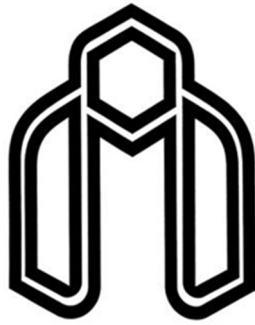


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مغناطیس سنجی

تعیین شکل و عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به روش گرادیان کل نرمال

بهبود یافته (مطالعه موردی محدوده معدنی شادان)

عالیه یوسفی طبس

استاد راهنما:

دکتر حمید آقاجانی

تیر ۱۳۹۷

تقدیم به

پدر و مادرم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیایم و از ریشه آن ها شاخ و برگ
گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر
بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند وستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب
آموختند. آموزگاران که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند...

تقدیر و تشکر

سپاس یگانه‌ای که آموختن را آموخت تا از آموخته‌هایم راز آفرینش را فراگیرم. وظیفه‌ی خود می‌دانم از تمام عزیزانی که با صبر و حوصله، همکاری و حمایت خود را از اینجانب دریغ نداشته‌اند و از استاد محترم جناب آقای دکتر آقا جانی استاد راهنمای این پایان‌نامه که با راهنمایی‌های دلسوزانه‌ی خود همواره مراد انجام این پایان‌نامه‌یاری نمودند کمال قدردانی را بنمایم. باشد که توانایی قدردانی از زحمات این استاد کرامت‌دار و پناه خداوند رحمان داشته باشم.

عالیه یوسفی طبس
دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
تسیرماه

تعهد نامه

اینجانب عالیہ یوسفی طبس دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش مغناطیس‌سنجی از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: تعیین شکل و عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (مطالعه موردی محدوده معدنی شادان) تحت راهنمایی جناب آقای دکتر حمید آقا جانی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ گونه مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «shahrood university of technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

هدف از یک برداشت مغناطیسی، بررسی ساختارهای زمین‌شناسی و توده‌های زیرسطحی با استفاده از بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ناشی از خاصیت مغناطیسی مواد تشکیل دهنده زمین در یک منطقه است. فیلتر گسترش میدان به سمت پایین که در روش‌های میدان پتانسیل جهت پردازش و تفسیر داده‌ها استفاده می‌شود، سبب تقویت طول موج‌های کوتاه و تضعیف طول موج‌های بلند حاصل از بی‌هنجاری‌های ناشی از بی‌هنجاری‌های زیرسطحی می‌شود. ولی به دلیل ماهیت روش، بکارگیری آن سبب تشدید نوفه و ناپایداری در اعماق بیشتر از عمق اجسام زیرسطحی می‌شود. برای رفع این ناپایداری از روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی و مغناطیس استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان موقعیت افقی و گسترش عمقی اجسام زیرسطحی را تعیین کرد. مهمترین پارامتر در این روش، تعیین تعداد جملات هارمونیک برای محاسبه ضرایب فوریه است که در روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته این مسأله به صورت نیمه‌خودکار تا حدود زیادی حل شده است. در این تحقیق با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته به تخمین تعداد جملات هارمونیک مورد نیاز برای تخمین عمق و شکل بی‌هنجاری‌ها پرداخته شده است.

همچنین نتایج حاصل از این روش، با روش بیشینه مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های مغناطیسی مقایسه شده است. برای نیل به این هدف، ابتدا در محیط نرم‌افزار MATLAB کدهای مورد نیاز نوشته شد. سپس این روش‌ها روی چند داده مغناطیسی حاصل از مدل مصنوعی اعمال شد. نتایج بررسی نشان می‌دهد که روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته در مواردی که اثر مغناطیسی ناشی از وجود یک بی‌هنجاری منفرد است دقت بیشتری در تخمین عمق دارد. اما در مواردی که اثر بی‌هنجاری ناشی از وجود چند بی‌هنجاری مرتبط بهم در یک منطقه است روش تعیین بیشینه نسبی مقادیر گرادیان برای تخمین تعداد جملات هارمونیک مناسب‌تر عمل می‌کند. همچنین به دلیل اینکه تعداد هارمونیک‌ها در روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته کوچک‌تر هستند حجم محاسبات کمتر و سرعت افزایش می‌یابد. این دو روش بر روی داده‌های مغناطیسی مناطق معدنی شادان، جلال‌آباد و آجت‌آباد اعمال شده و نتایج حاصل از آن‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

کلمات کلیدی: بی‌هنجاری مغناطیسی، گسترش میدان به سمت پایین، گرادیان کل نرمال

بهبودیافته، تخمین عمق، محدوده معدنی شادان

مقالات مستخرج از پایان نامه

یوسفی طبس، ع.، آقاجانی، ح.، (۱۳۹۷)، "تعیین موقعیت اجسام آنومال با روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته"، هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، ایران.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ سابقه مطالعات انجام شده در زمینه گرادیان کل نرمال.....	۴
۳-۱ طرح مساله و ضرورت انجام تحقیق.....	۸
۴-۱ اهداف مطالعه و روش تحقیق.....	۱۱
۵-۱ ساختار پایان نامه.....	۱۱
فصل دوم: کلیات روش مغناطیس و مبانی روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته.....	۱۳
۱-۲ مقدمه.....	۱۴
۲-۲ جایگاه روش مغناطیس سنجی در اکتشاف ذخایر معدنی.....	۱۴
۳-۲ میدان مغناطیسی زمین.....	۱۵
۴-۲ مغناطیس سنگ ها و کانی ها.....	۱۷
۵-۲ برداشت های مغناطیس سنجی.....	۱۸
۲-۵-۱ اصول برداشت های زمینی.....	۱۸
۲-۶ تغییرات مؤلفه های میدان مغناطیسی نسبت به زمان.....	۱۹
۲-۶-۱ تغییرات عناصر مغناطیسی با فواصل زمانی بسیار طولانی.....	۱۹
۲-۶-۲ تغییرات قرنی.....	۲۰
۲-۶-۳ تغییرات سالیانه.....	۲۰
۲-۶-۴ تغییرات روزانه.....	۲۰
۲-۷ تصحیح داده های مغناطیسی.....	۲۱
۲-۷-۱ تصحیح روزانه.....	۲۲
۲-۷-۲ تصحیح مغناطیس زمین.....	۲۲
۲-۷-۳ تصحیح ارتفاع.....	۲۳
۲-۷-۴ تصحیح توپوگرافی.....	۲۳
۲-۸ پردازش و تفسیر داده های مغناطیسی.....	۲۴
۲-۸-۱ برگردان به قطب.....	۲۵
۲-۸-۲ فیلتر روند سطحی.....	۲۷

۲۸	۳-۸-۲ تبدیل گسترش میدان به سمت بالا (ادامه فراسو).....
۲۹	۴-۸-۲ مشتق قائم.....
۳۰	۵-۸-۲ فیلتر زاویه تیل.....
۳۱	۶-۸-۲ سیگنال تحلیلی.....
۳۱	۷-۸-۲ روش اوپلر.....
۳۲	۸-۸-۲ گرادیان کل نرمال بهبودیافته.....
۳۹	فصل سوم: اعمال روش ENFG روی مدل های مصنوعی.....
۴۰	۱-۳ مقدمه.....
۴۱	۲-۳ اعمال روش روی اثر گرانی و مغناطیس حاصل از مدل های مصنوعی.....
۴۱	۱-۲-۳ مدل مصنوعی استوانه افقی گرانی.....
۴۴	۲-۲-۳ مدل مصنوعی استوانه افقی مغناطیسی.....
۴۸	۳-۲-۳ مدل مصنوعی دایک قائم مغناطیسی.....
۵۱	۴-۲-۳ تهیه مدل مصنوعی مرکب از سه جسم کروی.....
۵۵	فصل چهارم: اعمال روش ENFG روی داده های واقعی.....
۵۶	۱-۴ مقدمه.....
۵۶	۲-۴ منطقه معدنی سنگ مس شادان.....
۵۶	۱-۲-۴ موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه شادان.....
۶۰	۲-۲-۴ پردازش داده های برداشت شده از منطقه شادان.....
۶۲	الف: اعمال فیلتر برگردان به قطب.....
۶۳	ب: اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی.....
۶۴	ج: اعمال فیلتر مشتق قائم.....
۶۶	د: اعمال فیلتر روند سطحی.....
۶۸	ه: اعمال فیلتر ادامه فراسو.....
۷۴	و: اعمال فیلتر زاویه تیل روی داده های مغناطیسی.....
۷۴	ز: اعمال روش گرادیان کل نرمال و روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته.....
۸۲	۳-۴ منطقه جلال آباد.....
۸۲	۱-۳-۴ موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به منطقه جلال آباد.....
۸۳	۲-۳-۴ زمین شناسی منطقه جلال آباد.....

۳-۳-۴ پردازش داده‌های مغناطیسی منطقه جلال آباد.....	۸۴
الف: اعمال فیلتر برگردان به قطب.....	۸۵
ب: اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی.....	۸۶
ج: اعمال فیلتر مشتق قائم.....	۸۷
د: اعمال فیلتر روند سطحی.....	۸۸
ه: اعمال فیلتر ادامه فراسو.....	۸۹
و: اعمال روش اوایلر.....	۹۳
ز: اعمال روش گرادیان کل نرمال و روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته.....	۹۴
۴-۴ منطقه اُجت آباد.....	۱۰۱
۴-۴-۱ کلیاتی از منطقه و برداشت داده‌ها.....	۱۰۱
۴-۴-۲ موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه.....	۱۰۱
۴-۴-۳ محاسبه گرادیان کل نرمال.....	۱۰۳
۴-۴-۴ محاسبه گرادیان کل نرمال بهبودیافته.....	۱۰۷
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۱۱۳
۵-۱ نتیجه‌گیری.....	۱۱۴
۵-۲ پیشنهادات.....	۱۱۴
منابع.....	۱۱۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: تغییرات زاویه‌ی میل با عرض جغرافیایی. ۱۶.....
- شکل ۲-۲: المان‌های مغناطیسی. ۱۶.....
- شکل ۳-۲: منحنی تغییرات روزانه میدان مغناطیسی و چگونگی انجام تصحیح روزانه. ۲۲.....
- شکل ۴-۲: بی‌هنجاری گرانی و مغناطیس روی یک توده دو بعدی مشابه. ۲۵.....
- شکل ۵-۲: حذف گرادیان ناحیه‌ای از یک میدان مغناطیسی به وسیله‌ی فیلتر روند سطحی. ۲۸.....
- شکل ۱-۳: نمایشی از استوانه در دو بعد. ۴۱.....
- شکل ۲-۳: اثر بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل مصنوعی استوانه افقی گرانی. ۴۲.....
- شکل ۳-۳: Er، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال. ۴۳.....
- شکل ۴-۳: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری گرانی استوانه افقی گرانی. ۴۴.....
- شکل ۵-۳: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری گرانی استوانه افقی گرانی. ۴۴.....
- شکل ۶-۳: نمایشی از استوانه در دو بعد. ۴۵.....
- شکل ۷-۳: بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی استوانه‌ی افقی مغناطیسی. ۴۶.....
- شکل ۸-۳: Er، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال. ۴۷.....
- شکل ۹-۳: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی استوانه افقی. ۴۷.....
- شکل ۱۰-۳: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی استوانه افقی مغناطیسی. ۴۸.....
- شکل ۱۱-۳: نمای دو بعدی از دایک قائم. ۴۸.....
- شکل ۱۲-۳: بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی دایک قائم مغناطیسی. ۴۹.....
- شکل ۱۳-۳: Er، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال. ۵۰.....
- شکل ۱۴-۳: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی دایک قائم. ۵۰.....
- شکل ۱۵-۳: تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک. ۵۱.....
- شکل ۱۶-۳: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی دایک قائم. ۵۱.....
- شکل ۱۷-۳: نمای دو بعدی از کره مدفون. ۵۲.....
- شکل ۱۸-۳: اثر بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل مصنوعی مرکب از سه جسم کروی. ۵۲.....
- شکل ۱۹-۳: Er و عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال. ۵۳.....
- شکل ۲۰-۳: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل. ۵۳.....
- شکل ۲۱-۳: تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک. ۵۴.....
- شکل ۲۲-۳: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل مصنوعی. ۵۴.....

- شکل ۴-۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه شادان..... ۵۷
- شکل ۴-۲: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده مطالعاتی..... ۵۹
- شکل ۴-۳: نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه شادان بعد از اعمال تصحیح روزانه..... ۶۱
- شکل ۴-۴: نقشه اثر IGRF در منطقه شادان..... ۶۱
- شکل ۴-۵: نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه شادان پس از حذف اثر IGRF..... ۶۲
- شکل ۴-۶: نقشه میدان مغناطیسی شادان پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب..... ۶۳
- شکل ۴-۷: نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های منطقه شادان..... ۶۴
- شکل ۴-۸: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه ۱ بر روی داده‌های منطقه شادان..... ۶۵
- شکل ۴-۹: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه ۲ بر روی داده‌های منطقه شادان..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطحی درجه ۱..... ۶۶
- شکل ۴-۱۱: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطحی درجه ۲..... ۶۷
- شکل ۴-۱۲: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطحی درجه ۳..... ۶۷
- شکل ۴-۱۳: نقشه ادامه فراسو ۸۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان..... ۶۹
- شکل ۴-۱۴: نقشه ادامه فراسو ۱۰۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان..... ۷۰
- شکل ۴-۱۵: نقشه ادامه فراسو ۱۲۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان..... ۷۰
- شکل ۴-۱۶: نقشه ادامه فراسو ۱۴۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان..... ۷۱
- شکل ۴-۱۷: نقشه ادامه فراسو ۱۶۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان..... ۷۱
- شکل ۴-۱۸: (الف) نمودار همبستگی میان دو ادامه فراسوی متوالی بر حسب ارتفاع..... ۷۲
- شکل ۴-۱۹: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو بهینه..... ۷۳
- شکل ۴-۲۰: نقشه حاصل از اعمال فیلتر زاویه تیلت بر روی داده‌های منطقه شادان..... ۷۴
- شکل ۴-۲۱: (الف) منحنی E_r ، (ب) منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال..... ۷۶
- شکل ۴-۲۲: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ab..... ۷۷
- شکل ۴-۲۳: (الف) منحنی E_r ، (ب) منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال cd..... ۷۸
- شکل ۴-۲۴: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل..... ۷۹
- شکل ۴-۲۵: (الف) منحنی E_r ، (ب) منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال..... ۸۰
- شکل ۴-۲۶: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ef..... ۸۱
- شکل ۴-۲۷: موقعیت منطقه جلال‌آباد بر روی نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ راور و راه‌های دسترسی..... ۸۲
- شکل ۴-۲۸: نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال‌آباد پس از اعمال تصحیح روزانه..... ۸۴

- شکل ۴-۲۹: نقشه اثر IGRF منطقه جلال آباد..... ۸۵
- شکل ۴-۳۰: نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد پس از حذف اثر IGRF..... ۸۵
- شکل ۴-۳۱: نقشه میدان مغناطیسی منطقه جلال آباد پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب..... ۸۶
- شکل ۴-۳۲: نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های منطقه جلال آباد..... ۸۶
- شکل ۴-۳۳: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه ۱ بر روی داده‌های منطقه جلال آباد..... ۸۷
- شکل ۴-۳۴: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه ۲ بر روی داده‌های منطقه جلال آباد..... ۸۸
- شکل ۴-۳۵: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطح درجه ۱..... ۸۸
- شکل ۴-۳۶: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطح درجه ۲..... ۸۹
- شکل ۴-۳۷: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطح درجه ۳..... ۸۹
- شکل ۴-۳۸: نقشه ادامه فراسو ۸۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد..... ۹۰
- شکل ۴-۳۹: نقشه ادامه فراسو ۱۶۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد..... ۹۰
- شکل ۴-۴۰: نقشه ادامه فراسو ۲۴۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد..... ۹۰
- شکل ۴-۴۱: نقشه ادامه فراسو ۳۲۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد..... ۹۱
- شکل ۴-۴۲: نقشه ادامه فراسو ۴۰۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد..... ۹۱
- شکل ۴-۴۳: (الف) نمودار همبستگی میان دو ادامه فراسوی متوالی بر حسب ارتفاع..... ۹۲
- شکل ۴-۴۴: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو بهینه..... ۹۳
- شکل ۴-۴۵: نتایج حاصل از تخمین عمق با استفاده از روش اویلر استاندارد..... ۹۴
- شکل ۴-۴۶: موقعیت مکانی نقطه به‌دست آمده با استفاده از روش اویلر مکانی..... ۹۴
- شکل ۴-۴۷: (الف) E_r ، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال..... ۹۶
- شکل ۴-۴۸: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ab..... ۹۷
- شکل ۴-۴۹: (الف) E_r ، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال cd..... ۹۹
- شکل ۴-۵۰: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل cd..... ۱۰۰
- شکل ۴-۵۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده اجت‌آباد..... ۱۰۲
- شکل ۴-۵۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه اجت‌آباد، بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ جام..... ۱۰۳
- شکل ۴-۵۳: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده مغناطیسی حاصل از روش روند سطحی درجه ۷..... ۱۰۴
- شکل ۴-۵۴: مقاطع گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل I-J..... ۱۰۵
- شکل ۴-۵۵: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری‌های مغناطیسی کانسار آهن..... ۱۰۶
- شکل ۴-۵۶: (الف) E_r نسبت به تعداد جملات هارمونیک..... ۱۰۸

- شکل ۴-۵۷: (الف) Er نسبت به تعداد جملات هارمونیک ۱۰۹
- شکل ۴-۵۸: (الف) Er نسبت به تعداد جملات هارمونیک ۱۱۰
- شکل ۴-۵۹: (الف) Er نسبت به تعداد جملات هارمونیک ۱۱۱
- شکل ۴-۶۰: (الف) Er نسبت به تعداد جملات هارمونیک ۱۱۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: شاخص ساختاری برای مدل‌های زمین‌شناسی مختلف ۳۲
- جدول ۱-۳: مشخصات مدل مصنوعی مرکب از سه جسم کروی. ۵۲
- جدول ۱-۴: مختصات چهارگوش منطقه شادان ۵۶
- جدول ۲-۴: نتایج تخمین عمق به روش گرادیان کل نرمال دو بعدی. ۱۰۷
- جدول ۳-۴: نتایج تخمین عمق به روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته دو بعدی. ۱۱۲
- جدول ۱-۵: مختصات نقاط پیشنهادی جهت عملیات حفاری ۱۱۵

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه

میدان پتانسیل مشاهده‌ای به‌عنوان نتیجه‌ای از توزیع منابع مختلف در فواصل عمقی متفاوت به‌دست می‌آید. تعدادی از روش‌ها برای تعیین ویژگی‌های ساختاری و نشان دادن عمق منابع با استفاده از داده‌های مغناطیسی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها در بیشتر موارد به‌وسیله الگوریتم‌هایی که به‌صورت عددی برنامه‌ریزی شده‌اند، توصیف می‌شوند که توسط پژوهشگران زیادی مورد بحث و بررسی و استفاده قرار گرفته‌اند که در اصطلاح به‌عنوان روش‌های خودکار و نیمه‌خودکار به لحاظ اجرای کار پردازش تقسیم می‌شوند (Oruç and Keskinsezer, 2008).

گسترش میدان به سمت پایین^۱ روشی جهت برآورد میدان نزدیک‌تر به منبع است و در نتیجه منجر به وضوح بهتری از توزیع سنگ‌های زیر سطح زمین می‌شود. اما استفاده از این فرآیند به‌دلیل اینکه روشی بسیار حساس به نوفه است، محدود می‌شود. هنگامی که گسترش میدان به سمت پایین انجام می‌شود، سیگنال به‌صورت نمایی با توانی متناسب با فرکانس طیفی تقویت می‌شود. با داده‌های بدون نوفه، گسترش میدان به سمت پایین به خوبی انجام می‌شود (Boschetti et al., 2001).

در تهیه نقشه‌های گسترش میدان به سمت پایین، محاسبات در بعد بسامد و عدد موج صورت می‌گیرد و از آنجا که معمولاً در داده‌های برداشت شده نوفه وجود دارد؛ اثر این نوفه در تحلیل فوریه داده‌ها به‌صورت فرکانس‌هایی با دامنه زیاد است که باعث مخدوش شدن محاسبات می‌شود. در صورتی که از فیلتر پایین‌گذر^۲ نیز استفاده شود، می‌توان این اثر مخرب را از بین برد ولی با این کار مقداری از اطلاعات همراه سیگنال مورد نظر نیز از بین می‌رود که این یکی از مشکلات اساسی در تهیه نقشه‌های گسترش میدان به سمت پایین است (Aghajani et al., 2009a؛ عابدی و همکاران، ۱۳۹۰).

علی‌رغم مشکلات ذکر شده، اکثر متخصصان ژئوفیزیک به‌دلیل اهمیت گسترش میدان به سمت پایین برای اکتشاف مواد معدنی به این تکنیک علاقه‌مند هستند. فرآیند گسترش میدان به سمت

¹ Downward continuation

² Low-pass

پایین می‌تواند تصاویر کلی زیرسطحی برای تفسیر بیشتر فراهم کند به‌ویژه در مواردی که هیچ داده ژئوفیزیکی دیگر یا داده حفاری وجود ندارد. همچنین با این روش تا حدود زیادی می‌توان حدود افقی و قائم منابع زمین‌شناسی را تعیین نمود (Trompat et al., 2003).

فیلترهای مشتق و گسترش میدان به سمت پایین فیلترهای بالاگذر^۱ هستند که به‌منظور حذف یا کاهش مقدار نوفه‌های بسامد بالا به‌کار می‌روند. روش گرادیان کل نرمال^۲ (NFG) بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل، با استفاده از عمل گسترش میدان به سمت پایین و در نظر گرفتن مشتق داده‌ها سبب کاهش نوفه‌های ناشی از روش گسترش میدان به سمت پایین می‌شود (آقاجانی و همکاران، ۱۳۸۹).

روش گرادیان کل نرمال به لحاظ عملکردی تشابه زیادی به روش سیگنال تحلیلی^۳ (Nabighian, 1972) به‌ویژه روش اصلاح شده آن (Nabighian, 1974) دارد. روش گرادیان کل نرمال ترکیبی از سیگنال تحلیلی و گسترش میدان به سمت پایین است. این روش نشان دهنده گرادیان کل (یا سیگنال تحلیلی) میدان گسترش یافته به سمت پایین داده‌های گرانی و مغناطیس در یک نقطه با استفاده از میانگین گرادیان کل در عمق‌های مختلف است.

روش گرادیان کل نرمال در سطح وسیعی در روش‌های میدان پتانسیل، به‌خصوص روش مغناطیس‌سنجی به‌کار برده می‌شود. در این روش با استفاده از بسط فوریه سینوسی داده‌های مغناطیسی، مشتقات جهتی این داده‌ها محاسبه می‌شود و با نرمال کردن این خروجی‌ها نسبت به هم، نقشه گرادیان کل نرمال به‌دست می‌آید. با استفاده از این روش می‌توان موقعیت، عمق مرکز و فاصله تا سطح بالای کانسارها را برآورد کرد (عابدی و همکاران، ۱۳۹۰).

¹ High-pass

² Normalized full gradient

³ Analytic signal

۱-۲ سابقه مطالعات انجام شده در زمینه گرادیان کل نرمال

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد روش گسترش میدان به سمت پایین باعث ایجاد نوفه و ناپایداری می‌شود که پژوهشگران زیادی برای حذف این ناپایداری و بهبود روش گسترش میدان به سمت پایین تلاش کرده‌اند و روش گسترش میدان به سمت پایین را با روش‌های زیادی بهبود داده‌اند.

روش گرادیان کل نرمال اولین بار به‌عنوان روشی مناسب برای تفسیر داده‌های میدان پتانسیل برای اکتشاف مخازن نفت معرفی شده است (Berezkin and Buketov, 1965; Berezkin, 1967; Berezkin, 1973) و طی سال‌های بعد تئوری این روش توسط برزکین (۱۹۸۸) و دیگران توسعه بیشتری یافته است (Zeng et al., 2002; Zhang et al., 2005; Elysseieva and Pasteka, 2009; Fedi and Florio, 2011).

اولین کاربرد روش گرادیان کل نرمال در تفسیر داده‌های مغناطیسی (Berezkin et al., 1994) بدون آزمایش آن روی مدل‌های مصنوعی فقط روی مجموعه‌ای از داده‌های واقعی از صنعت نفت انجام شده است. سپس پاشتکا^۱ (۱۹۹۴) این روش را برای تفسیر داده‌های مغناطیسی به‌کار برد و بیان کرد این روش برای مناطقی با اطلاعات اولیه زمین‌شناسی کم، مناسب است. ترین^۲ و ژدانوف^۳ (۱۹۹۵) با اعمال روش گرادیان کل نرمال روی داده‌های الکترومغناطیسی و مغناطیسی هوابرد ساختارهای مغناطیسی و رسانای زیرسطحی را مورد بررسی قرار دادند.

زنگ^۴ و همکاران (۲۰۰۲) نتایج حاصل از روش گرادیان کل نرمال را برای حالت‌های دو بعدی مقاطع تاقدیس‌هایی با چگالی یکسان در میدان نفتی شنگلی منتشر کردند و تئوری روش توسط آن‌ها توسعه یافته است؛ آن‌ها بیان کردند در یک مقطع عرضی گرادیان کل نرمال، مقدار کمینه در منحنی‌های بسته می‌تواند برای تخمین عمق مرکز توده حاوی منابع هیدروکربن مورد استفاده قرار گیرد و همچنین بیان کردند با توجه به اینکه در روش گرادیان کل نرمال یک پارامتر کلیدی مقادیر

¹ Pasteka

² Traynin

³ Zhdanov

⁴ Zeng

گرادیان میدان است اگر مستقیماً به جای محاسبه، گرادیان اندازه‌گیری شود اثر روش می‌تواند بهبود بیشتری یابد. ابراهیم‌زاده اردستانی (۲۰۰۴) روش گرادیان کل نرمال را برای تعیین موقعیت بی‌هنجاری‌های گرانی نزدیک به سطح مورد استفاده قرار داده و نتایج رضایت بخشی به‌دست آورده است.

با توجه به مزایای روش گرادیان کل نرمال، بسیاری از محققان این روش را برای تشخیص منابع مختلف زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی معرفی کرده و توسعه داده‌اند. در سال‌های اخیر پیشرفت شگرفی در اجرای روش گرادیان کل نرمال ایجاد شده است. همچنین این روش به‌منظور تحلیل و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی مختلف، بر داده‌های الکترومغناطیس (Dondurur, 2005)، بر داده‌های پتانسیل خودزا (Sindirgi et al., 2008; Abedi et al., 2012)، بر داده‌های مقاومت ویژه (Aydin, 2009) و بر داده‌های سیگنال لرزه‌ای (Karsli and Bayrak, 2010) اعمال شده است. ژانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۵) استفاده از تبدیل هیلبرت را برای محاسبه گرادیان کل نرمال برای بهبود دقت پردازش داده‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد کردند و نشان دادند در مواردی که بی‌هنجاری دارای چگالی پایین است محاسبه گرادیان کل نرمال با استفاده از تبدیل هیلبرت دقت بالاتری دارد. آیدین^۲ (۲۰۰۷) از روش فیلون برای محاسبه ضرایب سری فوریه در روش گرادیان کل نرمال استفاده کرد. آقاجانی و مرادزاده (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) از روش گرادیان کل نرمال برای آشکارسازی گنبدیهای نمکی و بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیس در عمق‌های مختلف استفاده کردند. اورچ^۳ و کسکنزیزر^۴ (۲۰۰۸) در پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد از گرادیان کل نرمال استفاده کردند و نشان دادند که گرادیان کل نرمال در تعیین موقعیت و عمق توده‌های بی‌هنجار موثر واقع شده است. آقاجانی و همکاران (۲۰۰۹b) نیز از روش فیلون برای محاسبه ضرایب سری فوریه در روش گرادیان کل نرمال

¹¹ Zhang

² Aydin

³ Oruç

⁴ Keskinsezer

استفاده کردند. آقاجانی و همکاران (۲۰۰۹c) نشان دادند برای اینکه عمق توده بی‌هنجار با حداقل خطا تعیین شود طول پروفیل و ابعاد منطقه باید ۱۳ برابر بزرگتر از عمق مورد انتظار مطالعه باشد. الیسووا^۱ و پاشتکا (۲۰۰۹) با اعمال تغییراتی در روش گرادیان کل نرمال روش نقاط شبه تکین را ارائه دادند که به حل مسائل ساختاری مختلف کمک کرده است. آقاجانی و همکاران (۲۰۰۹a-d، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱) روش گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی را برای تعیین موقعیت افقی و ژرفای بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیس مورد استفاده قرار دادند و با استفاده از روش بیشینه نسبی مقدار گرادیان کل نرمال، به‌صورت تابعی از تعداد جملات هارمونیک‌ها بدون نیاز به داده‌های اضافی، تعداد بهینه جملات هارمونیک جهت محاسبه ضرایب سری فوریه را تعیین کردند. عابدی و همکاران (۱۳۹۱، ۲۰۱۴) از روش گرادیان کل نرمال برای تفسیر داده‌های بی‌هنجاری مغناطیسی و بی‌هنجاری‌های گرانی کم‌عمق استفاده کردند و نتایج حاکی از این بود که این روش به‌خوبی توصیفی کلی از وضعیت بی‌هنجاری می‌دهد و می‌توان آن را در حکم یک روش سریع در تفسیر داده‌های مغناطیس و گرانی به‌کار برد.

فدی^۲ و فلوریو^۳ (۲۰۱۱) با تمرکز برای نرمال کردن روش گسترش میدان به سمت پایین، روش گرادیان کل نرمال را بهبود داده و آن را گسترش میدان به سمت پایین نرمال شده نامیدند. پاموچو^۴ و اکسیگ^۵ (۲۰۱۱) با اعمال روش گرادیان کل نرمال بر روی داده‌های گرانی مکان‌های احتمالی ناپیوستگی‌های افقی و قائم در ساختار پوسته را تعیین کردند. اورچ (۲۰۱۲) این روش را بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال کرد و براساس مقادیر عمق بیشینه گرادیان کل نرمال محاسبه شده با استفاده از درجات مختلف هموارسازی، روشی برای محاسبه درجه هموارکنندگی (μ) ارائه کرد و بیان کرد هر چه منبع عمیق‌تر باشد مقادیر μ بزرگتر است. گوننک^۶ و آکگان^۷ (۲۰۱۲) با اعمال روش گرادیان کل نرمال روی مدل‌های چندساختاری و داده‌های گرانی زون فرورانش نشان دادند که این

¹ Elysseieva

² Fedi

³ Florio

⁴ Pamukcu

⁵ Akcig

⁶ Gonenc

⁷ Akgun

روش قادر به شناسایی ساختارهای احتمالی است؛ و همچنین بیان کردند ساختارهای عمیق را می‌توان با تعداد هارمونیک‌های کوتاه‌تر و ساختارهای سطحی را با هارمونیک‌های بزرگتر شناسایی کرد. اکینچی^۱ و ییجیبز^۲ (۲۰۱۳) روش گرادیان کل نرمال سه بعدی را برای پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد مورد استفاده قرار دادند.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) برای بهبود روش گرادیان کل نرمال با معرفی کمیت E_r و محاسبه این کمیت برای تعداد هارمونیک‌های مختلف نشان دادند تعداد هارمونیک‌ها زمانی بهینه است که E_r با نرخ سیگنال به نوفه برابر باشد، همچنین نشان دادند وابستگی تعداد هارمونیک‌های بهینه به نرخ نوفه بی‌هنجاری‌های گرانی بیشتر از عمق منبع است. ژانگ و منگ^۳ (۲۰۱۵) با استفاده از آنالیز منحنی‌های E_r و عمق مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال که برحسب تعداد هارمونیک‌های مختلف رسم کردند روشی برای انتخاب تعداد هارمونیک‌های بهینه ارائه کردند. فدی و فلوریو (۲۰۱۵) براساس آنتروپی میدان گسترش میدان به سمت پایین نرمال در سطوح مختلف روشی برای بهبود گرادیان کل نرمال ارائه کردند.

ژو^۴ (۲۰۱۵) به‌منظور پایداری و سرعت بخشیدن به روش گسترش میدان به سمت پایین، روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته داده‌های تانسورهای گرادیان کل^۵ (FTG) را بر پایه روش منظم‌سازی تیخونف تکراری تطبیق‌پذیر ارائه کرد. در این بهبود همه مؤلفه‌های گرادیان ترکیب می‌شوند که باعث دقت تفکیک جانبی می‌شود. روش گرادیان کل نرمال در جهت‌های مختلف می‌تواند اطلاعات بیشتری در مورد موقعیت افقی و عمق منابع فراهم کند، در جهت z عمدتاً عمق مرکز و مقدار اندکی اطلاعات لبه و در جهت‌های x و y اطلاعات لبه و عمق مرکز را تشخیص می‌دهد. ژو نشان داد که روش

¹ Ekinici

² Yigitbas

³ Meng

⁴ Zhou

⁵ Full tensor gradient

گرادیان کل نرمال ابزار موثری در تفسیر داده‌های تانسورهای گرادیان کل است و استفاده از مؤلفه‌های تانسورهای گرادیان کل می‌تواند تفسیری کمی برای توده‌های زمین‌شناسی فراهم کند.

ژو و همکاران (۲۰۱۵) الگوریتم تبدیل فوریه سریع (FFT) را به‌جای سری فوریه در روش استاندارد نقاط تکین مورد استفاده قرار دادند و با اعمال بر روی داده‌های گرانی دو و سه بعدی به نتایج رضایت‌بخشی دست یافتند و آن را به‌عنوان یک روش تفسیر نیمه‌اتوماتیک مؤثر معرفی کردند.

وو^۱ و همکاران (۲۰۱۶) با اعمال روش گرادیان کل نرمال روی بی‌هنجاری‌های گرانی و ساختار چگالی پوسته در زون‌های دارای شکستگی به تعیین گسل‌ها و شکستگی‌ها پرداختند. ژو و همکاران (۲۰۱۷) از روش گسترش میدان به سمت پایین نرمال شده که توسط فدی و فلوریو در سال (۲۰۱۱) ارائه شده است برای تفسیر داده‌های گرانی استفاده کردند.

۱-۳ طرح مساله و ضرورت انجام تحقیق

از نقطه نظر میدان پتانسیل، انجام عمل گسترش میدان به سمت پایین در نزدیکی و عمق بیشتر از منبع بی‌هنجار امکان‌پذیر نیست. لذا بایستی همه انحراف‌ها و اغتشاشاتی که در اثر حذف این قاعده برای گسترش میدان به سمت پایین ظاهر می‌شود را مشخص نمود (Berezkin, 1988؛ Pasteka, 2000).

همان‌طور که گفته شد، روش گرادیان کل نرمال (NFG) جهت تحلیل داده‌های میدان پتانسیل و تخمین عمق بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی کاربرد دارد. نرمال کردن گرادیان کل بی‌هنجاری گرانی در به حداقل رساندن مسائل و مشکلات مرتبط به روش گسترش به سمت پایین بی‌هنجاری‌ها مثل نوسانات و یا اغتشاشات با فرکانس بالا کمک می‌کند (Berezkin, 1967). عملگر گرادیان کل نرمال به‌دلیل استفاده از مشتق‌های اول تابع پتانسیل در دو جهت محوره‌های x و z قابلیت حذف چنین اغتشاشاتی را خواهد داشت که در فرآیند تفسیر گسترش میدان به سمت پایین یک میدان پتانسیل (مؤلفه‌های آن) به‌وجود می‌آیند (Pasteka, 2000).

¹ Wu

بارزترین تفاوت روش گرادیان کل نرمال با بیشتر روش‌های دیگر تخمین عمق این است که روش گرادیان کل نرمال فقط شامل یک فرآیند ساده محاسباتی گسترش میدان به سمت پایین است، چنان‌که با راه‌حل‌های مکرر یک سیستم معادلات برای تخمین پارامترهای منبع مغایر است. از ویژگی‌های دیگر روش گرادیان کل نرمال این است که الزاماً پارامترهای قابل تنظیم ندارد و می‌تواند به یک حالت نیمه‌خودکار استفاده شود. روش گرادیان کل نرمال نیاز به پارامترهای ورودی هندسی یا فرضیاتی در مورد خواص زمین‌شناسی ندارد. این روش را می‌توان به‌طور مستقیم برای به‌دست آوردن عمق منبع بی‌هنجار استفاده کرد (Zhou et al., 2015; Zhou, 2015).

افزایش حذف نوسانات مزاحم در طول فرآیند گسترش میدان به سمت پایین ویژگی اصلی روش گرادیان کل نرمال است چون ترکیب مشتقات با گرادیان کل، نوسانات را کاهش می‌دهد. این نرمال‌سازی در هر یک از سطوح عمق سبب به‌دست آوردن حداکثر ارتباط میدان گرادیان کل نرمال نزدیک به منبع (Berezkin, 1988; Pasteka, 2000) و حذف نوسانات مزاحمی که در اعماق نزدیک منابع بی‌هنجار در طول فرآیند گسترش میدان به سمت پایین رخ می‌دهد، می‌شود (Oruc, 2012). استفاده از گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری‌های گرانی باعث حذف منابع ساختگی و تشخیص نقاط تکین مرتبط با توده‌های بی‌هنجار می‌شود (Aghajani et al., 2009a). این روش آشفتگی‌هایی که به‌دلیل گذر از عمق توده در طول فرآیند گسترش میدان به سمت پایین بوجود می‌آید را از بین می‌برد. این روش به گسترش میدان به سمت پایین مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی بستگی دارد. گسترش تحلیلی، بی‌هنجاری‌های ساختاری خاص که نمی‌توانند در میدان گرانی مشاهده‌ای مشخص شوند را برجسته می‌کند (Aydin, 2007).

مفهوم اصلی روش گرادیان کل نرمال مشابه گسترش میدان به سمت پایین گرادیان کل نرمال داده‌های ژئوفیزیکی است. در روند گسترش میدان به سمت پایین معمولی، وقتی از منبع بی‌هنجار به سمت پایین عبور کند معمولاً نتایج ناپایدار و نوسانات بیشتر می‌شود. چون مشتقات به‌جای خود

بی‌هنجاری در محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال استفاده می‌شوند، نوسانات پیچیده‌ای که نزدیک یا زیر منابع بی‌هنجاری اتفاق می‌افتد، می‌توانند حذف شوند. در نتیجه امکان محاسبه گسترش میدان به سمت پایین در یک ناحیه نزدیک یا زیر منبع بی‌هنجار وجود دارد (Aydin, 2005; Aghajani et al., 2009a; Dondurur, 2005). مقادیر بیشینه و کمینه در نقشه گرادیان کل نرمال می‌تواند موقعیت توده‌ها را نشان دهد (Aghajani et al., 2009d).

بیشینه‌های گرادیان کل نرمال در تشخیص مرکز توده‌های متراکم و عمق بالای دایک‌هایی با وسعت عمقی نامحدود مفید است. راه‌حل گرادیان کل نرمال دقت بسیار خوبی در تخمین عمق در مدل‌های شناخته شده نشان می‌دهد (Oruc, 2012). روش گرادیان کل نرمال در راستای z عمدتاً عمق مرکز و ویژگی‌های کمی از اطلاعات مرز را توصیف می‌کند. این روش در راستاهای x و y می‌تواند اطلاعات مرز را به‌دست آورد و عمق مرکز را شناسایی کند.

گسترش میدان به سمت پایین نقش کلیدی در روش گرادیان کل نرمال ایفا می‌کند. ثبات روش گسترش میدان به سمت پایین مستقیماً صحت روش گرادیان کل نرمال را تعیین می‌کند. بنابراین لازم است یک گسترش میدان به سمت پایین پایدار در فرآیند محاسبات استفاده شود. الگوریتم گسترش میدان به سمت پایین روش گرادیان کل نرمال با استفاده از سری‌های فوریه با یک فیلتر هموارسازی اجرا می‌شود (Zhou, 2015). مقدار گرادیان کل نرمال به شدت به تعداد جملات سری فوریه وابسته است و تغییر کوچک در مقدار آن سبب تغییرات بزرگی در مقدار گرادیان کل نرمال خواهد شد (Berezkin and Buketov, 1965; Zeng et al., 2002; Aghajani and Moradzadeh, 2008). تعداد هارمونیک‌ها یک پارامتر برای ایجاد تعادل بین سیگنال و نوفه است. با ارائه کمیت E_r به‌صورت مقدار سیگنال مفید در بی‌هنجاری‌های بازسازی شده در سطح اندازه‌گیری که مربوط به اولین N ضرایب فوریه است، مقدار بهینه N محاسبه می‌شود (Zhang and Meng, 2015).

در این تحقیق هدف تخمین عمق و تعیین شکل بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از گرادیان کل نرمال بهبودیافته است.

۴-۱ اهداف مطالعه و روش تحقیق

هدف این تحقیق بررسی روش‌های مبتنی بر ریاضی برای به‌کارگیری آن‌ها در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل می‌باشد، به همین دلیل روش‌هایی نظیر تبدیل فوریه، سری فوریه و سری فوریه‌ی سینوسی مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند تا با استفاده از آن‌ها و مفهوم گرادیان‌های میدان در حوزه این تبدیلات، بتوان گرادیان کل نرمال را که ابزاری کارآمد در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل است، به‌دست آورد.

در این تحقیق نخست روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته توضیح داده خواهد شد. سپس با طراحی مدل‌های مصنوعی و محاسبه اثر بی‌هنجاری آن‌ها با کدنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB، روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته روی این مدل‌ها اعمال می‌گردد. سپس این روش بر روی داده‌های واقعی حاصل از چند منطقه اعمال شده و نتیجه این روش با روش گرادیان کل نرمال مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر مشتمل بر پنج فصل می‌باشد. در فصل اول کلیاتی در خصوص پایان‌نامه، ضرورت و اهداف تحقیق و روش تحقیق آورده شده است و همچنین سابقه کاربرد روش گرادیان کل نرمال در تجزیه و تحلیل داده‌های میدان پتانسیل مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم به کلیاتی از روش مغناطیس و مبانی روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته پرداخته شده است. در فصل سوم با کدنویسی در محیط MATLAB مدل‌های مصنوعی مختلف گرانی و مغناطیس تهیه شده و اثر بی‌هنجاری‌ها محاسبه شده است. به‌منظور تخمین عمق و تعیین شکل بی‌هنجاری‌ها، روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته بر روی داده‌های حاصل از یک پروفیل از این مدل‌ها اعمال شده و این روش با روش گرادیان کل نرمال مقایسه شده است. در فصل چهارم ابتدا هر منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفته و پس از آن تصحیح و پردازش داده‌ها انجام و نقشه

بی‌هنجاری‌ها رسم شده است. سپس پروفیل‌هایی در جهت عمود بر بی‌هنجاری‌ها تهیه شده و روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته بر روی داده‌های حاصل از آن پروفیل‌ها اعمال شده است و نتایج حاصل با روش گرادیان کل نرمال مقایسه شده است. در پایان جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات در فصل پنجم ارائه گردیده است.

فصل دوم: کلیات روش مغناطیس و مبانی

روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته

۲-۱ مقدمه

اندازه‌گیری تغییرات محلی میدان مغناطیس اغلب موجب شناسایی تغییرات لیتولوژی می‌گردد. گستره‌ی کاربرد روش مغناطیس بسیار زیاد بوده و از بررسی‌های کوچک مقیاس تا هدف‌های بزرگتر نظیر مطالعه کانسارهای معدنی و مخازن نفتی را شامل می‌شود (Telford et al., 1990). هدف از مغناطیس‌سنجی شناخت عوارض زیرسطحی به کمک اندازه‌گرفتن میدان مغناطیسی است. مغناطیس‌سنجی از جمله روش‌های ژئوفیزیکی است که کاربردهای متعددی در زمینه‌های گوناگون دارد. قابلیت برداشت هوایی و دریایی علاوه بر برداشت‌های زمینی، ارزان‌تر بودن نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر ژئوفیزیکی و وجود نرم‌افزارهای نسبتاً جامع جهت پردازش و تفسیر داده‌ها این روش را به یکی از پرکاربردترین و ارزان‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی مبدل ساخته است (Kearey, 2002).

۲-۲ جایگاه روش مغناطیس‌سنجی در اکتشاف ذخایر معدنی

کاوش‌های مغناطیسی از قدیمی‌ترین روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی است که سال‌هاست در پی‌جویی نفت و کانی‌های اقتصادی (از جمله آهن) مورد استفاده قرار می‌گیرد. اکتشاف مغناطیسی برای کانی‌های اقتصادی کلاً برای یکی از سه هدف زیر صورت می‌گیرد (کلاگری، ۱۳۸۹):

۱. جستجوی مستقیم برای کشف کانی مگنتیت.

۲. استفاده از مگنتیت به عنوان کانی ردیاب برای اکتشاف دیگر کانی‌ها.

۳. تعیین عمق، اندازه و یا شکل زون‌های کانی‌سازی که از آن‌ها هیچ‌گونه آثار سطحی وجود ندارد.

تقریباً ۹۰ درصد آهن تولیدی جهان از ذخایر رسوبی تامین می‌شود و ۱۰ درصد دیگر مرتبط با سنگ‌های آذرین مافیک، اولترامافیک و یا اسکارن‌ها می‌باشند. نسبت مگنتیت به هماتیت کانسنگ‌های آهن موجود در سنگ‌های آذرین بیشتر از انواع سنگ‌های دیگر است، در نتیجه به راحتی با روش‌های مغناطیس‌سنجی قابل اکتشاف هستند. ذخایر هماتیتی غیرمغناطیسی بوده، ولی اغلب آن‌ها از نظر

ژنتیکی مرتبط با مگنتیت می‌باشند؛ به همین دلیل این نوع ذخایر را می‌توان به‌طور غیرمستقیم به روش مغناطیس‌سنجی مورد پی‌جویی قرار داد (Dobrin and Savit, 1988).

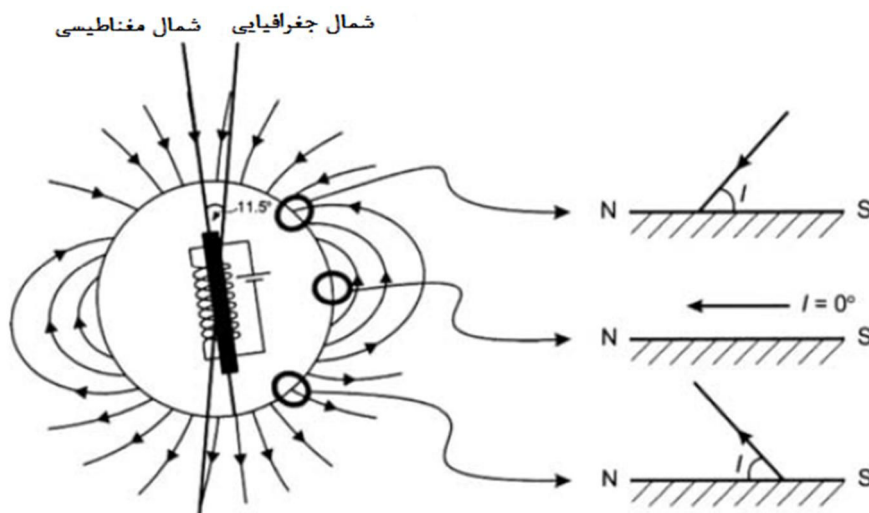
۲-۳ میدان مغناطیسی زمین

میدان مغناطیسی زمین، مجموع چندین مؤلفه مغناطیسی نشأت گرفته از داخل و خارج زمین است، که با مکان و زمان در سرتاسر زمین تغییر می‌کند. میدان اصلی تولیدی در اثر جریان‌های الکترومغناطیسی در هسته‌ی بیرونی زمین حدود ۹۸ درصد یا بیشتر از میدان مغناطیسی را تشکیل می‌دهد. میدان‌های خارجی ناشی از برهمکنش پلاسمای خورشیدی با میدان هسته، بیشتر میدان باقی‌مانده را تولید می‌کنند. علاوه بر میدان‌های اصلی و خارجی، اثرات نسبتاً جزئی مربوط به اجسام از تباین مغناطیسی‌پذیری زیرسطحی که مورد توجه مطالعات اکتشافی هستند به‌منظور تعیین خواص ترکیبی، ساختاری و حرارتی و بنابراین تاریخچه پوسته زمین و گوشته بالایی استفاده می‌شوند (Hinze et al., 2013).

میدان مغناطیسی را می‌توان با اصطلاحات زاویه‌ی انحراف^۱ (D)، زاویه‌ی میل^۲ (I) و بردار میدان کل (F) توصیف کرد. در شمال مغناطیسی زاویه‌ی میل ۹۰ است یعنی بردار F به‌صورت قائم به سمت پایین قرار دارد و در استوای مغناطیسی زاویه میل صفر است یعنی بردار F به‌صورت افقی قرار دارد (شکل ۱-۲). مؤلفه قائم شدت میدان مغناطیسی زمین با عرض جغرافیایی از ۳۰,۰۰۰ nT در استوای مغناطیسی تا ۶۰,۰۰۰ nT در قطب‌های مغناطیسی تغییر می‌کند (Reynolds, 2011).

¹ Declination

² Inclination

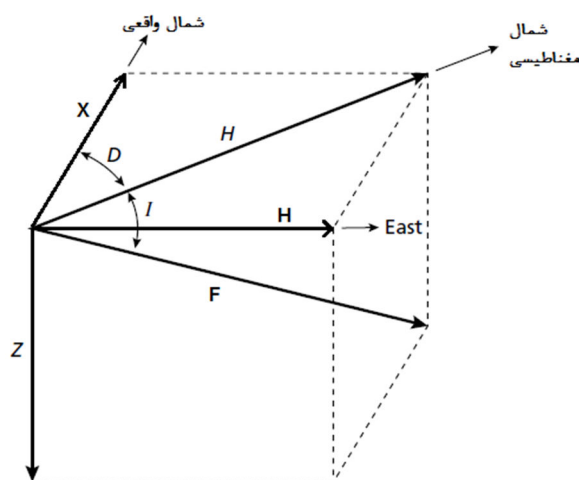


شکل ۲-۱: تغییرات زاویه‌ی میل با عرض جغرافیایی (Kearey, 2002).

از آنجایی که ابزارهای مرسوم نصب شده در رصدخانه‌های مغناطیسی فقط به مؤلفه‌های افقی و قائم میدان واقعی پاسخ می‌دهند، معمولاً میدان کل F به مؤلفه‌ی افقی H (که به تصویرهای X و Y تجزیه شده) و مؤلفه قائم Z تبدیل می‌شود (شکل ۲-۲). زاویه‌ای که F با مؤلفه افقی‌اش (H) می‌سازد زاویه‌ی میل (I) و زاویه بین H و X زاویه‌ی انحراف (D) است (شکل ۲-۲). مقادیر H و Z به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$H = F \cos I \quad (۱-۲)$$

$$Z = F \sin I = H \tan I \quad (۲-۲)$$



شکل ۲-۲: المان‌های مغناطیسی (Kearey, 2002).

صفحه‌ی قائمی که از مؤلفه‌های افقی میدان H و F می‌گذرد نصف‌النهار مغناطیسی محلی نامیده می‌شود (Dobrin and Savit, 1988).

۲-۴ مغناطیس سنگ‌ها و کانی‌ها

سنگ‌ها و کانی‌های موجود در پوسته زمین به دلیل وجود یا عدم وجود خاصیت مغناطیسی ناشی از مواد آهن‌دار به سه دسته تقسیم می‌شوند. گروه اصلی کانی‌های حاوی مغناطیس که عامل اصلی تولید بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در پوسته‌ی زمین هستند، کانی‌های فرومغناطیس بوده و هدف اصلی برداشت‌های ژئومغناطیس به حساب می‌آیند. این مواد در برابر میدان مغناطیسی هرچند ضعیف، خاصیت آهنربایی شدیدی به خود می‌گیرند و با برداشته شدن میدان مغناطیسی اعمالی، قسمتی از خاصیت مغناطیسی ایجاد شده در خود را حفظ می‌نمایند. از مهم‌ترین کانی‌های این گروه می‌توان به مگنتیت، ایلمنیت و تیتانومگنتیت اشاره نمود. خودپذیری مغناطیسی در مواد فرومغناطیس بسیار زیاد است ولی بستگی زیادی به دما و شدت میدان مغناطیسی دارد. بنابراین تمامی مواد فرومغناطیس، در دمای بالاتر از دمای کوری به مواد پارامغناطیس تبدیل شده و مقدار زیادی از خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. شدت مغناطیس شدن این کانی‌ها، بسیار بالاتر از کانی‌های پارامغناطیس است (Telford et al., 1990).

کانی‌های پارامغناطیس در ساختار اتمی خود، دارای اوربیتال‌های نیمه‌پر هستند. این مواد از لحاظ اتمی، خنثی بوده و به گونه‌ای به نظر می‌رسند که هیچ خاصیت مغناطیسی ندارند. این مواد تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی خارجی، متناسب با شدت میدان خارجی، بعضی از گشتاورهای خود را در جهت گشتاور میدان خارجی جهت‌گیری کرده و سبب پیدایش گشتاور مغناطیسی القایی می‌گردند (Dobrin and Savit, 1988).

کانی‌های دیامغناطیس برخلاف مواد فرومغناطیس، دارای اوربیتال‌های پر می‌باشند که باعث چرخش الکترون اطراف هسته می‌شوند. در واقع آهنربا موادی که اتم‌ها یا یون‌های آن دارای اوربیتال

نیمه‌پر نباشد را دفع می‌کند. این مواد را به نام مواد دیامغناطیس می‌شناسند. زیرا وجود اوربیتال پر در یک اتم باعث ایجاد گشتاور مغناطیسی می‌شود که مجموع آن در کل کانی، تقریباً صفر می‌شود. از مواد دیامغناطیس می‌توان به کوارتز، کلسیت، طلا، مس و نقره اشاره نمود (Telford et al., 1990).

۲-۵ برداشت‌های مغناطیس‌سنجی

روش مغناطیسی به‌طور گسترده در کارهای اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برداشت‌های مغناطیسی را می‌توان به‌صورت زمینی، هوایی و دریایی انجام داد. در مناطقی که وسعت زیادی دارند (بیش از صد هزار کیلومتر مربع) بیشتر از مگنتومتري هوایی استفاده می‌شود زیرا کارهای مغناطیسی هوابرد خیلی سریع‌تر و کلاً با دقت زیادتری انجام می‌گیرد. در مناطق کم وسعت که فاصله ایستگاه‌های اندازه‌گیری کم می‌باشند مگنتومتري زمینی مناسب‌تر خواهد بود. مگنتومتري زمینی معمولاً برای کارهای اکتشافی نیمه‌تفصیلی و تفصیلی به‌کار می‌رود. در مگنتومتري اکتشافی مسائلی از قبیل انتخاب دستگاه اندازه‌گیری، جهت و فاصله بین ایستگاه‌های قرائت و همچنین ارتفاع پرواز در کارهای هوایی باید معین گردند. در واقع میزان دامنه‌ی بی‌هنجاری‌های قابل پیش‌بینی در یک منطقه، دقت مورد نیاز را هم در حساسیت دستگاه‌های اندازه‌گیری و هم انتخاب محل‌های اندازه‌گیری تعیین می‌نماید. جهت بی‌هنجاری‌ها، جهت صحیح مسیرهای برداشت را تعیین می‌کند. امتداد پروفیل‌های برداشت معمولاً باید عمود بر جهت امتداد ساختارهای زمین‌شناسی باشد (کلاگری، ۱۳۸۹).

۲-۵-۱ اصول برداشت‌های زمینی

برداشت‌های مغناطیسی زمینی معمولاً در مناطق نسبتاً کوچک روی یک هدف از پیش تعریف شده انجام می‌شود. در نتیجه، فاصله‌ی ایستگاهی معمولاً ۱۰ تا ۱۰۰ متر است، اگرچه ممکن است در مناطق با گرادیان‌های مغناطیسی بالا فواصل کوچک‌تر اجرا شود. قرائت‌ها نباید در مجاورت اشیاء فلزی مانند خطوط راه آهن، اتومبیل‌ها، جاده‌ها، خانه‌ها و غیره انجام شود که ممکن است میدان

مغناطیسی محلی را آشفته کند. به دلایل مشابه، اپراتورهای مغناطیس‌سنج‌ها نباید اشیاء فلزی به همراه داشته باشند (Kearey, 2002).

در برداشت‌های زمینی تعیین یک ایستگاه مبنا در محلی دور از اهداف مغناطیسی مورد بررسی یا نوفه مغناطیسی و جایی که گرادیان میدان محلی نسبتاً هموار باشد، مهم است. یک ایستگاه مبنا باید سریع و آسان مکان‌یابی شود و مورد استفاده باشد. دقت روش برای برداشت به نوع ابزار بستگی دارد. اگر یک مغناطیس‌سنج پروتون دستی مورد استفاده قرار گیرد، زمان دقیق برای برداشت هر ایستگاه و حداقل سه قرائت شدت میدان کل باید ثبت شود. تفاوت هر کدام از این سه قرائت باید در حدود ± 1 یا ± 2 نانوتسلا باشد؛ سپس میانگین این سه قرائت محاسبه می‌شود. همان‌طور که برداشت‌ها انجام می‌شود، به‌منظور رسم منحنی تغییرات روزانه برای تصحیحات بعدی باید هر ۳۰ یا ۴۵ دقیقه ایستگاه مبنا دوباره قرائت شود. بعد از ثبت هر داده در صورت نیاز باید توضیحی در مورد توپوگرافی یا فاکتورهای دیگر که در پردازش و تفسیر داده‌ها مهم است مطرح شود (Reynolds, 2011).

در برنامه‌ریزی برداشت‌های زمینی اثرات ارتفاع و توپوگرافی معمولاً ناچیز فرض می‌شود. گرادیان قائم میدان مغناطیسی در قطب‌ها حدود nT/m 0.3 است. ارتفاع ایستگاه‌ها معمولاً لازم نیست و موقعیت ایستگاه‌ها با استفاده از GPS تعیین می‌شود (Hinze et al., 2013).

۲-۶ تغییرات مؤلفه‌های میدان مغناطیسی نسبت به زمان

مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین نسبت به زمان تغییر می‌کنند. دوره‌ی تناوب این تغییرات متفاوت است.

۲-۶-۱ تغییرات عناصر مغناطیسی با فواصل زمانی بسیار طولانی (منطبق با زمان زمین‌شناسی)

دوره‌ی تناوب این تغییرات در مقیاس میلیون سال بوده و علاوه بر تغییر مکان قطبین، معکوس شدن آن‌ها را نیز شامل می‌شود. این نوع تغییرات را با مطالعات پالئومغناطیس مشخص می‌کنند. مثلاً در

چهار میلیون سال گذشته، قطبین مغناطیسی زمین ۹ بار معکوس شده‌اند که آخرین بار آن ۷۰۰۰۰۰ سال قبل بوده است (کلاگری، ۱۳۸۹).

۲-۶-۲ تغییرات قرنی^۱

تغییرات کند و تدریجی در میدان مغناطیسی زمین را که دائماً در طول ده‌ها و یا صدها سال صورت می‌گیرد، تغییرات قرنی می‌نامند. این تغییرات تمام عناصر مغناطیسی زمین را در بر می‌گیرد و در تمام رصدخانه‌های مغناطیسی در سراسر دنیا قابل مشاهده هستند. دامنه‌ی این تغییرات نیز نسبت به زمان متغیر می‌باشد (کلاگری، ۱۳۸۹).

۲-۶-۳ تغییرات سالیانه^۲

تغییرات عناصر مغناطیسی زمین را در طول یک سال تغییرات سالیانه می‌نامند. نقشه‌هایی را که تغییرات سالیانه‌ی زوایای انحراف و میل را به‌صورت خطوط کنتوری نشان می‌دهند، نقشه‌های آیزوپوریک^۳ می‌نامند. با مطالعه این نقشه‌ها به‌طور کلی معلوم می‌شود که در روی زمین مناطقی وجود دارند که تغییرات سالیانه آن‌ها مشابه بی‌هنجاری‌ها بیشتر از سایر مناطق می‌باشند (کلاگری، ۱۳۸۹).

۲-۶-۴ تغییرات روزانه^۴

این نوع تغییرات تأثیر مستقیم در کارهای اکتشاف مغناطیسی دارند. هر چند مقدار این تغییرات نسبتاً کم است ولی از نظر زمانی کوتاه مدت می‌باشند. تغییرات مغناطیسی روزهای آرام در اثر القای مغناطیسی حاصله از جریان ذرات باردار در داخل یونسفر بوجود می‌آیند. این تغییرات به دو دسته تقسیم می‌شوند (کلاگری، ۱۳۸۹):

الف- تغییرات روزانه مربوط به روزهای آرام

¹ Secular variations

² Annual variations

³ Isoporic

⁴ Diurnal variations

این نوع تغییرات روزانه خیلی نرم، منظم و با دامنه‌ی کم می‌باشند؛ که شامل تغییرات روزانه خورشیدی با دوره‌ی تناوب ۲۴ ساعت و میانگین حدود ۳۰ نانوتسلا و تغییرات روزانه قمری با دوره تناوب ۲۵ ساعت و میانگین حدود ۲ نانوتسلا می‌باشد.

ب- تغییرات روزانه مربوط به روزهای آشفته

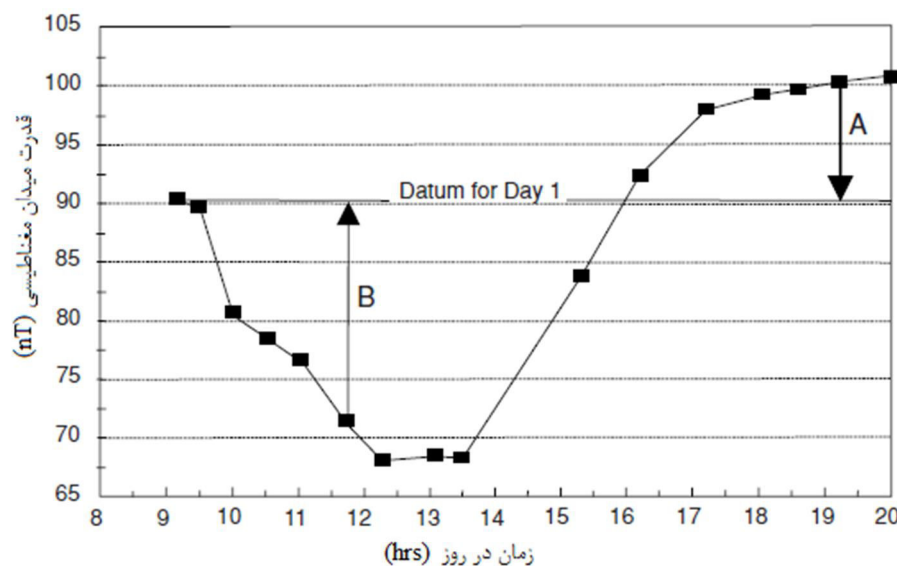
یک سری آشفتگی‌های زودگذر در میدان مغناطیسی زمین وجود دارند که به واسطه‌ی شباهت زیاد آن‌ها به تحولات جوی، طوفان‌های مغناطیسی نام گرفته‌اند. این طوفان‌ها سبب توقف عملیات اکتشاف مغناطیسی خواهند شد. در هنگام بروز این طوفان‌ها نوسانات میدان مغناطیسی آنقدر شدید، سریع و غیر قابل پیش‌بینی می‌شوند که برخلاف تغییرات روزهای آرام امکان تصحیح برای آن‌ها وجود ندارد. هنگام بروز طوفان‌های مغناطیسی باید هر گونه عملیات مغناطیسی را متوقف نمود. دامنه تغییرات این طوفان‌ها در عرض‌های جغرافیایی بین صفر الی ۶۰ درجه شمالی و یا جنوبی حدود ۱۰۰۰ نانوتسلا می‌باشد. در مناطق قطبی بالأخص هنگام ظاهر شدن شفق‌های قطبی دامنه این تغییرات ممکن است تا ۳۰۰۰ نانوتسلا نیز برسد. بیشتر این طوفان‌ها دوره‌ای حدود ۲۸ روز دارند، در واقع این طوفان‌ها در رابطه با ظهور لکه‌های خورشیدی می‌باشند. طوفان‌های شدید مغناطیسی به‌طور ناگهانی شروع شده و فوراً سراسر دنیا را فرا می‌گیرند و تا چندین روز دوام خواهند داشت (کلاگری، ۱۳۸۹).

۷-۲ تصحیح داده‌های مغناطیسی

تمام داده‌های مغناطیسی حاوی نوفه هستند و چند تصحیح برای داده‌های خام مورد نیاز است برای اینکه سهم همه عوامل در میدان مغناطیسی مشاهده‌ای غیر از عوامل مربوط به منابع مغناطیسی زیرسطحی حذف شود (Kearey, 2002).

۲-۷-۱ تصحیح روزانه

مهمترین تصحیح مربوط به تغییرات روزانه میدان مغناطیسی زمین است. قرائت‌های ثبت شده در ایستگاه مبنا در تمام مدت برداشت، به انجام تصحیح روزانه کمک می‌کند (شکل ۲-۳). اندازه‌گیری‌های میدان کل در سایر ایستگاه‌ها می‌توانند به راحتی توسط تغییرات در منحنی روزانه تنظیم شوند. برای مثال در نقطه A میدان محیط حدود ۱۰ نانوتسلا افزایش یافته و بنابراین باید مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه A باید ۱۰ نانوتسلا کاهش یابد. به طور مشابه در نقطه B میدان محیط حدود ۱۹ نانوتسلا کاهش یافته و بنابراین مقدار در B باید حدود ۱۹ نانوتسلا افزایش یابد (Reynolds, 2011).



شکل ۲-۳: منحنی تغییرات روزانه میدان مغناطیسی و چگونگی انجام تصحیح روزانه (Reynolds, 2011).

۲-۷-۲ تصحیح مغناطیس زمین

این تصحیح مشابه تصحیح عرض جغرافیایی در برداشت‌های گرانی است که اثر یک میدان مرجع مغناطیسی زمین را از داده‌های برداشت شده حذف می‌کند. دقیق‌ترین روش تصحیح مغناطیس زمین استفاده از IGRF است، که میدان مغناطیسی دست نخورده‌ی زمین را به صورت تعداد زیادی هارمونیک بیان می‌کند و شامل عبارات زمانی برای تصحیح تغییرات بلند مدت است. پیچیدگی IGRF نیازمند انجام محاسبات تصحیح به وسیله کامپیوتر است. به دلیل اینکه هارمونیک‌های مورد استفاده

براساس مشاهدات رصدخانه‌های مغناطیسی نسبتاً کوچک و پراکنده‌اند، لذا مقدار IGRF با خطا همراه است. بنابراین IGRF در مناطق دور از رصدخانه‌ها می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای اشتباه باشد (Kearey, 2002). زمانی که IGRF از داده‌ها حذف شود، نتایج در واقع همان بی‌هنجاری‌های مغناطیسی حاصل از منابع زمین‌شناسی زیرسطحی است. البته با فرض اینکه میدان به‌دست آمده از هسته‌ی زمین دقیقاً با مدل IGRF توصیف شود (Dobrin and Savit, 1988).

۲-۷-۳ تصحیح ارتفاع

گرادیان قائم داده‌های مغناطیسی به ازای هر متر از حدود $0.3/0$ نانوتسلا در قطب‌ها تا $0.1/0$ نانوتسلا در استوای مغناطیسی تغییر می‌کند. بنابراین تصحیح ارتفاع عموماً لازم نیست (Telford et al, 1990).

۲-۷-۴ تصحیح توپوگرافی

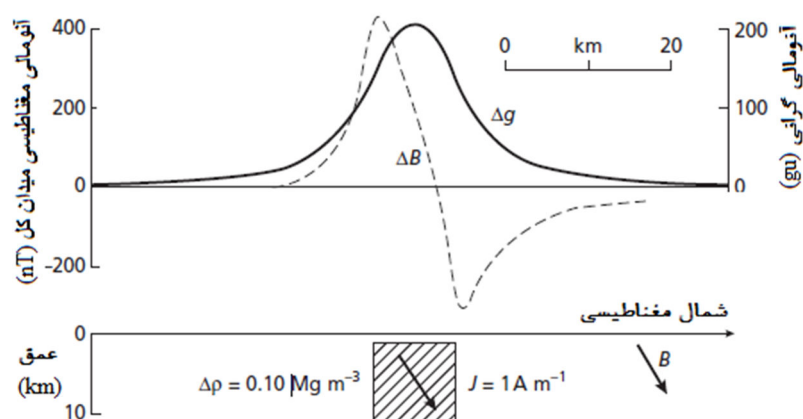
تأثیر توپوگرافی بر روی مغناطیس زمین، می‌تواند بسیار مهم باشد. واضح است که اندازه‌گیری در دره، برای مثال، جایی که دیواره‌های سنگی بالاتر از ایستگاه باشد فرکانس پایین غیرطبیعی مغناطیسی تولید می‌کند. بی‌هنجاری‌های توپوگرافی به بزرگی 700 نانوتسلا در دامنه‌های شیب‌دار (45° درجه) با گسترش حدود 10 متر در تشکیلات حاوی مگنتیت 2 درصد رخ می‌دهد. در چنین مواردی تصحیح توپوگرافی لازم است، اما صرفاً نمی‌تواند به‌عنوان یک تابع توپوگرافی اعمال شود زیرا موقعیت‌هایی مانند تشکیلات رسوبی با خودپذیری خیلی پایین وجود دارند که هیچ تغییر توپوگرافی در آن مشاهده نشده است. تصحیح توپوگرافی ساده داده‌های میدان مغناطیسی قائم (Z) ممکن است با برگردان اندازه‌گیری‌ها از یک سطح نامنظم $z = h(x, y)$ به سطح افقی $z=0$ که بالاتر از آن است انجام شود. این می‌تواند تقریباً با استفاده از سری تیلور با دو جمله انجام شود (Telford et al., 1990):

$$Z(x, y, 0) = Z(x, y, h) - h \left(\frac{\partial Z}{\partial z} \right)_{z=h} \quad (3-2)$$

۲-۸ پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی

زمانی که داده‌های مغناطیسی تصحیح و به شکل نهایی خود تبدیل می‌شوند، معمولاً به شکل پروفیل یا نقشه نمایش داده می‌شوند و روند تفسیر برای این دو مورد متفاوت است (Reynolds, 2011). پردازش در اکتشافات مغناطیسی نسبت به مدلسازی میدان مشاهده‌ای، تغییرات خارجی را مستقیماً از مشاهدات حذف می‌کند. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی برای اهداف تفسیری معمولاً به بی‌هنجاری معادل که در قطب مغناطیسی مشاهده می‌شوند، تبدیل می‌شوند. هدف از محاسبه بی‌هنجاری مغناطیسی جدا کردن قسمت‌های مغناطیسی منابع زمین‌شناسی مختلف است. یک بخش مهم از پردازش، شناسایی و جداسازی بی‌هنجاری‌های نشات گرفته از منابع خاص، مرتبط با برداشت است (Hinze et al, 2013).

تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشابه روش‌ها و شرایط تفسیر گرانی است چون هر دو از میدان‌های پتانسیل طبیعی براساس قوانین مربع معکوس جاذبه استفاده می‌کنند. اما چندین تفاوت وجود دارد که پیچیدگی تفسیرهای مغناطیسی را افزایش می‌دهد. در حقیقت بی‌هنجاری گرانی حاصل از یک توده کاملاً مثبت یا منفی است بسته به اینکه چگالی توده از محیط اطرافش بیشتر یا کمتر باشد؛ بی‌هنجاری مغناطیسی یک توده‌ی محدود همیشه شامل المان‌های مثبت و منفی است که نشات گرفته از ماهیت دو قطبی خاصیت مغناطیسی است (شکل ۲-۴). بعلاوه در حالی که چگالی یک کمیت اسکالر است، شدت مغناطیس پذیری یک بردار است و جهت آن در یک توده، شکل بی‌هنجاری مغناطیسی را کنترل می‌کند. بنابراین توده‌هایی با اشکال یکسان می‌توانند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی خیلی متفاوتی تولید کنند. به این دلایل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی نسبت به بی‌هنجاری‌های گرانی اغلب ارتباط کمتری با شکل توده مسبب دارند (Kearey, 2002).



شکل ۲-۴: بی‌هنجاری گرانی و مغناطیس روی یک توده دو بعدی مشابه (Kearey, 2002).

در بسیاری از موارد مستقیماً از داده‌های مغناطیسی ترسیم شده بدون مدلسازی بی‌هنجاری‌ها می‌توان اطلاعات زیادی به‌دست آورد. محصول این روش معمولاً یک نقشه (اغلب نقشه کنتوری) است که خواص معینی از منابع را برجسته می‌کند. بیشتر این روش‌های فیلتری می‌توانند هم در حوزه مکان و هم در حوزه فرکانس اجرا شوند اما در حوزه فرکانس کارآمدتر هستند. در تفسیر کیفی مقاطع بی‌هنجاری باید توجه نمود که با تغییر موقعیت ساختار و کانسارهای مدفون در عرض‌های مختلف جغرافیایی، به دلیل زوایای مختلف ورود میدان مغناطیسی زمین (زاویه میل مغناطیسی)، میدان القایی حاصل دارای شکل و شدت متفاوت می‌باشد. تفسیر نقشه‌های مغناطیسی همانند مقطع مغناطیسی، براساس شدت میدان و گرادیان تغییرات و شکل بی‌هنجاری صورت می‌پذیرد و با استفاده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی تکمیل می‌گردد (Dobrin and Savit, 1988).

۲-۸-۱ برگردان به قطب^۱

همان‌طور که گفته شد، شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی علاوه بر خودپذیری و شکل توده، به جهت مغناطیس‌شدگی و جهت میدان ناحیه‌ای نیز بستگی دارد. بنابراین به‌منظور به‌کارگیری فیلتر برگردان به قطب، از الگوریتم تبدیل در حوزه زمان یا حوزه فوریه استفاده می‌شود. فیلتر برگردان به قطب یک بی‌هنجاری مغناطیسی را به یک بی‌هنجاری که مغناطیس‌شدگی و میدان ناحیه‌ای قائم باشند، تبدیل

^۱ Reduction to the pole

می‌کند. یک توده‌ی متقارن در قطب‌های مغناطیسی یک بی‌هنجاری متقارن تولید می‌کند. بنابراین برگردان به قطب راهی برای حذف عدم تقارن ایجاد شده به وسیله مغناطیس‌شدگی یا میدان ناحیه‌ای غیر قائم و تولید یک مجموعه بی‌هنجاری ساده‌تر برای تفسیر است (Dobrin and Savit, 1988). برگردان به قطب یک گام مهم در بسیاری از روش‌های تفسیری مغناطیسی است. روش برگردان به قطب در عرض‌های مغناطیسی پایین به ویژه در حدود $\pm 15^\circ$ درجه استوای مغناطیسی ناپایدار است. بنابراین با تشدید نوفه و مقدار بی‌هنجاری در داده‌ها در جهت شمال- جنوب نتایج نامناسبی در تفسیر ارائه می‌دهد. تکنیک‌های زیادی در حوزه مکان و عدد موج برای کاهش مشکل ناپایداری توسعه داده شده است (Hinze et al, 2013).

پردازش‌های مشابهی می‌تواند برای برگردان میدان مغناطیسی بین هر دو عرض مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرد. برگردان به قطب تفسیر داده‌های مغناطیسی را خیلی راحت می‌کند. برای اینکه در عرض‌های مغناطیسی کمتر از 50° درجه ارتباط شکل بی‌هنجاری با هندسه منبع غالباً آشکار نیست. همان‌طور که گفته شد در عرض‌های مغناطیسی کمتر از 15° درجه پردازش می‌تواند دچار مشکلاتی شود. به این دلیل که در این حالت پردازش تبدیل فوریه به علت نیاز به تقسیم طیف به یک جمله خیلی کوچک، ناپایدار می‌شود. خیلی از افراد از این مشکل با محدود کردن این پردازش به عرض‌های مغناطیسی بزرگتر از 15° درجه دوری می‌کنند. برخی نیز این پردازش را برای عرض‌های مغناطیسی کوچکتر از 15° درجه به صورت تقریبی با اعمال دو تبدیل، که مجموع زوایا در آن دو تبدیل برابر با اختلاف بین عرض مغناطیسی و قطب باشد، فراهم کردند (Luyenyk, 1997).

در حوزه فرکانس، این تبدیل به شرح زیر می‌باشد:

$$A'(u, v) = \frac{A(u, v)}{(\sin\theta + i\cos\theta \cdot \sin(\varphi + \alpha))^2} \quad (4-2)$$

که در آن؛ $A(u, v)$ شدت بی‌هنجاری در فرکانس‌های (u, v) ، θ و φ به ترتیب زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس زمین و $\alpha = \tan^{-1}(v/u)$ می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که زاویه میل و

انحراف بردار مغناطیس زمین باید در تمام نقاط منطقه، یکسان باشند. چنانچه تغییرات زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس ناچیز باشد، از میانگین مقادیر آن‌ها برای فیلتر برگردان به قطب استفاده می‌شود و چنانچه اختلاف مقادیر آن‌ها زیاد باشد، می‌توان منطقه را به قسمت‌های کوچکتری که دارای مقادیر زاویه میل و انحراف مغناطیس یکسان هستند، تبدیل و از میانگین آن‌ها برای برگردان به قطب استفاده نمود (Arkani, 1988).

۲-۸-۲ فیلتر روند سطحی

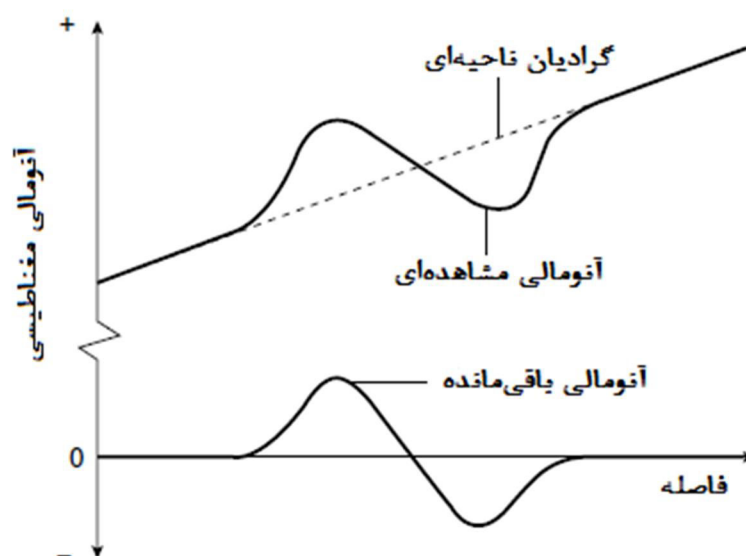
از این روش تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای به‌وسیله‌ی برازش چند جمله‌ای استفاده می‌شود. در این روش، میدان ناحیه‌ای از طریق مقادیر مشاهده‌ای به‌وسیله‌ی روش کمترین مربعات تقریب زده می‌شود. بدین منظور بر داده‌های میدان پتانسیل برداشت شده، سطحی عبور داده می‌شود که پیچیدگی ریاضی آن بستگی به روند حاکم بر داده‌ها دارد. معادله این سطح برای حالت دو بعدی به شکل زیر می‌باشد:

$$T(x, y) = A_{00} + A_{10}x + A_{01}y + A_{11}xy + A_{20}x^2 + A_{02}y^2 + A_{21}x^2y + \dots + A_{mn}x^m y^n \quad (۵-۲)$$

که در آن؛ $T(x, y)$ مقدار بی‌هنجاری ناحیه‌ای، A_{ij} ضرایب معادله چندجمله‌ای و x و y مختصات نقاط مشاهده‌ای داده‌ها می‌باشند. پس از عبور دادن سطح مورد نظر از داده‌های میدان پتانسیل برداشت شده، مقدار بی‌هنجاری باقی‌مانده به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_i = G_i - T_i \quad (۶-۲)$$

که در آن؛ G_i داده‌های مشاهده‌ای، T_i پاسخ سطح مورد نظر به‌عنوان اثر ناحیه‌ای و R_i بی‌هنجاری باقی‌مانده می‌باشد (Robinson and Coruh, 1988). درجه روند سطحی بیشتر برای هم‌پوشانی مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر سطح عبوری در شرایط پیچیده‌تر زمین‌شناسی به‌کار می‌رود و به پیچیدگی‌های زمین‌شناسی ناحیه‌ای بستگی دارد (Dobrin and Savit, 1988).



شکل ۲-۵: حذف گرادیان ناحیه‌ای از یک میدان مغناطیسی به وسیله‌ی فیلتر روند سطحی که میدان ناحیه‌ای به وسیله‌ی یک روند خطی تقریب زده شده است. (Kearey, 2002).

۲-۸-۳ تبدیل گسترش میدان به سمت بالا (ادامه فراسو)^۱

فیلترهای گسترش میدان به سمت بالا و پایین به‌طور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل بی‌هنجاری‌های مغناطیس مورد استفاده قرار می‌گیرند. فیلتر گسترش میدان به سمت بالا به‌منظور کاهش مؤلفه‌های عدد موج بالا و فیلتر گسترش میدان به سمت پایین به‌منظور تاکید بر بی‌هنجاری‌های گرادیان بالاتر و تخمین عمق منابع، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hinze et al, 2013).

ادامه‌ی فراسو فرآیند تبدیل داده‌های میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده از یک سطح به سطوح بالاتر است. چون داده‌ها از منبع دور می‌شوند این فرآیند از نظر ریاضی پایدار است (Dobrin and Savit, 1988). ادامه فراسو یک فیلتر پایین‌گذر است که باعث می‌شود میدان اندازه‌گیری شده هموارتر شده و بی‌هنجاری‌های کوچکی که از منابع سطحی کوچک منشا می‌گیرند، حذف گردند. کسر میدان ادامه فراسو از میدان اصلی مغناطیسی باعث می‌شود تا اثر اهداف عمیق‌تر روی داده‌های اولیه کمتر شده و از این رو با کاهش اثر روندهای منطقه‌ای، پاسخ‌های به‌دست آمده از اهداف کم‌عمق برجسته گردد.

¹ Upward continuation

اگر $U(x, y, z_0)$ میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده در سطح $z = z_0$ باشد، برای انتقال میدان پتانسیل به سطح $z = z_0 - \Delta z$ (جهت مثبت محور z به سمت داخل زمین در نظر گرفته شده است) از رابطه (۷-۲) استفاده می‌شود (Blakely, 1996).

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

, $\Delta z > 0$

تبدیل فوریه رابطه (۷-۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$F[U_{up}] = F[U]e^{-\Delta z|k|} \quad (8-2)$$

که در آن؛ $F[U_{up}]$ تبدیل فوریه میدان پتانسیل در ارتفاع $z = z_0 - \Delta z$ ، $F[U]$ تبدیل فوریه میدان پتانسیل در ارتفاع $z = z_0$ و k عدد موج است.

گسترش میدان به سمت پایین که تبدیل داده‌ها به سطوح پایین‌تر است به شدت ناپایدار است، به این دلیل که با نزدیک شدن به منبع، اطلاعات دارای عدد موج کوتاه‌تر که شامل نوفه‌ها هستند، تقویت می‌شوند (Dobrin and Savit, 1988). رابطه (۸-۲) با فرض مثبت در نظر گرفتن علامت Δz برای محاسبه گسترش میدان به سمت پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۸-۴ مشتق قائم

مشتق قائم داده‌های میدان پتانسیل را می‌توان با استفاده از خواص تابع لاپلاس در صورتی که $\varphi(x, y)$ بیانگر داده‌های پتانسیل باشد، محاسبه نمود. پس اگر $\varphi(x, y)$ یک میدان پتانسیل باشد، آنگاه $\nabla^2 \varphi = 0$ ، بنابراین:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right) \quad (9-2)$$

چنانچه داده‌ها در یک سطح برداشت شده باشند، می‌توان تابع لاپلاس را به حوزه فوریه منتقل و سپس مشتق قائم مرتبه n داده‌های میدان پتانسیل را محاسبه نمود که n هر عدد حقیقی می‌تواند باشد. با افزایش مرتبه مشتق قائم، بی‌هنجاری‌ها برجسته می‌شوند اما از آنجا که این فیلتر، فیلتر

بالاگذر است، همزمان با سیگنال‌ها، نوفه‌ها را نیز برجسته می‌کند. این امر به‌ویژه در مشتقات قائم مرتبه بالاتر ظاهر خواهد شد. به‌طور معمول استفاده از این فیلتر فقط به مرتبه‌های اول و دوم محدود می‌شود. البته استفاده از فیلتر مشتق قائم با مرتبه‌ی غیرصحیح و یا مشتق قائم وزن‌دار نیز می‌تواند مشکل تشدید نوفه را برطرف کند (Blakely, 1996).

۲-۸-۵ فیلتر زاویه تیل^۱

از اهداف مهم تفسیر داده‌های مغناطیس و گرانی، تعیین مرزها و عمق بی‌هنجاری‌های مدفون می‌باشد. روش‌های متفاوتی برای این کار وجود دارند که بیشتر بر پایه مشتق‌های میدان مغناطیسی عمل می‌کنند. اما با اعمال تغییرات جزئی در معادلات و نرمال‌سازی دامنه آن‌ها، می‌توان فیلترهای جدیدی با کارایی بیشتر تولید نمود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، زاویه تیل^۱ (T) می‌باشد. زاویه تیل^۱ به‌منظور مکان‌یابی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی استفاده می‌شود (Salem et al., 2007). میلر و سینگ (۱۹۹۴) بر حسب نسبت مشتق قائم به مشتق افقی میدان این فیلتر را به‌صورت رابطه‌ی (۲-۱۰) بیان کردند:

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{\partial f / \partial z}{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2}} \right) \quad (2-10)$$

که در آن؛ f میدان مغناطیس یا گرانی است. طبق رابطه فوق، زاویه تیل^۱ زمانی مثبت می‌شود که داده‌ها بر روی منبع مغناطیس قرار داشته باشند. هنگامی که داده‌ها در نزدیکی لبه‌ها قرار داشته باشند، به‌عبارت دیگر مشتق قائم برابر صفر و مشتق افقی، بیشینه باشد، زاویه تیل^۱ برابر صفر خواهد بود. چنانچه داده‌ها در خارج از محدوده لبه‌های بی‌هنجاری باشند، زاویه تیل^۱ منفی خواهد بود. محدوده تغییرات T از $-\frac{\pi}{2}$ تا $+\frac{\pi}{2}$ رادیان خواهد بود و تفسیر آن نیز به نسبت زاویه فاز سیگنال تحلیلی، بسیار ساده‌تر می‌باشد.

^۱ Tilt Angle

۲-۸-۶ سیگنال تحلیلی

سیگنال تحلیلی ترکیبی از گرادیان‌های افقی و قائم بی‌هنجاری مغناطیسی است. سیگنال تحلیلی در سرتاسر توده‌های بی‌هنجار یک شکل دارد که به موقعیت توده‌ها بستگی دارد و به جهت مغناطیس شدن آن‌ها بستگی ندارد. کاربرد سیگنال تحلیلی در تفسیر مغناطیس توسط نبی‌قیان (۱۹۷۲) برای بررسی‌های دو بعدی به عنوان ابزار تخمین عمق و موقعیت منابع ارائه شد (Blakely, 1996).

به کمک یک تبدیل ساده در حوزه فرکانس، یک تابع تحلیلی ارائه می‌شود که مؤلفه حقیقی آن مشتق افقی میدان و مؤلفه موهومی آن مشتق قائم میدان است. مؤلفه موهومی را می‌توان تبدیل هیلبرت^۱ مؤلفه حقیقی در نظر گرفت. این روش یک روش ساده و سریع برای محاسبه مشتق قائم از یک پروفیل را ارائه می‌کند (Nabighian, 1972).

سیگنال تحلیلی تابع $f(x)$ از طریق رابطه (۲-۱۱) محاسبه می‌شود:

$$a(x) = f(x) - iF_1(x) \quad (2-11)$$

که در آن؛ $a(x)$ سیگنال تحلیلی تابع $f(x)$ و $F_1(x)$ تبدیل هیلبرت تابع $f(x)$ می‌باشد. سیگنال تحلیلی تابع $f(x)$ به دو روش قابل محاسبه است:

الف- محاسبه تبدیل هیلبرت تابع $f(x)$ و ترکیب آن با تابع $f(x)$.

ب- محاسبه تبدیل فوریه تابع $f(x)$ و سپس به ازای عدد موج‌های بزرگتر از صفر تبدیل فوریه تابع دو برابر، به ازای عدد موج‌های کوچک‌تر از صفر تبدیل فوریه تابع مساوی با صفر و به ازای عدد موج صفر بدون تغییر گذاشته می‌شود و در نهایت عکس تبدیل فوریه نتایج محاسبه می‌شود (Blakely, 1996).

۲-۸-۷ روش اویلر

برای یک میدان پتانسیل معادله اویلر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

¹ Hilbert transforms

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -\eta \Delta T \quad (12-2)$$

که در آن؛ (x_0, y_0, z_0) مکان چشمه مغناطیسی، ΔT بی‌هنجاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده در نقطه مشاهده‌ای (x, y, z) و η شاخص ساختاری است. با توجه به این رابطه ملاحظه می‌شود برای حل معادله اوایلر در یک پنجره گرادیان‌های افقی و قائم بی‌هنجاری مغناطیسی مورد نیاز است. برای داده‌های مغناطیسی مزیت مهم فرآیند وارون‌سازی معادله اوایلر آن است که حساس به زاویه شیب، انحراف مغناطیسی و مؤلفه بازماند مغناطیسی نیست (Thompson, 1982).

روش اوایلر زمانی بهتر عمل می‌کند که پنجره جستجوگر به اندازه کافی بزرگ باشد که کل بی‌هنجاری را شامل شود، اما آنقدر بزرگ نباشد که بی‌هنجاری‌های مجاور را در برگیرد. برای منابع عمیق بهتر است پنجره‌ها بزرگتر انتخاب شوند (Zhang et al., 2000). شاخص ساختاری با توجه به هندسه چشمه تعیین می‌شود که برای مدل‌های ساده زمین‌شناسی برای میدان مغناطیسی به‌صورت جدول (۱-۲) است (Reid et al., 1990).

جدول ۱-۲: شاخص ساختاری برای مدل‌های زمین‌شناسی مختلف (Reid et al., 1990).

شکل توده	شاخص ساختاری
کنتاکت	۰
دایک یا سیل	۱
استوانه قائم یا افقی	۲
کره یا دوقطبی	۳

۲-۸-۸ گرادیان کل نرمال بهبودیافته

برزکین (۱۹۷۳) اولین بار روش گرادیان کل نرمال را بر روی داده‌های بی‌هنجاری گرانی به‌صورت رابطه (۲-۱۳) ارائه کرد. با توجه به اینکه میدان‌های گرانی و مغناطیسی میدان پتانسیل می‌باشند از این فرمول برای تعیین گرادیان کل نرمال داده‌های مغناطیسی که برگردان به قطب شده باشند نیز می‌توان استفاده نمود.

$$G_N(x, z) = \frac{G(x, z)}{G_m(z)} = \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z}\right)^2\right]^v}}{\frac{1}{M} \sum_1^M \sqrt{\left[\left(\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z}\right)^2\right]^v}} \quad (13-2)$$

که در آن $\partial \Delta g(x, z) / \partial x$ و $\partial \Delta g(x, z) / \partial z$ به ترتیب مشتق‌های اول افقی و قائم بی‌هنجاری گرانی Δg در نقطه (x, z) می‌باشد و M تعداد نقاط مشاهده‌ای روی نیمرخ اندازه‌گیری داده‌های گرانی، $G(x, z)$ مقدار گرادیان کل بی‌هنجاری گرانی در هر نقطه مشاهده‌ای، $G_m(z)$ متوسط گرادیان کل بی‌هنجاری‌های گرانی در افق ثابت z و $G_N(x, z)$ گرادیان کل نرمال در نقطه (x, z) در یک مقطع $x-z$ است. v درجه عملگری گرادیان کل است که معمولاً ۱ منظور می‌شود. مقدار گرادیان کل نرمال یک مقدار بدون بعد است (آقاجانی و همکاران، ۱۳۸۹).

برای فرآیند گسترش میدان به سمت پایین می‌توان از روش استاندارد مبتنی بر سری فوریه استفاده نمود، که فرآیند گسترش میدان را در حوزه عدد موج محقق می‌نماید (Pasteka, 2000). تابعی مثل $g(x)$ که در فاصله $(-L, L)$ تعریف شده و در خارج از این فاصله متناوب است متناظر با سری فوریه زیر است (Kreyszing, 1979):

$$g(x) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}x\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi}{T}x\right) + \dots + a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}x\right) + b_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T}x\right) + \dots + b_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T}x\right) \quad (14-2)$$

که در آن؛ $\frac{2\pi}{T}$ فرکانس زاویه‌ای پایه و x فاصله می‌باشد. در صورت برقراری شرایط دیریکله به شرح زیر، سری فوریه همگرا می‌شود (Gerken, 1989):

الف- تابع در فاصله $(-T, T)$ تعریف شده و دارای دوره تناوب $2T$ باشد.

ب- مقدار تابع معلوم و موجود باشد.

ج- تابع و مشتق آن پیوسته باشد.

د- تابع دارای تعداد محدودی نقاط کمینه و بیشینه باشد.

در بسیاری از مسائل فیزیکی به ویژه در روش‌های میدان پتانسیل بایستی سری فوریه در مورد توابعی که فقط بر فاصله‌ای متناهی تعریف شده‌اند، تعیین شود. در مسائل کاربردی نظیر داده‌های مشاهده‌ای گرانی و مغناطیس می‌توان از سری‌های سینوسی و کسینوسی بهره برد (Kreyszing, 1979).

برزکین و بوکتف (۱۹۶۵)، بی‌هنجاری گرانی را به صورت سری فوریه سینوسی در دامنه $(-L, L)$ چنین بیان کردند:

$$\Delta g(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{\frac{\pi n z}{L}} \quad (15-2)$$

که در آن؛ L طول نیمرخ برداشت و N تعداد جملات سری فوریه و B_n ضرایب هارمونیک‌های سینوسی می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شوند.

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L \Delta g(x, 0) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx \quad (16-2)$$

روش‌های عددی مختلفی مثل قاعده دوزنقه، یک سوم سیمپسون و روش فیلون (Filon, 1928) را می‌توان جهت محاسبه ضرایب B_n مورد استفاده قرار داد.

زمانی که یک موج که حاوی ناپیوستگی است (مشتق ناپیوسته) به صورت سری فوریه نوشته شود، عمل برازش در نزدیکی ناپیوستگی ضعیف است. همچنان که تعداد مؤلفه‌های فرکانس در سری افزایش می‌یابد، ناحیه برازش ضعیف، باریک می‌شود. این برازش ضعیف به پدیده گیبس^۱ معروف است (آقاجانی و مرادزاده، ۱۳۸۶). به هنگام فرآیند محاسبه مقدار بی‌هنجاری میدان پتانسیل و نیز گرادیان آن در راستای افقی و قائم در روش گسترش میدان به سمت پایین، اغتشاشات و نوفه‌هایی در میدان ظاهر می‌شود، که برای حذف آن‌ها روی ناحیه مورد مطالعه، بسط تابع سینوسی در تابع هموار کننده‌ای به نام q_m که اثر پایدار کننده‌ای روی عملگر گرادیان کل نرمال دارد، ضرب می‌شود (Berezkin, 1967; Berezkin and Buketov, 1965):

¹ Gibbs effect

$$q_m = \left(\frac{\sin \frac{n\pi}{N}}{\frac{n\pi}{N}} \right)^\mu \quad (۱۷-۲)$$

که در آن μ عدد صحیحی است که نمایانگر درجه هموار کنندگی است و میزان انحنای تابع q_m را کنترل می‌کند. برای μ می‌توان هر عدد صحیحی انتخاب نمود ولی بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقدار ۲ برای آن نتایج منطقی در روش گسترش میدان به سمت پایین ارائه می‌دهد (Berezkin, 1988; Zeng et al., 2002; Dondurur, 2005; Aghajani & Moradzadeh, 2008). تابع q_m معروف به جمله هموار کننده لانکوزوس^۱ است که اولین بار توسط برزکین (۱۹۶۷) برای حذف اثر گیبس که در تبدیلات فوریه مورد بحث قرار می‌گیرد، استفاده گردید.

بدین ترتیب با ضرب تابع هموار کننده لانکوزوس در سری فوریه، تابع $\Delta g(x, z)$ به صورت معادله زیر ارائه می‌گردد:

$$\Delta g(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin \frac{n\pi}{N}}{\frac{n\pi}{N}} \right)^\mu \quad (۱۸-۲)$$

مشتق‌های افقی و قائم رابطه (۱۸-۲) به صورت زیر به دست می‌آید (Berezkin, 1967):

$$\Delta g_x(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^N n B_n \cos\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin \frac{n\pi}{N}}{\frac{n\pi}{N}} \right)^\mu \quad (۱۹-۲)$$

$$\Delta g_z(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^N n B_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin \frac{n\pi}{N}}{\frac{n\pi}{N}} \right)^\mu \quad (۲۰-۲)$$

با جایگذاری معادلات (۱۹-۲) و (۲۰-۲) در معادله (۱۳-۲) مقدار گرادیان کل نرمال محاسبه می‌شود.

^۱ Lanczos

برزکین (۱۹۷۸ و ۱۹۸۸) و ابراهیم‌زاده اردستانی (۲۰۰۴) به این نکته اشاره کرده‌اند که باید نسبت طول نیم‌رخ به عمق، حداقل ۱۰ باشد که نتایج حاصل درست باشد و برای نسبت‌های کمتر، از دقت این روش کاسته می‌شود.

بدیهی است که مقدار گرادیان کل نرمال به شدت به تعداد جملات سری فوریه‌ی استفاده شده در محاسبه آن وابسته است و تغییر کوچک در مقدار آن سبب تغییرات بزرگی در مقدار گرادیان کل نرمال خواهد شد (Berezkin and Buketov, 1965; Zeng et al., 2002; Aghajani and Moradzadeh, 2008). بنابراین تعیین یک معیار مناسب برای برآورد مقدار بهینه تعداد جملات سری هارمونیک مهم‌ترین مسئله در این روش است (آقاجانی و همکاران، ۱۳۸۹).

ژانگ و منگ (۲۰۱۵) روش جدیدی را برای محاسبه تعداد هارمونیک‌های بهینه معرفی کردند و کاربرد آن را در تعیین موقعیت و عمق بی‌هنجاری‌های گرانی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند در مقایسه با روش‌های مرسوم روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته برای مدل‌های مصنوعی، تخمینی صحیح و پایدار ارائه می‌دهد. سپس این روش را برای تفسیر بی‌هنجاری گرانی در حوضه نمکی می‌سی‌سی‌پی به کار بردند و نتایج رضایت‌بخشی به دست آوردند. آن‌ها بیان کردند بی‌هنجاری‌های گرانی مجموع بی‌هنجاری‌های گرانی اصلی و نوفه‌های تصادفی هستند. تعداد هارمونیک‌ها یک پارامتر ایجاد کننده تعادل بین سیگنال و نوفه است. با ارائه کمیت E_r به صورت مقدار سیگنال مفید در بی‌هنجاری‌های بازسازی شده در سطح اندازه‌گیری که با اولین N ضرایب فوریه به دست آمده است، مقدار بهینه N محاسبه می‌شود.

$$E_r(N) = \frac{E_{rec}(N)}{E_{ori}} = \frac{\sum \Delta g_{rec}^2(N)}{\sum \Delta g_{ori}^2} \quad (2-21)$$

$$\Delta g_{rec}(N) = \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \quad (2-22)$$

که در آن؛ E_{rec} انرژی بی‌هنجاری‌های بازسازی شده با اولین N ضرایب، E_{ori} انرژی بی‌هنجاری‌های اصلی Δg_{ori} و $\Delta g_{rec}(N)$ بی‌هنجاری‌های بازسازی شده در سطح اندازه‌گیری با اولین N ضرایب فوریه است.

منحنی E_r دارای سه مرحله است: مرحله صعود که N کوچک است و سیگنال بی‌هنجاری به‌طور کامل بازسازی نمی‌شود؛ مرحله گذار که N متوسط است و سیگنال بازسازی شده شامل بیشینه بازسازی سیگنال مطلوب با کمترین نوفه است؛ و مرحله ثابت (تقریباً افقی) که N بزرگ است و سیگنال بازسازی شده شامل مقادیر زیادی نوفه فرکانس بالا است. تعداد هارمونیک‌های بهینه از مرحله گذار به وسیله تعادل بین سیگنال و نوفه انتخاب می‌شود.

به دلیل اینکه مرحله گذار خیلی تدریجی است برای تعیین نقطه انحنای منحنی E_r ، عمق مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک رسم می‌شود. در منحنی عمق قسمتی که منطبق بر مرحله گذار است به شکل V با یک دنباله بلند است؛ مقدار گوشه سمت چپ بالای V بیشینه عمق گسترش میدان به سمت پایین است. مقدار N در پایین‌ترین نقطه V به عنوان تعداد هارمونیک‌های بهینه در نظر گرفته می‌شود (Zhang and Meng, 2015).

در ادامه، در فصل بعدی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مدل‌های مصنوعی تهیه و اثر مغناطیس و گرانی آن‌ها تهیه و سپس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته روی آن‌ها اعمال خواهد شد.

فصل سوم: اعمال روش ENFG روی مدل‌های

مصنوعی

۳-۱ مقدمه

یکی از اهداف اصلی در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل تخمین عمق و تعیین شکل منابع بی‌هنجاری‌های زیرسطحی است. روش گرادیان کل نرمال ترکیبی از گسترش میدان به سمت پایین و گرادیان‌های افقی و قائم بی‌هنجاری است که به عنوان روشی نیمه‌خودکار در دو و سه بعد برای تفسیر داده‌های میدان پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این فصل هدف بررسی عملکرد الگوریتم گرادیان کل نرمال بهبودیافته دو بعدی (2D-ENFG) روی داده‌های حاصل از مدل‌های مصنوعی است. در مسیر بررسی این هدف نخست در محیط نرم‌افزار MATLAB کد محاسبه اثر میدان ناشی از چند مدل مصنوعی نوشته شده است. سپس داده‌های حاصل از یک پروفیل روی هر کدام از این مدل‌ها به وسیله کد گرادیان کل نرمال بهبودیافته که در محیط MATLAB نگارش شده است، برای تخمین عمق مورد بررسی قرار گرفته است. ژانگ و منگ (۲۰۱۵) روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته را روی داده‌های گرانی حاصل از مدل مصنوعی استوانه افقی اعمال کردند. اکنون در این پایان‌نامه برای بررسی صحت کد مربوطه، ابتدا همان مدل استوانه افقی گرانی ارائه شده است. سپس دو مدل مصنوعی مغناطیسی استوانه افقی و دایک قائم تهیه شده است. در انتها با استفاده از اثر گرانی حاصل از مدل مصنوعی چهارم که شامل شش کره می‌باشد، عملکرد روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته برای تخمین عمق مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای هر کدام از مدل‌ها نتایج حاصل از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته با روش گرادیان کل نرمال که تعداد هارمونیک‌های بهینه با استفاده از روش بیشینه نسبی (Aghajani et al., 2009a-c) محاسبه می‌شود، مقایسه شده است.

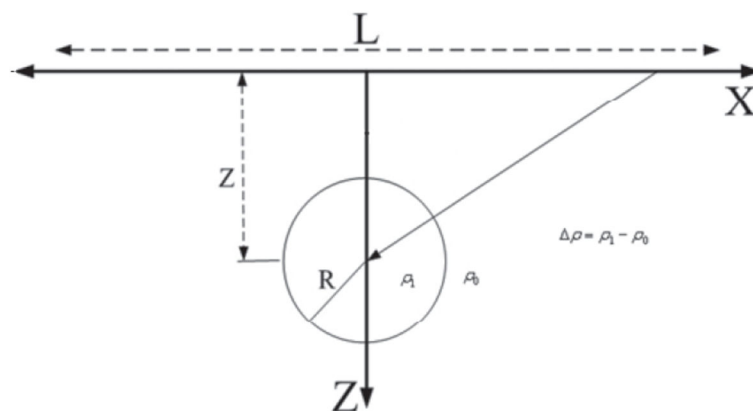
۲-۳ اعمال روش روی اثر گرانی و مغناطیس حاصل از مدل‌های مصنوعی

۲-۳-۱ مدل مصنوعی استوانه افقی گرانی

مقدار اثر گرانی ناشی از استوانه افقی مدفون به شعاع R کیلومتر (شکل ۱-۳) با استفاده از رابطه‌ی (۱-۳) محاسبه می‌شود (آقاجانی و همکاران، ۱۳۸۹).

$$\Delta g(x, z) = 2G\lambda \frac{z}{z^2 + x^2} \quad (1-3)$$

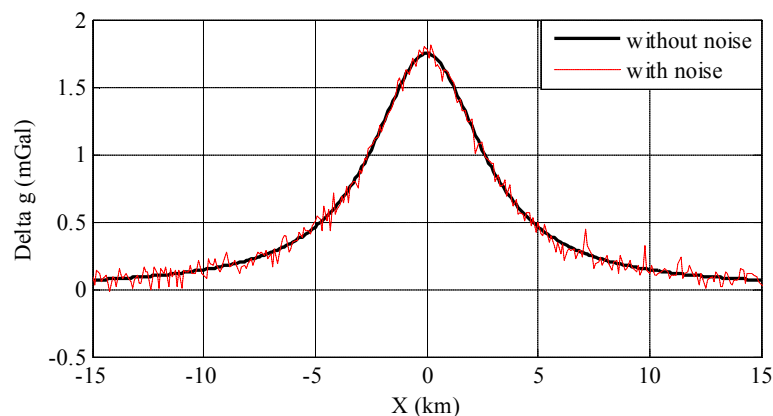
که در آن؛ G ثابت جهانی شتاب جاذبه زمین و $\lambda = \pi \Delta \rho R^2$ اختلاف چگالی سطحی و z عمق مرکز استوانه افقی یا فاصله قائم بین نقطه اندازه‌گیری اثر گرانشی استوانه تا مرکز آن است. مقدار بی‌هنجاری گرانی $\Delta g(x, z)$ به سمت مرکز استوانه یعنی $z = 0$ افزایش یافته و وقتی که مقدار $x = 0$ گردد، بی‌هنجاری $\Delta g(0, 0)$ به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. این موضوع بیانگر این مطلب است که مرکز یک استوانه افقی یک نقطه‌ی تکین است.



شکل ۱-۳: نمایی از استوانه در دو بعد.

مدل مصنوعی استوانه افقی نامحدود با شعاع ۰/۵ کیلومتر و تباین چگالی ۰/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب طراحی شده است که این استوانه در عمق ۳ کیلومتری از سطح زمین قرار گرفته است. پروفیل برداشت شده به طول ۳۰ کیلومتر و فاصله نمونه‌برداری ۰/۱ کیلومتر است. به داده‌های حاصل از این پروفیل ۵ درصد نوفه تصادفی اضافه شده است. اثر بی‌هنجاری محلی حاصل از این استوانه در دو حالت بدون نوفه و حاوی ۵ درصد نوفه محاسبه شده است (شکل ۲-۳). در هر دو حالت مقادیر

حاصل از این پروفیل با استفاده از کد گرادیان کل نرمال بهبودیافته برای تخمین عمق مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبودیافته از سطح زمین تا عمق ۵ کیلومتر در ۵۱ لایه با فواصل یکسان ۰/۱ کیلومتری محاسبه شده است.

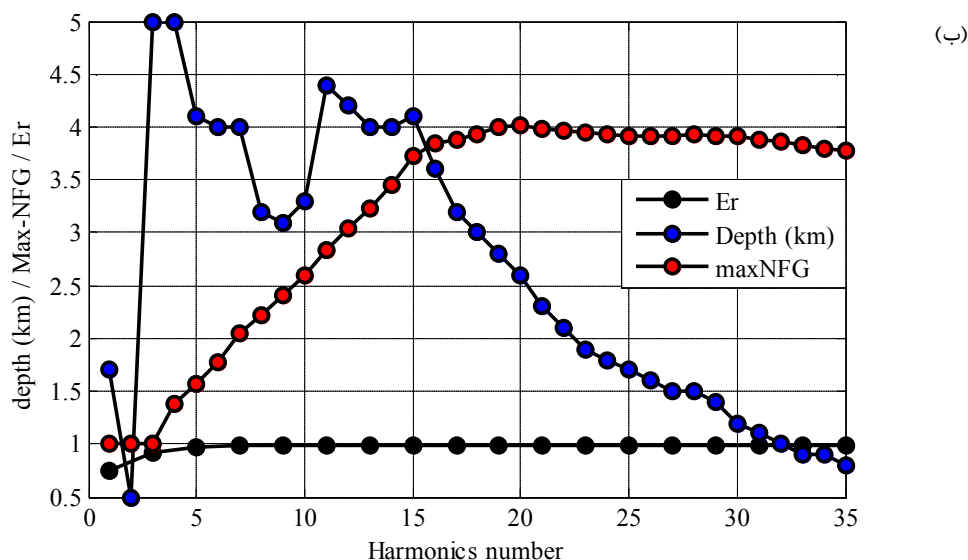
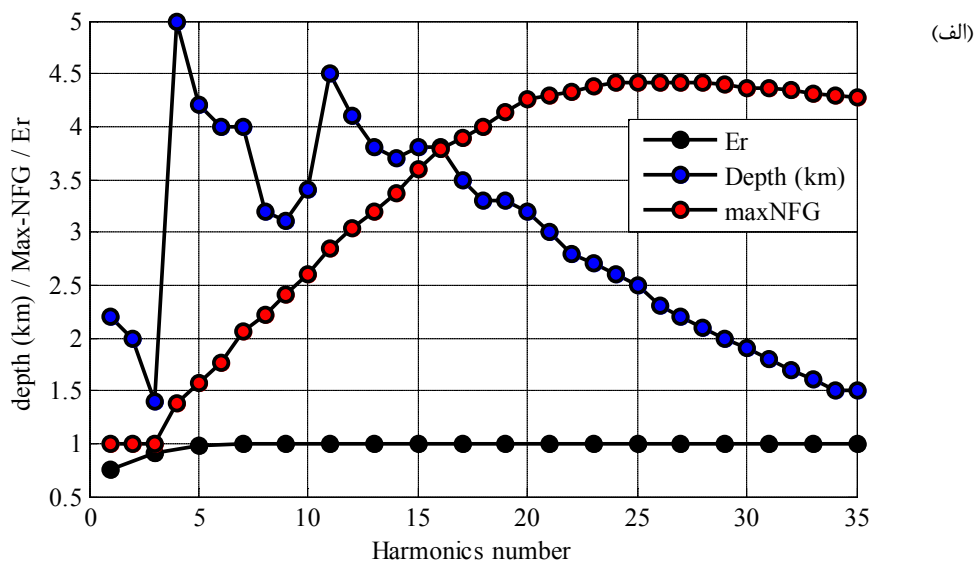


شکل ۳-۲: اثر بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل مصنوعی استوانه افقی گرانی.

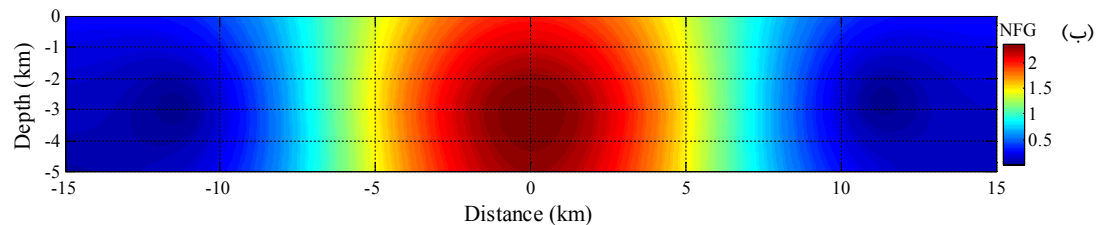
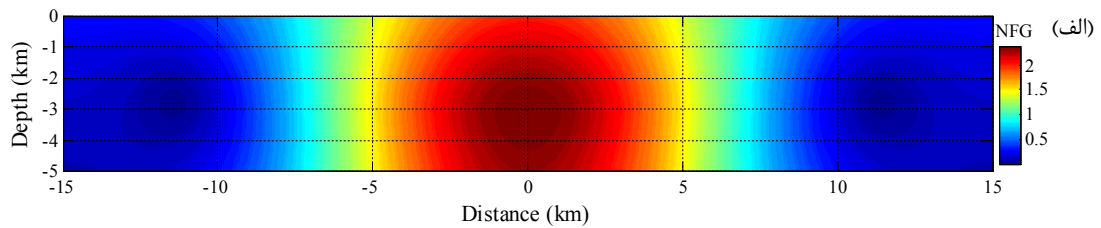
برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r ، تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال و عمق مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، ترسیم شد (شکل ۳-۳). به‌وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی E_r (سیاه رنگ) و منحنی عمق بیشینه گرادیان‌های کل نرمال (آبی رنگ) در شکل (۳-۳) با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (در دو حالت بدون نوفه و دارای نوفه)، تعداد هارمونیک‌های بهینه برای این مدل تعیین شد ($N=9$). مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای $N=9$ در شکل (۳-۴) ارائه شده و عمق مرکزی منبع در هر دو حالت ۳/۱ کیلومتر برآورد شده است. به وضوح مقدار بیشینه در این مقاطع با مرکز استوانه مطابقت دارد و همچنین این روش نسبت به نوفه پایدار است.

برای مقایسه روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته با روش گرادیان کل نرمال ابتدا تعداد هارمونیک‌های بهینه با استفاده از روش بیشینه نسبی تعیین شد. نمودار تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، یک منحنی ایجاد می‌کند که در شکل (۳-۳) با رنگ قرمز نشان داده شده است. تعداد هارمونیک‌های بهینه با استفاده از بیشینه‌ی این منحنی در

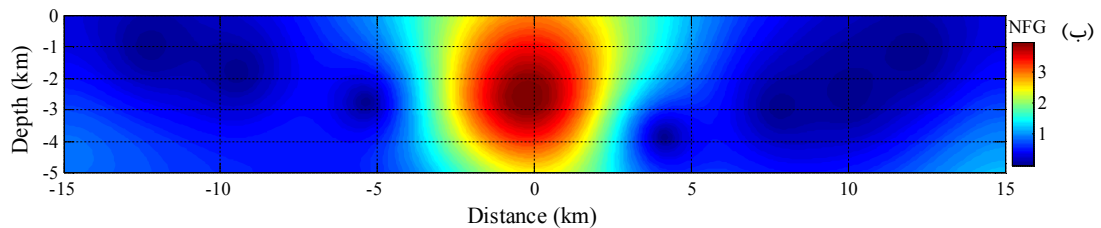
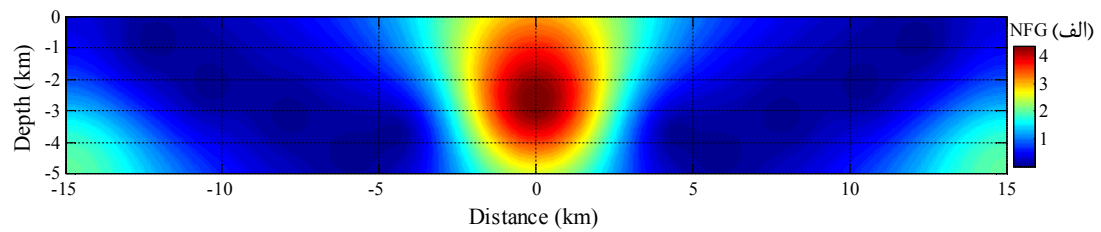
حالت بدون نوفه ۲۴ (شکل ۳-۳-الف) و در حالت دارای نوفه ۲۰ (شکل ۳-۳-ب) انتخاب شد. مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای $N=20$ و $N=24$ در شکل (۳-۵) نشان داده شده و عمق منبع در هر دو حالت ۲/۶ کیلومتر تخمین زده شده است. با مقایسه این دو روش به وضوح می‌توان دید که روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته در تعیین تعداد هارمونیک‌های بهینه برای تخمین عمق دقت بالاتری دارد.



شکل ۳-۳: E_r ، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال و تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۳-۲)؛ (الف) بدون نوفه؛ (ب) حاوی ۵ درصد نوفه.



شکل ۳-۴: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری گرانی استوانه افقی گرانی؛ (الف) بدون نوفه؛ (ب) حاوی ۵ درصد نوفه؛ تعداد جملات هارمونیک در هر دو حالت ۹ می‌باشد.



شکل ۳-۵: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری گرانی استوانه افقی گرانی؛ (الف) بدون نوفه؛ (ب) حاوی ۵ درصد نوفه؛ تعداد جملات هارمونیک به ترتیب ۲۴ و ۲۰ می‌باشد.

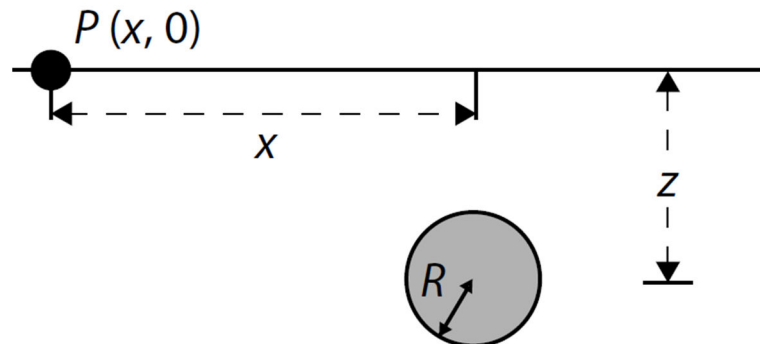
۳-۲-۲ مدل مصنوعی استوانه افقی مغناطیسی

مقدار شدت میدان قائم ناشی از استوانه افقی مدفون به شعاع R (شکل ۳-۶) که به‌طور قائم در نیمکره شمالی پلاریزه شده باشد با استفاده از رابطه (۳-۲) محاسبه می‌شود.

$$H_z = \frac{2\pi R^2 I}{z^2} \times \frac{1 - (x/z)^2}{[1 + (x/z)^2]^2} \quad (3-2)$$

که در آن؛ I شدت مغناطیسی شدن جسم مزبور، x فاصله افقی هر نقطه مشاهده‌ای از مرکز استوانه و z عمق مرکز استوانه افقی یا فاصله قائم بین نقطه اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی

استوانه تا مرکز آن است. مقدار بی‌هنجاری مغناطیسی وقتی که مقدار $x=0$ گردد، بیشینه خواهد بود. این موضوع بیانگر این مطلب است که مرکز یک استوانه افقی یک نقطه تکین است.

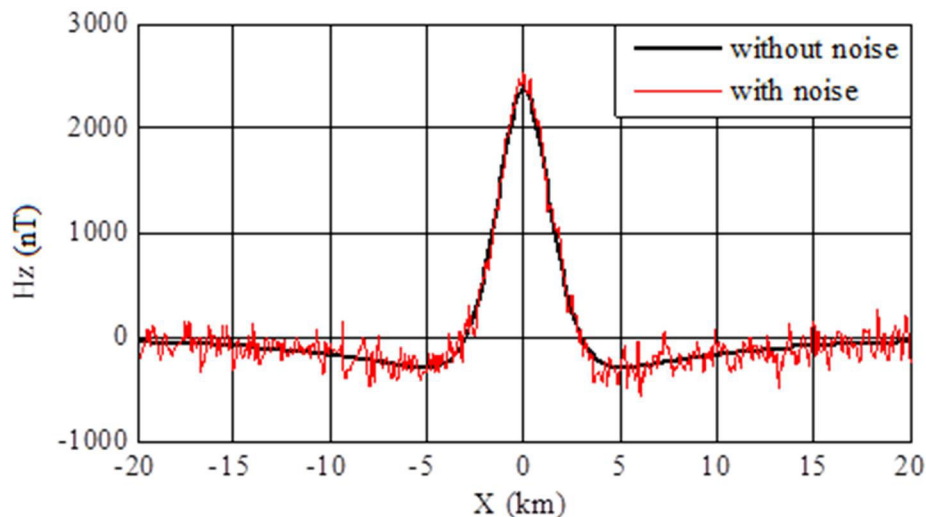


شکل ۳-۶: نمایی از استوانه در دو بعد.

استوانه افقی نامحدود با شعاع ۰/۵ کیلومتر در نیمکره شمالی واقع و در عمق ۳ کیلومتری دفن شده است. درصد حجمی مگنتیت موجود در این توده استوانه‌ای شکل ۴۵ درصد و خودپذیری مغناطیسی آن ۰/۵ در سیستم CGS است. پروفیل برداشت شده به طول ۴۰ کیلومتر و فاصله نمونه‌برداری ۰/۱ کیلومتر است. به داده‌های حاصل از این پروفیل ۵ درصد نوفه تصادفی اضافه شده است. در صورتی که مؤلفه قائم شدت میدان مغناطیسی زمین ۰/۶ اورستد باشد اثر بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل از این استوانه در دو حالت بدون نوفه و حاوی ۵ درصد نوفه محاسبه شده است (شکل ۳-۷). در هر دو حالت مقادیر حاصل از این پروفیل با استفاده از کد گرادیان کل نرمال بهبودیافته برای تخمین عمق مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبودیافته از سطح زمین تا عمق ۵ کیلومتر در ۱۰۱ لایه با فواصل یکسان ۰/۰۵ کیلومتری محاسبه شده است.

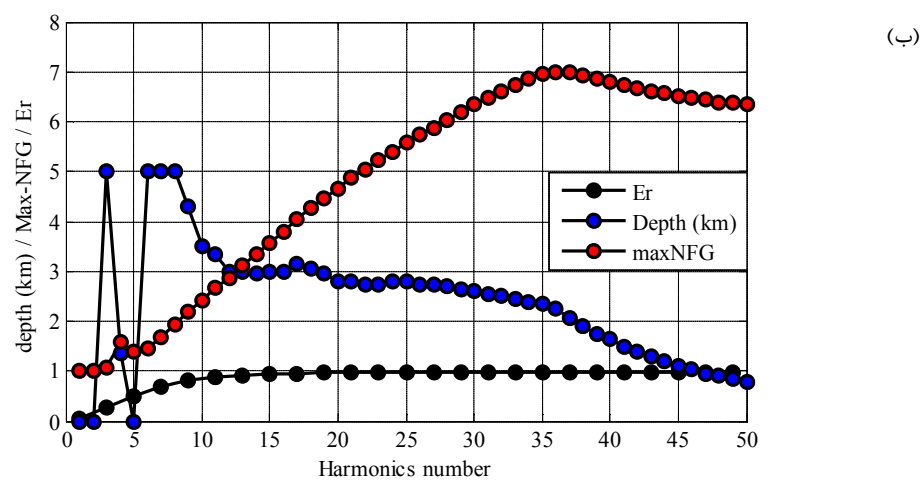
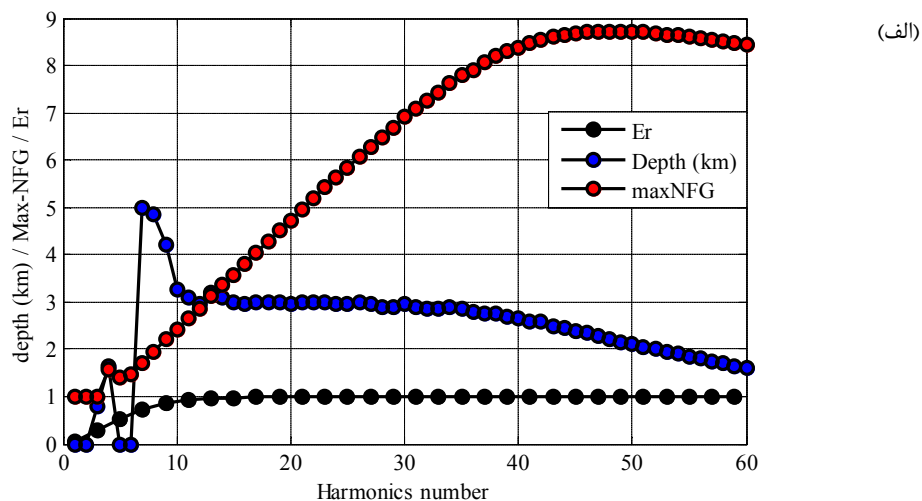
برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r ، تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال و عمق مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک ترسیم شد (شکل ۳-۸). به وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی E_r (سیاه رنگ) و منحنی عمق مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (آبی رنگ) در شکل (۳-۸) با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته در حالت بدون نوفه تعداد $N=12$ (شکل ۳-۸-الف) و در حالت دارای نوفه $N=14$ (شکل

۳-۸-ب) به عنوان تعداد هارمونیک‌های بهینه برای این مدل تعیین شد. مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای ۱۲ و ۱۴ هارمونیک در شکل (۳-۹) ارائه شده و عمق مرکزی منبع در هر دو حالت ۲/۹۵ کیلومتر برآورد شده است. به وضوح مقدار بیشینه در این مقاطع با مرکز استوانه مطابقت دارد و همچنین این روش نسبت به نوفه پایدار است.

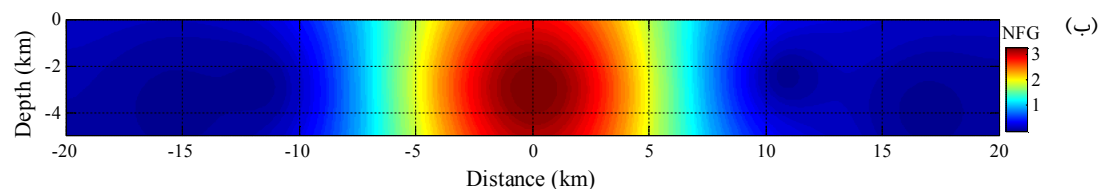
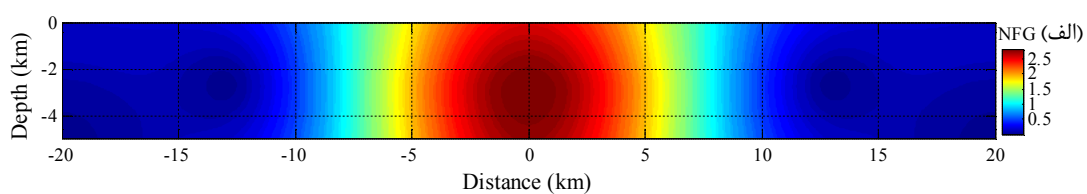


شکل ۳-۷: بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی استوانه‌ای افقی مغناطیسی.

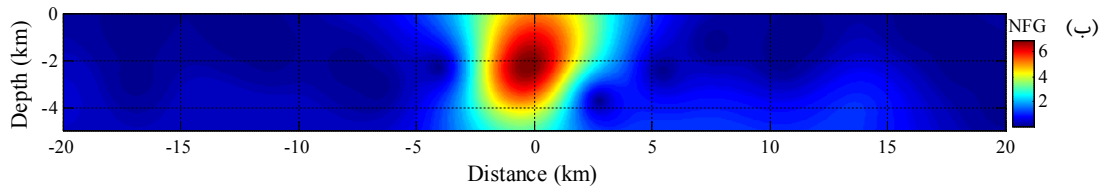
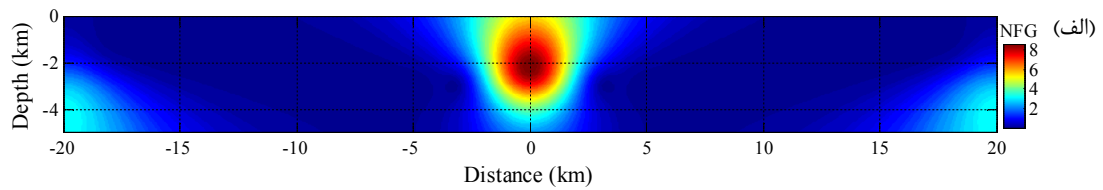
نمودار تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک با رنگ قرمز در شکل (۳-۸) ارائه شده است. تعداد هارمونیک‌های بهینه با استفاده از بیشینه این منحنی در حالت بدون نوفه ۴۹ (شکل ۳-۸-الف) و در حالت دارای نوفه ۳۶ (شکل ۳-۸-ب) انتخاب شد. مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای $N=36$ و $N=49$ در شکل (۳-۱۰) ارائه شده و عمق منبع به ترتیب ۲/۱۵ (شکل ۳-۱۰-الف) و ۲/۲۵ (شکل ۳-۱۰-ب) کیلومتر تخمین زده شده است. با مقایسه این دو روش به وضوح می‌توان دید که روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته در تعیین تعداد هارمونیک‌های بهینه برای تخمین عمق دقت بالاتری دارد.



شکل ۳-۸: E_r ، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال و تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۳-۷)؛ (الف) بدون نوفه؛ (ب) حاوی ۵ درصد نوفه.



شکل ۳-۹: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی استوانه افقی مغناطیسی؛ (الف) بدون نوفه؛ (ب) حاوی ۵ درصد نوفه؛ تعداد جملات هارمونیک به ترتیب ۱۲ و ۱۴ می‌باشد.



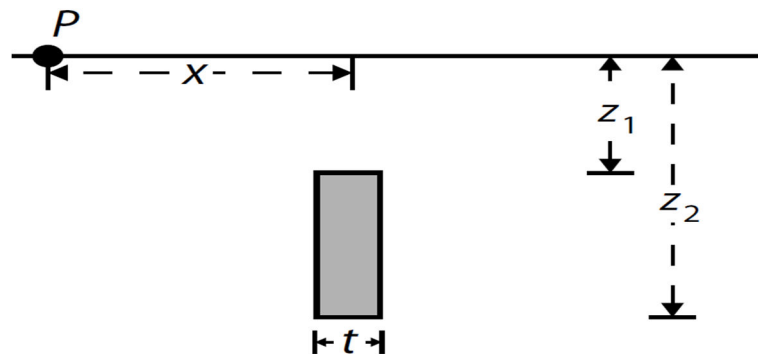
شکل ۳-۱۰: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی استوانه افقی مغناطیسی؛ (الف) بدون نوفه؛ (ب) حاوی ۵ درصد نوفه؛ تعداد جملات هارمونیک به ترتیب ۴۹ و ۳۶ می‌باشد.

۳-۲-۳ مدل مصنوعی دایک قائم مغناطیسی

مقدار شدت میدان قائم ناشی از دایک قائم که به‌طور قائم در میدان مغناطیسی زمین در نیمکره شمالی پلاریزه شده باشد (شکل ۳-۱۱) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$H_z = 2It \left[\frac{z_1}{z_1^2 + x^2} - \frac{z_2}{z_2^2 + x^2} \right] \quad (3-3)$$

که در آن؛ I شدت مغناطیسی شدن جسم مزبور، x فاصله افقی هر نقطه مشاهده‌ای از مرکز دایک، t ضخامت دایک، z_1 عمق سطح فوقانی دایک و z_2 عمق سطح تحتانی دایک است. مقدار بی‌هنجاری مغناطیسی وقتی که مقدار $x=0$ شود، بیشینه خواهد بود.



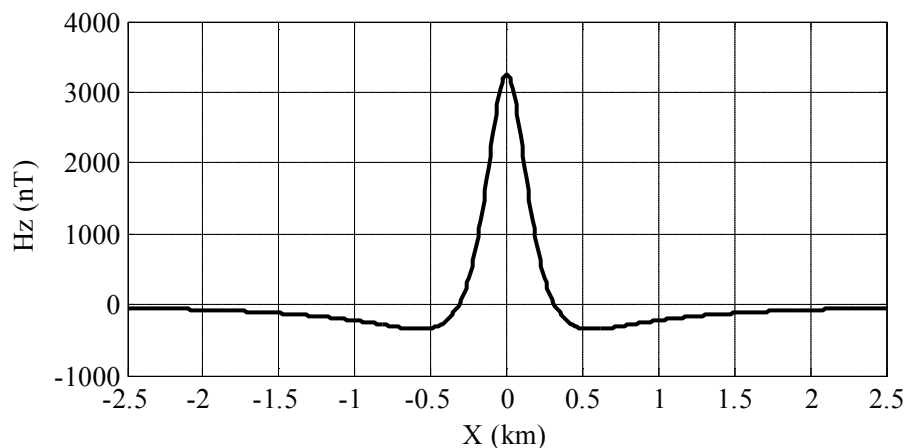
شکل ۳-۱۱: نمای دو بعدی از دایک قائم.

دایک قائمی با ضخامت ۰/۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است که عمق آن از ۰/۲ تا ۰/۵ کیلومتری ادامه دارد. درصد حجمی مگنتیت موجود در این دایک ۱۲ درصد و خودپذیری مغناطیسی

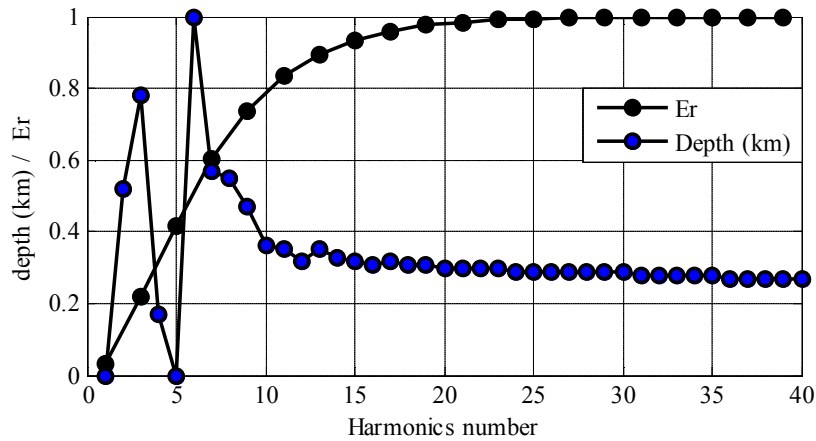
آن ۰/۵ در سیستم cgs است. پروفیل برداشت شده به طول ۵ کیلومتر و فاصله نمونه برداری ۱۰ متر است. در صورتی که مؤلفه قائم شدت میدان مغناطیسی زمین ۰/۶ اورستد باشد اثر بی‌هنجاری حاصل از این دایک محاسبه گردید (شکل ۳-۱۲). مقادیر حاصل از این پروفیل با استفاده از کد گرادیان کل نرمال بهبودیافته برای تخمین عمق استفاده قرار گرفت. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبودیافته از سطح زمین تا عمق ۱ کیلومتر در ۱۰۱ لایه با فواصل یکسان ۰/۰۱ کیلومتری محاسبه شده است.

برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r و عمق بیشینه گرادیان‌های کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونی رسم گردید (شکل ۳-۱۳). به‌وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی این دو منحنی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته، $N=12$ به عنوان تعداد هارمونیک‌های بهینه برای این مدل تعیین شد.

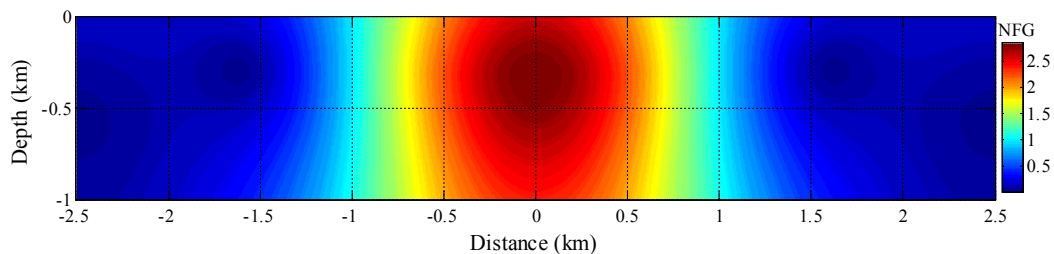
مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای $N=12$ در شکل (۳-۱۴) ارائه شده و با استفاده از مقدار بیشینه در این مقطع، عمق منبع ۳۲۰ متر برآورد شده است.



شکل ۳-۱۲: بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی دایک قائم مغناطیسی.

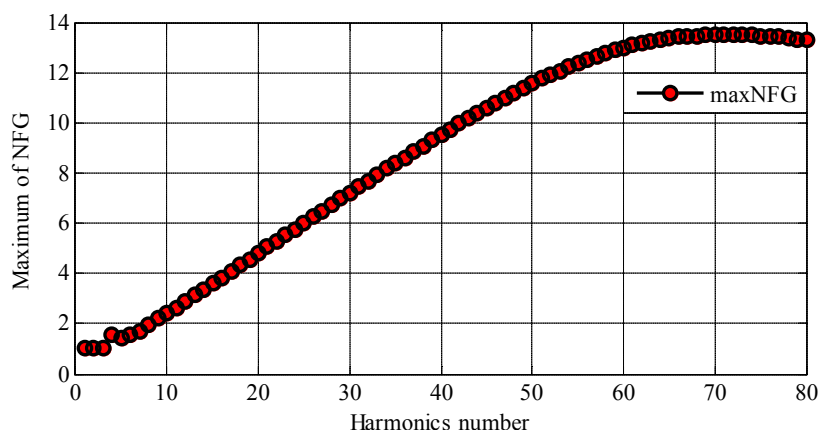


شکل ۳-۱۳: E_r ، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۳-۱۲).

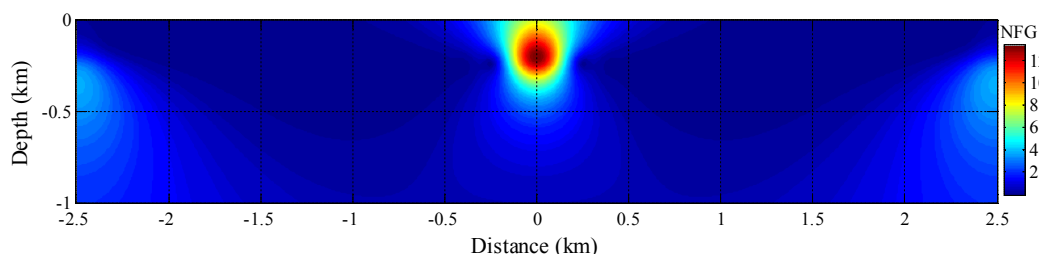


شکل ۳-۱۴: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی دایک قائم، تعداد جملات هارمونیک ۱۲ می‌باشد.

نمودار تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، برای تعیین آن مقادیر براساس روش بیشینه نسبی، رسم شد (شکل ۳-۱۵). تعداد هارمونیک‌های بهینه با استفاده از بیشینه این منحنی عدد ۷۱ انتخاب شد. مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای $N=71$ در شکل (۳-۱۶) ارائه شده و عمق منبع ۲۰۰ متر تخمین زده شده است. با مقایسه این دو روش مشاهده می‌شود که با استفاده از روش گرادیان کل نرمال عمق سطح فوقانی دایک تخمین زده شده است و با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته حدوداً عمق مرکزی دایک تخمین زده شده است. با توجه به اینکه تعداد هارمونیک‌ها در روش گرادیان کل نرمال خیلی بالاست سرعت انجام محاسبات در روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته بیشتر است.



شکل ۳-۱۵: تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۳-۱۲).

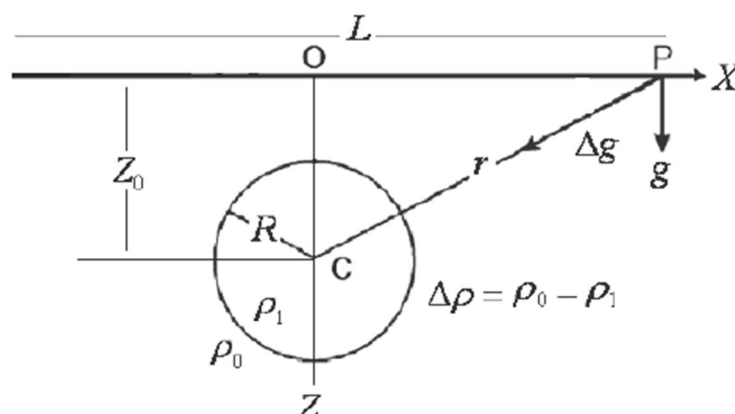


شکل ۳-۱۶: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی دایک قائم، تعداد جملات هارمونیک ۷۱ می‌باشد.

۳-۲-۴ تهیه مدل مصنوعی مرکب از سه جسم کروی

برای طراحی چنین مدلی از سه جسم کروی با شعاع و عمق‌های یکسان نظیر شکل (۳-۱۷) استفاده شده است که در آن مقادیر عمق مرکزی جسم، شعاع، طول پروفیل و اختلاف چگالی این اجسام با محیط اطراف مشخص شده است (جدول ۳-۱). برای محاسبه مقدار اثر گرانی محلی ناشی از وجود این اجسام بر روی پروفیلی که از روی سه جسم عبور نماید، مقادیر پارامترها طبق جدول وارد کد شد و اثر گرانی آن محاسبه گردید (شکل ۳-۱۸).

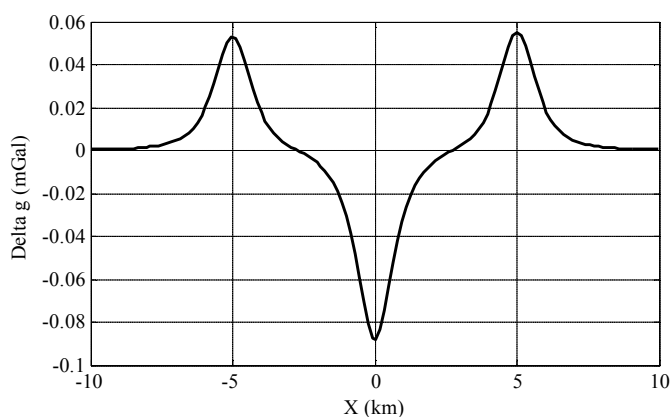
پروفیل برداشت شده به طول ۲۰ کیلومتر و فاصله نمونه‌برداری ۰/۱۵ کیلومتر است. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبودیافته روی اثر گرانی محلی حاصل از اجسام کروی روی پروفیل مورد نظر محاسبه و برای تخمین عمق مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبودیافته از سطح زمین تا عمق ۲ کیلومتر در ۴۱ لایه با فواصل یکسان ۰/۰۵ کیلومتری محاسبه شده است.



شکل ۳-۱۷: نمای دو بعدی از کره مدفون.

جدول ۳-۱: مشخصات مدل مصنوعی مرکب از سه جسم کروی.

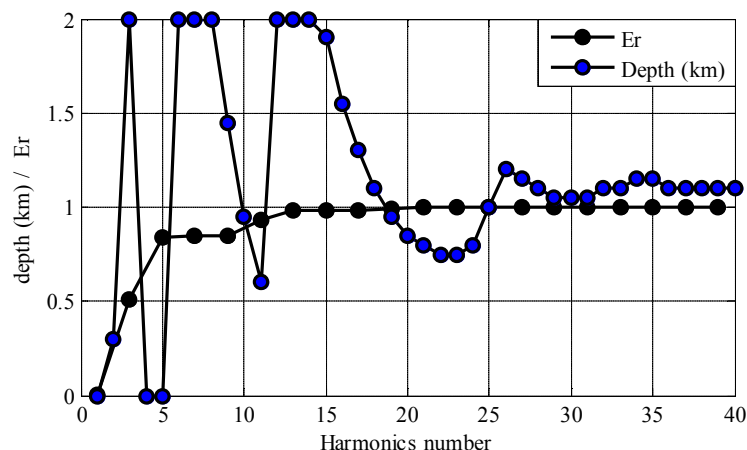
کره ۳	کره ۲	کره ۱	توده‌های بی‌هنجار
۰	-۵	۵	x نقطه‌ی میانی
۰	۰	۰	y نقطه‌ی میانی
۱	۱	۱	عمق مرکز (کیلومتر)
۰/۲	۰/۲	۰/۲	شعاع (کیلومتر)
-۰/۴	+۰/۲۴	+۰/۲۵	چگالی (گرم بر سانتیمترمکعب)



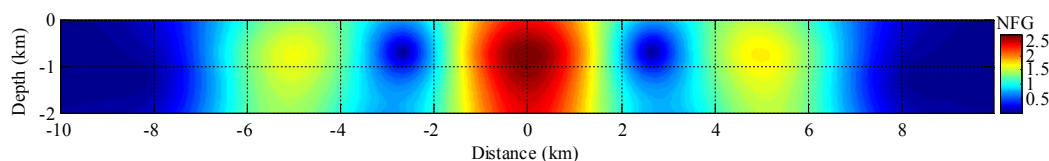
شکل ۳-۱۸: اثر بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل مصنوعی مرکب از سه جسم کروی.

برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r و عمق مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک هارمونیک ترسیم شد (شکل ۳-۱۹). به‌وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی این دو منحنی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته، $N=22$ به عنوان تعداد هارمونیک‌های بهینه برای این مدل تعیین شد. مقطع دو بعدی گرادیان کل

نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای $N=22$ در شکل (۳-۲۰) ارائه شده و عمق کره‌های شماره یک و دو ۰/۷۴ کیلومتر و عمق کره شماره سه ۰/۸ کیلومتر تخمین زده شده است.



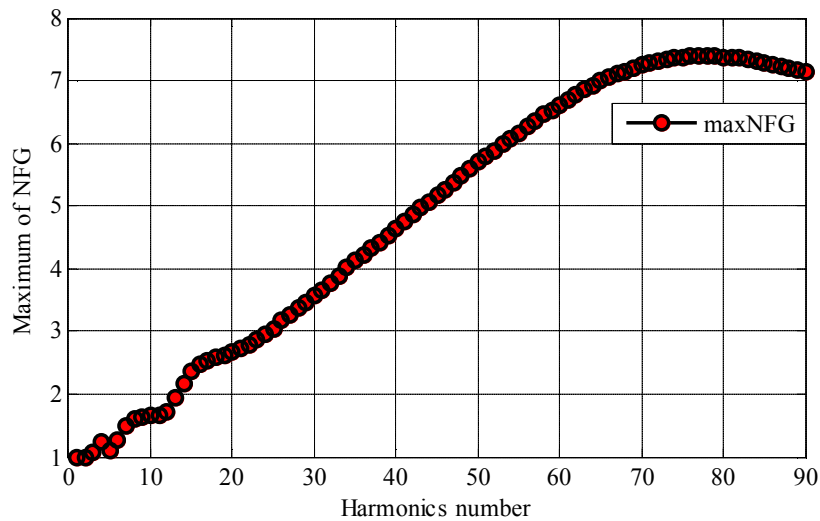
شکل ۳-۱۹: E_r و عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۳-۱۸).



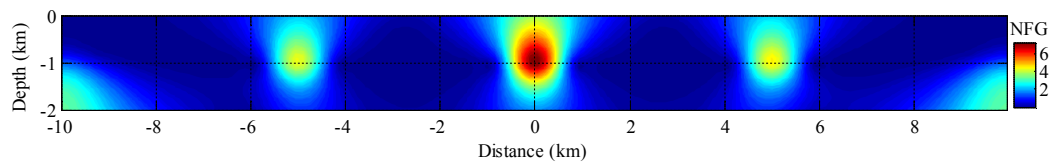
شکل ۳-۲۰: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل مصنوعی مرکب از سه جسم کروی، تعداد جملات هارمونیک ۲۲ می‌باشد.

منحنی تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان‌های کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک ترسیم شد (شکل ۳-۲۱). تعداد هارمونیک‌های بهینه با استفاده از بیشینه این منحنی عدد ۷۷ انتخاب شد. مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای $N=77$ در شکل (۳-۲۲) نشان داده شده و عمق هر سه کره ۰/۹۵ کیلومتر تخمین زده شده است.

با مقایسه این دو روش مشاهده می‌شود که تعداد جملات هارمونیک در روش گرادیان کل نرمال خیلی بیشتر از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته است و این باعث افزایش حجم محاسبات می‌شود. اما روش گرادیان کل نرمال در تخمین عمق مدلی که دارای چندین توده بی‌هنجار است دقت بالاتری نشان می‌دهد و درصد خطای کمتر در برآورد عمق دارد.



شکل ۳-۲۱: تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۳-۱۸).



شکل ۳-۲۲: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل مصنوعی مرکب از سه جسم کروی، تعداد جملات هارمونیک ۷۷ می‌باشد.

با انجام مدل‌های مصنوعی و اعمال روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته روی اثر مغناطیسی و گرانی این مدل‌ها، به‌نظر می‌رسد که روش مذکور در مواردی خیلی نتواند دقت بالایی را در تجزیه و تحلیل و تخمین عمق ارائه نماید، در ادامه در فصل بعد اعمال این روش روی چندین داده واقعی بررسی خواهد شد.

فصل چهارم: اعمال روش ENFG روی

داده‌های واقعی

۴-۱ مقدمه

جهت تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌های میدان پتانسیل به روش ENFG، چندین داده واقعی در مناطق مختلف استفاده شد. اعمال این روش روی این داده‌ها تا حدود زیادی از وضعیت عمقی بی‌هنجاری‌ها اطلاعات مفیدی ارائه داده است. بنابراین برای هر منطقه ابتدا به معرفی موقعیت جغرافیایی و بررسی زمین‌شناسی پرداخته شده است. سپس داده‌های برداشت شده از هر منطقه پردازش و نقشه باقی‌مانده به صورت کنٹوری رسم شده است که در جهت عمود بر بی‌هنجاری پروفیل تهیه شده است. در نهایت روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته روی پروفیل‌ها اعمال گردیده است و تخمین عمق حاصل از این روش با روش گرادیان کل نرمال مقایسه شده است.

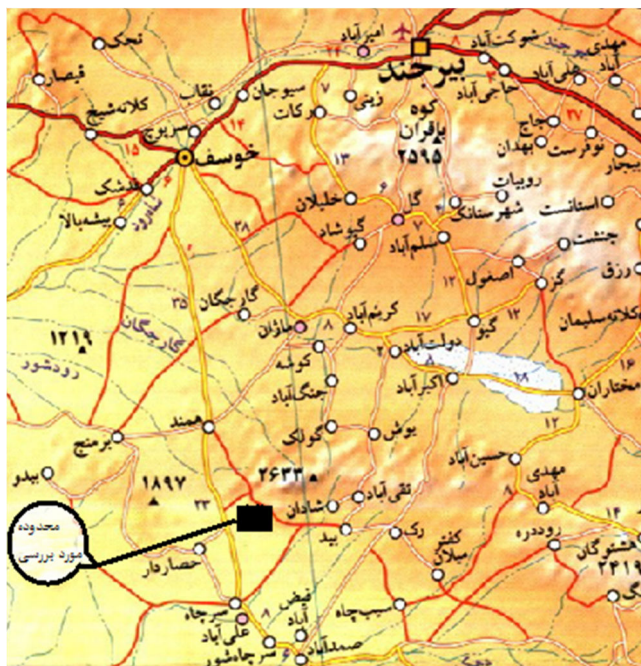
۴-۲ منطقه معدنی سنگ مس شادان

۴-۲-۱ موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه شادان

جهت دسترسی به محدوده مورد نظر در شهرستان خوسف، می‌توان مسیر جاده ماژان - همند - سرچاه شور به طول ۷۵ کیلومتر را طی کرده و از پاسگاه سرچاه شور از طریق جاده خاکی اختصاصی پس از طی ۱۵ کیلومتر به سمت شمال شرق، به محدوده مورد مطالعه رسید. دسترسی به بخش‌های مختلف داخل محدوده، از طریق راه‌های احداثی ممکن است (شکل ۴-۱). مساحت محدوده اکتشافی ۳۰۰ هکتار می‌باشد. مختصات چهارگوش محدوده مورد بررسی در جدول (۴-۱) ارائه شده است.

جدول ۴-۱: مختصات چهارگوش منطقه شادان.

رئوس محدوده	X	Y
A	۶۸۴۲۱۲/۴	۳۵۸۲۴۰۵/۵
B	۶۸۴۹۱۴	۳۵۸۳۳۶۹/۷
C	۶۸۶۹۴۸/۶	۳۵۸۱۸۸۹/۱
D	۶۸۶۲۴۶/۹	۳۵۸۰۹۲۴/۹



شکل ۴-۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه شادان (قسمتی از نقشه ۱,۰۰۰,۰۰۰ عمومی جمهوری اسلامی ایران).

محدوده مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی، بخشی از کمربند افیولیتی خاور ایران محسوب می‌شود که گاه از آن با عنوان کمربند فلیش و آمیزه شرق ایران یاد می‌شود، بنابراین از اختصاصات عمومی و کلی این زون تبعیت می‌نماید. واحدهای زمین‌شناسی منطقه روندی شمال غرب- جنوب شرق دارند.

براساس اطلاعات زمین‌شناسی موجود از منطقه سرچاه شور، در محدوده مورد مطالعه بخشی از واحدهای تراکی آندزیت، توف، توف برش و توده‌های جوان (گرانیت) رخنمون دارند. رخنمون‌های موجود در محدوده اکتشافی عمدتاً شامل سنگ‌های نفوذی با سن ائوسن- الیگوسن و ترکیب شیمیایی متفاوت و همچنین رخنمون‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی می‌باشند. سنگ‌های آتشفشانی به ائوسن تعلق دارند و توده‌های نفوذی مربوط به بعد از ائوسن (ائوسن- الیگوسن) آن‌ها را قطع کرده‌اند (شکل ۴-۲).

واحد آندزیتی بخش عمده‌ای از رخنمون‌های سنگی موجود در محدوده شادان را به خود اختصاص داده است. عموماً گسترش این واحد در بخش‌های غربی و مرکزی محدوده شادان دیده می‌شود. در اثر

مجاورت با توده‌های نفوذی از جمله توده شادان پورفیری، این سنگ‌ها هورنفلسی شده‌اند و زمینه آن‌ها تبلور یافته است. رخنمون‌های این واحد در برگیرنده بخشی از کانی‌زایی پورفیری در محدوده شادان هستند که به صورت پراکنده در داخل سیستم استوک‌ورکی در داخل سنگ‌های آندزیتی توسعه یافته‌اند. انواع رگچه‌های کوارتز-مگنتیت، کوارتز-بیوتیت-کانی‌های اپاک، کوارتز-سریسیت، کوارتز-تورمالین-کانی‌های اپاک و کوارتز-آمفیبول-کانی‌های اپاک در این واحد توسعه یافته‌اند (حسین‌زاده، ۱۳۹۶).

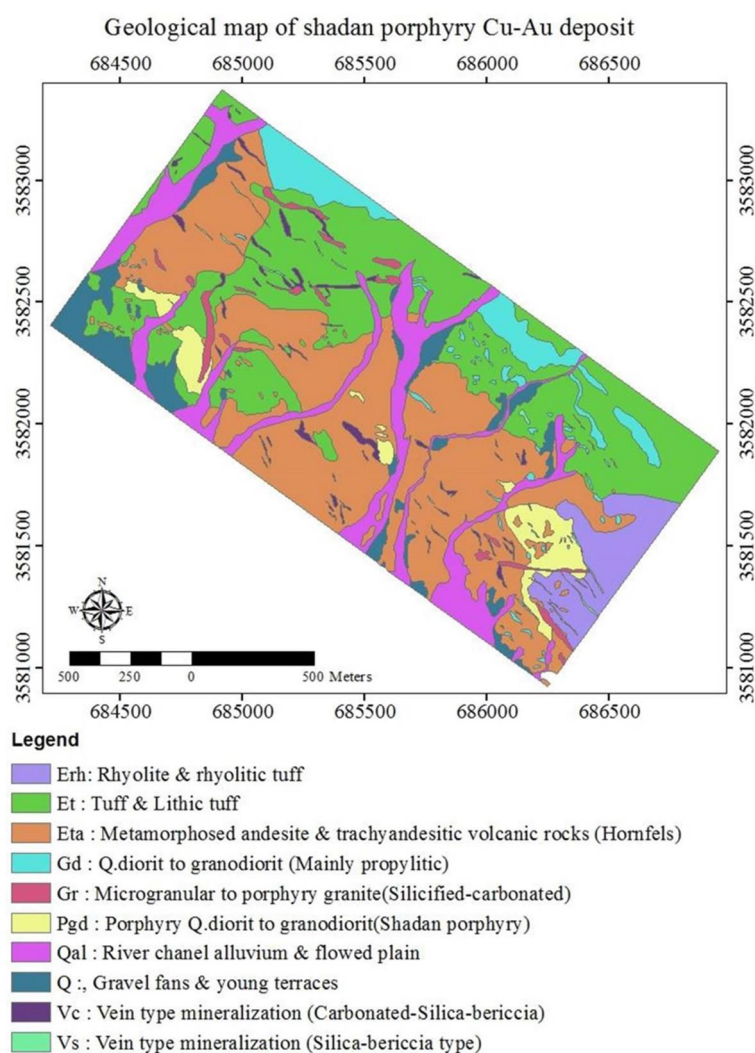
واحد توفی گسترش زیادی در بخش‌های شرقی محدوده دارد و رخنمون‌های این واحد بخش‌های مرتفع غربی محدوده را تشکیل می‌دهند. در بخش‌های جنوبی و جنوب شرق محدوده ریولیت و توف ریولیتی رخنمون دارد. واحد ریولیتی عمدتاً به صورت گدازه دیده می‌شود ولی در بخش‌هایی با ساخت توفی نیز دیده می‌شود. این واحد در بخش‌های حاشیه‌ای توده شادان پورفیری، دربرگیرنده استوک‌ورک‌های سیلیسی می‌باشد که به سمت توده، میزان گسترش استوک‌ورک‌های سیلیسی زیاد است (حسین‌زاده، ۱۳۹۶).

توده شادان پورفیری در بخش‌های شرقی محدوده با روند شمال غربی-جنوب شرقی و در سه منطقه مجزا دیده می‌شود. از لحاظ رخنمون‌های توده شادان پورفیری می‌توان آن‌ها را به انواع جنوب شرقی، مرکزی و شمال غربی تقسیم نمود که در هر منطقه چندین رخنمون مجزا از توده شادان پورفیری دیده می‌شود. توده شادان پورفیری عامل کانی‌زایی مس-مولیبدن پورفیری در منطقه می‌باشد. در رخنمون‌های مربوط به این توده کانی‌زایی مس و استوک‌ورک‌های سیلیسی کانه‌دار شایع می‌باشد (حسین‌زاده، ۱۳۹۶).

توده گرانیته به صورت دایک و استوک در بخش‌های مختلف محدوده شادان رخنمون دارد این توده فاقد کانی‌زایی است و عموماً بعد از کانی‌زایی پورفیری تشکیل شده است. جوان‌ترین واحد سنگی و توده نفوذی منطقه مورد مطالعه توده گرانودیوریتی می‌باشد که در بخش‌های شرقی و جنوبی دیده

می‌شود. این توده با وجودی که به صورت ناحیه‌ای آلتراسیون پروپیلیتی را تحمل کرده است اما دارای کانی‌زایی نیست (حسین‌زاده، ۱۳۹۶).

نهشته‌های کواترنری در بخش‌های غربی و جنوب غربی محدوده و در امتداد آبراهه‌های اصلی توسعه یافته‌اند. این نهشته‌ها در دامنه ارتفاعات و در دشت می‌توانند پتانسیل مناسبی از طلای پلاسری داشته باشند چرا که در ارتفاعات بالادست یکی از کانی‌زایی‌های رخ داده طلای اپی‌ترمال می‌باشد (حسین‌زاده، ۱۳۹۶).



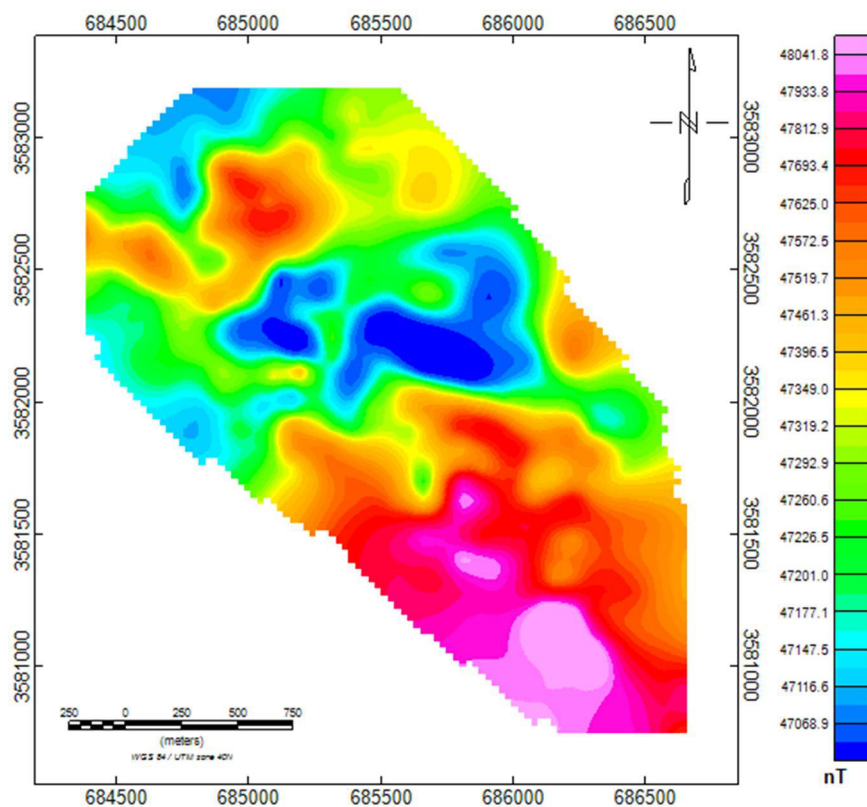
شکل ۴-۲: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده مطالعاتی (اقتباس از حسین‌زاده، ۱۳۹۶).

در محدوده اکتشافی سه سیستم شکستگی دیده می‌شود که روندهای شمال غربی - جنوب شرقی، شرقی - غربی و شمال شرقی - جنوب غربی دارند. سیستم شکستگی شمال غربی - جنوب شرقی اصلی بوده و سیستم‌های دیگر به تبع آن تشکیل شده است. این سیستم در کنترل جایگزینی توده‌های نفوذی، تشکیل کانی‌زایی اپی‌ترمال و پورفیری و همچنین ایجاد ساختارهای تکتونیکی نقش اصلی داشته است. همچنین این سیستم گسل خوردگی در جایگزینی توده‌های سه‌گانه شادان پورفیری، گرانیتی و گرانودیوریتی نقش اصلی داشته است (حسین‌زاده، ۱۳۹۶).

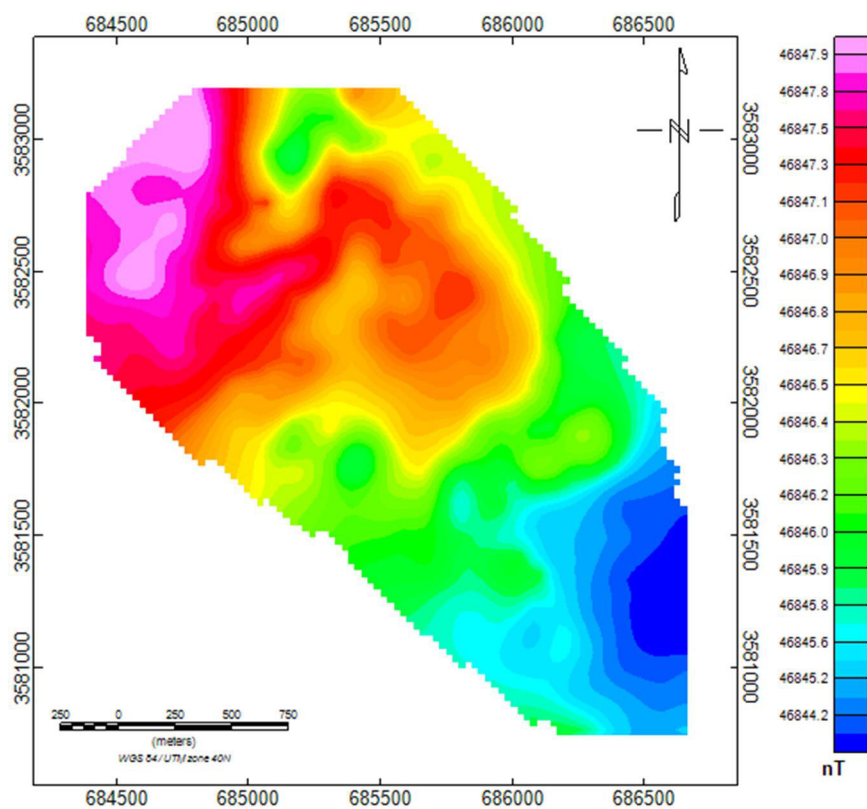
۴-۲-۲ پردازش داده‌های برداشت شده از منطقه شادان

با توجه به اینکه یکی از عناصر همراه مس، آهن می‌باشد و همچنین رخنمون‌های آهن به‌صورت گوسان در منطقه مورد مطالعه مشاهده شده به همین دلیل یکی از روش‌های ژئوفیزیکی مناسب در مطالعه اندیس معدنی مس شادان، روش مغناطیس‌سنجی انتخاب شد. داده‌های مغناطیسی از کانسار مس - طلای شادان در یک شبکه برداشت منظم برداشت شده است. در این برداشت فواصل خطوط برداشت و فواصل نقاط برداشت ۷۰ متر بوده است.

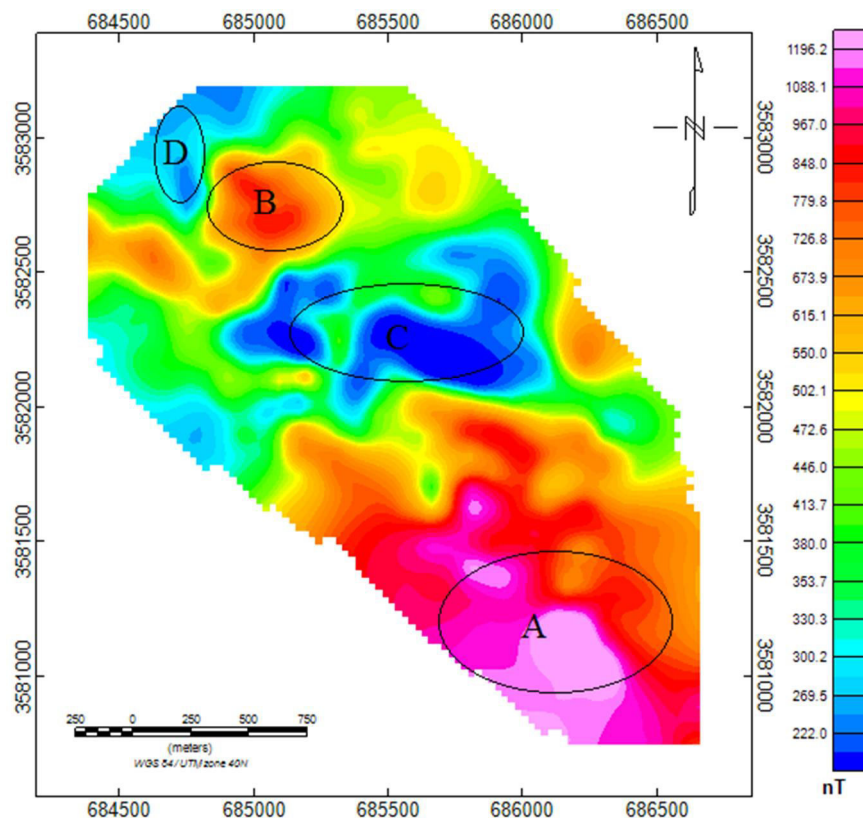
ابتدا تصحیح روزانه داده‌ها انجام شده و سپس پردازش‌های لازم بر روی داده‌ها به‌وسیله نرم‌افزار Oasis montaj اعمال شده است. نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه شادان بعد از اعمال تصحیح روزانه در شکل (۴-۳) ارائه شده است. نقشه اثر IGRF در منطقه مورد مطالعه در شکل (۴-۴) و نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه شادان پس از حذف اثر IGRF در شکل (۴-۵) ارائه شده است. با توجه به شکل (۴-۵) منطقه دارای یک بیشینه در جنوب شرق (بی‌هنجاری A) و بیشینه دیگری در شمال غرب (بی‌هنجاری B) محدوده است که منطبق بر واحدهای سنگی آذرین هستند. در قسمت مرکزی محدوده کمینه‌ای مشاهده می‌شود (بی‌هنجاری C) که منطبق بر واحدهای سنگی رسوبی یا آذرینی هستند که تحت تاثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند و دگرسان شده‌اند. در قسمت شمال غربی محدوده کمینه‌ای وجود دارد (بی‌هنجاری D) که به دلیل قرار گرفتن در بخش حاشیه‌ای خیلی قابل اعتماد نیست، اما در ظاهر به نظر می‌رسد روند کاهشی دارند.



شکل ۳-۴: نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه شادان بعد از اعمال تصحیح روزانه.



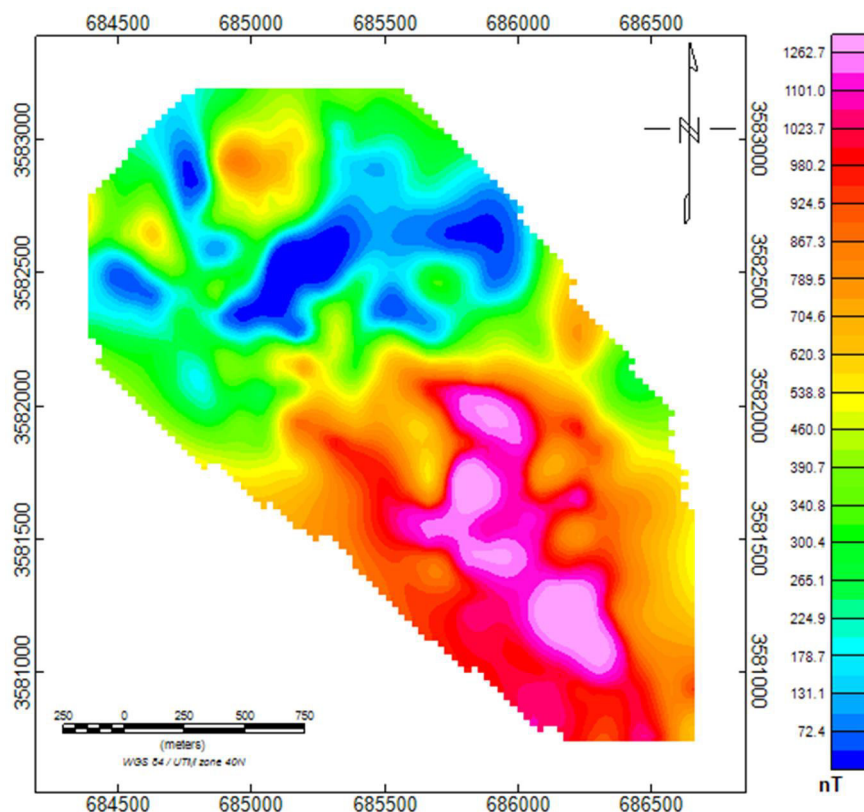
شکل ۴-۴: نقشه اثر IGRF در منطقه شادان.



شکل ۴-۵: نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه شادان پس از حذف اثر IGRF.

الف: اعمال فیلتر برگردان به قطب

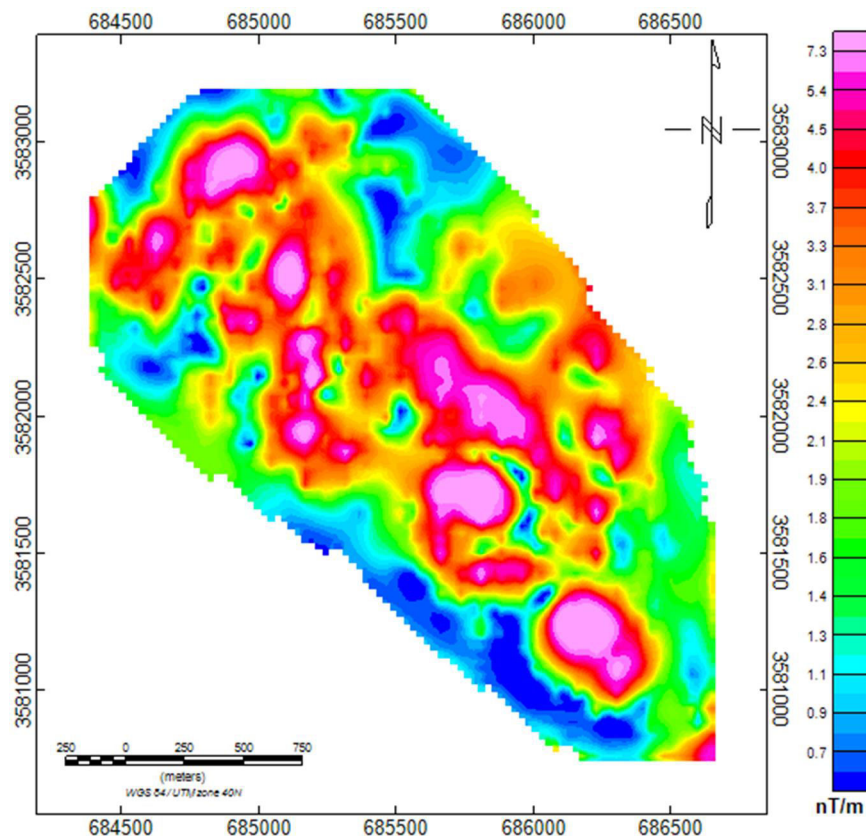
فیلتر برگردان به قطب، میدان مغناطیسی را از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان مغناطیسی زمین مایل و شیب‌دار است به قطب مغناطیسی یعنی جایی که میدان مغناطیسی قائم می‌باشد منتقل می‌کند. در نتیجه اعمال این فیلتر، شکل نامتقارن بی‌هنجاری مغناطیسی نسبت به منبع به وجود آورنده آن متقارن شده، باعث جانمایی درست بی‌هنجاری بر روی توده و همین‌طور تعیین وضعیت شیب توده می‌شود. نقشه حاصل از اعمال فیلتر برگردان به قطب روی نقشه میدان کل مغناطیسی پس از حذف اثر IGRF در شکل (۴-۶) آورده شده است. با توجه به نقشه (۴-۶) بیشینه‌ها و کمینه‌ای که در نقشه (۴-۵) مشاهده شد مقداری به سمت شمال جابه‌جا شده‌اند و براساس شکل نامتقارن بیشینه‌ی موجود در قسمت جنوب شرق که تا مرکز محدوده ادامه دارد و کمینه‌ی موجود در قسمت میانی محدوده، ساختارهایی که این بی‌هنجاری‌ها را ایجاد کرده‌اند دارای شیب به سمت شمال هستند.



شکل ۴-۶: نقشه میدان مغناطیسی شادان پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب.

ب: اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی

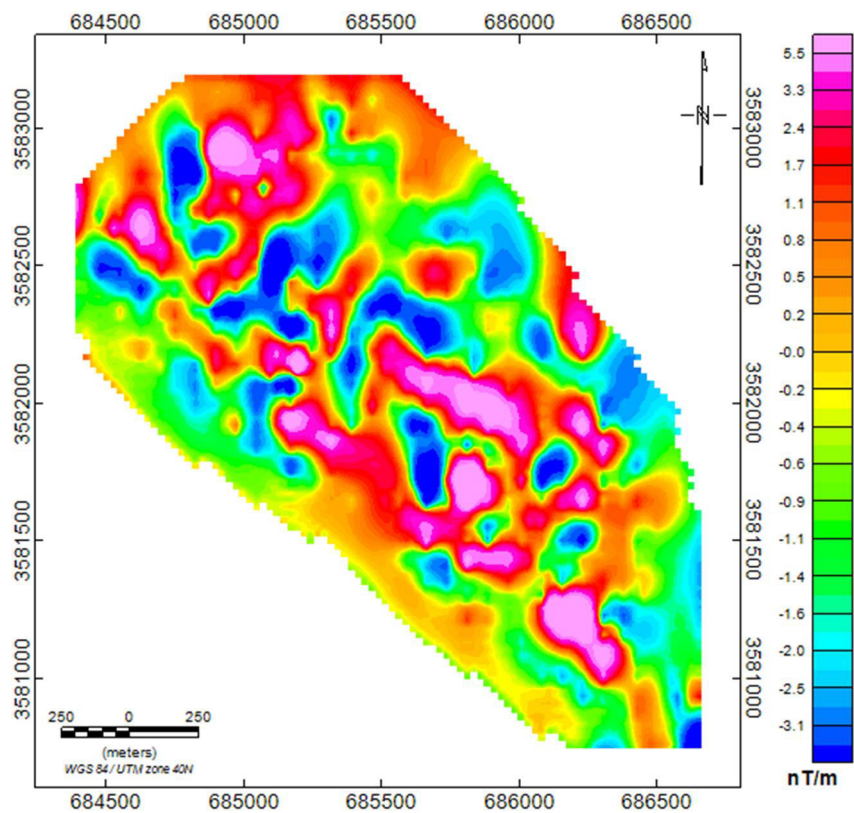
این فیلتر کاملاً مستقل از جهت مغناطیده شدن سنگ‌ها و جهت میدان مغناطیس زمین می‌باشد در نتیجه تمام اجسام با هندسه یکسان سیگنال تحلیلی یکسانی دارند. معمولاً پیک این فیلتر مستقیماً بالای لبه اجسام پهن و بالای مرکز اجسام باریک قرار می‌گیرد، در نتیجه با این فیلتر می‌توان تا حدود زیادی به هندسه توده‌های مغناطیسی پی برد. این فیلتر بر روی نقشه میدان مغناطیسی برگردان به قطب اعمال شده است و نقشه سیگنال تحلیلی در شکل (۴-۷) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه در این نقشه در قسمت‌های شمال غرب، جنوب شرق و مرکز دیده می‌شود. با مقایسه این نقشه با نقشه برگردان به قطب به نظر می‌رسد توده‌ای که در مرکز قرار دارد و دارای امتداد شمال غرب- جنوب شرق است پیوسته است.



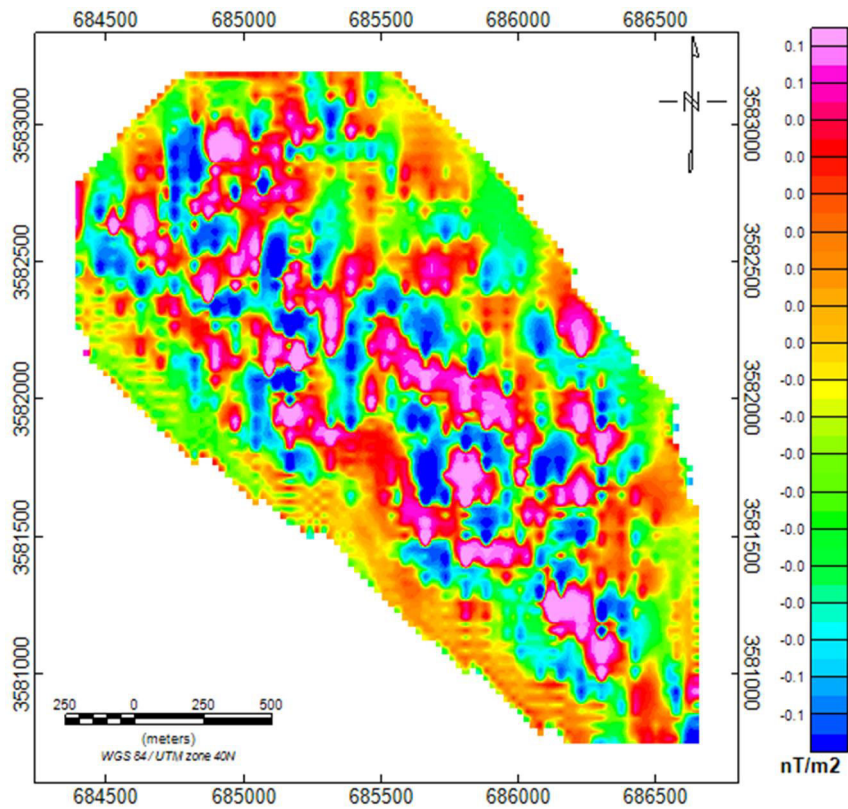
شکل ۴-۷: نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های منطقه شادان.

ج: اعمال فیلتر مشتق قائم

فیلتر مشتق قائم یکی از مهم‌ترین ابزارها در تعیین لبه‌های بی‌هنجاری و مرز زون‌های زمین‌شناسی است. این فیلتر نیز بر روی نقشه میدان مغناطیسی برگردان به قطب اعمال شده و نقشه‌های مشتق قائم مرتبه ۱ و ۲ در شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) ارائه شده است. همان‌طور که در نقشه مشتق قائم مرتبه اول (شکل ۴-۸) دیده می‌شود بی‌هنجاری‌ها سطحی و نوفه کم است و محدوده‌ی بی‌هنجاری‌ها تا حدودی و مرز آن‌ها به خوبی مشخص شده است، ولی در نقشه مشتق قائم مرتبه دوم (شکل ۴-۹) میزان نوفه و اغتشاش زیاد شده و امکان تفکیک و جدایش بی‌هنجاری‌ها وجود ندارد.



شکل ۴-۸: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه ۱ بر روی داده‌های منطقه شادان.

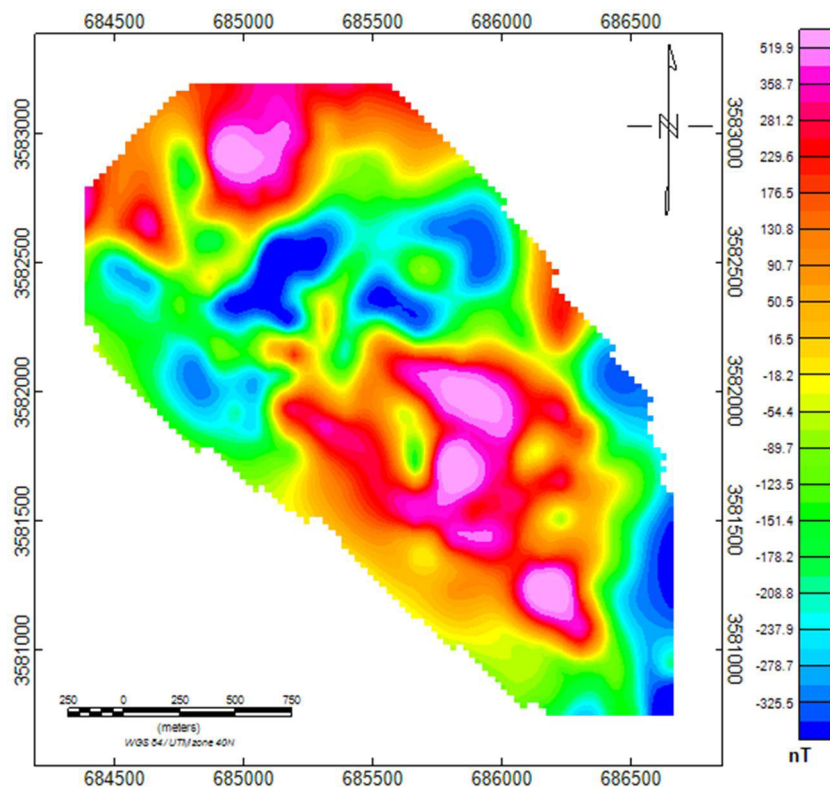


شکل ۴-۹: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه ۲ بر روی داده‌های منطقه شادان.

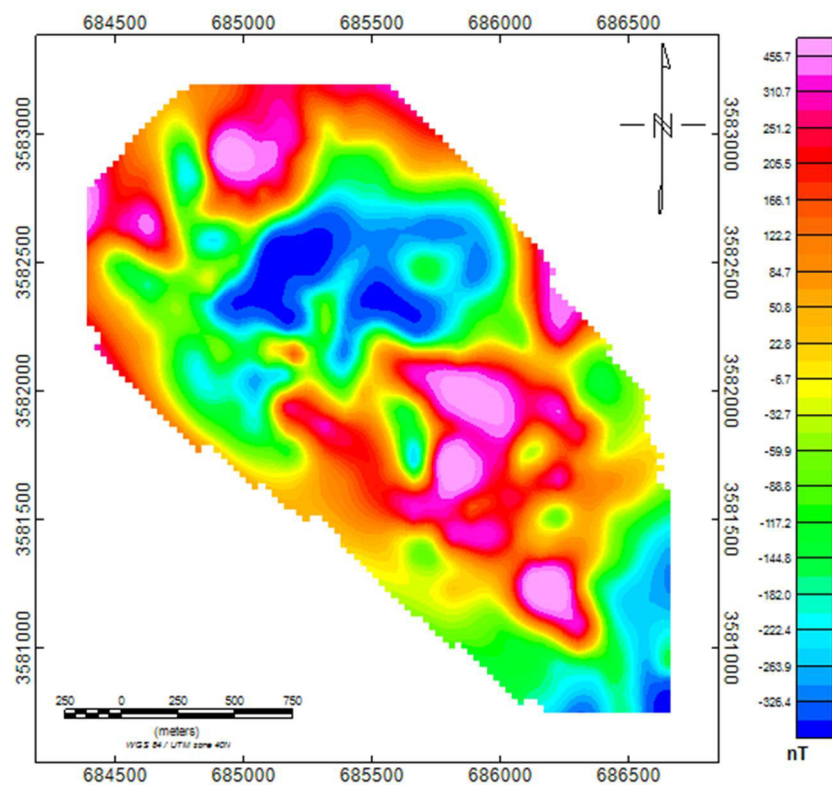
د: اعمال فیلتر روند سطحی

این فیلتر برای به دست آوردن بی‌هنجاری باقی‌مانده استفاده می‌شود. در این روش معادلات چندجمله‌ای با درجات مختلف بر داده‌های برداشت شده گذرانده می‌شود. اساس این فیلتر بر مبنای سطحی استوار است که بهترین تطابق را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده داشته باشد. این سطح به عنوان اثرات ناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شود که بعد از کم کردن این مقادیر از داده‌های مشاهده‌ای، بی‌هنجاری مغناطیسی باقی‌مانده به دست می‌آید. این فیلتر بر روی نقشه میدان مغناطیسی برگردان به قطب اعمال شده و نقشه‌های بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از سطح روندهایی با درجات ۱ تا ۳ در شکل‌های (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) ارائه شده است.

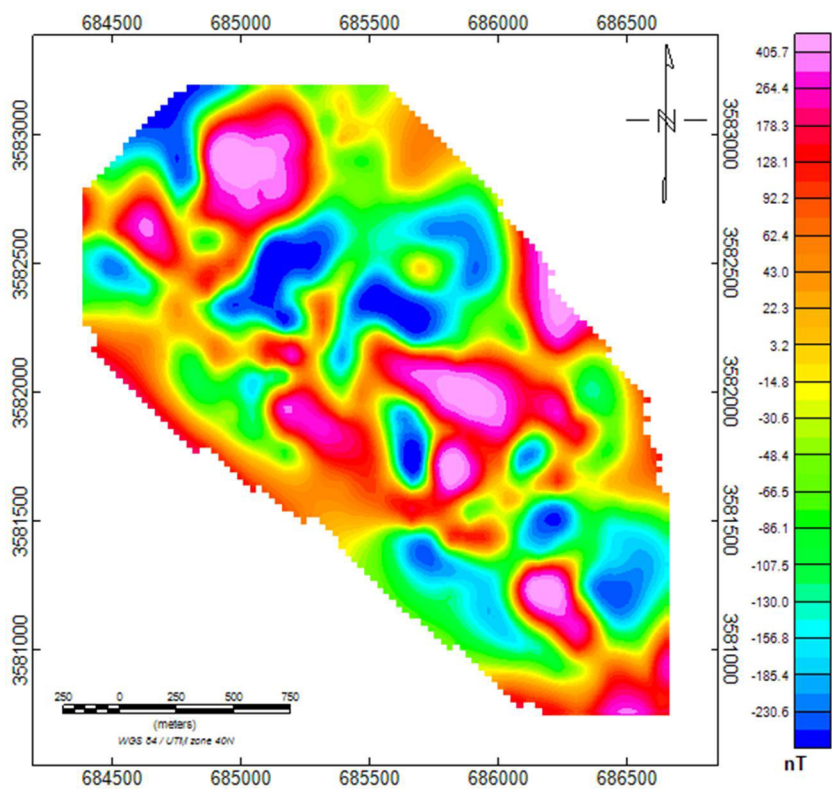
مطابق این نقشه‌ها یک مقدار بیشینه از قسمت مرکزی تا جنوب شرق گسترش دارد که احتمالاً توده اصلی بی‌هنجار در منطقه است و یک مقدار بیشینه در قسمت شمال غرب منطقه وجود دارد که گسترش کمتری دارد. این دو بیشینه مرتبط با توده شادان پورفیری (دیوریت تا گرانودیوریت پورفیری) هستند.



شکل ۴-۱۰: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطحی درجه ۱ بر روی داده‌های منطقه شادان.



شکل ۴-۱۱: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطحی درجه ۲ بر روی داده‌های منطقه شادان.



شکل ۴-۱۲: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطحی درجه ۳ بر روی داده‌های منطقه شادان.

ه: اعمال فیلتر ادامه فراسو

یکی از مراحل مهم در پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس، جداسازی بی‌هنجاری‌های محلی از ناحیه‌ای است. فرایند ادامه فراسو یک تبدیل ریاضی روی داده‌های برداشت شده است که باعث تضعیف بی‌هنجاری‌هایی با طول موج کوتاه می‌شود. به عبارت دیگر، ادامه فراسو اثر بی‌هنجاری‌های سطحی را تضعیف می‌کند. بنابراین می‌توان آن را در حکم ابزاری مناسب برای جداسازی بی‌هنجاری‌های محلی با طول موج کوتاه از ناحیه‌ای با طول موج بلند به کار گرفت. در روش ادامه فراسو، انتخاب ارتفاع بهینه گسترش میدان 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 مقدار بهینه سبب تضعیف مضاعف اثر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای در داده‌ها می‌شود. برای برآورد ارتفاع بهینه ادامه فراسو، می‌توان همبستگی بی‌هنجاری ناحیه‌ای (Δg_r) و نتیجه ادامه فراسو (Δg_u) برای ارتفاع‌های گوناگون را برحسب ارتفاع رسم کرد. عبدالرحمن و همکاران (۱۹۸۹) همبستگی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای (Δg_r) و نتیجه ادامه فراسو (Δg_u) برای ارتفاع معین را به صورت رابطه (۴-۱) بیان کردند.

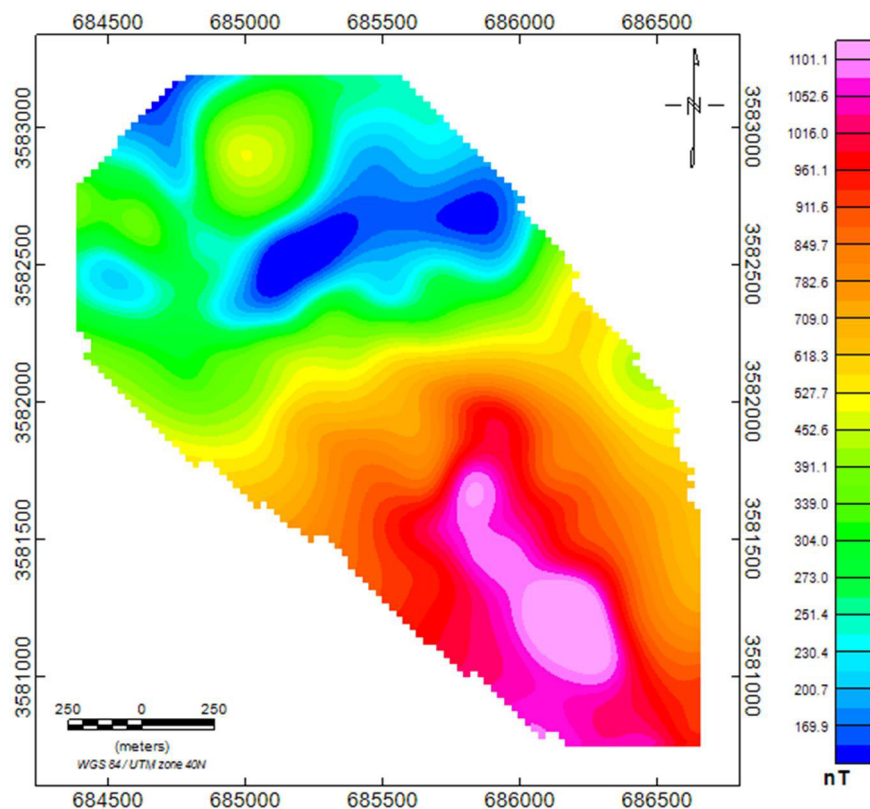
$$r_{\Delta g_r, \Delta g_u} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_r(x_i, y_j) \Delta g_u(x_i, y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_r^2(x_i, y_j) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_u^2(x_i, y_j)}} \quad (۴-۱)$$

که در آن؛ M و N به ترتیب تعداد نمونه‌ها در راستاهای x و y است.

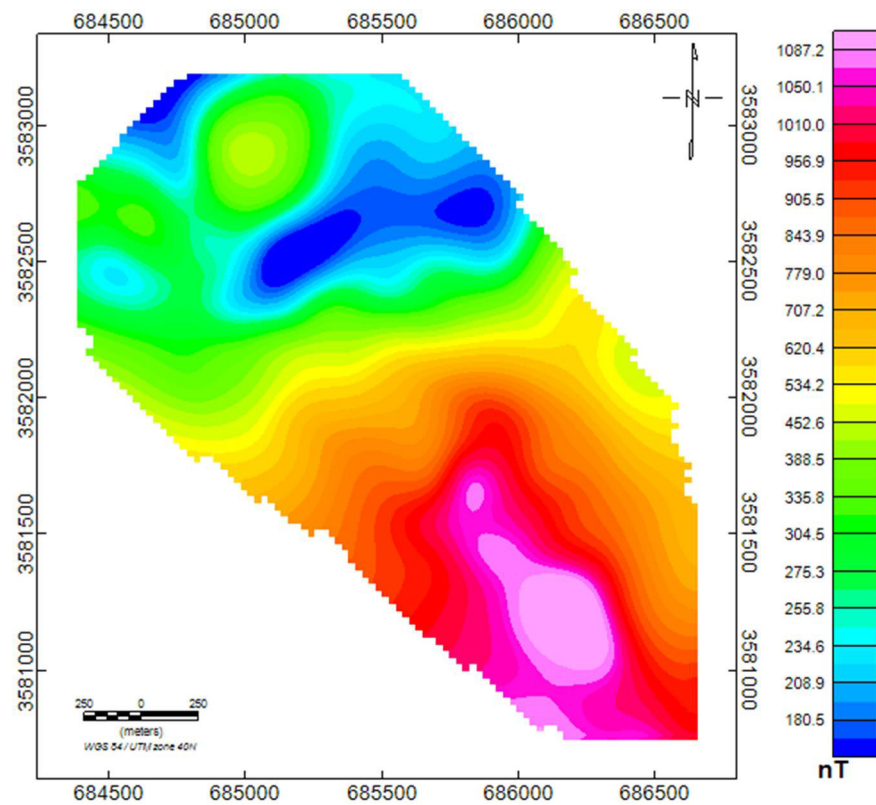
بدیهی است که بیشینه مقدار این همبستگی مربوط به ارتفاعی است که اثرات بی‌هنجاری‌های محلی در نتیجه ادامه فراسو تضعیف شده است. این ارتفاع به مثابه‌ی ارتفاع بهینه برای ادامه فراسو در نظر گرفته می‌شود. معمولاً در عمل، بی‌هنجاری ناحیه‌ای معلوم نیست. در چنین حالتی می‌توان همبستگی را میان دو ادامه فراسو برای دو ارتفاع متوالی محاسبه کرد. اگر این مقادیر برحسب ارتفاع رسم شوند، با افزایش ارتفاع مقدار همبستگی به یک مقدار حدی همگرا می‌شوند. بیشترین انحراف از خط واصل بین نقطه ابتدا و انتها در ارتفاع بهینه اتفاق می‌افتد. در واقع بیشینه انحراف مربوط به

ارتفاعی است که اثرات بی‌هنجاری‌های محلی تضعیف شده و ادامه فراسو در آن ارتفاع بیشتر بیانگر اثرات بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای هستند (روشندل و نجاتی، ۱۳۹۳).

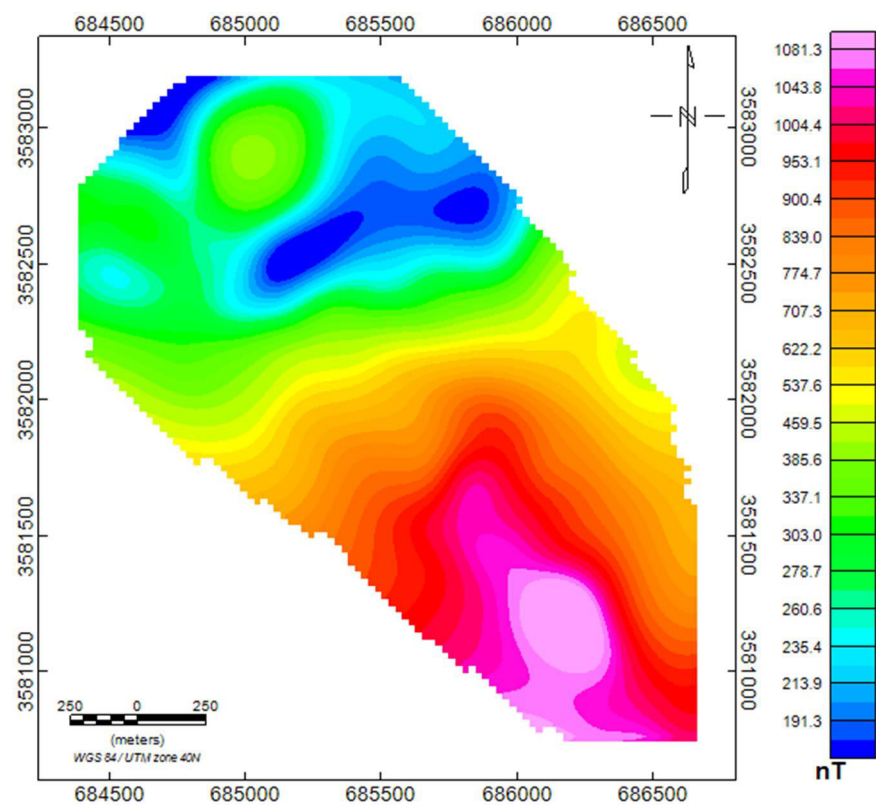
ادامه فراسو روی داده‌های منطقه شادان برای ارتفاع‌های صفر تا ۳۴۰ متر با گام ۲۰ متر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان (شکل ۴-۶) اعمال شده است. تعدادی از نقشه‌های ادامه فراسو در شکل‌های (۴-۱۳) تا (۴-۱۷) ارائه شده است. مطابق این نقشه‌ها بی‌هنجاری ناحیه‌ای در این منطقه در قسمت مرکز تا جنوب محدوده مغناطیس بالایی نشان می‌دهد و در قسمت شمال محدوده دارای مقدار پایینی است. احتمالاً این دو بخش با توجه به روند ظاهری که دیده می‌شود توسط خطواره گسلی یا گسل ژئوفیزیکی از هم جدا شده باشند.



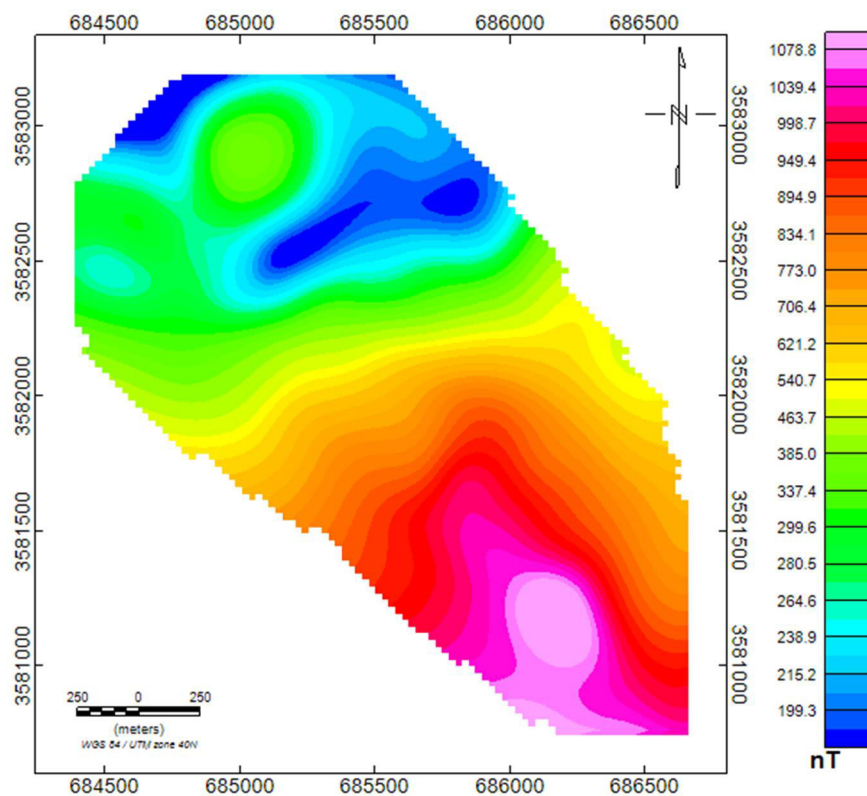
شکل ۴-۱۳: نقشه ادامه فراسو ۸۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان.



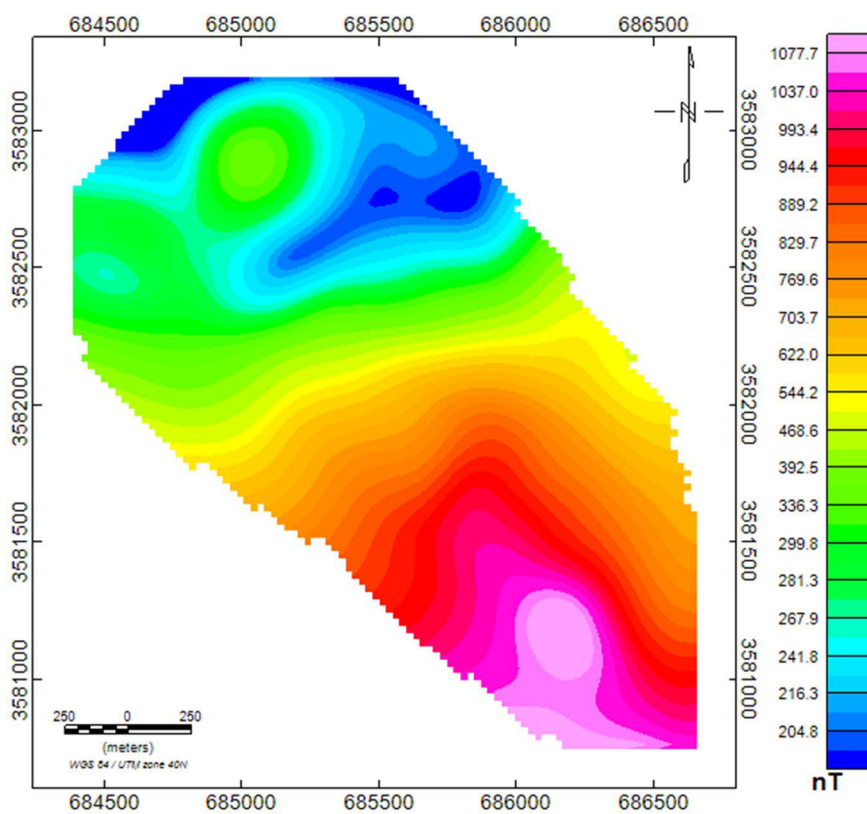
شکل ۴-۱۴: نقشه ادامه فراسو ۱۰۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان.



شکل ۴-۱۵: نقشه ادامه فراسو ۱۲۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان.

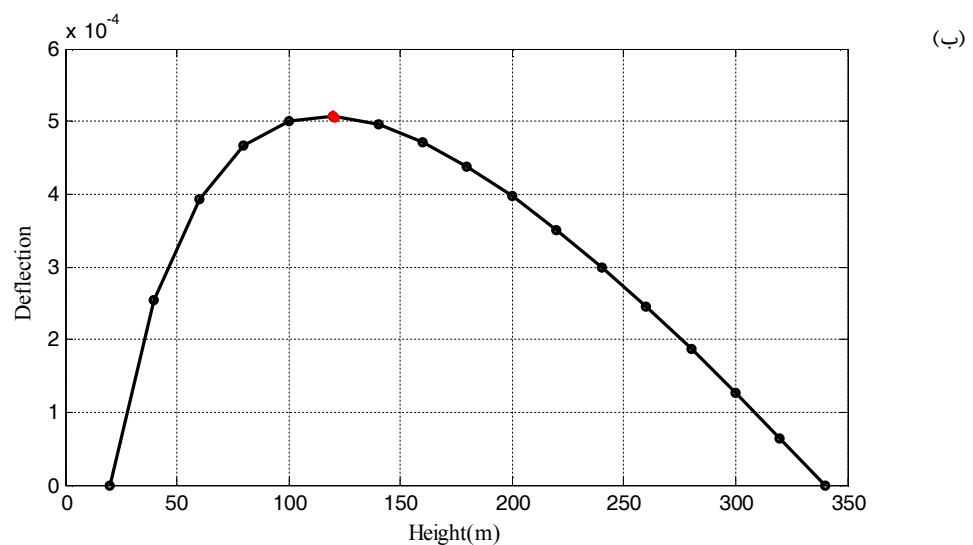
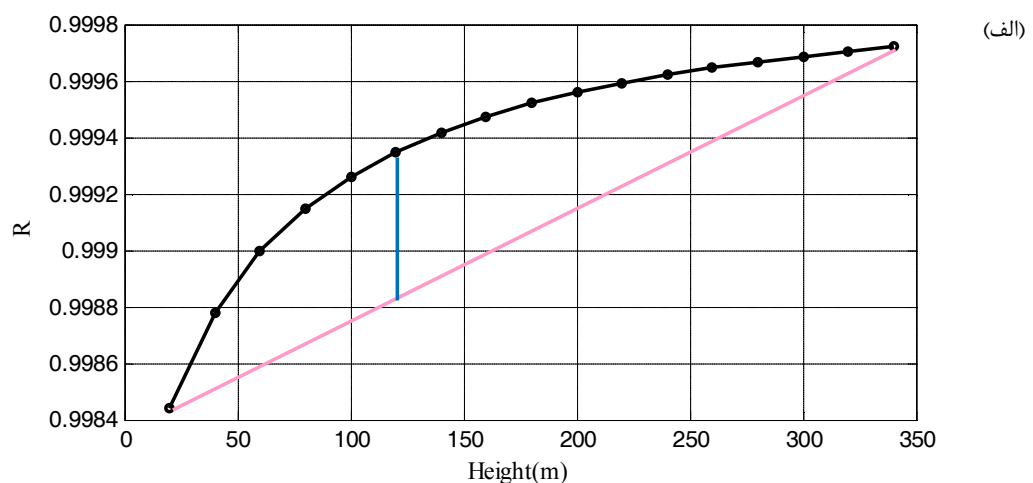


شکل ۴-۱۶: نقشه ادامه فراسو ۱۴۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان.



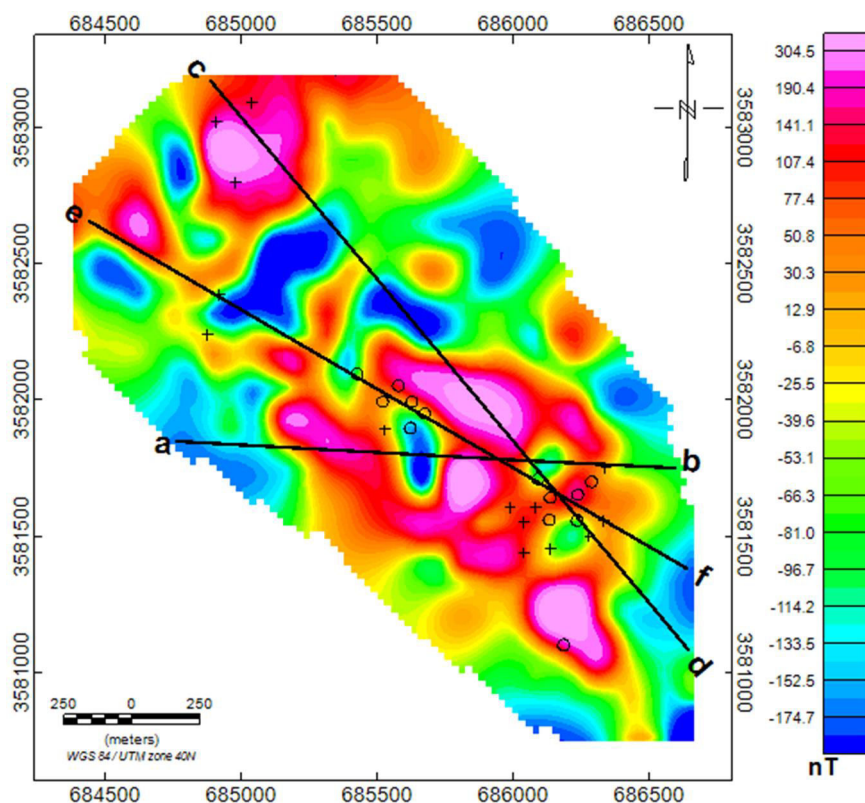
شکل ۴-۱۷: نقشه ادامه فراسو ۱۶۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب منطقه شادان.

جهت تهیه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو، نیازمند تعیین ارتفاع بهینه جهت گسترش میدان است که بدین منظور نمودار همبستگی میان دو ادامه فراسوی متوالی برحسب ارتفاع ترسیم شد (شکل ۴-۱۸-الف) که برای این منطقه فاصله دو فراسوی متوالی ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. برای به‌دست آوردن ارتفاع بهینه با همگرا شدن مقادیر همبستگی به یک مقدار حدی خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی رسم شد. مقادیر انحراف از این خط در ارتفاع‌های مختلف محاسبه و رسم گردید (شکل ۴-۱۸-ب) که بیشینه مقدار انحراف در ارتفاع ۱۲۰ متر (نقطه قرمز) دیده می‌شود بنابراین ارتفاع بهینه ۱۲۰ متر در نظر گرفته شد. نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو در ارتفاع بهینه ۱۲۰ متر در شکل (۴-۱۹) ارائه شده است.



شکل ۴-۱۸: (الف) نمودار همبستگی میان دو ادامه فراسوی متوالی برحسب ارتفاع، (ب) مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی و مقدار بیشینه مقدار انحراف (نقطه قرمز).

مقایسه نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو بهینه (شکل ۴-۱۹) با نقشه‌های بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطح که در شکل‌های (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) ارائه شده، بیانگر این است که روند بی‌هنجاری ناحیه‌ای در این منطقه از درجه سه است. با مقایسه شکل‌های (۴-۱۲) و (۴-۱۹) بی‌هنجاری‌های منفی در قسمت مرکزی و بی‌هنجاری‌های مثبت در قسمت شمال غرب، مرکز و جنوب شرق در هر دو نقشه مشاهده می‌شود و همدیگر را تایید می‌کنند. به دلیل اینکه روش ادامه فراسوی بهینه نسبت به روش روند سطح ابزار دقیق‌تری در جداسازی بی‌هنجاری ناحیه‌ای از بی‌هنجاری محلی است پروفیل مورد نیاز برای تخمین عمق از روی نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو بهینه (شکل ۴-۱۹) تهیه شده است همچنین موقعیت نقاط حفاری انجام شده در منطقه نیز بر روی این نقشه ارائه شده است.



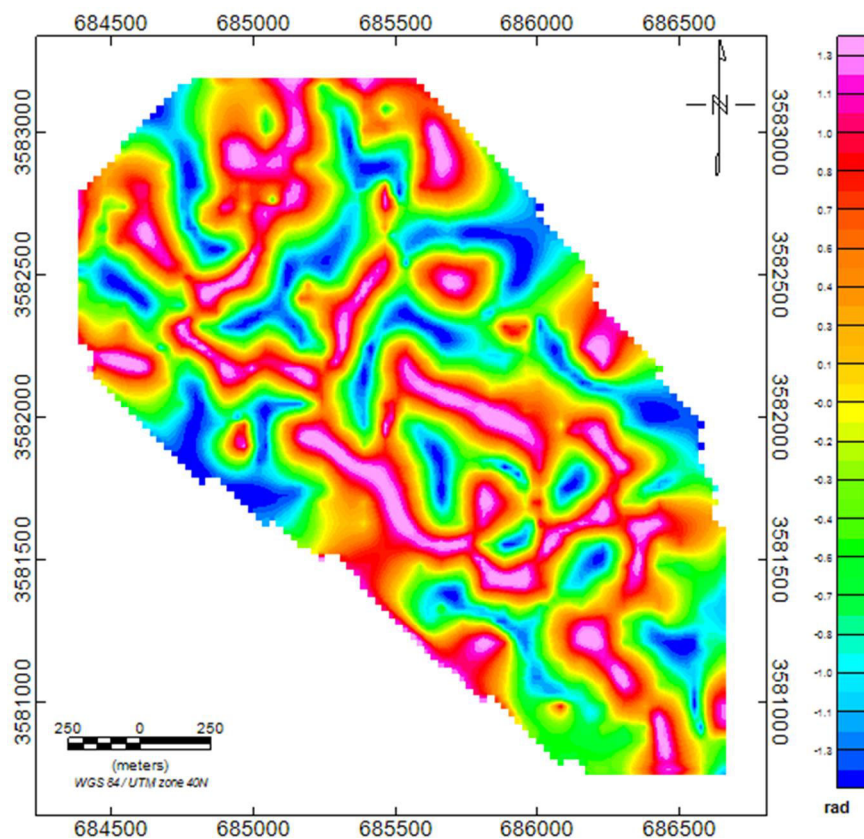
شکل ۴-۱۹: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو بهینه (ارتفاع فراسو ۱۲۰ متر)، پروفیل‌های ab، cd، ef و نقاط حفاری (نقاط پرعیار با دایره و نقاط کم‌عیار با + مشخص شده‌اند).

و: اعمال فیلتر زاویه تیلت روی داده‌های مغناطیسی

فیلتر زاویه تیلت در نزدیکی لبه‌های ساختارهای زمین‌شناسی و بی‌هنجاری‌ها صفر می‌شود بنابراین از این فیلتر جهت تعیین مرزها می‌توان استفاده نمود. این فیلتر بر روی نقشه باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو بهینه اعمال شده و نقشه زاویه تیلت در شکل (۴-۲۰) ارائه شده است.

مطابق شکل (۴-۲۰)، محدوده‌های بی‌هنجاری و نیز مرز شکستگی‌ها و خطواره‌ها تا حدودی

مشخص است.



شکل ۴-۲۰: نقشه حاصل از اعمال فیلتر زاویه تیلت بر روی داده‌های منطقه شادان.

ز: اعمال روش گرادیان کل نرمال و روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته

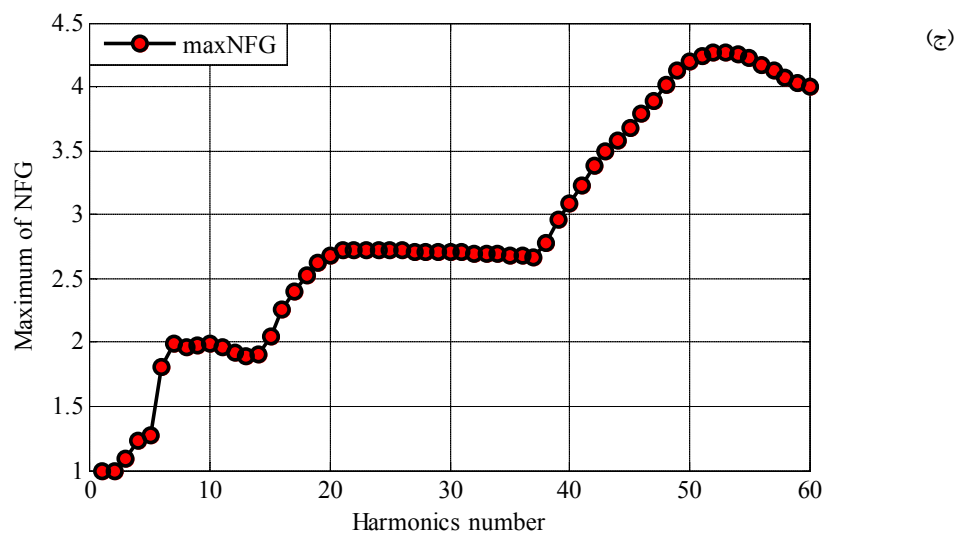
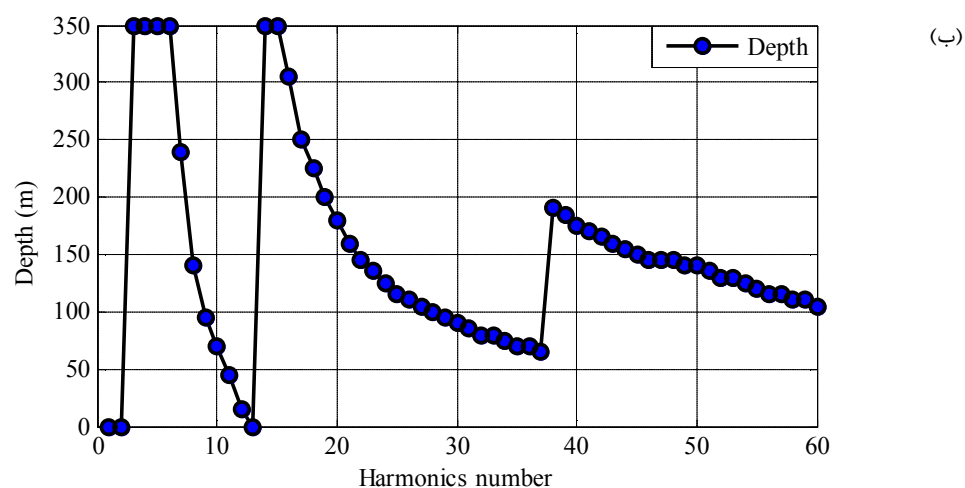
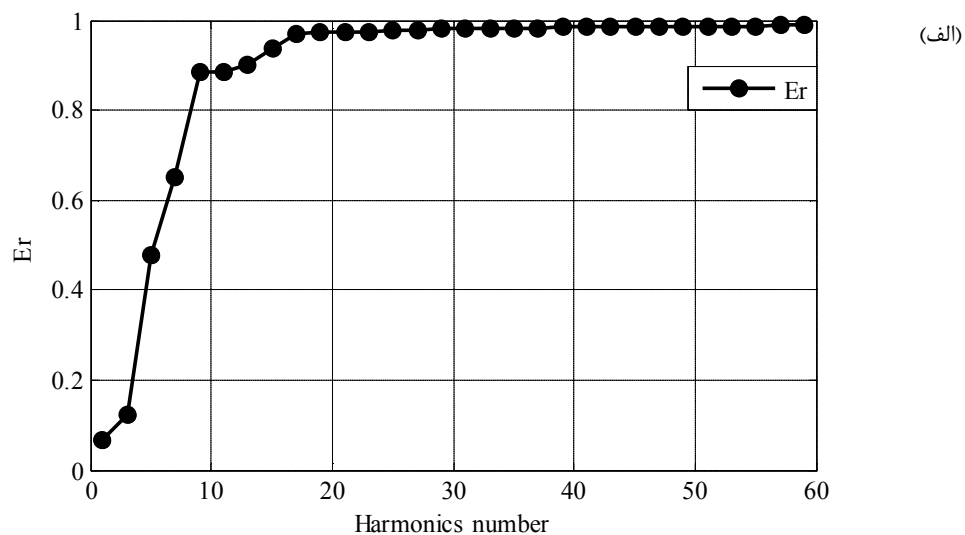
برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال روی داده‌های منطقه، پروفیل‌های سه‌گانه موجود در شکل (۴-۱۹) استفاده شد. پروفیل ab تقریباً شرقی-غربی و طول این پروفیل ۱۸۳۰ متر است. پروفیل‌های cd و ef در جهت شمال غرب-جنوب شرق هستند و به ترتیب دارای طول‌های ۲۷۲۵ و ۲۵۳۵ متر

هستند. فاصله نمونه برداری در هر سه پروفیل ۵ متر است و مقادیر گرادیان کل نرمال از سطح زمین تا عمق ۳۵۰ متر در ۷۱ لایه با فواصل یکسان ۵ متری محاسبه شده است.

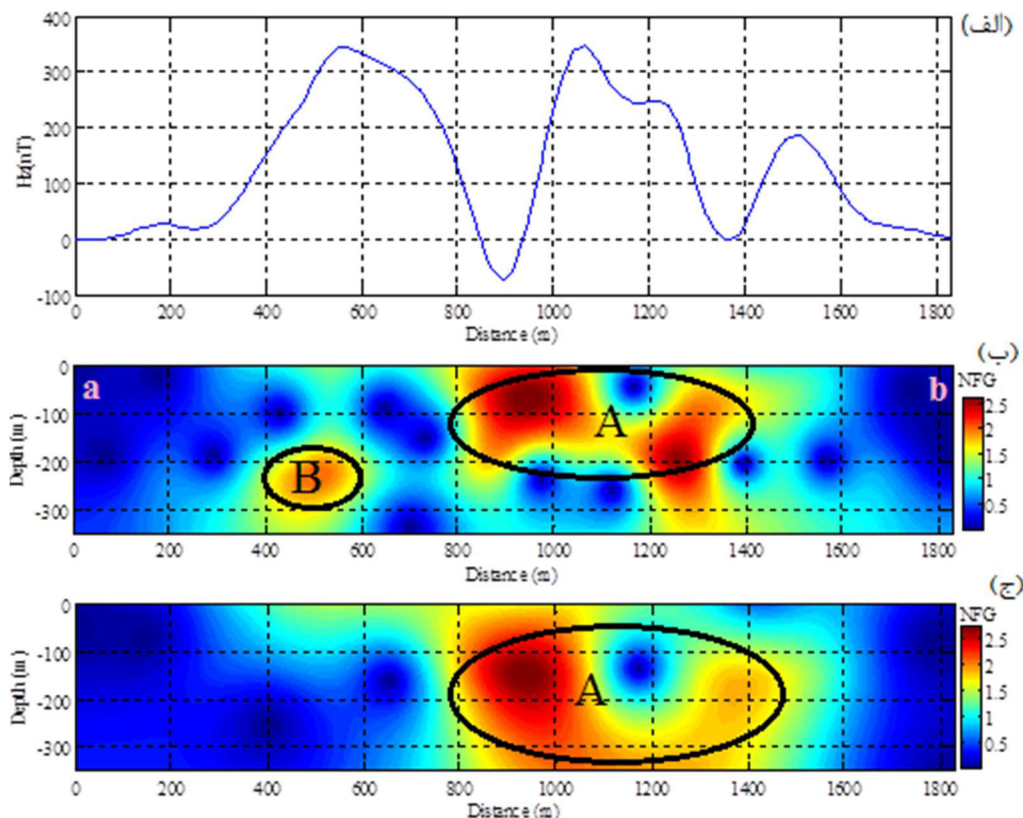
برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز در راستای پروفیل ab مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r (شکل ۴-۲۱-الف)، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۲۱-ب) و تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۲۱-ج) نسبت به مقادیر مختلف N در راستای این پروفیل رسم شد. به وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی‌های E_r و عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل ab براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (با توجه به انطباق مرحله گذار منحنی E_r و قسمت V شکل منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال) عدد ۳۷ و براساس روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال عدد ۲۲ تعیین شد.

اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای این پروفیل و مقاطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته و گرادیان کل نرمال در شکل (۴-۲۲) ارائه شده است. با توجه به طول پروفیل ab مناسب‌ترین عمق اکتشاف کمتر از ۱۸۰ متر است. براساس مقاطع قسمت‌هایی که بیشینه مقادیر NFG وجود دارند محدوده بی‌هنجاری است و می‌توان گفت که در این محدوده کانی‌زایی اتفاق افتاده است. همان‌طور که در مقاطع شکل (۴-۲۲) مشاهده می‌شود بی‌هنجاری اصلی (A) در فاصله ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ متر از ابتدای پروفیل وجود دارد که به صورت دو شاخه است و احتمال دارد در قسمت پایین یکپارچه باشد. در قسمت وسط این پروفیل ماده معدنی دارای رخنمون است و گسترش عمقی آن از سطح زمین تا حدود ۲۰۰ متری قابل بررسی است. این بی‌هنجاری مطابق با توده پورفیری شادان است (شکل ۴-۲). در مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته (شکل ۴-۲۲-ب) در فاصله ۴۰۰ تا ۶۰۰ متر از ابتدای پروفیل یک بی‌هنجاری (B) در عمق ۲۰۰ تا ۳۰۰ متری مشاهده می‌شود که این بی‌هنجاری در مقطع گرادیان کل نرمال (۴-۲۲-ج) دیده نمی‌شود. با توجه به اینکه تعداد هارمونیک‌ها در روش

گرادیان کل نرمال بهبودیافته بیشتر است نوفه بیشتری در مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته مشاهده می‌شود.

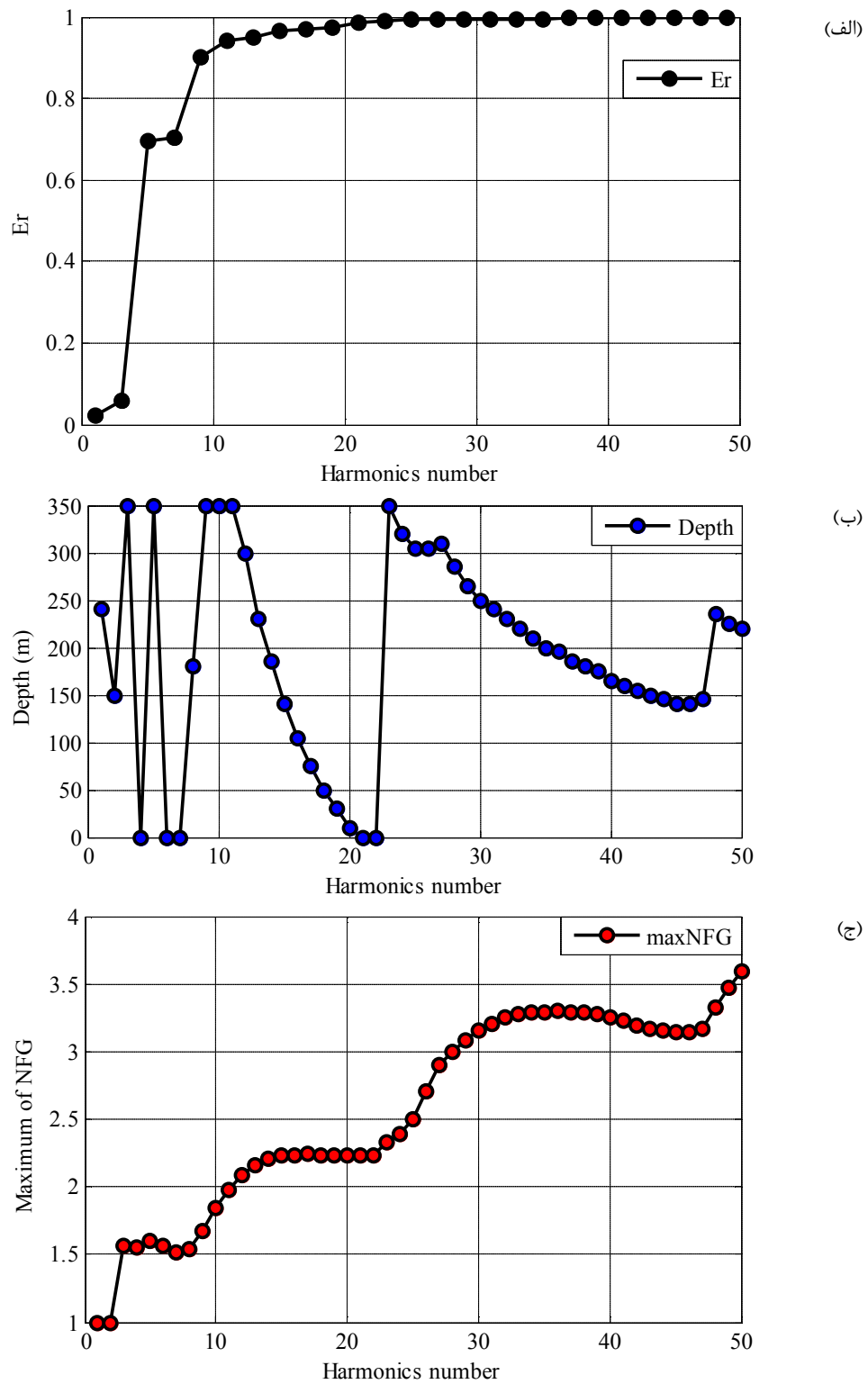


شکل ۴-۲: (الف) منحنی E_r ، (ب) منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، (ج) منحنی تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، نسبت به مقادیر مختلف N مربوط به بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ab.



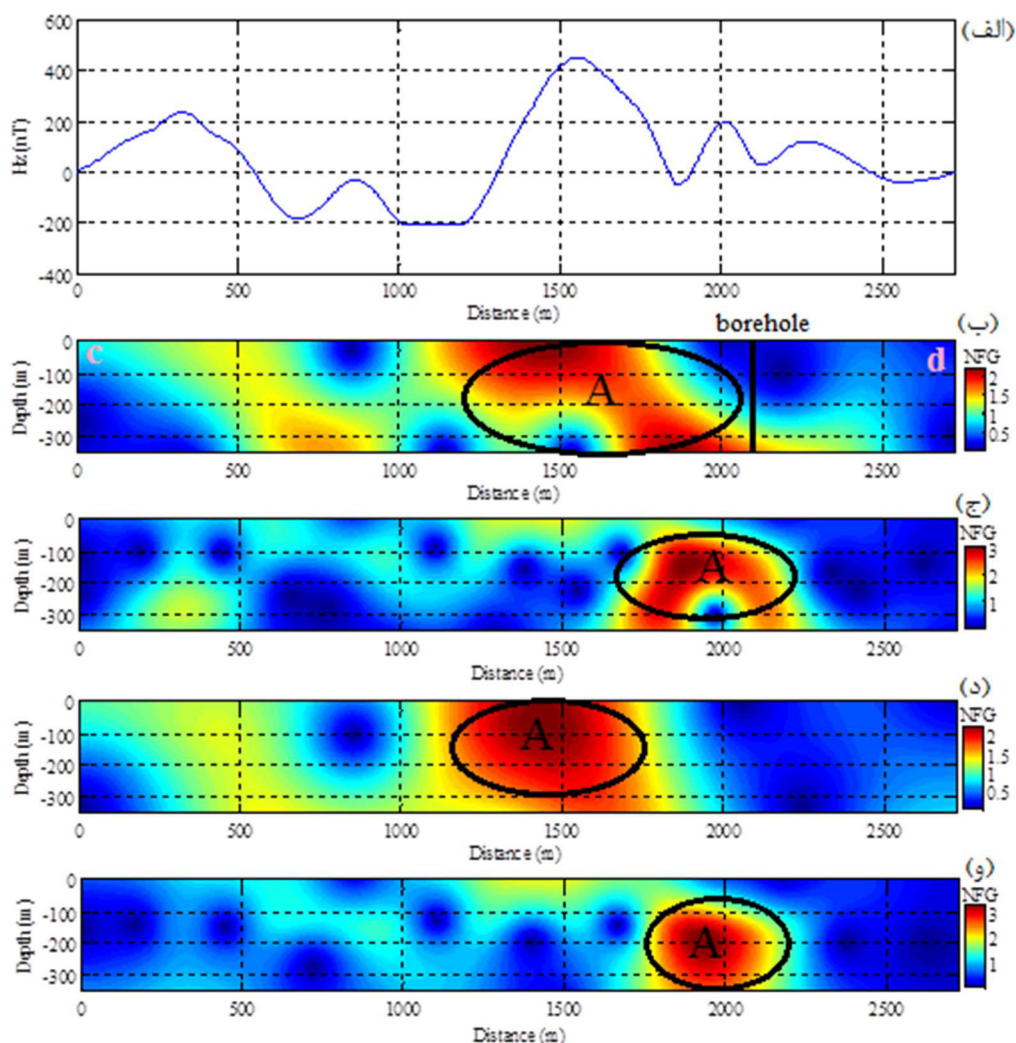
شکل ۴-۲۲: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ab، (ب) مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته، تعداد جملات هارمونیک ۳۷ می‌باشد، (ج) مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال، تعداد جملات هارمونیک ۲۲ می‌باشد.

برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز در راستای پروفیل cd مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r (شکل ۴-۲۳-الف)، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۲۳-ب) و تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۲۳-ج) نسبت به مقادیر مختلف N برای اثر مغناطیسی در راستای این پروفیل رسم گردید. به‌وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی‌های E_r و عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل cd براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته عدد ۲۱ و براساس روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال عدد ۱۷ انتخاب شد. اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای این پروفیل و مقاطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته (برای ۲۱ و ۴۵ هارمونیک) و مقاطع گرادیان کل نرمال (برای ۱۷ و ۳۶ هارمونیک) در شکل (۴-۲۴) ارائه شده است. با توجه به طول پروفیل cd مناسب‌ترین عمق اکتشاف کمتر از ۲۷۰ متر است.



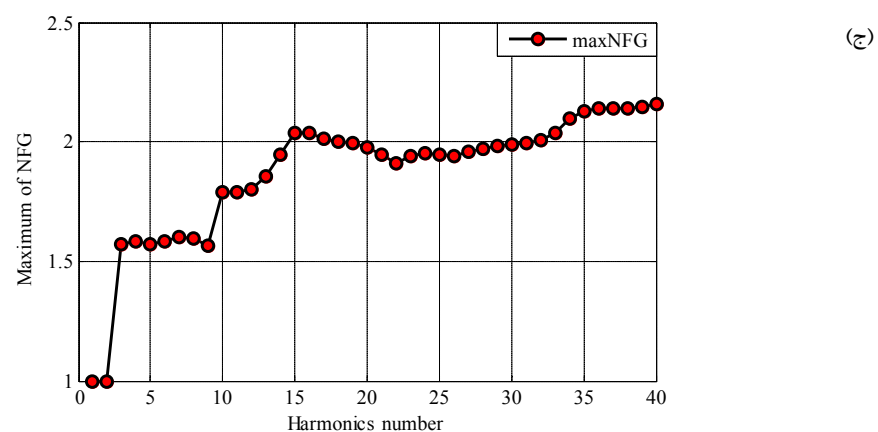
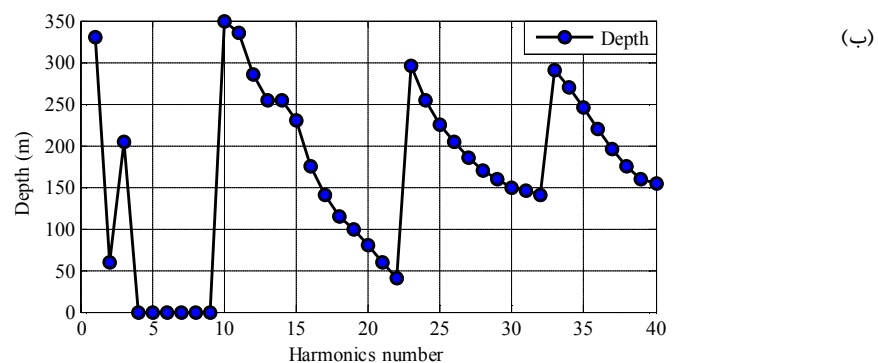
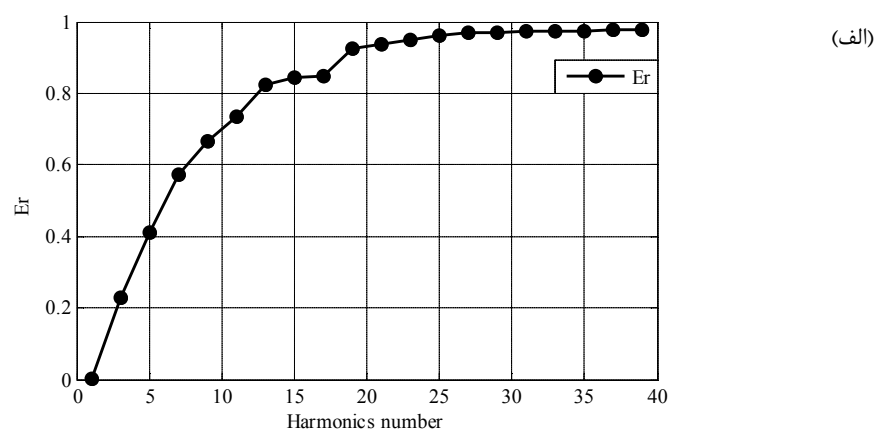
شکل ۴-۲۳: (الف) منحنی E_r ، (ب) منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، (ج) منحنی تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، نسبت به مقادیر مختلف N مربوط به بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل cd.

مطابق مقاطع NFG (شکل ۴-۲۴) می‌توان گفت در محدوده‌ی بیشینه مقدار NFG، بی‌هنجاری به‌صورت توده‌ای (A) وجود دارد که حالت دو شاخه دارد. این توده در سطح زمین رخنمون دارد و احتمالاً تا عمق حدود ۳۰۰ متری گسترش دارد. این بی‌هنجاری مطابق با توده پورفیری شادان است (شکل ۴-۲). در دو مقطع (ج) و (و) این شکل به دلیل اینکه تعداد هارمونیک‌ها بیشتر است نویز بیشتری دیده می‌شود. با توجه به اطلاعات حاصل از گمانه‌ای که بر روی پروفیل cd حفر شده است (شکل ۴-۲۴-ب)، وجود ماده معدنی در عمق ۳۰۰ متری مورد تایید است.



شکل ۴-۲۴: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل cd، (ب) و (ج) مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته، تعداد جملات هارمونیک ۲۱ و ۴۵ می‌باشد، (د) و (و) مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال، تعداد جملات هارمونیک ۱۷ و ۳۶ می‌باشد.

برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز در راستای پروفیل ef مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r (شکل ۴-۲۵-الف)، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۲۵-ب) و تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۲۵-الف) نسبت به مقادیر مختلف N در راستای این پروفیل ترسیم شد. به‌وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی‌های E_r و عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال تعداد هارمونیک‌های بهینه براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته عدد ۲۲ و براساس روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال عدد ۱۵ انتخاب شد.

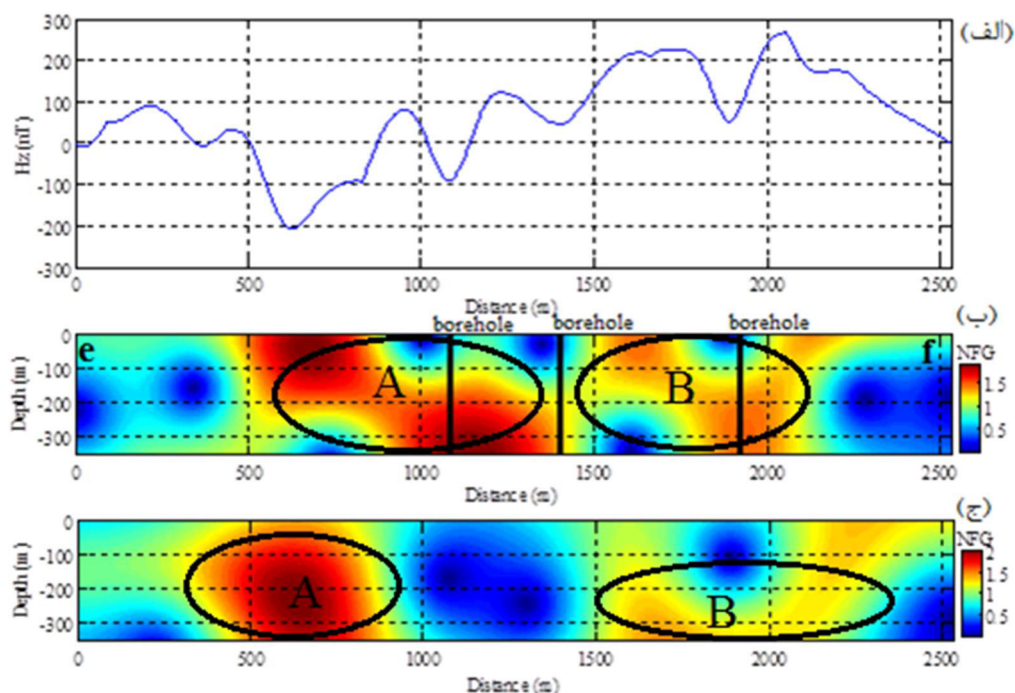


شکل ۴-۲۵: (الف) منحنی E_r ، (ب) منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، (ج) منحنی تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، نسبت به مقادیر مختلف N مربوط به بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ef .

اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ef و مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته و گرادیان کل نرمال در شکل (۴-۲۶) ارائه شده است. با توجه به طول پروفیل ab مناسب‌ترین عمق اکتشاف با استفاده از این دو روش کمتر از ۲۵۰ متر است.

مطابق مقاطع NFG (شکل ۴-۲۶) دو بی‌هنجاری قابل رویت است که گسترش عمقی آن‌ها از سطح تا عمق ۳۰۰ متری می‌باشد. و با توجه به اطلاعات حاصل از گمانه‌هایی که بر روی پروفیل ef حفر شده است (شکل ۴-۲۶-ب)، وجود ماده معدنی در حدود عمق ۳۰۰ متری مورد تایید است و عیار بالایی دارد. بیشینه‌های وجود در این مقاطع نیز منطبق بر توده شادان پورفیری هستند (شکل ۴-۲).

نتایج تخمین عمق حاصل در راستای این سه پروفیل با نتایج حاصل از روش اوپلر دو بعدی (حسین‌زاده، ۱۳۹۶) مطابقت دارد.

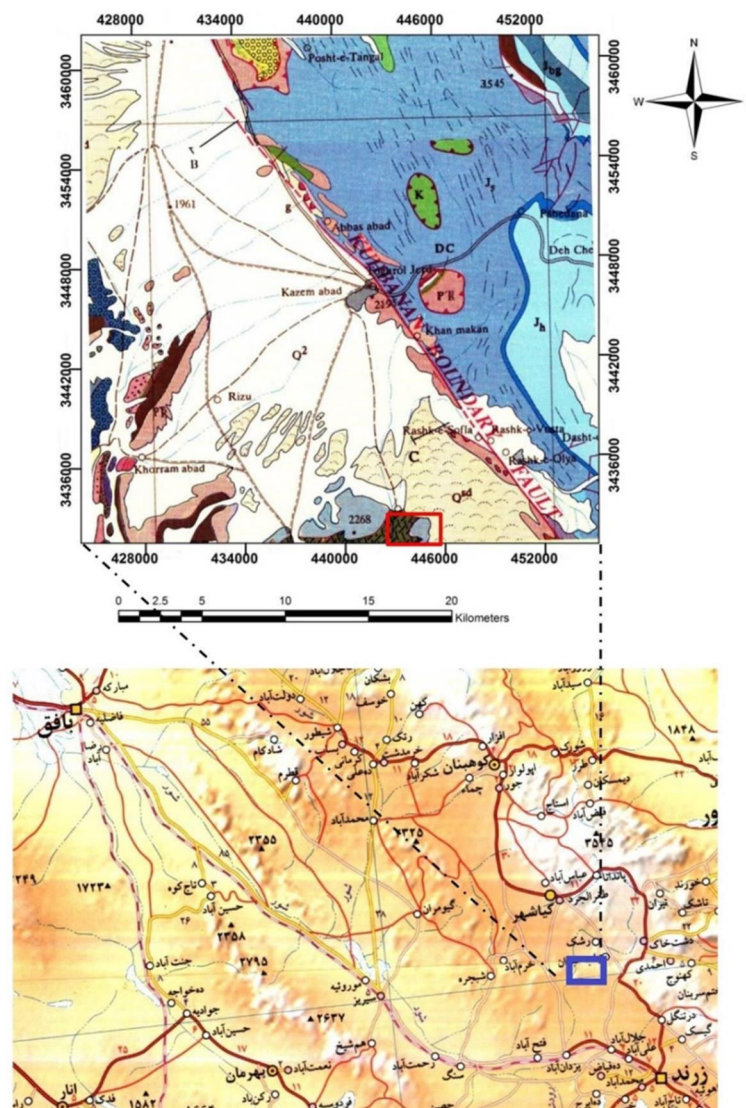


شکل ۴-۲۶: اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ef، (ب) مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته، تعداد جملات هارمونیک ۲۲ می‌باشد، (ج) مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال، تعداد جملات هارمونیک ۱۵ می‌باشد.

۴-۳ منطقه جلال آباد

۴-۳-۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه جلال آباد

کانسار آهن جلال آباد در ۳۸ کیلومتری شمال غرب شهر زرنند در استان کرمان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه در قسمت شمالی معدن جلال آباد در بین طول‌های شرقی ۴۴۳۶۰۰ تا ۴۴۵۴۰۰ و عرض‌های شمالی ۳۴۳۲۸۰۰ تا ۳۴۳۵۰۰۰ در سیستم مختصات متریک (UTM) در زون ۴۰R واقع شده است. در شکل (۴-۲۷) موقعیت محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ راور همراه با راه‌های دسترسی به منطقه نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۷: موقعیت منطقه جلال آباد بر روی نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ راور و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه.

بهترین راه دسترسی به محدوده از طریق جاده آسفalte زرد- بافق است که از کیلومتر ۱۳ آن، راه فرعی جاده اختصاصی معدن به سمت شمال جدا شده و در ادامه تا معدن سنگ آهن جلال آباد به طول ۲۰ کیلومتر ادامه می یابد. همچنین راه اختصاصی معدن از زرد در جهت شمال غرب به طول حدوداً ۴۰ کیلومتر مسیر مستقیم است (ژولیده سر و مصطفایی، ۱۳۹۳).

۴-۳-۲ زمین شناسی منطقه جلال آباد

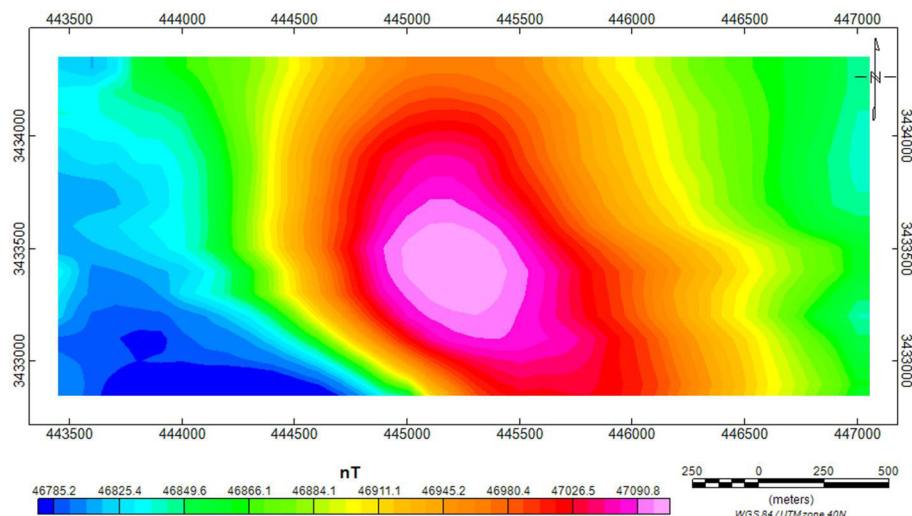
سنگ میزبان سنگ آهن جلال آباد، سنگ های آتشفشانی و رسوبی سری ریزو است. توده های کوچک آذرین از نوع میکروگابرو و تعدادی دایک و سیل با ترکیب دیوریت و دیاباز در منطقه رخنمون دارند. دایک ها و سیل ها در سنگ های ولکانو کلاستیک و سنگ های رسوبی نفوذ کرده و جوان تر از آن ها هستند. شواهد نشان می دهد که آن ها قدیمی تر و یا همزمان با کانی سازی آهن می باشند. کانی سازی آهن در کانسار جلال آباد در اعماق زیاد صورت پذیرفته و رخنمون کانسنگ آهن در ابتدای کار مطالعات صحرایی کم بوده است. شکل کلی کانسار جلال آباد به صورت یک عدسی کشیده با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی است که در یک ساختمان چین خورده واقع شده است. کانه اصلی کانسار مگنتیت است که در بخش های عمیق واقع گردیده است و تقریباً بیشتر حجم کانسار را تشکیل می دهد. هماتیت عمدتاً به صورت ثانویه از اکسیداسیون مگنتیت ایجاد شده و در بخش های کم عمق و سطحی و محل شکستگی ها فراوان است (ژولیده سر و مصطفایی، ۱۳۹۳).

بررسی ویژگی های مشخصه کانی سازی در جلال آباد نشان می دهد که ویژگی های کانی سازی در جلال آباد مشابه کانسارهای هیدروترمال است. کانی سازی مرتبط به یک محیط ریفیت درون قاره ای است و احتمالاً منشا سیالات کانی ساز، ماگمای آکالن سدیک اولیه ای بوده که در اثر بالا آمدن استنوسفر و ذوب بخشی گوشته تشکیل شده است (ژولیده سر و مصطفایی، ۱۳۹۳).

۳-۳-۴ پردازش داده‌های مغناطیسی منطقه جلال آباد

داده‌های مغناطیسی در این منطقه در ۲۶ پروفیل شرقی غربی و ۲ پروفیل شمالی جنوبی طی ۹ روز برداشت شده است. در این برداشت فاصله پروفیل‌ها ۴۰ متر و فاصله نقاط برداشت روی پروفیل‌ها ۲۰ متر بوده است که در مجموع بیشتر از ۴۴۰۰ نقطه مورد برداشت مغناطیس‌سنجی قرار گرفته است (سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران^۱). نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه مورد بررسی پس از اعمال تصحیح روزانه تهیه و ترسیم شد (شکل ۴-۲۸). مطابق این نقشه یک بی‌هنجاری بزرگ در محدوده وجود دارد که حجم وسیعی دارد.

سپس تصحیح IGRF بر روی داده‌های برداشت شده اعمال شده است؛ که نقشه‌های IGRF و میدان کل مغناطیسی منطقه مورد بررسی پس از حذف اثر IGRF در شکل‌های (۴-۲۹) و (۴-۳۰) ارائه شده است.

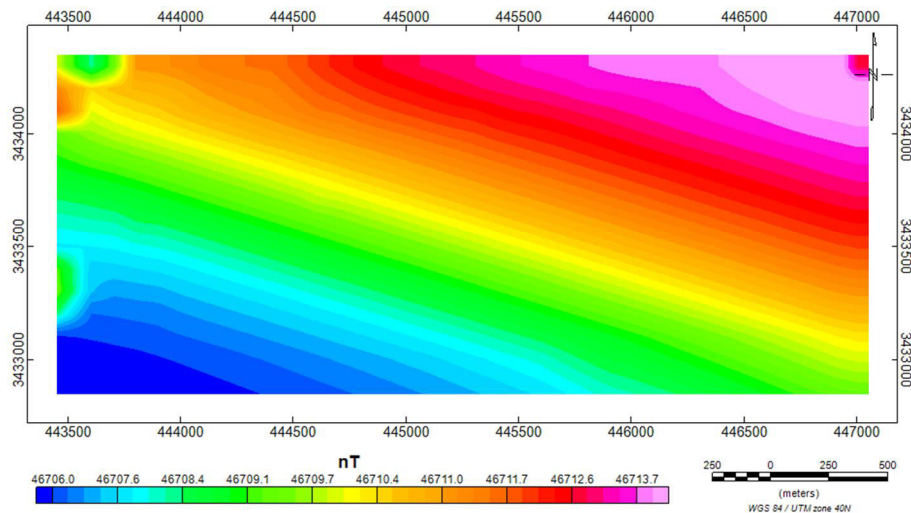


شکل ۴-۲۸: نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد پس از اعمال تصحیح روزانه.

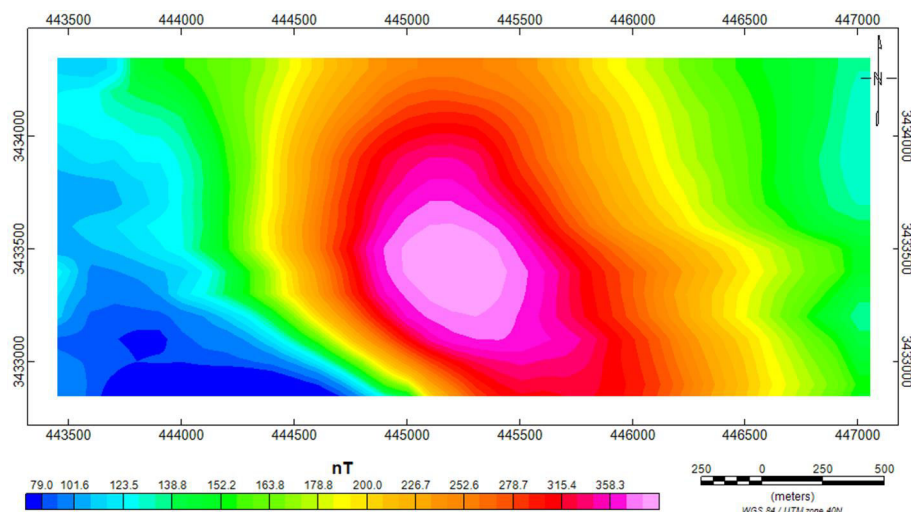
مطابق نقشه IGRF (شکل ۴-۲۹) میدان مرجع مغناطیس زمین در این محدوده به سمت شمال شرق روند افزایشی دارد. شکل (۴-۳۰) بیانگر تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی منطقه می‌باشد؛ که نشان می‌دهد منطقه دارای یک بیشینه در مرکز است که تا حدودی دارای روندی شمال غرب-

^۱ IMIDRO

جنوب شرق می‌باشد. پردازش‌های لازم به‌وسیله‌ی نرم‌افزار Oasis montaj بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه مورد بررسی پس از حذف اثر IGRF صورت گرفته است.



شکل ۴-۲۹: نقشه اثر IGRF منطقه جلال‌آباد.

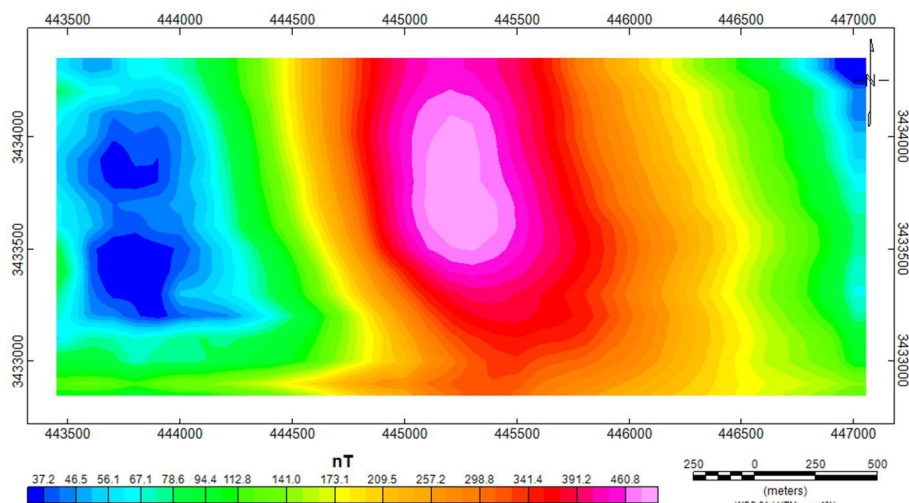


شکل ۴-۳۰: نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال‌آباد پس از حذف اثر IGRF.

الف: اعمال فیلتر برگردان به قطب

فیلتر برگردان به قطب، باعث جانمایی درست بی‌هنجاری بر روی توده و همین‌طور تعیین وضعیت شیب توده می‌شود. نقشه حاصل از اعمال فیلتر برگردان به قطب بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی در شکل (۴-۳۱) آورده شده است که با توجه به این نقشه تغییرات چندانی در نقشه‌ی مغناطیسی

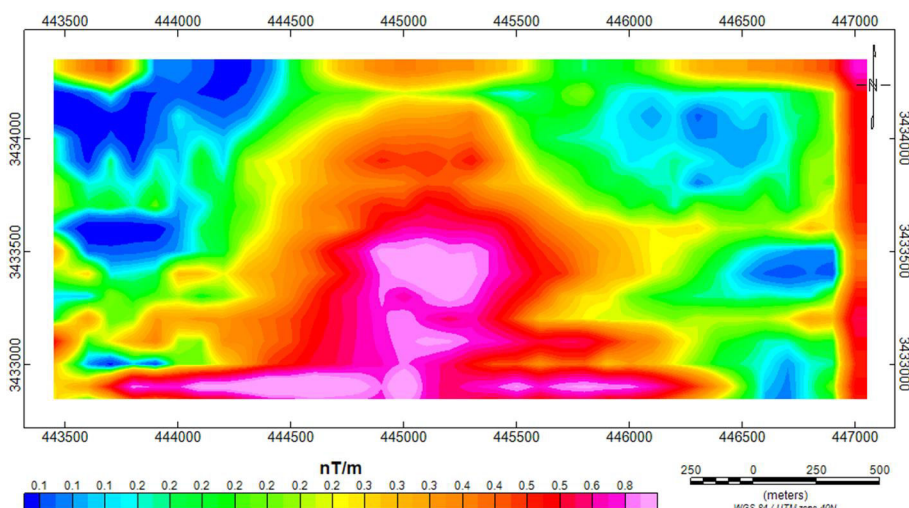
ایجاد نشده است و فقط بی‌هنجاری مقداری به سمت شمال جابه‌جا شده است بنابراین احتمالاً توده به سمت شمال امتداد دارد.



شکل ۴-۳: نقشه میدان مغناطیسی منطقه جلال‌آباد پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب.

ب: اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی

معمولاً پیک این فیلتر مستقیماً بالای لبه اجسام پهن و بالای مرکز اجسام باریک قرار می‌گیرد، در نتیجه با این فیلتر می‌توان تا حدود زیادی به هندسه توده‌های مغناطیسی پی برد. این فیلتر بر روی داده‌های میدان کل مغناطیسی اعمال و نقشه سیگنال تحلیلی رسم شد (شکل ۴-۳۲).

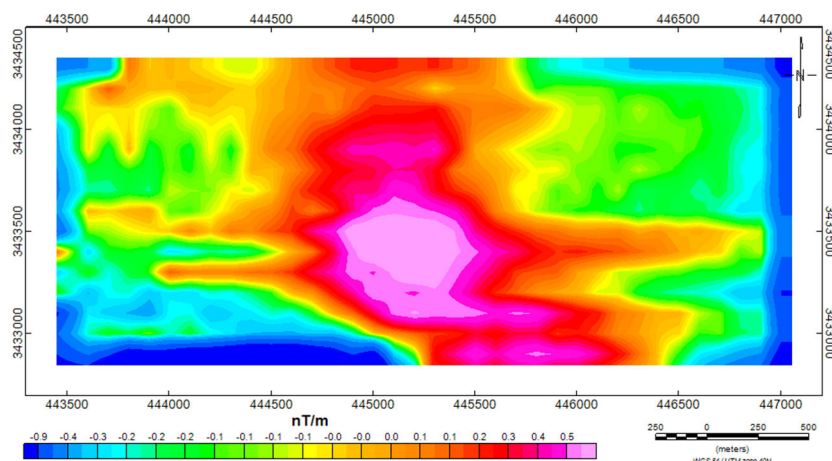


شکل ۴-۳۲: نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های منطقه جلال‌آباد.

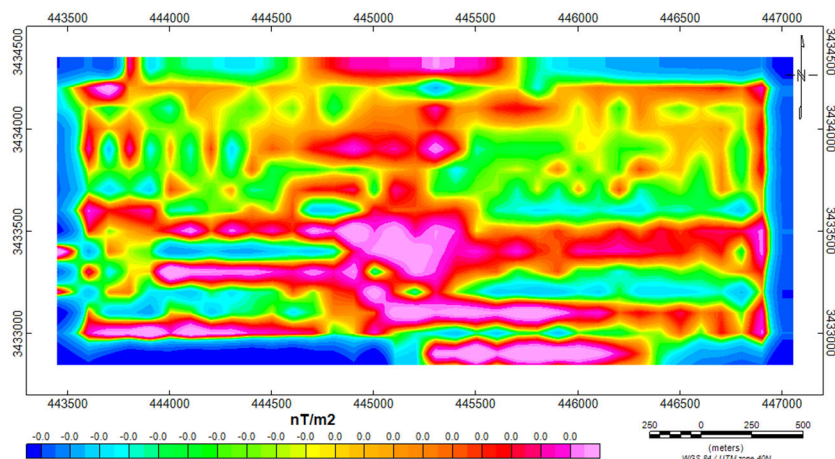
مطابق شکل می‌توان گفت بیشینه مقدار نقشه سیگنال تحلیلی در قسمت مرکزی نقشه قرار دارد و نشان دهنده مرکز توده بی‌هنجار است و همچنین توده‌ای که سبب ایجاد این بی‌هنجاری شده در عمق پیوسته است.

ج: اعمال فیلتر مشتق قائم

این فیلتر بر روی داده‌های میدان کل مغناطیسی اعمال و نقشه‌های مشتق قائم مرتبه ۱ و ۲ در شکل‌های (۳۳-۴) و (۳۴-۴) ارائه شده است. براساس شکل‌ها می‌توان گفت بی‌هنجاری در عمق هم تغییر چندانی ندارد و به نظر توده یکپارچه‌ای است. با افزایش مرتبه مشتق اغتشاشات ناشی از نوفه زیاد شده و احتمالاً خطوط برداشت را نشان می‌دهند و تقریباً اثری از جسم بی‌هنجار به وضوح دیده نمی‌شود.



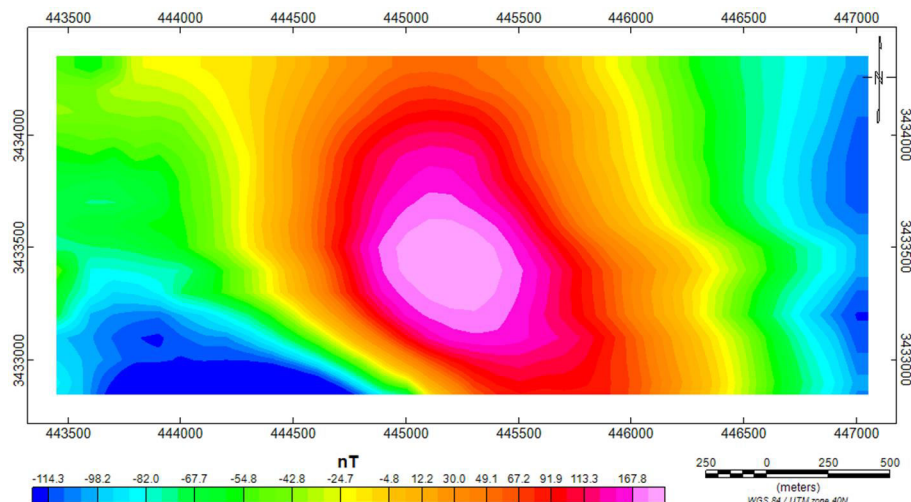
شکل ۳۳-۴: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه ۱ بر روی داده‌های منطقه جلال‌آباد.



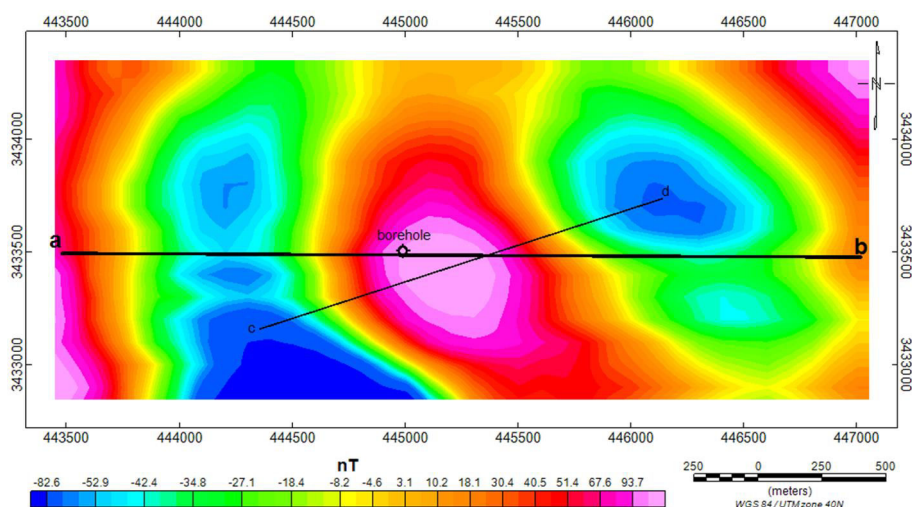
شکل ۴-۳۴: نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه ۲ بر روی داده‌های منطقه جلال‌آباد.

د: اعمال فیلتر روند سطحی

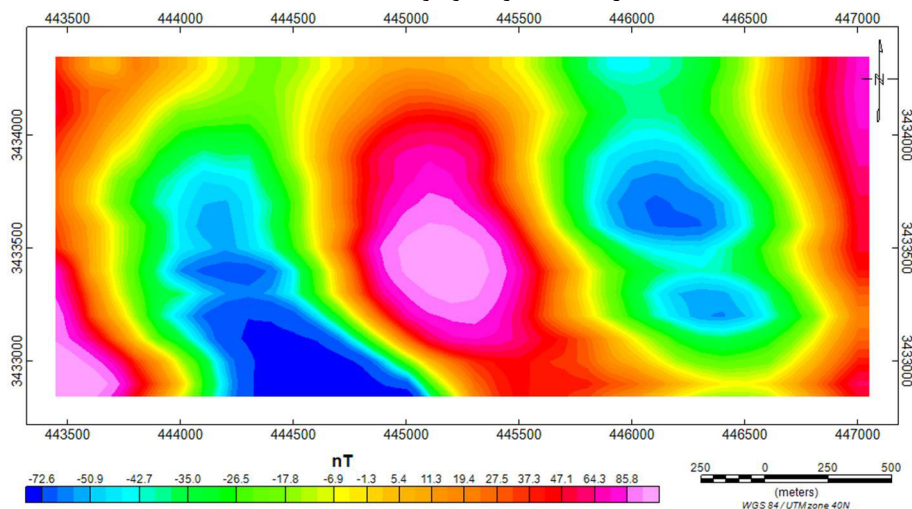
این فیلتر برای به دست آوردن بی‌هنجاری باقی‌مانده استفاده می‌شود. نقشه‌های بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از سطح روندهایی با درجات ۱ تا ۳ در شکل‌های (۴-۳۵)، (۴-۳۶) و (۴-۳۷) ارائه شده است. بر روی شکل (۴-۳۶) موقعیت گمانه حفر شده و راستای پروفیل‌های ab و cd نشان داده شده است. مطابق این نقشه‌ها در وسط منطقه توده‌ای با شدت مغناطیس بالا وجود دارد که از اطراف توده‌هایی با شدت پایین آن را در بر گرفته‌اند که براساس این اطلاعات توده با شدت مغناطیس بالا توده اصلی است.



شکل ۴-۳۵: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطح درجه ۱ بر روی داده‌های منطقه جلال‌آباد.



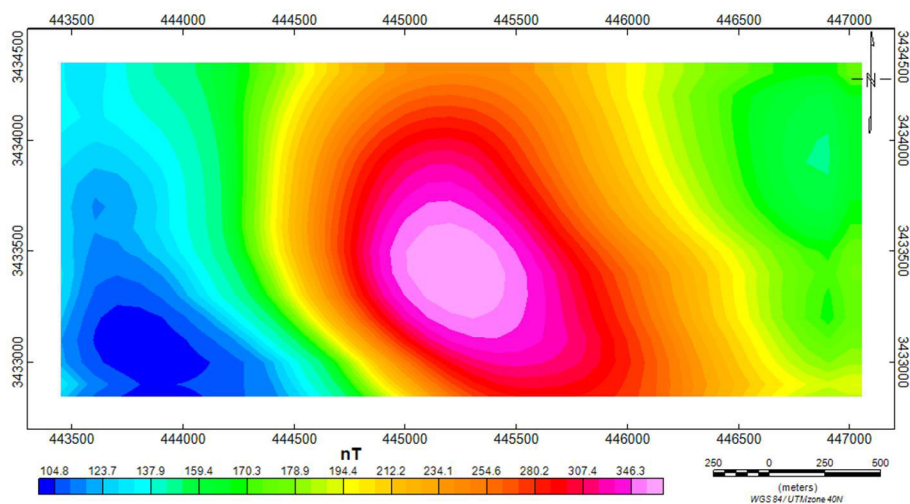
شکل ۴-۳۶: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطح درجه ۲ بر روی داده‌های منطقه جلال‌آباد با راستای ab و cd و موقعیت گمانه.



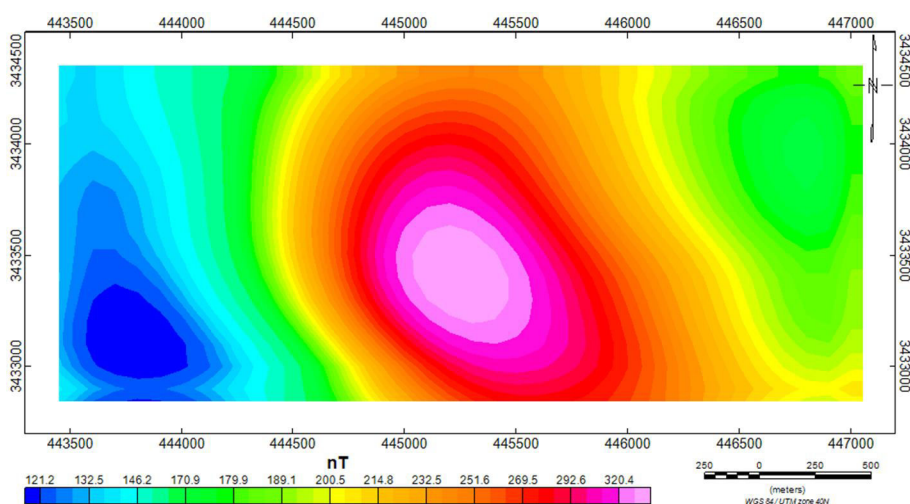
شکل ۴-۳۷: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطح درجه ۳ بر روی داده‌های منطقه جلال‌آباد.

ه: اعمال فیلتر ادامه فراسو

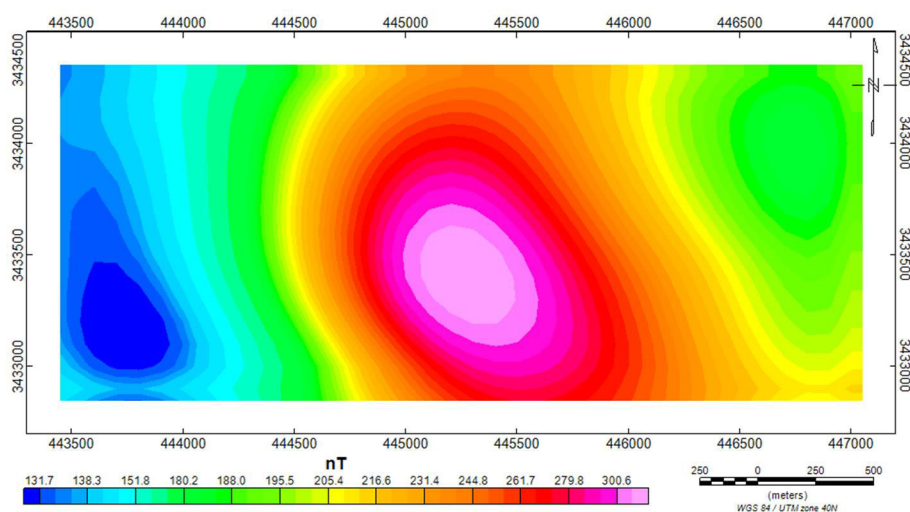
فیلتر ادامه فراسو روی داده‌های منطقه جلال‌آباد تا ارتفاع ۶۸۰ متر با گام ۴۰ متر اعمال شده است. این فیلتر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی (شکل ۴-۳۰) اعمال شده است. تعدادی از این نقشه‌های ادامه فراسو در شکل‌های (۴-۳۸) تا (۴-۴۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از این فیلتر به نظر می‌رسد این توده در عمق گسترش زیادی داشته باشد.



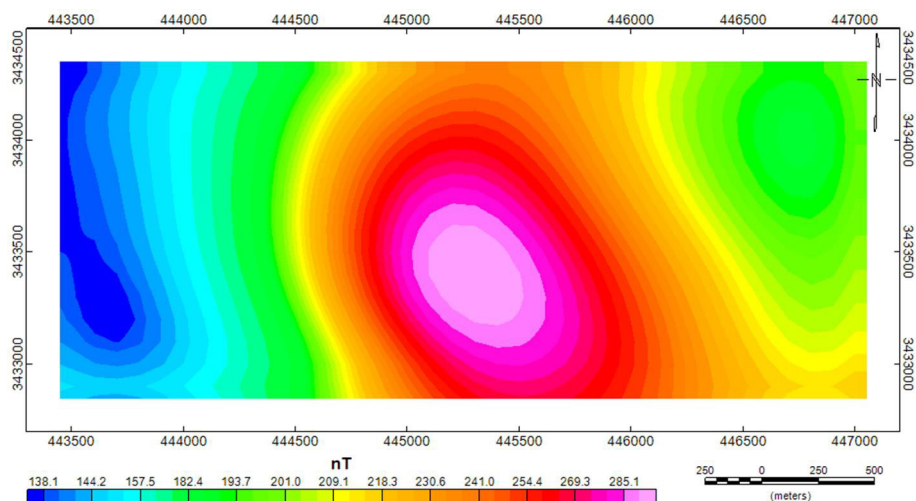
شکل ۴-۳۸: نقشه ادامه فراسو ۸۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد.



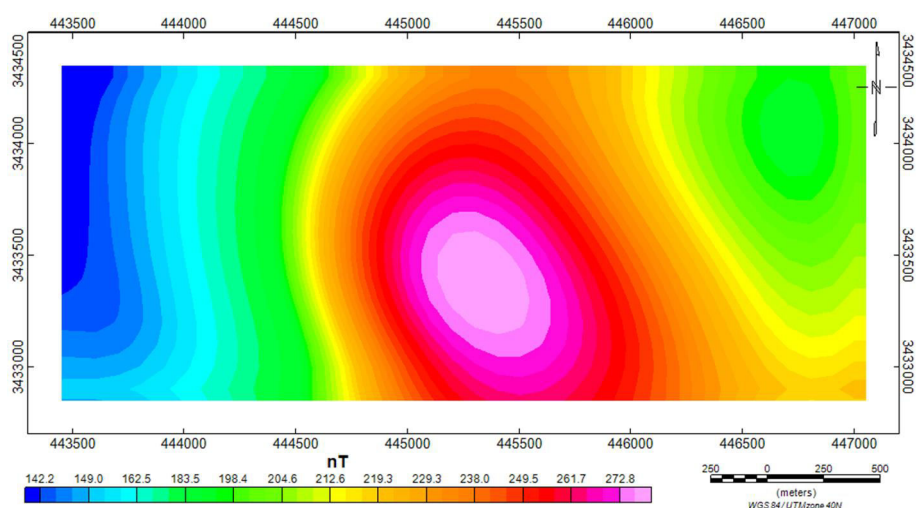
شکل ۴-۳۹: نقشه ادامه فراسو ۱۶۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد.



شکل ۴-۴۰: نقشه ادامه فراسو ۲۴۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد.



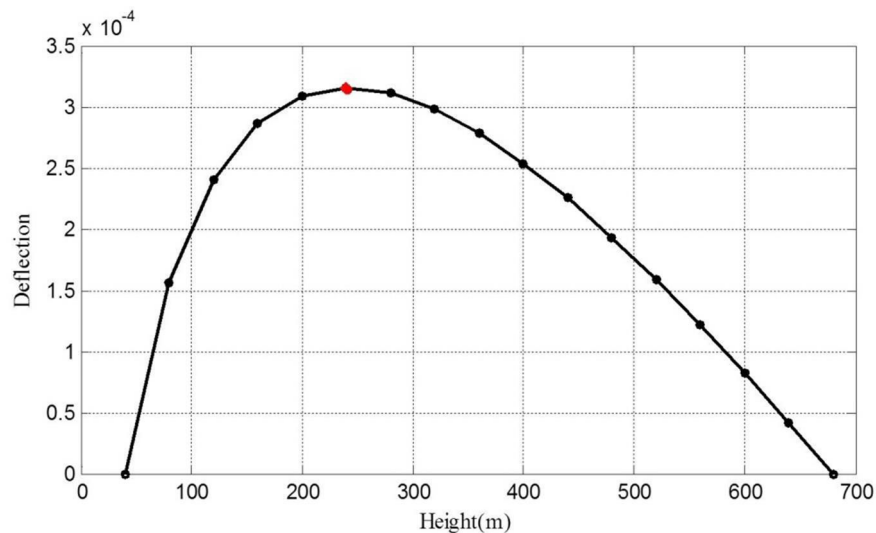
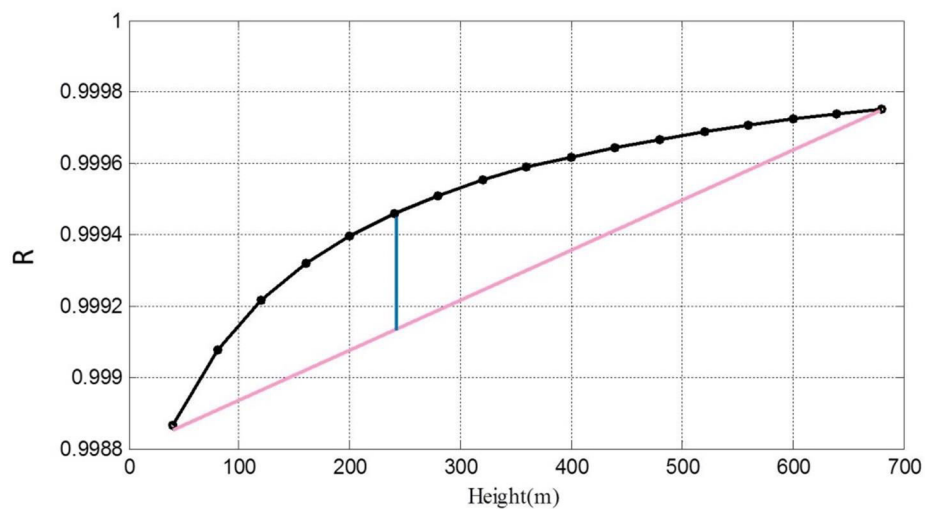
شکل ۴-۴۱: نقشه ادامه فراسو ۳۲۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد.



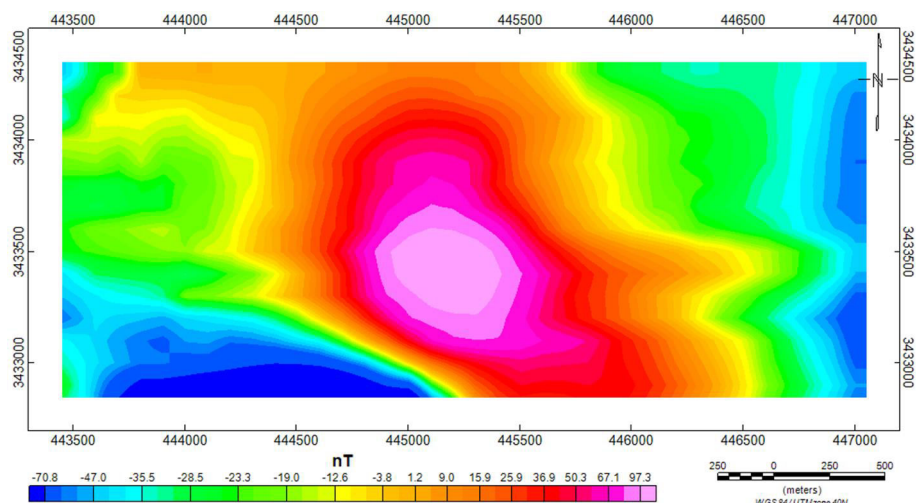
شکل ۴-۴۲: نقشه ادامه فراسو ۴۰۰ متر بر روی نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه جلال آباد.

مطابق نقشه‌های ادامه فراسو، وجود توده بی‌هنجار در همه نقشه‌ها بدون تغییرات فاحش به نظر می‌رسد این جسم بی‌هنجار از گسترش عمقی و حجم وسیعی برخوردار است. جهت تهیه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو، نیاز به تعیین ارتفاع بهینه جهت گسترش میدان است که به منظور تعیین ارتفاع بهینه ادامه فراسو از نمودار همبستگی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای و نتیجه ادامه فراسو برای ارتفاع‌های مختلف برحسب ارتفاع استفاده می‌شود. اما با توجه به اینکه بی‌هنجاری ناحیه‌ای در عمل مشخص نیست از همبستگی میان دو ادامه فراسوی متوالی استفاده می‌شود (شکل ۴-۴۳-الف)، که برای این منطقه فاصله دو فراسوی متوالی ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. برای

به دست آوردن ارتفاع بهینه با همگرا شدن مقادیر همبستگی به یک مقدار حدی خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی رسم شد. مقادیر انحراف از این خط در ارتفاعهای مختلف محاسبه و رسم گردید (شکل ۴-۴۳-ب) که بیشینه مقدار انحراف در ارتفاع ۲۴۰ متر (نقطه قرمز) دیده می شود بنابراین ارتفاع بهینه ۲۴۰ متر در نظر گرفته شد. نقشه بی‌هنجاری باقی مانده حاصل از روش ادامه فراسو در ارتفاع بهینه‌ی ۲۴۰ متر در شکل (۴-۴۴) ارائه شده است.



شکل ۴-۴۳: (الف) نمودار همبستگی میان دو ادامه فراسوی متوالی بر حسب ارتفاع، (ب) مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی و مقدار بیشینه مقدار انحراف (نقطه قرمز).

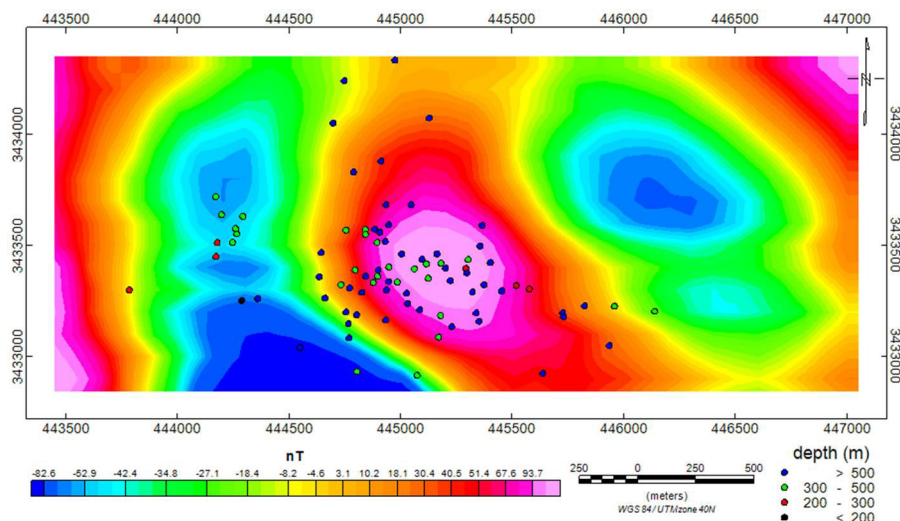


شکل ۴-۴: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو بهینه (ارتفاع فراسو ۲۴۰ متر).

مقایسه نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از روش ادامه فراسو بهینه (شکل ۴-۴) با نقشه‌های بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل از حذف روند سطح که در شکل‌های (۴-۳۵) تا (۴-۳۷) ارائه شده، بیانگر این است که روند بی‌هنجاری ناحیه‌ای در این منطقه از درجه دو است.

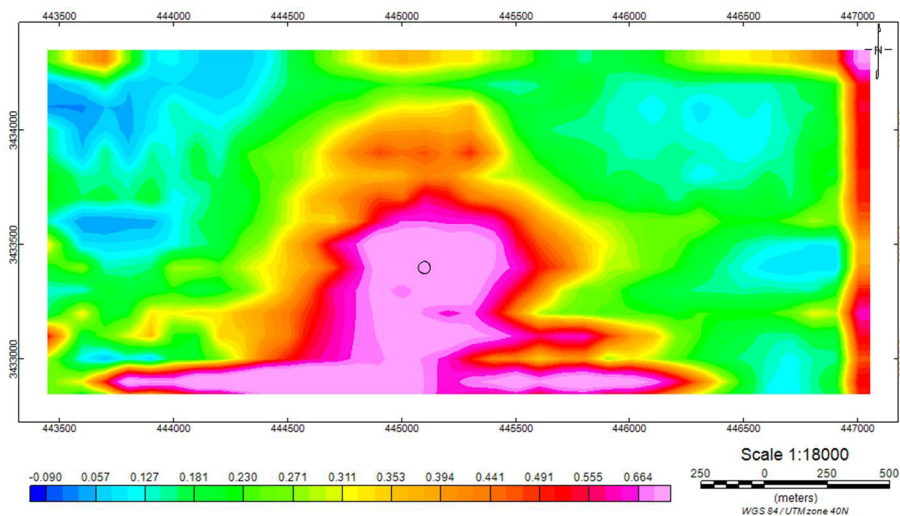
و: اعمال روش اوایلر

روش اوایلر یکی از روش‌های کمی برای تخمین عمق بی‌هنجاری‌ها است. برای بررسی صحت تخمین عمق حاصل از روش‌های ارائه شده در این پایان‌نامه روش اوایلر بر روی داده‌های مغناطیسی این محدوده اعمال شد. برای اجرای روش اوایلر از داده‌های میدان کل مغناطیسی پس از حذف اثر IGRF (شکل ۴-۳۰) استفاده شده است. با توجه به اینکه شاخص ساختاری برای اشکال هندسی مشخصی تعیین شده است و توده بی‌هنجار در این منطقه عدسی شکل است و با هیچ کدام از آن‌ها مطابقت ندارد شاخص ساختاری ۲/۲ انتخاب شده است. با توجه به اندازه بی‌هنجاری اندازه پنجره برای روش اوایلر استاندارد ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. نتایج تخمین عمق با استفاده از روش اوایلر استاندارد بر روی نقشه باقی‌مانده ناشی از روند سطحی درجه ۲ در شکل (۴-۴۵) ارائه شده است. مطابق شکل (۴-۴۵) توده بی‌هنجار دارای گسترش عمقی زیادی است و بیشتر نقاط حاصل از تخمین عمق به این روش اعماق بیشتر از ۵۰۰ متر را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۵: نتایج حاصل از تخمین عمق با استفاده از روش اویلر استاندارد بر روی نقشه باقی‌مانده حاصل از روند سطح درجه ۲.

تخمین عمق حاصل از روش اویلر مکانی در شکل (۴-۴) ارائه شده است. در این روش ابعاد پنجره توسط نرم‌افزار ۵۲۳/۷۶ انتخاب شده است. نقطه حاصل از تخمین عمق در مختصات $X=445100$ و $Y=34333400$ واقع شده است و توده در این نقطه دارای عمق ۴۷۸/۱۶ است.



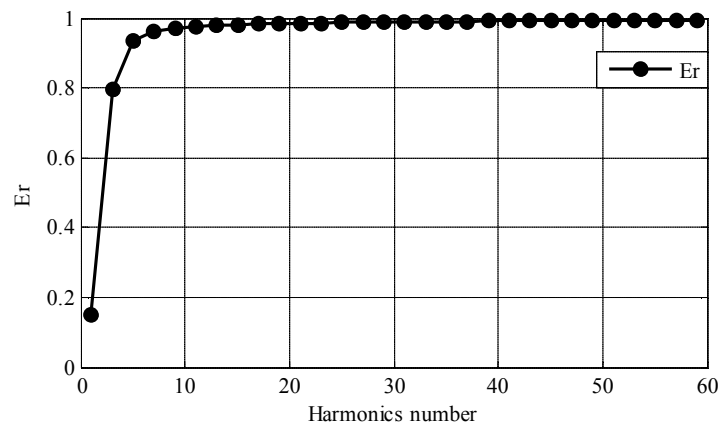
شکل ۴-۶: موقعیت مکانی نقطه به‌دست آمده با استفاده از روش اویلر مکانی.

ز: اعمال روش گرادیان کل نرمال و روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته

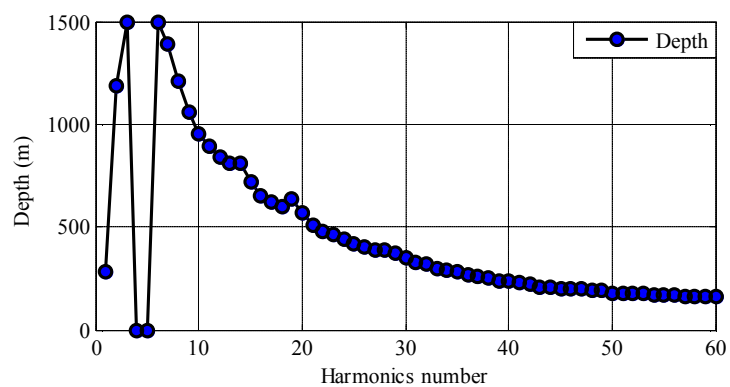
برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال روی داده‌های منطقه، از پروفیل‌های دوگانه موجود در شکل (۴-۳۶) استفاده شد. پروفیل ab با راستای شرقی-غربی با طول ۳۵۲۰ متر و پروفیل cd با راستای شمال شرق-جنوب غرب با طول ۱۸۷۰ متر تهیه شده است. فاصله نمونه‌برداری ۱۰ متر است و

مقادیر گرادیان کل نرمال در راستای پروفیل ab از سطح زمین تا عمق ۱۵۰۰ متر و در راستای پروفیل cd از سطح زمین تا عمق ۱۰۰۰ متر با فواصل یکسان ۱۰ متری محاسبه شده است.

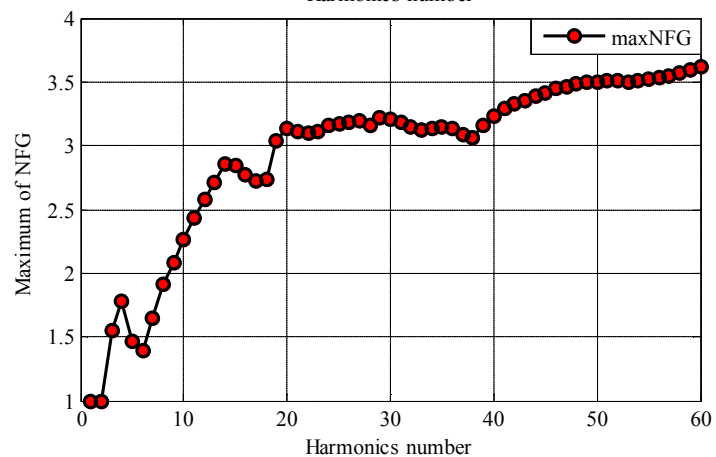
برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز در راستای پروفیل ab مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r (شکل ۴-۴۷-الف)، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۴۷-ب) و تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۴۷-ج) نسبت به مقادیر مختلف N در راستای این پروفیل رسم شد. به وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی‌های E_r و عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل ab براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (با توجه به انطباق مرحله گذار منحنی E_r و قسمت V شکل منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال) عدد ۱۸ و براساس روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال عدد ۲۰ تعیین شد. اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای این پروفیل و مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته (برای ۱۸ هارمونیک) و مقاطع گرادیان کل نرمال (برای ۱۴، ۲۰ و ۲۷ هارمونیک) در شکل (۴-۴۸) نشان داده شده است. با توجه به این مقاطع توده شیب‌دار و حالت دو شاخه دارد و عمق مرکزی توده حدود ۶۰۰ متر برآورد شده است.



(الف)

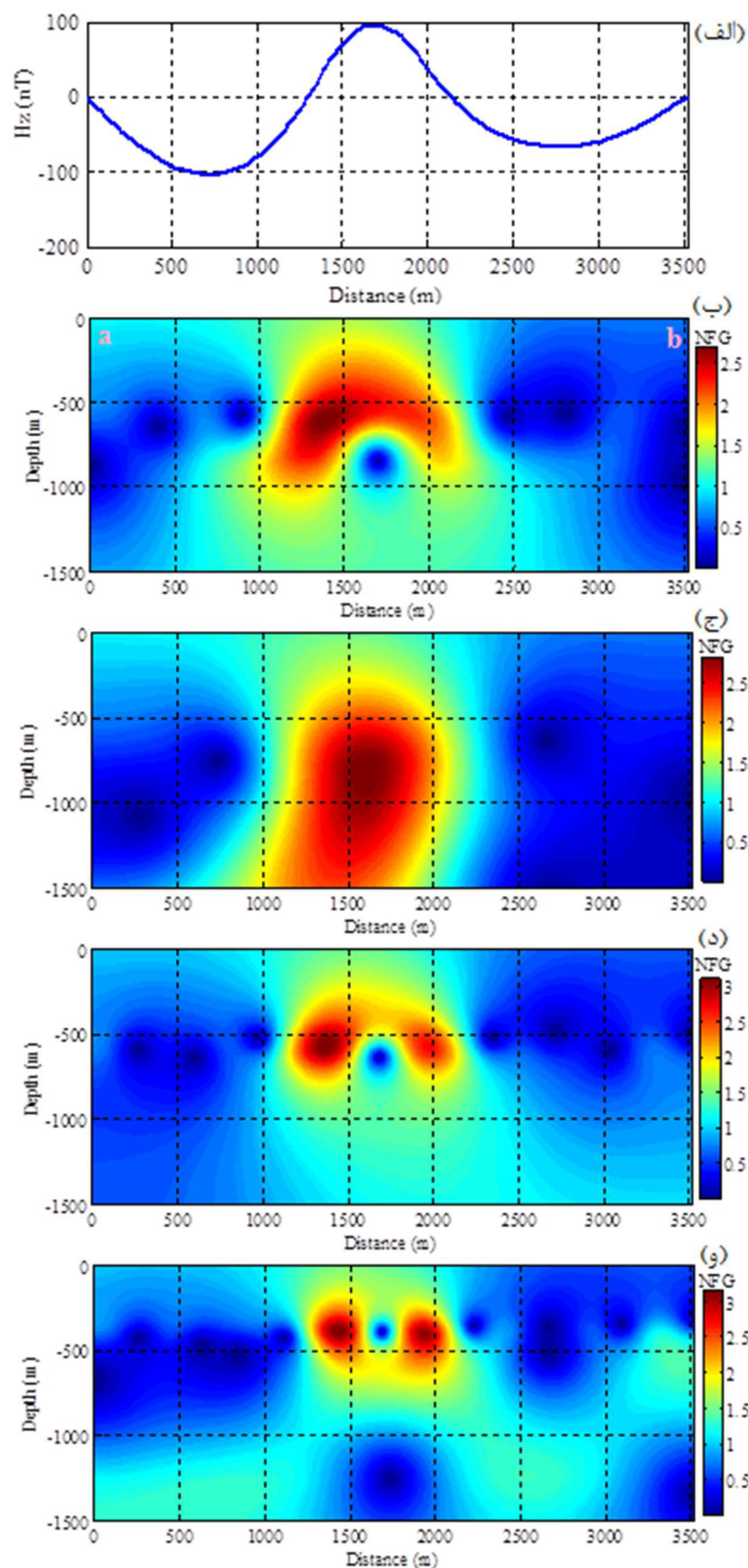


(ب)



(ج)

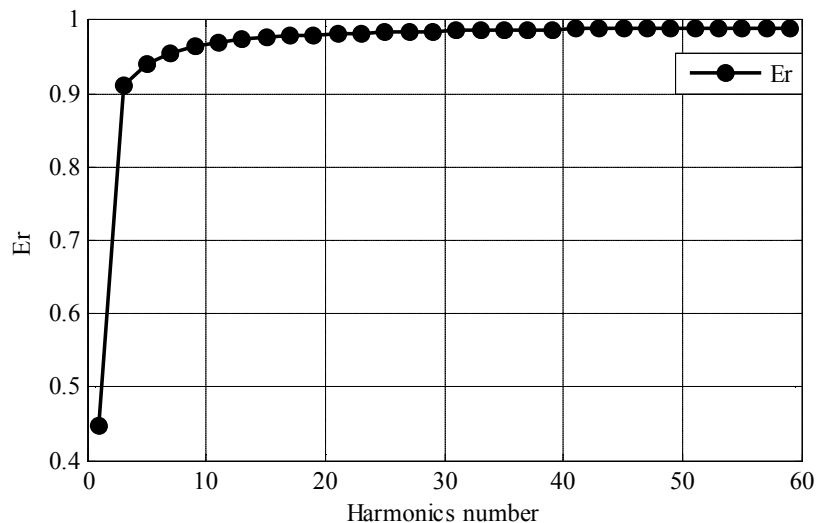
شکل ۴-۴۷: (الف) E_r ، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، (ج) تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، نسبت به مقادیر مختلف N مربوط به بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ab.



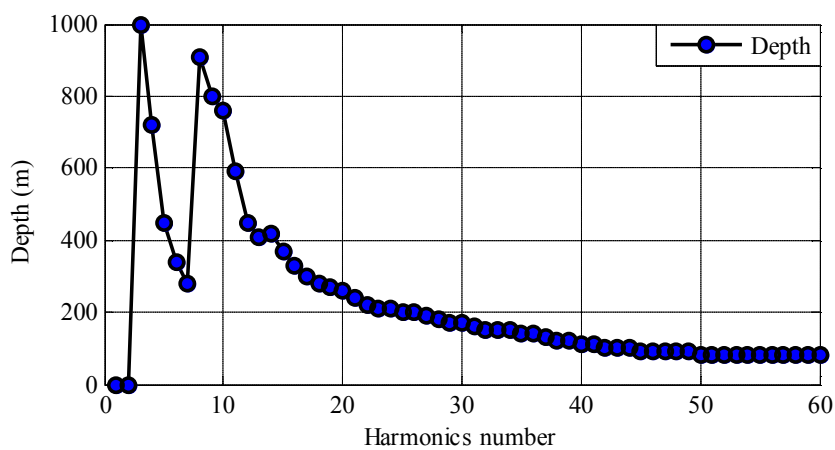
شکل ۴-۴۸: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل ab، (ب) مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته، تعداد جملات هارمونیک ۱۸ می‌باشد، (ج)، (د) و (و) مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال، تعداد جملات هارمونیک ۱۴، ۲۰ و ۲۷ می‌باشد.

برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز در راستای پروفیل cd مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r (شکل ۴-۴۹-الف)، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۴۹-ب) و تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۴۹-ج) نسبت به مقادیر مختلف N در راستای این پروفیل رسم شد. به‌وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی‌های E_r و عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل cd براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته عدد ۷ و براساس روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال عدد ۱۰ تعیین شد. اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای این پروفیل و مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته (برای ۷ و ۱۳ هارمونیک) و مقاطع گرادیان کل نرمال (برای ۱۰ و ۲۸ هارمونیک) در شکل (۴-۵۰) نشان داده شده است. با توجه به این مقاطع که حاصل از تعداد هارمونیک‌های مختلف هستند می‌توان گفت توده شیب‌دار است (با افزایش و کاهش تعداد هارمونیک‌ها علاوه بر جابجایی توده به سمت بالا و پایین، حالت توده نیز تغییر می‌کند) و عمق مرکزی توده با روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته حدود ۳۰۰ و با روش گرادیان کل نرمال حدود ۴۰۰ متر برآورد شده است.

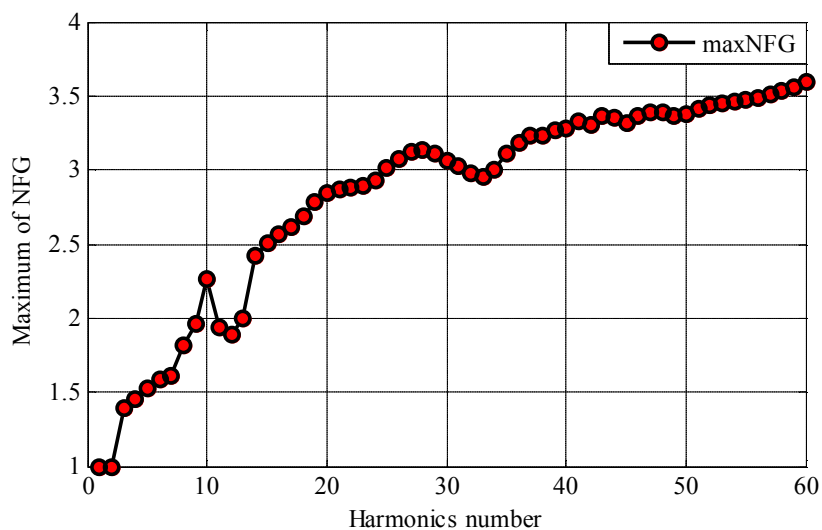
نتایج تخمین عمق به‌دست آمده با استفاده از روش‌های گرادیان کل نرمال و گرادیان کل نرمال بهبودیافته در راستای این دو پروفیل، با نتایج حاصل از روش اویلر استاندارد و اویلر محلی مطابقت دارد. همچنین با توجه به حفاری انجام شده در این منطقه وجود ماده معدنی در منطقه تایید شده است.



(الف)

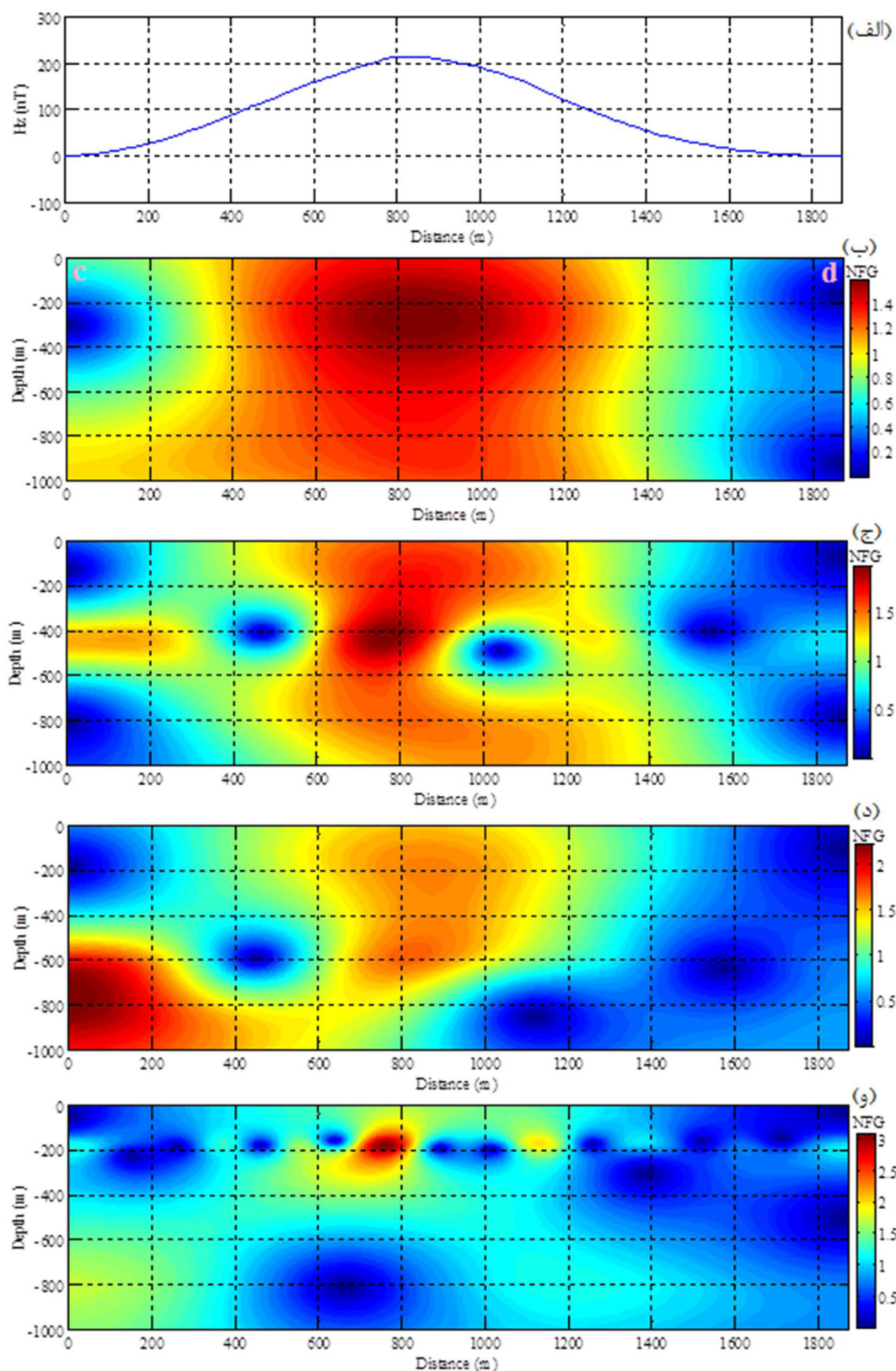


(ب)



(ج)

شکل ۴-۴: (الف) E_r ، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، (ج) تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، نسبت به مقادیر مختلف N مربوط به بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل cd.



شکل ۴-۵: (الف) اثر بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل cd، (ب) و (ج) مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبودیافته، تعداد جملات هارمونیک ۷ و ۱۳ می‌باشد، (د) و (و) مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال، تعداد جملات هارمونیک ۱۰ و ۲۸ می‌باشد.

۴-۴ منطقه اُجت آباد

۴-۴-۱ کلیاتی از منطقه و برداشت داده‌ها

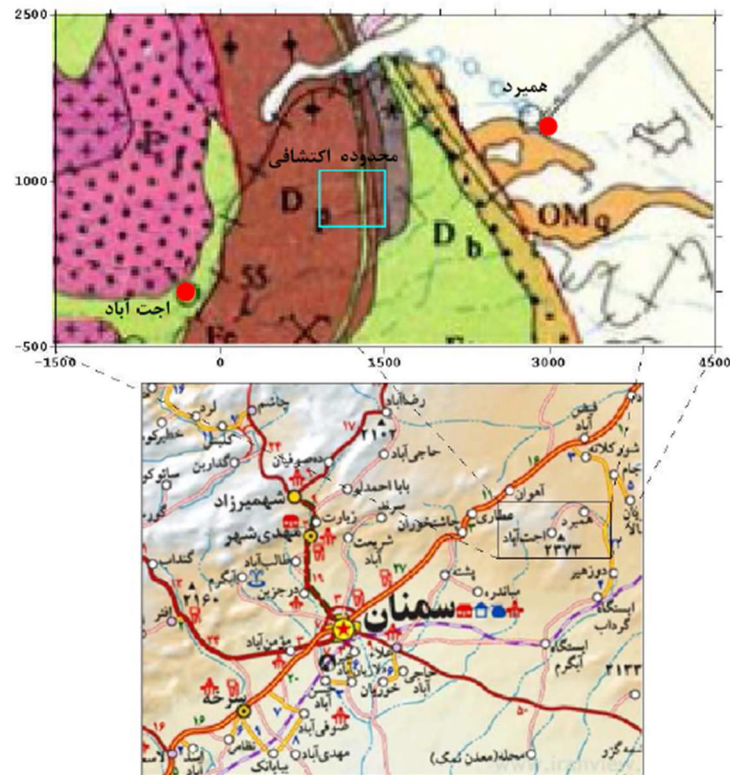
در شمال شرق سمنان یکسری معادن و کانسارهای آهن وجود دارد که برخی از آن‌ها مثل معدن همیرد برای مصارف مورد نیاز کارخانه‌های سیمان بهره‌برداری می‌شود. از جمله کانسارهای منطقه، کانسار اُجت آباد است که به منظور اکتشاف بیشتر تحت بررسی مغناطیس‌سنجی قرار گرفته است. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که در روی این کانسار آثار معدنکاری قدیمی بیش از ۵۰ سال به صورت محدود در دو محل همراه با مقداری دپو از سنگ‌های آهن‌دار استخراج شده وجود دارد و حتی اقدامات اولیه برای کشیدن ریل برای دسترسی به محل و سکوی بارگیری نیز دیده می‌شود. با وجود چنین شواهدی که تلاش برای بهره‌برداری از کانسار فوق را نشان می‌دهد متأسفانه هیچگونه گزارش مدوئی که مربوط به مسائل زمین‌شناسی و اکتشافی آن باشد، وجود ندارد (آقاجانی، ۱۳۸۸).

داده‌های مغناطیسی مورد استفاده در این بخش جهت یک کار تحقیقی در یک دوره آرام مغناطیسی توسط دو دستگاه مگنتومتر پروتون در یک محدوده مربعی با وسعت ۳۶ هکتار در امتداد ۲۳ پروفیل شرقی-غربی و ۳ پروفیل شمالی-جنوبی با فاصله نقاط اندازه‌گیری ۱۵ متر و فواصل پروفیلی ۲۰ متر در یک شبکه‌ی منظم ۵۰۰×۶۰۰ متری برداشت شده است. با چنین آرایش عملیات صحرایی در مجموع بیش از ۱۲۰۰ نقطه مورد برداشت مغناطیس‌سنجی قرار گرفته است. پس از تصحیحات لازم روی داده‌های مغناطیسی برداشت شده مقادیر بی‌هنجاری باقی‌مانده محاسبه شده است (مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵).

۴-۴-۲ موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

کانسار آهن اُجت آباد در ۶۳ کیلومتری شمال شرق سمنان، جنوب شرق روستای اُجت آباد و بین عرض جغرافیایی شمالی ۳۵°۴۲'۴۴" تا ۳۵°۴۳'۱" و طول جغرافیایی شرقی ۵۳°۴۸'۲۳" تا ۵۳°۴۸'۴۶" در بخش جنوبی جاده سمنان-دامغان قرار دارد (شکل ۴-۵۱). از این مسافت، ۳ کیلومتر جاده‌ی

اصلی آبخوری و ۱۰ کیلومتر جاده‌ی خاکی اختصاصی معدن همیرد و ۵۰ کیلومتر جاده‌ی آسفالته‌ی سمنان به دامغان می‌باشد.

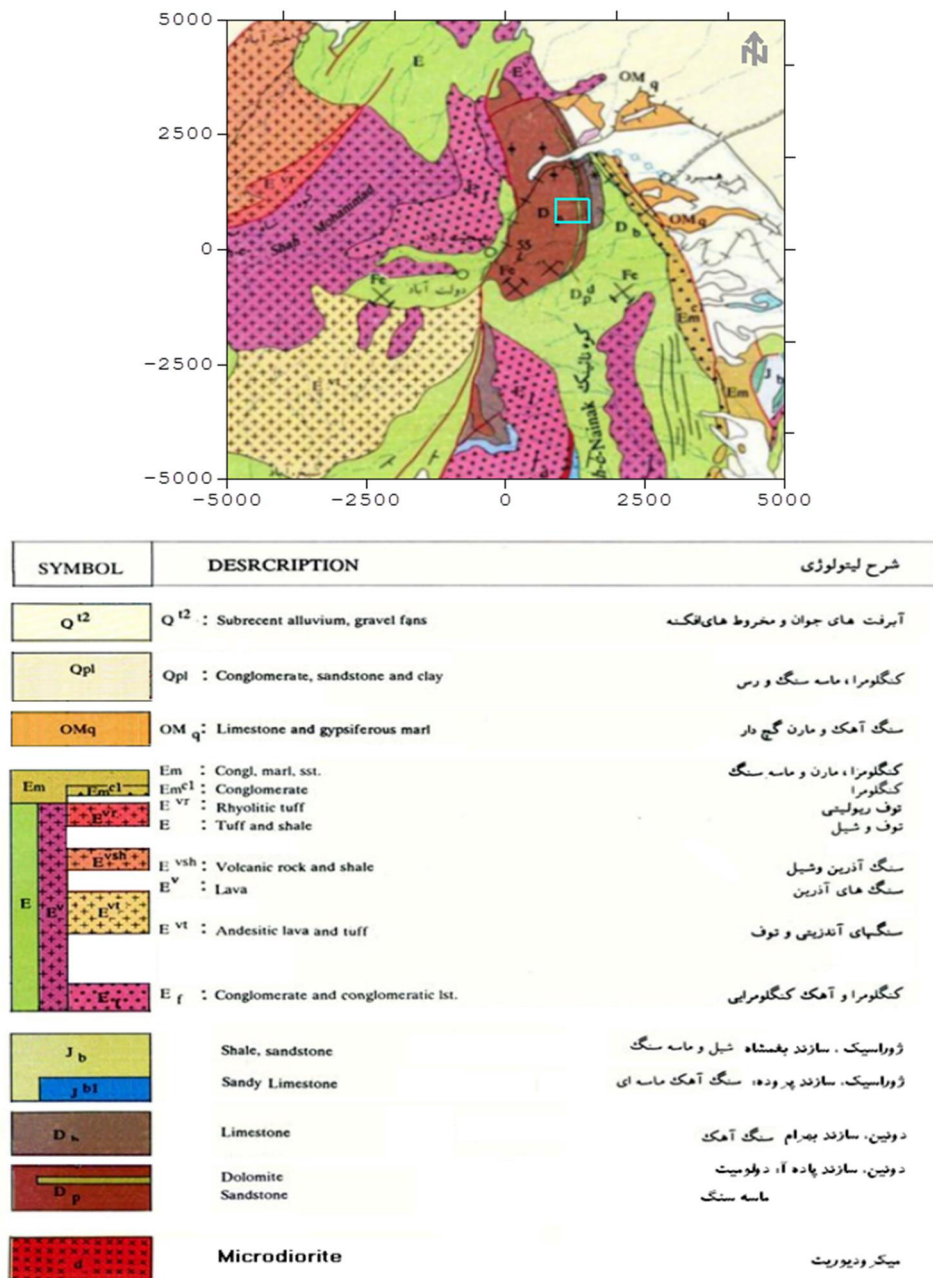


شکل ۴-۵۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده اجت آباد به همراه بخشی از نقشه زمین‌شناسی آن (اقتباس از آقاجانی، ۱۳۸۸).

براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جام (شکل ۴-۵۲)، منطقه کانی‌سازی شده از ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های آهکی دونین تشکیل شده که در اطراف آن سنگ‌های سازند کرج شامل توف، آندزیت و سایر سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی‌های وابسته به ائوسن رخنمون دارند. علاوه بر آن در بخش‌های غربی و جنوبی ناحیه مورد بررسی، گنگلومرا و آهک کنگلومرایی مربوط به سازند فجن با سن ائوسن زیرین دیده می‌شوند. همچنین سنگ‌های نفوذی میکرودیوریت مربوط به ترشیری با وسعت کم در بخش جنوبی منطقه برونزد دارند.

کانی‌سازی آهن در این منطقه عموماً از جنس مگنتیت و هماتیت می‌باشد که احتمالاً می‌تواند در اثر فعالیت‌های گرمایی ناشی از نفوذ سنگ‌های آندزیت- داسیت به داخل رسوبات آهکی، کنگلومرایی و همچنین سیلیس‌های با سن ائوسن باشد. از کانی‌های فرعی همراه ماده‌ی معدنی می‌توان به

سیلیس و باریت اشاره نمود. توده‌های آهن‌دار عموماً به‌صورت رگه و دایک می‌باشند (مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵).

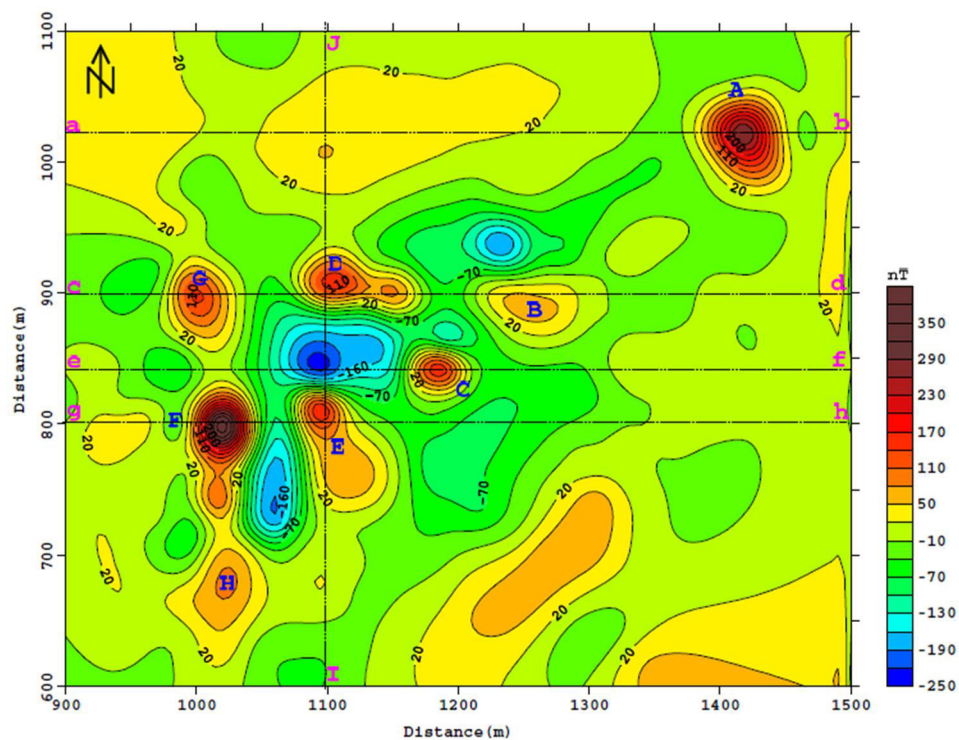


شکل ۴-۵۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه اجت‌آباد، بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ جام (اقتباس از آقاجانی، ۱۳۸۸).

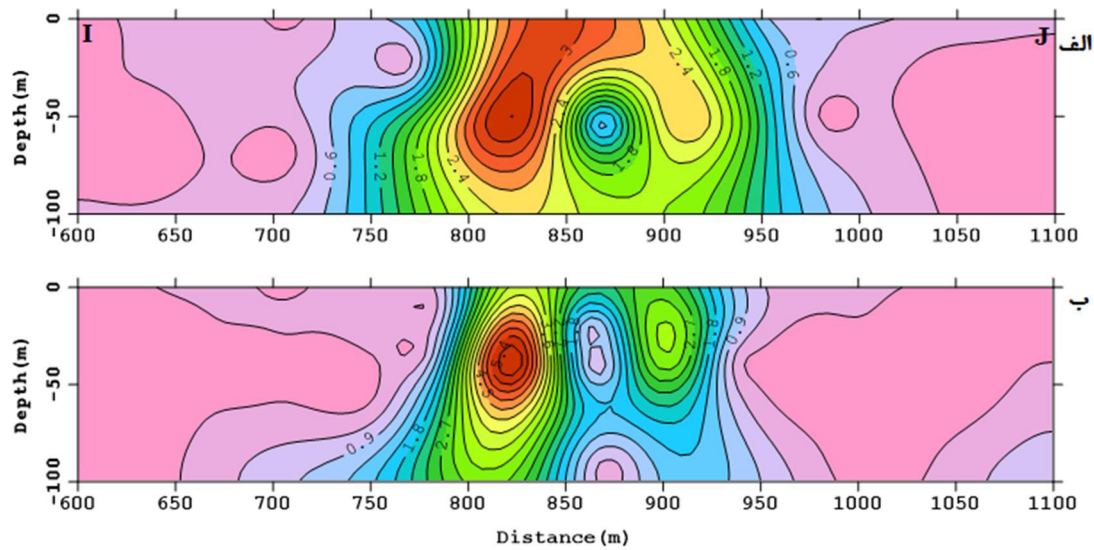
۴-۳ محاسبه گرادیان کل نرمال

در این مطالعه از داده‌های بی‌هنجاری باقی‌مانده مغناطیسی منطقه که به روش روند سطحی با درجه‌ی ۷ تهیه شده جهت تفسیر استفاده می‌شود. شکل (۴-۵۳) نقشه بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده

مغناطیسی حاصل از توده‌های آهن‌دار را پس از حذف اثرات ناحیه‌ای نشان می‌دهد. چندین بی‌هنجاری مثبت (A, B, C, D, E, F, G, H) با منحنی‌های تراز بسته روی نقشه به وضوح قابل رویت هستند. روند عمومی غالب این بی‌هنجاری‌های مغناطیسی شمال شرق - جنوب غرب است. تعدادی پروفیل عمود بر امتداد و روند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در راستای شرقی - غربی و شمالی - جنوبی انتخاب شده که بر روی شکل (۴-۵۳) دیده می‌شوند. مقادیر گرادیان کل نرمال روی این پروفیل‌ها به تفکیک محاسبه گردیده و سپس گرادیان کل نرمال دو بعدی روی این پروفیل‌ها رسم گردیده است (شکل‌های ۴-۵۴ و ۴-۵۵).



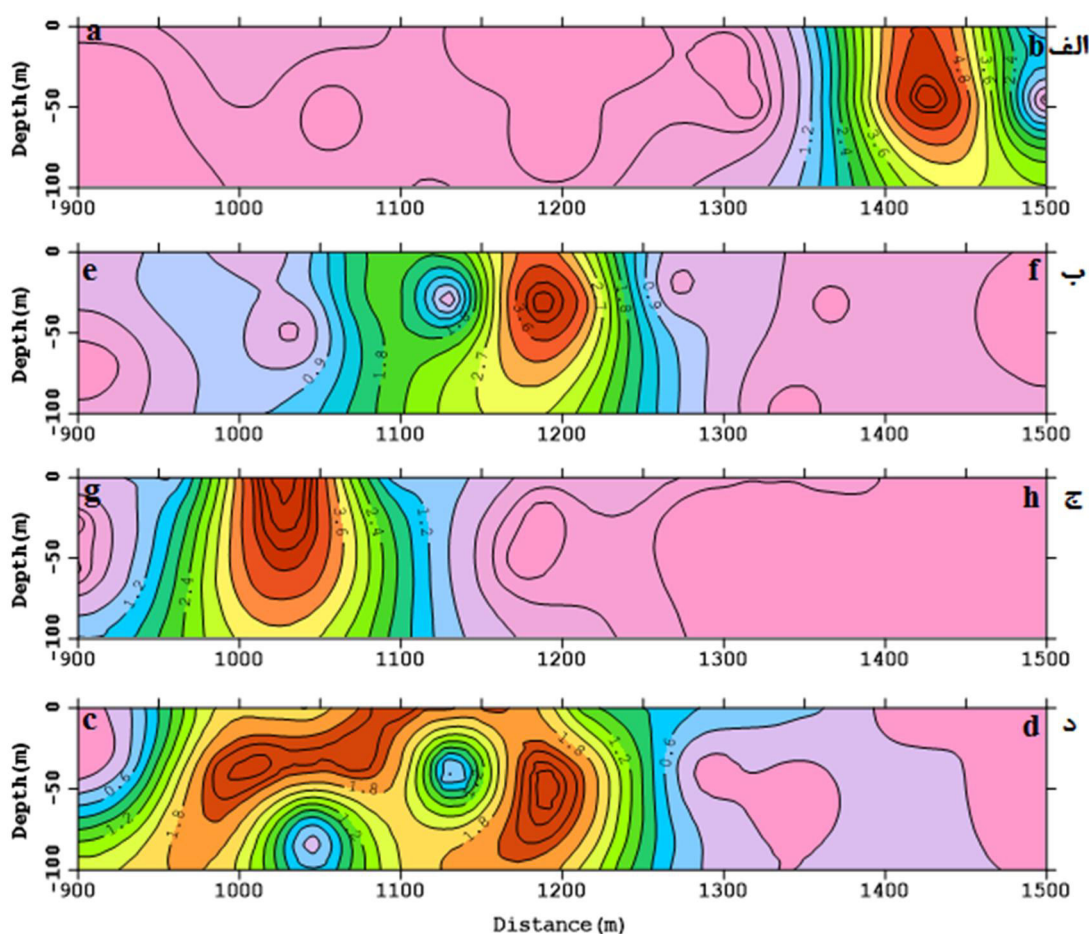
شکل ۴-۵۳: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده مغناطیسی حاصل از روش روند سطحی درجه ۷ همراه با بی‌هنجاری‌های A, B, C, D, E, F, G, H و پروفیل‌ها.



شکل ۴-۵: مقاطع گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای پروفیل I-J گذرنده از بی‌هنجاری‌های E و D، تعداد جملات سری فوریه عدد ۲۵ (الف) و ۴۷ (ب) می‌باشد (اقتباس از آقاجانی، ۱۳۸۸).

براساس روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال، تعداد جملات بهینه‌ی سری فوریه برای محاسبه گرادیان کل نرمال در فضای دو بعدی در راستای پروفیل II عدد ۲۵ تعیین شده است. با توجه به طول پروفیل (۵۰۰ متر) بیشترین و مناسب‌ترین عمق اکتشاف کمتر از ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. در این پروفیل دو محدوده بیشینه نشان دهنده موقعیت و محل تقریبی بی‌هنجاری‌های E و D می‌باشند که این دو بی‌هنجاری احتمالاً در بخش بالایی با هم مرتبط بوده‌اند و احتمالاً در اثر فرسایش شاید بخش روپی از بین رفته است.

بررسی شکل‌های (۴-۵۴) و (۴-۵۵) نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه روی پروفیل‌ها به وسیله مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال مشخص شده است. موقعیت مقادیر بیشینه برای کلیه بی‌هنجاری‌ها نشان می‌دهد که گسترش عمقی آن‌ها از سطح زمین (بی‌هنجاری‌های F و D) تا ۷۰ متری (بی‌هنجاری‌های A و B) است (آقاجانی، ۱۳۸۸).



شکل ۴-۵۵: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری‌های مغناطیسی کانسار آهن اجت‌آباد، (الف) پروفیل a-b گذرنده از بی‌هنجاری A، (ب) پروفیل e-f گذرنده از بی‌هنجاری C، (ج) پروفیل g-h گذرنده از بی‌هنجاری‌های E و F (د) پروفیل c-d گذرنده از بی‌هنجاری‌های B، D و G، تعداد جملات سری فوریه مورد استفاده عدد ۲۵ می‌باشد. محدوده‌ی تیره رنگ (قهوه‌ای) محل بی‌هنجاری‌ها می‌باشد (اقتباس از آقاجانی، ۱۳۸۸).

به این ترتیب گفته شده که بی‌هنجاری‌های منطقه سطحی بوده و از ریشه زیادی برخوردار نیستند و به این ترتیب با در نظر گرفتن گسترش سطحی هر کدام از آن‌ها بر روی نقشه بی‌هنجاری‌ها (شکل ۴-۵۵) بزرگی هر کدام از بی‌هنجاری‌ها تا حدودی تخمین زده شده است.

مطابق شکل‌های (۴-۵۴) و (۴-۵۵) گسترش عمقی بی‌هنجاری D از بقیه بی‌هنجاری‌ها کمتر و احتمال این که بی‌هنجاری‌های B، D و G به‌طور پیوسته یک بی‌هنجاری را تشکیل دهند می‌باشد که در بخش زیرین آن‌ها توسط سنگ میزبان با مغناطیس شونده‌گی کمتر دیده شده است. نتایج

تخمین عمق این بی‌هنجاری‌ها با روش گرادیان کل نرمال در جدول (۲-۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که کانسار به‌طور کلی از ریشه و ذخیره‌ی زیادی برخوردار نبوده است (آقاجانی، ۱۳۸۸).

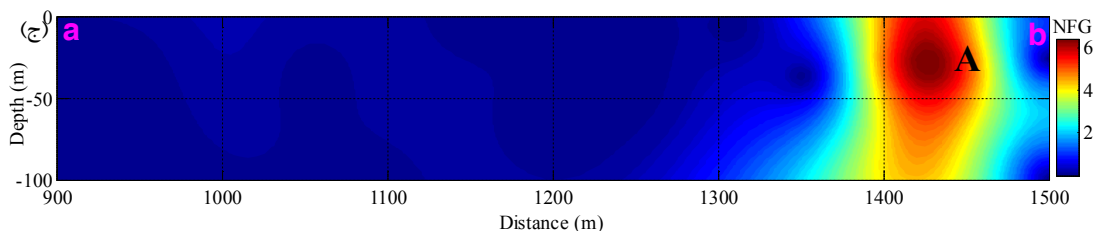
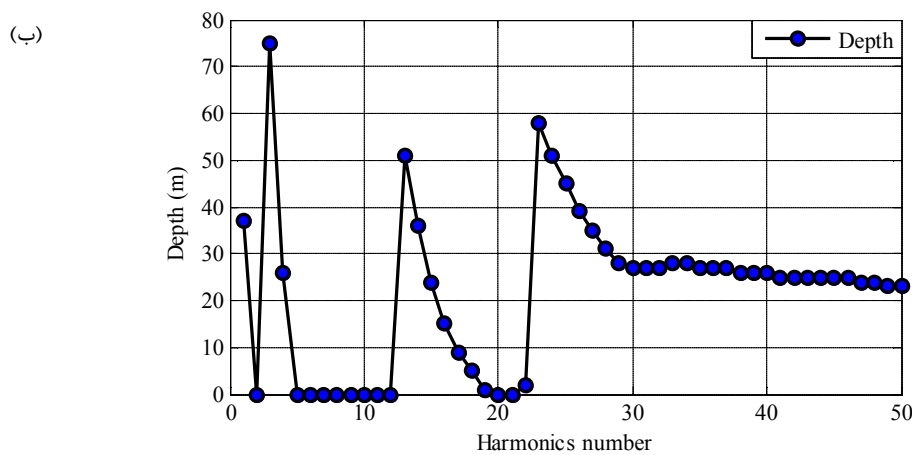
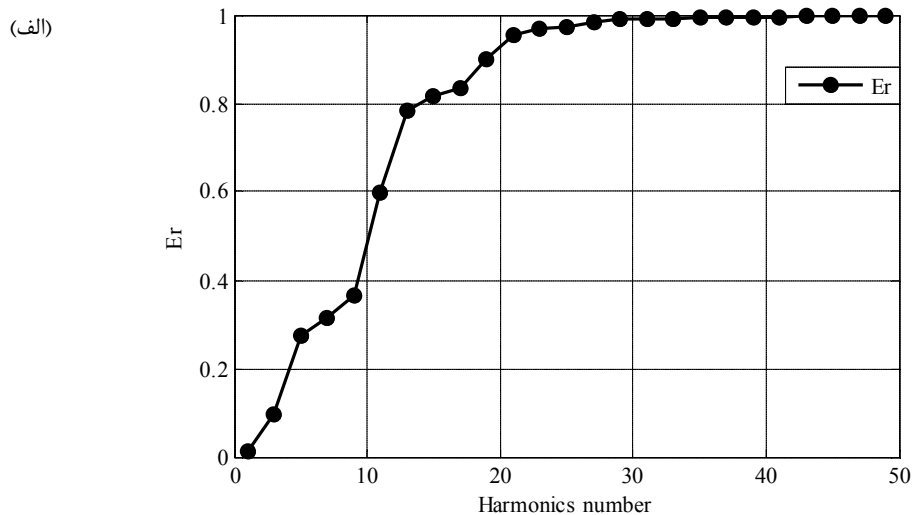
جدول ۴-۲: نتایج تخمین عمق به روش گرادیان کل نرمال دو بعدی.

نام بی‌هنجاری	G	F	E	D	C	B	A
حدود عمق مرکزی (متر)	۳۵	۲۰	۳۸	۲۵	۳۲	۵۰	۴۵

۴-۴-۴ محاسبه گرادیان کل نرمال بهبودیافته

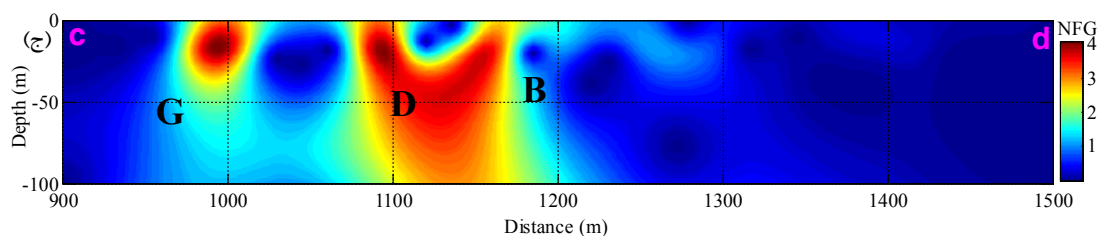
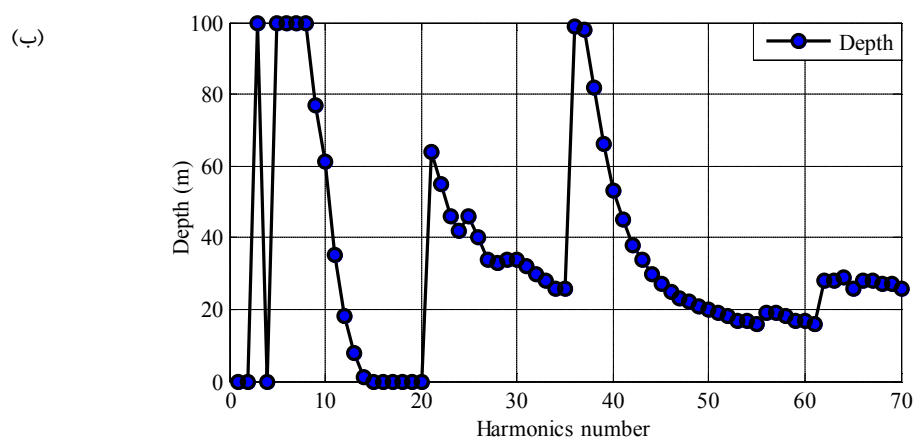
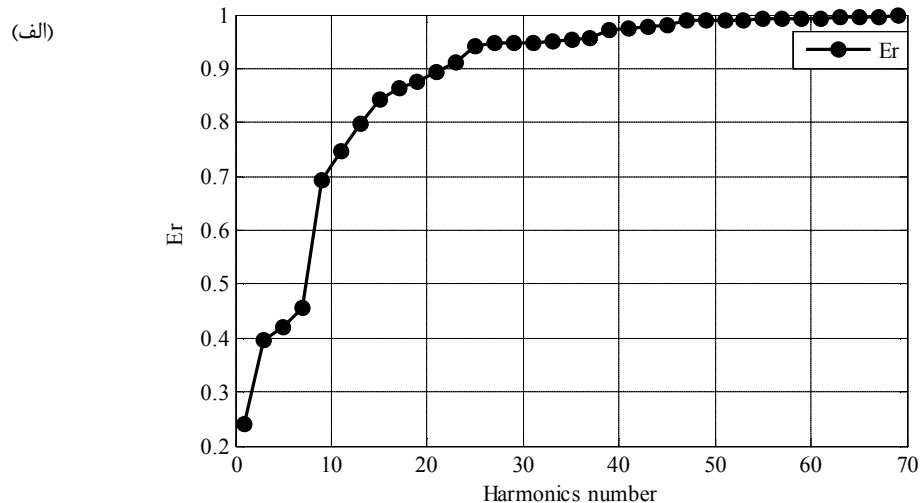
در این قسمت روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته بر روی پنج پروفیل مشخص شده در شکل (۴-۵۳) اعمال شده است. ابتدا برای هر کدام از پروفیل‌ها برای تعیین تعداد هارمونیک‌های مورد نیاز در راستای پروفیل مقادیر E_r محاسبه و منحنی‌های E_r ، عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال و تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به مقادیر مختلف N در راستای هر پروفیل رسم شد. سپس به‌وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی‌های E_r و عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (با توجه به انطباق مرحله گذار منحنی E_r و قسمت V شکل منحنی عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال) تعیین شد و مقادیر گرادیان کل نرمال بهبودیافته در هر پروفیل تا عمق ۱۰۰ متر و در ۱۰۱ لایه با فواصل یکسان محاسبه شد.

براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (شکل‌های ۴-۵۶ الف-ب)، تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل ab عدد ۳۰ تعیین شد. در مقطع شکل (۴-۵۶ ج) محدوده بیشینه نشان دهنده موقعیت بی‌هنجاری A می‌باشد که می‌توان گفت این بی‌هنجاری در سطح زمین رخنمون دارد و تا حدود ۷۰ متر گسترش دارد.



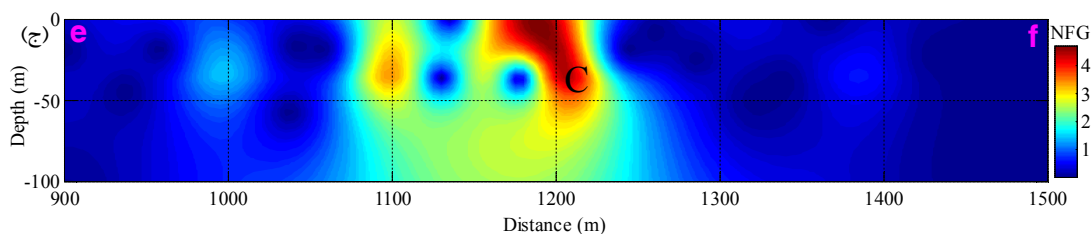
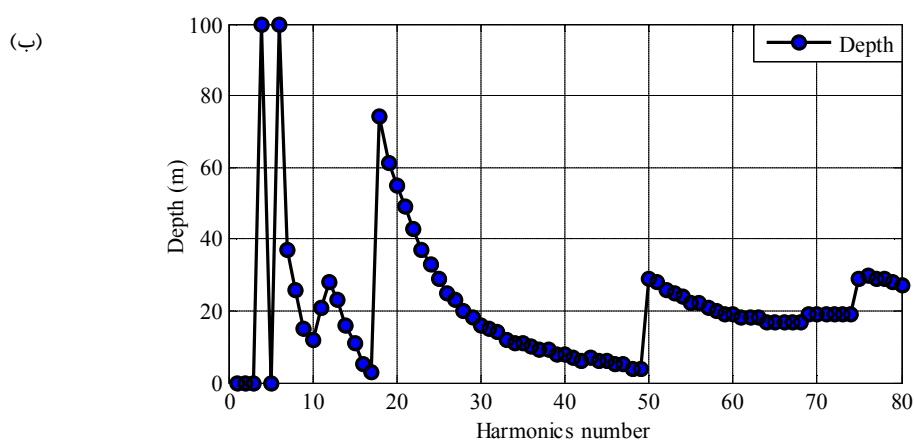
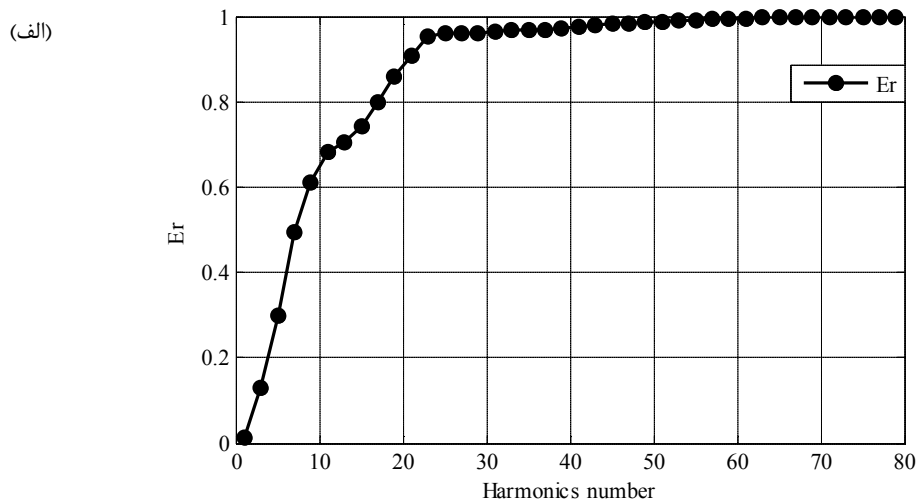
شکل ۴-۵۶: (الف) نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ج) مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی، در راستای پروفیل ab گذرنده از بی‌هنجاری A، تعداد هارمونیک‌ها عدد ۳۰ می‌باشد.

براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (شکل‌های ۴-۵۷ الف-ب)، تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل cd عدد ۵۵ تعیین شد. در مقطع شکل (۴-۵۷ ج) محدوده‌های بیشینه نشان دهنده موقعیت بی‌هنجاری G، B و D می‌باشد که می‌توان گفت احتمالاً این بی‌هنجاری‌ها در سطح زمین رخنمون دارند. بی‌هنجاری G تا حدود ۵۰ متر گسترش دارد و بی‌هنجاری‌های D و B در قسمت زیرین به هم متصل بوده و تا ۸۰ متری گسترش دارند.



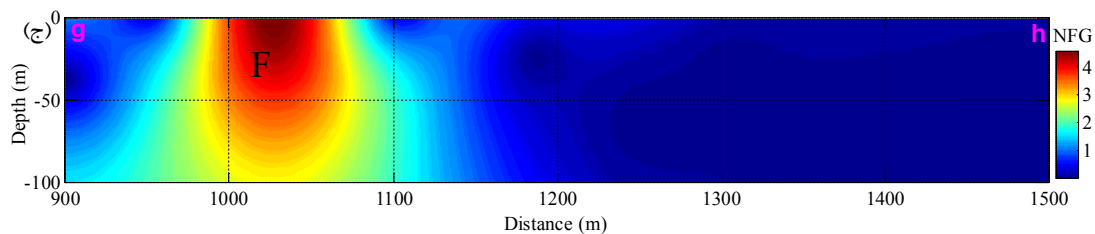
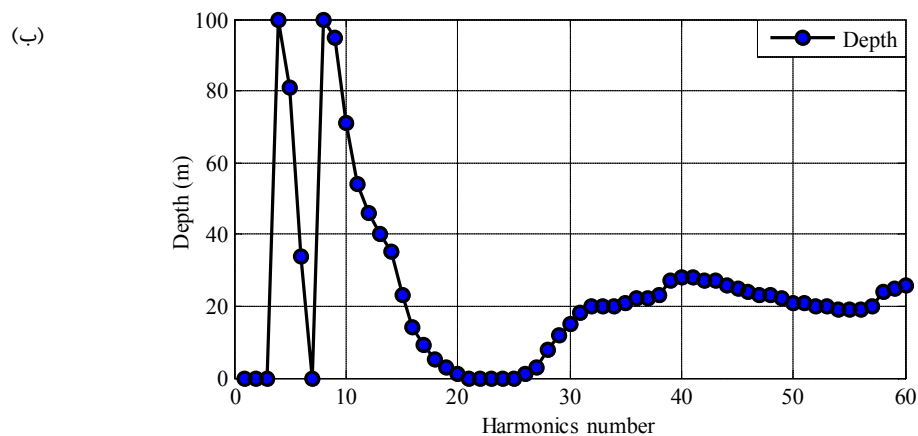
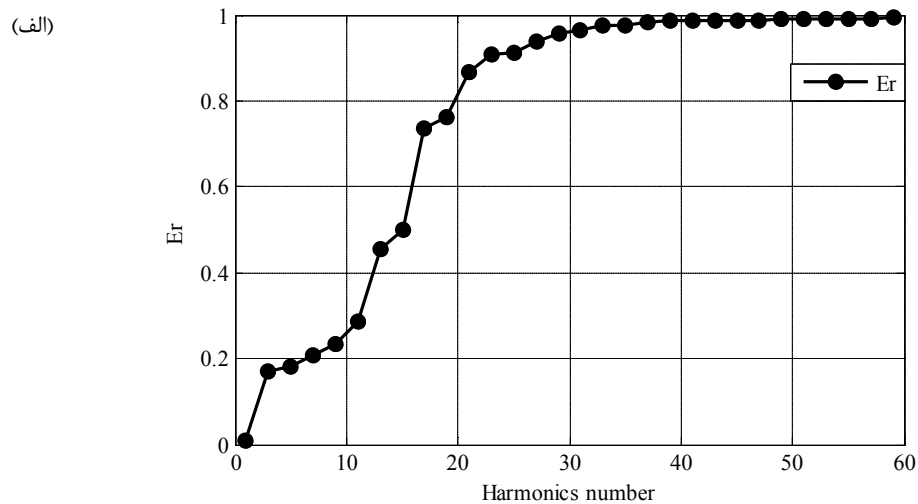
شکل ۴-۵۷: (الف) E_r نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ج) مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی، در راستای پروفیل cd گذرنده از بی‌هنجاری‌های G، D و B، تعداد هارمونیک‌ها عدد ۵۵ می‌باشد.

براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (شکل‌های ۴-۵۸ - الف - ب)، تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل ef عدد ۴۸ تعیین شد. در مقطع شکل (۴-۵۸ - ج) محدوده بیشینه نشان دهنده موقعیت بی‌هنجاری C می‌باشد که این بی‌هنجاری در سطح زمین رخمون دارد و تا حدود ۶۰ متر گسترش دارد.



شکل ۴-۵۸: (الف) E_r نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ج) مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی، در راستای پروفیل ef گذرنده از بی‌هنجاری C، تعداد هارمونیک‌ها عدد ۴۸ می‌باشد.

براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (شکل‌های ۴-۵۹ - الف - ب)، تعداد هارمونیک‌های بهینه در راستای پروفیل gh عدد ۲۱ تعیین شد. در مقطع شکل (۴-۵۹ - ج) محدوده بیشینه نشان دهنده موقعیت بی‌هنجاری F می‌باشد که بخشی از این بی‌هنجاری در اثر فرسایش از بین رفته و بی‌هنجاری تا حدود ۵۰ متر گسترش دارد.



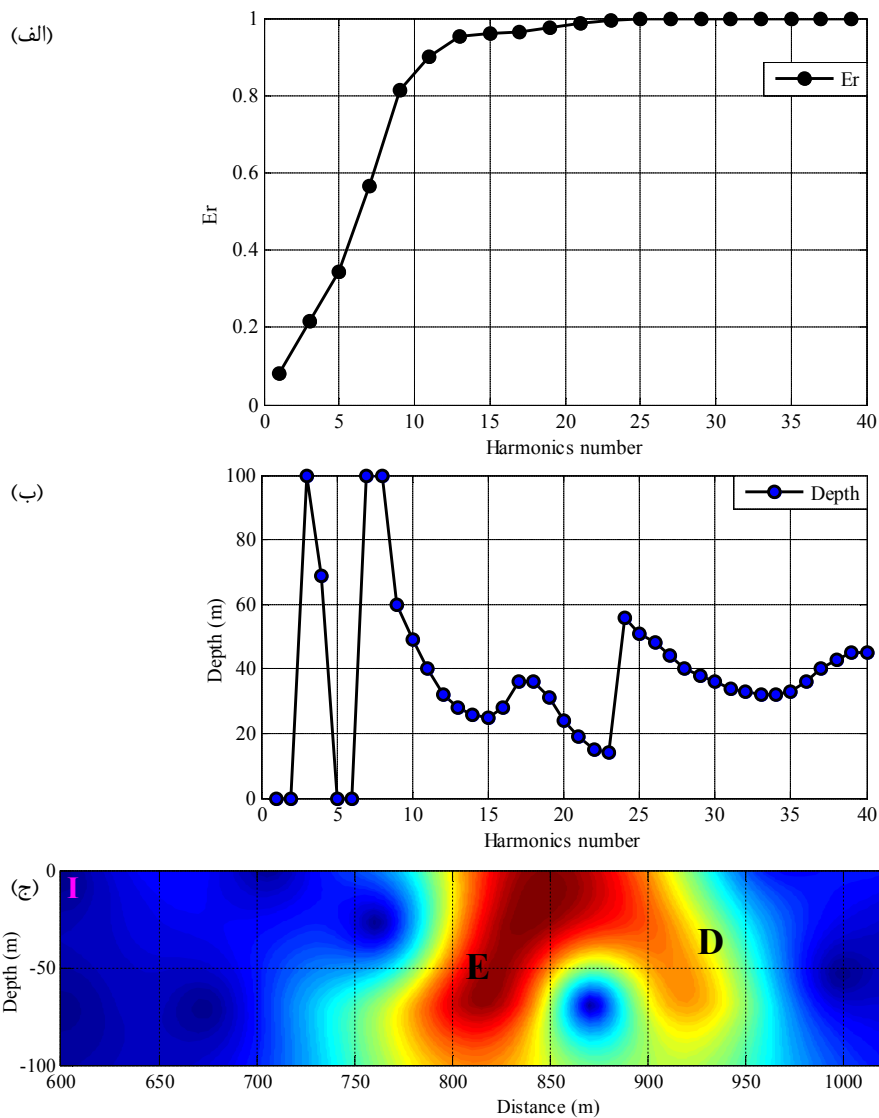
شکل ۴-۵۹: (الف) E_r نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ج) مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی، در راستای پروفیل gh گذرنده از بی‌هنجاری‌های E و F، تعداد هارمونیک‌ها عدد ۲۱ می‌باشد.

براساس روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته (شکل‌های ۴-۶۰ - الف - ب)، تعداد هارمونیک‌های

بهینه در راستای پروفیل ij عدد ۲۳ تعیین شد. در مقطع شکل (۴-۵۹ - ج) محدوده‌های بیشینه

نشان دهنده موقعیت بی‌هنجاری‌های E و D می‌باشد که این بی‌هنجاری‌ها در سطح زمین رخنمون

دارد و به‌طور پیوسته یک بی‌هنجاری را تشکیل می‌دهند و تا حدود ۸۰ متری گسترش دارند.



شکل ۴-۶: (الف) E_r نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ب) عمق تخمینی مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک، (ج) مقطع گرادیان کل نرمال بهبودیافته بی‌هنجاری مغناطیسی، در راستای پروفیل ij گذرنده از بی‌هنجاری‌های D و E، تعداد هارمونیک‌ها عدد ۲۳ می‌باشد.

نتایج تخمین عمق این بی‌هنجاری‌ها با روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته در جدول (۴-۳) ارائه شده است. نتایج حاصل از این روش بیانگر این است که کانسار آهن اُجت‌آباد در نزدیکی سطح زمین بوده و به‌طور کلی از ریشه و ذخیره زیادی برخوردار نبوده است.

جدول ۴-۳: نتایج تخمین عمق به روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته دو بعدی.

A	B	C	D	E	F	G	نام بی‌هنجاری
۴۰	۴۵	۳۰	۳۰	۳۵	۲۵	۲۵	حدود عمق مرکزی (متر)

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری

- با اعمال روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته روی مدل های مصنوعی و داده های واقعی این نتیجه حاصل شد که این روش روی داده هایی که بی هنجاری حالت مجزا داشته باشد و تأثیر متقابل بی هنجاری ها نباشد، بهتر جواب می دهد.
- با روش گرادیان کل نرمال تخمین عمق به خوبی انجام می شود و نتایج قابل قبولی به دست می آید همچنین محدوده بی هنجاری با استفاده از این روش به خوبی به دست می آید.
- با توجه به مقایسه ای که انجام شد روش گرادیان کل نرمال که با استفاده از روش بیشینه نسبی تعداد هارمونیک های بهینه محاسبه می شود در حالت هایی که بی هنجاری های چندتایی وجود دارد تا حدود زیادی بهتر از روش گرادیان کل نرمال بهبودیافته جواب می دهد.
- با استفاده از روش ENFG توده اصلی در منطقه شادان که در قسمت جنوب شرق قرار دارد تا ۳۰۰ متری گسترش دارد که این با نتایج حاصل از تخمین عمق روش اوپلر و همچنین اطلاعات حاصل از حفاری در منطقه مطابقت دارد.
- نتایج تخمین عمق با استفاده از روش ENFG در منطقه جلال آباد حاکی از آن است که توده بی هنجار شیب دار است و گسترش عمقی زیادی دارد و مرکز آن در حدود ۶۰۰ متر قرار دارد. که این نتیجه با نتایج حاصل از تخمین عمق روش اوپلر و همچنین اطلاعات حاصل از حفاری در منطقه مطابقت دارد.

۵-۲ پیشنهادات

- در منطقه شادان تعدادی گمانه حفاری شده است که عمدتاً در قسمت جنوب شرقی محدوده قرار دارند، عیار ماده معدنی در بعضی از گمانه ها بالا بوده است. پیشنهاد می شود براساس نقشه بی هنجاری باقی مانده حاصل از روش فراسو و موقعیت قرارگیری گمانه های دارای عیار بالا،

گمانه‌های بیشتری در محدوده حفاری شود که مختصات نقاط پیشنهادی برای عملیات حفاری در جدول (۱-۵) آورده شده است.

جدول ۱-۵: مختصات نقاط پیشنهادی جهت عملیات حفاری.

BH	X	Y	BH	X	Y	BH	X	Y
۱	۶۸۶۳۰۰	۳۵۸۱۰۰۰	۶	۶۸۵۶۵۰	۳۵۸۱۶۱۱	۱۱	۶۸۵۳۱۳	۳۵۸۲۳۱۵
۲	۶۸۵۸۱۱	۳۵۸۱۳۷۵	۷	۶۸۵۷۷۰	۳۵۸۱۸۱۱	۱۲	۶۸۵۶۳۴	۳۵۸۲۱۷۱
۳	۶۸۵۷۰۵	۳۵۸۱۴۱۶	۸	۶۸۵۱۱۵	۳۵۸۱۹۶۱	۱۳	۶۸۵۳۱۱	۳۵۸۲۳۱۱
۴	۶۸۵۶۴۸	۳۵۸۱۴۸۷	۹	۶۸۵۱۵۰	۳۵۸۲۲۰۹	۱۴	۶۸۵۴۱۰	۳۵۸۲۴۲۳
۵	۶۸۴۵۶۸	۳۵۸۲۵۶۱	۱۰	۶۸۴۷۶۶	۳۵۸۲۴۹۶	۱۵	۶۸۴۸۶۱	۳۵۸۲۸۹۵

- با توجه به اینکه در منطقه جلال‌آباد گمانه تا عمق ۲۵۰ متر حفر شده است پیشنهاد می‌شود گمانه‌هایی با عمق بیشتر در محدوده حفر شود. یک نقطه پیشنهادی جهت حفاری مرکز بی‌هنجاری مثبت موجود در نقشه باقی‌مانده حاصل از روند سطح درجه ۲ است که دارای مختصات $X=445172$ و $Y=3433414$ است.
- برای بررسی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل می‌توان همزمان از چند نوع روش استفاده کرد که بتوان جواب‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتری به‌دست آورد.

منابع

آقاجانی ح.، (۱۳۸۸)، "رساله دکتری: بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله‌های نفتی"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

آقاجانی، ح.، مرادزاده، ع.، و زنگ، ه.، (۱۳۸۹)، "برآورد موقعیت افقی و ژرفای بی‌هنجاری‌های گرانی به کمک گرادیان کل بهنجار شده"، **مجله علوم زمین**، سال نوزدهم، شماره ۷۶، ص ۱۶۹-۱۷۶.

جمشیدی، خ.، و محبی، ا. ر.، (۱۹۹۶)، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ راور"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

حسین‌زاده، حسن.، (۱۳۹۶)، "پایان‌نامه کارشناسی ارشد: تهیه نقشه پتانسیل مس-طلا و طراحی نقاط حفاری تکمیلی با بکارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین در کانسار مس-طلای شادان، خراسان جنوبی"، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند.

روشندل کاهو، ا.، و 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، ص ۹-۱.

ژولیده‌سر، ف.، و مصطفایی، ک.، (۱۳۹۳)، "طرح پژوهشی: اکتشاف گرانی‌سنجی در محدوده معدن جلال‌آباد، سنگ آهن ایران مرکزی، شهرستان زرنده-استان کرمان".

عابدی، م.، افشار، ا.، ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، و نوروزی، غ. ح.، (۱۳۹۱)، "تفسیر بی‌هنجاری‌های گرانی توده‌های کم عمق با استفاده از روش گرادیان کامل نرمال شده"، **مجله فیزیک زمین و فضا**، دوره ۳۸، شماره ۲، ص ۱۰۷-۱۲۱.

عابدی، م.، افشار، ا.، نوروزی، غ. ح.، و ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، (۱۳۹۰)، "تفسیر بی‌هنجاری مغناطیسی معدن مروارید زنجان با استفاده از روش گرادیان کامل نرمال"، **مجله ژئوفیزیک ایران**، جلد ۵، شماره ۲، ص ۱-۱۵.

کلاغری، ع. ا.، (۱۳۸۹)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، تبریز، ص ۴۸۳.

مرادزاده، ع.، و دولتی ارده‌جانی، ف.، (۱۳۸۵)، "طرح پژوهشی: اکتشاف و مدلسازی مغناطیسی کانسار آهن اجت‌آباد سمنان"، دانشگاه صنعتی شاهرود، ص ۸۱.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، "نقشه‌ی عمومی جمهوری اسلامی ایران ۱:۱,۰۰۰,۰۰۰".

- Abdelrahman, E. M., Bayoumi, A. I., Abdelhady, Y. E., Gobashy, M. M., and El-Araby, H. M., 1989, Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies: *Geophysics*, 54, 1614-1621.
- Abedi, M., Asghari, O., and Norouzi, G. H., (2014), "Collocated cokriging of iron deposit based on a model of magnetic susceptibility: a case study in Morvarid mine, Iran", *Arab J. Geosci.*
- Abedi, M., Hafizi, M. K., and Norouzi, G. H., (2012), "2D interpretation of self-potential data using Normalized Full Gradient, a case study: galena deposit", *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 53, No. 2, 213-230.
- Aghajani, H., and Moradzadeh, A., (2007), "Detection of iron deposits by normalized full gradient method: Ojatabad deposit, Iran", 7th international scientific conference SGEM 2007, Albena Co., Bulgaria, No. 31-7173, 59 (1-7).
- Aghajani, H., and Moradzadeh, A., (2008), "Salt domes depth estimation using normalized full gradient of gravity data", 21th World Mining Congress & Expo, Poland, 11-19.
- Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H., (2009a), "Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly Method and Its Application to the Mobrun Sulfide Body, Canada", *World Applied Sciences*, Vol. 6, No.3, 393-400.
- Aghajani, H., Moradzadeh, A., Aydin, A., and Tabatabaei, S. H., (2009b), "Using normalized full gradient method to interpret gravity anomalies on synthetic and field data", The 9th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Vol. 1, 725-734.
- Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H., (2009c), "Determining of Optimum the Length of Profile in Normalized Full Gradient Method", 1st EAGE International Petroleum Conference and Exhibition, Shiraz, Iran.
- Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H., (2009d), "Estimation of Depth to Salt Domes from Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly and Examples from the USA and Denmark", *Earth Science*, Vol. 20, No. 6, 1012-1016.
- Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H., (2010), "Estimation of horizontal and depth of gravity anomalies using normalized full gradient", *Geoscience journal*, Vol. 19, No. 76, 169-176.
- Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H., (2011), "Detection of High-Potential Oil and Gas Fields Using Normalized Full Gradient of Gravity Anomalies: A Case Study in the Tabas Basin, Eastern Iran", *Pure and Applied Geophysics*, vol. 168, 1851-1863.
- Arkani, H., J., (1988), "Differential reduction-to-the-pole of regional magnetic anomalies", *Geophysics*, Vol. 53, No. 12, 1592-1600.
- Aydin, A., (2005), "Evaluation of Gravity Anomalies by Direct Interpretation Techniques: An Application from Hasankale- Horasan Region", *Journal of Engineering Sciences*, 11(1): 95–102.
- Aydin, A., (2007), "Interpretation of gravity anomalies with the normalized full gradient (NFG) method and an example", *Pure Appl. Geophys.*, 164, 2329–2344.

- Aydin, A., (2009), "Application of the Normalized Full Gradient (NFG) Method to Resistivity Data", *Turkish Journal of Earth Sciences*, Vol. 19, 2010, 513–526.
- Berezkin, W. M., (1967), "Application of the full vertical gravity gradient to determination to sources causing gravity anomalies", *Expl. Geophys.*, 18, 69-76 (in Russian).
- Berezkin, W. M., (1973), "Application of gravity exploration to reconnaissance of oil and gas reservoir", Nedra Publishing House (in Russian).
- Berezkin, W. M., (1988), "Method of the total gradient in geophysical prospecting", 180p. Nedra, Moscow (in Russian).
- Berezkin, V. M., and Buketov A. P., (1965), "Application of the Harmonical Analysis for the Interpretation of Gravity Data", *Applied Geophys.*, 46, 161-166 (in Russian).
- Berezkin, V. M., Filatov, V. G., and Bulychev, E. V., (1994), "Methodology of the aeromagnetic data interpretation with the aim of direct detection of oil and gas deposits (in Russian)", *Geofizika.*, 5, 38-43.
- Blakely, J. R., (1996), "**Potential theory in gravity and magnetic applications**", Cambridge University Press, 441 p.
- Boschetti, F., Hornby, P., and Horowitz, F. G., (2001), "Wavelet based inversion of gravity data", *Exploration Geophysics*, No. 32, 48-55.
- Dobrin, Miltin B., and Savit, Carl H., (1988), "**introduction to geophysical prospecting**", 4th edition, Mc. Graw- Hill Book Company.
- Dondurur, D., (2005), "Depth estimates for Sling ram electromagnetic anomalies from dipping sheet-like bodies by the normalized full gradient method", *Pure Appl. Geophys.*, 162, 2179–2195.
- Ebrahimzadeh Ardestani, V., (2004), "Detection of near-surface anomalies through 2D normalized full gradient of gravity data", *J. Earth & Space Physics.*, No. 30, 1-6.
- Ekinçi, Y. L., and Yigitbas, E., (2013), "A geophysical approach to the igneous rocks in the Biga Peninsula (NW Turkey) based on airborne magnetic anomalies", *geological implications, Geodinamica Acta*, Vol. 25, Nos. 3–4, 267–285.
- Elysseieva, I. S., and Pasteka, R., (2009), "Direct interpretation of 2D potential fields for deep structures by means of the quasi-singular points method", *Geophysical prospecting*, No. 57, 683-705.
- Fedi, M., and Florio, G., (2011), "Normalized downward continuation of potential fields within the quasi-harmonic region", *Geophys. Prospect*, No. 59, 1087–1100.
- Fedi, M., and Florio, G., (2015), "Depth estimation from downward continuation: an entropy-based approach", SEG New Orleans Annual Meeting.
- Filon, L. N. G., (1928), "On a Quadrate Method for Trigonometric Integrals", *Proc. R. Soc. Edinburgh*, 49, 38- 47.
- Gerkins, J. C., (1989), "**Foundation of exploration geophysics**", Elsevier science publishers, 667 p.
- Gonenc, T., and Akgun, M., (2012), "Structure of the Hellenic Subduction Zone from Gravity Gradient Functions and Seismology", *Pure and Applied Geophysics*, No. 169, 1231–1255.

- Hinze, W.J., Von F. R. R. B., and Saad, A. H., (2013), "**Gravity and Magnetic Exploration**", Cambridge University Press, 512 p.
- Karsli, H., and Bayrak, Y., (2010), "Application of the normalized total gradient (NTG) method to calculate envelope of seismic reflection signals", *J. Appl. Geophys.*, No. 71, 90–97.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I., (2002), "**An introduction to geophysical exploration**", 3rd edition, Blackwell publishing, 268 p.
- Kreyszig, E., (1979), "**Advanced engineering mathematics**", John Wiley & Sons, 940p.
- Luyendyk, A., (1997), "Processing of airborne magnetic data", *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, No. 17, 31–38.
- Miller, H. G., and Singh, V., (1994), "Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources", *J. Appl. Geophys.*, No. 32, 213-217.
- Nabighian, M. N., (1972), "The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation", *Geophysics*, 37, 507-517.
- Nabighian, M. N., (1974), "Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section", *Geophysics*, No. 39, 85-92.
- Oruc, B., (2012), "Source Location and Depth Estimation Using Normalized Full Gradient of Magnetic Anomalies", *Yerbilimleri*, No. 33 (2), 177-192.
- Oruç, B., and Keskinsezer, A., (2008), "Detection of causative bodies by normalized full gradient of aeromagnetic anomalies from east Marmara region", NW Turkey. *J. Appl. Geophys.*, No. 65, 39–49.
- Pamukcu, O. A., and Akcig, Z., (2011), "Isostasy of the Eastern Anatolia (Turkey) and discontinuities of its crust", *Pure Appl. Geophys.*, No. 168, 901–917.
- Pasteka, R., (1994), "Interpretation of geomagnetic data by means of the method of the total normalized gradient", 56th meeting and technical exhibition-Vienna, Austria, 6-10 June 1994.
- Pasteka, R., (2000), "2D semi-automated interpretation methods in gravimetry and magnetometer", *Bratislava*, No. 55, 5-50.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. T., & Somerton, I. W., (1990), "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution", *Geophysics*, 55(1), 80-91.
- Reynolds, J. M., (2011), "**An introduction to applied and environmental geophysics**", 2nd edition, John Willy and Sons Ltd, 696 p.
- Robinson, E., and Coruh, C., (1988), "**Basic exploration geophysics**", John Wily & Sons, 562 p.
- Salem, A, Williams, S., Fairhead, D., Smith R., and Ravat, D., (2007), "Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives", *Geophysics*, vol. 73, No. 1, L1-L10.
- Sindirgi, P., Pamukcu, O., and Ozyalin, S., (2008), "Application of normalized full gradient method to self potential (SP) data", *Pure Appl. Geophys.*, No. 165, 409–427.

- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. C., (1990), "**Applied geophysics**", 2nd edition, Cambridge University Press, 770 p.
- Traynin, P. N., and Zhdanov M. S., (1995), "Total normalized gradient method in the interpretation of airborne electromagnetic and magnetic data", University of Utah.
- Trompat, H., Boschetti, F., and Hornby P., (2003), "Improved downward continuation of potential field data", *Exploration Geophysics*, No. 34, 249-256.
- Wu, G., Shen, C., Tan, H., and Yang, G., (2016), "Gravity anomaly and crustal density structure in Jilantai rift zone and its adjacent region", *Earthquake Sci.*, No. 29(4), 235–242.
- Zeng, H., Meng, X., Yao, CH., Li, X., Lou, H., Guang, Z., and Li, Z., (2002), "Detection of reservoirs from normalized full gradient of gravity anomalies and its application to Shengli oil field east China", *Geophysics*, No. 67, 4, 1138-1147.
- Zhang, S., and Meng, X., (2015), "Improved normalized full-gradient method and its application to the location of source body", *Journal of Applied Geophysics*, No. 113, 86–91.
- Zhang, S., Meng, X., Chen, Z., Wang, J., and Ren, L., (2013), "The improvement of normalized full gradient method and its application to locate mineral resources", First Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, Beijing, China.
- Zhang, F. X., Meng, L. S., Zhang, F. Q., LIU, C., and Wang, S. Y., (2005), "Calculating normalized full gradient of gravity anomaly using Hilbert transform", *Chinese journal of geophysics*, Vol. 48, No. 3, 2005, 777-784.
- Zhang, C., Mushayandebvu, M. F., Reid, A. B., Fairhead, J. D., & Odegard, M. E., (2000), "Euler deconvolution of gravity tensor gradient data", *Geophysics*, 65(2), 512-520.
- Zhou, W., (2015), "Normalized full gradient of full tensor gravity gradient based on adaptive iterative Tikhonov regularization downward continuation", *Applied Geophysics*, Vol. 118, 75-83.
- Zhou, S., Jiang, J., and Lu, P., (2017), "Source parameters estimation by the normalized downward continuation of gravity gradient data", *Journal of Applied Geophysics*, (unedited manuscript).
- Zhou, W., Li, J., and Du, X., (2015), "Implementation of the singular points method for gravity data by fast Fourier transforms", *IEEE POTENTIALS*.

Abstract

The purpose of the magnetic survey is to investigate geological structures and subsurface bodies using magnetic anomalies due to the material in the earth's crust at an area. Downward continuation filter is a method that use in potential field for data processing and interpretation. This method improves short wavelengths and removes long wavelengths resulting from anomalies caused by subsurface bodies. But because of the nature of the method, its application causes the noise and instability of the results to intensify more deeply than the depth of the underlying objects. To eliminate this instability, the normalized full gradient method is used. Using this method, you can determine the horizontal position and deep expansion of sub-surface objects. The most important parameter in this method is to determine the optimal number of harmonic to calculate the Fourier coefficients, which is improved in the enhanced normalized full gradient as a semi-automatic method. In this study, using the enhanced normalized full gradient method, the optimum of harmonic number is determined for estimating the depth and shape of anomalies.

Also, the results of this method are compared with the maximum relative values of Normalized full gradient of magnetic data. To achieve this goal, the first some codes have written in the MATLAB software, then these methods were applied to a few magnetic data obtained from the artificial or synthetic model. The results of the study show that the enhanced normalized full gradient method is more accurate in depth estimation in cases where the magnetic effect due to the existence of an individual anomaly. However, in cases where the anomaly effect is due to the presence of several bodies associated in one area, the method of determining the maximum relative values of Normalized full gradient is useful to choose the optimal number of harmonics. Also, because the optimal number of harmonics in enhanced Normalized full gradient method is smaller, the volume of computation becomes less and the speed increases. These two methods were applied to the magnetic data from Shadan, Jalalabad and Ojatabad areas and the results of them were analyzed.

Keywords: magnetic anomaly, downward continuation, enhanced Normalized full gradient (NFG) method, depth estimation, Shadan mining area



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

**Determination of shape and depth of magnetic anomalies using
enhanced normalized full gradient method (case study: Shadan area)**

By: Aliyeh Yoosefi Tabas

Supervisor:
Dr. H. Aghajani

July 2018