنر وجود دارد. عمل تقویت ممکن است مکانیکی، نوری، الکتریکی یا ترکیبی از آن‌ها باشد. گرانی‌سنج‌های ناپایدار که به ناپایا هم معروف هستند، دارای یک نیروی بازگرداننده منفی هستند؛ که نظیر نیروی گرانشی در مقابل فنر بازگرداننده عمل می‌کند [Telford et al, 1990]. این دستگاه‌ها اصولاً در حالتی از تعادل ناپایدارند و لذا حساس‌تر از انواع پایدارند.

قابل‌ذکر است که اندازه‌گیری مقدار گرانی مطلق در یک نقطه با مشکلات فراوان روبرو بوده و محدودیت‌هایی به همراه دارد. از این‌رو در اکتشافات از گرانی‌سنج استفاده می‌شود که شتاب نسبی را اندازه می‌گیرد. ویژگی مهم همه گرانی‌سنج‌ها حساسیت بالا و دوره طولانی آن‌ها است که باعث ایجاد خطا می‌شود از آن در اکتشافات استفاده می‌شود [Lacoste, 1973].

۲-۴-۱- گرانی سنج CG5 ساخت شرکت سینترکس کشور کانادا^۱

از شروع کاربردی این روش ژئوفیزیکی گرانی سنج‌های مختلفی طراحی و به بازار ارائه شده است؛ که یکی از معروف‌ترین و دقیق‌ترین آن‌ها گرانی سنج CG5 است. این دستگاه در مطالعه سطح آب‌های آزاد، در تحقیقات ژئوفیزیکی جابجایی و حرکت عمودی پوسته، ارتباط با GPS برای تکمیل و بازبینی جابجایی اندازه‌گیری شده هنگام برداشت نقاط، تعیین کردن ژئوئید، حرکت شارش ماگمای آتش‌فشانی، تحقیقات زلزله‌ای، مطالعه مدل الاستیسیته زمین و کشند و اکتشاف نفت و مواد معدنی و کارهای مهندسی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دقت اندازه‌گیری آن‌ها بین ۰/۱ میلی‌گال تا ۱ میکروگال است. اندازه‌گیری در هر ایستگاه بسته به شرایط در حد ۵ دقیقه قابل قرائت می‌باشد. نتایج حاصل از برداشت داده‌ها به صورت پروفیلی و نقشه‌های مختلف آنومالی گرانی (دوبعدی و سه‌بعدی) قابل ارائه است. [CG-5 Manual, 2010].

از ویژگی‌های این دستگاه می‌توان به موارد زیر نیز اشاره کرد:

| | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| • انحراف استاندارد کمتر از ۵ میکروگال | • دارای GPS |
| • سادگی و سهولت به کارگیری گراویمتر | • نمایش و ثبت داده‌های لازم |
| • قابلیت تکرار عملیات صحرائی عالی | • سبک‌ترین دستگاه گراویمتری |
| • سنسور قوی و مقاوم | • باتری‌های هوشمند |
| • نمایشگر گرافیکی بزرگ | • فرمت‌های قابل انعطاف داده‌ها |
| • صفحه کلید عدد و الفبایی | • قابلیت انتقال داده‌ها به کامپیوتر |

۲-۵- روش کار در گرانی‌سنجی

برای انجام عملیات گرانی‌سنجی در یک منطقه، ابتدا روی نقشه اولیه منطقه شبکه برداشت داده‌ها مشخص می‌شود. ساختار شبکه برداشت داده‌ها یعنی فواصل نقاط اندازه‌گیری و پروفیل‌ها به مقیاس و نوع کاوش بستگی دارد. در پی‌جویی‌های نفتی این فواصل ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر تا بیشتر است ولی در مورد اکتشاف سایر کانسارها معمولاً بین ۱۰ تا ۵۰ متر و یا کمتر می‌باشد. در این‌گونه از عملیات‌ها پس از طراحی شبکه و

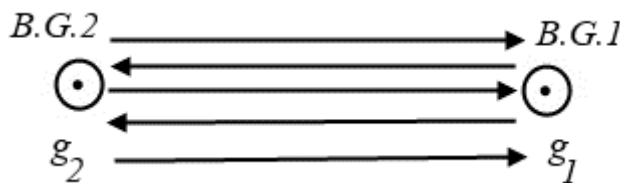
^۱Canada, Scintrex

تعیین نقاط ایستگاهی از روی نقشه، ایستگاه‌های برداشت گرانی روی زمین با یک دستگاه GPS دستی پیاده‌سازی شده و سپس مختصات و ارتفاع کلیه نقاط ایستگاهی و نقاط عارضه‌ای دیگر برای تهیه مختصات دقیق نقاط ایستگاهی و نقشه توپوگرافی، با یک دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن یا یک GPS دو یا سه فرکانسه مورد برداشت و محاسبه قرار می‌گیرد.

در عملیات گرانی‌سنجی، همراه با انتخاب ایستگاه‌ها، یک سری ایستگاه‌های مبنا که طی شبکه معینی به هم ارتباط دارند، باید انتخاب شود. این ایستگاه‌ها که به نام ایستگاه‌های تصحیح زمانی معروف هستند، باید در تمام طول منطقه برداشت داده پراکنده و در دسترس باشند.

۲-۶- کالیبره کردن دستگاه گرانی‌سنج

در هر منطقه‌ای جهت اطلاع از صحت عملکرد دستگاه، قبل از شروع عملیات گرانی‌سنجی باید دستگاه گرانی‌سنج را کالیبره نمود و ضریب دستگاه را برای آن منطقه تعیین نمود. زیرا ضریب دستگاه با گذشت زمان و عوامل مختلفی از قبیل افزایش و کاهش دما، ضربه و جابجایی به‌مرور تغییر می‌کند. بهتر است عمل کالیبراسیون در جاهایی انجام گیرد که عرض جغرافیایی آنجا با عرض جغرافیایی منطقه عملیاتی موردنظر مطابقت داشته باشد. برای این منظور دو ایستگاه که مقادیر گرانی مطلق آن‌ها مشخص است را تعیین نموده و سپس به طریق زیر عمل می‌کنند. دو ایستگاه اصلی زیر با مقادیر گرانی مطلق g_1 و g_2 در دست است:



شکل ۲-۲: نحوه رفت و برگشت و قرائت نقاط برای کالیبره کردن دستگاه

بین دو ایستگاه اصلی B.G.1 و B.G.2، با انجام دو رفت و برگشت پنج قرائت انجام می‌گیرد (سه قرائت در ایستگاه B.G.1 و دو قرائت در ایستگاه B.G.2). ذکر این نکته ضروری است که قرائت‌ها باید در مدتی

کمتر از ۲ ساعت انجام گیرند. حال اختلاف قرائت‌های دو ایستگاه حساب شده و در نهایت ضریب دستگاه از طریق رابطه (۶-۲) محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{\Delta g'}{\Delta g} \quad (6-2)$$

Δg : اختلاف جاذبه مطلق بین دو ایستگاه

$\Delta g'$: اختلاف جاذبه اندازه‌گیری شده بین دو ایستگاه

بعد از محاسبه ضریب فوق، با عدد مشابه در جدول ویژه ضریب دستگاه مقایسه می‌گردد. اگر اختلاف چندانی وجود نداشته باشد، همان ضریب جدول را در نظر می‌گیرند و گرنه ضریب جدیدی برای دستگاه محاسبه می‌شود. در واقع ضریب جدیدی برای دستگاه جهت تبدیل نمودن مقادیر قرائت‌شده به میلی‌گال محاسبه می‌گردد.

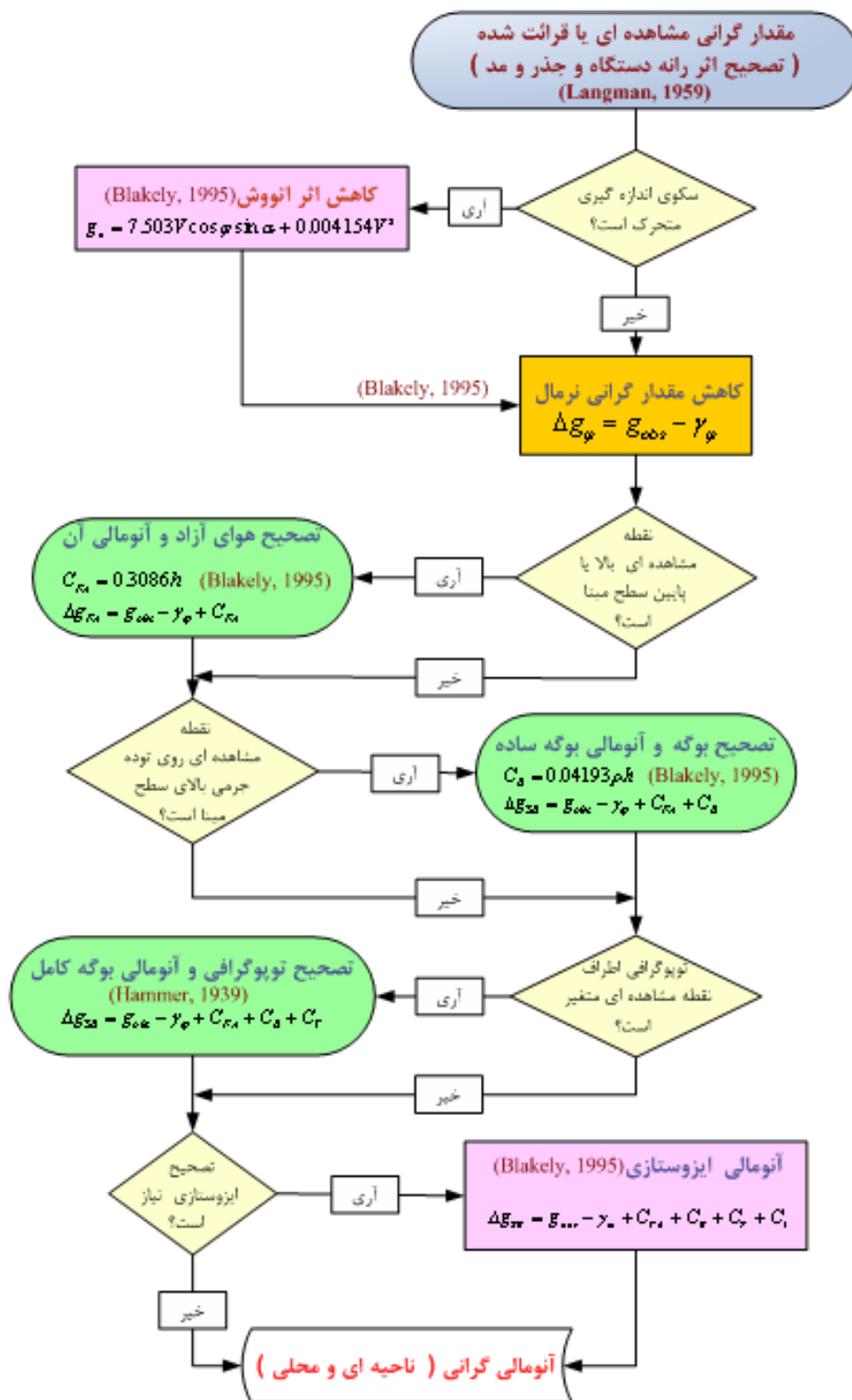
۲-۷- تصحیحات و پیش‌پردازش داده‌های گرانی‌سنجی

هدف نهایی از عملیات صحرائی گرانی‌سنجی به دست آوردن مقادیر شتاب گرانی است که ناشی از تغییرات وزن مخصوص لایه‌ها و سازندهای زیرین منطقه اکتشافی باشد و با توجه به تفسیر این تغییرات است که می‌توان به شکل و نوع آنومالی در منطقه پی برد. میدان گرانی در هر نقطه علاوه بر تغییرات وزن مخصوص لایه‌ها، ناشی از عوامل دیگری هم‌چون عرض جغرافیایی، توپوگرافی، جزر و مد و... می‌باشد از این رو برای اینکه اطلاعات به دست آمده فقط ناشی از تغییرات چگالی افق‌های زیرین زمین باشد، لازم می‌باشد که اثر عوامل مختلف دیگر را روی شتاب گرانی تمام نقاط محاسبه و حذف کرد. برای تفکیک مقدار آنومالی گرانی ناشی از تغییرات دانسیته محلی از اثرات ناحیه‌ای لازم است که تصحیحاتی مانند تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح توپوگرافی، تصحیح ارتفاعی، تصحیح اثر جزر و مد روی مقدار گرانی مشاهده‌ای صورت گیرد. برای رسیدن به این هدف برای مشخص نمودن تصحیحات باید هرکدام از آنها به‌عنوان بخشی از

گرانی مشاهده‌ای در نظر گرفته شود. در معادله زیرمجموعه مؤلفه‌هایی که در گرانی مشاهده‌ای مؤثر هستند به همراه تصحیح موردنظر آن بیان شده است [Blakely,1995].

گرانی مشاهده‌ای = شتاب ناشی از بیضوی مرجع (گرانی نرمال) + اثر ارتفاع بالای سطح دریا (هوای آزاد) + اثر جرم نرمال بالای سطح دریا (بوگه و توپوگرافی) + اثر جرم‌های ناشی از بارهای توپوگرافی (ایزوستازی) + اثر حرکت (تصحیح اتووش) + تغییرات وابسته به زمان (جزر و مد ناشی از اثر خورشید و ماه) + اثر تغییرات چگالی محلی (زمین‌شناسی)

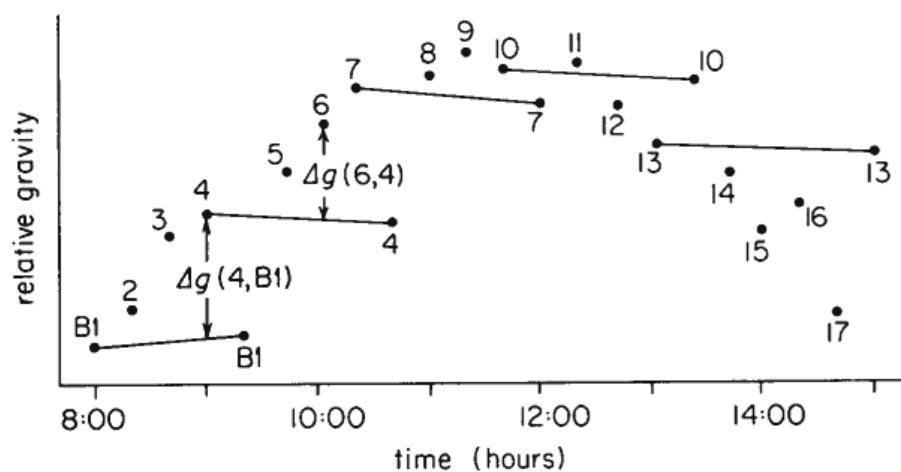
هدف نهایی در گرانی‌سنجی تفکیک مقدار اثر تغییرات چگالی محلی (زمین‌شناسی) در معادله بالا از سایر عبارات می‌باشد که ناشی از اثر تغییرات چگالی پوسته و گوشته بالایی است. زمانی که به وسیله معادله بالا مقادیر مشاهده‌ای گرانی مورد ارزیابی قرار گرفته و تصحیح شوند، باقیمانده حاصل بازتاب‌کننده اختلاف چگالی زمین حاصل از بیضوی همگن و تغییرات جانبی چگالی در پوسته و گوشته می‌باشد. این مقدار باقیمانده همچنین شامل اثرات عرض جغرافیایی، جزر و مد و دیگر عوامل مؤثر می‌باشد که باید طبق الگوریتم (شکل ۲-۳) تصحیح شوند.



شکل ۲-۲: مراحل مختلف تصحیحات داده‌های گرانی (آقاجانی، ۱۳۸۸)

۲-۷-۱- تصحیح رانه دستگاه^۱

گرانی‌سنج‌ها از موادی ساخته شده‌اند که معمولاً به تنش‌های مکانیکی و حرارتی حساس بوده و به این ترتیب باعث تولید کرنش‌های الاستیکی و غیرالاستیکی می‌شوند. بنابراین جابجایی دستگاه گرانی‌سنج از یک نقطه به نقطه دیگر و همچنین تغییرات درجه حرارت در طول مدت‌زمان اندازه‌گیری سبب تغییراتی در مقدار قرائت‌شده در یک نقطه در چند زمان متفاوت خواهد شد [Telford et al., 1990]. به این تغییرات که ناشی از خطای دستگاه است دریفت یا رانه دستگاه گفته می‌شود و وابسته به زمان است، (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴: روش حذف رانه دستگاه [Dobrin & Savit, 1988]

بنابراین برای تصحیح اثرات ناشی از عوامل وابسته به زمان یعنی مقدار جذر و مد و رانه دستگاه، از اندازه‌گیری‌های تکراری در مدت‌زمان برداشت داده‌ها استفاده گردید. به این منظور برای تصحیح قرائت‌های انجام‌شده معمولاً به فاصله زمانی هر دو ساعت یک‌بار به نقطه یا ایستگاه مبنا مراجعه شده و مقدار میدان گرانی آن مجدد قرائت‌شده است. به این ترتیب مقادیر اختلاف ناشی از رانه دستگاه با مقایسه اختلاف اندازه‌گیری مقدار اثر گرانی ایستگاه مبنا بر اساس رابطه (۲-۷) در دو زمان مشخص محاسبه و اثر آن برای همه ایستگاه‌ها مشخص گردید.

¹Drift Correction

$$Drift \ Rate = \frac{g'_{base} - g_{base}}{t'_{base} - t_{base}}$$

$$\delta g_{dc(for \ S2)} = Drift - Rate \times (t_{obs-S2} - t_{base}) \ mGal \quad (7-2)$$

$$g_{dc(for \ S2)} = g_{obs-S2} - \delta g_{dc}$$

۲-۷-۲- تصحیح اثر جزر و مد^۱

به طور کلی تصحیح اثر جزر و مد دو روش کلی وجود دارد یکی به کمک جداولی که به طریق محاسبه‌ای تغییرات جزر و مد و شتاب گرانی ناشی از جزر و مد را نسبت به زمان و در مکان‌های مختلف نشان می‌دهد و دیگر روش قرائت‌های مکرر و رسم منحنی دریافت در هنگام عملیات صحرایی است. در روش محاسبه‌ای لازم است که منحنی و جداول تغییرات سالانه شتاب گرانی در اثر جزر و مد ناشی از جاذبه ماه و خورشید را برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه کرد، اصولاً محاسبه چنین منحنی‌ها و جداول تغییرات برای تمام ایستگاه‌ها در عملیات معمولی گرانی‌سنجی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه بوده و در عمل تقریباً غیرممکن است. از این رو برای حذف اثر جزر و مد معمولاً در عملیات گرانی‌سنجی از روش قرائت‌های مکرر و رسم منحنی دریافت استفاده می‌شود. البته لازم به ذکر است که دستگاه‌های گرانی‌سنج جدید قابلیت ارائه مقادیر جزر و مد را داشته و می‌توان از این قابلیت استفاده کرد [Blakely, 1995].

۲-۷-۳- تصحیح عرض جغرافیایی^۲

اگر مواد موجود در زیر سطح زمین در تمام نقاط اندازه‌گیری یکسان هم می‌بود، بازهم شتاب جاذبه در نقاطی که دارای عرض جغرافیایی متفاوت باشند، فرق می‌کرد. علت اختلاف در عرض جغرافیایی، ناشی از شتاب جاذبه زمین است که؛ از دو مؤلفه جرم زمین و مؤلفه دیگر یعنی شتاب حاصل از نیروی گریز از مرکز زمین است. مقدار این مؤلفه، که در خلاف جهت مؤلفه ناشی از جرم زمین است، در استوا ماکزیمم و در

¹Tide Correction

²Latitude Correction

قطبین حداقل است. این عوامل سبب می‌شود که شتاب جاذبه از ۹۷۸ گال (سانتی‌متر بر مربع ثانیه) در استوا تا ۹۸۳ گال در قطبین تغییر کند [Blakely, 1995]. به علت شکل خاص زمین، مقدار شتاب گرانی در نقاط واقع شده روی سطح مقایسه فرضی یا سطح ژئوئید، که سطح دریاها را آزاد در نظر گرفته شده، ثابت نبوده و می‌توان مقدار آن را در هر نقطه با تقریب خوبی از فرمول زیر به دست آورد:

$$g_{\phi} = 978.032 (1 + 0.0052884 \sin^2\phi - 0.0000059 \sin^2 2\phi) \quad (۸-۲)$$

با مشتق‌گیری از این رابطه نسبت به عرض جغرافیایی می‌توان تصحیح عرض جغرافیایی را برای هر نقطه ایستگاهی به صورت رابطه زیر تعیین نمود.

$$\delta g_{\phi} = 0.818 \Delta y \times \sin(2\phi) \text{ mGal} \quad (۹-۲)$$

که در آن ϕ مقدار عرض جغرافیایی در خط مبنای ایستگاهی و Δy مقدار اختلاف عرض جغرافیایی در سیستم متریک نقطه مشاهده‌ای نسبت به نقطه مبنا بر حسب کیلومتر است.

این تصحیح زمانی لازم می‌شود که مقدار اثر گرانی دو نقطه روی یک شبکه و یا یک پروفیل شمالی-جنوبی مقایسه شود. با توجه به اینکه در این پایان‌نامه، اندازه‌گیری مقدار گرانی در یک شبکه منظم و به فواصل ایستگاهی مشخص و با تغییراتی در راستای شمالی-جنوبی بوده لذا از فرمول مذکور جهت محاسبه تغییرات شتاب گرانی استفاده گردید.

۲-۷-۴- تصحیح ارتفاعی

این تصحیح از آنجا ناشی می‌شود که سطح زمین در منطقه مورد اکتشاف مسطح نبوده و دارای پست و بلندی‌هایی می‌باشد. در نتیجه ایستگاه‌های اندازه‌گیری در یک ارتفاع واقع نخواهند شد و به دلیل تغییرات فاصله‌شان نسبت به مرکز زمین تغییراتی در شتاب گرانی نشان خواهند داد که باید این تغییرات محاسبه و حذف شوند. در عمل سطح مبنایی در نظر گرفته می‌شود و تمام نقاط نسبت به آن تصحیح خواهند شد که نتیجه امر انتقال ایستگاه‌ها به آن سطح و یکی شدن ارتفاع تمام نقاط می‌باشد. سطح مبنا را می‌توان در هر

ارتفاعی فرض کرد ولی اغلب سطح ژئوئید به عنوان سطح مبنا در نظر گرفته می‌شود. در اثر انتقال نقاط به سطح مبنا، تأثیر جاذبه جرمی که بین ایستگاه‌ها و سطح مبنا قرار گرفته است باید حذف شود. اگر سطح مبنا پایین‌تر از ایستگاه باشد، این تأثیر دارای مقدار منفی خواهد بود. تصحیح ارتفاعی از دو قسمت تصحیح هوای آزاد و تصحیح تخته جرمی بوگه تشکیل شده است.

الف- تصحیح هوای آزاد^۱

با توجه به اینکه عامل فاصله بین دو جرم در قانون نیوتن از عوامل تأثیرگذار در مقدار شتاب وارده است لذا بر اساس تغییر فاصله ایستگاه اندازه‌گیری نسبت به سطح مبنا یا سطح آب‌های آزاد مقدار گرانی ثبت شده متفاوت است. به این منظور همه نقاط اندازه‌گیری بر مبنا سطح ارتفاعی مشخص سنجیده و قیاس می‌شوند برای این کار لازم است که مقدار گرانی اندازه‌گیری شده در فاصله ارتفاعی مثل h بالای سطح ژئوئید از رابطه ساده زیر محاسبه شده است.

$$\delta g_{fa} = 0.3086h \quad (۱۰-۲)$$

این عبارت را تصحیح هوای آزاد می‌نامند و در آن δg_{fa} تصحیح هوای آزاد بر حسب میلی‌گال است؛ اگر مقدار اختلاف ارتفاع نقطه اندازه‌گیری از سطح دریاها بر حسب متر باشد [Blakely, 1995]. اگر هیچ‌گونه جرمی بین نقطه اندازه‌گیری و سطح مبنا (آب‌های آزاد) وجود نداشته باشد، تنها محاسبه این تصحیح ضروری می‌باشد. در پایان‌نامه موردنظر با لحاظ نمودن سطح آب‌های آزاد به عنوان سطح مبنا ارتفاعی و مقدار عدد ارتفاعی که از طریق نقشه‌برداری نقاط به دست آمده است در فرمول (۱۰-۲) مقدار تصحیح ارتفاعی به دست آمد. با مدنظر قرار دادن تصحیح هوای آزاد، آنومالی هوای آزاد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta g_{fa} = g_{obs} - \gamma_{\varphi} - \delta g_{dc} + \delta g_{\varphi} + \delta g_{fa} \quad (۱۱-۲)$$

که در آن به ترتیب از چپ به راست آنومالی هوای آزاد، مقدار گرانی مشاهده‌ای، مقدار گرانی نرمال، اثر

^۱Free Air Correction

تصحیح دریافت، اثر عرض جغرافیایی، اثر هوای آزاد است. در عمل هر جابجایی که در موقعیت ایستگاه نسبت به مرکز زمین انجام شود لازم است که مقدار تصحیح محاسبه و به مقدار قرائت شده اضافه یا از آن کم شود.

ب- تصحیح تخته بوگه^۱

یکی دیگر از عوامل مزاحم در داده‌های گرانی سنجی عامل جرم اطراف نقطه اندازه‌گیری است که به دو مؤلفه تصحیح تخته بوگه و تصحیح توپوگرافی تقسیم می‌شود (شکل ۲-۵)؛ که ناشی از جرم موجود با ارتفاع است [Dehlinger, 1978]. مقدار تصحیح بوگه طبق فرمول معروف زیر با در نظر گرفتن مقدار چگالی متوسط محاسبه شده است.

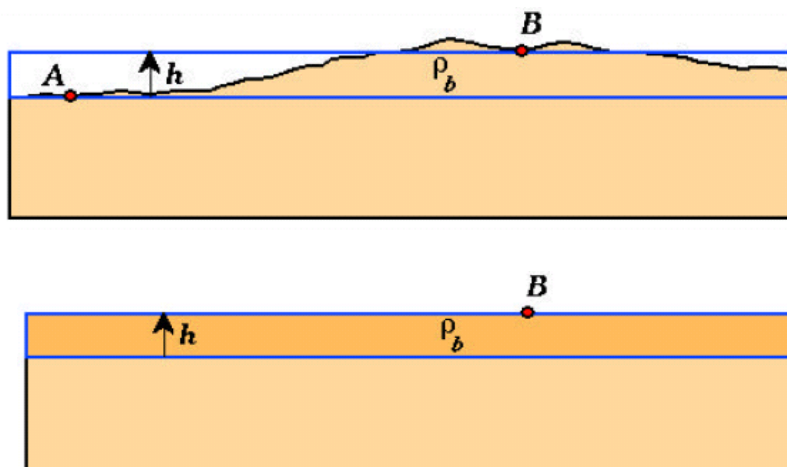
$$\delta g_{sb} = 2\pi G \rho h \quad (۱۲-۲)$$

بنابراین، آنومالی بوگه ساده به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\Delta g_{sb} = g_{obs} - \gamma_{\phi} - \delta g_{dc} + \delta g_{\phi} + \delta g_{fa} - \delta g_{sb} \quad (۱۳-۲)$$

که در آن به ترتیب از چپ به راست آنومالی بوگه ساده، مقدار گرانی مشاهده‌ای، مقدار گرانی نرمال، اثر تصحیح دریافت، اثر عرض جغرافیایی، اثر هوای آزاد، اثر تخته بوگه است. آنومالی بوگه ساده، اختلاف چگالی اجرام آنومال را نسبت به چگالی متوسط منطقه نشان می‌دهد و به شکل توپوگرافی بستگی ندارد.

^۱Bouguer Correction



شکل ۲-۵: تصحیح بوگه روی ایستگاه زمینی [Dehlinger, 1978]

۲-۷-۵- تصحیح زمینگان (توپوگرافی)^۱

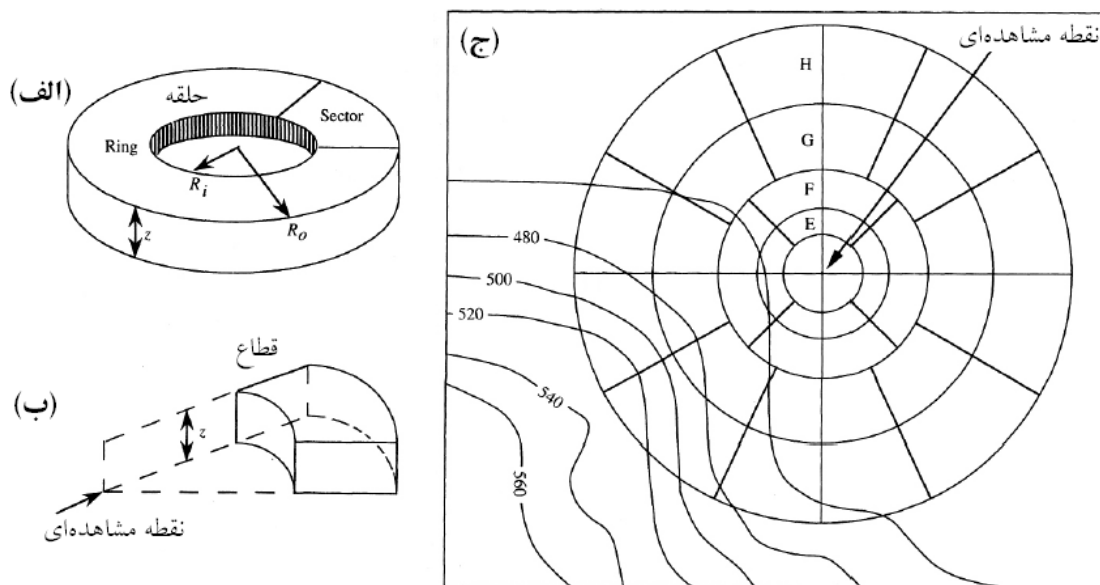
پس از انجام تصحیحات اولیه در گرانی‌سنجی، عامل جرمی از جمله عوامل تأثیرگذار بر روی داده‌های قرائت شده می‌باشد که بخشی از آن‌ها توسط اثر تخته بوگه تصحیح می‌گردد ولی این اثر با لحاظ نمودن شرایط یکسان جرمی و ارتفاعی برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری نقاط نمی‌تواند اثر کاهشی ناشی از وجود توپوگرافی کوه یا دره را از روی داده‌های برداشتی حذف نماید [Blakely, 1995]. لذا از تصحیح توپوگرافی استفاده می‌شود. تصحیح توپوگرافی به روش‌های مختلفی انجام‌پذیر است که می‌توان به قدیمی‌ترین و مرسوم‌ترین روش یعنی روش نمودار هامر شکل (۲-۶) یا جدول هامر (۱۹۳۹) یا روش‌های جدیدتری که با لحاظ نمودن مختصات نقطه در شبکه‌های منظم اشاره کرد. نتیجه این عمل، آنومالی بوگه کامل نامیده می‌شود:

$$\Delta g_{cb} = g_{obs} - \gamma_{\varphi} - \delta g_{dc} + \delta g_{\varphi} + \delta g_{fa} - \delta g_{sb} + \delta g_{TC} \quad (۲-۱۴)$$

که در آن به ترتیب از چپ به راست آنومالی بوگه کامل، مقدار گرانی مشاهده‌ای، مقدار گرانی نرمال، اثر

^۱Terrain Correction

تصحیح دریافت، اثر عرض جغرافیایی، اثر هوای آزاد، اثر تخته بوگه، اثر تصحیح توپوگرافی می‌باشد.

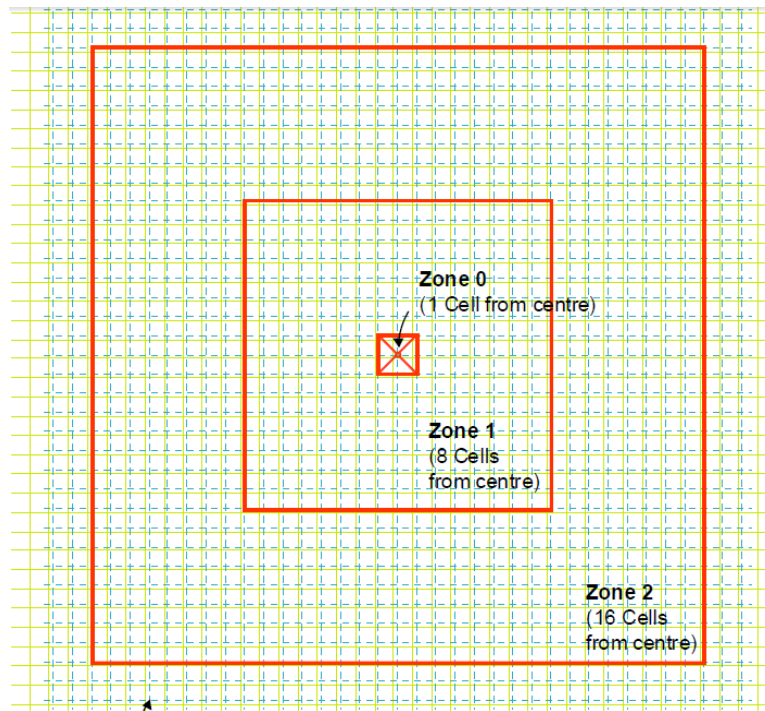


شکل ۲-۶: تصحیح توپوگرافی داده‌های گرانی [Hammer, 1939]. الف: یک حلقه استوانه‌ای با شعاع داخلی و شعاع خارجی و ضخامت؛ ب: یک قطاع از استوانه مذکور بیانگر ویژگی توپوگرافی سطح بالایی نقطه مشاهده‌ای گرانی؛ ج: نمودار تصحیح توپوگرافی هامر با استفاده از نقشه توپوگرافی

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و به‌کارگیری روش‌های جدید در تصحیح توپوگرافی، جهت به دست آوردن مقادیر رقومی ارتفاعی، این عمل با سرعت و دقت بیشتری انجام می‌گیرد. به این ترتیب که برای محاسبه اثر توپوگرافی ارتفاعات جرم‌دار نقاط دور یا نزدیک به نقاط ایستگاهی از دو نقشه رقومی ارتفاعی استفاده می‌شود. از نقشه توپوگرافی بزرگ‌مقیاس که در حین عملیات گرانی‌سنجی به‌وسیله دوربین نقشه‌برداری یا جی‌پی‌اس ایستگاهی تهیه می‌شود برای تعیین اثر نزدیک توپوگرافی از نقشه‌های توپوگرافی رقومی سازمان نقشه‌برداری کشور یا مدل رقومی ارتفاعی موجود در مقیاس مختلف برای تعیین اثر دور استفاده می‌گردد. نرم‌افزار ژئوسافت و منوی تصحیح توپوگرافی از یک مدل رقومی ارتفاعی ناحیه‌ای (نقشه رقومی توپوگرافی منطقه) و یک مدل محلی دقیق‌تر (برداشت‌های نقشه‌برداری برای به دست آوردن نقشه توپوگرافی دقیق در حوالی محدوده) که محدوده مورد مطالعه را پوشش می‌دهد استفاده می‌کند. توسط منوی تصحیح

توپوگرافی نرم‌افزار ژئوسافت یک شبکه تصحیح ناحیه‌ای تولید می‌شود که مقدار تصحیحات توپوگرافی را در خارج از فاصله تصحیحات محلی به دست می‌آورد و این مقدار برای محاسبه دقیق مقدار تصحیح در نقاط مشاهده‌ای استفاده مجدد خواهد شد.

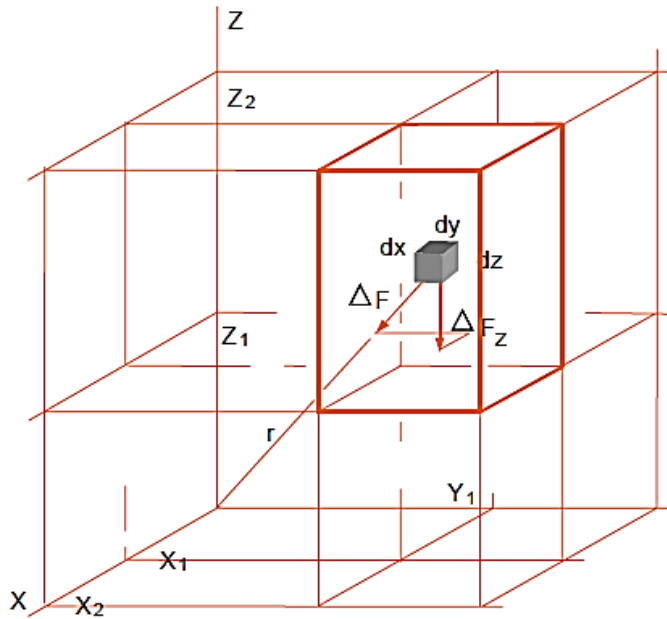
الگوریتم GRREGTER GX یک شبکه تصحیح توپوگرافی ناحیه‌ای برای کاربرد تصحیح ارتفاعی که با نرم‌افزار ژئوسافت سازگارا بوده تولید می‌کند. شبکه تصحیح ناحیه‌ای در ابتدا برای پوشش محدوده مورد مطالعه تولید شده و می‌تواند برای محاسبه تصحیح توپوگرافی در فواصل بیشتر تصحیح محلی دوباره مورد استفاده قرار گیرد. این مقدار تصحیح با مقدار محاسبه شده تصحیح محلی (local DEM) جمع می‌شود. توسط الگوریتم GRTERAIN GX، واحد میلی‌گال شبکه داده‌ها وقتی تصحیح توپوگرافی کلی محاسبه می‌شود در مقدار چگالی ضرب می‌شود. مقادیر محاسبه شده با این الگوریتم در هر ایستگاه از طریق استخراج مقدار تصحیح ناحیه‌ای از شبکه تصحیح توپوگرافی ناحیه‌ای بعلاوه تصحیح توپوگرافی محلی به دست می‌آید. در عمل با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت که بر اساس روش‌های شبکه‌بندی (شکل ۲-۷) و فرمول‌های (۲-۱۵) و (۲-۱۶) [Kane, 1962, Nagy, 1966] و داده‌های رقومی تهیه شده برای محاسبه تصحیح توپوگرافی استفاده می‌شود و سپس مقدار آنومالی بوگه کامل برای کلیه ایستگاه‌ها بر اساس فرمول (۲-۱۴) محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۷: منطقه بندی اطراف ایستگاه برداشت گرانی برای محاسبه اثر توپوگرافی با یک شبکه مدل رقومی ارتفاعی [Hammer, 1939]

برای محاسبه اثر تصحیح توپوگرافی زون نزدیک و متوسط از منشور و رابطه مدل شده آن استفاده می‌شود.

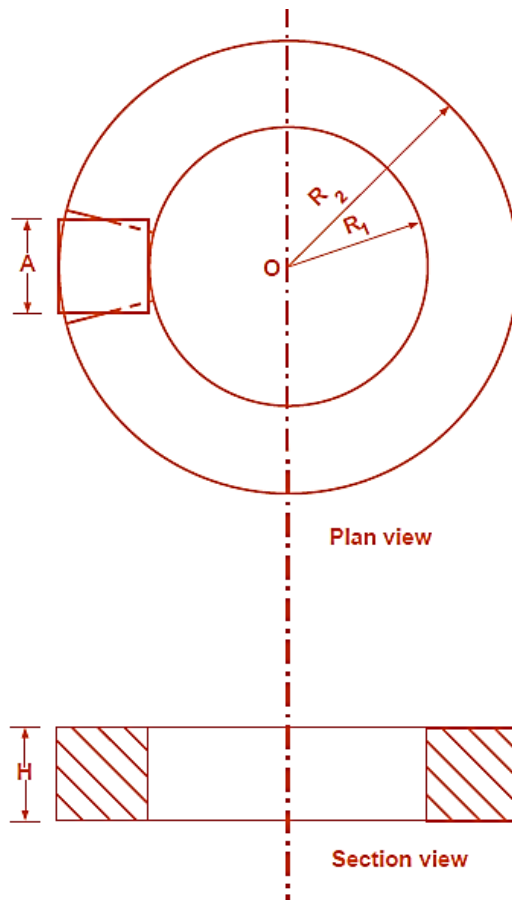
$$g = -G\rho \left[\frac{Z_2}{Z_1} \frac{Y_2}{Y_1} \frac{X_2}{X_1} x \cdot \ln(y + R) + y \cdot \ln(x + R) + Z \arctan\left(\frac{Z \cdot R}{x \cdot y}\right) \right] \quad (۱۵-۲)$$



شکل ۲-۸: منشور و رابطه مدل شده برای به دست آوردن مقدار تصحیح توپوگرافی در زون نزدیک و متوسط
 [Hammer, 1939]

برای محاسبه اثر تصحیح توپوگرافی زون دور از یک سیستم استوانه‌ای و رابطه مدل شده آن استفاده می‌شود.

$$g = 2G\rho A^2 \frac{(R_2 - R_1 + \sqrt{R_1^2 + H^2} - \sqrt{R_2^2 + H^2})}{\sqrt{R_2^2 - R_1^2}} \quad (۲-۱۶)$$



شکل ۹-۲: منشور و رابطه مدل شده برای به دست آوردن مقدار تصحیح توپوگرافی در زون دور [Hammer, 1939]

- | | |
|---|--|
| G: ثابت گرانی | g: مقدار تصحیح توپوگرافی |
| A: طول وجه افقی منشور | D: چگالی |
| R_2 : شعاع حلقه خارجی استوانه توخالی | R_1 : شعاع حلقه داخلی استوانه توخالی |
| H: ارتفاع حلقه استوانه‌ای توخالی یا منشور | |

۳- فصل سوم:

زمین‌شناسی محدوده معدنی سولفات سدیم گرماب،

عملیات گرانی سنجی و پیش‌پردازش داده‌ها

۳-۱- مقدمه

این تحقیق به منظور تعیین مناطق امیدبخش کانی‌زایی سولفات سدیم جهت حفاری در محدوده معدن سولفات سدیم گرماب انجام شده است. هدف از آن برنامه‌ریزی برای استخراج و تهیه یک طرح بهره‌برداری علمی و سیستماتیک برای استخراج ماده معدنی در محدوده معدن فعال گرماب بوده تا توده‌های آنومال احتمالی در این محدوده مشخص شود. عملیات برداشت گرانی‌سنجی در مردادماه سال ۱۳۹۵ در ۲۵۰ ایستگاه گرانی انجام شد. پیش از بحث در خصوص طرح برداشت داده مختصری درباره راه دسترسی و وضعیت ماده معدنی از گزارشات زمین‌شناسی ارائه می‌گردد.

۳-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

نزدیک‌ترین شهر به محدوده اکتشافی، شهر سمنان است که به فاصله ۳۸ کیلومتری محل واقع است

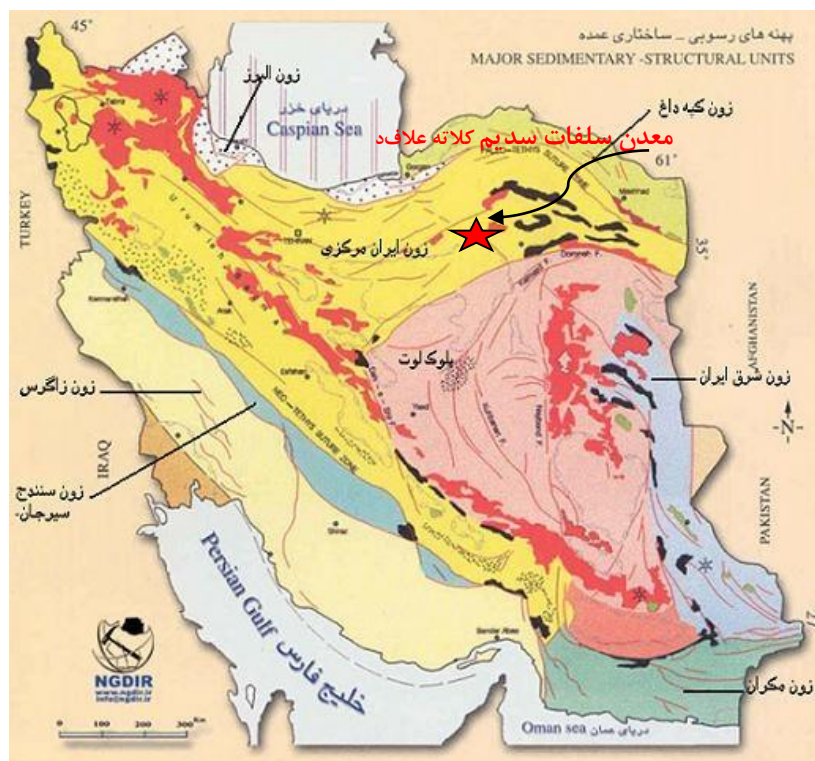
(شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱: موقعیت شهر سمنان روی تصویر ماهواره‌ای و راه دسترسی به معدن گرماب [Google Earth]

۳-۳- زمین‌شناسی

معدن سولفات سدیم گرماب، واقع در ۳۵ کیلومتری شرق شهر سمنان، در بخش بالایی سازند آواری-تبخیری محلی دوزهیر و در بخش ایران مرکزی جای دارد (شکل ۳-۲). از زمان کشف ماده معدنی سولفات سدیم در این محل، پی‌جویی و اکتشاف ذخیره‌های بیش از آنچه در سطح قابل‌برداشت است اصلی‌ترین مسئله آن تلقی شده است و تاکنون، هنوز هیچ‌یک از روش‌های سعی و خطا یا پی‌جویی‌های سیستماتیک این ذخیره مورد انتظار را آشکار نکرده است. آخرین مرحله اکتشافی به روش ترکیبی زمین‌شناسی ساختاری و ژئوفیزیک در سال ۱۳۹۳ انجام شد و با گذر از مراحل شناسایی مقدماتی، در بهمن‌ماه ۱۳۹۳ وارد مراحل تکمیلی شد (شبانیان، ۱۳۹۴).



شکل ۳-۲: نقشه مناطق ساختاری ایران و محل معدن سولفات سدیم گرماب (آقابات، ۱۳۸۳)

بر پایه بررسی‌های زمین‌شناسی، واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده معدن، متشکل از شیل،

مارن، ژپیس و سنگ گچ، حاصل تکرار بخش‌های بالایی سازند دوزهیر بر روی فرادیواره گسله‌های راندگی است. دامنه چین خوردگی‌ها و ضخامت درگیرشده در فرادیواره این گسله‌ها نشان‌دهنده عمق نفوذ کم آن‌ها است. با توجه به ساختار عمقی بازسازی‌شده معدن گمان می‌رود گسله‌های راندگی سبب تغییر در عمق شده باشد. از پردازش همه این داده‌ها چنین برمی‌آید که احتمال وجود ذخیره چشمگیر معدنی در بخش‌های شمالی معدن بسیار کم و شاید صفر باشد.

کهن‌ترین واحد سنگی در محدوده، واحد مارن سبز است که به ضخامت نزدیک به ۲۰ متر در زیر واحدهای دیگر قرار دارد. این واحد از مارن‌های سبزرنگ با میان لایه‌هایی از ژپیس تشکیل شده است و باوجود ضخامت نه‌چندان زیاد، به دلیل تکرار در فرادیواره گسله‌های راندگی، بخش گسترده‌ای از رخنمون-های معدن را شامل می‌شود. بر روی واحد مارن سبز، واحد شیل قهوه‌ای جای گرفته است که بیشتر از شیل‌های قهوه‌ای بامیان لایه‌هایی از مارن و ژپیس تشکیل شده است. میان لایه‌های ژپیزی در مرز با لایه رویی ضخامت بیشتری داشته و تا حد ۳۱ متر افزایش می‌یابد. جوان‌ترین واحد، واحد مارن خاکستری ژپیس‌دار است که در بخش‌های پایینی بیشتر از مارن‌های خاکستری بامیان لایه‌های ژپیزی تشکیل شده است. این لایه در بخش‌هایی بالایی، بر فراوانی لایه‌های ژپیس افزوده می‌شود و کم‌کم، لایه‌های سنگ گچ ظاهر می‌شود. در بالاترین بخش واحد، لایه‌های نازک سنگ گچ بامیان لایه‌های ژپیس، جای خود را به سنگ گچ ضخیم لایه می‌دهد. ضخامت این لایه‌های گچی گاهی به یک متر می‌رسد. این واحد در مجموع ضخامتی نزدیک به ۱۰۰ متر دارد. (صمیمی، ۱۳۷۸).

۳-۴- پیشینه مطالعات اکتشافی منطقه

۱- معدن سولفات سدیم توسط افراد محلی شناسایی و پس از ثبت موفق به دریافت پروانه اکتشاف شده بود. این صاحب پروانه فقط یک ترانشه ۶ متری بر روی لایه جنوبی حفر کرده بود که در این ترانشه ضخامت لایه سولفات حداقل به ۶ متر به‌ظاهرشده بود.

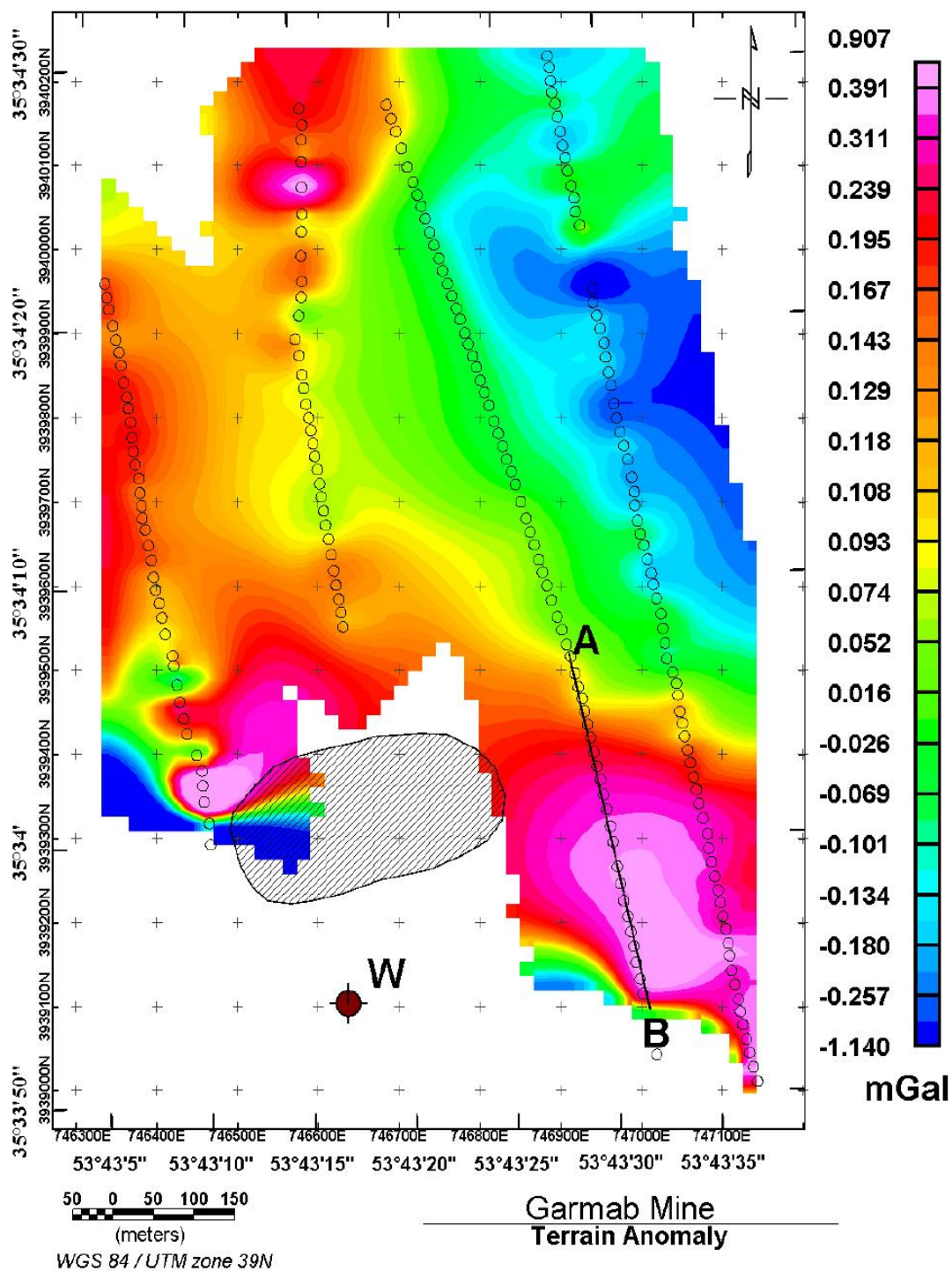
۲- پس از انتقال پروانه اکتشاف به شرکت معدنی املاح ایران فقط مطالعات ناحیه‌ای انجام شد و در محدوده معدن هیچ کار اکتشافی صورت نگرفت.

۳- در سال ۱۳۷۸ طرحی تحت عنوان پروژه اکتشاف نیمه تفصیلی سولفات سدیم در ناحیه گرماب (علاف) سمنان در کمیته تخصصی اکتشاف حوزه معاونت اکتشاف وزارت معادن و فلزات به سازمان برنامه و بودجه ارائه و مصوب گردید. در راستای این طرح فعالیت‌های اکتشافی مانند تهیه نقشه زمین‌شناسی و حفر تراشه‌هایی و نیز آنالیزهای شیمیایی از ماده معدنی انجام و کل ذخیره ۱۳۵۰۰۰ تن سولفات برآورد شد [صمیمی، ۱۳۷۸].

۴- در خردادماه سال ۱۳۹۴، طرح بررسی‌های تکمیلی زمین‌شناسی ساختاری در محدوده‌ی معدن گرماب اجرا و در نتیجه آن گزارش زمین‌شناسی ساختاری معدن سولفات سدیم گرماب تهیه و محدوده مورد بررسی کامل‌تری به لحاظ ژنزی قرار گرفت [شبانیان، ۱۳۹۴].

۵- همچنین در مردادماه سال ۱۳۹۴، در ادامه و راستای طرح بررسی‌های تکمیلی زمین‌شناسی ساختاری در محدوده معدن گرماب چهار گمانه حفر شده مورد بازبینی قرار گرفت.

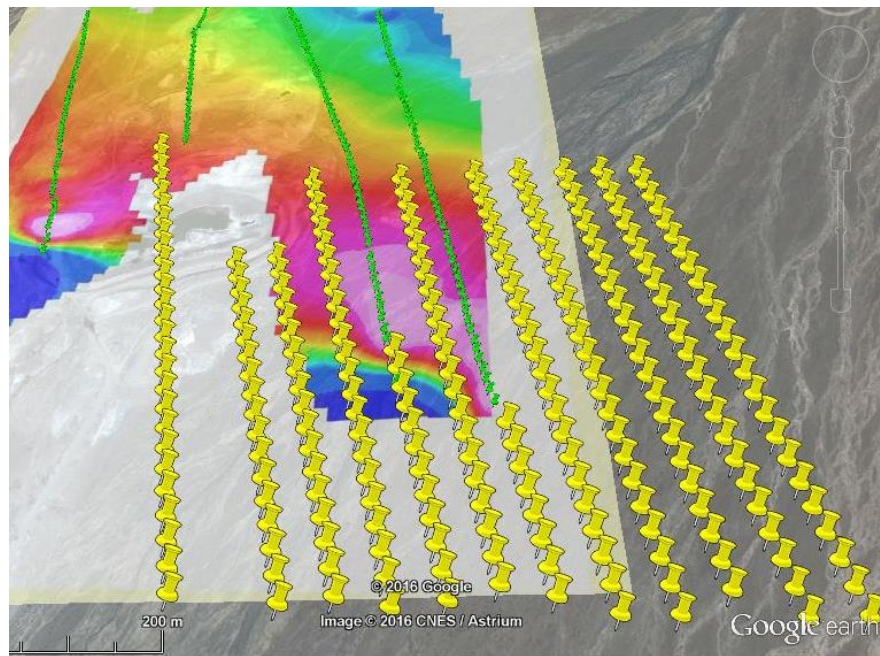
۶- در ادامه فعالیت‌های اکتشافی در تابستان ۱۳۹۵، برای شناسایی گسترش افقی و عمقی معدن عملیات گرانی‌سنجی به تعداد ۲۰۰ ایستگاه قرائت و نتیجه آن یک زون کانی‌زایی با گسترش به سمت جنوب شرق معدن را نشان داد (شکل ۳-۳) که سبب شد که عملیات اکتشاف ماده معدنی پیگیری شود.



شکل ۳-۳: نقشه آنومالی باقیمانده گرانی پس از به کارگیری فیلتر روند سطح مرتبه اول، محدوده پیت معدن به صورت هاشور مشخص شده است. علامت W در پایین نقشه محل حفر یک گمانه است که ماده معدنی برخورد نکرده است.

۳-۵- طراحی عملیات صحرائی

پس از تصمیم به اجرای فاز دوم عملیات گرانی‌سنجی توسط شرکت املاح ایران، شبکه برداشت با نظر ناظر پروژه بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و نتایج گرانی‌سنجی مرحله اول، شبکه برداشت داده در ۱۲ پروفیل با راستای شمالی-جنوبی با فواصل متفاوت و با تعداد نقاط مشخص روی هر پروفیل با فاصله ۲۰ متر طراحی شد، به طوری که تعدادی از آن‌ها در راستای پروفیل‌های سری اول برداشت گرانی قرار گرفت (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴: شبکه برداشت داده‌های گرانی بر روی محدوده مورد مطالعه (تصویر Google Earth)

۳-۶- برداشت صحرائی محدوده گرماب

پس از طراحی شبکه برداشت، به منظور اجرای بهینه و مناسب عملیات گرانی‌سنجی ابتدا گروه نقشه‌برداری با یک دستگاه GPS دستی ایستگاه‌های موردنظر را روی زمین پیاده و به وسیله میخ‌های چوبی علامت‌گذاری شد. سپس با دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن علاوه بر تهیه نقشه توپوگرافی محدوده

برداشت، کلیه ایستگاه‌های گرانی با دقت بالا نقشه‌برداری و مختصات نقاط تعیین شد.

۳-۶-۱- کالیبراسیون دستگاه

برای شروع عملیات برداشت گرانی، ابتدا می‌بایست دستگاه گرانی‌سنج طی دو مرحله کالیبراسیون استاتیکی و دینامیکی تنظیم گردد:

الف: کالیبراسیون استاتیکی

به منظور تست استاتیکی، دستگاه گرانی‌سنج را باید در مکانی ثابت قرار داد و در مدت‌زمان حدود ۱۲ ساعت قرائت انجام پذیرد. داده‌های حاصل از این قرائت‌ها ثبت و از دستگاه تخلیه گردد. سپس نمودار تغییرات داده‌های ثبتي برحسب زمان رسم شود که پس از بررسی این نمودارها و وجود روندی کاملاً نرمال برای دستگاه (بر اساس دفترچه راهنمای دستگاه)، کالیبراسیون دینامیکی باید صورت گیرد.

ب: کالیبراسیون دینامیکی

برای کالیبراسیون دینامیکی، دستگاه گرانی‌سنج پس از مدت ۱۲ ساعت بعد از کالیبراسیون استاتیکی در منطقه‌ای روی تعداد نقطه محدوده مقدار گرانی نسبی اندازه‌گیری می‌شود. سپس مقادیر قرائت‌شده روی هر ایستگاهی با یکدیگر مقایسه شده و هم‌میزان خطای نقاط تکراری مشخص می‌گردد. خطای مجاز برای این حالت ۰/۰۶ میلی‌گال می‌باشد.

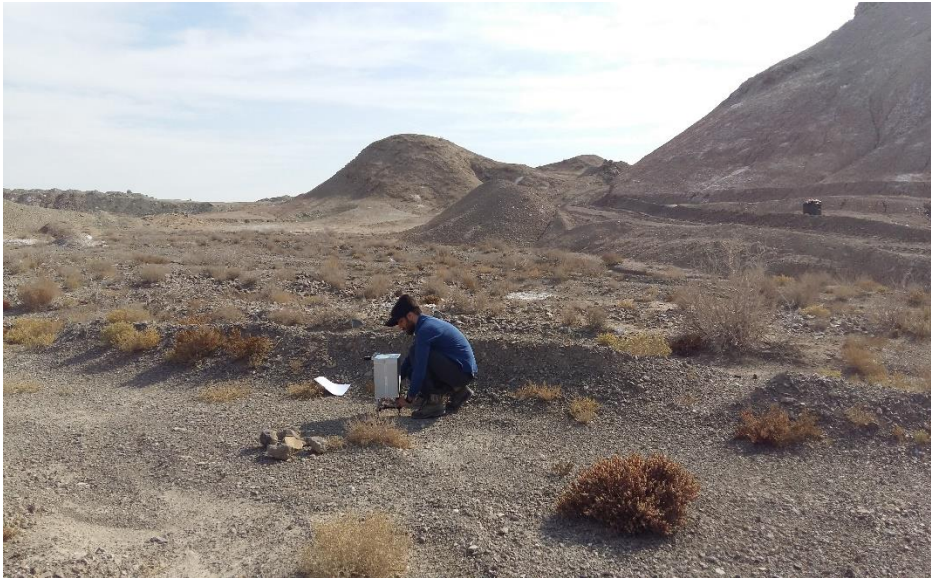
۳-۶-۲- قرائت ایستگاه‌ها

قرائت روزانه ایستگاه‌ها به وسیله دستگاه گرانی‌سنج CG5 انجام شد. قرائت‌ها از ایستگاه مبنای گرانی شروع و بعد از قرائت تعدادی از نقاط موجود در منطقه (هر ایستگاه سه بار قرائت‌شده است) به ایستگاه مبنا برگشته و مجدد قرائت‌شده است. سپس داده‌ها از دستگاه به کامپیوتر منتقل شده و به همراه مختصات نقاط و ایستگاه مبنایی استفاده‌شده وارد نرم‌افزار ژئوسافت گردیده است و پس از اعمال دریافت دستگاه، خروجی آن محاسبه گردیده است.

برداشت صحرائی در محدوده‌ی معدنی سولفات سدیم گرماب در تاریخ ۹۵/۶/۲۲ و ۹۵/۶/۲۳ با قرائت تعداد ۲۵۰ ایستگاه به‌جز قرائت‌های صورت گرفته (شکل ۳-۵) بر روی ایستگاه مینا و کالیبراسیون دستگاه انجام شد. نمونه‌ای از برداشت داده‌ها در جدول (۳-۱) ارائه شده است به‌طوری که مقدار انحراف معیار داده‌های برداشتی کم‌تر از ۰,۰۲۵ میلی‌گال در نظر گرفته شد.

جدول ۳-۱: نمونه از برداشت داده‌های گرانی در محدوده معدن سولفات سدیم گرماب

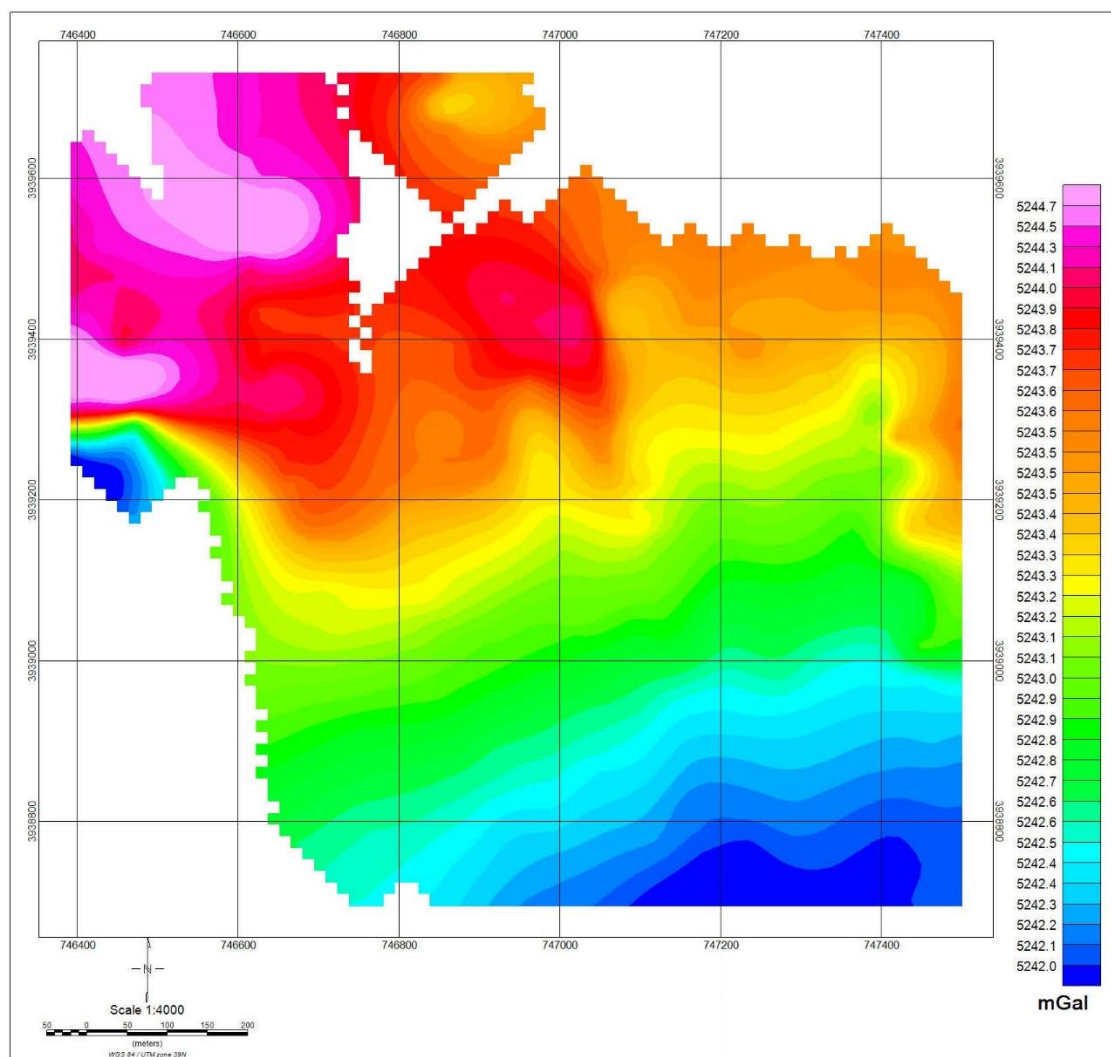
| NO. Line | NO. Station | X-coord | Y-coord | Elevation | Gravity (obs) | S.D. | Time |
|----------|-------------|------------|-------------|-----------|---------------|-------|---------|
| 1 | 999 | Base | | | 4963.645 | 0.013 | 3:46:36 |
| 2 | 249 | 747407.268 | 3939427.861 | 1450.129 | 4960.046 | 0.007 | 4:00:30 |
| 3 | 248 | 747408.966 | 3939396.777 | 1449.551 | 4960.063 | 0.010 | 4:05:42 |
| 4 | 247 | 747384.197 | 3939369.715 | 1448.302 | 4960.162 | 0.006 | 4:08:24 |
| 5 | 246 | 747415.478 | 3939336.202 | 1448.302 | 4960.171 | 0.006 | 4:11:14 |
| 6 | 245 | 747396.530 | 3939300.988 | 1446.238 | 4960.338 | 0.011 | 4:14:01 |
| 7 | 244 | 747422.609 | 3939271.510 | 1448.302 | 4960.402 | 0.018 | 4:16:26 |
| 8 | 243 | 747423.731 | 3939249.698 | 1446.238 | 4960.392 | 0.011 | 4:19:04 |
| 9 | 242 | 747427.809 | 3939230.502 | 1446.238 | 4960.434 | 0.014 | 4:21:12 |
| 10 | 241 | 747433.400 | 3939207.512 | 1446.238 | 4960.559 | 0.012 | 4:23:21 |
| 11 | 240 | 747435.082 | 3939181.710 | 1446.238 | 4960.634 | 0.023 | 4:25:43 |
| 12 | 239 | 747439.506 | 3939159.241 | 1446.238 | 4960.697 | 0.014 | 4:28:50 |
| 13 | 238 | 747439.515 | 3939095.547 | 1442.803 | 4960.713 | 0.009 | 4:31:28 |
| 14 | 237 | 747446.789 | 3939069.927 | 1442.803 | 4960.753 | 0.025 | 4:34:08 |
| 15 | 236 | 747448.109 | 3939039.129 | 1442.228 | 4960.858 | 0.011 | 4:36:33 |
| 16 | 235 | 747450.032 | 3939017.069 | 1442.238 | 4961.019 | 0.008 | 4:39:08 |



شکل ۳-۵: نقشه برداری و قرائت ایستگاه‌های گرانی در محدوده گرماب (سمنان)

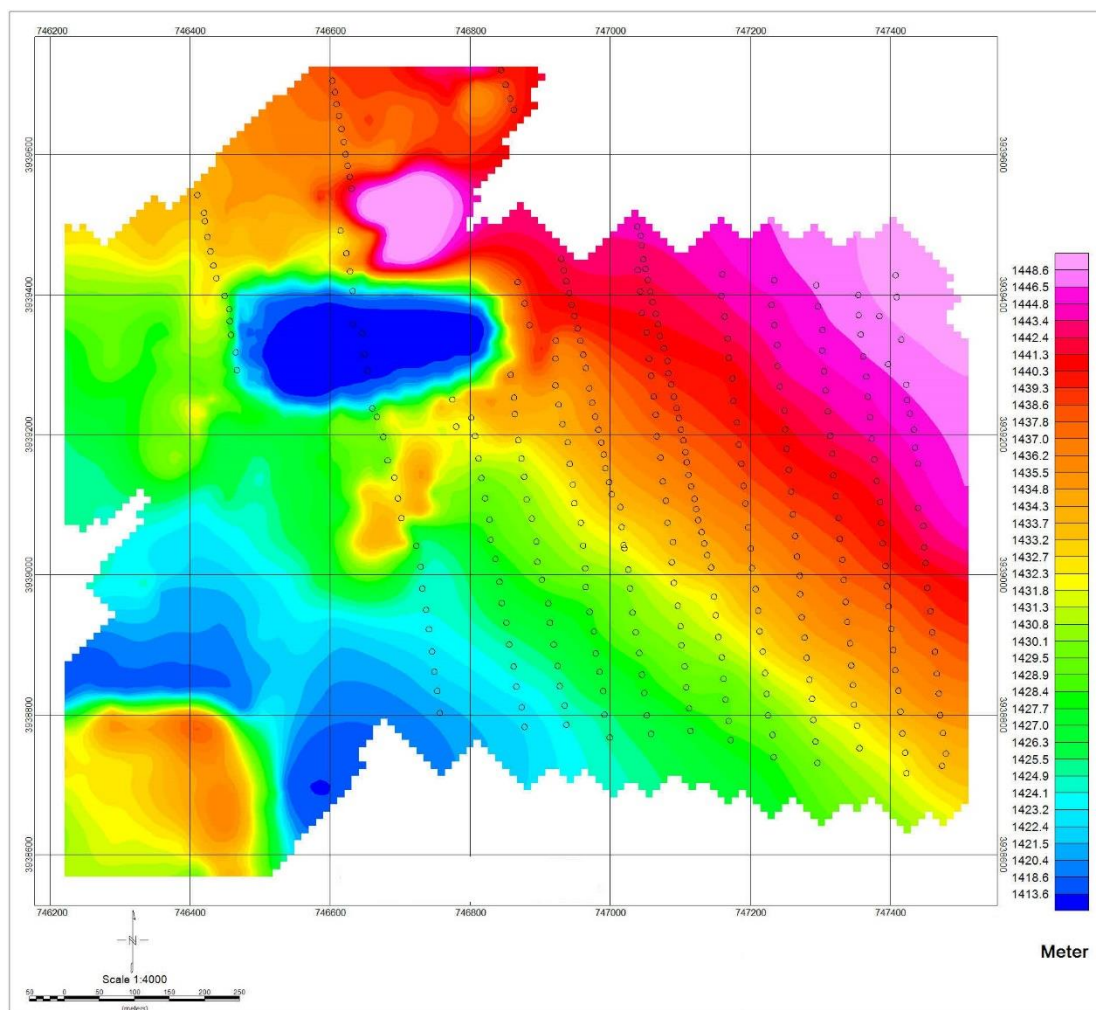
۳-۷- پیش پردازش و تصحیح داده‌ها

در این مرحله پس از برداشت داده‌ها، به منظور انجام تصحیحات و پردازش‌ها لازم است که داده‌ها با یک فرمت مناسب آماده شوند. برای این کار پس از استخراج داده‌ها از دستگاه‌های گرانی‌سنج کلیه داده‌ها در محیط نرم‌افزار اکسل برای انجام تصحیحات لازم مرتب شدند. از آنجا که داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله دریافت، جزر و مد، عرض جغرافیایی، ارتفاع و توپوگرافی منطقه هستند، لذا بایستی اثرات این عوامل را با اعمال تصحیحات مختلف (برحسب نیاز) بر روی داده‌ها حذف نمود یا به حداقل ممکن کاهش داد. وقتی تمامی نوفه‌های قابل پیش‌بینی از داده‌های میدان‌های پتانسیل حذف شدند، داده‌های آنومالی شامل طیفی از اثرات منابع زمین‌شناسی منطقه باقی می‌مانند. در پایگاه داده ایجادشده عمده تصحیحات روی داده‌ها اعمال و آنومالی بوگه ساده برای هر ایستگاه محاسبه و نقشه آن رسم گردید (شکل ۳-۶).

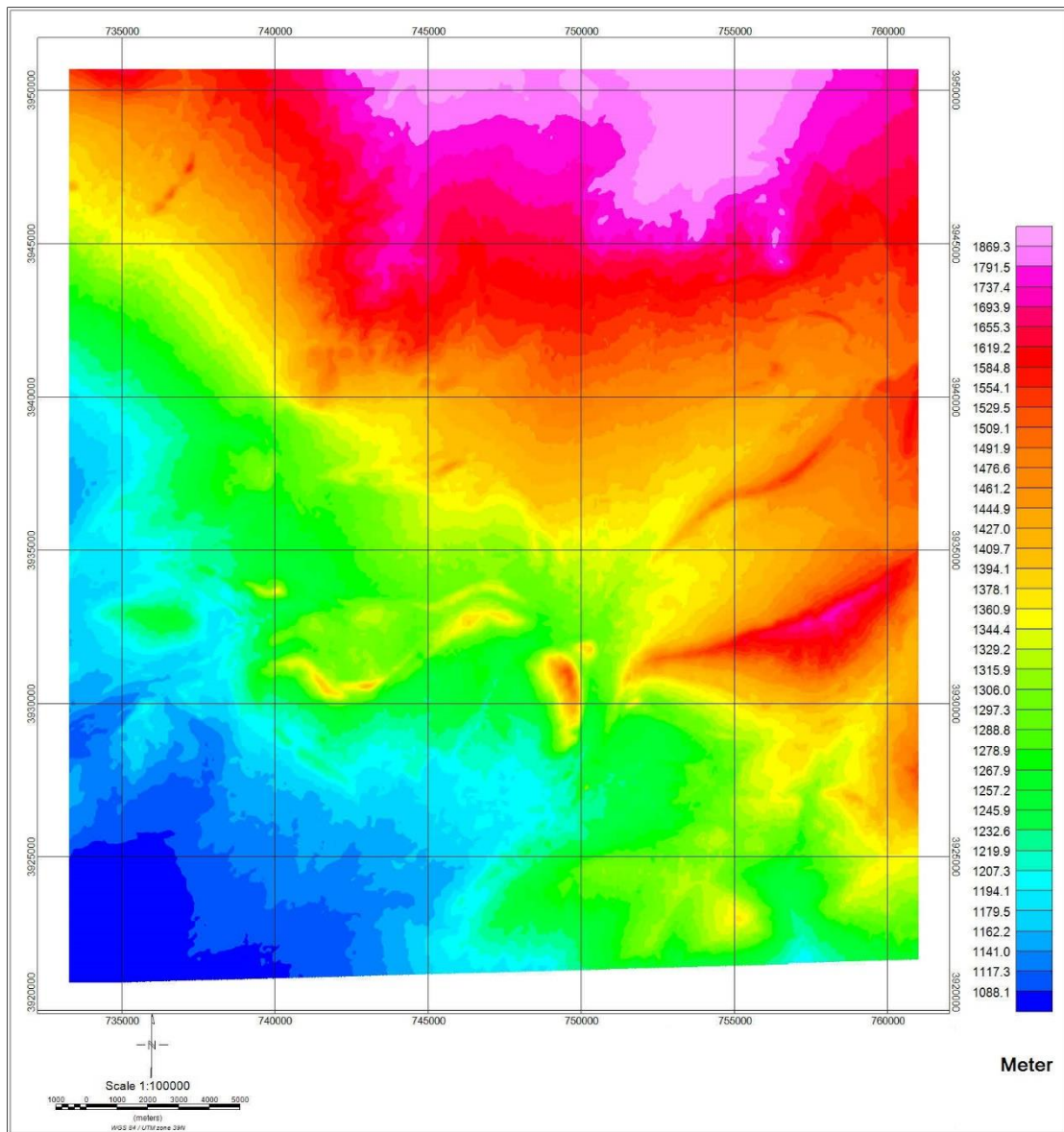


شکل ۳-۶: نقشه آنومالی بوگه ساده محدوده معدنی گرماب

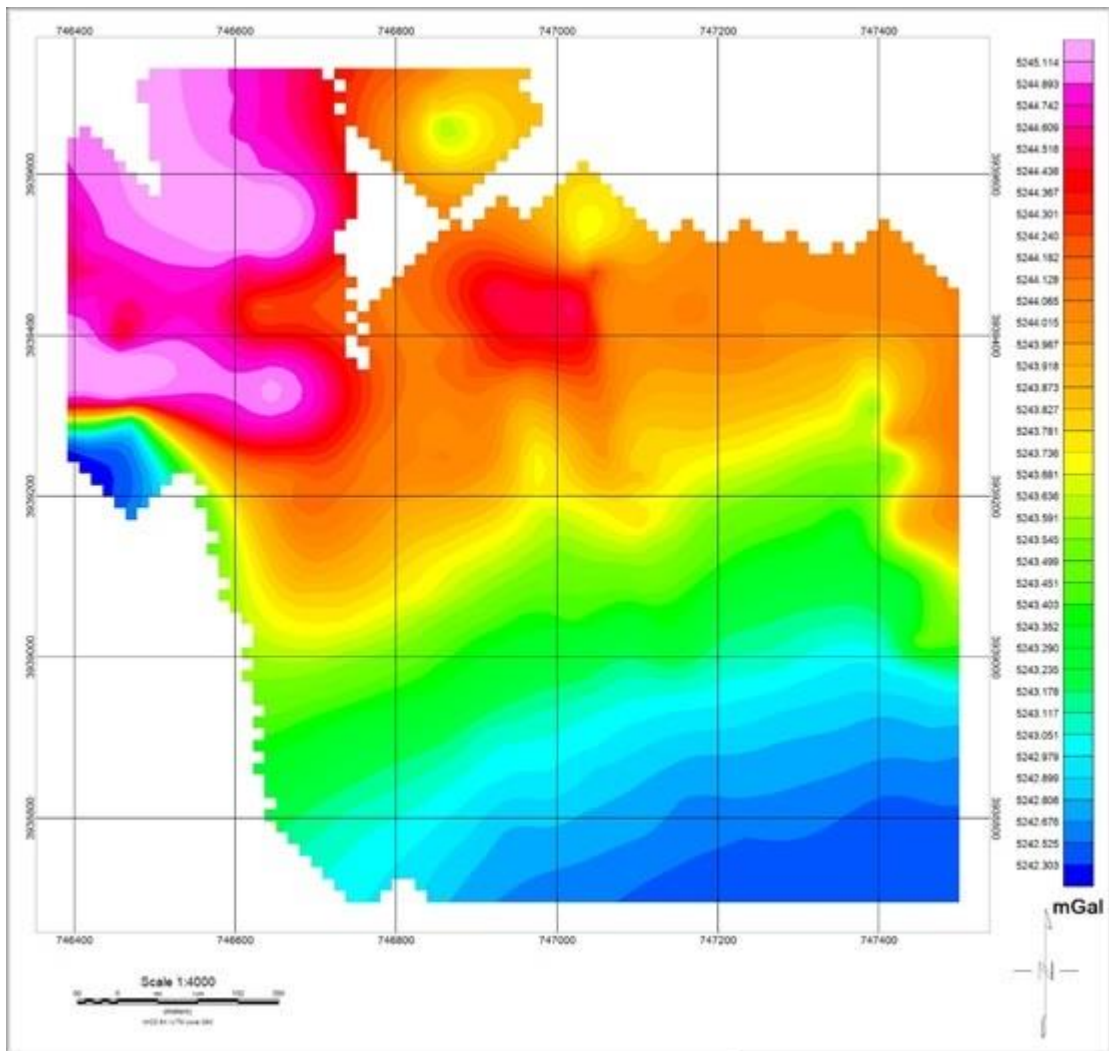
همان طور که پیش تر اشاره شد، به منظور تصحیح توپوگرافی و حذف اثر آن از روی داده های گرانی، از دودسته داده شبکه بندی شده مربوط به زون دور (از مدل رقومی ارتفاعی ۱۵ متری) و نزدیک (به وسیله دوربین نقشه برداری پیمایش شده است) توپوگرافی استفاده شد. نقشه کنتوری این دودسته داده در شکل های (۳-۷) و (۳-۸) ارائه شده است. پس از محاسبه اثر گرانی مؤثر در روی داده های گرانی (شکل ۳-۸)، مقادیر آنومالی بوگه کامل که شتاب گرانی ناشی از اثرات کلیه توده ها و ساختمان های زیر سطحی است، برای هر ایستگاه محاسبه و نقشه آن رسم شد (شکل ۳-۹).



شکل ۳-۷: نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری گرانی برای تصحیح اثر زون نزدیک (محل بیت معدن فعال سولفات سدیم در بخش میانی دیده می‌شود)



شکل ۳-۸: نقشه توپوگرافی منطقه اطراف محدوده مورد بررسی برای تصحیح اثر زون دور توپوگرافی (برگرفته از مدل رقومی ارتفاع ۱۵ متری)



شکل ۳-۹: آنومالی بوگه کامل نسبی محدوده معدنی گرماب

در نقشه مذکور؛ که در محیط نرم‌افزاری Geosoft تهیه شده است، یک روند تغییر مقادیر آنومالی گرانی از سمت جنوب شرق به سمت شمال غرب محدوده مورد بررسی کاملاً مشهود است به طوری که در بخش جنوب شرقی محدوده مقادیر گرانی دارای مقادیر کم بوده و با یک روند افزایشی به سمت شمال غرب ادامه می‌یابد. این روند تا محدوده پیت معدن به شدت افزایش یافته و از حالت روند نواری به صورت توده آنومال مثبت آنومالی گرانی ظاهر شده که نشان‌دهنده محدوده احتمالی مرتبط با اختلاف چگالی موجود در منطقه یا کانی‌زایی باشد.

نقشه آنومالی تهیه شده از برداشت‌های گرانی از اثرات کلیه توده‌ها و ساختمان‌هایی به وجود آمده‌اند که در اعماق مختلف واقع بوده و دارای چگالی‌های متفاوتی هستند. در روش‌های میدان پتانسیل اجسام به وجود آورنده آنومالی‌ها از پائین به بالا بر روی یکدیگر اثر گذاشته و نقشه آنومالی بوگه را به وجود می‌آورند. از مسائل مهم در تفسیر نقشه آنومالی گرانی بوگه، تعیین آنومالی منطقه‌ای است که بیانگر آثار خیلی عمیق به صورت خطی و یا با توپوگرافی ملایم است. با حذف اثر گرانی مربوط به منابع عمیق از داده‌های گرانی برداشت‌شده، آنومالی باقی‌مانده گرانی به دست می‌آید. به‌طور کلی تفسیر کیفی و کمی و مدل‌سازی داده‌های میدان پتانسیل در این مرحله با شناسایی و تعیین محل منابع زمین‌شناسی مولد آنومالی‌ها خاتمه می‌یابد.

فصل چهارم:

پردازش، تفسیر و مدل سازی

داده‌های گرانی منطقه گرماب

۴-۱- پردازش و تفکیک آنومالی‌ها و تفسیر نتایج

مهم‌ترین پارامتر در روش‌های میدان پتانسیل تفکیک آثار آنومالی‌ها از یکدیگر است، یعنی جداسازی آنومالی‌های کم‌عمق از منابع عمیق به وسیله تهیه نقشه آنومالی باقی‌مانده؛ که مبین تأثیرات سطحی ناشی از اثرات ساختمانی موجود در منطقه است نسبت به تأثیرات عمیق (روند تأثیرات ناحیه‌ای) است [Robinson & Coruh, 1988]. بنابراین لازم است این دودسته آنومالی‌ها از یکدیگر تفکیک شوند تا بدین ترتیب آنومالی‌های موردنظر آشکارسازی شوند. این کار با روش‌های مختلف تفکیک آنومالی‌ها از جمله روش‌های روند سطحی، مشتق، گسترش میدان به سمت بالا و گسترش میدان به سمت پایین انجام می‌پذیرد. به‌طور کلی تفسیر کیفی و کمی و مدل‌سازی داده‌های میدان پتانسیل در این مرحله با شناسایی و تعیین محل منابع زمین‌شناسی مولد آنومالی‌ها خاتمه می‌یابد.

نقشه‌های آنومالی تهیه‌شده از برداشت‌های روش‌های پتانسیل از تأثیرات اجسام گوناگون در اعماق مختلف با چگالی‌های متفاوت پدید می‌آید؛ که مقادیر برداشت‌شده شامل اثرات مجموعه این توده‌ها از پایین به بالا می‌باشد. یعنی آنچه برداشت شده به کلیه آنومالی‌ها مربوط می‌شود. در نقشه آنومالی بوگه، تأثیرات سنگ کف با توپوگرافی ملایم و تغییرات ملایم خطی خود را نشان خواهند داد که به این مقادیر تأثیرات منطقه‌ای یا گرانی ناحیه‌ای می‌گویند. تأثیرات منطقه‌ای را باید به وسیله روش‌های محاسباتی و یا روش‌های ترسیمی می‌توان از بین برد بدین منظور با کم کردن این مقادیر که شامل تأثیرات عمیق می‌باشد از مقادیر بوگه، تأثیرات سطحی حاصل می‌شود.

با توجه به اینکه در روش‌های میدان پتانسیل توزیع اجرام به وجود آورنده آنومالی یکسان نیست و اثرات ناشی از یک توده مفید نمی‌باشد. بنابراین اشکال و اعماق توده‌های به وجود آورنده آنومالی متفاوت بوده و تغییرات نقشه آنومالی بوگه شامل کلیه توده‌های منطقه برداشت خواهد بود. بنابراین اگر در روش‌های پتانسیل توزیع یکسان وجود داشته یا اصلاً تغییر چگالی بین اجرام وجود نداشته باشد، در آن صورت بحثی

از مطالب آنومالی‌ها و تفکیک آن‌ها باقی نمی‌ماند و تغییرات خطی می‌شد. در نقشه‌های میدان پتانسیل توده‌های عمیق محدوده وسیعی را در نقشه آنومالی در برگرفته برعکس تأثیرات سطحی مناطق کوچکی را شامل می‌شوند. بنابراین مقادیر آنومالی گرانی باقی‌مانده طبق رابطه (۱-۴) بیان خواهد شد که تفسیر داده‌های میدان پتانسیل به دو صورت کیفی و کمی انجام می‌شود.

(۱-۴) اثرات ناحیه‌ای - مقادیر بوگه = اثرات باقی‌مانده

روش‌های کیفی و کمی متفاوتی برای جدایش آنومالی‌های منطقه‌ای و محلی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از ابتدایی‌ترین آن‌ها می‌توان روش‌هایی چون هموار کردن گرافیکی پروفیل گرانی بوگه و روش گریفین را نام برد [Griffin, 1949]. در طی سالیان بعدی این روش‌ها، توسط روش‌های پیشرفته‌تر و با سرعت پردازش بالا جایگزین شده‌اند. روش‌هایی مانند کمترین مربعات، جدا کردن طول موجی، گسترش میدان به سمت بالا و روش فیلتر میان‌گذر وینر، روش‌های فیلترهای فازی محلی و روش تخمین عمق اوپلر مورد استفاده قرار گرفته‌اند به نحوی که حجم وسیعی از داده‌ها در زمانی اندک قابل پردازش باشد. در نهایت و پس از جدایش، آنومالی باقی‌مانده مورد استفاده قرار گرفته تا به ویژگی‌هایی از منبع مدفون همچون گسترش، عمق و شکل پی برده شود. لذا برای تفسیر آنومالی گرانی در اکتشاف مواد معدنی لازم است که مؤلفه‌های محلی از ناحیه‌ای تفکیک شوند. برای تفکیک آنومالی ناحیه‌ای از آنومالی گرانی بوگه (شکل ۱-۴)، روش تحلیل سطح روند، گسترش میدان به سمت بالا، گرادیان قائم و افقی، سیگنال تحلیلی و روش تخمین عمق اوپلر استفاده شده است.

۴-۲- روش روند سطحی^۱

یکی از انعطاف پذیرترین روش‌های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای، روش روند سطحی می‌باشد. در این روش، میدان ناحیه‌ای از مقادیر مشاهده‌ای به وسیله روش کمترین مربعات یا روش اورتونرمال تقریب زده می‌شود. این روش بر اساس محاسبه سطحی (به روش ریاضی) استوار است که بهترین تطابق را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای داشته باشد [Unwin, 1987; Miller, 1956].

در این روش بر داده‌های گرانی مشاهده‌ای سطحی عبور داده می‌شود که پیچیدگی معادله ریاضی سطح موردنظر به روند حاکم بر داده‌ها بستگی دارد [Robisons & Coruh, 1988]. در حالت کلی معادله سطح مذکور برای حالت دوبعدی به صورت زیر است:

$$T(x, y) = A_{00} + A_{10}x + A_{01}y + A_{11}xy + A_{20}x^2 + A_{02}y^2 + A_{21}x^2y + \dots + A_{mn}x^m y^n \quad (۲-۴)$$

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

$$R_i = G_i - T_i \quad (۳-۴)$$

که در آن G_i داده‌های مشاهده‌ای، T_i پاسخ سطح مزبور به عنوان اثر ناحیه‌ای و R_i نماینده آنومالی باقی‌مانده می‌باشد. درجه روند سطحی به پیچیدگی زمین‌شناسی ناحیه‌ای بستگی دارد. از درجه روند سطحی بیشتر برای همپوشانی بین مقادیر سطح مزبور و مقادیر داده‌های مشاهده‌ای در شرایط پیچیده‌تر زمین‌شناسی استفاده می‌شود [Dobrin & Sovit, 1988].

^۱Trend

این در صورتی است که مجموع باقی مانده‌ها بایستی به صفر نزدیک شود. در این حالت مربع اطلاعات باقیمانده یعنی مربع تفاضل اطلاعات مشاهده شده و اطلاعات روند سطحی باید کمترین مقدار را داشته باشد (روش کمترین مربعات):

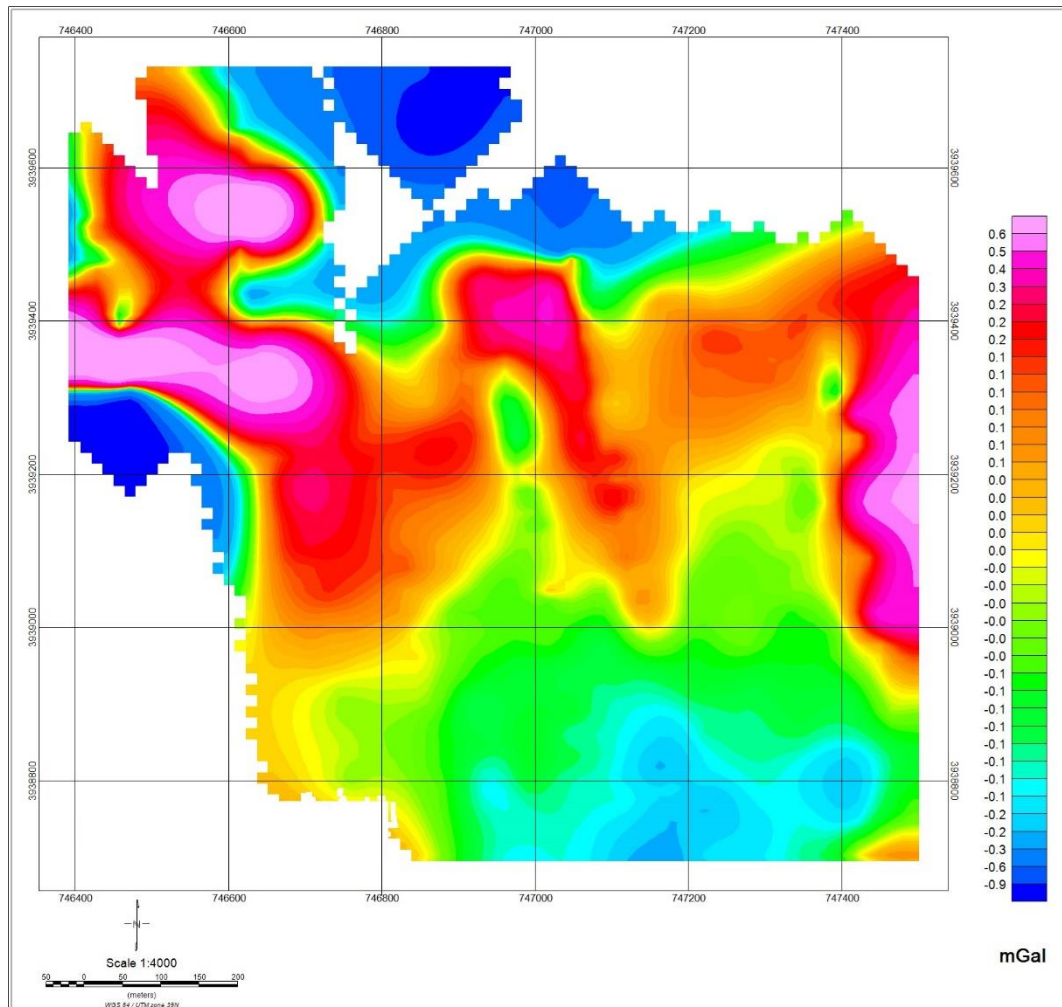
$$\sum_{i=1}^n R_i^2 = \sum (G_i - T_i)^2 = \text{the least value} \quad (4-4)$$

هر چه درجه روند سطحی بیشتر باشد، امکان دسترسی به سطحی که بیشترین مناسبت و یا تطابق را با مقادیر مشاهده شده داشته باشد بیشتر خواهد بود، بنابراین روند ایده آل برای یک فرآیند تفکیک آنومالی است.

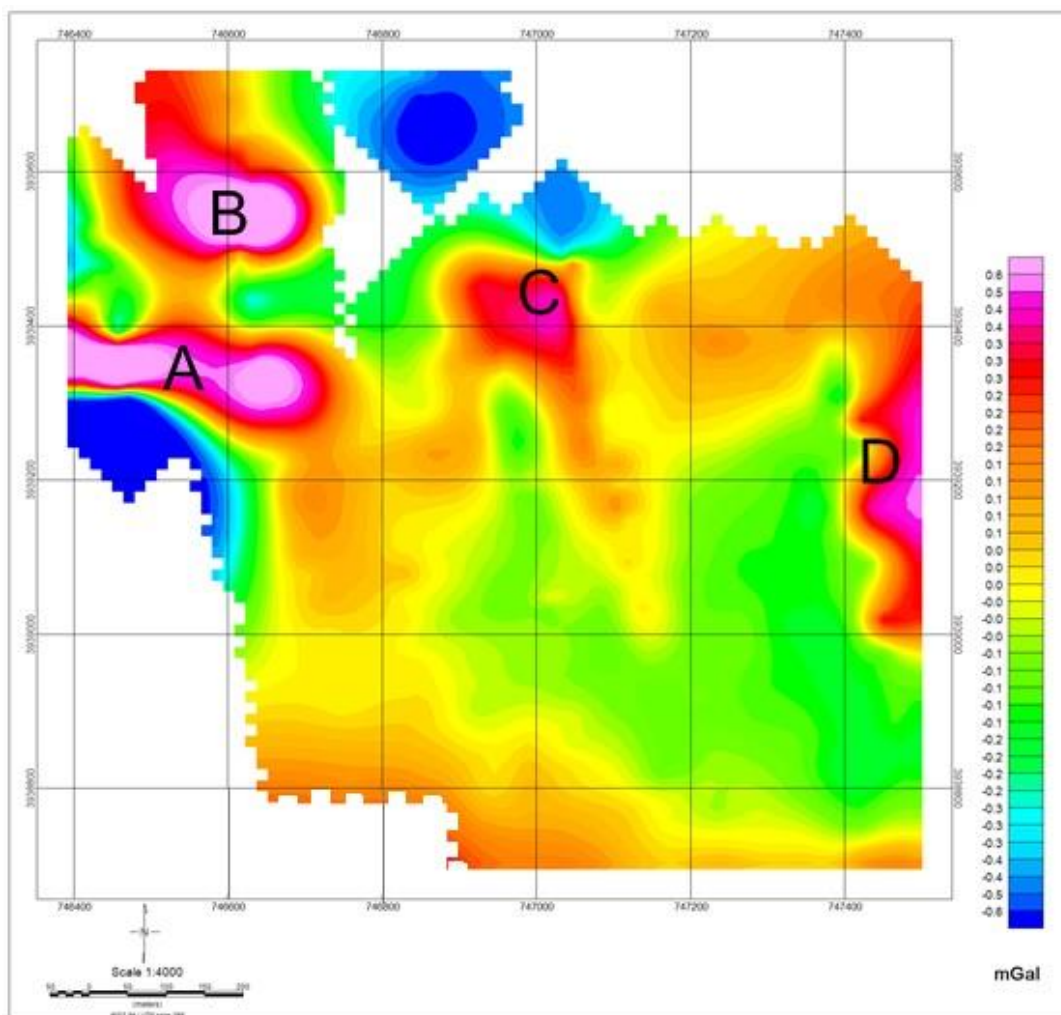
برای تفکیک آنومالی‌های محلی از آنومالی‌های ناحیه‌ای در محدوده مورد مطالعه، با استفاده از نرم افزار Geosoft و Winglink بر روی آنومالی گرانی بوگه از فیلتر روند سطحی با درجه‌های متفاوت ۱،۲ و ۳ اعمال شد (شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۳). پس از بررسی نتایج حاصل از این روش و نبود تغییرات جدی در آنومالی‌های اصلی، نقشه حاصل از روند سطح مرتبه دوم به این دلیل که آنومالی‌های مثبت نقشه روند مرتبه دوم بیشترین شباهت را با اطلاعات و مشاهدات زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه داشت برای تجزیه و تحلیل انتخاب گردید. نقشه آنومالی باقی مانده روند ۲، وضعیت ساختمانی ناحیه مذکور را در حدود ۶ آنومالی بزرگ تا کوچک به صورت دو تا سه بعدی مشخص می‌سازد که تعدادی از آن‌ها منفی بوده و با توجه به هدف پروژه مورد توجه نمی‌باشند. در بخش شمال غرب نقشه و محدوده معدن فعلی دو آنومالی مثبت (A و B) مناسب و در مرکز و شرق نیز دو آنومالی مثبت کوچک‌تر (C و D) دیده می‌شود. با توجه به شبکه برداشت داده‌ها آنومالی مثبت شرقی (D) در حاشیه نقشه بوده و به علت کمبود داده از اعتبار خوبی برخوردار نیست و قابل اطمینان نمی‌باشد.

در میان آنومالی‌های مثبت موجود در نقشه مذکور، آنومالی A بخشی از محدوده معدن و ادامه آن در شرق محدوده می‌باشد. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و مشاهدات صحرایی، دو آنومالی A و B با

روند کانی‌زایی سولفات سدیم درون لایه‌های رسوبی تبعیت می‌نمایند. با مقایسه نقشه آنومالی ناحیه‌ای با نقشه آنومالی باقی‌مانده روند ۲ مشخص می‌گردد که هیچ‌گونه انطباق و هماهنگی بین مقادیر ناحیه‌ای با مقادیر محلی وجود ندارد و مشخص‌کننده عمق کم توده‌های آنومال و گسترش کم آن‌ها است که در روندهای با درجه بالاتر نیز مشهود است. با توجه به نقشه آنومالی باقی‌مانده گرانی در محدوده برداشت داده‌ها به نظر می‌رسد که در سمت جنوب و جنوب شرق گسترش ماده معدنی بعید بوده و از ساختار کلی زمین‌شناسی منطقه تبعیت می‌نماید.

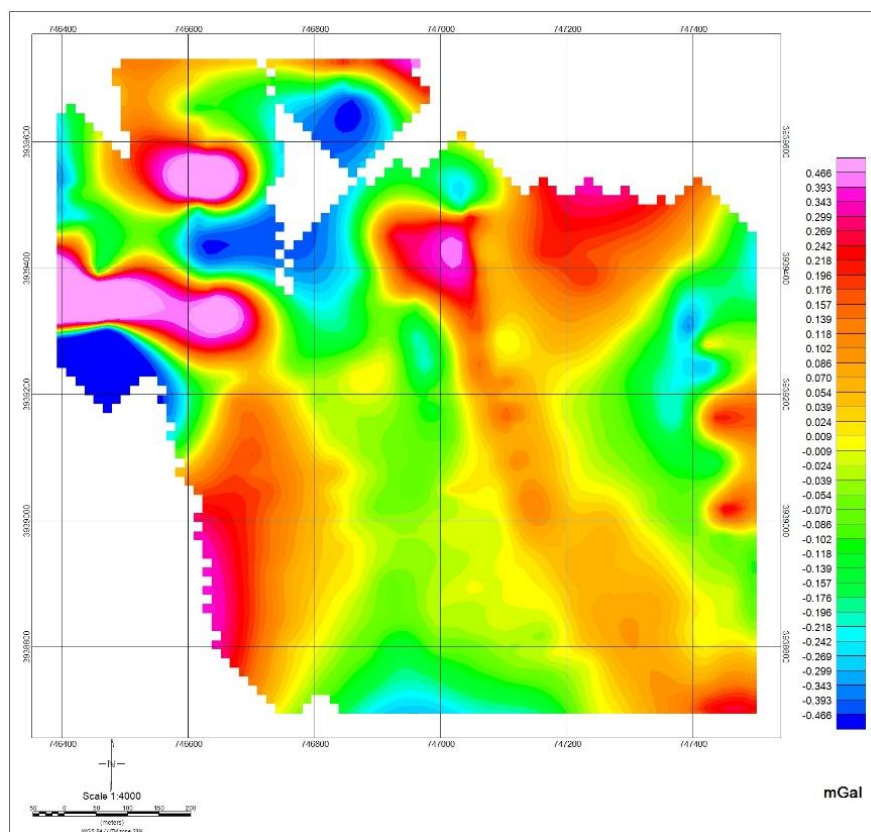


شکل ۴-۱: نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده حاصل از اعمال فیلتر روند سطح مرتبه یک



شکل ۴-۲: نقشه آنومالی گرانی باقی مانده حاصل از اعمال فیلتر روند سطح مرتبه دوم

ولی بر اساس شواهد زمین شناسی و نیز مطالعه تصاویر ماهواره ای وجود چندین گسل مؤثر در محدوده به اثبات رسیده که می تواند سبب جابجایی ماده معدنی شده باشد. این حالت را می توان با احتمال بیشتری روی آنومالی C عنوان نمود، هرچه درجه این فیلتر بالاتر رفته است آنومالی شرقی کوچک تر شده است، البته این احتمال هم بعید نیست که آنومالی شرقی تحت تأثیر گسلی جابجا شده باشد که نیازمند بررسی بیشتر را می طلبد.



شکل ۴-۳: نقشه آنومالی گرانی باقی مانده حاصل از اعمال فیلتر روند سطح مرتبه سوم

۴-۳- اعمال فیلتر گسترش میدان گرانی به سمت بالا^۱

یکی از روش‌های تفکیک آنومالی میدان پتانسیل گسترش به سمت بالا می‌باشد با کاربرد این روش تأثیرات سطحی حذف شده و تأثیرات عمیق به وضوح مشخص می‌شود. در این روش داده‌های میدان پتانسیل از یک سطح مبنا به طریق ریاضی بر روی سطوح تراز در بالای سطح مبنا اصلی تصویر می‌شوند. عمل گسترش به سمت بالا یک نوع هموارسازی می‌باشد.

در نقشه‌های گسترش به سمت بالا هر چه از سطح زمین دور می‌شویم آنومالی‌های کوچک و کم وسعت کمتر شده و در نتیجه فقط آنومالی‌های منطقه‌ای باقی می‌مانند. در واقع این روش آنومالی‌های با طول موج

^۱Upward Continuation

کوتاه‌تر را حذف کرده و دامنه آنومالی‌ها را تضعیف و نویز را کاهش می‌دهد. بنابراین این روش مانند یک روش پایین‌گذر عمل می‌کند. در این روش آنومالی بوگه از سطح برداشت داده‌ها بر روی سطوح ترازوی بالاتر از سطح برداشت تصویر می‌شوند.

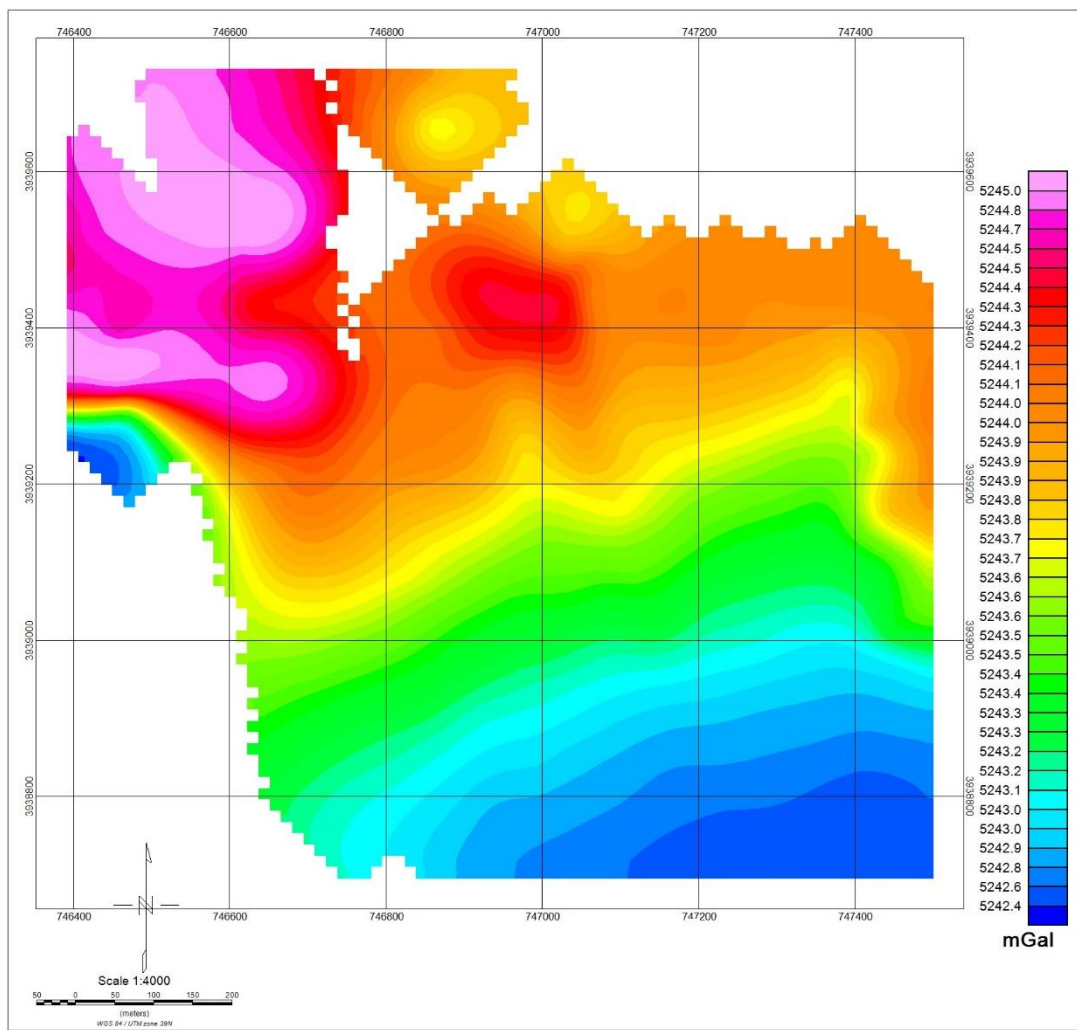
مراحل انجام تبدیل میدان گرانی با استفاده از فیلتر گسترش میدان به سمت بالا به شرح زیر خلاصه می‌شود:

(۱) تبدیل فوریه داده‌ها و انتقال آن‌ها به حوزه فرکانس

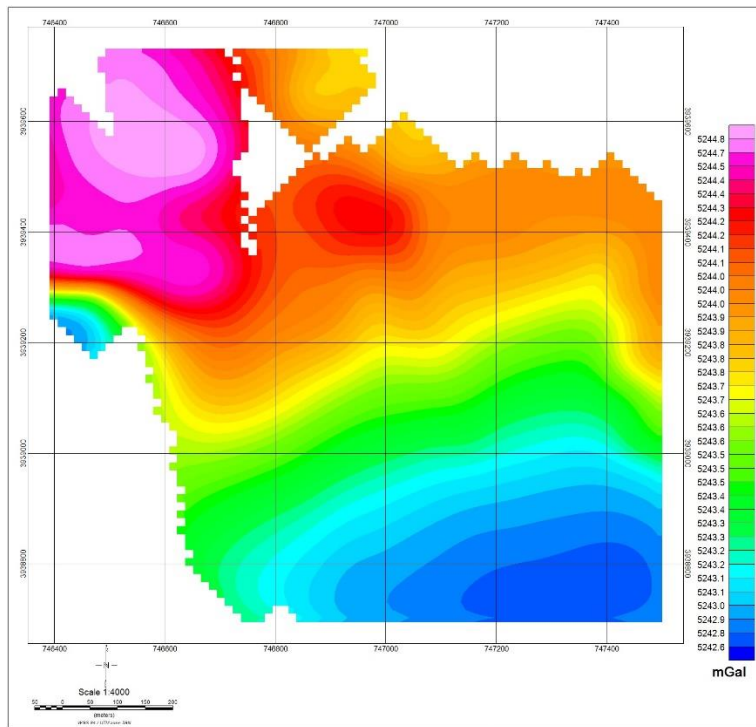
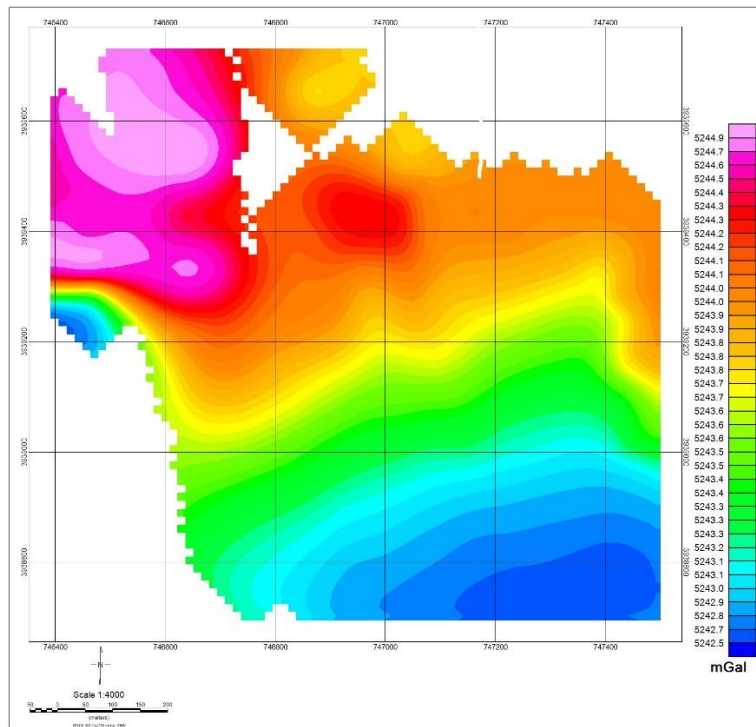
(۲) ضرب نتیجه مرحله ۱ در عبارت $e^{-|k|\Delta z}$ که در آن Δz ارتفاع گسترش به متر و k عدد موج است.

(۳) برگرداندن نتایج مرحله ۲ به حوزه مکان توسط عکس تبدیل فوریه

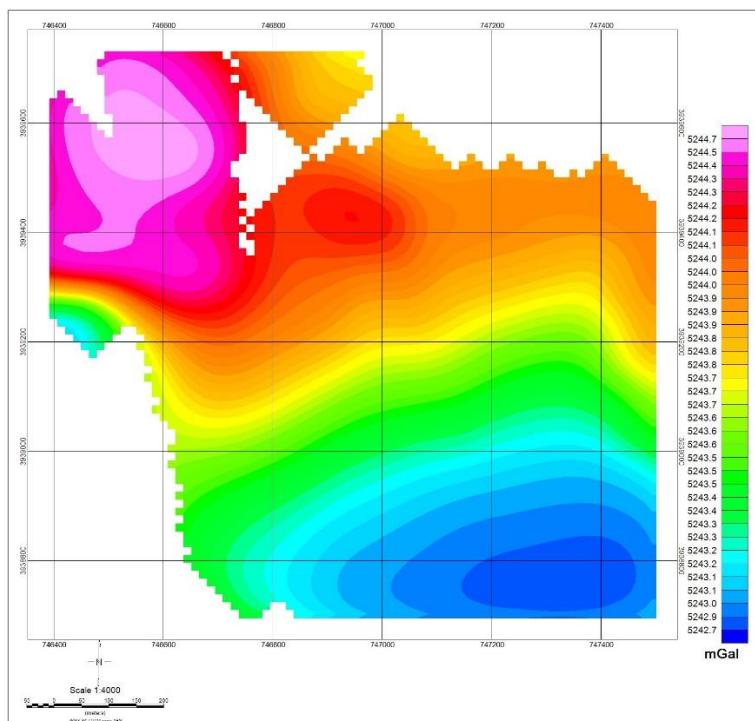
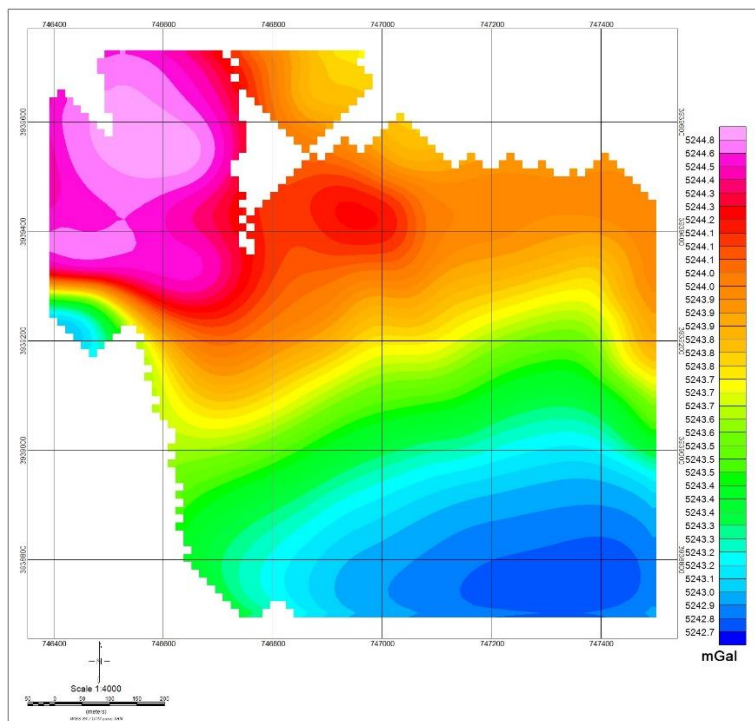
به منظور بررسی بیشتر داده‌های گرانی و مقایسه نتایج روش تفکیک روند سطح، از روش تبدیل میدان گرانی به سمت بالا نیز استفاده شد. بنابراین با استفاده از نرم‌افزار Geosoft، روش گسترش میدان گرانی به سمت بالا در ارتفاع‌های مختلفی از ۱۰ تا ۸۰ متری به فواصل ۱۰ متری بر روی داده‌های آنومالی بوگه اعمال و نتیجه بررسی در هر ارتفاعی به صورت نقشه تبدیل میدان به سمت بالا رسم گردید (شکل ۴-۴ تا ۴-۷). نقشه‌های حاصل از این روش در ارتفاع‌های بیش از ۴۰ متری تغییر چندانی در ظاهر نمودار نشان نمی‌دهد و این موضوع بیانگر این مطلب است که توده‌های آنومال از ریشه بالایی برخوردار نبوده و جزء توده‌های سطحی محسوب می‌شوند و عمده تغییرات روی نقشه‌ها مشابه هم بوده و نشان‌دهنده آنومالی‌های طول موج بلند و عمیق هستند.



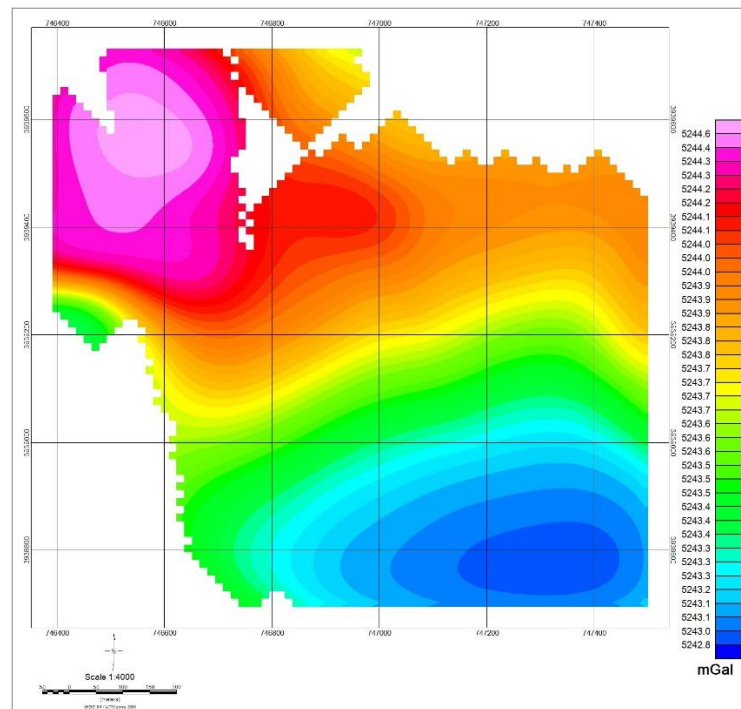
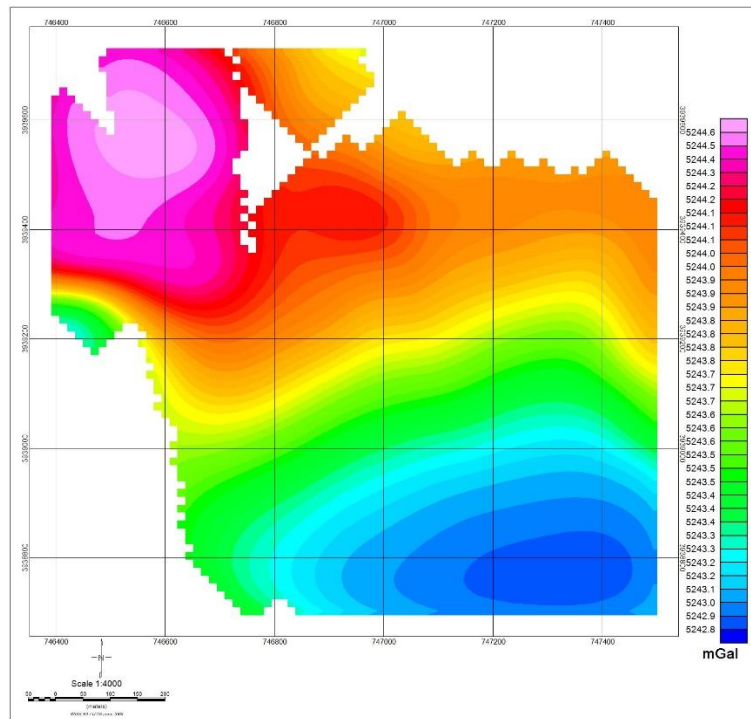
شکل ۴-۴: نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۱۰ متر



شکل ۴-۵: نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۲۰ متر (بالا) و ۳۰ متر (پایین)

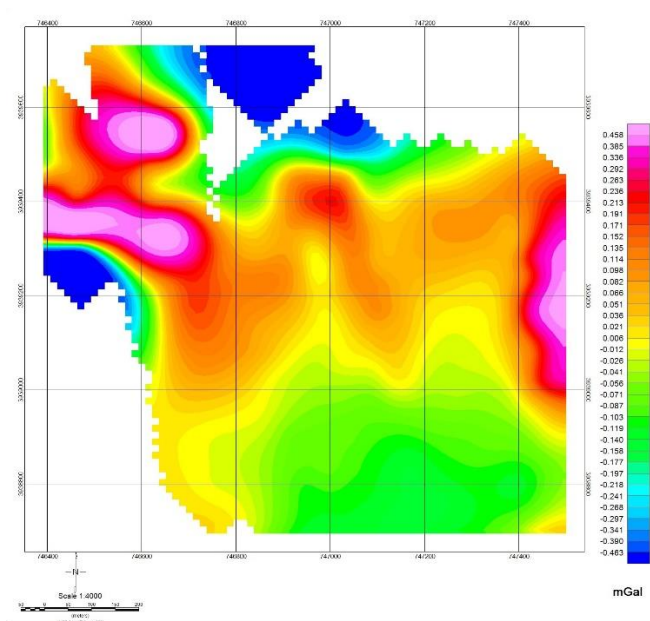


شکل ۴-۶: نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۴۰ متر (بالا) و ۵۰ متر (پایین)

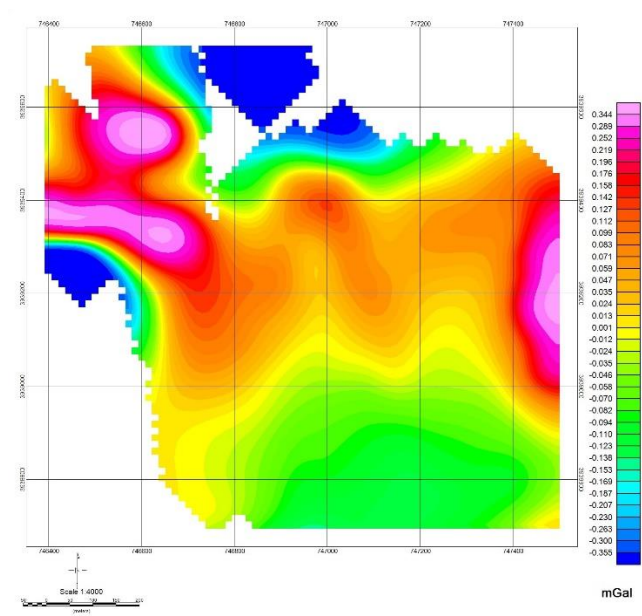


شکل ۴-۷: نقشه گسترش میدان گرانی بوگه به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۶۰ متر (بالا) و ۷۰ متر (پایین)

علاوه بر این روی میدان گرانی باقی مانده مرتبه اول نیز برای ارتفاع‌های مختلف محاسبه و نقشه‌های مربوطه برای مقایسه رسم شد که دو نمونه از آن ارائه شده است (شکل ۴-۸ و ۴-۹).



شکل ۴-۸: نقشه گسترش میدان گرانی باقی مانده مرتبه اول به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۲۰ متر



شکل ۴-۹: نقشه گسترش میدان گرانی باقی مانده مرتبه اول به سمت بالا به اندازه ارتفاعی ۴۰ متر

همان‌گونه که در این دو نقشه مشاهده می‌شود، آنومالی‌های اصلی A و B پس از ۴۰ متر گسترش یافته هنوز به صورت تیز و واضح دیده می‌شوند؛ که می‌توان به توده نسبتاً مناسب از محدوده معدنی مرتبط دانست. پخش‌شدگی آنومالی مرکزی (C) و از بین رفتن آن در ارتفاع تبدیل ۶۰ متر به بالاتر نشان می‌دهد که احتمالاً این آنومالی ریشه زیادی ندارد. از طرفی یک دلیل را به جهت عدم برداشت داده در یک شبکه متراکم‌تر دانست.

۴-۴-۴ ارتفاع بهینه^۱

معمولاً داده‌های گرانی روی سطح اولیه برداشت داده‌ها تفسیر می‌شوند. اما در برخی از موارد به منظور تفسیر بهتر داده‌ها یا مقایسه آن‌ها با داده‌های دیگر لازم است که داده‌های گرانی به یک سطح ارتفاعی دیگر منتقل شوند که به این فرآیند پردازشی داده‌ها ادامه فراسو (انتقال به سطح پایین‌تر) می‌گویند.

بر اساس بررسی‌های انجام شده توسط برخی از پژوهشگران (فدی و همکاران^۲ (۱۹۸۷)، چن^۳ (۱۹۹۹))، در روش ادامه فراسو، انتخاب ارتفاع بهینه اهمیت بسیار زیادی دارد، زیرا ارتفاع کم‌تر از مقدار بهینه سبب باقی ماندن اثر بی‌هنجاری‌های محلی در داده‌ها می‌شود و در مقابل ارتفاع بیش‌تر از ارتفاع بهینه سبب تضعیف مضاعف اثر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای در داده‌ها می‌شود. طبق نظر ژنگ و همکاران^۴ (۲۰۰۷)، انتخاب ارتفاع بهینه برای ادامه فراسو، اثر مستقیمی بر کیفیت جداسازی بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای خواهد داشت. روش متداول در انتخاب ارتفاع بهینه ادامه فراسو، مقایسه کیفی نتایج ادامه فراسو برای ارتفاع‌های متفاوت می‌باشد (روشندل کاهو و نجاتی کلاته، ۱۳۹۳).

^۱Optimum Height

^۲Fedi et al.

^۳Chen

^۴Zeng et al.

۴-۴-۱- برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو

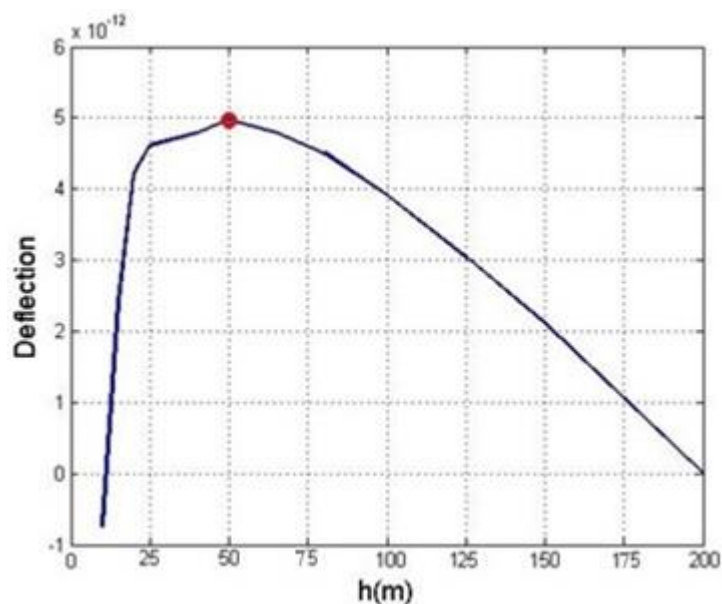
همبستگی عرضی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای (Δg_r) و نتیجه ادامه فراسو (Δg_u) برای ارتفاع معین

به صورت رابطه (۴-۵) بیان می‌شود [Abdelrahman et al. 1989].

$$r_{\Delta g_r, \Delta g_u} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \Delta g_r(x_i, y_i) \Delta g_u(x_i, y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \Delta g_r^2(x_i, y_i) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \Delta g_u^2(x_i, y_i)}} \quad (۴-۵)$$

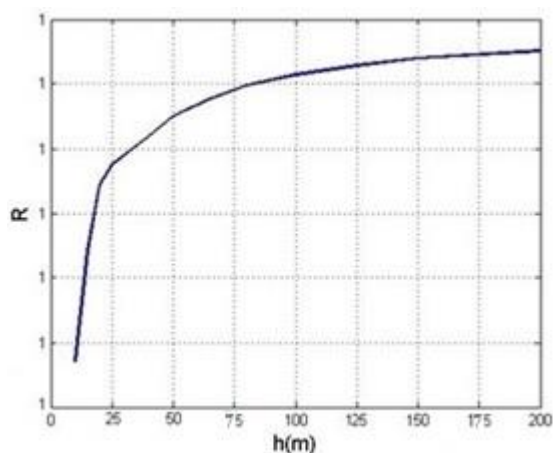
که M و N به ترتیب تعداد نمونه‌ها در راستای y و x است.

برای برآورد ارتفاع بهینه ادامه فراسو، می‌توان همبستگی عرضی بی‌هنجاری ناحیه‌ای (Δg_r) و نتیجه ادامه فراسو (Δg_u) برای ارتفاع‌های مختلف را برحسب ارتفاع رسم کرد، بدیهی است که بیشینه مقدار این همبستگی عرضی مربوط به ارتفاعی است که اثرات بی‌هنجاری‌های محلی در نتیجه ادامه فراسو تضعیف شده است، این ارتفاع به مثابه ارتفاع بهینه برای ادامه فراسو در نظر گرفته می‌شود. با کدنویسی در محیط متلب ارتفاع بهینه به دست آمده است. ورودی این الگوریتم که براساس معادله (۴-۵) نوشته شده است، بی‌هنجاری ناحیه‌ای (Δg_r) و نتیجه ادامه فراسو (Δg_u) است، خروجی این الگوریتم مقدار ارتفاع بهینه است که در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰: مقدار انحراف از خط واصل میان دونقطه ابتدایی و انتهایی، نقطه قرمز رنگ نمایانگر مقدار بیشینه

انحراف



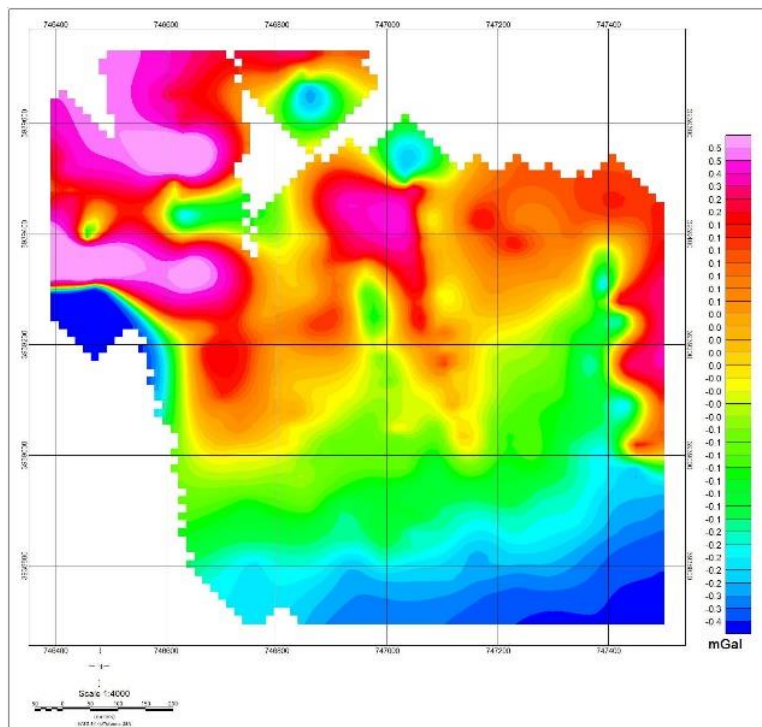
شکل ۴-۱۱: مقادیر همبستگی عرضی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای و نتایج ادامه فراسو برای ارتفاع‌های مختلف

با بررسی شکل (۴-۱۰) می‌توان به این نتیجه رسید که بالاترین نقطه این نمودار نشانگر ارتفاع بهینه

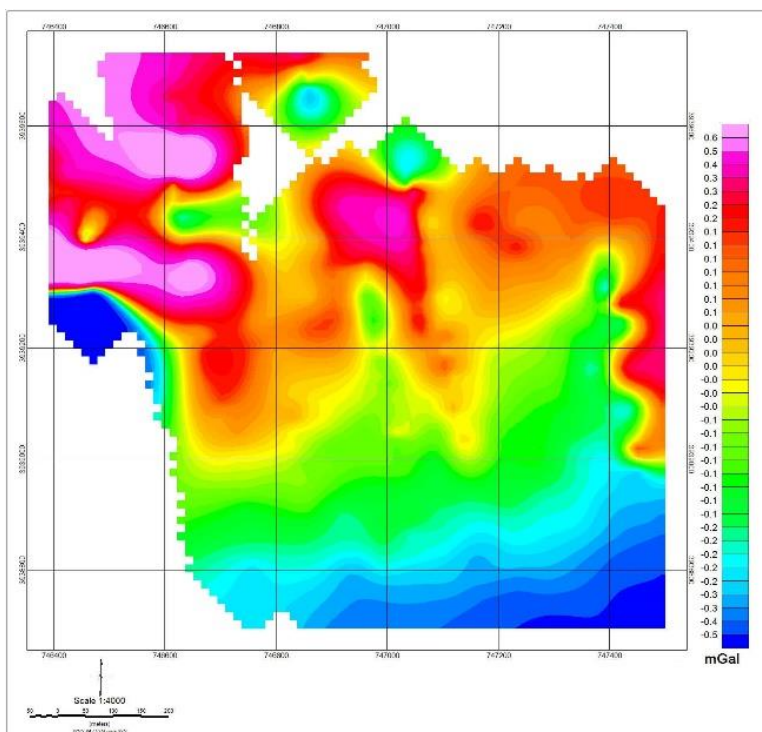
می‌باشد، پس در این مطالعه ارتفاع بهینه حاصل شده ۵۰ متر می‌باشد. همچنین برای مقایسه آنومالی

باقی‌مانده حاصل از تبدیل میدان، مقادیر باقی‌مانده هر ارتفاع با کسر هر یک از مقادیر گسترش‌یافته فوق-

الذکر از مقادیر آنومالی بوگه محدوده نیز محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۱۲ و ۴-۱۳).



شکل ۴-۱۲: نقشه آنومالی گرانی باقی مانده از کسر گسترش میدان به سمت بالا به ارتفاع ۵۰ متر از بوگه کامل



شکل ۴-۱۳: نقشه آنومالی گرانی باقی مانده از کسر گسترش میدان به سمت بالا به ارتفاع ۶۰ متر از بوگه کامل

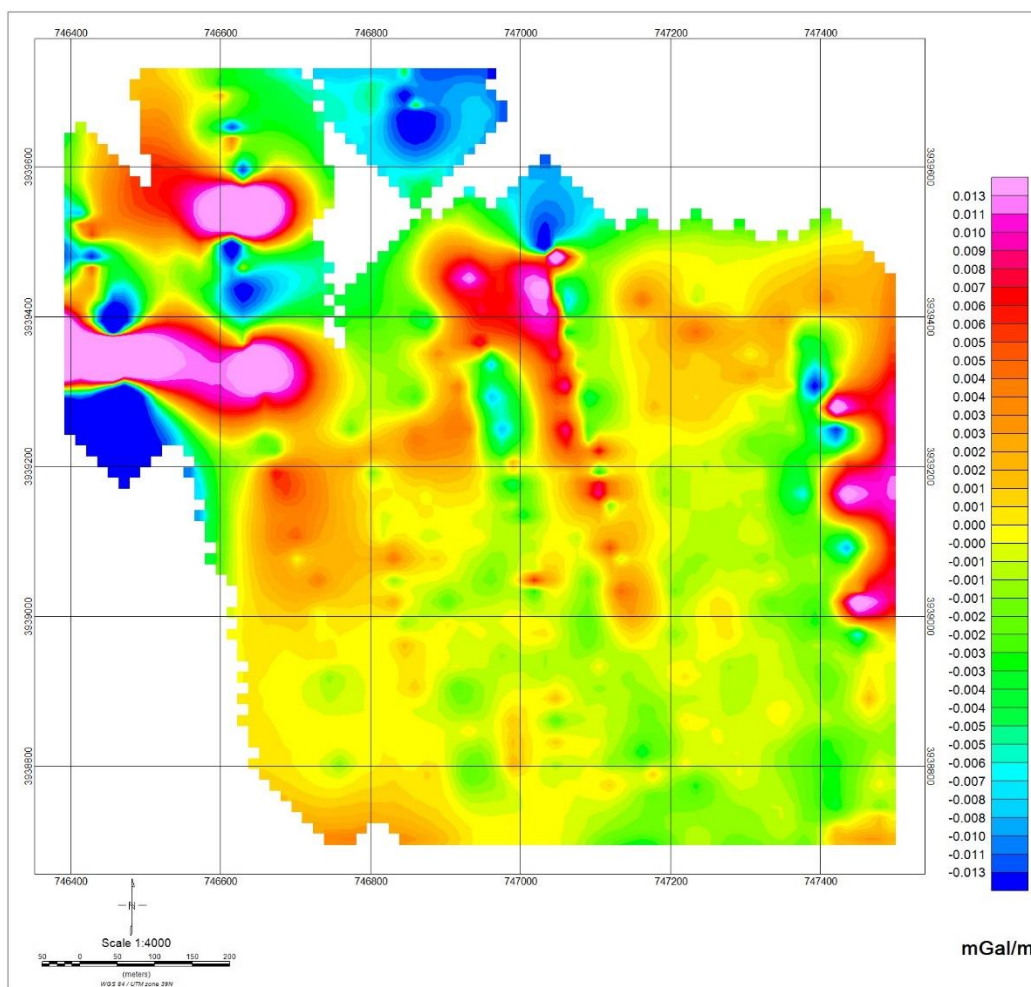
برای تشخیص این که کدام یک از نقشه‌های روند سطحی حاصل شده جهت تفسیر مناسب‌تر است، باید روندهای به دست آمده را با آنومالی باقی مانده گسترش به سمت بالا ۵۰ متر مقایسه کرد و هر کدام که بیشترین شباهت را با آنومالی باقی مانده گسترش به سمت بالا ۵۰ متر داشته باشد مناسب‌ترین نقشه جهت تفسیر می‌باشد.

پس از بررسی نقشه‌های حاصل شده از روندهای مختلف این نتیجه به دست آمد که روند سطحی درجه ۲ بیشترین شباهت را با آنومالی باقی مانده گسترش به سمت بالا ۵۰ دارد.

۴-۵- اعمال فیلتر مشتق مرتبه اول و دوم

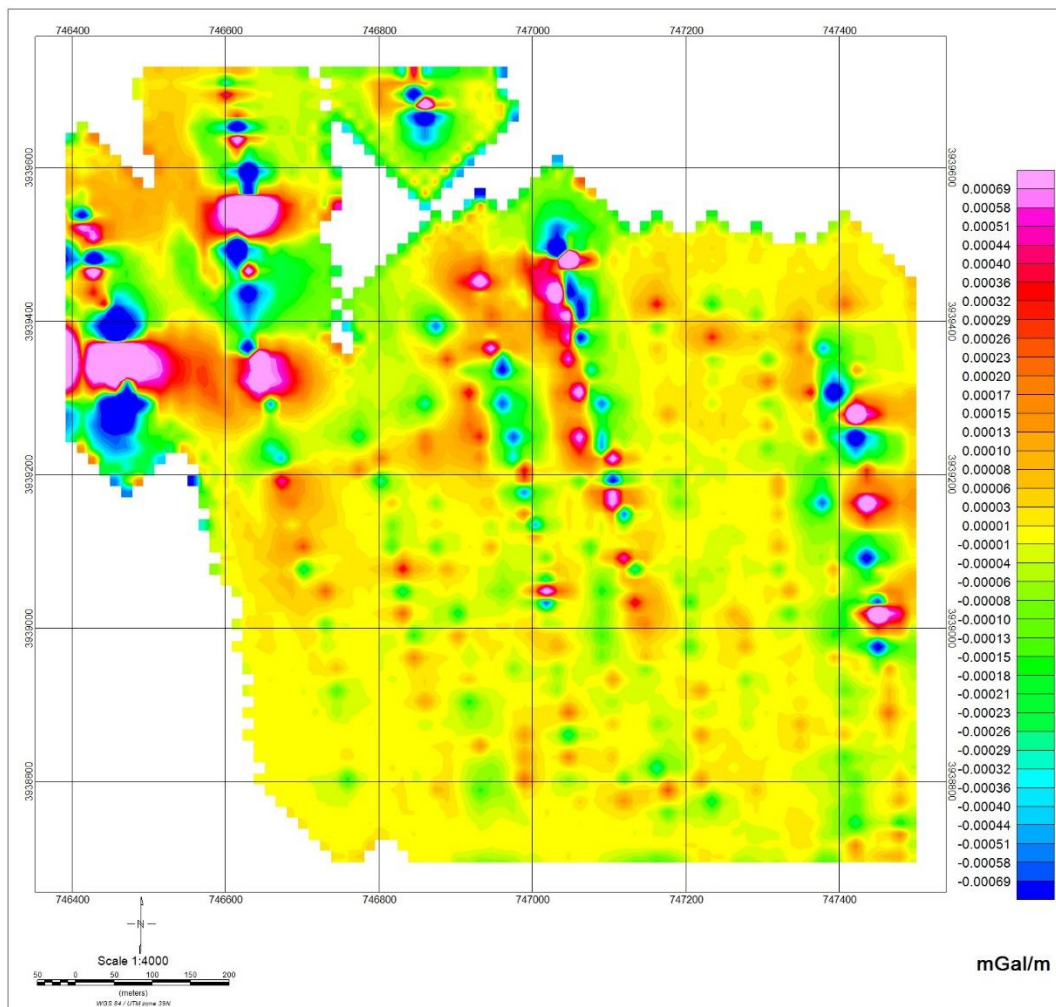
به منظور بررسی وجود احتمالی ساختارهای کم عمق نظیر گسل، تاقدیس، ناودیس، حفرات زیر سطحی و توده‌های نفوذی از فیلتر مشتق اول قائم که تغییرات میدان را در جهت عمودی نشان می‌دهد، استفاده می‌شود. این روش به عنوان یک ابزار مناسب جهت آشکارسازی مؤلفه‌های میدان پتانسیل با طول موج کوتاه‌تر مربوط به آنومالی‌های کم عمق می‌باشد [Robinson & Coruh, 1988; Klingelé et al., 1991]. مشتق دوم قائم به طور معمول در آشکارسازی آنومالی‌های محلی؛ که به وسیله آنومالی‌های ناحیه‌ای محو شده‌اند و نیز برای تشخیص لبه‌های اجسام آنومال، به کار می‌رود. یک منبع زمین‌شناسی کم عمق که از اطراف به وسیله ساختارهای دیگر محدود شده (گنبد نمکی) به طور مشخص دارای آنومالی با انحنای بیشتر از میدان ناحیه‌ای (ناشی از منابع عمیق) می‌باشد؛ که روی هم منطبق شده‌اند. در نقشه‌های مشتق تأثیرات ناحیه‌ای و عمیق به علت خطی بودن آن‌ها خیلی ضعیف شده و یا از بین می‌روند که در این صورت تأثیرات سطحی به صورت واضح‌تری نشان داده خواهند شد. برای به دست آوردن تأثیرات سطحی خیلی نزدیک به زمین از مشتق دوم و برای به دست آوردن تأثیرات سطحی عمیق‌تر از مشتق اول استفاده می‌شود. مقدار مشتق‌ها قادر به تشخیص و تعیین ویژگی‌های نزدیک سطحی با افزایش توان بعد خطی در عملگر می‌باشند. زیرا اثر گرانی به طور معکوس با مربع فاصله تغییر می‌کند.

با توجه به نتایج تقریباً یکسان دو روش برای بررسی بیشتر گسترش عمقی و اثرات گسل خوردگی از روش مشتقات هم استفاده گردید. برای این کار فیلترهای گرادیان در نرم افزار Geosoft به صورت مشتق اول و دوم قائم بر روی نقشه آنومالی بوگه اعمال شد. نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق (گرادیان) قائم اول، اثرات محلی ناشی از وجود آنومالی‌های سطحی را همانند نقشه آنومالی‌های باقی‌مانده روش روند سطح درجات مختلف نشان می‌دهد. در این نقشه آنومالی‌های اصلی چهارگانه گرانی به خوبی مشاهده می‌شود و مطابق روش روند سطح عمل کرده است (شکل ۴-۱۴).



شکل ۴-۱۴: نقشه مشتق قائم مرتبه اول محدوده معدنی گرماب

به منظور بررسی آنومالی‌های سطحی تر و نیز آشکارسازی‌های گسل‌ها، فیلتر مشتق (گرادیان) قائم دوم نیز روی داده‌های گرانی بوگه اعمال و نقشه مربوطه رسم شد (شکل ۴-۱۵). مطابق این شکل اثرات و نوفه‌های سطحی مشخص‌تر شده به طوری که بخش زیاد نقشه را در بر گرفته و سبب کوچک شدن محدوده آنومالی‌های اصلی در محل شده است. خطواره مشخصی روی این نقشه به واضح دیده نمی‌شود، ولی با اعمال فیلتر مشتق قائم دوم، مقادیر نوفه زیاد شده و بیشتر تأثیرات نزدیک سطحی را به نمایش می‌گذارد که متأثر از شبکه و پروفیل‌های برداشت داده‌ها است.

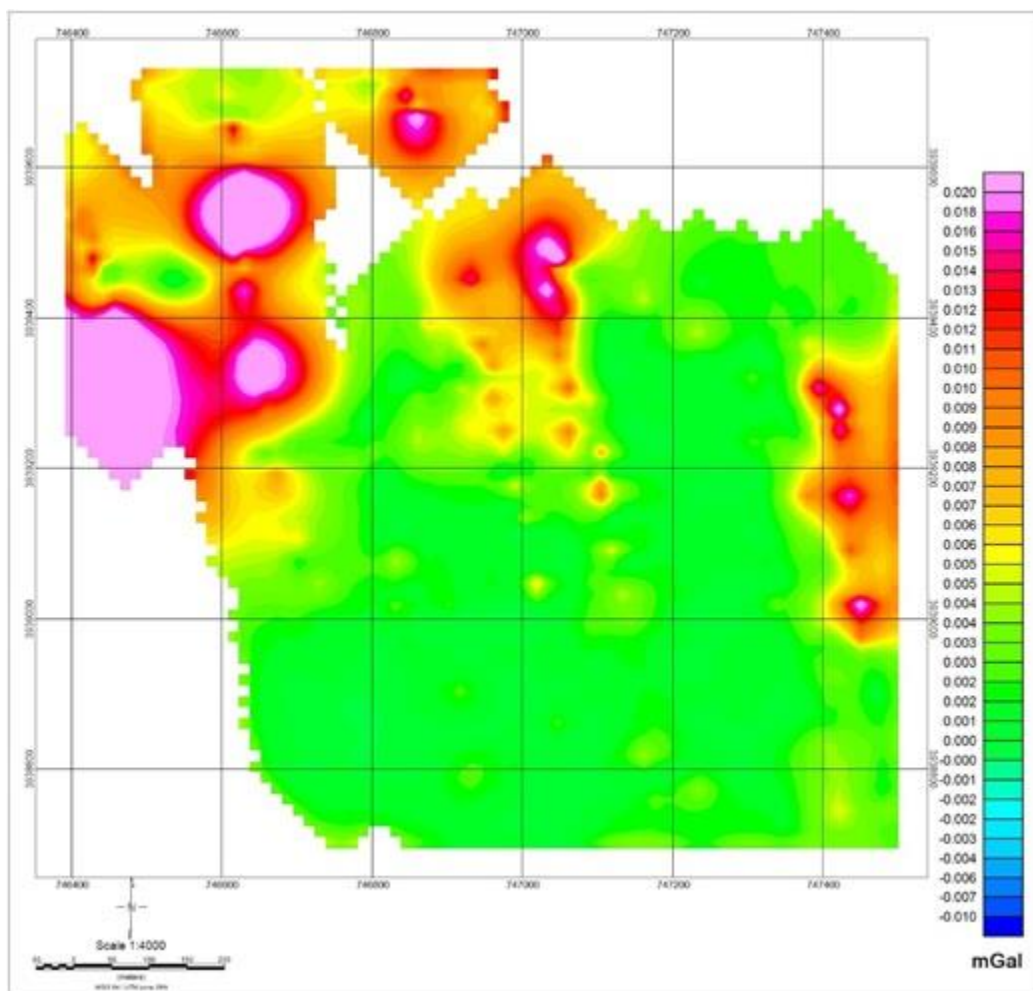


شکل ۴-۱۵: نقشه مشتق قائم مرتبه دوم محدوده معدنی گرماب

۴-۶-۱ اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی^۱ روی داده‌های گرانی

سیگنال تحلیلی تابعی از توان دوم مشتق‌های افقی و شاقولی است. بنابراین نقشه‌هایی که بر مبنای سیگنال‌های تحلیلی تهیه می‌شوند، بیانگر نقطه‌های عطف نمودارهای تغییرات میدان هستند و تغییرات نمودارهای میدان پتانسیل در پیرامون پیکره‌ها در این نقشه به میزان بیشینه خود می‌رسد و می‌توان به کمک آن‌ها مرز پیکره‌های بی‌هنجار را تا حدودی تعیین نمود. از سوی دیگر تحلیل‌های ریاضی نشان می‌دهد که مقادیر بیشتر در نقشه‌های سیگنال تحلیلی می‌تواند به مرکز بی‌هنجاری‌ها نزدیک باشد و در مورد بی‌هنجاری‌های شدید؛ که ناشی از پیکره‌های کوچک است، مقادیر بیشینه می‌تواند بر مرکز پیکره منطبق باشد. در شکل (۴-۱۶) نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های گرانی محدوده برداشت ارائه شده است.

^۱Analytic Signal



شکل ۴-۱۶: نتیجه اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی روی داده‌های گرانی

مطابق شکل فوق آنومالی‌های اصلی گرانی به‌ویژه آنومالی‌های شمال غرب به‌خوبی بارز شده است و مقادیر بیشینه محدوده آنومالی را نشان می‌دهد. براین اساس در محدوده جنوبی و جنوب شرقی محدوده آثار کانی‌زایی و آنومالی دیده نمی‌شود، لذا ادامه فعالیت اکتشافی در این بخش لزومی ندارد.

۴-۷- شناسایی گسل‌های محدوده و تعیین حدود آنومالی‌های گرانی‌سنجی

برای بررسی جزئیات داده‌های گرانی می‌توان از فیلترهای بالاگذر مانند گرادیان‌های قائم استفاده کرد. در این صورت ناپیوستگی‌ها و لبه‌ها آنومالی با اعمال این‌گونه فیلترها به‌صورت مشخص‌تری در مقایسه با میدان‌های گرانی مشاهده خواهند شد. تقویت لبه‌ها در داده‌های میدان پتانسیل می‌تواند به تفسیر زمین‌شناسی داده‌های کمک شایانی بکند. تاکنون روش‌های متعددی برای بالا بردن تفکیک لبه‌ها ارائه شده است که اکثر آن‌ها فیلترهای بالا گذر بر اساس مشتقات افقی یا عمودی از میدان می‌باشند. محاسبه فاز محلی میدان پتانسیل ابزار مفیدی برای تشخیص لبه‌ها می‌باشد. زاویه شیب در ایجاد توازن میان دامنه ناهنجاری‌های مختلف مؤثر است، روش‌های مختلفی برای تشخیص مرز آنومالی‌ها معرفی شده‌اند [Cooper and Cowan, 2006]. فیلتر فاز محلی یکی دیگر از ابزارهایی است که بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از ابهام در فاز داده‌ها در روش‌های معمول از ادامه فراسو قبل از اعمال فیلتر استفاده می‌شود [Filtzgerald et al., 1997]. به این منظور می‌توان از گرادیان‌های کلی افقی داده‌های میدان پتانسیل، فیلتر زاویه تمایل برای آشکارسازی لبه‌ها استفاده کردند. میلر و سینگ (۱۹۹۴) فیلتر فازی زاویه کجی یا تمایل را به‌صورت زیر معرفی کردند:

$$TA = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial g}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (۴-۶)$$

که در آن g میدان گرانی، TA زاویه تمایل، $\frac{\partial g}{\partial x}$ ، $\frac{\partial g}{\partial y}$ و $\frac{\partial g}{\partial z}$ مشتق‌های میدان گرانی زمین نسبت به x ، y و z هستند. فیلتر زاویه کجی هنگامی که نقاط مشاهده روی چشمه آنومالی قرار دارد، دارای مقادیر مثبت است. در لبه آنومالی‌ها مقدار گرادیان قائم برابر با صفر و گرادیان‌های افقی بیشینه هستند، بنابراین مقدار این فیلتر در لبه‌ها برابر با صفر و در سایر نقاط فیلتر دارای مقدار منفی خواهد بود. مقادیر زاویه تمایل

با صرف نظر از مقدار مشتقات افقی و عمودی در بازه $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ قرار می‌گیرند. با اعمال فیلتر زاویه تمایل بر

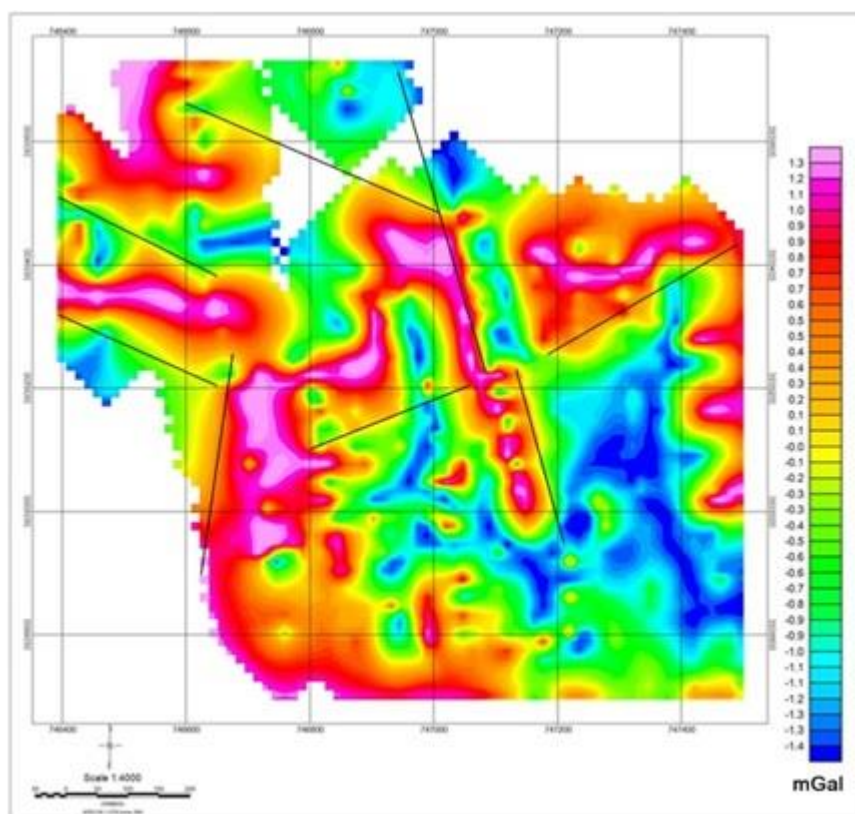
روی داده‌های گرانی می‌توان موقعیت افقی آنومالی‌ها و نیز گسل‌ها را شناسایی نمود.

با استفاده از نرم‌افزار Geosoft و با به‌کارگیری ماژول‌های مربوط به فیلترهای فازی، نقشه زاویه تمایل

مربوط به داده‌های گرانی محدوده تهیه گردید (شکل ۴-۱۷). با کاربرد فیلتر محلی فاز یا زاویه تمایل با

توجه به این‌که مقدار عددی این فیلتر روی آنومالی‌ها مثبت و در خارج از توده‌ها منفی است لذا مرز

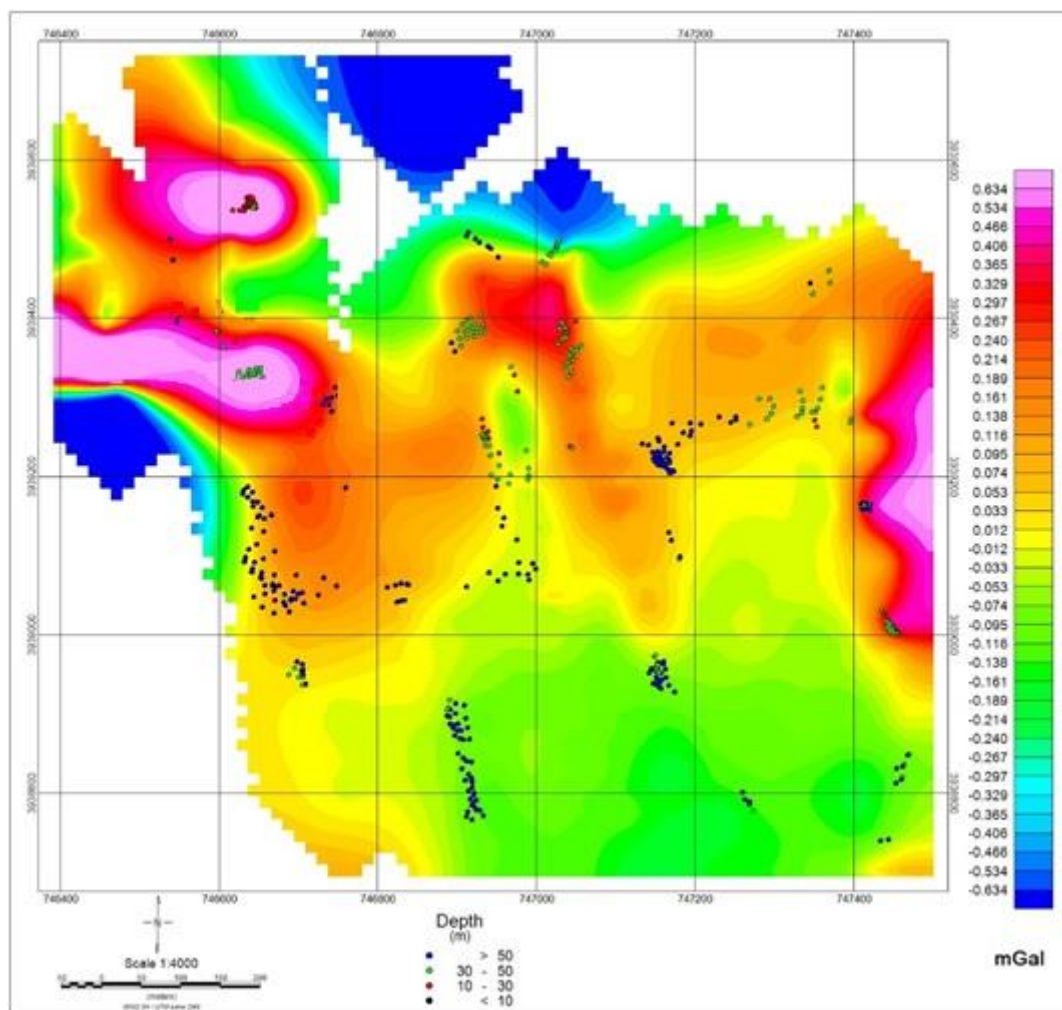
آنومالی‌ها، شکستگی‌ها مشخص و ترسیم شد.



شکل ۴-۱۷: نقشه زاویه تمایل داده‌های گرانی منطقه مورد مطالعه

۴-۸- تفسیر کمی داده‌ها

تخمین عمق توده‌های آنومال زیرسطحی از اصلی‌ترین اهداف برداشت‌های ژئوفیزیکی و مدل‌سازی است. برآورد عمق آنومالی درروش گرانی‌سنجی به علت اینکه آنومالی ناشی از اجسام یا یک جسم خاص در زیر سطح است، با خطاهایی همراه است و نمی‌توان دقت آن را با روش‌های دیگری مانند الکتربیکی و لرزه‌نگاری مقایسه نمود. باین‌حال روش‌هایی برای برآورد عمق پیکره‌های آنومال توسط پژوهشگران زیادی ارائه و به‌کاررفته است که یکی از مرسوم‌ترین آن‌ها، دیکانولوشن اوپلر است. یکی از تفاوت‌های عمده روش اوپلر با سایر روش‌های دیگر تخمین عمق این است که در این روش هیچ فرض خاصی در مورد نوع ساختار زمین‌شناسی مورد مطالعه نمی‌شود [Thompson, 1982]. تکنیک مزبور برای یک طیف گسترده از ساختارهای زمین‌شناسی نظیر گسل‌ها، دایک‌ها، همبری‌های زمین‌شناسی، ناپیوستگی‌ها و ... بکار می‌رود. از این روش با اعمال پنجره‌های 20×20 به دلیل این‌که آنومالی‌های مثبت را به‌خوبی در برگیرد برای تخمین عمق آنومالی‌های موجود در محدوده مورد بررسی استفاده شد و نیز با توجه به این‌که آنومالی مدنظر ساختاری مستطیلی مانند دارد مقدار شاخص ساختاری یک درنظر گرفته شده است. نتیجه اعمال روش دیکانولوشن اوپلر روی آنومالی‌های گرانی باقیمانده در شکل (۴-۱۸) نشان داده‌شده است. در این شکل به‌منظور نمایش مطلوب سه‌بعدی اعماق به‌دست‌آمده، عمق به‌دست‌آمده به‌وسیله رنگ و اندازه دوایر روی نقشه باقیمانده به‌صورت ترکیبی نمایش داده‌شده است، به‌گونه‌ای که با افزایش عمق، اندازه و رنگ دوایر عوض می‌شود. دامنه تغییرات عمق بیشتر از ۱۰ متر و تا ۵۰ متر می‌باشد. قابل‌ذکر است محدوده عمقی در این نقشه تنها برای آنومالی‌های مثبت قابل‌توجه و اعتبار دارد، زیرا پارامترهای بکار رفته در این روش به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که مقادیر خارج از ردیف را به‌صورت خودکار حذف کنند. بر مبنای این شکل عمق برآورد شده در محدوده آنومالی A بیشتر از ۳۰ متر بوده و تا بالای ۵۰ متر نیز ادامه دارد، ولی آنومالی B به نظر ضعیف‌تر بوده و بین ۱۰ تا ۳۰ متر برآورده شده است.

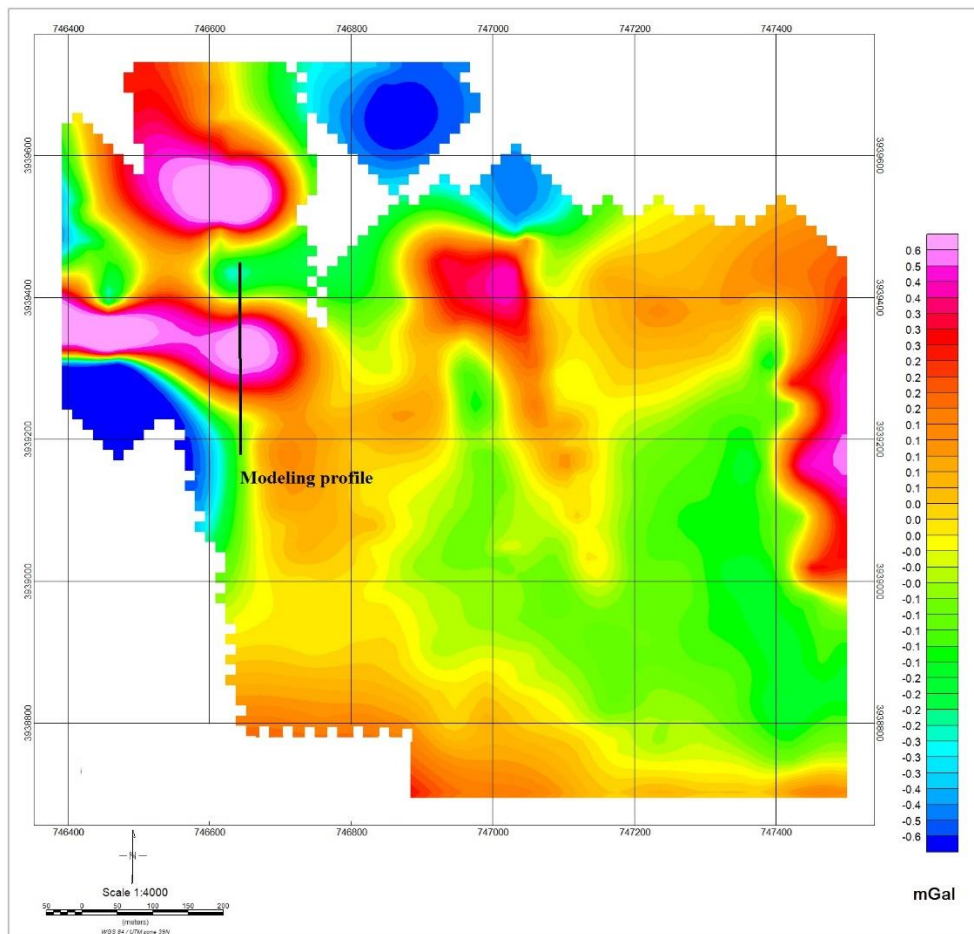


شکل ۴-۱۸: تخمین عمق به روش اویلر بر روی نقشه باقیمانده گرانی

۴-۹- مدل سازی

با استفاده از مدل سازی وارون داده‌های پتانسیل، می‌توان مدل‌هایی از حجم آنومال به دست آورد. اگرچه با نرم‌افزارهای موجود می‌توان مدل سازی وارون انجام داد. ولی مدل‌های ارائه شده با این نرم‌افزارها، فقط در شرایط خاصی و برای اجسام با شکل هندسی ویژه‌ای به واقعیت نزدیک است. اما در بسیاری موارد این مدل‌ها با واقعیت تفاوت چشمگیری دارند. اما با استفاده درست از روش‌هایی مانند مدل سازی مقید و مختلف می‌توان به برآورد نسبتاً مناسبی از عمق برخورد به سطح توده آنومالی دست یافت (دقت این برآوردها

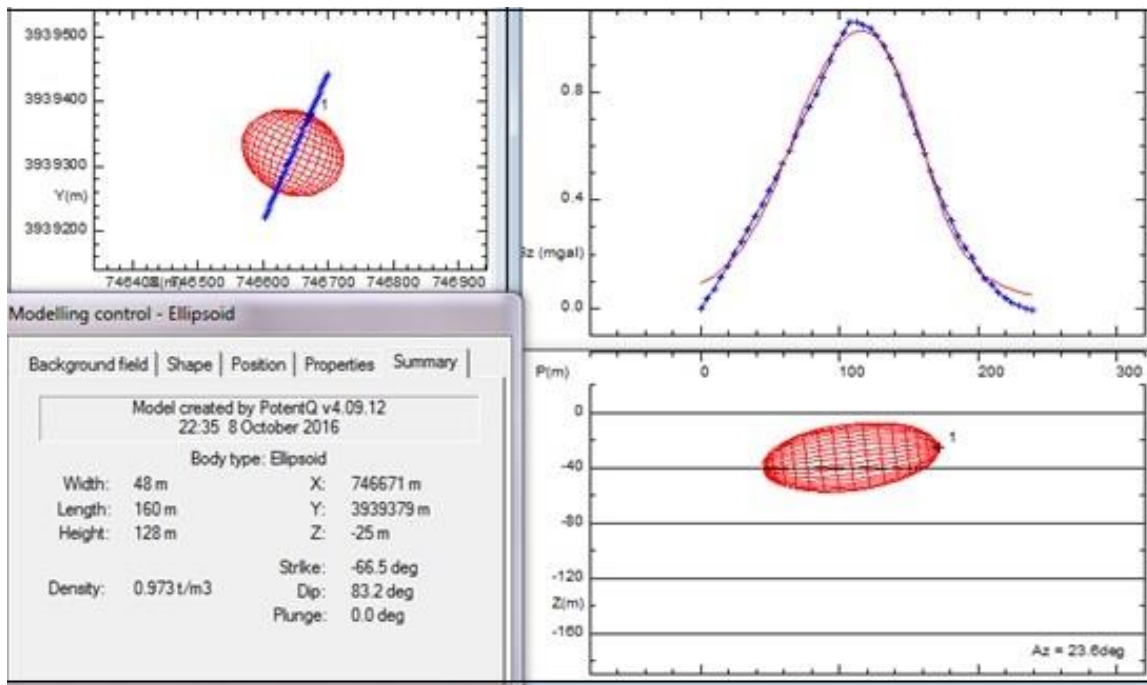
بستگی وارون بافاصله نقاط برداشت دارد). شکل (۴-۱۹) نقشه آنومالی باقی مانده گرانی با روند سطح مرتبه دوم و موقعیت پروفیل مدل سازی شده را نشان می دهد.



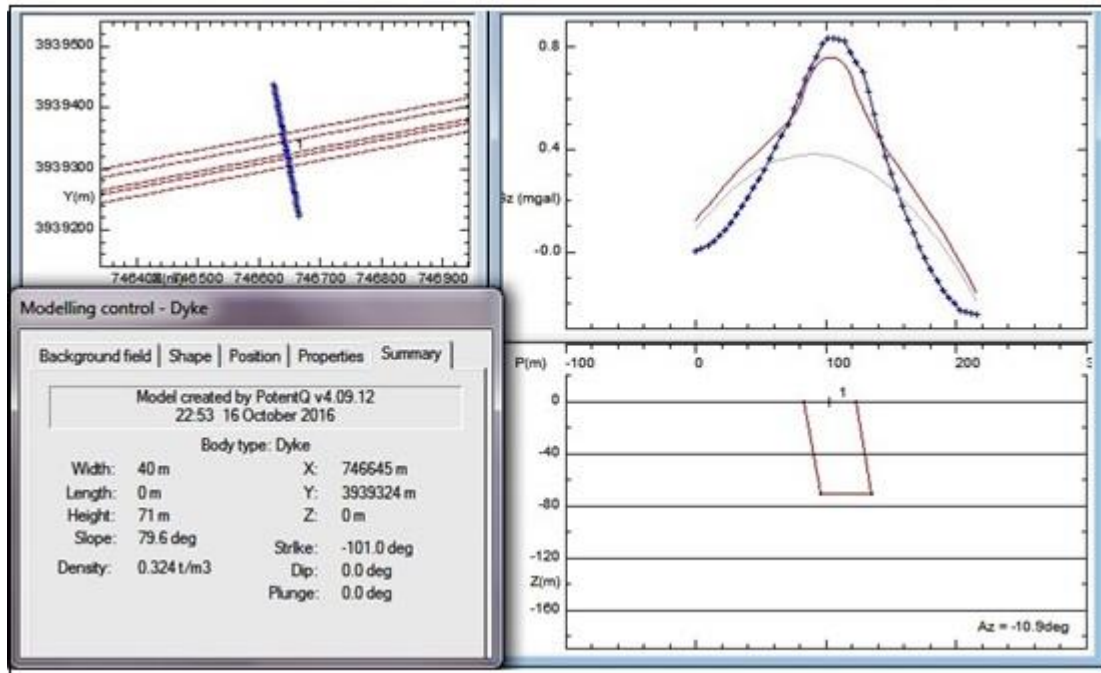
شکل ۴-۱۹: نقشه آنومالی باقی مانده ناشی از فیلتر روند سطح درجه دو و محل پروفیل ها برای مدل سازی

با توجه به عدم پوشش کافی داده ها در قسمت پیت و اطراف آن لذا انجام عملیات مدل سازی با محدودیت هایی همراه است، از جمله این محدودیت ها انجام عملیات مدل سازی بر روی یک پروفیل که اطلاعات دقیق تری را شامل شده است. با انتخاب محل مدل سازی از آنجایی که در تمام مدل سازی های صورت گرفته چه به صورت مستقیم و چه به صورت وارون یک عدم یکتایی پاسخ مسئله همواره مطرح می گردد یا به مفهوم ساده تر تعداد زیادی مدل وجود دارد که پاسخ یکسانی را ایجاد می کنند.

در شکل (۴-۲۰) فرآیند وارون‌سازی به‌وسیله پارامترهای خود نرم‌افزار صورت گرفته است که میزان اختلاف دانسیته بین ماده معدنی و محیط اطراف را چیزی در حدود 0.975 گرم بر سانتی‌متر مکعب تخمین زده است و عمق تقریبی ماده معدنی را 25 متر و گسترش طولی و عرضی 160 متر در 128 متر و ضخامت 48 متر تخمین زده است. حال به‌منظور نزدیک شدن مدل مذکور به مدل واقعی برخی از پارامترهای مدل‌سازی مانند عمق و دانسیته محدود شده که نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۴-۲۱) آورده شده است.



شکل ۴-۲۰: مدل‌سازی وارون بر روی پروفیل یک نقشه آنومالی گرانی باقی‌مانده با پیش‌فرض‌های نرم‌افزار



شکل ۴-۲۱: مدل سازی وارون بر روی پروفیل یک نقشه آنومالی گرانی باقی مانده با قید چگالی و عمق

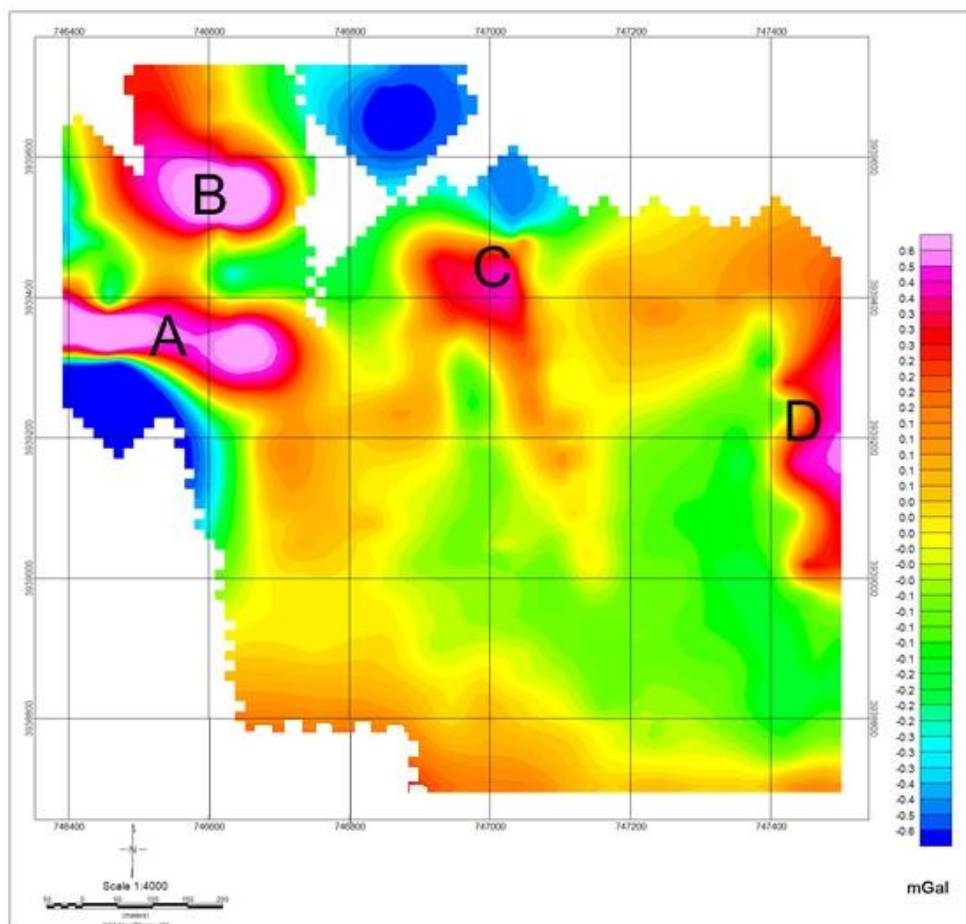
۵- فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، به‌منظور تعیین محدوده‌های امیدبخش کانی‌زایی سولفات سدیم و گسترش سطحی و عمقی آن در اطراف معدن فعلی از روش‌های پردازش روند سطحی و گسترش میدان به سمت بالا و فیلترهای مشتق قائم، سیگنال تحلیلی و فاز محلی استفاده گردید. نتیجه حاصل از این پردازش چهار آنومالی مثبت گرانی در محدوده است که در همه نقشه‌های باقی‌مانده حاصل از روش روند سطحی با درجات مختلف قابل مشاهده است. اما یکی از آنومالی‌های شناخته‌شده (D) در حاشیه شرقی محدوده اکتشافی قرار گرفته و به علت کمی داده از اطمینان‌پذیری کافی برخوردار نیست. بنابراین لازم است که شبکه برداشت داده‌ها در محدوده‌های شرقی منطقه گسترش یابد.

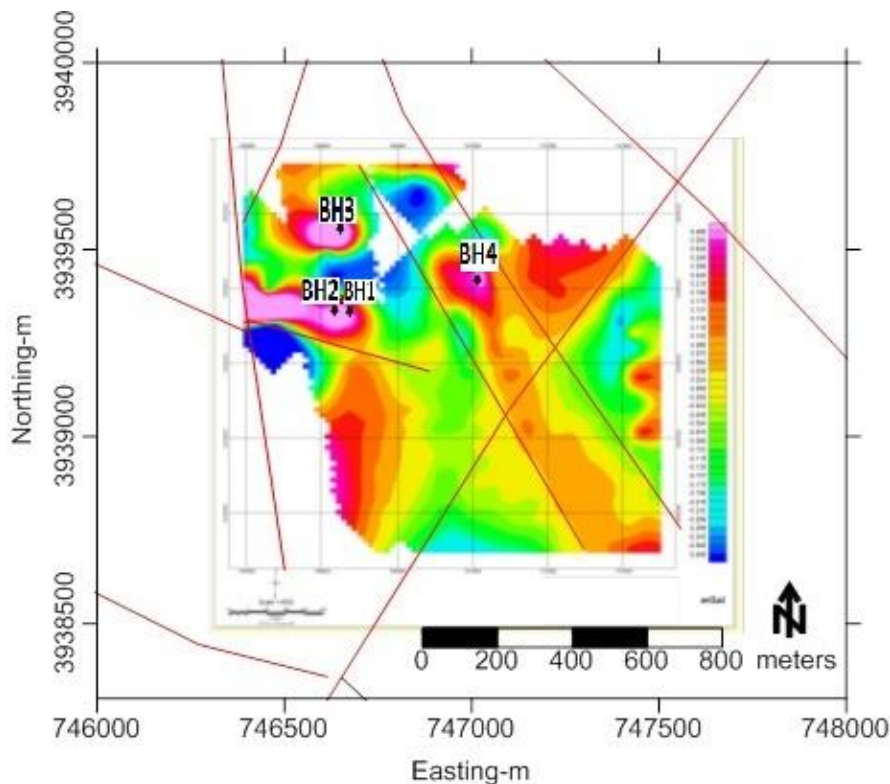
در میان آنومالی‌های مثبت موجود در نقشه مذکور، آنومالی A از گسترش سطحی مناسبی برخوردار است و با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و مشاهدات صحرایی و وجود پیت معدن روباز، آنومالی A با روند کانی‌زایی شرقی-غربی درون رسوبات مارنی - گچی از گسترش سطحی و عمقی مناسبی برخوردار است.



شکل ۵-۱: نقشه آنومالی های گرانی باقی مانده در منطقه مورد مطالعه

بخش اصلی آنومالی A دارای گسترش شرقی-غربی است به طوری که بر اساس نتایج به دست آمده از تخمین عمق با روش دیکانولوشن اوپلر، گستردگی عمقی آن از غرب به شرق کمی افزایش می یابد. حدود تخمینی عمق در این آنومالی از ۳۰ متر به بالا و تا ۶۰ متر می رسد. بر اساس نقشه های آنومالی باقی مانده می توان گفت که آنومالی C شاید دنباله شرقی این آنومالی باشد که به وسیله گسلی از هم جدا شده باشد که البته نیازمند بررسی بیشتر است (شکل ۵-۲). این آنومالی با گسترش سطحی کم ولی شدت آنومالی بالا مورد توجه است ولی این احتمال هم می رود که ناشی از وجود نخاله های تپه موجود در حوالی این محل باشد. آنومالی D در جنوب شرق و در حاشیه شبکه برداشت داده است و اعتبار آن کم بوده است ولی با

توجه به گسل شمال شرق - جنوب غرب در غرب آن شاید عملکرد گسل باعث جابجایی ماده معدنی شده باشد که در حد یک فرضیه است و نیاز به بررسی بیشتر دارد (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۲: موقعیت آنومالی‌های گرانی باقی مانده و محل حفر گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی، خطوط قرمز رنگ گسل‌های آشکار شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست که با داده‌های گرانی مطابقت خوبی دارد.

آنومالی B با گسترش تقریبی شرقی تا غربی گسترش سطحی کمتری نسبت به آنومالی A دارد. محدوده عمقی این آنومالی نیز کمتر و بین ۱۰ تا ۳۰ با توجه به نتایج به دست آمده از روش دیکانولوشن اوپلر تخمین زده می‌شود. اما شدت کم این آنومالی مثبت نسبت به آنومالی A و پراکندگی آن در محدوده اکتشافی آن را در درجه دوم اهمیت قرار داده است.

آنومالی‌های تعیین و شناخته شده از روش گرانی‌سنجی بر اساس یک منطق و ویژگی‌های کانسارها به دست می‌آید. لذا این آنومالی‌ها می‌تواند علاوه بر هدف اصلی اکتشاف یعنی نوع کانی‌زایی مورد جستجو

(سولفات سدیم)، ناشی از وجود سنگ‌های میزبان ماده معدنی و نخاله‌های استخراجی محوطه معدن نیز باشد. به‌رحال وجود آثار معدنی در پیت معدن روباز و همچنین محدوده‌هایی از بخش‌هایی بالاتر، وجود کانی‌زایی سولفات سدیم در محدوده کار و اطلاعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که برداشت گرانی‌سنجی توانسته ماده معدنی را از سنگ‌های میزبان تفکیک نماید.

۵-۲-پیشنهادات

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده و نتایج به‌دست آمده، موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

با توجه به مطالب ارائه‌شده به‌منظور اکتشاف عمقی ابتدا روی آنومالی A، سپس آنومالی B و در نهایت اولویت C جهت حفاری پیشنهاد می‌شود (شکل ۵-۲). روی نقشه تهیه‌شده (مقیاس ۱:۱۰۰۰) و محدوده آنومالی‌ها و گسل‌های منطقه مشخص و محتمل‌ترین نقاط کانی‌زایی برای حفاری مشخص شده است (جدول ۵-۱).

با توجه به این‌که محل آنومالی D در محدوده جنوب شرقی و در حاشیه محدوده برداشت واقع است، به علت کمبود اطلاعات قابل‌اعتماد نبوده و پیشنهاد می‌شود مطالعات در این سمت برای بررسی آنومالی بیشتر شود.

جدول ۵-۱: معرفی مختصات نقاط امیدبخش معدنی واقع در محدوده آنومالی های مشخص شده

| Bore Holes | XCOORD | YCOORD |
|-------------------|---------------|---------------|
| BH1 | 746674.40 | 3939320.20 |
| BH2 | 746633.70 | 3939323.30 |
| BH3 | 746649.40 | 3939542.10 |
| BH4 | 747015.10 | 3939404.50 |

منابع فارسی

- ابراهیم‌زاده اردستانی، و. (۱۳۹۰)، "گرانی سنجی کاربردی"، انتشارات دانشگاه تهران.
- آقاجانی، ح. (۱۳۸۸)، "بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله‌های نفتی، (مطالعه موردی در چند میدان نفتی ایران)"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- آقابیاتی، س.، ع. (۱۳۹۲)، "زمین‌شناسی ایران و کشورهای همجوار"، انتشارات رهی.
- انصاری، ع.، ا. (۱۳۸۵)، "قابلیت‌های روش ژئوفیزیکی گرانی‌سنجی در تعیین مشخصات کانسارهای سنگ‌آهن"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین.
- جودی نصر اله بیگلو، م.، عرب امیری، ع.، ا. (۱۳۹۰)، "تأثیر وجود سولفات سدیم بر مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه الکتریکی"، دومین همایش علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آشتیان.
- رشیدی گویا، ح.، ابراهیم‌زاده اردستانی، و. (۱۳۸۹)، "اکتشاف قیر طبیعی (گیلسونیت) به وسیله روش‌های گرانی‌سنجی و مقاومت ویژه الکتریکی (VES و CRP)"، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- روشندل کاهو، ا.، نجاتی کلاته، ع. (۱۳۹۳)، "برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو داده‌های گرانی به‌منظور اکتشاف کرومیت در استان هرمزگان"، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۸، شماره ۲، صفحه ۱-۹.
- شبانیان، ا. (۱۳۹۴)، "گزارش زمین‌شناسی ساختاری معدن سولفات سدیم گرماب"، شرکت معدنی املاح ایران.
- صمیمی، م. (۱۳۷۸)، "مطالعات نیمه تفضیلی معدن سولفات سدیم علاف"، گزارش زمین‌شناسی معدن سولفات سدیم گرماب.
- صیادی، س.، عرفانیان، م. (۱۳۹۳)، "اکتشاف ژئوفیزیکی و بررسی ویژگی‌های گنبد نمکی در منطقه

قره‌آغاچ با روش گرانی‌سنجی"، همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، شیراز.

قدیمی عروس محله، ف.، (۱۳۸۳)، "بررسی اکتشافی به‌منظور تعیین وضعیت محیطی سولفات سدیم

کویر میقان اراک"، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

کلاگری، ع.، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی".

مراد زاده، ع.، دولتی ارده جانی، ف.، آگاه، آ.، طباطبایی، س.ه.، (۱۳۸۳)، "اکتشاف تله‌های هیدروکربوری

منطقه طبس به کمک داده‌های گرانی"، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

Abdelrahman, E. M., Bayoumi, A. I., Abdelhady, Y. E., Gobashy, M. M., & El-Araby, H. M. (1989). "Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies". *Geophysics*, 54(12), 1614-1621.

Blakely R.J., (1995). "Potential Theory in Gravity and Magnetic applications", Cambridge University Press, Cambridge.

CG-5 Manual (2010). "Scintrex Autograv Gravity Meter, Operation Manual" Revision 7, 312p, Website: www.scintrex.com.

Chen, S., & Zhou, G. (1987). "Gravity exploration", Geophysical publishing house.

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

Davis W. E., Jackson W. H., Richter D. H., (1957). "Gravity prospecting chromite deposits in Camaguey province, Cuba", *GEOPHYSICS*, VOL. XXII, NO. 4.

Dehlinger, P. (1978). "Marine Gravity" Elsevier scientific publishing company, 321P

Dobrin, M. B., & Savit, C. H. (1988). "Introduction to Geophysical Prospecting McGraw-Hill, 867".

Fedi, M., Rapolla, A., & Russo, G. (1999). "Upward continuation of scattered potential field data". *Geophysics*, 64(2), 443-451.

Filtzgerald, D., Yassi, N. and Dart, P. (1997). "A case study on geophysical gridding techniques: INTREPID perspective" *Exploration Geophysics* 28, 204-208.

Griffin, R. (1948). "Residual gravity in theory and practice" *Geophysics* 49, 39-57

Hammer, S. (1939). "Terrain corrections for gravimeter stations" *Geophysics*, 4, 3, 184-194.

Kane, M. F. (1962). "A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer". *Geophysics*, 27(4), 455-462.

Klinge, E. E., Marson, I., & Kahle, H. G. (1991). "Automatic interpretation of gravity gradiometric data in two dimensions: vertical gradient", *Geophysical Prospecting*, 39(3),

407-434.

Lacoste, L.J.B. (1973). "Cross correlation method for evaluating and correcting shipboard gravity data" *Geophysics* 38, 4, 701-709

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

Miller, H. G. and Singh, V. (1994). "Potential Field Tilt – a new concept for location of potential field sources" *Journal of Applied Geophysics* 32, 213-217.

Miller, R. L. (1956). Trend surfaces: their application to analysis and description of environments of sedimentation. *The Journal of Geology*, 64(5), 425-446.

Moritz, H. (1984). "Geodetic reference system 1980" *Bulletin Geodesique*, 58 (3), 388-398

Mostafaie, K., (2015), "Application of electrical resistivity method in sodium sulfate deposits exploration, case study: Garmab, Iran", *Journal of Biodiversity and Environmental Science*.

Nagy, D. (1966). "The gravitational attraction of a right rectangular prism". *Geophysics*, 31(2), 362-371.

Reynolds, D., (1977). "Electromechanical phenomena associated with earthquakes", *Geophysical Surveys* 3, 157-174.

Robinson, E. S., & Coruh, C. (1988). "Basic Exploration Geophysics John Wiley & Sons". New York Toronto/Brisbane/Singapore.

Telford W. M., Geldart L. P., Sherif R. E., (1990), "APPLIED GEOPHYSICS", Cambridge university press.

Thompson, D. T. (1982). EULDPH: "A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data". *Geophysics*, 47(1), 31-37.

Unwin, D. J., & Wrigley, N. (1987). Control point distribution in trend surface modelling revisited: an application of the concept of leverage. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 147-160.

Zeng, H., Xu, D., & Tan, H. (2007). "A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly

over a mineral deposit", Jilin province, northeast China. *Geophysics*, 72(4), I45-I50.

Abstract

Use of geophysical methods. Measuring the physical properties of subsurface rocks is a good way to investigate subsurface structures and discover buried reserves in the basement, such as petroleum, gas, water and minerals. The gravity method because of simplicity to survey, interpret and cost-effectively, including the most widely used geophysical methods used for introductory explorations. Due to the fact that the high anomalies are due to the difference in the density of the floors and their non-homogeneity, the method of gravimetry is used to study the gravity anomalies.

Sodium sulfate is a practical mineral that forms in evaporative environments. The Garmab sodium sulfate range is located in the south east of Semnan city. Due to the fact that sodium sulfate has a significant density difference with surrounding sedimentary layers and its density is higher than surrounding rocks, the method of gravimetry was used. The Gramab Mining area gravity data of Semnan was measured using CG5 gravity device in several profiles and then necessary corrections for the events done.

In this study, optimum heights were estimated for the upward continuations. For this purpose, upward continuation applied to different heights on the Bouguer map, and finally an optimal height was estimated. In order to make a better comparison for the separation of the anomalies, the trend method was also used for separation and compared with the upward continuation residual anomaly maps, the depth of the anomalies was estimated using the Euler method, and also using the Geosoft software, two-dimensional models were modeled and the shape of the anomalies was estimated. The depth of the mass was about 30 to 60 meters and four points were proposed for drilling.

Keywords: Gravity, Euler, Optimum Height, Modeling, Garmab, Sodium sulfate



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

**Investigation and gravity surveying for sodium sulfate
exploration in Garmab area - Semnan**

**By
Ali Abbasi**

Supervisor
Dr. Hamid Aghajani

January 2018