

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد اکتشاف مواد معدنی

پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی هوابرد با قدرت تفکیک بالا - مطالعه موردی کشور عمان، منطقه صحار

نگارنده : محمد نیک‌نژاد گلفزانی

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا عرب‌امیری

دکتر علی نجاتی کلاته

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۴۰۸
تاریخ: ۹۷/۱۰/۱۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد نیک نژاد گلفرانی با شماره دانشجویی ۹۴۱۸۶۰۴ رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف تحت عنوان **پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی هواپرد با قدرت تفکیک بالا- مطالعه موردی کشور عمان، منطقه صحار** که در تاریخ ۹۷/۰۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ☒ ضعیف) ☐ مردود			
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علیرضا عرب امیری	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر علی نجاتی کلاته	دانشیار	
۳- استاد مشاور	—	—	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد رداد	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حمید آقاجانی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطائی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

پدر و مادر عزیزم

به پاس آنچه از وصف ایشان است در کلام من ننگذ

به پاس آنکه مویشان سپید شد تا روی من سپید شود

به پاس آنکه وجودشان مایه آرامش و دلگرمی من است

شکر و قدردانی

پاس خدای را که سخوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان حق او را کزاردن نتوانند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، بازبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بکاریم، اما از آنجایی که تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می کند و سلامت امانت باری را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب ”من لم یثکر المنعم من المخلوقین لم یثکر الله عزوجل“:

از استادان گرانقدرم؛ جناب آقای دکتر علیرضا عرب امیری و جناب آقای دکتر علی نجابی کلاته که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از پیچ لکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پلایان نامه را بر عهده گرفتند کمال شکر و قدردانی را دارم.

چکیده

یکی از روش‌های کارآمد در اکتشاف مواد معدنی، ژئوفیزیک هوابرد (شامل مجموعه روش‌های مغناطیس، الکترومغناطیس و رادیومتری) است. در این روش‌ها وسعت‌های بالا در زمان کوتاه‌تری نسبت به دیگر روش‌های ژئوفیزیکی برداشت می‌شوند. امروزه هواپیماهای بدون سرنشین (پهپاد) در اکتشاف مواد معدنی، تولید نقشه‌های زمین شناسی و توپوگرافی، به منظور شناسایی هرچه دقیق‌تر ساختارهای زیرسطحی توسعه یافته‌اند. پردازش و تفسیر داده‌های برداشت شده با مغناطیس‌سنج و حذف نوفه‌های ثبت شده از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از انجام این پایان‌نامه پردازش و تفسیر داده‌های برداشت شده به وسیله نسل جدید مغناطیس‌سنج‌های متصل به پهپاد است. داده‌های مغناطیس هوابرد مورد استفاده در این پایان‌نامه مربوط به منطقه‌ای در کشور عمان به نام صحار است. پردازش این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Oasis montaj صورت گرفته است. برداشت داده‌ها در دو ارتفاع ۲۰ و ۶۰ متر برای اکتشاف کرومیت صورت گرفته است. لازم به ذکر است این برداشت‌ها برای برنامه آزمایشی این دستگاه، برای اکتشاف مواد معدنی انجام شده و به همین علت وسعت منطقه مورد مطالعه نسبتاً کم است. پس از اعمال پردازش بر روی داده‌ها در دو ارتفاع ۲۰ و ۶۰ متر و تولید نقشه‌های پتانسیل مغناطیسی، نتایج نشان دهنده این بود که آنومالی‌هایی که در ارتفاع ۲۰ متر بدست آمده، در نقشه برداشت ۶۰ متر مشخص نیست و همچنین با مقایسه داده‌های بدست آمده در ارتفاع ۶۰ متر و مقایسه آن با داده‌های ۲۰ متری که فیلتر گسترش رو به بالا به اندازه ۴۰ متر روی آن اعمال شده است، مشخص شد که فیلتر گسترش رو به بالا دارای مقداری خطا است.

کلیدواژه‌ها: مغناطیس‌سنجی هوابرد، پهپاد، پردازش، هم‌تراز سازی، IGRF، عمان، صحار.

تعمدنامه

اینجانب محمد نیک‌نژاد گلفزانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی هوابرد با قدرت تفکیک بالا- مطالعه موردی کشور عمان، منطقه صحار تحت راهنمایی دکتر علیرضا عرب‌امیری و دکتر علی نجاتی کلاته 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 نوع 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 تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از 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 اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها	ی
فهرست شکل‌ها	ک
فصل ۱- مقدمه و کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- سابقه مطالعات انجام شده	۴
۱-۳- ضرورت انجام تحقیق	۶
۱-۴- هدف تحقیق	۷
۱-۵- روش انجام تحقیق	۷
۱-۶- ساختار پایان‌نامه	۷
فصل ۲- بررسی روش‌های مغناطیسی، مغناطیس‌سنج و سیستم‌های پروازی بدون سرنشین	۹
۲-۱- مغناطیس‌سنج‌های هوابرد	۱۰
۲-۱-۱- مغناطیس‌سنج‌های فلاکس‌گیت	۱۰
۲-۱-۲- مغناطیس‌سنج‌های تشدید	۱۲
۲-۲- برداشت‌های مغناطیس‌سنج هوابرد	۱۵
۲-۲-۱- گرادئومتری مغناطیسی	۱۶
۲-۲-۲- مقدمه‌ای بر برداشت‌های مغناطیسی در چند سطح	۱۷
۲-۳- سیستم‌های هوایی بدون سرنشین (UAVs)	۱۹
۲-۳-۱- پهپاد فانتوم دی.جی. آی	۲۳
۲-۳-۲- پهپاد دی.جی. آی، اس ۹۰۰	۲۴
فصل ۳- مبنای پردازش داده‌های مغناطیس‌سنج هوابرد	۲۹
۳-۱- مقدمه	۳۰
۳-۲- مرحله پیش‌پردازش داده‌های مغناطیس‌سنج هوابرد	۳۱
۳-۳- مرحله پردازش داده‌های مغناطیس‌سنج هوابرد	۳۳
فصل ۴- اثر مغناطیسی سیستم هوایی بدون سرنشین	۳۷

۳۸	۱-۴ - مقدمه
۳۹	۲-۴ - اثر مغناطیسی در برداشت‌های هوابرد
۴۰	۱-۲-۴ - اثر استاتیکی
۴۰	۲-۲-۴ - اثر دینامیکی
۴۳	۳-۴ - اثر مغناطیسی وسیله‌های هوایی بدون سرنشین
۴۳	۱-۳-۴ - نمونه اولیه پهپاد فانتوم دی.جی.آی ۲+
۴۸	۲-۳-۴ - پهپاد دی جی آی-اس ۹۰۰
۵۳	فصل ۵ - پردازش داده‌های برداشت کیفیت بالا، منطقه صحار، کشور عمان
۵۴	۱-۵ - کرومیت عمان
۵۶	۲-۵ - کاربرد برداشت‌های مغناطیسی برای اکتشاف کرومیت
۶۴	۳-۵ - روش بررسی و جمع‌آوری داده‌ها
۶۸	۴-۵ - پردازش داده‌ها
۶۸	۱-۴-۵ - مرحله پیش‌پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد، منطقه صحار در عمان
۶۸	الف) تصحیح و بازبینی داده‌های خام
۷۱	ب) مشخص کردن مکان دقیق داده‌ها بر حسب X و Y
۷۱	۲-۴-۵ - مرحله پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد در منطقه صحار عمان
۷۱	الف) تصحیح روزانه
۷۲	ب) تصحیح جابه‌جایی محل بی‌هنجاری‌ها
۷۲	ج) تصحیح اثر جهت برداشت داده‌های مغناطیسی بر روی میدان مغناطیسی
۷۳	د) تصحیح IGRF
۷۴	ه) تصحیح هم‌ترازسازی
۷۴	۵-۵ - بررسی میدان مغناطیسی کل محدوده مورد مطالعه
۷۴	۱-۵-۵ - نقشه میدان مغناطیسی کل
۷۶	۲-۵-۵ - نقشه برگردان به قطب
۸۴	۳-۵-۵ - مقایسه نقشه میدان مغناطیسی در دو ارتفاع ۲۰ متر و ۶۰ متر
۸۷	۴-۵-۵ - فیلتر ادامه فراسو
۹۰	۵-۵-۵ - فیلتر مشتق قائم
۹۲	۶-۵-۵ - نقشه سیگنال تحلیلی شدت کل میدان مغناطیسی
۹۷	فصل ۶ - نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۸	۱-۶ - نتیجه‌گیری
۹۸	۲-۶ - پیشنهادات
۱۰۱	منابع

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲. مقایسه مزایا و محدودیت‌های سیستم‌های پرواز بدون سرنشین	۲۲
جدول ۲-۲. مشخصات فنی پهپاد دی. جی. آی فانتوم.	۲۴
جدول ۳-۲. مشخصات فنی پهپاد اس ۹۰۰	۲۵
جدول ۴-۲. مشخصات کلی مغناطیس‌سنج GSMP35-A شرکت جم سیستم	۲۶
جدول ۱-۵. داده‌های حاصل از آزمایش Heading	۷۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲. دیدگاه شماتیک از مغناطیس سنج فلاکس گیت..... ۱۱
- شکل ۲-۲. طرح شماتیک یک سنسور بخار قلیایی..... ۱۴
- شکل ۳-۲. گرادیان اول شدت مغناطیسی کل..... ۱۷
- شکل ۴-۲. اثر خطوط پروازی و تراکم خطوط تراورس..... ۲۰
- شکل ۴-۱. نموداری که اثر مغناطیسی پرنده را توصیف می‌کند..... ۴۰
- شکل ۴-۲. میدان اندازه‌گیری شده در هنگام مانور در مقایسه با همان سیگنال با استفاده از جبران‌کننده‌های مغناطیسی فعال..... ۴۲
- شکل ۴-۳. شکل بالا راست: نقشه شبکه برداشت دید از بالا، شکل پایین راست: نقشه شبکه برداشت دید از کنار، شکل چپ: جهت مغناطیس سنج فلاکس گیت..... ۴۴
- شکل ۴-۴. اجزاء سیستم برداشت..... ۴۵
- شکل ۴-۵. تمام سطوح اندازه‌گیری شده در ۵ cm، ۱۵ cm، ۲۵ cm و ۳۵ cm زیر پهپاد. مقادیر نشان داده شده اختلاف میدان مغناطیسی پهپاد روشن با حداکثر توان و پهپاد خاموش را نشان می‌دهد..... ۴۶
- شکل ۴-۶. تاثیر مغناطیسی پهپاد. مقادیر اندازه‌گیری شده هنگامی که پهپاد روشن بوده از مقادیر اندازه‌گیری شده در زمانی که که موتورهای پهپاد با تمام سرعت کار می‌کردند کاسته شده است..... ۴۷
- شکل ۴-۷. دید از کنار Voxel ساخته شده از شبکه‌های تولید شده در شکل ۴-۵..... ۴۸
- شکل ۴-۸. اثر مغناطیسی پهپاد اس ۹۰۰..... ۴۹
- شکل ۴-۹. دید از کنار درون‌یابی سه بعدی اثر مغناطیس پهپاد اس ۹۰۰..... ۵۱
- شکل ۵-۱. محل تقریبی زمین‌شناسی کوه‌های عمان..... ۵۶
- شکل ۵-۲. پروفیل شدت مغناطیسی عمودی بر روی مقطع زمین‌شناسی بدنه کرومیت..... ۵۸
- شکل ۵-۳. درصد سرپانتین و کرومیت در مقایسه با حساسیت مغناطیسی نمونه‌های پریدوتیت ژوزفین، کالیفرنیا..... ۵۹
- شکل ۴-۵. سیستم هوایی بدون سرنشین به همراه مغناطیس سنج متصل به آن..... ۶۲
- شکل ۵-۵. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به صورت شماتیک برای نشان دادن واحدهای اصلی زمین‌شناسی..... ۶۴
- شکل ۵-۶. سرپانتینی شدن در اطراف رخنمون کرومیت. شکستگی‌ها با سرپانتینیت و الیوین دگرگون شده پر شده است..... ۶۵
- شکل ۵-۷. مسیر پرواز انجام شده در دو ارتفاع ۲۰ متر و ۶۰ متر از سطح زمین..... ۶۶

- شکل ۵-۸. شدت میدان مغناطیسی پروفیل ثبت شده برای اهداف آزمایشی. محور افقی تعداد نقاط را نشان می‌دهد. نمودار بالایی: قبل از استفاده از هر فیلتر. نمودار پایینی: بعد از استفاده فیلتر غیرخطی. ۶۷
- شکل ۵-۹. بخشی از داده‌های برداشت در نرم‌افزار Oasis Montaj ۶۹
- شکل ۵-۱۰. نمودار داده‌های خام در برداشت ۲۰ متر و رسم کانال مشتق چهارم قبل و بعد از فیلتر غیرخطی ۷۰
- شکل ۵-۱۱. نمودار داده‌های خام در برداشت ۶۰ متر و رسم کانال مشتق چهارم قبل و بعد از فیلتر غیرخطی ۷۰
- شکل ۵-۱۲. پروفیل رسم شده در بررسی تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت میدان مغناطیسی داده‌های ایستگاه مینا ۷۱
- شکل ۵-۱۳. نرم‌افزار GEM Link برای تصحیحات روزانه ۷۲
- شکل ۵-۱۴. میدان مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر ۷۵
- شکل ۵-۱۵. میدان مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر ۷۶
- شکل ۵-۱۶. نقشه شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب ۷۹
- شکل ۵-۱۷. نقشه شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب ۸۰
- شکل ۵-۱۸. محاسبه آنومالیهای میدان (آنومالی تئوری در زاویه میل 75° ، آنومالی با اعمال فیلتر برگردان به استوا و آنومالیهای برگردان به استوا با طول پروفیل متفاوت) برای دایک عمودی که نسبت عرض به عمق آن ۴ است ۸۱
- شکل ۵-۱۹. نقشه شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر پس از اعمال فیلتر برگردان به استوا ۸۲
- شکل ۵-۲۰. نقشه شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر پس از اعمال فیلتر برگردان به استوا ۸۳
- شکل ۵-۲۱. شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر ۸۵
- شکل ۵-۲۲. شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر ۸۶
- شکل ۵-۲۳. (۱) مقایسه شدت مغناطیسی پروفیل ۱ در دو برداشت. (۲) مقایسه شدت مغناطیسی پروفیل ۲ در دو برداشت ۸۷
- شکل ۵-۲۴. نقشه شدت مغناطیسی برداشت ۲۰ متر با اعمال فیلتر ادامه فراسو به اندازه ۴۰ متر ۸۸
- شکل ۵-۲۵. میزان اختلاف میدان اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۶۰ متر و میدان اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۲۰ متر با اعمال فیلتر ادامه فراسو به میزان ۴۰ متر ۸۹
- شکل ۵-۲۶. شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر با اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه اول ۹۱
- شکل ۵-۲۷. شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر با اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه اول ۹۲
- شکل ۵-۲۸. نقشه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی محدوده برای برداشت ارتفاع ۲۰ متر ۹۳
- شکل ۵-۲۹. نقشه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی محدوده برای برداشت ارتفاع ۶۰ متر ۹۴
- شکل ۵-۳۰. میدان مغناطیسی کل سه بعدی منطقه مورد مطالعه ۹۵

شکل ۵-۳۱. میدان مغناطیسی سه بعدی منطقه. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آنومالی از ارتفاع ۴۴
متری سطح زمین قابل ردیابی است..... ۹۶

فصل ۱- مقدمه و کلیات

دانش ژئوفیزیک یعنی علم استفاده از مشخصات فیزیکی مواد زمین برای آگاهی از دیگر ویژگی‌های آن؛ که امروزه طیف گسترده‌ای از مطالعات مربوط به فضا، دریا و زمین را تشکیل می‌دهد. بخشی از آن به اکتشاف منابع معدنی، هیدروکربوری، آب، شناسایی زمین و محیط زیست می‌پردازد؛ این بخش را می‌توان به عنوان ژئوفیزیک اکتشافی یا کاربردی در نظر گرفت (نوروزی، ۱۳۸۸).

قسمت فوقانی پوسته زمین که می‌تواند باعث تغییرات بعضی خواص فیزیکی سنگ‌ها شود، هدف اکتشافات ژئوفیزیکی است. روش‌های ژئوفیزیکی را به طور عام می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱- روش‌های استاتیکی یا غیرفعال، که در آن‌ها اندازه‌گیری‌های میدان‌های طبیعی زمین انجام می‌شود، مانند روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی.

۲- روش‌های دینامیکی یا فعال که در آن‌ها میدان یا سیگنال مشخصی با فرستنده دستگاه به زمین ارسال می‌شود، مانند روش‌های لرزه‌ای (نوروزی، ۱۳۸۸).

روش‌های ژئوفیزیکی که عمدتاً برای اکتشاف بکار گرفته می‌شوند؛ عبارتند از: روش‌های لرزه‌ای، گرانی، مغناطیس، الکتریک و الکترومغناطیس. تعدادی از این روش‌ها به منظور اکتشاف نفت و گاز و بقیه در اکتشاف مواد معدنی استفاده می‌شوند. لرزه، مغناطیس و گرانی روش‌های اصلی برای اکتشاف مواد هیدروکربنی هستند. روش‌های لرزه و الکتریک نیز دو ابزار عمده در اکتشاف مواد معدنی هستند (Dorbin and savit, 1988).

وسایله‌های هوایی بدون سرنشین (UAV)^۱ یا سیستم‌های هوایی متحرک (UAS)^۲، یا به طور کلی نامی که برای عوام آشناست، پهپاد^۳، در زمینه‌های گوناگونی مانند مهندسی عمران، مدیریت ریسک و مخاطره، اکتشافات نظامی، اکتشاف معدن و نقشه‌های شهری در نواحی مختلف استفاده می‌شود. به

^۱- Unmanned Aerial Vehicle

^۲- Unmanned Aerial System

^۳- Drones

ویژه در نواحی پرخطری که انسان نمی‌تواند از طریق راه‌های سطحی به آن دسترسی داشته باشند، وسیله‌های هوایی بدون سرنشین (UAV) بسیار کارآمد خواهد بود. کانینگهام^۱ در سال ۲۰۱۶ به توسعه چنین پروژه‌های پرداخته است. در دهه‌ی گذشته پیشرفت قابل توجهی در زمینه پهپادها انجام شده است و امروزه این ابزارها به راحتی در دسترس هستند؛ که می‌توانند برای بررسی‌های ژئوفیزیکی در مقیاس‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرند. پهپادها در مشخصات فنی بسیار متفاوت و در عین حال وسیله‌های منعطف و سازگار در شرایط مختلف هستند.

سنسورها و دوربین‌هایی که پهپادها قادر به حمل آن می‌باشند، شامل موارد زیر می‌شوند؛ دوربین‌های Hyperspectral (Hernandez-Palacios et al., 2011)، دوربین‌های RGB برای عکاسی هوایی و فوتوگرامتری (Siebert et al., 2014)، دوربین‌های مادون قرمز (IR)، سنسورهای فرکانس پایین (VLF)، مگنتومترها (Cunningham, 2016) و تشخیص و ردیابی نور (LiDAR) (Lin et al., 2011).

برداشت‌های ژئومغناطیسی نقش مهمی در اکتشاف مواد معدنی ایفا می‌کنند. استفاده از مغناطیس-سنجی و کشف آنومالی‌های مغناطیسی برای شناسایی اهداف بالقوه معدنی یک استراتژی مشترک برای کشف مواد معدنی است. علاوه بر این، برداشت‌های ژئومغناطیس نسبت به سایر روش‌های ژئوفیزیکی ارزان‌تر و داده‌ها به طور مستقیم به زمین‌شناسی منطقه مرتبط است. همچنین مغناطیس‌سنجی به عنوان یک ابزار برای تشخیص زیرساخت‌ها مانند کابل، خط لوله آب و برق استفاده می‌شود (Barrows, 1990). مغناطیس‌سنجی در زمینه‌های نظامی برای تشخیص مهمات و مین‌های کشف نشده در محیط‌های مختلف نیز می‌تواند موثر باشد. (Schultz, 2007).

امروزه مغناطیس‌سنجی هوابرد یک ابزار اکتشافی در معدنکاری است. سرعت نمونه‌برداری در بعضی از موارد تا ۱۰ داده در ثانیه می‌رسد؛ پس اگر سرعت پرواز ۷۰ کیلومتر بر ساعت باشد تعداد داده‌ها در هر متر ۷ داده است (Reeves, 2005).

^۱- Cunningham

حمل مغناطیس سنج به وسیله پهپادها در نگاه اول ساده به نظر می‌رسد. با این حال برخی مشکلات فنی نیز در این موارد وجود دارد؛ همان‌طور که اپلبام^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱ به آن اشاره کرده‌اند. برداشت‌های مغناطیسی به سه صورت زمینی، هوایی و دریایی انجام می‌شود. برداشت‌های هوایی که با هواپیما یا هلیکوپتر انجام می‌شوند در ارتفاعی بالاتر از ۷۰ متر است. در برداشت‌های مغناطیسی هوایر به دلیل ارتفاع برداشت مناطق بیشتری پوشش داده می‌شوند؛ ولی کیفیت^۲ داده‌ها نسبت به برداشت‌های زمینی کمتر است. از سوی دیگر برداشت‌های زمینی مستلزم صرف نیروهای اجرایی بیش‌تر، هزینه و زمان بیش‌تری نسبت به برداشت‌های هوایی هستند و مناطق وسیع را با روش زمینی نمی‌توان برداشت کرد. در حالی که برداشت مغناطیسی با پهپاد کیفیتی بین برداشت‌های هوایی و زمینی و انعطاف‌پذیری مناسبی در پوشش مناطق هدف دارند و این امر، انجام برداشت مغناطیسی را بسیار راحت‌تر می‌کند. علاوه بر این برداشت مغناطیسی با پهپاد قادر به تولید گرادیان سه بعدی مغناطیسی با پرواز در ارتفاع‌های مختلف است (Parvar et al., 2016).

۱-۲- سابقه مطالعات انجام شده

مطالعات مغناطیس زمین، قدیمی‌ترین شاخه ژئوفیزیک است؛ اولین تحلیل علمی میدان مغناطیسی زمین را فیزیکدان انگلیسی، ویلیام گیلبرت^۳ در سال ۱۶۰۰ در کتابی به نام "دو مگنت"^۴ انتشار داد. در اوایل سال ۱۶۴۰، اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین برای تعیین محدوده کانسارهای آهن در سوئد انجام شد. در سال ۱۸۷۰ تالن و تیبرگ^۵ برای اندازه‌گیری مولفه‌های مختلف میدان

^۱- Eppelbaum

^۲- Resolution

^۳- Gilbert, W

^۴- De Magnete

^۵- Thalen & Tiberg

مغناطیسی زمین، دستگاه‌های اندازه‌گیری اولیه را توسعه دادند. در سال ۱۹۱۵، آدولف اشمیت^۱ دستگاهی به نام ترازوی اشمیت را ساخت؛ که باعث گسترش کاربرد برداشت‌های مغناطیسی شد (نوروزی، ۱۳۸۸).

اولین برداشت مغناطیس‌سنجی در اتحاد جماهیر شوروی سابق در سال ۱۹۳۶ انجام شد. این برداشت به نام موسسه زمین‌شناسی و تحقیقاتی مرکزی (TsNIGRI) و توسط لوگاف^۲ طراح دستگاه و میبرودا^۳ انجام شد (Logachev et al., 1936). USGS پیشگام اولین بررسی ژئوفیزیکی هوایی در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۴۵ با جمع‌آوری ۱۶۰۰۰ کیلومتر خط برداشت داده‌های مغناطیس-سنگ هوابرد، در مورد ذخایر دریایی در آلاسکا است. به طور کلی برداشت‌ها برای نیازهای مختلف با شرایط متفاوت (ارتفاع پرواز و فاصله برداشت) طراحی می‌شود (Rystorm, 1997). همچنین روش به دست آوردن داده‌ها به علت پیشرفت‌های تکنولوژی تغییرات زیادی داشته است (Rystorm et al., 1997). داده‌های برداشت شده با مغناطیس‌سنگ نیاز به تصحیح دارد؛ میلیگان^۴ و گان^۵ (۱۹۹۷)، لایندایک^۶ (۱۹۹۷) و هورسفال^۷ (۱۹۹۷) به روش‌های پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد پرداخته‌اند. سال ۱۹۷۷ در کشور ایران، بر اساس قراردادی با شرکت آئرو (Aero) برداشت‌های هوابرد مغناطیسی به سفارش سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است. ضمن اینکه طی سال‌های ۷۸-۱۹۷۹ همراه با برداشت‌های رادیومتری هوابرد، برداشت‌های مغناطیسی نیز برای مناطق وسیعی از کشور توسط چند شرکت خارجی و با نظارت سازمان انرژی اتمی انجام شده است (نوروزی، ۱۳۸۸).

^۱- Schmit, A

^۲- Logachev, A. A.

^۳- Maibroda, A. T.

^۴- Milligian

^۵- Gunn

^۶- Luyendyk

^۷- Horsfall

سامسون^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۰ به طراحی و ساخت پهپاد، برای تهیه نقشه‌های مغناطیسی پرداختند (Samson et al., 2010). کریستوف اک^۲ و بندیکت ایمبچ^۳ در سال ۲۰۱۱ به منظور کشف اشیاء مدفون زیر خاک، مانند وسیله‌های حفاری و حمل و نقل در معدن ذغال سنگ ریزش کرده، یک نقشه دقیق مغناطیسی با استفاده از یک کوادکوپتر تولید کردند (Eck, C., & Imbach, B., 2011). استال^۴ و موریتز^۵ در سال ۲۰۱۳ از پهپاد برای برداشت و اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی سریع و نزدیک سطح زمین استفاده کردند (Stoll, J., & Moritz, D., 2013). کارون^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از یک سیستم شبیه‌ساز پهپاد، نقشه مغناطیسی هوابرد را تهیه کردند (Caron et al., 2014). کانینگهام^۷ نیز در سال ۲۰۱۶ با استفاده از پهپاد به تهیه نقشه مغناطیس هوابرد پرداخت (Cunningham, 2016).

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

برداشت‌های هوابرد در مدت زمان کوتاه قادرند منطقه وسیعی را پوشش بدهند؛ که این امر از لحاظ بازدهی زمان و هزینه بسیار مناسب است. برداشت‌های هوابرد برای ناحیه‌هایی که از لحاظ توپوگرافی خشن هستند و دسترسی زمینی به این مناطق دشوار است؛ نیز کارآمد است. با این حال معایبی همچون نداشتن قابلیت پرواز در ارتفاع‌های کم، اقتصادی نبودن پرواز برای مناطق کوچک و نداشتن قابلیت مانور در انتهای خطوط برداشت، این روش‌ها را دچار ضعف می‌کند.

در صورتی که برداشت با پهپاد به دلیل داشتن ویژگی‌های: عمود پرواز بودن، داشتن سوخت ارزان (باتری)، قابلیت پرواز در سطوح نزدیک زمین، پرواز در ارتفاع‌های مختلف و بدون سرنشین بودن

^۱- Samson

^۲- Christoph Eck

^۳- Benedikt Imbach

^۴- Stoll

^۵- Moritz

^۶- Caron

^۷- Cunningham, M

وسیله، معایب قبل را رفع می‌کند و از لحاظ هزینه و زمان بازدهی بیش‌تری دارد. به همین دلیل باعث سرعت بخشیدن به طرح‌های اکتشافی کشور می‌شود. تاکنون در کشور ایران برداشت هوابرد مغناطیسی با پهباد و مولتی‌روتورها انجام نشده است. از این رو، در این تحقیق سعی بر تعبیر و تفسیر داده‌های به دست آمده از پهباد در منطقه صحرای کشور عمان برای آمادگی عملیات‌های داخل کشور است.

۴-۱- هدف تحقیق

هدف از انجام این پایان‌نامه تحلیل و تفسیر داده‌های حاصل از سیستم‌های مغناطیسی هوایی بدون سرنشین مجهز به مغناطیس‌سنج برای مطالعه موردی بر روی ذخیره کرومیت در کشور عمان است. نشان دادن مزایای اندازه‌گیری واقعی گرادیان مغناطیسی نسبت به فیلترهای ژئوفیزیکی و مزایای پرواز در دو ارتفاع در یک منطقه از دیگر اهداف این پایان‌نامه است.

۵-۱- روش انجام تحقیق

در این پایان‌نامه ابتدا به حذف نوفه‌های تولید شده در نتیجه پرواز پهباد پرداخته شده است. سپس به پردازش و تصحیح داده‌های خام حاصل از مغناطیس‌سنج و اعمال فیلترهای مختلف بر روی داده‌ها پرداخته شده است. پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Oasis montaj انجام شد. پس از پردازش داده‌ها، نقشه‌های شدت مغناطیسی کل برای هر ارتفاع تولید شد و به مقایسه آن‌ها با هم و نقشه‌های تولید شده با فیلترهای مختلف پرداخته شد.

۶-۱- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه مشتمل بر شش فصل است. در فصل اول به تاریخچه ژئوفیزیک و روش مغناطیس-سنجی، انواع روش‌های ژئوفیزیکی، سابقه مطالعات انجام شده در زمینه به کارگیری روش مغناطیس-

سنجی هوابرد معمول و مغناطیس‌سنجی با سیستم‌های بدون سرنشین و در پایان ضرورت و اهداف انجام پایان‌نامه بیان شده است. در فصل دوم به بررسی روش‌های مغناطیسی، مغناطیس‌سنج و سیستم‌های پروازی بدون سرنشین پرداخته شده است. در فصل سوم به توضیح مبانی پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد پرداخته شده است. در فصل چهارم اثر میدان مغناطیسی سیستم هوایی بدون سرنشین بر روی مغناطیس‌سنج و چگونگی حذف آن‌ها آمده است. در فصل پنجم به پردازش داده‌های برداشت کیفیت بالای منطقه صحرای درکشور عمان و تولید نقشه‌های شدت کل مغناطیسی محدوده پرداخته شده است. در فصل ششم به نتایج به‌دست آمده و پیشنهادات اشاره شده است.

فصل ۲- بررسی روش‌های مغناطیسی، مغناطیس‌سنج و

سیستم‌های پروازی بدون سرنشین

۲-۱- مغناطیس‌سنج‌های هوابرد

در اواخر دهه ۱۹۴۰، برداشت‌های مغناطیسی تنها با ابزارهای زمینی انجام می‌شد. این ابزار مولفه‌های میدان را با دقت چند نانو تسلا اندازه‌گیری می‌کرد (Hinze et al., 2013). یکی از اولین مغناطیس‌سنج‌های شناخته شده به نام فلاکس‌گیت^۱ است؛ که برای تشخیص زيردریایی برای هواپیماها طراحی شده بود و دستگاه تنها مقدار عددی برآیند میدان مغناطیسی زمین را اندازه‌گیری می‌کرد. این طراحی بدون در نظر گرفتن عوارض ناشی از جهت‌گیری سنسور بود و یافتن یک جواب مطمئن از داده‌ها کاری مشکل و وقت‌گیر بود (Reeves, 2005).

در اواخر دهه ۱۹۵۰، مغناطیس‌سنج پروتون ساخته شد و به رغم پیشرفت‌های زیاد در فلاکس-گیت، مغناطیس‌سنج‌های پروتونی جایگزین آن‌ها در برداشت‌های معمول شد. مغناطیس‌سنج‌های پمپاژ نوری در اوایل دهه ۱۹۶۰ استفاده می‌شد و تا اواخر ۱۹۸۰ مغناطیس‌سنج‌های دیگر جایگزین آن نشد (Reeves, 2005). در بخش‌های بعد در مورد سیستم‌های مغناطیس‌سنج و مزایا و محدودیت‌های آن‌ها بحث خواهد شد.

۲-۱-۱- مغناطیس‌سنج‌های فلاکس‌گیت

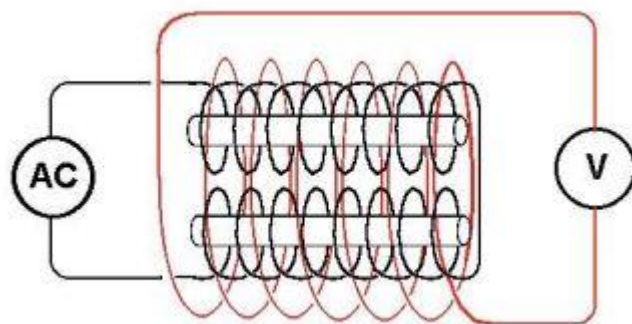
اولین مغناطیس‌سنج فلاکس‌گیت توسط لوگاجف^۲ ساخته شد و در یک برداشت هوایی مورد استفاده قرار گرفت (Logachev, 1936). سنسور فلاکس‌گیت یک دستگاه حالت جامد برای اندازه‌گیری مقدار و جهت میدان مغناطیسی در محدوده 10^5 تا 10^1 نانوتسلا است (Ripka, 2003). این دستگاه شامل دو مغزه موازی از جنس مواد فرومغناطیس با تراوایی مغناطیسی بسیار زیاد است. مغزه‌ها به صورت سری و در دو جهت مخالف یکدیگر سیم‌پیچی شده‌اند؛ که آن را سیم‌پیچ اولیه می‌نامند. علاوه بر آن سیم‌پیچ ثانویه نیز در اطراف دو مغزه در نظر گرفته شده که در جهت مخالف سیم-

^۱- fluxgate

^۲- Logachev

پیچ اولیه قرار داده شده است. زمانی که دو مغزه در میدان مغناطیسی زمین قرار می‌گیرند، بر اساس قرارگیری یکی از مولفه‌های این میدان به موازات امتداد مغزه‌ها، میدان اولیه یکی از آن‌ها توسط مولفه میدان زمین تقویت می‌شود، در حالی که میدان مغزه دیگر تضعیف می‌شود. مغزه‌ای که میدان آن تقویت شده زودتر به حالت اشباع خواهد رسید. نتیجه این عمل ایجاد اختلاف فازی بین پتانسیل‌های ثانویه است که بدین ترتیب جمع آن‌ها مخالف صفر است.

بر حسب تنظیم مغزه‌ها در جهت میدان کل مغناطیسی یا مولفه‌های آن می‌توان میدان کل یا هر یک از مولفه‌های آن را با این دستگاه اندازه‌گیری کرد (Hinze et al., 2013). شکل ۱-۲ مغناطیس-سنج فلاکس‌گیت را به صورت شماتیک نشان داده است.



شکل ۱-۲. دیدگاه شماتیک از مغناطیس‌سنج فلاکس‌گیت (Reeves, 2005).

امروزه عمده گرایش‌ها به سوی کاهش اندازه سنسور، کاهش مصرف انرژی و قیمت و از سوی دیگر افزایش دقت در محدوده وسیعی از میدان زمین است. فلاکس‌گیت‌های امروزی دارای فرکانس‌های کم و کیفیت مشابه دستگاه‌های ابررسانای کوانتومی (SQUIDs) است (Ripka, 2003).

برای دستیابی به حداکثر عملکرد قابل دسترس، شکل و مواد هسته باید به گونه‌ای انتخاب شوند که جریان‌های مخالف را محدود کند. کم‌ترین مقدار نوفه به طور معمول اینگونه محاسبه می‌شود $\frac{1pT}{\sqrt{Hz}}$ (Koch et al., 1999).

در این مطالعه از مغناطیس‌سنج فلاکس‌گیت مدل HMR2300 (اندازه: $10/6 \times 2/2 \times 3/8$ cm³) با حساسیت محدود ۷ نانوتسلا استفاده شده است. HMR2300 یک مغناطیس‌سنج هوشمند دیجیتالی سه محوره برای تشخیص قدرت و جهت میدان مغناطیسی خارجی است.

۲-۱-۲ مغناطیس‌سنج‌های تشدید

دو نوع مغناطیس‌سنج تشدید وجود دارد: مغناطیس‌سنج حرکت تقدیمی آزاد پروتون^۱ و مغناطیس‌سنج بخار قلیایی^۲ یا مگنتومتر جذب نوری که بیشتر در مطالعات هوابرد از آن‌ها استفاده می‌شود. هر دو نوع این دستگاه‌ها حرکت تقدیمی ذرات اتمی را در یک محیط میدان مغناطیسی اندازه‌گیری می‌کنند؛ که با یک کالیبراسیون ساده می‌توان میدان مغناطیسی کلی را بدست آورد (نوروزی، ۱۳۸۸).

سنسور مغناطیس‌سنج پروتون از یک ظرف حاوی مایعی غنی از پروتون (به طور معمول نفت) تشکیل شده است. در ظرف مذکور که شکلی بطری مانند دارد، سیم‌پیچی تعبیه شده که به دستگاه اندازه‌گیری وصل می‌شود. هر پروتون دارای گشتاور مغناطیسی M و نیز گشتاور حرکتی G است و به طور دائم در یک مدار حرکت می‌کند. در میدانی مغناطیسی مانند میدان کلی زمین (F)، بیشتر پروتون‌ها به موازات این میدان و هم‌جهت با آن به خط می‌شوند و باقیمانده آن‌ها به صورت موازی و در جهت مخالف میدان زمین قرار می‌گیرند. بدین ترتیب حجم مایع غنی شده از پروتون گشتاور مغناطیسی مشخصی را در امتداد میدان F پذیرا می‌شود (نوروزی، ۱۳۸۸).

برای اجرای اندازه‌گیری با اعمال یک جریان الکتریکی به سیم‌پیچ تعبیه شده در بطری حاوی مایع، میدانی با اندازه ۵۰ تا ۱۰۰ برابر قوی‌تر از میدان زمین و در جهت عمود بر آن ایجاد می‌شود. در این حال پروتون‌ها خود را با میدان جدید هماهنگ کرده و در جهت آن به خط می‌شوند. حال در صورتی

^۱- proton free-precession

^۲- alkali vapour

که میدان اعمال شده حذف شود، پروتون‌ها دوباره در جهت میدان موجود یعنی میدان زمین (F) به خط می‌شوند که این جهت‌گیری دوباره تحت فرکانس تقدیمی لارمور^۱ (f_p) رخ می‌دهد.

فرکانس مذکور متناسب با شدت میدان F به صورت رابطه زیر است:

$$F = 2\pi f_p / \psi_p$$

که در آن ψ_p ، نسبت ژيرومغناطیسی پروتون و برابر نسبت گشتاورمغناطیسی به گشتاور زاویه‌ای اسپین آن است. مقدار ψ_p ثابت و برابر 0.26753 هرتز بر نانوتسلا است؛ در نتیجه داریم:

$$\frac{2\pi}{\psi_p} = 23.4859(nT/H_z) \quad 1-2$$

بدین ترتیب رابطه نهایی بین F و f_p به صورت زیر در می‌آید:

$$F = 23.4859 f_p \quad 2-2$$

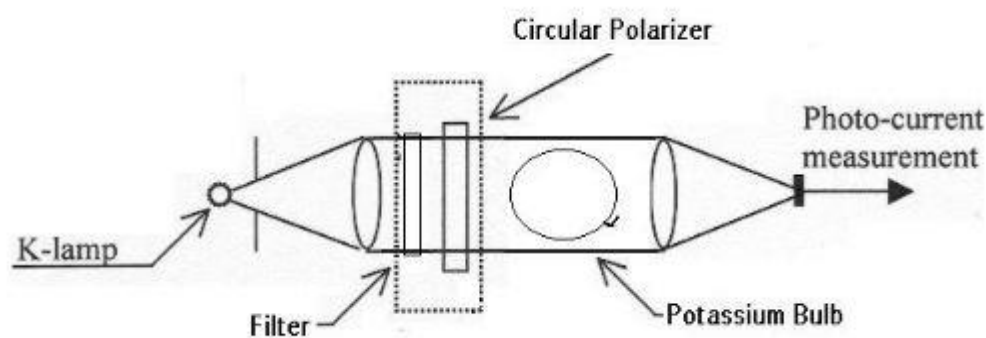
از آنجایی که پروتون‌ها ذرات بارداری هستند، زمانی که برای جهت‌گیری در میدان F تغییر مسیر می‌دهند، ولتاژ متناوبی با فرکانس f_p در سیم‌پیچ بطری سنسور القا می‌کنند. فاصله زمانی برهم‌کنش بین پروتون‌های مجاور که باعث ایجاد حرکت تقدیمی می‌شود و سپس محو شدن این حرکت ۲ تا ۳ ثانیه طول می‌کشد که این زمان برای اندازه‌گیری فرکانس تقدیمی کافی است. برای دستیابی به میدان F با دقتی در حدود ± 0.1 نانوتسلا، باید مقدار فرکانس f_p با دقتی معادل ± 0.004 هرتز اندازه‌گیری شود؛ که این دقت به راحتی قابل دستیابی است (نوروزی، ۱۳۸۸).

نوع دوم مغناطیس‌سنج‌های تشدید، مغناطیس‌سنج جذب نوری است؛ که در آن از روش پمپاژ نوری استفاده می‌شود. اصول استفاده از این دستگاه در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. تحت شرایط معمول دما و فشار، الکترون‌ها در ترازهایی از انرژی (A و B) در اطراف هسته اتم قرار دارند. بر اساس فیزیک کوانتوم انتقال الکترون فقط از سطح انرژی پایین‌تر (A) به سطح انرژی بالاتر (B) و به صورت

^۱ - Larmor precession frequency

پرشی امکان پذیر است. اگر بخار عنصری مانند روبیدیوم یا سزیم با لامپی که رشته داخل آن از همان عنصر ساخته شده، روشن شود، نور ساطع شده در طول موج صحیحی برای فوتون‌های تابشی که جذب بخار می‌شوند، قرار دارد.

بدین ترتیب تراز انرژی پایین الکترون‌ها برای رفتن به تراز بالاتر تحریک می‌شود. اگر نور تابشی به صورت دایره‌ای پلاریزه شده باشد، فقط الکترون واقع در مدار A با تحریک یا پمپاژ نوری به مدار B می‌جهد. در این نقطه فوتون‌های افزایش یافته از درون بخار تحریک شده عبور می‌کنند و باعث افزایش شدت نور می‌شوند؛ که با یک سلول فتوالکتریک آشکار می‌شود.



شکل ۲-۲. طرح شماتیک یک سنسور بخار قلیایی (GEM Systems, 2013).

با عبور جریان متناوبی با فرکانس ۹۰-۳۰۰ کیلو هرتز از سیم‌پیچ واقع در اطراف سلول بخار بازیک (روبییدیوم یا سزیم) میدانی مغناطیسی در اطراف این سلول ایجاد می‌شود. فرکانس تا قفل شدن در فرکانس لارمور برای بخار بازیک مربوط تغییر می‌کند. این میدان مغناطیسی کوچک، انرژی بعضی از الکترون‌ها را برای برگشت به تراز تخلیه شده A مهیا می‌سازد. نتیجه این عمل جذب فوتون‌ها توسط بخار بازیک و کاهش شدت نور در سلول فتوالکتریک تا رسیدن به اشباع دوباره است. جذب فوتون‌ها تا تحریک شدن الکترون‌های موجود و رسیدن به تراز B ادامه می‌یابد که در این حالت شدت نور در سلول فتوالکتریک به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. نتیجه آن که پمپاژ نوری دایره‌ای، نوری در سلول

فتوالکتریک ایجاد می‌کند که با سوسوزدن در فرکانس تقدیمی لارمور به راحتی قابل اندازه‌گیری است. شکل ۲-۲ یک سنسور بخار قلیایی را به صورت شماتیک نمایش داده است.

سرعت نمونه‌برداری مغناطیس‌سنج‌های بخار بازی بیشتر از مغناطیس‌سنج‌های پروتونی است و این حقیقت باعث شده که آن‌ها در برداشت‌های هوایی کاربرد بیشتری داشته باشند چون در این نوع برداشت‌ها سرعت پرنده زیاد است بنابراین سرعت نمونه‌برداری نیز باید بالا باشد. در این تحقیق برداشت‌ها توسط شرکت Pioneer Exploration Consultant Ltd انجام شده و مغناطیس‌سنج مورد استفاده در این برداشت مدل GSMP-35A محصول شرکت GEM Systems و از نوع بخار پتاسیم است.

۲-۲- برداشت‌های مغناطیس هوابرد

اولین برداشت ژئوفیزیکی هوابرد توسط لوگچف در استارایا^۱ در اتحاد جماهیر شوروی سابق در سال ۱۹۳۶ انجام شد. مغناطیس‌سنج مورد استفاده در آن برداشت فلاکس‌گیت با حساسیت ۱۰۰ نانوتسلا بود که مولفه عمودی میدان مغناطیسی را در طول ۶۰ کیلومتر اندازه‌گیری کرد (Logachev, 1936).

داده‌های مغناطیسی هوایی و دریایی موجود در آمریکای شمالی توسط دولت کانادا، ایالات متحده آمریکا و مکزیک جمع‌آوری شده‌اند. در اوایل دهه ۱۹۸۰، اولین نقشه آنومالی مغناطیسی برای ایالات متحده تولید شد (Zietz, 1982).

برداشت‌های مغناطیس هوابرد تنها مختص اکتشافات معدنی نیست و در زمینه‌های نظامی و مهمات منفجر نشده (Salem et al., 2001) و تشخیص ساختارهای زیرسطحی مانند خط لوله کاربرد دارد. همچنین از دیدگاه اکتشافی، استفاده از مغناطیس هوابرد کاربردهای متعددی نظیر اکتشاف

^۱- Staraya

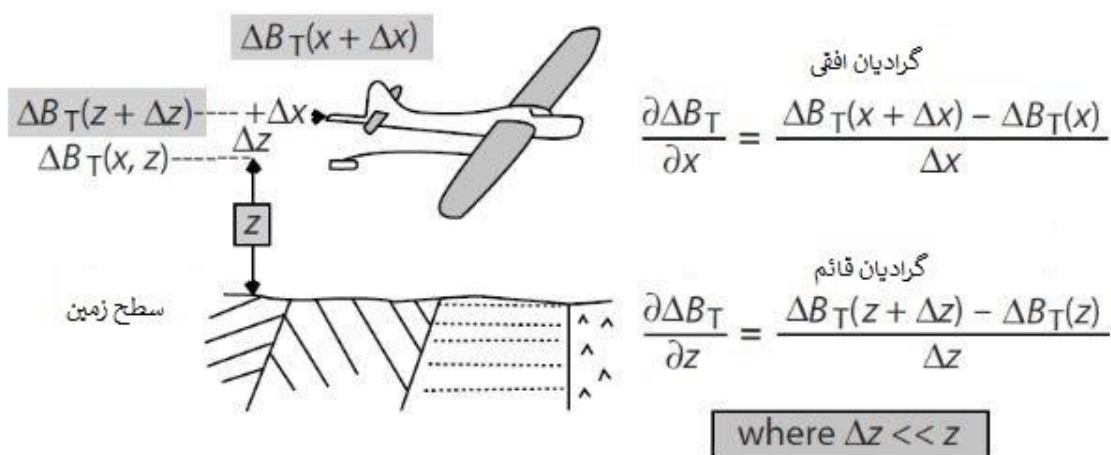
مواد معدنی، شناخت توده‌های کیمبرلیتی، نقشه‌برداری ساختارهای زیرسطحی و ... دارد (Abitibi, 2016).

برداشت‌های مغناطیسی هوابرد به دلیل اقتصادی بودن، سریع بودن و راندمان بالا مهم‌ترین داده‌ها در مناطق وسیع هستند. این برداشت‌ها با توجه به هدف‌های گوناگون قابلیت اجرای متفاوتی دارند و داده‌ها با تراکم بالا در طول خطوط موازی و به فاصله مناسب (با توجه به عمق هدف) برداشت می‌شوند. اندازه‌گیری کامل میدان می‌تواند به همراه اندازه‌گیری داده‌های ایستگاه مبنا و اندازه‌گیری شیب، بردار و تانسور تکمیل شود.

در اغلب برداشت‌ها حالت‌ها الگوی پروازی، خط‌های مستقیمی است که تا حد امکان عمود بر ساختارهای مغناطیسی مورد نظر و یا عمود بر ساختارهای عمومی زمین‌شناسی منطقه انتخاب می‌شود. در حالتی که ساختارهای مغناطیسی موجود نبود، الگو به صورتی طراحی می‌شود که برداشت تسهیل شود (Hinze et al., 2013).

۲-۲-۱- گرادیمتری مغناطیسی

برای اندازه‌گیری گرادیان مغناطیسی، شدت میدان کلی زمین بین دو سنسور مشابه با فاصله کم و یا یک سنسور در دو مکان مختلف در مدت زمان کوتاه اندازه‌گیری می‌شود. اگر مکان‌ها در یک صفحه XY یکسان باشند، آن را گرادیان افقی و اگر تغییرات در ارتفاع‌های مختلف باشد، گرادیان قائم نامیده می‌شود. در به صورت ریاضی در مورد گرادیان یک توضیح کلی داده شده است.



شکل ۲-۳. گرادیان اول شدت مغناطیسی کل (Hinze et al., 2013).

گرادیان‌های افقی و گرادیان‌های قائم هر دو آنومالی‌های منطقه را واضح‌تر می‌کنند؛ اما گرادیان عمودی کاربرد بیش‌تری، دارد زیرا اطلاعات عمق را به خوبی نمایش می‌دهد.

۲-۲-۲- مقدمه‌ای بر برداشت‌های مغناطیسی در چند سطح

اندازه‌گیری گرادیان‌های مغناطیسی مزایای متعددی نسبت به اندازه‌گیری میدان مغناطیسی مشاهده شده در ناحیه مورد مطالعه دارد؛ که شامل به حداقل رساندن اثرات منطقه‌ای، واضح‌تر کردن آنومالی‌ها و حذف تغییرات زمانی مغناطیسی است (Schmidt et al., 2006). با استفاده از این ویژگی-ها گرادیان‌های سطحی برای مطالعه مناطق کم عمق در تحقیقات باستان‌شناسی و شناسایی اشیاء آهنی مانند مین‌های زمینی و جنگ‌افزارها مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین به صورت گسترده‌ای در مطالعات هوایی و دریایی برای استخراج نفت و مواد معدنی استفاده می‌شوند.

همه این کارها با ابزارهای مدرن مغناطیسی که به آن‌ها اجازه می‌دهد برداشت‌ها در فاصله کمی از

منبع مغناطیسی انجام شود، ممکن است (Hinze et al., 2013).

نرخ تغییرات در مولفه قائم میدان مغناطیسی به طور مستقیم با عمق و عرض منبع آنومالی و همچنین حساسیت گرادیان بین منبع و سنگ میزبان، رابطه دارد. بنابراین نقشه‌های گرادیان قائم به درک بهتر مکان، عمق و شکل هدف مورد مطالعه کمک می‌کند.

با توجه به تحقیقات اشمیت^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۶، گرادیمتری مزایای متعددی نسبت به اندازه‌گیری تنها شدت کل مغناطیسی (TMI) دارد:

- واضح‌تر کردن ویژگی‌ها و آنومالی‌های منابع کم عمق
- تعریف بهتر ویژگی‌های ساختاری
- حذف آنومالی‌های منطقه‌ای ناشی از منابع عمیق
- نشان دادن تلاقی‌های زیرسطحی
- پیدا کردن آنومالی‌های کوچک در اطراف منابع متراکم
- تشخیص آسان و توصیف بهتر منابع لوله مانند
- اهمیت کمتر اصلاحات IGRF

با توجه به نظریه میدان پتانسیل، اگر میدان در یک سطح مشخص باشد، می‌توان میدان را در هر سطح بالاتر نیز محاسبه کرد (فرض بر آنکه منبع مغناطیسی بین آن‌ها وجود ندارد) (Billings et al., 2009). یک روش ساده و رایج برای محاسبه گرادیان بدون اندازه‌گیری دوم، استفاده از فیلترهای band-pass است. این فیلترهای band-pass می‌توانند آنومالی‌ها را به راحتی نشان دهند اگر چه این آنومالی‌های در ارتفاع‌ها مختلفی دیده شده باشند. معادله زیر، تغییرات میدان را محاسبه می‌کند (Reeves, 2005).

$$\Delta\phi(z) = \sum_{m=0}^{n=5} \frac{(-1)^m \times z(z+a)(z+2a) \dots (z+na)}{a^n (z+ma)(n-m)! m!} \Delta\phi(-ma)$$

^۱- Schmidt

که در آن Φ میدان مغناطیسی و a ارتفاع به اندازه دلخواه از سطح برداشت،

معادله ۲-۳

برای اعمال فیلتر است.

۲-۳- سیستم‌های هوایی بدون سرنشین (UAVs)

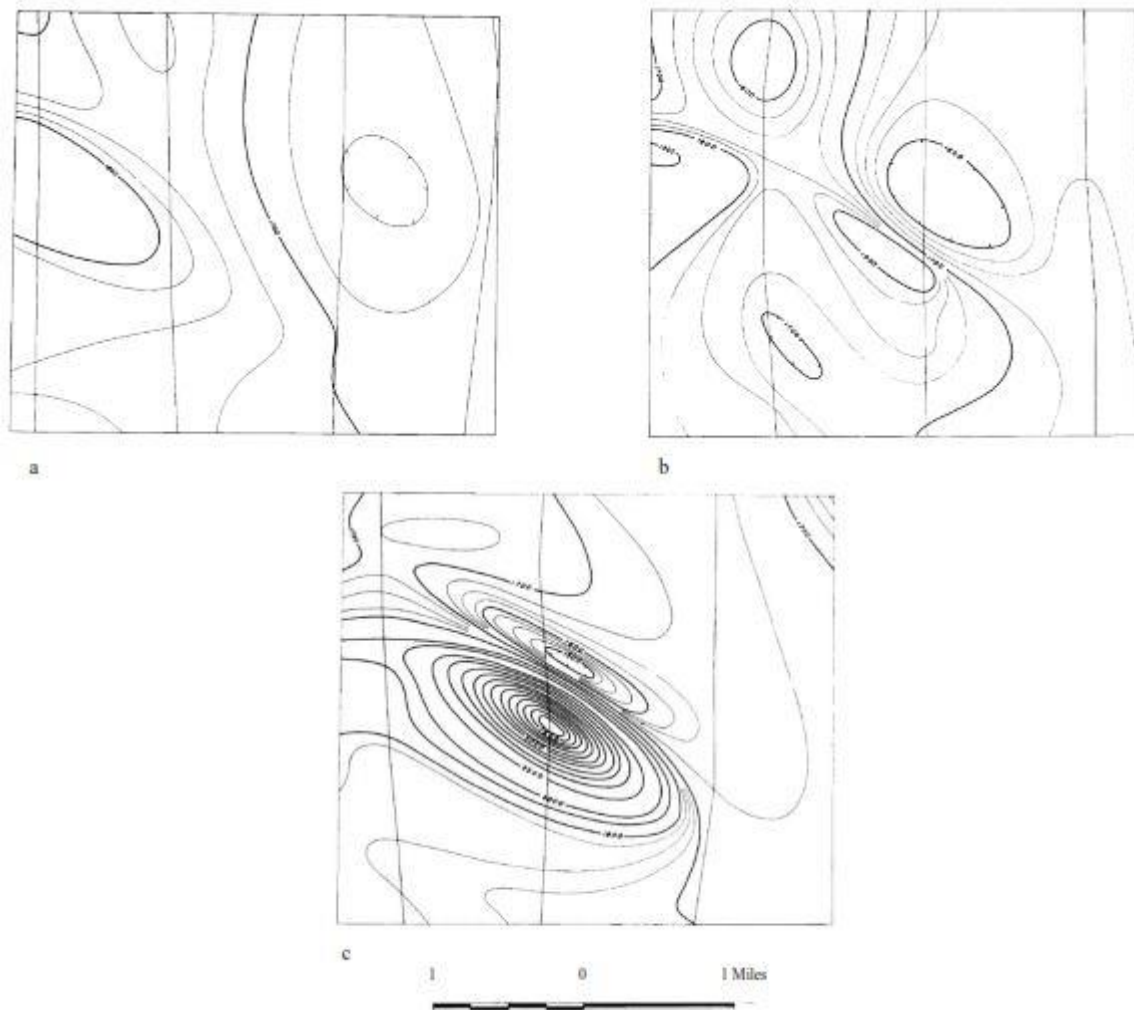
در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در زمینه فناوری پهپادها صورت گرفته است و به صورت گسترده در زمینه‌های صنعتی و علمی از این سیستم‌های هوایی بدون سرنشین استفاده می‌شود. کانادا در حال بازبینی قوانین هوایی برای استفاده از این سیستم‌ها است (Transport Canada, 2016). هواپیماهای بدون سرنشین به سنسورهای حساس و دقیقی مجهز هستند؛ به عنوان مثال، سیستم ناوبری خودکار (IMU)^۱ وژیروسکوپ‌ها، برای نشان دادن ارتفاع و موقعیت هواپیما، همچنین یک میکرو کامپیوتر که باعث می‌شود که پهپاد به صورت خودکار و بدون خلبان پرواز کند (Siebert, 2014). از این رو هواپیماهای بدون سرنشین بسیار کارآمدتر از هواپیماهای معمول است، که احتیاج به خلبان دارند.

در هنگام برداشت‌های ژئوفیزیکی مانند مغناطیس هواپرد عوامل تعیین کننده‌ای در منطقه مورد مطالعه وجود دارد مانند: وسعت منطقه، هدف برداشت، ابزار اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی، نیاز به یک خلبان، توپوگرافی منطقه، هزینه و زمان که برای برداشت صرف می‌شود.

فاصله خطوط پرواز به هدف برداشت و عمق منابع مغناطیسی بستگی دارد. رید^۲ (۱۹۸۰) نشان داد که برای جلوگیری از اشتباهات نامعلوم در داده‌ها که باعث ایجاد مشکل در شناسایی آنومالی‌ها می‌شود، خطوط پرواز باید حداکثر دو برابر عمق منبع مغناطیسی باشد (Hinze et al., 2013). شکل ۴-۲ نشان می‌دهد که چگونه یک منبع اقتصادی به دلیل مناسب نبودن خطوط پرواز از دست می‌رود (Agocs., 1955).

^۱ - Inertial Motion Units

^۲ - Reid



شکل ۲-۴. اثر خطوط پروازی و تراکم خطوط تراورس. داده‌ها در ارتفاع ۵۰۰ فوتی بالای آنومالی مارمورا در جنوب انتاریو کانادا جمع‌آوری شده است. این شکل داده‌های درون‌یابی شده را با خطوط پرواز مختلف نشان می‌دهد. a. ۱ مایل، b. ۳/۴ مایل، c. ۱/۴ مایل (Agocs, 1955).

برای برداشت‌های معمول هوابرد ارتفاع در سطوح نزدیک به زمین ممکن است خطرناک باشد. هرچه خطوط پرواز به هم نزدیک‌تر باشد، هزینه مربوط به برداشت بیشتر می‌شود هرچند کیفیت داده‌ها بیشتر

می‌شود. سیستم‌های پروازی بدون سرنشین برای برداشت‌هایی که سطح ارتفاع باید پایین باشد و منطقه مورد مطالعه نسبتاً کوچک است بسیار مناسب است. پلتفرم‌های مختلف سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای برداشت وجود دارد:

بالن‌ها: پر شده با هوای داغ یا هلیوم یا گازهای سبک دیگر. این سیستم‌ها معمولاً سخت کنترل می‌شوند و معمولاً گران هستند؛ به این دلیل که باید با گازهایی مانند هلیوم پر شوند. با این حال این سیستم‌ها برای برداشتهایی که در ارتفاعات زیاد انجام می‌شوند مانند مطالعات یونسفر و مطالعات پرتوهای کیهانی مناسب هستند. به عنوان مثال ابزارهای تحقیقاتی بر روی انواع تابش‌ها در اتمسفر با بالن‌ها تا ارتفاع ۳۰ کیلومتری حمل شد (Wincker, 1960). مثال دیگر تحقیق انجام شده توسط بروخوف^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ برای مشاهدات گرادیان ژئومغناطیسی است، که از بالن‌های استراتوسفری برای این کار استفاده کرده است.

هواپیماهای بدون سرنشین بال ثابت: این سیستم‌ها با موتورهای بنزینی یا الکتریکی کار می‌کنند و هنگامی که از زمین بلند شدن توسط بال‌های خود به مسیر ادامه می‌دهند. این سیستم‌ها با توجه به ظرفیت حمل خود می‌توانند منطقه نسبتاً وسیعی را پوشش دهند و معمولاً توسط یک سیستم انسانی یا کامپیوتری کار می‌کنند. این سیستم از لحاظ صرف هزینه بسیار به صرفه است اگرچه با توجه به ساختار خود در مناطقی که توپوگرافی متغیر باشد هنگام فرود دچار محدودیت می‌شود.

هلیکوپترها: برخلاف هواپیماهای بدون سرنشین بال ثابت، این سیستم می‌تواند به راحتی بلند شود و در هنگام پرواز سرعت بگیرد. حرکت این سیستم به نسبت راحت است و می‌تواند با توجه به اندازه و وزن خود در بیشتر مکان‌ها فرود بیاید، همچنین قابلیت حمل باتری‌های سنگین‌تر و سوخت بیش‌تر را دارند.

هواپیماهای بدون سرنشین چند موتوره: این سیستم‌ها به طور عمده برای اهداف تفریحی استفاده

می‌شود. این سیستم با انرژی موتورهای خود بلند می‌شود و قدرت مانور و چرخش خود را با تغییر

^۱ - Brokhov

سرعت چرخش موتورهای خود انجام می‌دهد. تمام این عملیات توسط سیستم کنترل پرواز که در درون خود سیستم وجود دارد، انجام می‌شود و بر اساس GPS و IMU هدایت می‌شود. دسترسی راحت، صرفه اقتصادی و اندازه نسبتاً کوچک این سیستم از ویژگی‌های کلیدی آن است. با این حال وابستگی آن به شرایط آب و هوایی و بارگیری نسبتاً کم آن‌ها ممکن است این سیستم را کمی محدود کند (Eck et al., 2011).

مقایسه بین سیستم عامل‌های موجود توسط سایبرت^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام شد. نتایج این تحقیق در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲. مقایسه مزایا و محدودیت‌های سیستم‌های پرواز بدون سرنشین (After Siebert et al., 2014).

نوع هواپیما	بهره‌وری و دامنه	انعطاف پذیری و مانور پذیری	وابستگی به آب و هوا	ظرفیت ترابری	ایمنی	پیچیدگی و سادگی	هزینه های جاری
بالن	بسیار خوب	متوسط	ضعیف	بسیار خوب	خوب	خوب	ضعیف
بال ثابت	بسیار خوب	ضعیف	خوب	خوب	متوسط	متوسط	متوسط
هلیکوپتر	متوسط	بسیار خوب	خوب	بسیار خوب	ضعیف	ضعیف	متوسط
چند موتوره	ضعیف	بسیار خوب	خوب	متوسط	متوسط	خوب	بسیار خوب

بر اساس این مقایسه‌ها، هلیکوپترها و پهپادهای چند موتوره به عنوان بهترین راه‌حل برای برداشت‌های ژئوفیزیکی هوابرد بدون سرنشین در نظر گرفته شده‌اند.

^۱- Siebert

سیستم‌های هوایی بدون سرنشین چند موتوره که مبتنی بر انرژی الکتریکی کار می‌کنند، بسیار به صرفه هستند و هر کدام از موتورهای آن‌ها با یک کنترل کننده سرعت الکترونیک (ESC)^۱ مرتبط است. این مدار جریان را کنترل می‌کند بنابراین سرعت چرخش هر موتور را نیز تنظیم می‌کند. هسته اصلی پهپاد شامل واحد اندازه‌گیری اولیه (IMU)^۲، GPS و کمپاس و ... است. تمام وظایف مربوط به ارتفاع و تنظیم ارتفاع توسط برد کنترل پرواز انجام می‌شود. برای استفاده از پهپاد در برداشت‌های ژئوفیزیکی هواپرد، از آن جایی که نیاز به تعیین موقعیت دقیق جغرافیایی وجود دارد، استفاده از کنترل خودکار ترجیح داده می‌شود. با این وجود می‌توان از کنترل دستی نیز استفاده کرد (Parvar et al., 2016). در ادامه مزایا و محدودیت‌های پهپاد مورد استفاده در این مطالعه به همراه توضیحات فنی مختصر، توضیح داده شده است.

۲-۳-۱ - پهپاد فانتوم دی.جی.آی^۳

فانتوم یک پهپاد کوچک است که قادر به پرواز تا فاصله ۳۰۰ متری واحد کنترل است. حجم وابعاد کوچک این پهپاد استفاده از آن را برای برداشت‌های عملیاتی محدود می‌کند. از فانتوم برای برداشت‌های ژئوفیزیکی هواپرد استفاده شده است. مشخصات فنی این پهپاد درجدول ۲-۲ آورده شده است.

^۱- Electronic Speed Controller

^۲- Inertial Measurement Unit

^۳- DJI Phantom 2+

Weight (Battery & Propellers included)	1000g
Hover Accuracy (Ready to Fly)	Vertical: 0.8m; Horizontal: 2.5m
Max Yaw Angular Velocity	200°/s
Max Tilt Angle	35°
Max Ascent / Descent Speed	Ascent: 6m/s; Descent: 2m/s
Max Flight Speed	15m/s(Not Recommended)
Diagonal Length	350mm
Flight Time	25mins
Take-off Weight	≤1300g
Operating Temperature	-10°C ~ 50°C
Supported Battery	DJI Smart Battery

جدول ۲-۲. مشخصات فنی پهپاد دی. جی. آی فانتوم.

۲-۳-۲ - پهپاد دی. جی. آی، اس ۹۰۰

پهپاد اس ۹۰۰ یک پرنده بدون سرنشین دیگر از دی جی آی است. در مقایسه با فانتوم از ابعاد بزرگ‌تر و توانایی بارگیری بیش‌تری برخوردار است. این پهپاد شامل شش موتور و از جریان مصرفی بالاتری استفاده می‌کند. محدوده ارتفاع پرواز و زمان پرواز با توجه به برداشت می‌تواند تنظیم شود. ویژگی‌های پهپاد اس ۹۰۰ در جدول ۳-۲ آمده است (DJI, 2016).

^۱- DJI S900

Diagonal Wheelbase	900mm
Frame Arm Length	358mm
Frame Arm Weight (Including Motor, ESC, Propeller)	316g
Center Frame Diameter	272mm
Center Frame Weight (with Landing Gear Mounting Base, Servos)	1185g
Landing Gear Size	460mm(Length)×450mm(Width)×3 60mm(Height)
Working Current	40A
Working Voltage	6S LiPo
Signal Frequency	30Hz ~ 450Hz
Drive PWM Frequency	8KHz
Weight(with Radiators)	35g
Takeoff Weight	4.7Kg ~ 8.2Kg
Total Weight	3.3Kg
Power Battery	LiPo (6S, 10000mAh~15000mAh , 15C(Min))
Max Power Consumption	3000W
Hover Power Consumption	1000W (@6.8Kg Takeoff Weight)
Hover Time	18min (@12000mAh& 6.8Kg Takeoff Weight)
Working Environment Temperature	-10 °C ~ +40 °C

جدول ۲-۳. مشخصات فنی پهپاد اس ۹۰۰ (DJI, 2016).

این پهپاد قادر به حمل وسایل مختلف از جمله یک دوربین DSLR و یک مغناطیس سنج بخار پتاسیم است. همچنین یک ارتفاع سنج لیزری برای ثبت اطلاعات ارتفاع وجود دارد. ارتفاع سنج میکرو لیزر

(MLM-120) برای ثبت دقیق ارتفاع در طول پرواز استفاده می شود و قادر به تشخیص ارتفاع تا ۱۲۰ متر است. این سیستم از برخورد پهپاد به زمین در طول پرواز جلوگیری می کند. از داده های ارتفاع بعد از پرواز می توان برای مدل کردن توپوگرافی نیز استفاده کرد. جهت یابی و کنترل خودکار^۱ به

^۱-Autopilote

وسیله کنترل کننده پرواز A2 و نرم افزار کنترل خودکار سازگار با لپ تاپ انجام می شود. دقت حرکت پهپاد بر اساس دستورعمل DJI A2 برای حرکت عمودی ۰/۵ متر و ۱/۵ متر در حرکت افقی است (DJI, 2016).

در این تحقیق از مغناطیس سنج بخار پتاسیم GSMP-35A استفاده می شود؛ که به صورت سفارشی بر روی پهپاد با سه متر فاصله بین پهپاد و سنسور نصب شده است. حساسیت گزارش شده مغناطیس-سنج ۰/۳ pT در ۱ Hz و دقت مطلق آن ± 0.1 نانوتسلا است. سنسور می تواند در محدوده دینامیکی ۲۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ نانوتسلا عمل کند. مشخصات کامل تر این سیستم در جدول ۲-۴ نشان داده شده است (GEM Systems, 2013; Pioneer Exploration).

Sensitivity:	0.3 pT @ 1Hz
Heading Error	± 0.05 nT between 10° and 80° degrees and 360 degrees full rotation about axis
Resolution	0.0001 nT
Absolute Accuracy	± 0.1 nT
Dynamic Range	20,000 to 100,000 nT
Gradient Tolerance	35,000 nT/m
Sampling rate	up to 20Hz
Orientation	Optimum angle 35 degrees between sensor head axis and field vector

جدول ۲-۴. مشخصات کلی مغناطیس سنج GSMP35-A شرکت جم سیستم (GEM Systems, 2013).

سیستم جمع آوری داده ها نیز در سیستم گنجانده شده است. از سامانه لایت ام یو ایکس^۱ برای ثبت داده های تمام سنسورها بر روی کارت حافظه استفاده شده است. داده های GPS، ارتفاع سنج لیزری،

^۱- LightMUX

مغناطیس‌سنج، کمپاس و ژيروسکوپ در کنار هم تولید یک رشته داده همگام‌سازی شده با زمان را در اختیار قرار می‌دهد (GEM Systems, 2014).

فصل ۳ – مبانی پردازش

داده‌های مغناطیس هوابرد

۳-۱- مقدمه

پس از طراحی و برداشت داده‌های مغناطیسی، باید داده‌ها پردازش شوند. منظور از پردازش، انجام تمامی مراحل است که داده‌ها را برای تحلیل آماده می‌کند. پردازش داده‌ها یکی از مهمترین مراحل هر پروژه است؛ که صحت مراحل بعدی وابسته با آن است.

فرآیند پردازش را می‌توان در دو بخش خلاصه کرد (Luyendyk 1997):

الف) پیش‌پردازش

۱. کنترل کیفی^۱، بازبینی و تصحیح داده‌های خام

۲. مشخص کردن مکان دقیق داده‌ها بر حسب X و Y

ب) پردازش

۱. حذف اثر تغییرات میدان مغناطیسی^۲

۲. حذف اثر تاخیر زمانی ثبت بی‌هنجاری و جابجایی مکانی آنومالی^۳

۳. حذف اثر تغییر جهت سنسور مغناطیس‌سنج و میدان القایی بدنه وسیله پرنده^۴

۴. تصحیح IGRF^۵، حذف اثرات تغییرات مکانی و زمانی

۵. همترازسازی داده‌های برداشت شده با استفاده از خطوط کنترلی^۶

^۱- Quality Control

^۲- Diurnal Correction

^۳- Lag Correction

^۴- Heading Correction

^۵- International Geomagnetic Reference Field Correction

^۶- Tie Line Levelling

۳-۲- مرحله پیش‌پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد

۱) کنترل کیفی، بازبینی و تصحیح داده‌های خام

به منظور تولید نقشه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی با کیفیت بالا و عاری از نوفه و اثرات متفرقه مغناطیسی باید نخست به شناسایی و حذف نوفه پرداخت. کنترل کیفی داده‌های خام مغناطیس مطابق دو مرحله زیر صورت می‌گیرد:

۱-الف) شناسایی و حذف نوفه از داده‌های شدت میدان مغناطیسی پرواز

یک معیار کلاسیک برای تفکیک نوفه از بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، استفاده از مشتق چهارم نرمالایز شده است. با استفاده از مشتق چهارم نرمالایز شده می‌توان محل نوفه را در پروفیل‌های مغناطیس هوابرد شناسایی کرد (Luyendyk, 1997). محاسبه مشتق چهارم نرمالایز شده به روش تفاضل محدود انجام می‌شود و رابطه آن به صورت زیر می‌باشد:

$$4th\ difference = (T_{-2} - 4T_{-1} + 6T_0 - 4T_{+1} + 4T_{+2})/16 \quad ۱-۳$$

که T_{+2} , T_{+1} , T_0 , T_{-1} , T_{-2} پنج قرائت متوالی در برداشت مغناطیس هستند که قرائت T_0 در مرکز آن‌ها قرار دارد (Reeves, 2005).

بر اساس استاندارد^۱ AGSO، اگر دامنه تغییرات مشتق چهارم به طور پیوسته در طول ۱ کیلومتر از ۱/۶ نانوتسلا تجاوز نماید، داده‌های برداشت شده حاوی نوفه هستند. مگر اینکه پدیده‌های زمین شناسی این نوفه را توجیه نمایند. گاهی ممکن است به صورت قراردادی مقدار عددی ۱/۶ نانوتسلا تغییر نماید. بر اساس تحقیق کایل^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۴ در کانادا میزان دامنه نوفه قابل قبول در برداشت ۰/۱ نانوتسلا است. به منظور جلوگیری از تغییر یا حذف ناخواسته اثر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، پس از شناسایی محل نوفه باید آن را به صورت دستی حذف نمود.

^۱- Australian Geological Survey Organization

^۲- Coyle

۱-ب) شناسایی و حذف نوفه از داده‌های شدت میدان مغناطیسی ایستگاه مبنا

به منظور اطمینان از صحت داده‌های ایستگاه مبنا باید تغییرات کوتاه و بلندمدت بررسی شود. مطابق استاندارد AGSO، اگر پروفیل تغییرات میدان در مدت ۵ دقیقه بیش از ۱۰ نانوتسلا تغییر کند، تغییرات کوتاه‌مدت وجود داشته و داده‌ها باید اصلاح شوند. تغییرات کوتاه‌مدت معمولاً ناشی از محل نامناسب ایستگاه مبنا می‌باشد. حضور نوفه در داده‌ها می‌تواند ناشی از تردد وسایل نقلیه، تردد انسان، ایستگاه‌های رادیویی، صاعقه، خطوط نیرو و ... باشد (Reeves, 2005).

از دیدگاه تئوری، یک پنجره به عرض ۵ دقیقه در نظر گرفته می‌شود؛ که با حرکت بر روی پروفیل، در هر مکان، تفاضل کمینه و بیشینه مغناطیس بر آن بررسی خواهد شد. پس از بررسی تغییرات کوتاه‌مدت باید تغییرات بلند مدت نیز محاسبه و بررسی شود. طبق استاندارد AGSO، اگر تغییرات میدان مغناطیسی زمین در ایستگاه مبنا در مدت ۳ ساعت از ۷۰ نانو تسلا تجاوز کند، نشانگر طوفان مغناطیسی خفیف^۱ و اگر از ۱۲۰ نانوتسلا تجاوز کند، نشان‌دهنده طوفان مغناطیسی شدید^۲ است. در صورت وقوع طوفان مغناطیسی، داده‌های ایستگاه مبنا مخدوش بوده و باید مجدداً برداشت شوند. بررسی تغییرات بلندمدت مانند تغییرات کوتاه‌مدت است؛ با این تفاوت که پهنای باند در آن سه ساعت در نظر گرفته می‌شود.

۲) مشخص کردن مکان دقیق داده‌ها بر حسب X و Y

محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در نقشه‌های اولیه نسبت به مکان واقعی آن‌ها بر روی زمین دارای اختلاف است؛ که این اختلاف دارای دو منشأ زمانی و مکانی بوده و به آن Lag می‌گویند. اثر این خطا در داده‌های برداشت شده باعث می‌شود که بی‌هنجاری‌های خطی در حین برداشت رفت و برگشت به صورت زیگزآگی و خمیده مشاهده شوند (سبطی، ۱۳۹۲).

^۱- Minor Storm

^۲- Major Storm

به طور کلی سیستم برداشت داده‌های مغناطیس هوابرد دو نوع است: ثابت^۱ و معلق^۲. در سیستم ثابت، گیرنده مغناطیس متصل به بدنه پرنده است و در حالت معلق، گیرنده مغناطیس توسط کابلی به صورت آویزان از وسیله پرنده قرار دارد.

در سیستم برداشت ثابت معمول با هواپیما، فاصله افقی بین گیرنده مغناطیس و دستگاه GPS حدوداً ۱۳ تا ۱۳/۵ متر و اختلاف ارتفاع حدود ۲/۵ متر است؛ که باعث به وجود آمدن خطا می‌شود. به منظور جلوگیری از بروز خطا باید مختصات دقیق نقاط برداشت محاسبه شود. تصحیح جابجایی محل سنسور و محل GPS، که به آن Parallax نیز گفته می‌شود؛ به سادگی از طریق اندازه‌گیری فاصله‌های مکانی، قابل اعمال به کانال مختصات است. هرچند برای برداشت با پهپاد این میزان ناچیز است. چون مغناطیس‌سنج در زیر پهپاد معلق است. در سیستم برداشت معلق، فاصله مکانی بین گیرنده مغناطیسی و GPS اندک بوده و نیاز به تغییر مختصات x و y ندارد.

۳-۳- مرحله پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد

پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد، طی ۵ مرحله که به اختصار در زیر آورده شده، بیان می‌شود.

۳-۳-۱- تصحیح روزانه میدان مغناطیسی

میدان مغناطیسی زمین در یک نقطه ثابت با گذشت زمان تغییر می‌کند. این تغییرات در داده‌های مغناطیسی برداشت شده در حین پرواز نیز نهفته است؛ از این رو پس از کنترل کیفی و تایید کیفیت تمام یا بخشی از داده‌ها باید به تصحیح روزانه داده‌ها اقدام شود. تغییرات روزانه به وسیله یک ایستگاه مبنا در یک مکان ثابت بر روی زمین بررسی می‌شود. برای پردازش روزانه، توجه به صحت و سلامت داده‌های ایستگاه مبنا ضروری است. تغییرات کوتاه و بلند مدت داده‌های ایستگاه مبنا باید در شرایط استاندارد قرار داده شوند. معیار تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت، بسته به نوع قراردادهای متفاوت است. معمولاً پروفیل مغناطیسی ایستگاه مبنا، برای تغییرات کوتاه مدت در هر دقیقه نباید از ۲ نانوتسلا و

^۱- Stinger

^۲- Sling

برای تغییرات بلند مدت در ۳ ساعت از ۷۰ نانوتسلا تجاوز کند. اگر تغییرات بلند مدت رخ دهد، داده-های برداشت نیز مخدوش می‌شود و باید پرواز تکرار شود. زیرا این تغییرات مربوط به طوفان‌های مغناطیسی است. تغییرات کوتاه مدت معمولاً ناشی از محل نامناسب ایستگاه مبنا است و در صورت بروز این تغییرات داده‌های برداشت قابل استفاده است (Luyendyk, 1997).

۳-۲-۳- حذف اثر جابجایی محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی

به طور کلی ممکن است داده‌های هوابرد در زمانی که به وسیله سیستم اندازه‌گیری مغناطیسی ثبت می‌شوند، نسبت به مختصات مکانی واقعی خود دارای جابجایی باشند. این جابجایی می‌تواند به دلیل یکسان نبودن مکان سنسور اندازه‌گیری داده و آنتن GPS باشد و یا به دلیل تاخیر زمانی در ثبت داده‌ها رخ دهد. مقدار مغناطیسی اندازه‌گیری شده بر روی هر نقطه از خطوط پرواز به موقعیت مکانی که GPS ثبت می‌کند، نسبت داده می‌شود. برای حذف اثر Lag که ناشی از تاخیر زمانی ثبت بی-هنجاری است، می‌توان از آزمایش Lag و یا داده‌های پرواز استفاده نمود. در روش اول باید پرواز به صورت رفت و برگشت و عمود بر امتداد یک سازه طولی و دارای اثر مغناطیسی انجام شود. ریل راه-آهن انتخاب مناسبی برای این آزمایش است. پس از پرواز با مقایسه پیک بی‌هنجاری مغناطیسی در مسیر رفت و برگشت، میزان جابجایی بی‌هنجاری محاسبه می‌شود؛ در نتیجه مقدار Lag تعیین خواهد شد. روش دوم استفاده از داده‌های پرواز است. در این روش با استفاده از میزان دامنه بی-هنجاری‌های خطی که عمود بر خطوط پرواز است، می‌توان مقدار Lag را تعیین کرد. بی‌هنجاری‌های خطی می‌تواند یک گسل در منطقه باشد؛ که به دلیل تاخیر زمانی در ثبت داده‌های مغناطیس، به صورت زیگزاگ درآمده است. نصف میزان دامنه بی‌هنجاری محاسبه شده برابر مقدار تصحیح Lag است. در صورت عدم وجود بی‌هنجاری‌های خطی نمی‌توان مقدار Lag را با استفاده از داده‌های پرواز

محاسبه کرد. میزان Lag بسته به مشخصات سیستم است و در صورت عدم تعویض سیستم در پروژه-ها، این عدد یکسان است (Reeves, 2005).

۳-۳-۳- حذف اثر تغییرات میدان مغناطیسی وابسته به جهت برداشت داده‌های

مغناطیسی

برای حذف اثر جهت پرواز از تصحیح Heading استفاده می‌شود. نقشه میدان مغناطیسی حاصل از برداشت داده‌ها بر روی خطوط وابسته به جهت پرواز است؛ که این امر ناشی از دو عامل است: (۱) تغییر جهت سنسور در پرواز رفت و برگشت بر روی پروفیل، (۲) هر شی دارای خاصیت مغناطیسی در حال حرکت وقتی که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، باعث تولید میدان مغناطیسی القایی ثانویه می‌شود؛ که اثر آن با میدان مغناطیسی زمین مقابله می‌کند. این اثر در برداشت‌های هوایی به دلیل استفاده از هواپیما، بالگرد و پهپاد کاملاً مشهود است؛ به طوری که در نقشه‌های شدت میدان مغناطیسی ساخته شده از خطوط رفت و برگشت، به صورت یکی در میان افزایش و کاهش نشان می‌دهند (Reeves, 2005). برای شناسایی این اثر و حذف آن، از آزمایش Heading استفاده می‌شود؛ به این صورت که در یک میدان آرام در ارتفاع بالا پروازهایی در امتداد خطوط پرواز و خطوط کنترلی انجام می‌شود. میانگین چهار عدد قرائت شده در محل تقاطع خطوط پرواز در چهار جهت مختلف بیانگر میدان واقعی بوده و اختلاف هر خط پرواز از این عدد، مقدار خطای Heading را مشخص می‌نماید (Reeves and Bullock, 2006). روش دیگر برای تصحیح این اثر استفاده از داده‌های پروازی است. در این روش ابتدا آزمون‌های خطوط پرواز مشخص می‌شود و سپس در هر آزمون میانگین مقادیر شدت میدان محاسبه می‌شود. سپس میزان خطای تغییرات میدان وابسته به جهت برداشت داده، تعیین می‌شود (Reeves, 2005).

۳-۳-۴- تصحیح IGRF

میدان مغناطیسی زمین برآیندی از میدان ناشی از بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سطحی و میدان حاصل از قشر خارجی هسته زمین است. کره زمین دارای شکل و شامل اجزایی چون پوسته، گوشته و هسته است که به صورت ریاضی با اعداد و ارقام قابل محاسبه است که می‌تواند مولد یک میدان استاندارد و یکنواخت باشد. این مدل توسط مجموعه‌ای از ضرایب هارمونیک کروی به درجه و مرتبه ۱۳ تعریف شده است. با حذف این مقدار از هر نقطه برداشت مقدار مطلق بی‌هنجاری‌ها به دست می‌آید (Reeves, 2005).

۳-۳-۵- هم‌ترازسازی

در برداشت‌های هوابرد به دلیل وسعت بالای مناطق و زمان طولانی برداشت، اثر تغییرات بلند مدت میدان مغناطیسی در داده‌های مغناطیس‌هوایی قابل مشاهده است. به منظور حذف این اثر خطی و خروجی بهتر داده‌ها، خطوط کنترلی برداشت می‌شود. خطوط کنترلی، خطوطی عمود بر پرواز برداشت هستند که در بازه کوتاه برداشت می‌شود. بدیهی است که در تقاطع خطوط پرواز اصلی و خطوط کنترلی مقدار میدان باید یکسان باشد، اما در حقیقت این مقادیر برابر نیست. این تفاوت مقادیر به دلیل اختلاف ارتفاع پرواز خطوط اصلی و خطوط گرادیان می‌تواند باشد؛ که دلیل آن گرادیان ناچیز مغناطیسی در راستای قائم است؛ اما بخش اصلی این تفاوت تغییرات بلند مدت میدان مغناطیسی با منشاهای مختلف است (Reeves, 2005).

فصل ۴- اثر مغناطیسی سیستم هوایی بدون سرنشین

اثر مغناطیسی سنسور همواره نقش مهمی در برداشت‌های هوایی ایفا می‌کند. اجتناب از تأثیرات مغناطیسی پرنده در هنگام برداشت و حذف این اثرات پس از آن یکی از نگرانی‌های اصلی ژئوفیزیست‌ها در برداشت‌های هوا برد است. امروزه مواد استفاده شده در پیکر هواپیماهای مدرن از آلیاژ آلومینیومی است که غیرمغناطیسی یا حساسیت مغناطیسی بسیار کمی دارند. مهم‌ترین اثر مغناطیسی هواپیما موتورهای آن‌ها است. به عنوان اولین رویکرد برای به حداقل رساندن اثرات مغناطیسی موتور بر روی سنسور، با توجه به محدودیت‌های برداشت، سنسور باید تا حد ممکن از هواپیما یا پهنپاد دور باشد. اولین راه حل حذف این اثر در گذشته قرار دادن سنسور درون "پرنده" بود؛ که با کابلی در زیر هواپیما آویزان بود؛ تا اثر مغناطیسی مذکور به حداقل برسد (Reeves, 2005). استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای برداشت‌های هوایی مغناطیسی نیاز به تولید پهنپادهایی با مواد غیرمغناطیسی^۲ دارد. استرلیگو^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ سیستم‌های موجود در پهنپاد را ارزیابی کرده و شروع به ساختن پهنپاد با تمرکز بر روی مواد غیرمغناطیسی کردند؛ که اثر مغناطیسی آن را به حداقل رسانند. در این فصل به بررسی و اندازه‌گیری اثر مغناطیسی دو نوع از پهنپادهای استفاده شده در این تحقیق پرداخته و همچنین اثرات مغناطیسی استاتیک و دینامیک پهنپاد بررسی می‌شود.

(۱) DJI Phantom 2+ و (۲) DJI S900.

^۱- Bird

^۲- non-magnetic Unmanned Aerial Platform

^۳- Sterligov

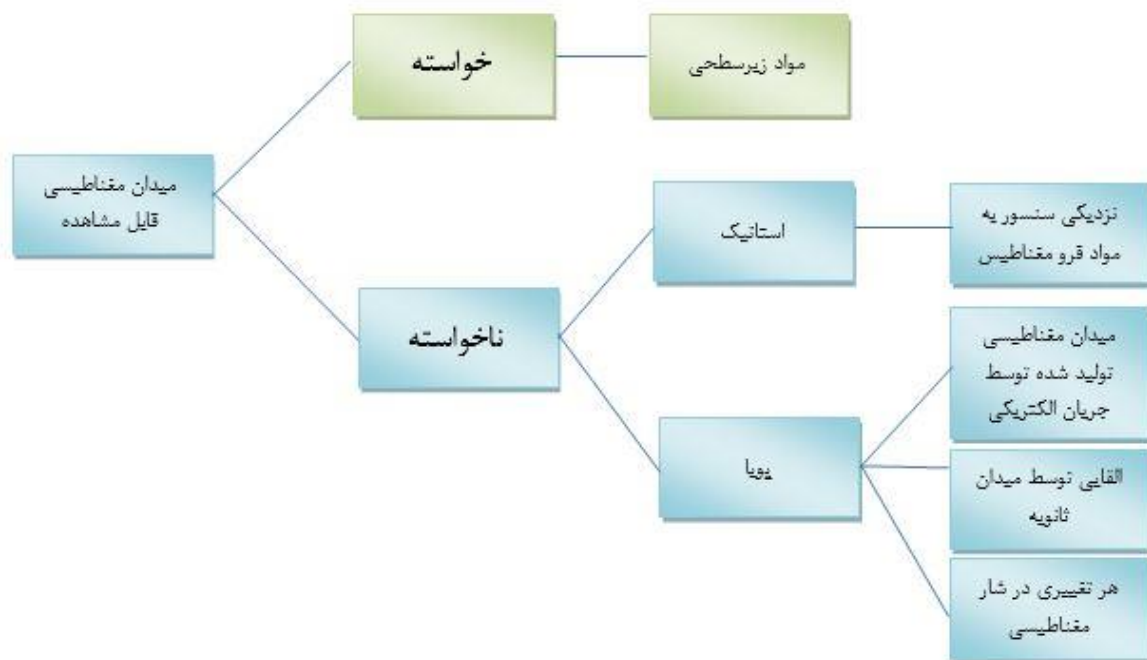
۴-۲- اثر مغناطیسی در برداشت‌های هوابرد

برداشت‌های هوایی مغناطیسی یکی از ابزارهای مفید برای اکتشاف معدن و شناسایی زیرساخت-هاست (Hinze et al., 2013). اگر چه این روش دارای معایب خاص خود است. در تمام برداشت‌های هوایی مغناطیسی، میدان مغناطیسی به وسیله یک مغناطیس‌سنج اندازه‌گیری می‌شود؛ در حالی که هواپیما در حال پرواز است. اجزا سازنده هواپیما یا پهپاد ممکن است شامل موادی باشد که بتواند تغییراتی مغناطیسی قابل توجه تولید کند. علاوه بر این، اجزای پهپاد و مدارهای الکتریکی استفاده شده در آن، باعث ایجاد اثرات ناخواسته و جریان‌های مخالف و همچنین ایجاد میدان مغناطیسی القایی می‌شود.

همچنین میدان مغناطیسی زمین به اندازه کافی قوی است، تا یک میدان مغناطیسی را در اجزای هواپیما ایجاد کند. همان‌طور که در بالا ذکر شد، سیستم‌های اولیه برداشت مغناطیسی هوابرد از سنسورهایی استفاده می‌کرد که به سادگی درون محفظه‌ای به نام پرنده توسط هواپیما و بالگرد حمل می‌شد. شرکت جم سیستم به تازگی یک پرنده همه جانبه را توسعه داده که می‌تواند هم با سیستم بدون سرنشین و هم با تنظیمات کنترل از راه دور هدایت شود (GEM Systems, 2016).
پرور و همکاران در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی اثر مغناطیسی وسیله پرنده را به دو زیر گروه تقسیم کردند (شکل ۴-۱):

(۱) اثر استاتیکی

(۲) اثر دینامیکی یا پویا



شکل ۴-۱. اثر مغناطیسی حاصل از وجود پرنده روی داده‌های مغناطیسی (After Parvar et al., 2016).

۴-۲-۱- اثر استاتیکی

همان‌طور که در بالا ذکر شد، اجزاء هواپیما ممکن است یک میدان مغناطیسی دائم تولید کنند که عموماً به وسیله مواد سازنده آن‌ها به وجود می‌آیند. این میدان با تغییرات جریان الکتریکی یا سرعت پهناد یا هواپیما تغییر نمی‌کند. از آن‌جا که این اثر از منابع غیرالقایی است، به راحتی در فواصل مختلف

اندازه‌گیری می‌شود و سپس از مقدار کل کاسته می‌شود (Parvar et al., 2016).

۴-۲-۲- اثر دینامیکی

تأثیرات دینامیکی را می‌توان به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱. القای میدان مغناطیسی در هر بخش رسانای هواپیما بر اساس قانون لنز، یک میدان ثانویه

ایجاد می‌کند. این القا معمولاً نتیجه مستقیم تغییرات در شار مغناطیسی است که مربوط

به تغییرات جهت حرکت هواپیما است. این اثر می‌تواند نتیجه نوسانات سنسور نیز باشد (Parvar et al., 2016).

۲. یک فرآیند مشابه میدان القایی نیز هنگامی که جریان‌های موتور تغییر می‌کنند، به وجود می‌آید؛ که شامل جریان‌های گردابی در پیکره هواپیما می‌شود. حرکت‌های مختلف هواپیما (Pitch, yaw, roll) می‌توانند بر روی میدان اندازه‌گیری شده تاثیر بگذارد. با قرار دادن

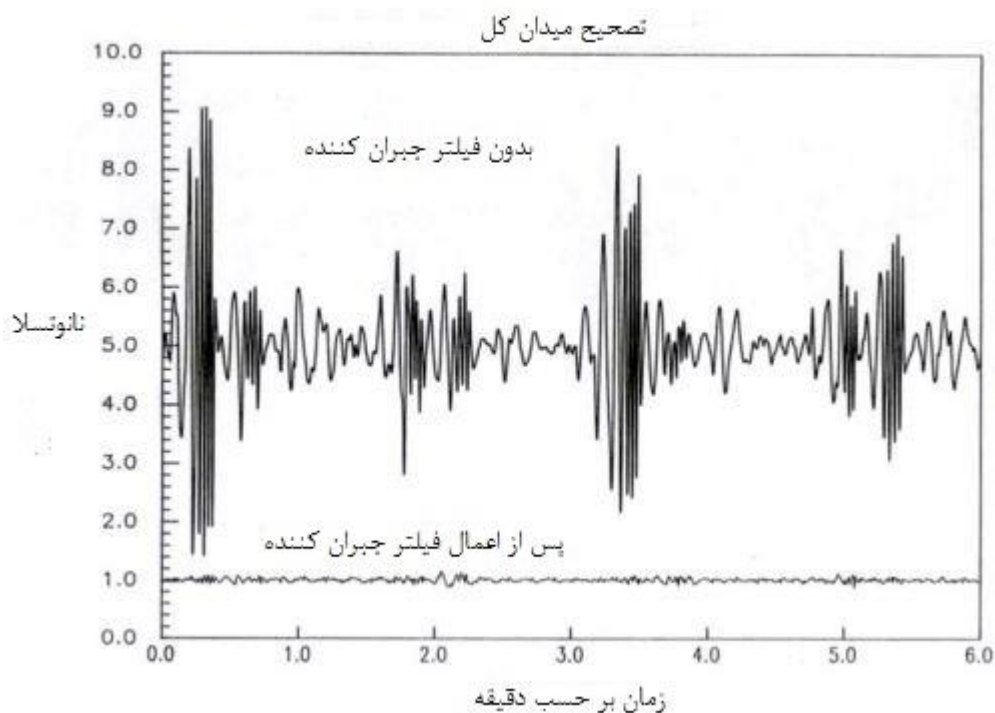
سیم‌پیچ‌هایی که میدان مشابه جریان‌های گردابی در نزدیکی سنسور تولید می‌کنند، می‌توان این اثرات را کاهش داد. همچنین با قرار دادن موادی که نفوذپذیری بالای مغناطیسی دارند، در یک نقطه خاص، مشکلات مربوط به جریان‌های القایی نیز حل می‌شود. داشتن یک میدان مغناطیسی استاتیکی که به وسیله میدان شناخته و کنترل شده باشد، می‌تواند تاثیرات استاتیکی تولید شده به وسیله هواپیما را فیلتر کند (Reeves, 2005).

پیچیدگی تاثیرات دینامیکی هواپیما و پهپاد، مدل کردن این اثرات را تقریباً غیرممکن می‌کند و داشتن یک مدل که به اندازه کافی دقیق باشد، یک کار چالش برانگیز است. با این حال اندازه‌گیری این اثرات با سنسورهای دیگر و نظارت بر تمام متغیرهای هم‌زمان با برداشت، یک روش منطقی برای پیش‌پردازش اطلاعات مغناطیسی است. امروزه جبران‌کننده‌های مغناطیسی فعال برای بررسی این مشکلات در هنگام برداشت توسعه داده شده است (Sterligov, 2016).

برای ثبت اثرهای تولید شده که هنگام مانور و تغییر جهت در هنگام برداشت تولید می‌شوند، مغناطیس‌سنج‌هایی در سه محور این تغییرات را ثبت می‌کنند. با استفاده از

الگوریتم یادگیری ماشین^۱ می‌توان این تاثیرات را تا حد خوبی از میدان اندازه‌گیری شده، حذف کرد.

شکل ۲-۴ نشان می‌دهد که هر چند گاهی تاثیرات مانور تا ۱۰ نانوتسلا تجاوز می‌کند، ولی با استفاده از این روش می‌توان سیگنال خروجی را بهبود بخشید (Reeves, 2005).



شکل ۲-۴. میدان اندازه‌گیری شده در هنگام مانور در مقایسه با همان سیگنال با استفاده از جبران‌کننده‌های مغناطیسی فعال (Reeves, 2005).

هر دو اثر استاتیکی و دینامیکی بر سیگنال ثبت شده به وسیله مغناطیس‌سنج تاثیر می‌گذارد. این اثرات می‌تواند منقطع یا ادامه‌دار باشد (Cunningham, 2016). به عنوان مثال پرواز بر روی خطوط برق تاثیر منقطع و ناگهانی است. این نوع نوفه‌ها را می‌توان به صورت دستی یا با استفاده از فیلترهای غیر خطی حذف کرد (Reeves, 2005). اثرات ادامه‌دار نیز به وسیله موتورهای و دیگر منابع نوسان رخ می‌دهد (Cunningham, 2016).

^۱- Machine learning

۴-۳- اثر مغناطیسی وسیله‌های هوایی بدون سرنشین

مشابه هر آنچه که در بالا برای برداشت‌های هوایی با هواپیما ذکر شد، برای برداشت با پهپاد نیز پیش‌بینی می‌شود. این قسمت از این مطالعه تلاش می‌کند که تاثیرات مغناطیسی پهپاد را بیشتر توضیح دهد. برای اطمینان از اینکه برداشت‌ها با حداقل تاثیرات انجام شود، درک میدان مغناطیسی تولید شده با وسیله هوایی بدون سرنشین ضروری است. پهپادهای استفاده شده در این تحقیق دارای موتورهای الکتریکی هستند و برای رسیدن به نیروی لازم، باید جریان قابل توجهی را از منبع کسب کنند. با جریان‌های متغیر که منجر به تولید میدان مغناطیسی متغیر می‌شود، این امر ضروری است که در تمام مدت برداشت میدان‌های تولید شده ثبت شوند و در آخر بررسی شوند. برای رقابت با سیستم‌های سنتی برداشت ابتدا باید خطای مغناطیسی پهپاد در هنگام برداشت کاملاً مشخص باشد. برای برداشت‌های سنتی این خطا از ۲ نانوتلا تجاوز نمی‌کند (Sterligov et al., 2016). با این حال نقشه‌برداری از میدان در اطراف پهپاد، یک رویکرد جدید برای تشخیص این اثر مغناطیسی است و می‌تواند میزان خطا را در هنگام برداشت کاهش دهد (Parvar et al., 2016). برای انجام این کار پرور و همکاران در سال ۲۰۱۶ یک برداشت با مقیاس کوچک با دو پهپاد مختلف و بررسی میدان تولید شده به وسیله پهپاد در فضای دو بعدی و سه بعدی، طراحی کردند. مغناطیس‌سنج مورد استفاده در آزمایش از نوع فلاکس‌گیت HMR-2300 است و نتایج با استفاده از نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj در مدل Voxel آنالیز شد.

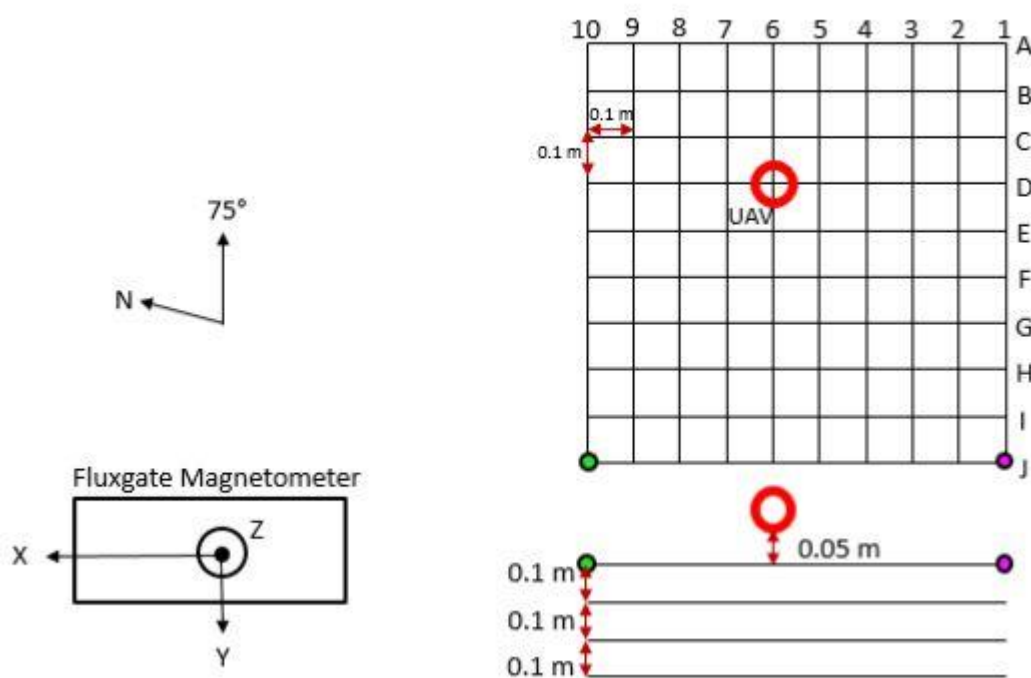
۴-۳-۱- نمونه اولیه پهپاد فانتوم دی.جی.آی ۲+

هدف این بود که یک پلتفرم با قابلیت تنظیم ارتفاع بین زمین و پهپاد طراحی شود. از یک سطح پلاستیکی برای ایجاد پلتفرم در زیر پهپاد استفاده شد. پهپاد در طول برداشت در بالای سطح پلاستیکی در هر ارتفاع به صورت ثابت معلق بود. با توجه به اینکه جریان‌های تولید شده در پهپاد متغیر است، میدان‌های مغناطیسی تولید شده نیز متغیر خواهند بود. این امر می‌تواند بر روی اندازه

شبکه انتخاب شده برای برداشت آزمایشگاهی تاثیر بگذارد. برای بهینه‌سازی تراکم داده‌ها و زمان برداشت، اندازه شبکه برداشت $0.1 \times 0.1 \times 0.1$ متر انتخاب شد.

در این برداشت سعی بر پیدا کردن ارتفاعی است که تاثیر میدان مغناطیسی تولید شده توسط پهپاد بر روی مغناطیس‌سنج به مقدار کمینه خود برسد (Parvar et al., 2016).

شکل ۳-۴ نقشه شبکه برداشت، ارتفاع پلتفرم و ارتفاع بین پهپاد و سطح پلاستیکی را نشان می‌دهد. همچنین جهت مغناطیس‌سنج در شکل مشخص شده است.

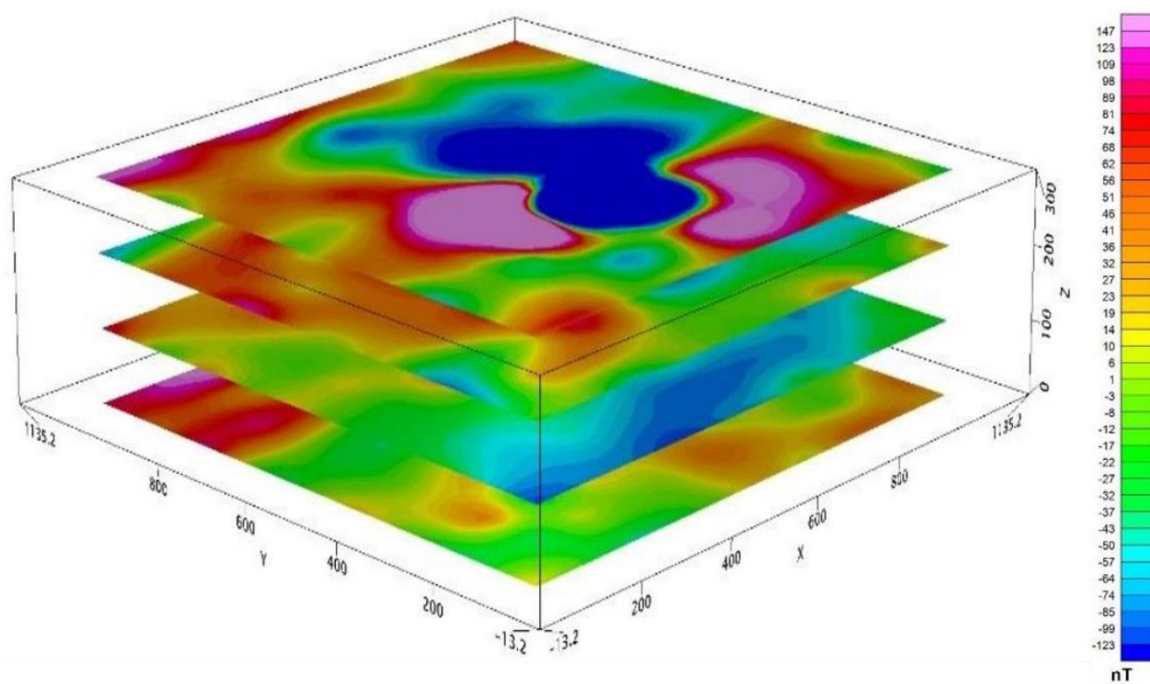


شکل ۳-۴. شکل بالا راست: نقشه شبکه برداشت دید از بالا، شکل پایین راست: نقشه شبکه برداشت دید از کنار، شکل چپ: جهت مغناطیس‌سنج فلاکس گیت (Parvar et al., 2016).

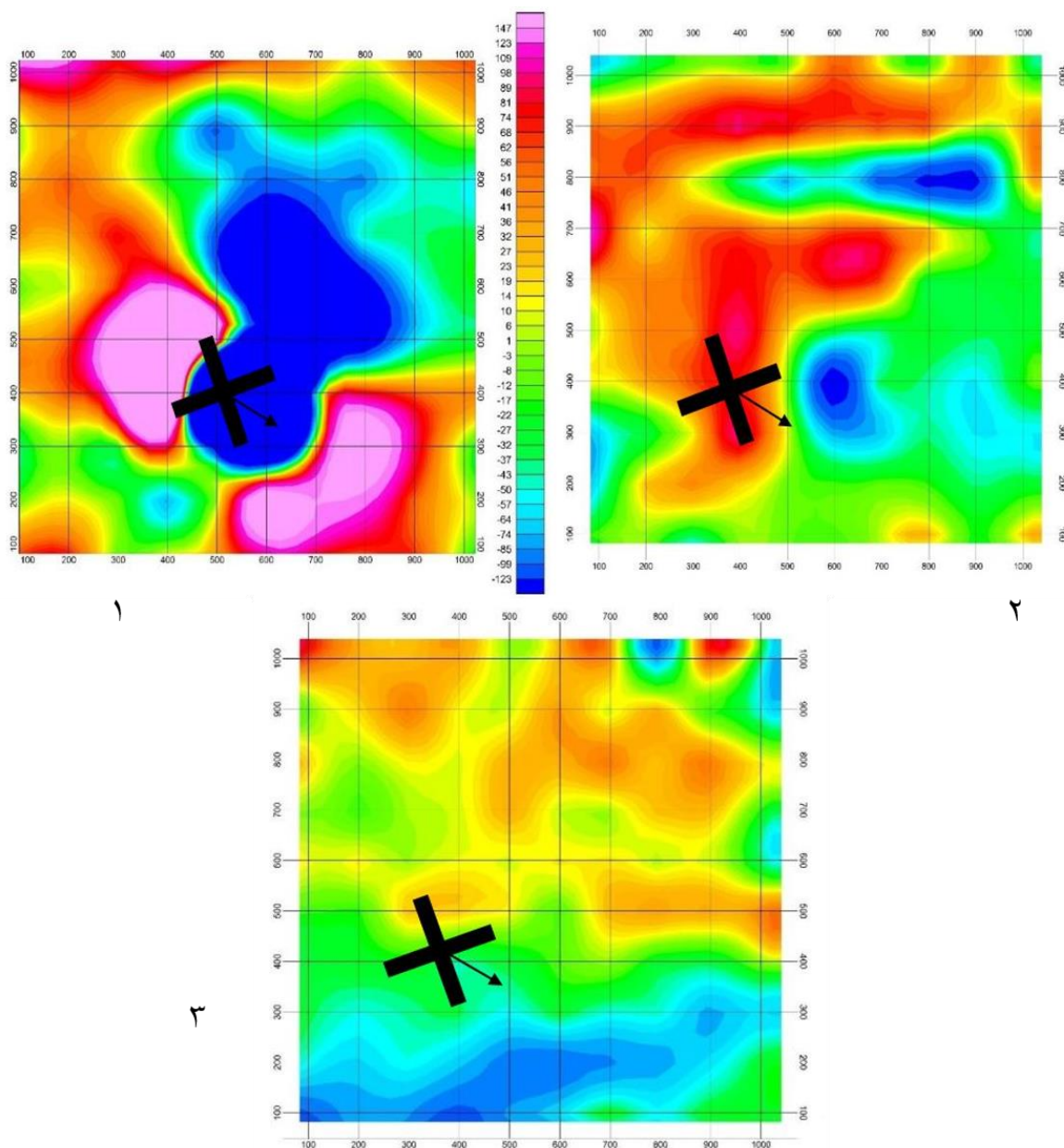


شکل ۴-۴. اجزاء سیستم برداشت پهباد آزمایشگاهی جهت بررسی اثرات مغناطیسی استاتیکی و دینامیکی (Parvar et al., 2016).

شکل ۴-۴ سطح پلاستیکی را که توسط طناب آویزان شده و یک قطعه کاغذ بزرگ برای نمایش شبکه بر روی آن را، نمایش می‌دهد. پهباد نیز در بالای سطح پلاستیکی به صورت معلق بدون حرکت است. برای مشاهده کامل اثر مغناطیسی پهباد دو بار اندازه‌گیری صورت گرفت؛ یک بار زمانی که پهباد خاموش بود و بار دیگر زمانی که موتورهای پهباد با تمام سرعت شروع به کار کردند؛ چون بیش‌ترین اثر مغناطیسی پهباد زمانی است که موتورها بیش‌ترین جریان را کسب می‌کنند. با تفریق این دو مقدار از هم اثر موتور پهباد قابل مشاهده است و می‌توان به نمایش سه بعدی آن، بدون تاثیر میدان مغناطیسی اطراف پرداخت (Parvar et al., 2016).

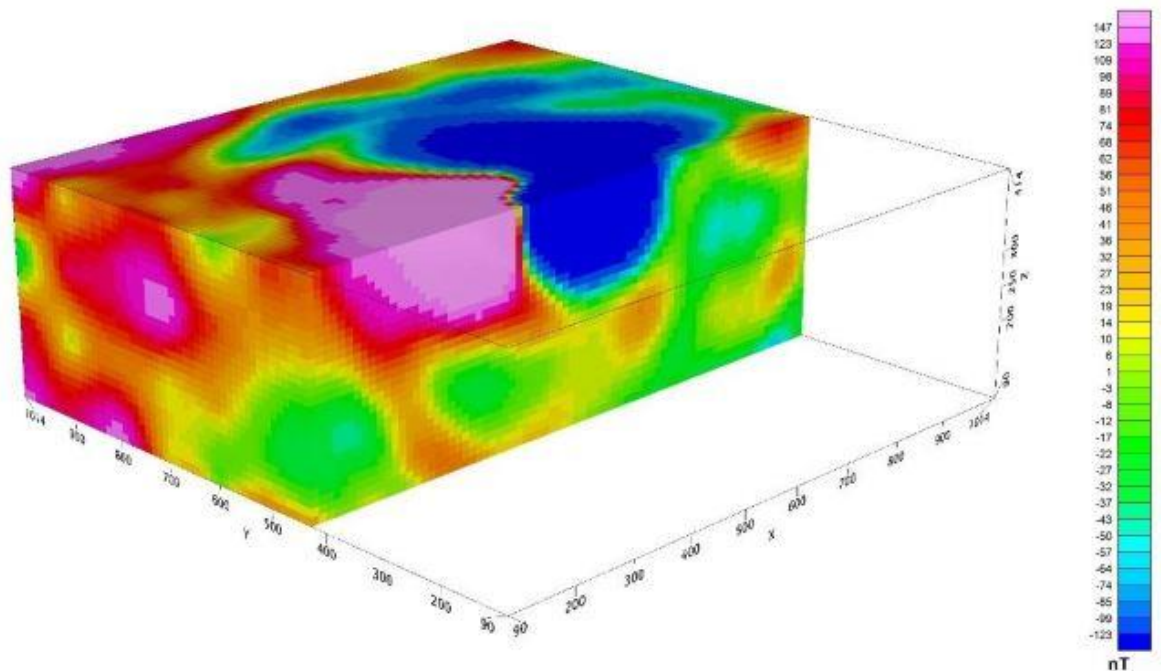


شکل ۴-۵. تمام سطوح اندازه‌گیری شده در ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متری زیر پهنپاد. مقادیر نشان داده شده اختلاف میدان مغناطیسی پهنپاد روشن با حداکثر توان و پهنپاد خاموش را نشان می‌دهد (Parvar et al., 2016).



شکل ۴-۶. تاثیر مغناطیسی پهباد. مقادیر اندازه‌گیری شده هنگامی که پهباد روشن بوده از مقادیر اندازه‌گیری شده در زمانی که که موتورهای پهباد با تمام سرعت کار می‌کردند کاسته شده است. (۱) در ارتفاع ۵ سانتی‌متر زیر پهباد، (۲) در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر زیر پهباد، (۳) در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر زیر پهباد. مکان و جهت پهباد فانتوم در شکل با علامت X و کمان نشان داده شده است (Parvar et al., 2016).
مشاهدات نشان می‌دهد که در سطح ۳۰ سانتی‌متر، هنوز نویز در حدود ۱۴ تا ۱۹ نانوتسلا وجود دارد. با این حال با نگاهی به میزان تغییرات در محور قائم، ۲۵ سانتی‌متر در زیر پهباد، تاثیر مغناطیسی پرنده به میزان قابل توجه کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۴-۷ مقطه قائم Voxel که در نرم‌افزار Oasis

Montaj تولید شده، نشان داده شده است. این Voxel با روش Gridding Kriging و با واریوگرام کروی ایجاد شده است. در فاصله ۰/۳۵ متری پایین پهناد اثر مغناطیسی پهناد کمتر از ۱۳ نانوتسلا است (Parvar et al., 2016).

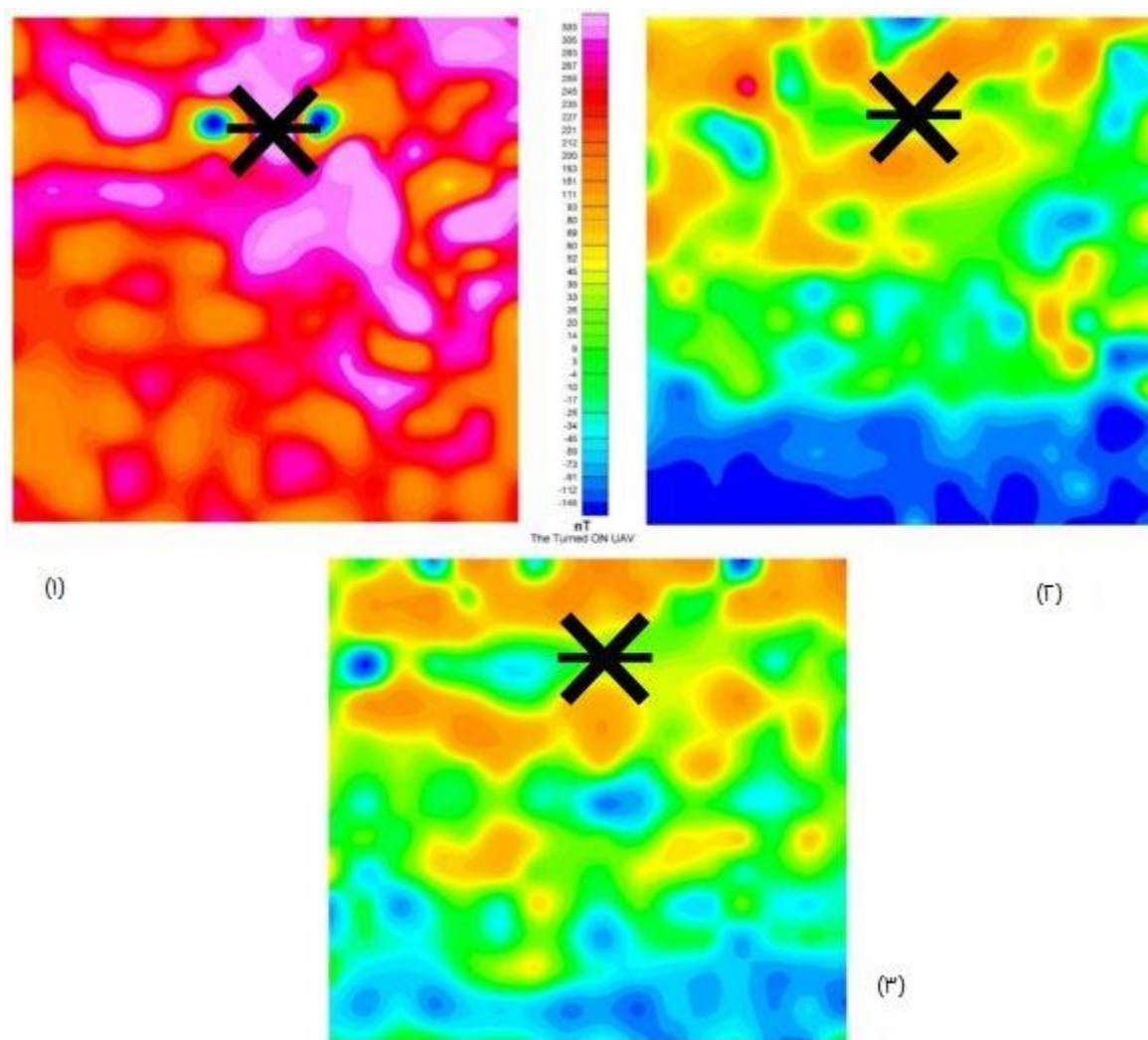


شکل ۴-۷. دید از کنار Voxel ساخته شده از شبکه‌های تولید شده در شکل ۴-۵ (Parvar et al., 2016).

۴-۳-۲- پهناد دی جی آی-اس ۹۰۰

برای به دست آوردن درک بهتر از میدان مغناطیسی تولید شده با پهناد و همچنین برای بهینه‌سازی بهترین مکان و فاصله بین پهناد و مغناطیس‌سنج GSMP-35A پرور و همکاران یک برداشت کوچک مقیاس دیگر انجام دادند. با توجه به اینکه پهناد اس ۹۰۰ قدرت بیش‌تری دارد، انتظار می‌رود که میدان مغناطیسی تولید شده با آن نیز بیش‌تر باشد، در نتیجه فضای بزرگ‌تری در اطراف پهناد مورد بررسی قرار گرفت. هر چند که این روش شبیه‌ساز کامل برداشت صحرائی نیست زیرا پهناد در حال حرکت نیست (Parvar et al., 2016).

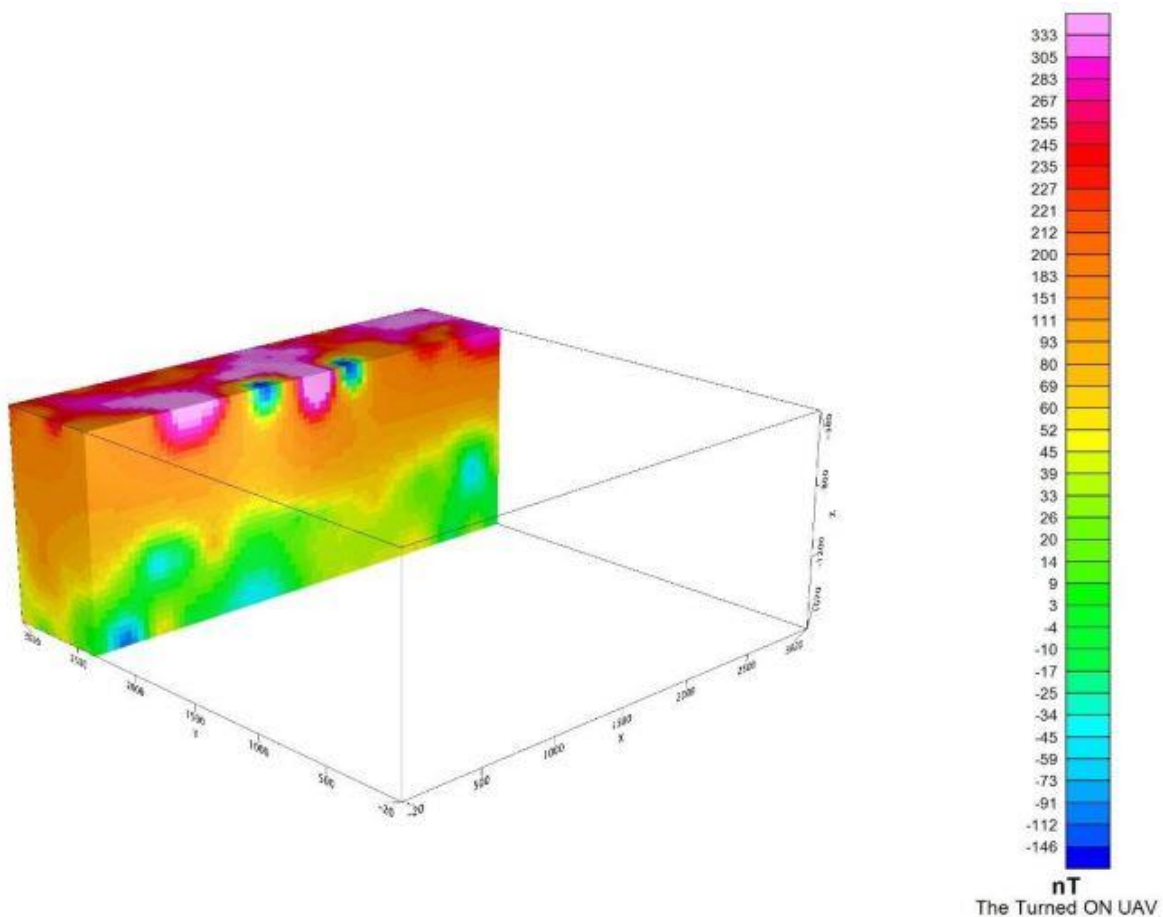
یک شبکه با ابعاد 300×300 سانتی متر در زیر پهپاد طراحی شد. پهپاد مورد نظر نیز در ارتفاع ۳ متری زمین از درخت آویزان شد. به دلیل حساسیت برداشت برای کیفیت بالای داده‌ها، تمامی موقعیت‌ها با لیزر تنظیم شد



شکل ۴-۸. اثر مغناطیسی پهپاد اس ۹۰۰. مقادیر اندازه‌گیری شده هنگامی که پهپاد خاموش است از مقادیر اندازه‌گیری شده وقتی که موتورهای پهپاد با بیش‌ترین توان خود کار می‌کردند، کاسته شده است. (۱) ۴۰ سانتی متر زیر پهپاد، (۲) در ۱۲۰ سانتی متری زیر پهپاد، (۳) در ۱۶۰ سانتی متری زیر پهپاد. پهپاد و جهت آن با علامت بر روی شکل نشان داده شده است (Parvar et al., 2016)

اندازه‌گیری‌ها با فاصله خطوط ۲۰ سانتی متر و در ۴ سطح مختلف: ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ سانتی متر پایین‌تر از پهپاد برای دو حالت پهپاد روشن و خاموش انجام شد؛ که به برداشت ۲۰۴۸ داده منجر شد.

پس از برداشت با استفاده از نرم‌افزار Oasis Montaj تحلیل‌ها صورت گرفت. داده‌ها با استفاده از روش حداقل انحنای درونیابی شده و نتایج در سه سطح مختلف در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. یک نگاه دقیق‌تر نشان می‌دهد که اثر موتورهای تا ارتفاع ۱/۶ متری نیز همچنان قوی است. با این حال اگر کابل به اندازه کافی بلند باشد، این اثر کاهش می‌یابد. درونیابی داده‌ها در Voxel 3D با استفاده از نرم‌افزار Oasis Montaj میدان تولید شده توسط پهپاد را نشان می‌دهد. درونیابی با استفاده از روش کریجینگ و واریوگرام کروی انجام شد. نتایج در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. یک سیگنال قوی نزدیک به پهپاد وجود دارد در حالی که در سطح ۱۶۰ سانتی‌متر مقدار آن به ۴ نانوتسلا کاهش پیدا می‌کند. اگرچه با توجه به شبکه‌های دو بعدی که در قبل ایجاد شد به نظر می‌رسد که بهتر است فاصله مغناطیس‌سنج از پهپاد بیش‌تر از ۱/۶ متر باشد. این نتایج مربوط به نویزهای تولید شده توسط پهپاد بدون در نظر گرفتن جهت‌گیری و حرکت آن است.



شکل ۴-۹. دید از کنار درون یابی سه بعدی اثر مغناطیس پهپاد اس ۹۰۰. شکل مشاهده شده حاصل کم کردن مقادیر اندازه گیری شده پهپاد خاموش از زمانی که پهپاد با حداکثر توان خود کار می کند، است. اثر مغناطیسی پهپاد در نزدیک آن (حدود ۴۰ سانتی متر) نزدیک به ۳۵۰ نانوتسلا است در حالی که این اثر با فاصله گرفتن از پهپاد (حدود ۱۶۰ سانتی متر) به اندازه ۴ نانوتسلا کاهش پیدا می کند (Parvar et al., 2016).

فصل ۵- پردازش داده‌های برداشت کیفیت

بالا، منطقه صحار، کشور عمان

۵-۱- کرومیت عمان

عمان کشوری در خاورمیانه، واقع در جنوب ایران و تنگه هرمز است که هم مرز با عربستان سعودی و امارات متحده عربی است. از دیدگاه زمین‌شناسی این کشور با مجموعه افیولیت‌های خود شناخته می‌شود (Ali et al., 2013). از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی افیولیت‌ها به علت وجود مواد معدنی مانند کرومیت‌ها مهم هستند. افیولیت^۱ یا مارسنگ بخشی از پوسته اقیانوسی و گوشته بالایی زمین در زیر پوسته است که در پی فشار به سمت بالا آمده و از آب دریا خارج شده است. منظور از افیولیت فقط یک سنگ خاص نیست، بلکه منظور ردیفی از مجموعه‌های سنگی با توالی ویژه است. به همین خاطر غالباً به آن‌ها مجموعه‌های افیولیتی اطلاق می‌شود. شیوه قرار گرفتن و استقرار مجموعه‌های سنگی مذکور قانونمند است و توالی معینی دارد (Parvar et al, 2016)

در مجموعه افیولیت‌های عمان، با توجه به موقعیت ساختاری آن‌ها سه نوع موقعیت برای کرومیت قابل تشخیص است:

۱. انباشت توالی نهشته‌ها به صورت لایه‌ای

۲. توالی نهشته‌ها گوشته بالایی

۳. نهشته‌های گوشته پایینی

در مجموعه افیولیتی شمال عمان، تعداد زیادی از ذخایر کوچک و بزرگ کرومیت‌های انبانه‌ای^۲ در درون لایه‌های مجموعه‌های پریدوتیتی، در سطح معینی از ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر زیر سطح لایه‌ای در مجاورت گابرو قرار دارند (Peters et al., 1974). ذخایری از لحاظ اقتصادی به صرفه است که به صورت لایه‌ای و عدسی‌های تخت باشد. در عمان ذخایر کرومیت عمدتاً در توالی گوشته حاوی هارزبورژیت و دونیت شکل می‌گیرند (Ali et al., 2013). کرومیت به عنوان یک ماده معدنی، فرومغناطیس نیست و خودپذیری مغناطیسی مرتبط با آن در محدوده $10^{-7} \times 2$ تا $10^{-5} \times 1/9$ در

^۱- Ophiolite

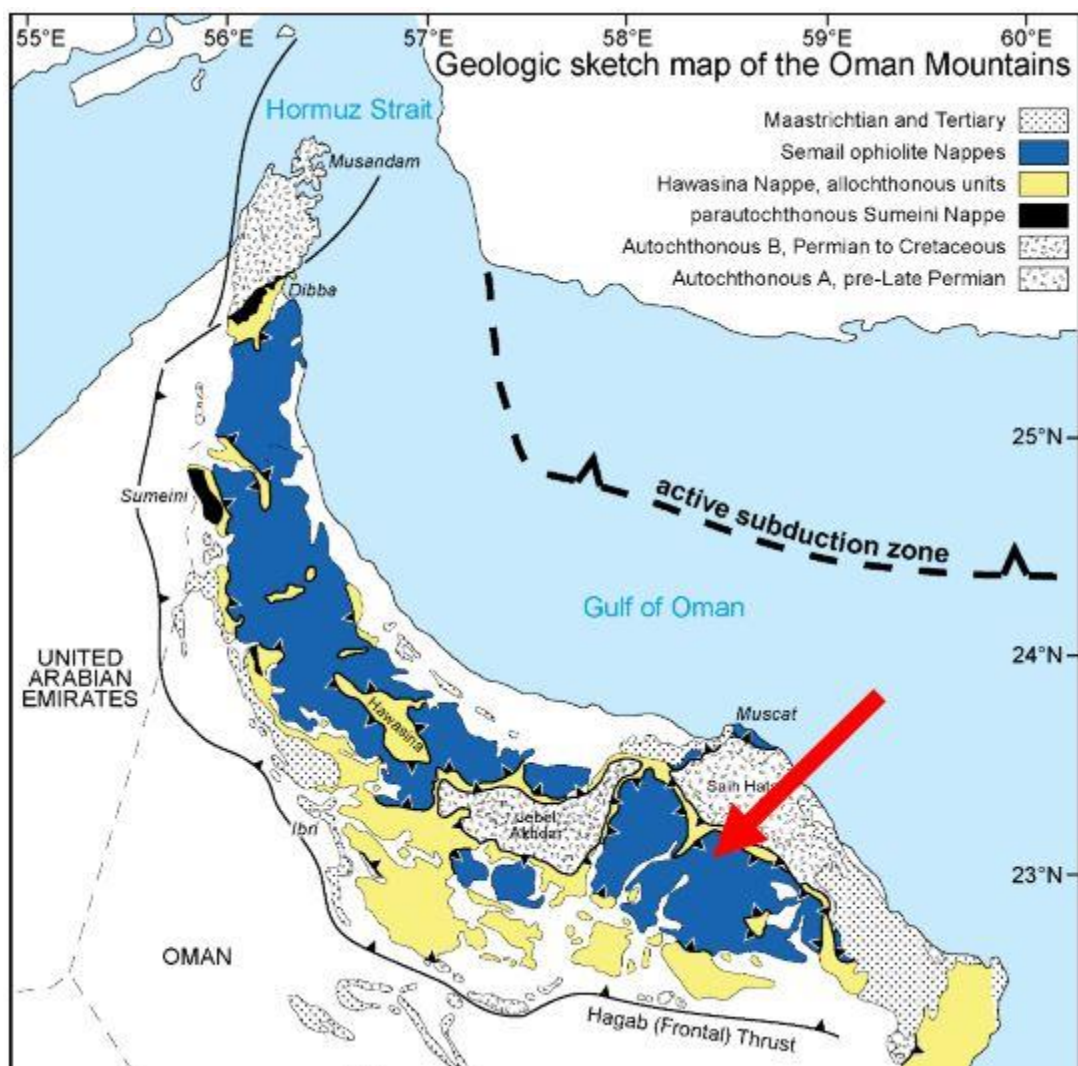
^۲- Podiform

واحد SI است. با این حال در طبیعت کرومیت با این محدوده حساسیت معمول نیست و محدوده مورد انتظار برابر 2×10^{-7} تا $2/5 \times 10^{-5}$ در واحد SI است (Allen et al., 2011). کرومیت موجود در افیولیت‌های عمان حساسیت مغناطیسی بالایی دارند؛ که بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که با برداشت‌های مغناطیسی قابل تشخیص هستند (Ali et al., 2013). با این حال مطالعات دیگری مانند گان^۱ (۱۹۹۷)، یونگول^۲ (۱۹۵۶) و گریسکام^۳ (۱۹۸۴) در مورد وابستگی حساسیت مغناطیسی نمونه‌های کرومیت به توده‌های سرپانتین انجام شده است. همچنین مقادیر $3/1 \times 10^{-4}$ تا $3/7 \times 10^{-4}$ در واحد SI برای حساسیت مغناطیسی کرومیت‌های عمان اندازه‌گیری شده است (Raise et al., 1997). از این رو تشخیص سرپانتین‌های مربوط به ذخایر کرومیت مهم‌ترین هدف اکتشافی مغناطیس‌سنجی است. نقشه زمین‌شناسی مناطق کوهستانی عمان واقع در بخش جداگانه کشور عمان در محدوده تنگه هرمز خلیج فارس در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.

^۱- Gunn

^۲- Yungul

^۳- Griscom



شکل ۵-۱. محل تقریبی زمین‌شناسی کوه‌های عمان (Burg, 2015). محل تقریبی سایت مورد مطالعه با یک فلش نشان داده شده است.

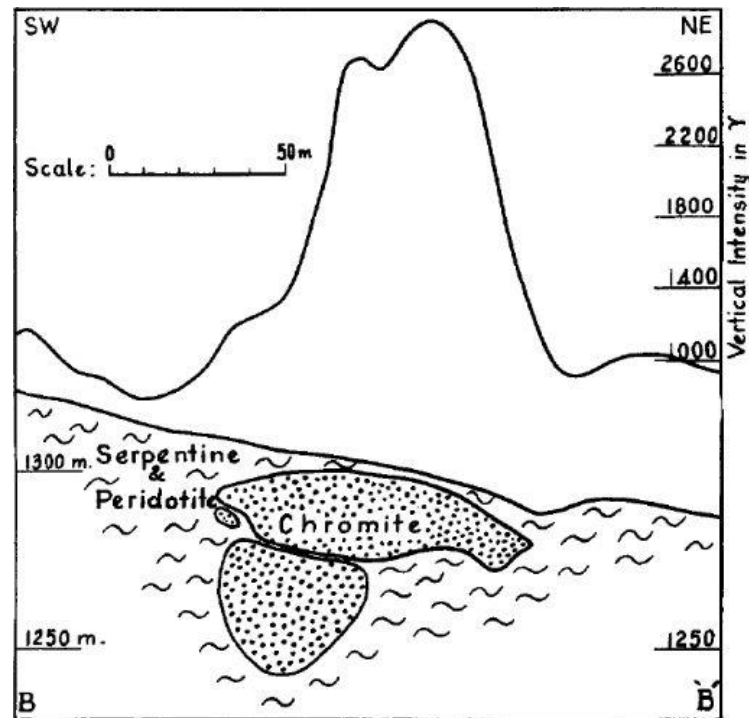
۵-۲- کاربرد برداشت‌های مغناطیسی برای اکتشاف کرومیت

کرومیت نسبت به مواد معدنی دیگر موجود در سنگ میزبان (هارزبورژیت و سرپانتین)، دارای چگالی و هدایت الکتریکی بیشتر و حساسیت مغناطیسی کمتری است؛ که این دلیلی مبنی بر آنومالی مغناطیسی، مقاومت ویژه و ثقل‌سنجی است (Ali et al., 2013). سایر مطالعات انجام شده در کشورهای ترکیه، یونان، آلبانی، ایران و یوگسلاوی سابق نیز نشان می‌دهد که برداشت‌های مغناطیسی

هواپرد برای شناسایی توده‌های کرومیت مفید هستند (Kospiri et al., 1999, Gunn et al., 1997, shayestehfar et al., 2013).

بر اساس مطالعات کلیچنیکو^۱ و همکاران (۱۹۶۷) اکتشاف کرومیت تنها با استفاده از مغناطیس-سنجی ممکن نیست؛ اما از یک سنگ میزبان به شدت سرپانتینیزه شده انتظار آنومالی کمی را می-توان داشت (Gunn et al., 1997). همچنین در اطراف ذخیره کرومیت انتظار سرپانتینی شدن بیش‌تری است (Yungul, 1956). بر این اساس نواحی سرپانتینی شده در اطراف ذخایر کرومیتی از خود آنومالی نشان می‌دهند. شکل ۵-۲ نشان دهنده شدت مغناطیسی کلی سنگ میزبان به شدت سرپانتینی شده در اطراف ذخیره کرومیت است که به وسیله یونگول در سال ۱۹۵۶ بررسی شده است. باید توجه داشت که سنگ میزبان سرپانتینی شده و در اطراف ذخیره کرومیت شدت سرپانتینی شدن بیش‌تر است و این امر در مشاهدات میدان تاثیر گذار است. این ذخیره در سال ۱۹۴۱ توسط یونگول با برداشت مغناطیسی و گرانی‌سنجی کشف شد.

^۱- Klichnikov



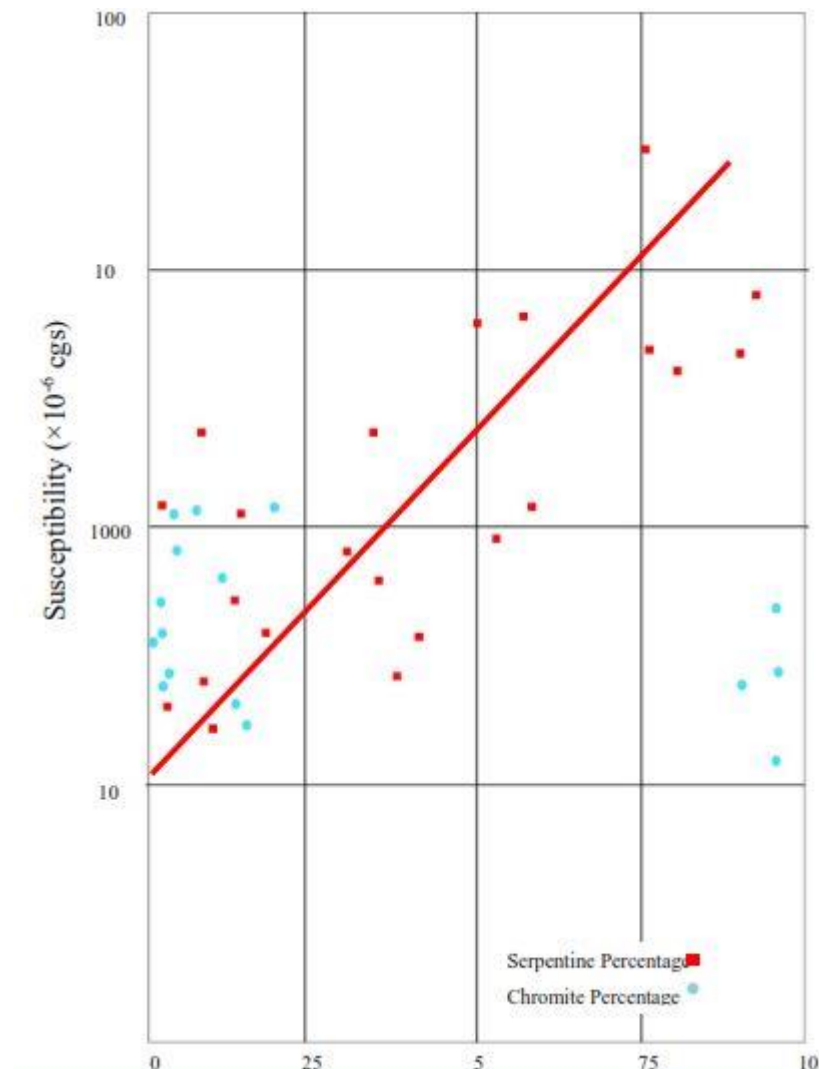
شکل ۵-۲. پروفیل شدت مغناطیسی عمودی بر روی مقطع زمین‌شناسی (Yungul, 1956). بدنه کرومیت با استفاده از برداشت مغناطیسی کشف شد. کانی‌سازی کرومیت در سنگ بستر سرپانتینی و پریدوتیتی قرار دارد.

مطالعه دیگری توسط گریسکام در سال ۱۹۸۴ در مورد رابطه بین مقدار سرپانتین و حساسیت مغناطیسی سنگ میزبان بیان شده است. نمونه‌هایی که از پریدوتیت ژوزفین^۱ واقع در شمال غربی کالیفرنیا جمع‌آوری شده‌اند، نشان می‌دهد که حساسیت مغناطیسی در ذخیره کرومیت توسط سرپانتین کنترل می‌شود و درصد کرومیت بر حساسیت مغناطیسی تاثیر زیادی نمی‌گذارد (Griscom, 1984).

شکل ۵-۳ رابطه بین درصد سرپانتین، درصد کرومیت و حساسیت مغناطیسی سنگ را به خوبی نشان می‌دهد. واضح است که دراکتشاف ذخایر کرومیت برداشت‌های مغناطیسی نقش مهمی را در تعیین محل سنگ میزبان و خود کانی را دارد. با این حال عمدتاً به دلیل مغناطیس محلی طبیعی منطقه،

^۱- Josephine

داده‌های مغناطیسی به تنهایی قابل اعتماد نیستند و اطلاعات گرانی نیز مورد نیاز است (Gunn, 1997).



شکل ۵-۳. درصد سرپانتین و کرومیت در مقایسه با حساسیت مغناطیسی نمونه‌های پریدوتیت ژوزفین، کالیفرنیا. همان‌طور که در شکل معلوم است حساسیت مغناطیسی به درصد کرومیت بستگی ندارد در حالی که درصد سرپانتین رابطه لگاریتمی نزدیکی با حساسیت مغناطیسی دارد (Griscom, 1984).

شایسته‌فر و همکاران (۲۰۱۳) بر روی ذخایر کرومیت در افیولیت‌های جنوب ایران مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که روش مغناطیسی یک ابزار مفید در اکتشاف کرومیت است. آنومالی‌های شدید در شدت مغناطیسی کلی مربوط به بدنه اولترامافیکی همراه با درصد بالای مگنتیت و سرپانتینیت می‌باشد. گسل‌ها و ویژگی‌های ساختاری، فرآیند سرپانتینیت شدن را در اطراف توده کرومیت افزایش می‌-

دهد. گسل و فرآیند سرپانتینی شدن نتیجه مستقیم مایعات ماگمایی به همراه خود کرومیت است (Shayestefar et al., 2013).

با توجه به همه مطالعات موردی که استفاده از مغناطیس هوابرد را برای اکتشاف کرومیت مفید می‌دانستند در بهمن ماه سال ۱۳۹۴ شرکت^۱ PECL یک برداشت مغناطیسی هوابرد با استفاده از پهپاد برای اکتشاف کرومیت را در عمان آغاز کرد. سیستم‌های ژئوفیزیکی اصلی که در این برداشت استفاده شد عبارتند از: مغناطیس‌سنج بخار پتاسیم حساسیت بالا GSMP-35A محصول شرکت جم سیستم^۲، سیستم موقعیت‌یاب GPS نواتل^۳، سیستم ناوبری خودکار^۴، ارتفاع‌سنج لیزری، دستگاه جمع‌آوری داده MUX، مغناطیس‌سنج GSM-19T، همگام شده با زمان UTC محصول شرکت جم سیستم. داده‌های خام مغناطیس‌سنج در محدوده ۱۰ هرتز به همراه داده‌های IMU، GPS و ارتفاع-سنج لیزری در پهپاد ذخیره شده و بعد از پرواز جمع‌آوری می‌شود. متأسفانه در این برداشت به علت خرابی ارتفاع‌سنج لیزری، داده‌های ارتفاع این سیستم قابل استفاده نبود و از داده‌های GPS برای ارتفاع استفاده شد. واحد کنترل پرواز نیز از یک کنترل از راه دور DJI A2 و یک برنامه نظارت پرواز بر روی لپ‌تاپ در ایستگاه زمینی، بر پرواز نظارت می‌کرد. سیستم مغناطیس هوابرد بدون سرنشین در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

در طی برداشت کانی‌سازی کرومیت و سرپانتینیت در منطقه مورد مطالعه مشاهده شد. این کانه‌زایی کرومیت به صورت لایه‌ای بود. ذخایر کرومیت به دلیل وجود قابل توجه سرپانتینیت آنومالی‌های بارزی را نشان می‌دهد.

^۱- Pioneer Exploration Consultant Ltd

^۲- GEM Systems

^۳- Novatel

^۴- Inertial Measurment Unit

اندازه‌گیری‌های ایستگاه پایه نیز به منظور انجام تصحیحات روزانه ثبت شده است. مغناطیس‌سنج ایستگاه پایه، یک دستگاه مغناطیس‌سنج پروتونی GSM-19T، محصول شرکت جم سیستم، همگام شده با زمان UTC بود.

تمامی داده‌های جمع‌آوری شده از سیستم جمع‌کننده داده پهباد (GEM Systems LightMUX) با فرمت زیر خارج می‌شود:

Time, Latitude, Longitude, UTMX, Qual(sats_qual_hdop_undulation), GALT, ALT(m), Yaw, Pitch, Roll, MagX, MagY, MagZ, AccelX, AccelY, AccelZ, GyroX, GyroY, GyroZ, Mag1, SS1, L1

که در آن GALT ارتفاع از سطح دریا، ALT ارتفاع سنج لیزری، Yaw، Pitch و Roll زاویه چرخش، MagX، MagY، MagZ مقادیر کمپاس به درصد هستند. AccelX، AccelY و AccelZ داده‌های شتاب در واحد متر بر مجذور ثانیه و GyroX، GyroY و GyroZ داده‌های ژيروسکوپ هستند. مقدار میدان مغناطیسی مشاهده شده Mag1 است. SS1 نشان دهنده کیفیت سیگنال و L1 شاخص قفل شدن مغناطیس‌سنج است (GEM Systems, 2013).

برای یک مغناطیس‌سنج قلیایی مانند GSMP-35A ضروری است که قبل از برداشت داده بر روی زمینه قابل اندازه‌گیری قفل شود (GEM Systems, 2013). مغناطیس‌سنج تمام محدوده قابل اندازه‌گیری را اسکن می‌کند تا مقدار زمینه را شناسایی کند و روی آن قفل کند. برای این کار دقیق انجام شود باید سنسور دارای دو معیار باشد:

۱. ناحیه اطراف باید از لحاظ مغناطیسی پایدار باشد. تغییرات زمانی میدان مغناطیسی زمین نباید بیش‌تر از ۵۰ نانو تسلا برثانیه باشد (GEM Systems, 2013).

۲. سنسور باید در جهت خاص با توجه به میل میدان مغناطیسی باشد. با توجه به مطالعات GEM Systems در سال ۲۰۱۳ زاویه ۴۵ درجه نسبت به میل میدان مغناطیسی ایده‌آل است. برای این

برداشت میل میدان در طی روز برداشت بر اساس IGRF $35/48^{\circ}$ بود (Inc 35.48° & Dec 1.26°).
سنسور به حالت عمودی برای حفظ قفل سیگنال تنظیم شد.



شکل ۴-۵. سیستم هوایی بدون سرنشین به همراه مغناطیس سنج متصل به آن (Parvar et al., 2016).
برداشت ها در نواحی مختلف در منطقه صحرای برای ارزیابی اقتصادی کرومیت انجام شد. پرور و همکاران در سال ۲۰۱۶، ابتدا یک برداشت آزمایشی بر روی رخنمون کرومیت، با این سیستم انجام دادند و سپس به ارزیابی داده‌ها پرداختند. نتایج نشان دهنده این امر بود که این سیستم برای اکتشاف کرومیت در این منطقه مناسب است. بعد از اطمینان از مفید بودن سیستم، در مناطق کوچک دیگر که احتمال وجود کرومیت بود، نیز برداشت انجام شد؛ که داده‌های استفاده شده در این تحقیق، یکی

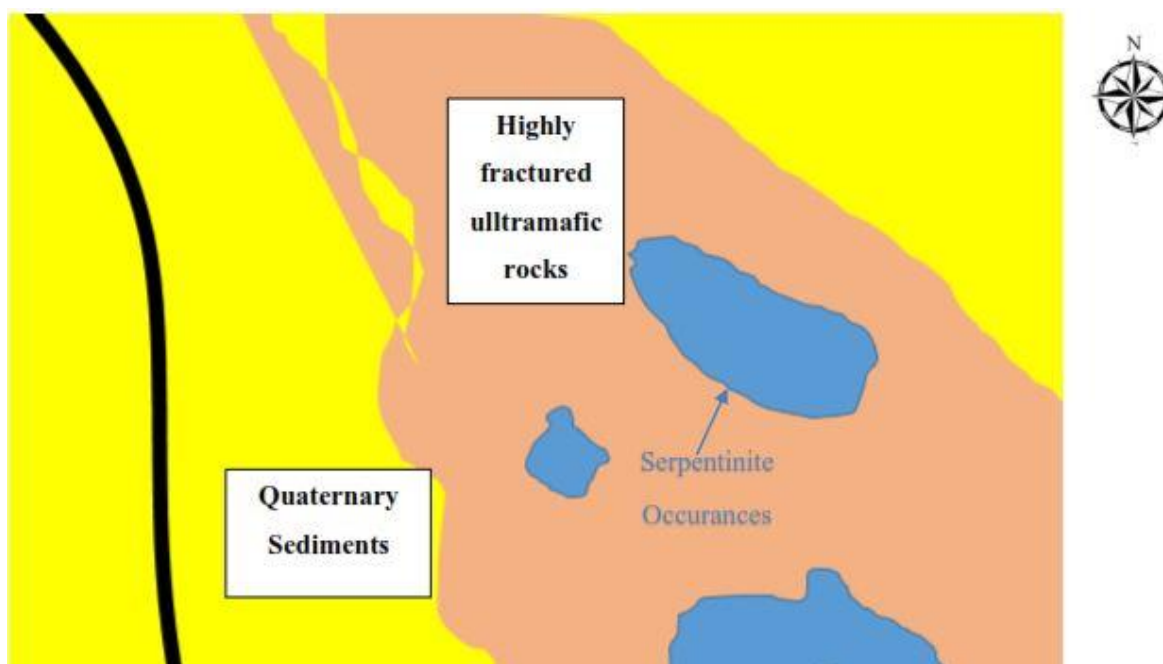
از برداشت‌ها در این مناطق است که توسط آقای پرور در اختیار قرار گرفته است (Parvar et al., 2016).

۵-۳- روش بررسی و جمع آوری داده‌ها

منطقه صحرای آب و هوای بیابانی با تابستان‌های گرم و زمستان‌های ملایم است؛ میزان بارش سالیانه این منطقه کم است. ویژگی‌های زمین‌شناسی این منطقه شامل دو واحد عمده زمین‌شناسی است:

رسوبات کواترنری: این رسوبات بیشتر مربوط به ته‌نشست آب‌های سطحی است (رنگ زرد در شکل ۵-۵).

سنگ‌های اولترامافیک دارای شکستگی زیاد: بیشتر این سنگ‌ها از واحدهای سنگی هارزبورژیت-دونیت هستند؛ که از مشخصه اصلی سنگ‌های افیولیتی عمان است (Searle, 1999).



شکل ۵-۵. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به صورت شماتیک برای نشان دادن واحدهای اصلی زمین‌شناسی

داشتن یک ارتفاع سنج دقیق لیزری در این برداشت‌ها می‌تواند دید خوبی از توپوگرافی منطقه به ما بدهد، متأسفانه در این برداشت به دلیل خراب بودن ارتفاع سنج لیزری، داده‌های ارتفاع مورد استفاده

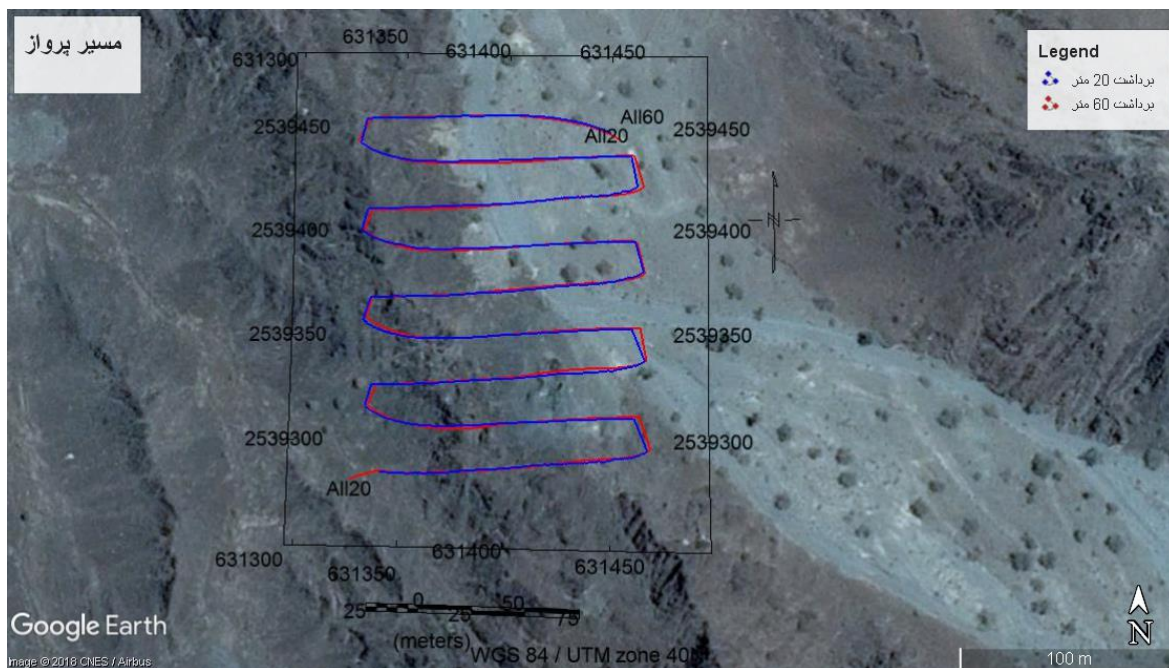
قرار نگرفت. با این حال به دلیل این که برداشت بر روی منطقه مسطح انجام شد تاثیر توپوگرافی ناچیز بوده است.

در تمامی شکستگی ها و رگه های منطقه، سرپانتینی شدن دیده می شود و این سرپانتینی شدن در اطراف رخنمون های کرومیت از شدت بیشتری برخوردار است (شکل ۵-۶).



شکل ۵-۶. سرپانتینی شدن در اطراف رخنمون کرومیت. شکستگی ها با سرپانتنیت و الیوین دگرگون شده پر شده است (Parvar et al, 2016).

این برداشت ها در دو ارتفاع ۲۰ و ۶۰ متر از محل بلند شدن پهناد انجام شد. با توجه به مشاهده رخنمون های منطقه فاصله خطوط برداشت تقریباً ۲۰ متر در نظر گرفته شد. هر کدام از خطوط تقریباً ۳۰۰ متر طول داشت و در کل ۹ خط پرواز برداشت شد. با توجه به امتداد رخنمون های منطقه، برای این که پرواز عمود بر امتداد ساختار ذخیره انجام شود، خطوط پرواز به صورت (شرقی - غربی) طراحی شد. خطوط برداشت در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.



شکل ۵-۷. مسیر پرواز انجام شده در دو ارتفاع ۲۰ متر و ۶۰ متر از سطح زمین.

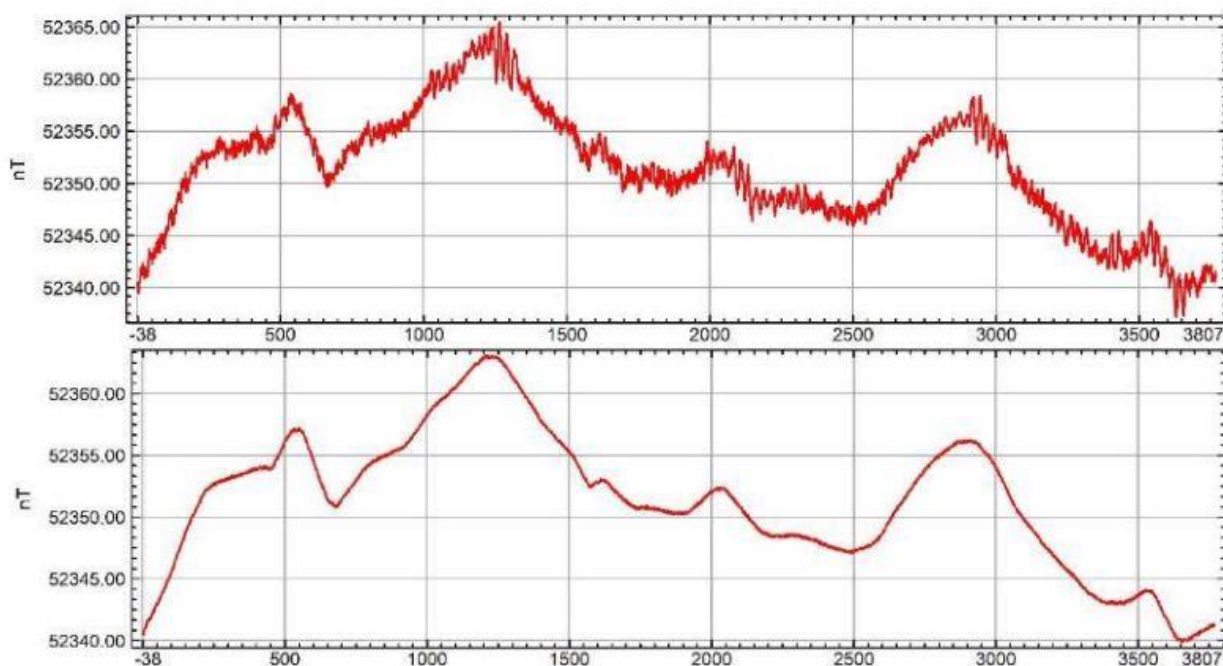
نوسانات سنسور در ابتدای هر خط باعث نوفه ناخواسته در هنگام چرخش می‌شود. سرعت پهپاد در حین برداشت عامل مهمی برای کنترل نوفه‌های ناشی از نوسانات سنسور است. با این حال هنوز به طور کامل رابطه بین پارامترهای مرتبط (سرعت، فاصله بین خطوط برداشت و ارتفاع سنسور از پهپاد) مشخص نیست. پیدا کردن رابطه بین پارامترهای ذکر شده نیازمند تحقیقات و برداشت‌های بیشتری است. برای جلوگیری از تشکیل چنین سیگنال‌هایی در داده‌ها انجام مراحل زیر انجام می‌شود:

۱. تنظیم سرعت بر اساس فاصله بین خطوط برداشت. مشاهدات حضوری در منطقه و تنظیم سرعت در حین پرواز برای به حداقل رساندن نوسانات.

۲. استفاده از یک میله ثابت و جامد غیر مغناطیسی به جای کابل برای نصب مغناطیس‌سنج به زیر پهپاد. میله باید به اندازه کافی بلند باشد؛ تا سنسور تحت تاثیر میدان مغناطیسی پهپاد قرار نگیرد. این روش اگر پهپاد را در هنگام نشست و بلند شدن دچار مشکل نکند، موثر است.

۳. حذف هرگونه اثر نوسان بعد از گرفتن اطلاعات با استفاده از فیلترهای غیرخطی (Geosoft, 2015). فیلترهای خطی در Oasis Montaj در دسترس هستند و برای حذف داده‌های اشاره شده طراحی شده‌اند؛ بدون اینکه بر روی داده‌های دیگر اثر بگذارند. با این حال ممکن است سیگنال‌های واقعی به

جای نویز اشتباه گرفته شوند و حذف شوند. فیلترهای غیرخطی با استفاده از الگوریتم غیرخطی، به هر داده نگاه می‌کند و تصمیم می‌گیرد که آیا این نقطه نویز است یا سیگنال واقعی؛ اگر نقطه‌ای نویز تشخیص داده شود، به راحتی حذف و با مقدار مناسب که بر اساس نقاط اطراف آن محاسبه می‌شود، تخمین زده شده و جایگزین می‌شود؛ و بخش‌هایی که نویز تشخیص داده نمی‌شوند بدون تغییر باقی می‌مانند. فیلترهای خطی مانند مواردی که در LOWPASS، BANDPASS و HIGHPASS استفاده می‌شوند، مانند فیلترهای غیرخطی، توانایی تصمیم‌گیری ندارند؛ و همه داده‌ها را دچار تغییر می‌کنند. در شکل ۵-۸ اثر فیلترهای غیرخطی در یک پرواز آزمایشی توسط پرور و همکاران نشان داده شده است.



شکل ۵-۸. شدت میدان مغناطیسی پروفیل ثبت شده برای اهداف آزمایشی. محور افقی تعداد نقاط را نشان می‌دهد. نمودار بالایی: قبل از استفاده از هر فیلتر. نمودار پایینی: بعد از استفاده فیلتر غیرخطی (parvar et al., 2015).

۵-۴- پردازش داده‌ها

پس از برداشت داده‌ها، مشاهدات مغناطیسی در یک پایگاه داده جداگانه قرار گرفت. این مقادیر شامل اندازه‌گیری‌هایی است که پهباد هنوز روی زمین قرار داشت و هنوز در مسیر پرواز قرار نگرفته است. پس از حذف داده‌های صفر و غیر قابل ثبت و داده‌هایی که کیفیت سیگنال آن‌ها کمتر از ۹۹ بود، مراحل پردازش و پیش‌پردازش روی داده‌ها انجام شد.

در نهایت در برداشت ارتفاع ۲۰ متر ۳۳۹۳ داده و در برداشت ارتفاع ۶۰ متر ۲۵۸۷ داده برداشت شد. این مقادیر شامل اندازه‌گیری‌هایی بود که پهباد هنوز روی زمین قرار داشت و در مسیر پرواز قرار داده نشده بود. داده‌های صفر و غیر قابل خواندن و داده‌هایی که کیفیت سیگنال آن‌ها (پارامتر SS1) کمتر از ۹۹ است، باید از این مقادیر حذف شوند.

۵-۴-۱- مرحله پیش‌پردازش داده‌های مغناطیسی هوابرد، منطقه صحار در عمان

این مرحله شامل تصحیح و بازبینی داده‌های حاصل از پرواز و داده‌های ایستگاه مبنا و همچنین تعیین دقیق مکان X و Y داده‌ها می‌باشد.

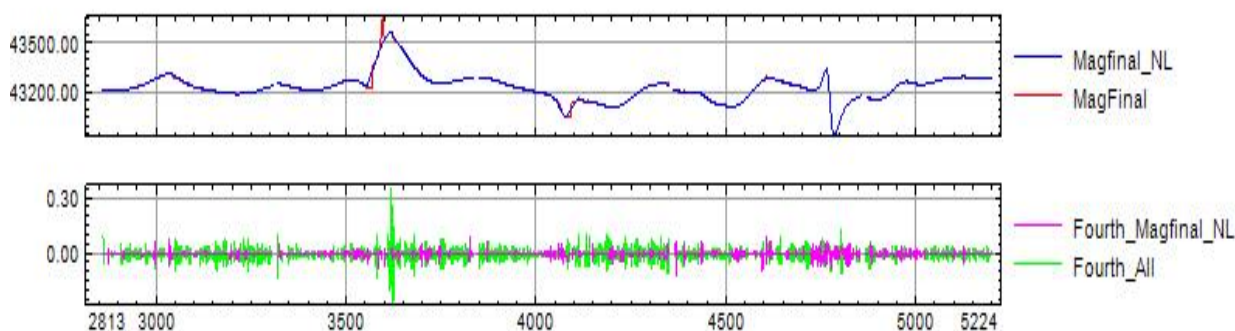
الف) تصحیح و بازبینی داده‌های خام

همانطور که در بالا گفته شد فاکتور قفل بودن مغناطیس‌سنج بر روی مقدار زمینه (L1) و کیفیت سیگنال (SS1)، در این نوع برداشت (مغناطیس هوابرد بدون سرنشین) فاکتور مهمی است. در تمامی خطوط نقطه‌هایی که پارامتر L1 آن‌ها مقدار صفر بود و نشان دهنده قفل نبودن مغناطیس‌سنج بود حذف شد. همچنین آن‌هایی که پارامتر SS1 آن‌ها کمتر از مقدار ۹۹ بود و نشان دهنده کیفیت پایین سیگنال بود نیز حذف شد. بعد از حذف این داده‌ها تعداد نقاط برداشت شده در برداشت ۲۰ متر، ۲۳۶۴ داده و در برداشت ۶۰ متر تعداد نقاط برداشت شده ۲۲۸۰ داده شد. بخشی از داده‌های برداشت در شکل ۵-۹ نشان داده شده است.

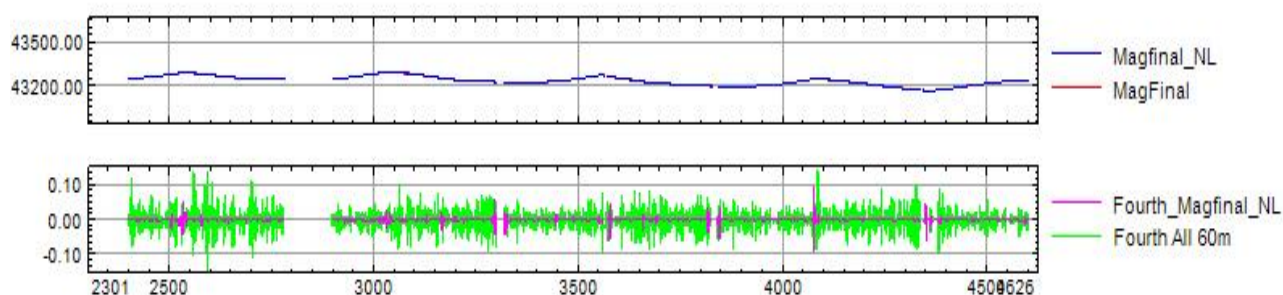
Time	Latitude	Longitude	UTMY	UTMX	Qual hdop	GALT	ALT m	U F	Yaw	Pitch	Roll	MagX	MagY	MagZ	AccelX	AccelY	AccelZ	GyroX	GyroY	GyroZ	mags	MagI
124528.80	22.96	58.28	2539337.85	631466.09	07_9_01.4	803.59	0.00	WNY	170.07	11.90	0.53	-0.50	-0.29	0.81	-1.31	-0.05	-9.89	0.06	-0.09	0.36	1.00	43204.33
124528.90	22.96	58.28	2539337.35	631465.21	07_9_01.4	803.51	0.00	WNY	171.57	11.53	0.85	-0.50	-0.28	0.83	0.32	0.64	-9.44	0.02	-0.03	0.33	1.00	43222.87
124529.00	22.96	58.28	2539337.08	631464.80	07_9_01.4	803.51	0.00	WNY	173.51	11.21	1.14	-0.52	-0.27	0.82	1.65	0.65	-9.59	-0.01	-0.03	0.33	1.00	43281.14
124529.10	22.96	58.28	2539336.87	631464.58	07_9_01.4	803.47	0.00	WNY	175.87	10.82	1.70	-0.54	-0.26	0.78	0.72	-1.50	-9.93	-0.05	-0.03	0.32	1.00	43317.53
124529.20	22.96	58.28	2539336.63	631464.15	07_9_01.4	803.42	0.00	WNY	177.76	10.72	2.02	-0.57	-0.21	0.82	-0.49	-2.56	-9.64	-0.02	-0.01	0.33	1.00	43317.56
124529.30	22.96	58.28	2539336.62	631464.20	08_9_01.3	803.26	0.00	WNY	179.58	10.62	1.98	-0.56	-0.20	0.81	0.41	-1.06	-9.23	-0.08	-0.02	0.29	1.00	43317.58
124529.40	22.96	58.28	2539336.41	631463.77	08_9_01.3	803.17	0.00	WNY	178.81	10.58	2.21	-0.55	-0.19	0.79	-0.43	-1.10	-10.57	-0.00	0.05	0.26	1.00	43317.73
124529.50	22.96	58.28	2539336.01	631462.76	07_9_01.4	804.05	0.00	WNY	177.36	10.64	2.59	-0.58	-0.16	0.83	-0.18	-0.61	-10.15	0.03	0.06	0.26	1.00	43261.75
124529.60	22.96	58.28	2539336.01	631462.76	08_9_01.3	803.31	0.00	WNY	176.31	10.42	3.17	-0.57	-0.11	0.85	0.92	-1.54	-9.70	0.08	-0.08	0.24	1.00	43262.58
124529.70	22.96	58.28	2539335.52	631461.46	07_9_01.4	804.26	0.00	WNY	175.35	10.25	3.61	-0.59	-0.13	0.79	2.97	-0.86	-7.66	-0.01	-0.02	0.20	1.00	43263.59
124529.80	22.96	58.28	2539335.61	631461.55	08_9_01.3	803.27	0.00	WNY	173.87	10.21	4.36	-0.60	-0.14	0.79	0.52	-1.90	-9.70	0.08	-0.03	0.19	1.00	43212.03
124529.90	22.96	58.28	2539335.43	631461.19	08_9_01.3	802.99	0.00	WNY	172.79	9.63	4.95	-0.59	-0.11	0.88	2.83	0.29	-11.16	0.11	-0.17	0.17	1.00	43210.13
124530.00	22.96	58.28	2539335.77	631460.91	07_9_01.4	801.80	0.00	WNY	172.79	9.63	4.95	-0.59	-0.11	0.88	2.83	0.29	-11.16	0.11	-0.17	0.17	1.00	43211.14
124530.10	22.96	58.28	2539335.66	631460.71	07_9_01.4	801.69	0.00	WNY	170.75	8.14	6.03	-0.61	-0.09	0.81	-0.29	-1.28	-9.58	0.02	-0.08	0.13	1.00	43211.58
124530.20	22.96	58.28	2539335.20	631459.93	07_9_01.4	802.49	0.00	WNY	170.13	7.60	6.12	-0.61	-0.10	0.80	2.43	-0.66	-9.02	-0.02	-0.10	0.14	1.00	43212.02
124530.30	22.96	58.28	2539335.08	631459.47	07_9_01.4	802.50	0.00	WNY	169.13	6.95	6.22	-0.61	-0.13	0.77	-0.37	-1.43	-9.37	-0.02	-0.04	0.14	1.00	43212.16
124530.40	22.96	58.28	2539335.22	631459.22	07_9_01.4	801.75	0.00	WNY	168.57	6.54	6.36	-0.61	-0.11	0.80	3.98	0.47	-10.77	0.02	-0.06	0.10	1.00	43211.88
124530.50	22.96	58.28	2539335.16	631459.02	07_9_01.4	801.69	0.00	WNY	168.03	6.11	6.63	-0.62	-0.07	0.83	-1.07	-2.61	-10.52	0.08	-0.05	0.14	1.00	43211.74
124530.60	22.96	58.28	2539334.77	631458.26	07_9_01.4	802.35	0.00	WNY	167.10	5.76	6.88	-0.65	-0.09	0.85	0.82	-0.36	-9.82	-0.05	0.00	0.11	1.00	43211.35
124530.70	22.96	58.28	2539334.65	631457.56	07_9_01.4	802.46	0.00	WNY	166.97	5.67	6.86	-0.64	-0.06	0.84	-1.14	-2.05	-9.73	0.01	-0.06	0.09	1.00	43211.00
124530.80	22.96	58.28	2539334.64	631457.14	07_9_01.4	802.11	0.00	WNY	166.06	5.00	6.66	-0.62	-0.06	0.85	3.98	1.02	-9.25	0.01	-0.05	0.11	1.00	43210.28
124530.90	22.96	58.28	2539334.55	631456.70	07_9_01.4	802.16	0.00	WNY	165.70	4.96	6.51	-0.61	-0.03	0.85	2.39	-0.52	-8.62	-0.09	0.02	0.07	1.00	43209.77
124531.00	22.96	58.28	2539334.41	631456.18	07_9_01.4	802.17	0.00	WNY	165.19	4.91	6.08	-0.65	-0.06	0.85	3.02	-0.39	-10.34	-0.08	0.04	0.06	1.00	43209.33
124531.10	22.96	58.28	2539334.33	631455.95	07_9_01.4	801.96	0.00	WNY	164.74	4.79	5.62	-0.60	0.01	0.88	-1.22	-0.95	-10.68	-0.04	0.08	0.04	1.00	43209.02
124531.20	22.96	58.28	2539334.24	631455.44	07_9_01.4	801.87	0.00	WNY	164.17	4.88	4.80	-0.66	-0.03	0.84	-0.12	-1.62	-11.06	-0.13	0.05	0.07	1.00	43208.87

شکل ۵-۹. بخشی از داده‌های برداشت در نرم‌افزار Oasis Montaj

برای تشخیص نوفه و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در یک پروفیل، از مشتق چهارم نرمالایز شده استفاده می‌شود. با رسم پروفیل مشتق چهارم می‌توان دامنه تغییرات مشتق چهارم را بررسی کرد. در برداشت‌های مغناطیسی هوابرد معمول که با هواپیما و هلیکوپتر انجام می‌شود، دامنه تغییرات مشتق چهارم نرمالایز شده در طول یک متر باید کمتر از $\frac{1}{6}$ نانوتسلا باشد؛ اما برای این نوع برداشت (مغناطیس هوابرد بدون سرنشین) هنوز استاندارد تعریف نشده است. طبیعی است با کم شدن ارتفاع برداشت، مقدار دامنه نویزها در مشتق چهارم نرمالایز شده باید بیشتر باشد؛ با این حال پس از رسم کانال مشتق چهارم داده‌ها این مقدار کمتر از $\frac{1}{6}$ بود؛ بنابراین این داده‌ها معتبر بوده و نیازی به تصحیح نیست. همچنین برای بالا بردن کیفیت داده‌ها و حذف نوفه از فیلتر غیرخطی استفاده شد که نتیجه آن در شکل ۵-۱۰ برای برداشت ارتفاع ۲۰ متر و در شکل ۵-۱۱ برای برداشت ارتفاع ۶۰ متر نمایش داده شده است.

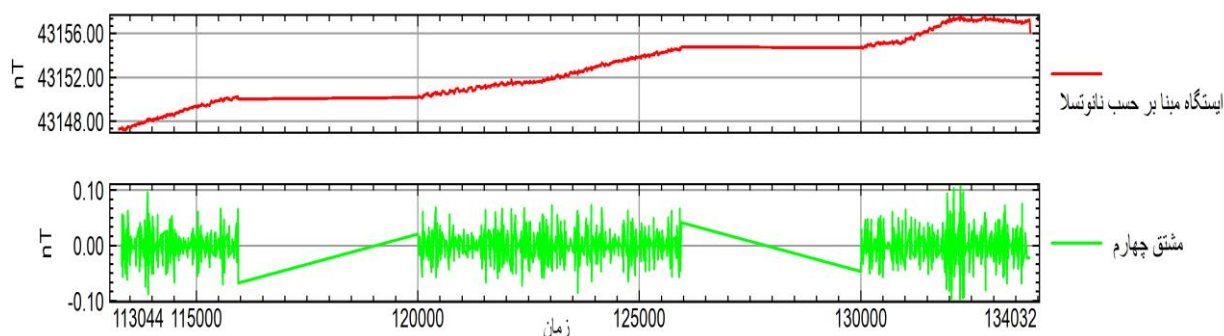


شکل ۵-۱۰. نمودار داده‌های خام در برداشت ۲۰ متر و رسم کانال مشتق چهارم قبل و بعد از فیلتر غیر خطی.



شکل ۵-۱۱. نمودار داده‌های خام در برداشت ۶۰ متر و رسم کانال مشتق چهارم قبل و بعد از فیلتر غیر خطی.

پس از اطمینان از صحت داده‌های پرواز باید داده‌های ایستگاه مبنا بررسی و تصحیح شوند. این کار با بررسی تغییرات بلندمدت و کوتاه‌مدت میدان مغناطیسی صورت می‌گیرد. با توجه به پروفیل رسم شده برای ایستگاه مبنا مدت زمان برداشت داده‌های ایستگاه مبنا در کل نزدیک به دو ساعت بود و بیشترین تغییرات در این مدت زمان ۱۰ نانوتسلا می‌باشد. با بررسی پروفیل تغییرات و از آن جایی که مدت زمان برداشت برای محدوده مورد مطالعه حدود ۱۰ تا ۱۵ دقیقه است؛ می‌توان گفت که داده‌های ایستگاه مبنا سالم می‌باشند و نیاز به تصحیح ندارند.



شکل ۵-۱۲. پروفیل رسم شده در بررسی تغییرات کوتاه مدت و بلندمدت میدان مغناطیسی داده‌های ایستگاه مبنا.

ب) مشخص کردن مکان دقیق داده‌ها بر حسب X و Y

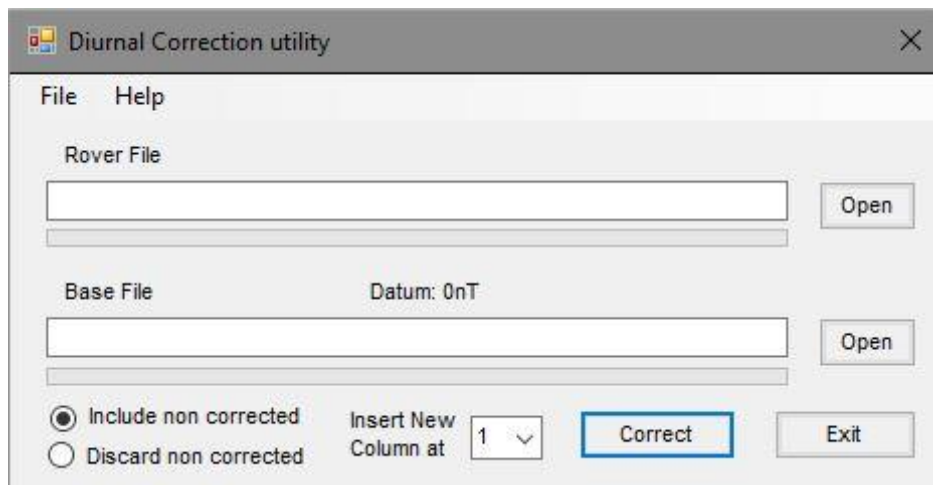
همانطور که در شکل ۵-۴ نشان داده شده مغناطیس‌سنج به صورت معلق در زیر پهپاد آویزان شده است و در این حالت به دلیل اندک بودن فاصله مکانی بین سنسور مغناطیس‌سنج و GPS، نیاز به تغییر مختصات X و Y نمی‌باشد.

۵-۴-۲- مرحله پردازش داده‌های مغناطیس هواپرد در منطقه صحار عمان

الف) تصحیح روزانه

برای حذف اثر تصحیح روزانه، فرض می‌شود که در هر زمان مشخص، مقدار تغییر میدان مغناطیسی از مقدار واقعی آن، همان مقدار تغییر میدان مغناطیسی در ایستگاه مبنا از مقدار واقعی (میانگین مقدار ایستگاه مبنا) در همان زمان است. انجام این کار در این پایان‌نامه با نرم‌افزار GEM Link 5.4 انجام شده است. به این صورت که در قسمت Diurnal Correction، فایل داده‌های پرواز در قسمت Rover File و داده‌های ایستگاه مبنا در قسمت Base File وارد می‌شود. سپس نرم‌افزار یک فایل خروجی به عنوان تصحیحات روزانه می‌دهد. داده‌های برداشت شده در ایستگاه مبنا در مدت زمان دو ساعت در کل تقییرات ۱۰ نانوتسلا داشته است. با توجه به اینکه مدت زمان برداشت حدود

۱۰ دقیقه بوده است، در این مدت تغییرات روزانه با توجه به پروفیل نشان داده شده بسیار ناچیز است (حدود یک نانو تسلا).



شکل ۵-۱۳. نرم افزار GEM Link برای تصحیحات روزانه.

ب) تصحیح جابه جایی محل بی هنجاری ها

تصحیح Lag به دو روش انجام می شود، روش اول با استفاده از آزمایش Lag و روش دوم با استفاده از داده های پرواز می باشد. به دلیل کوچک بودن منطقه مورد بررسی در این محدوده، بی هنجاری های مربوطه به آسانی دیده نمی شود. به همین دلیل برای اعمال تصحیح میزان جابه جایی بی هنجاری های مغناطیسی، باید از روش آزمایش Lag استفاده شود و نمی توان آن را با استفاده از داده های پرواز انجام داد. با توجه به این که ارتفاع پرواز نسبت به پروازهای معمول مغناطیس هوابرد بسیار کمتر است و همچنین سرعت پرواز در این برداشت نزدیک به ۷ متر بر ثانیه است؛ مقدار Lag بسیار اندک بوده (حدود ۰/۰۲ نانو تسلا) و قابل چشم پوشی است.

ج) تصحیح اثر جهت برداشت داده های مغناطیسی بر روی میدان مغناطیسی

آزمایش Heading در هر دو سیستم برداشت ثابت و معلق، اعمال می شود. هدف از انجام این تصحیح حذف اثر جهت پرواز در خطوط برداشت می باشد. این امر می توان ناشی از دو عامل باشد: نخست این که جهت سنسور مغناطیس سنج در رفت و برگشت تغییر می نماید. دوم این که هر جسم

رسانایی در حین حرکت در میدان مغناطیسی، میدان مغناطیسی القایی ثانویه‌ای تولید می‌کند؛ که اثر آن با میدان مغناطیسی زمین مقابله می‌نماید. در این برداشت آزمایش Heading در منطقه انجام شد و داده‌های حاصل از آزمایش به شکل جدول ۵-۱ بدست آمد. مقادیر به دست آمده بر روی داده‌ها اعمال شد؛ با توجه به مقادیر به دست آمده و ناچیز بودن آن‌ها، تاثیر آن چنانی بر روی داده‌ها مشاهده نمی‌شود.

جدول ۵-۱. داده‌های حاصل از آزمایش Heading.

	South	North	East	West	SUM
Yaw	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05
Pitch	0.09	0.08	0.04	0.05	0.05
Roll	0.01	0.03	0.02	0.01	0.1
SUM	0.12	0.12	0.07	0.07	0.2

د) تصحیح IGRF

زمین دارای میدان مغناطیسی است که شامل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سطحی و میدان حاصل از قشر خارجی میدان مغناطیسی زمین می‌باشد. توده‌ای با شکل و اندازه زمین و با اجزایی چون پوسته، گوشته، هسته، و سایر مشخصاتی که به صورت ریاضی با اعداد و ارقام قابل محاسبه است، می‌توان مولد یک میدان استاندارد و یکنواخت باشد که مدل نامیده می‌شود. این مدل توسط مجموعه‌ای از ضرایب هارمونیک کروی به درجه و مرتبه ۱۳ تعریف شده است. با حذف این اثر میدان تصحیح شده IGRF حاصل می‌شود و مقادیر حاصله، تنها بیانگر مقدار مطلق میدان بی‌هنجاری‌ها می‌باشند. معمولاً تصحیح IGRF برای تصحیح اختلاف ارتفاع در حین پرواز و همچنین اختلاف زمانی در حین برداشت انجام می‌شود. در این برداشت با توجه به کوچک بودن منطقه مورد مطالعه و همچنین کوتاه بودن زمان برداشت، تصحیح IGRF تاثیر چندانی بر روی داده‌ها نداشت و تغییرات IGRF در حد یک نانوتسلا است.

ه) تصحیح هم‌ترازسازی

پس از اعمال تصحیحات روزانه، Heading، IGRF، داده‌های میدان مغناطیسی برای اعمال تصحیح هم‌ترازسازی با استفاده از داده‌های خطوط کنترلی آماده می‌باشند. با توجه به اینکه این برداشت برای اولین بار و به منظور اعتبارسنجی این دستگاه و روش در این منطقه برای اهداف معدنی انجام شده، خطوط کنترلی برداشت نشده است. همان‌طور که در تصحیح‌های گذشته دیده شد به دلیل کوچک بودن منطقه، کوتاه بودن مدت زمان برداشت و همچنین تعداد قرائت بالای دستگاه مغناطیس‌سنج در مدت زمان کوتاه، تاثیر چندانی بر روی داده‌های پروازی ندارد.

۵-۵- بررسی میدان مغناطیسی کل محدوده مورد مطالعه

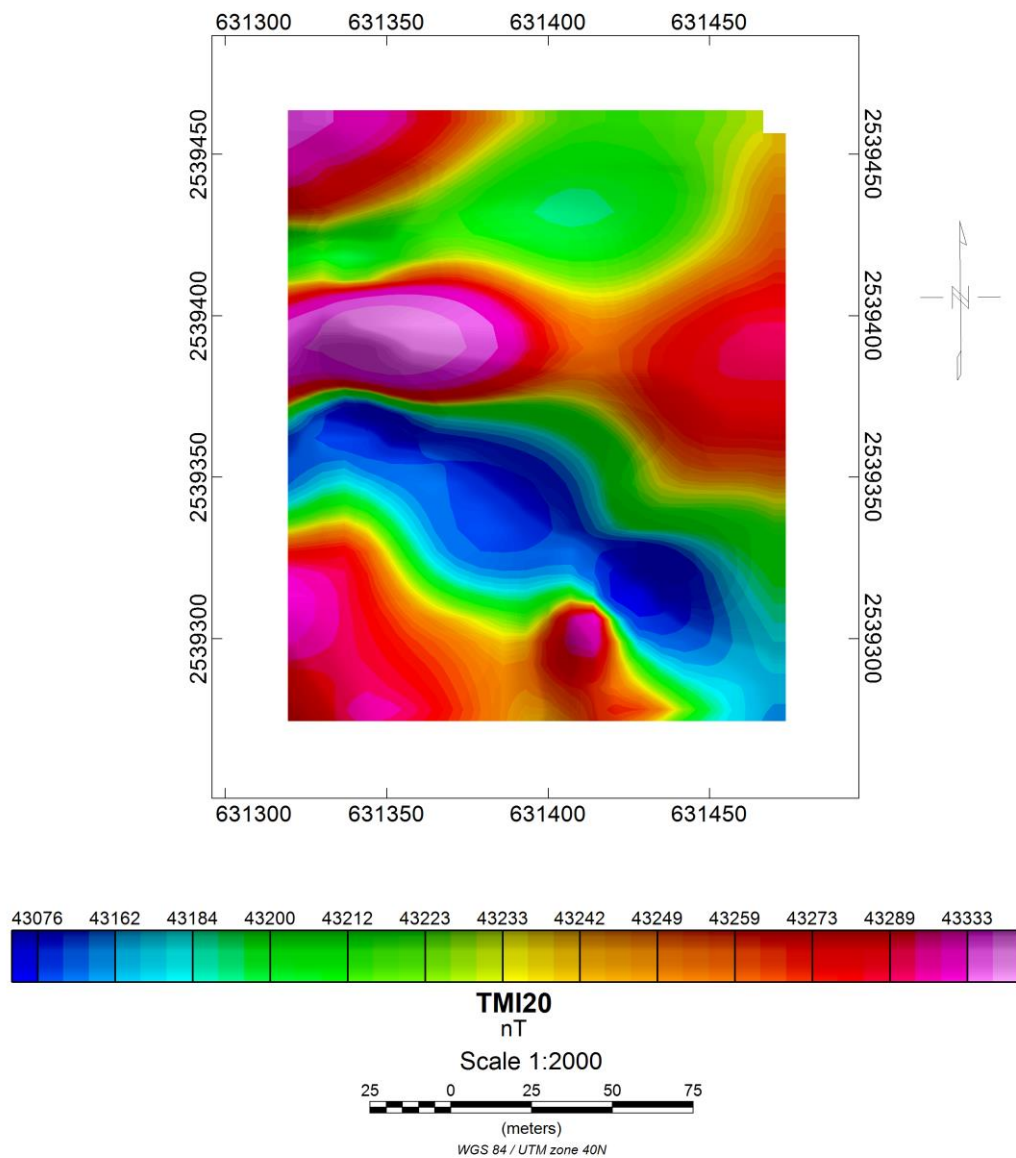
۵-۵-۱- نقشه میدان مغناطیسی کل

پس از انجام مراحل پردازش و حذف اثرات غیرمرتبط با مقدار شدت میدان مغناطیسی واقعی بی‌هنجاری‌ها، نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی بدون تاثیر نوفه و اثرات متفرقه مغناطیسی حاصل می‌شود. داده‌ها برای هر دو ارتفاع با روش حداقل انحنای^۱ درونیابی شدند. با توجه به اینکه فاصله بین خطوط برداشت ۲۰ متر بود اندازه سلول برای روش حداقل انحنای ۷ متر تنظیم شد؛ چون اندازه سلول باید تقریباً یک سوم فاصله بین خطوط برداشت باشد.

نقشه‌های شدت مغناطیسی کل برای هر دو برداشت ۲۰ متر و ۶۰ متر در شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است و پایه‌ای برای تعیین مناطق مورد اهمیت از نظر میدان مغناطیسی هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ارتفاع ۲۰ متر دو میدان دوقطبی مشخص است در حالی که در همین محدوده در ارتفاع ۶۰ متر این میدان‌های دو قطبی مشاهده نمی‌شود. بیش‌ترین مقدار میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۲۰ متر، ۴۳۵۴۳ نانوتسلا و کم‌ترین مقدار ۴۲۹۷۱

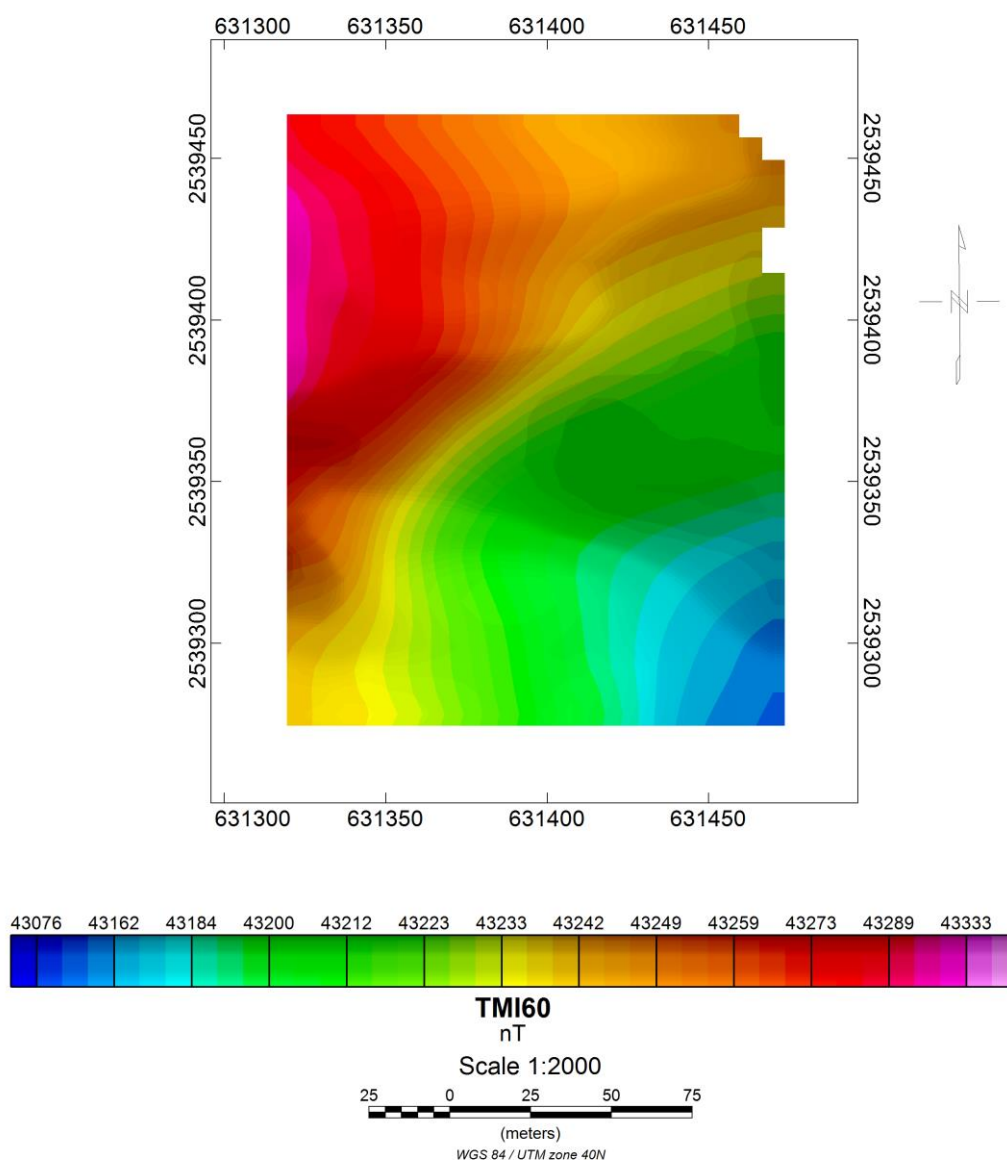
^۱- Minimum Curvature Method

نانوتسلا است. بیشترین مقدار میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۶۰ متر ۴۳۲۹۷ نانوتسلا و کمترین مقدار ۴۳۱۴۷ نانوتسلا است. با استفاده از ابزار سایه^۱ در نرم‌افزار Oasis Montaj می‌توان درک بهتری از شدت مغناطیسی پیدا کرد که در شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ اعمال شده است.



شکل ۵-۱۴. میدان مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر.

^۱- Shadow



شکل ۵-۱۵. میدان مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر.

۵-۵-۲- نقشه برگردان به قطب^۱

به طور کلی اگر مغناطیدگی و میدان زمینه، قائم نباشند، یک توزیع مغناطیدگی، به جای بی-
 هنجاری مغناطیسی متقارن، بی‌هنجاری نامتوازن را تولید خواهد کرد. به عبارتی یک توده مغناطیسی

^۱- Reduce to the pole

مشخص، بسته به موقعیت آن، بی‌هنجاری‌های مختلفی از خود نشان می‌دهد و این موضوع به دلیل تفاوت در مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین در نقاط مختلف آن است. برای تصحیح این اثر باید بردارهای مولفه میدان مغناطیسی زمین با مولفه‌های توده مغناطیسی هم‌جهت شوند. این عمل با فیلتر برگردان به قطب انجام می‌شود. در قطب شمال مغناطیسی جهت مغناطیدگی و میدان زمین، هر دو به صورت مستقیم و عمودی رو به پایین است. پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب، مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین با مولفه‌های توده آنومال، موازی و در جهت مرکز مغناطیدگی زمین قرار می‌گیرند. با این عمل پیک بی‌هنجاری مغناطیسی بر روی توده مغناطیس قرار می‌گیرد. (Blakely, 1996). این فیلتر از تبدیل فوریه آنومالی میدان کل ΔT به دست می‌آید و به صورت زیر است:

$$\mathcal{F}[\Delta T_r] = \mathcal{F}[\psi_r] \mathcal{F}[\Delta T] \quad 1-5$$

که در آن:

$$\mathcal{F}[\psi_r] = \frac{1}{\Theta_m \Theta_f} \quad 2-5$$

عامل برگردان به قطب نامیده می‌شود. ΔT_r آنومالی تبدیل شده به قطب مغناطیسی شمال است، جایی که مولفه توده آنومال و مولفه میدان مغناطیسی هر دو به صورت عمودی و در جهت پایین هستند. پارامترهای فاکتور فاز در معادله ۲-۵، Θ_m و Θ_f به صورت زیر هستند:

$$\Theta_m = \hat{m}_z + i \frac{\hat{m}_x k_x + \hat{m}_y k_y}{|k|} \quad 3-5$$

$$\Theta_f = \hat{f}_z + i \frac{\hat{f}_x k_x + \hat{f}_y k_y}{|k|} \quad 4-5$$

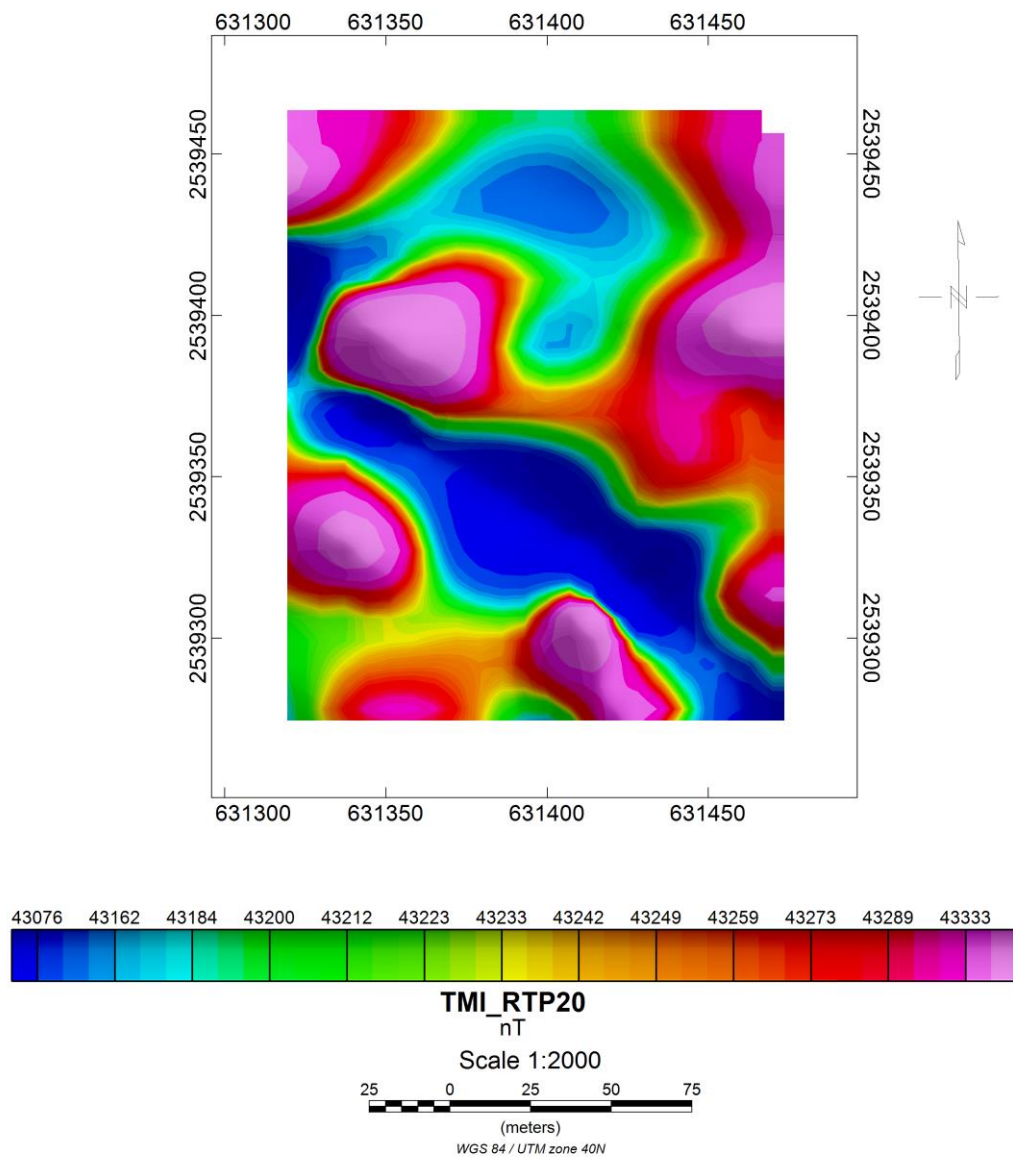
که در آن $m = (\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z)$ و $\hat{f} = (\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{f}_z)$ به ترتیب به عنوان بردارهای واحد در جهت مغناطیدگی و میدان محیط تعریف می‌شوند (Blakely, 1995). فرمولی که نرم‌افزار Oasis Montaj از آن برای فیلتر برگردان به قطب استفاده می‌کند به صورت زیر است:

۵-۵:

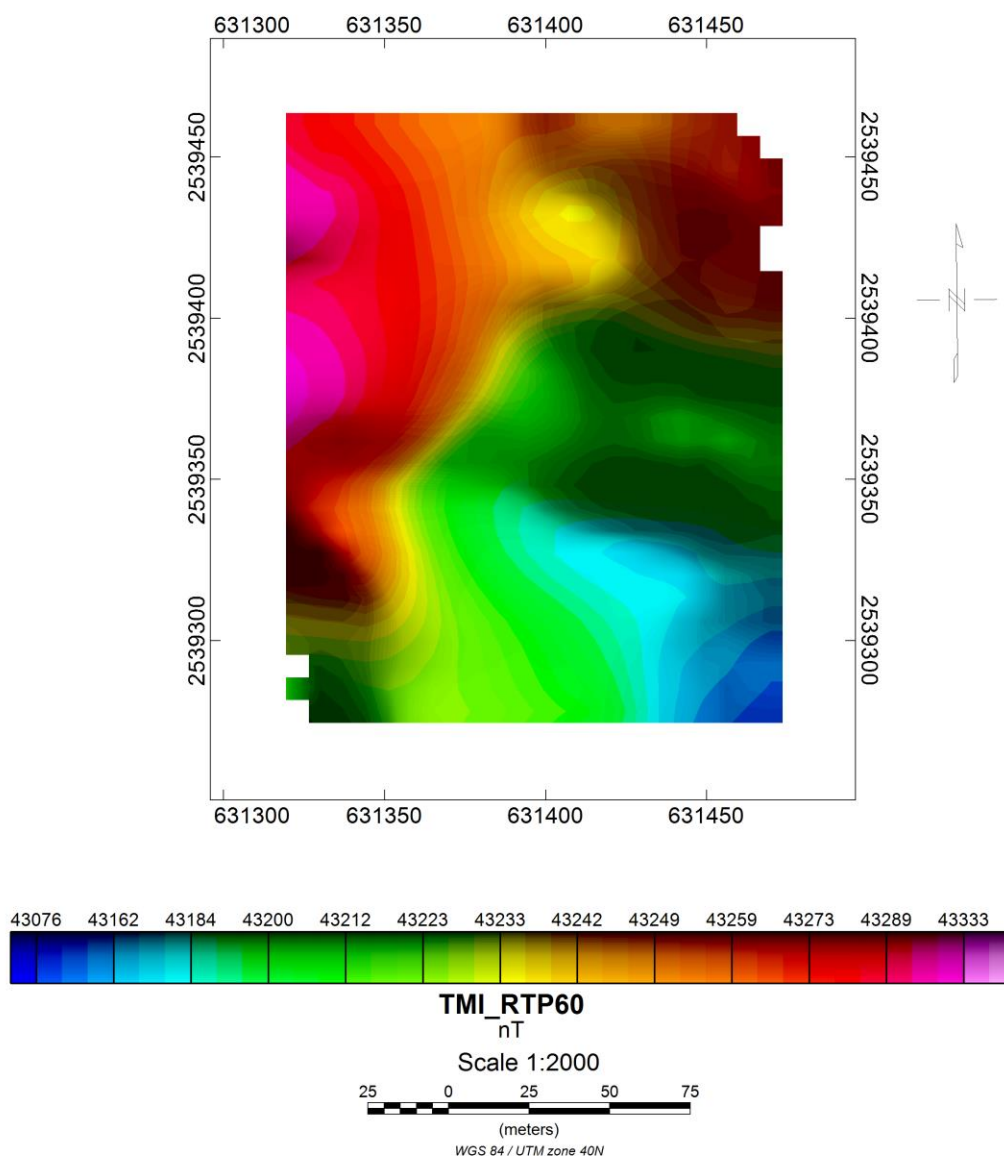
$$L(\theta) = \frac{[\sin(I) - i \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(I_a) + \cos^2(I_a) \cdot \cos^2(D - \theta)] \cdot [\sin^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]}, \text{ if } (|I_a| < |I|), I_a = I$$

که در آن I زاویه میل، D زاویه انحراف و I_a دامنه تصحیح زاویه میل است. به طور خلاصه، استفاده از فیلتر برگردان به قطب برای دستیابی به محل واقعی ناهنجاری‌ها با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه مورد مطالعه، انجام می‌شود (Clark, 1997). شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ نقشه شدت

مغناطیس کل را برای دو ارتفاع پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب نشان می‌دهند.

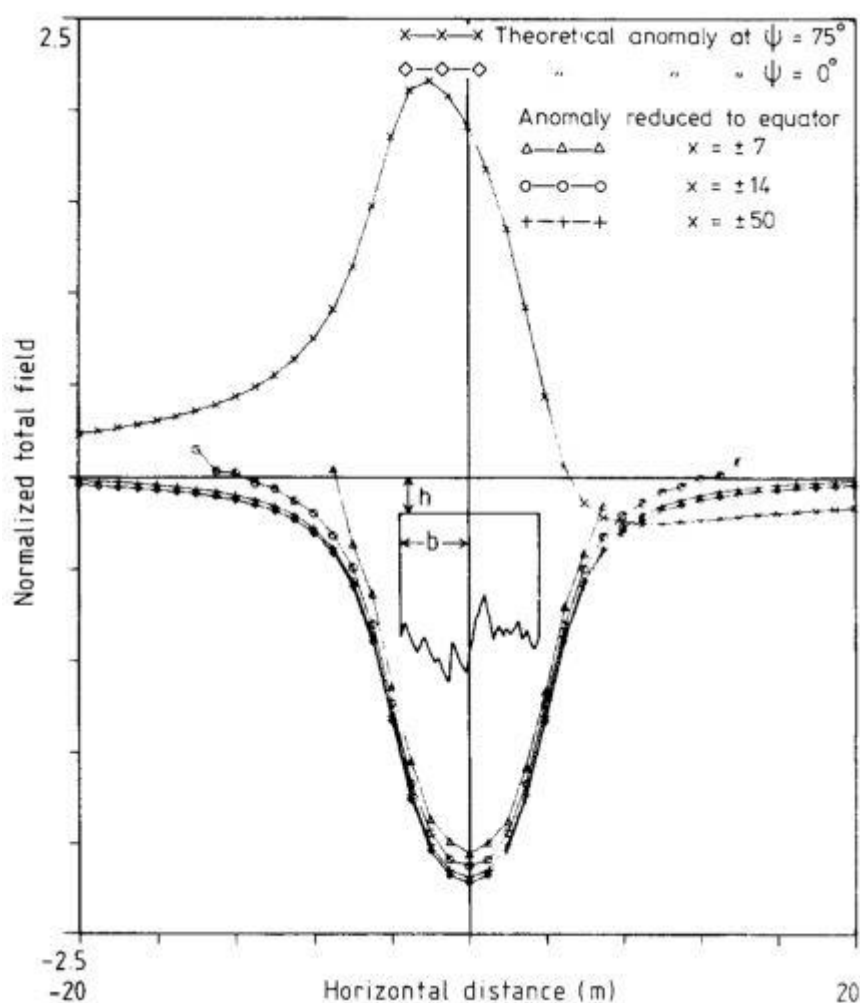


شکل ۵-۱۶. نقشه شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب.



شکل ۵-۱۷. نقشه شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب.

فیلتر برگردان به قطب برای عرض‌های جغرافیایی بالاتر از ۳۰ درجه پیشنهاد شده است و برای مناطقی که در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر قرار گرفته‌اند، از روش برگردان به استوا استفاده می‌شود. باید به این نکته توجه داشت که استفاده از روش برگردان به استوا، آنومالی را بر روی توده قرار می‌دهد؛ با این تفاوت که مقدار آنومالی را به صورت منفی نشان می‌دهد (شکل ۵-۱۸).



شکل ۵-۱۸. محاسبه آنومالی‌های میدان (آنومالی تئوری در زاویه میل 75° ، آنومالی با اعمال فیلتر برگردان به استوا و آنومالی‌های برگردان به استوا با طول پروفیل متفاوت) برای دایک قائم که نسبت عرض به عمق آن ۴ است (Aina, 1986).

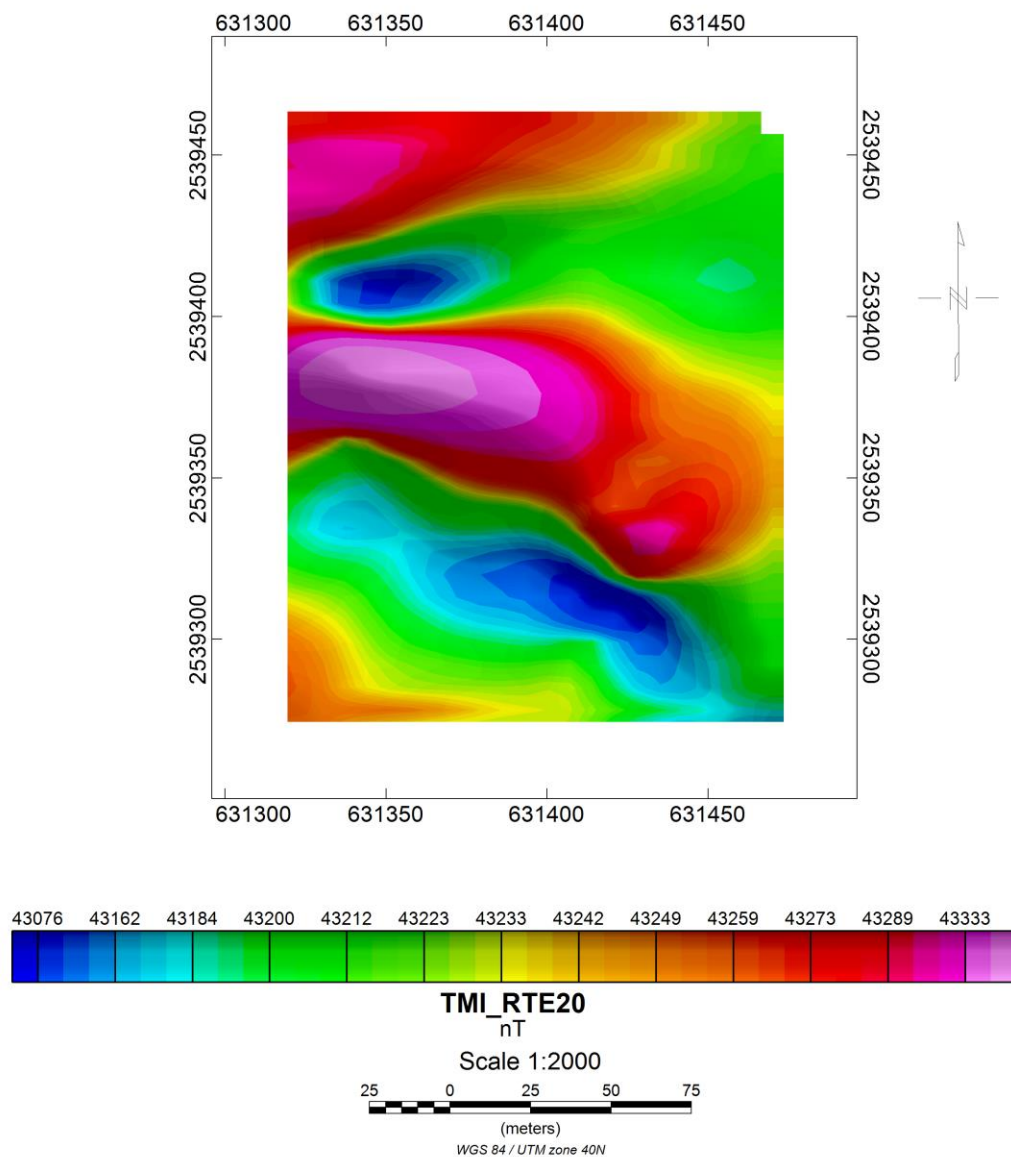
از آنجایی که کشور عمان در عرض جغرافیای زیر 30° درجه قرار دارد، فیلتر برگردان به استوا^۱ در این ناحیه پاسخ مناسب‌تری خواهد داشت. فرمول فیلتر برگردان به استوا در نرم افزار Oasis Montaj به صورت زیر است:

۵-۶:

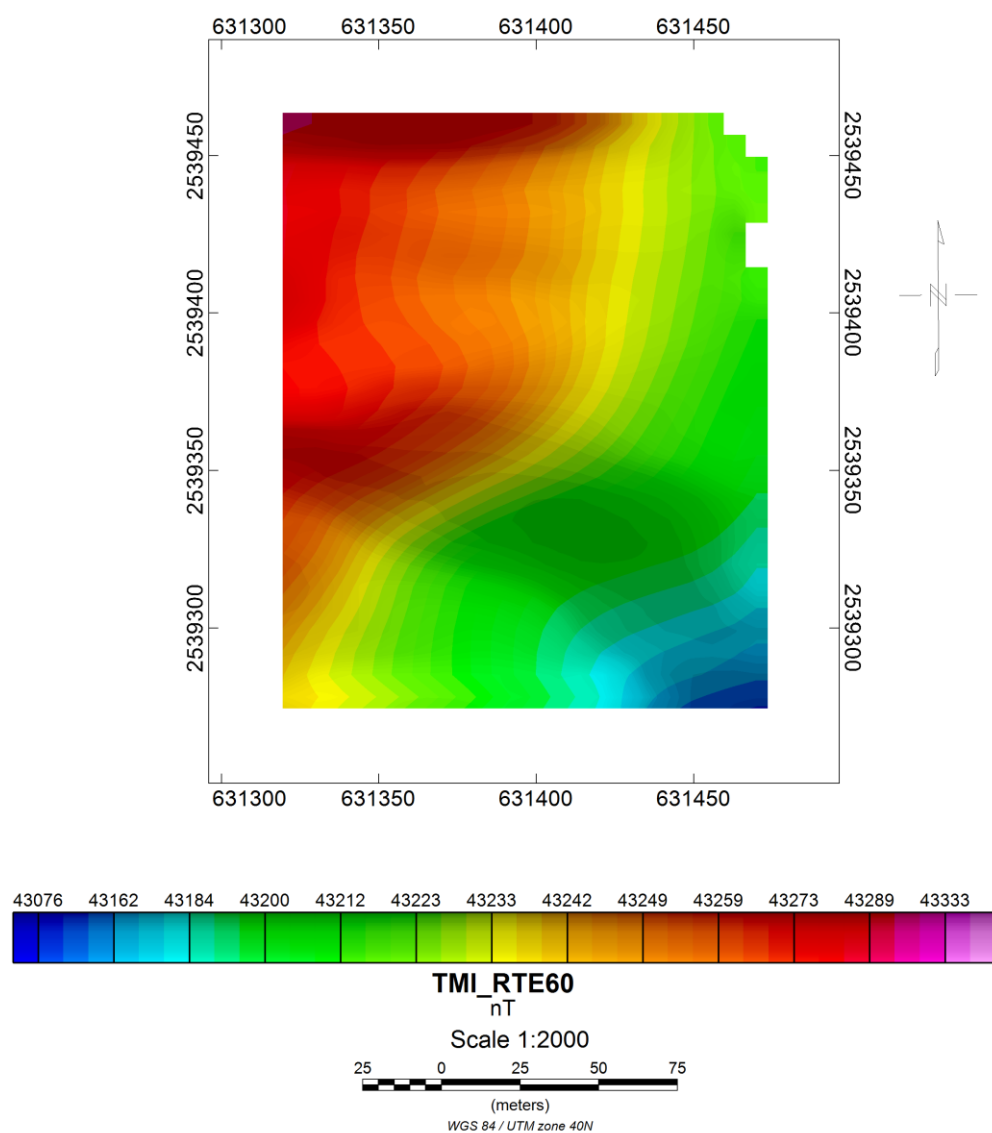
^۱- Reduce to magnetic equator

$$L(\theta) = \frac{[\sin(I) - i \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2 \times (-\cos^2(D - \theta))}{[\sin^2(I_a) + \cos^2(I_a) \cdot \cos^2(D - \theta)] \cdot [\sin^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]}, \text{ if } (|I_a| < |I|), I_a = I$$

که در آن I زاویه میل، D زاویه انحراف و I_a دامنه تصحیح زاویه میل است.



شکل ۵-۱۹. نقشه شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر پس از اعمال فیلتر برگردان به استوا.

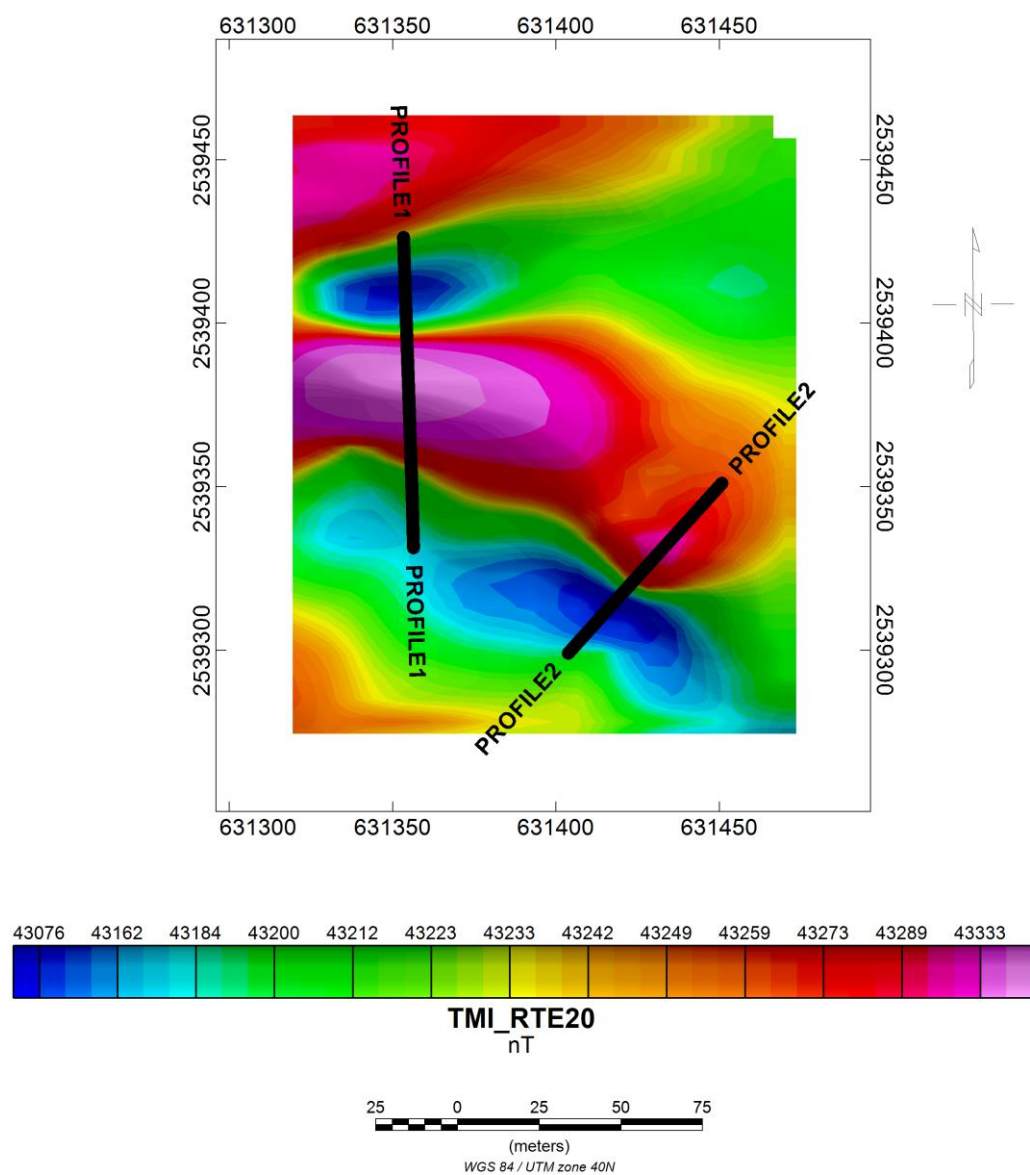


شکل ۵-۲۰. نقشه شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر پس از اعمال فیلتر برگردان به استوا.

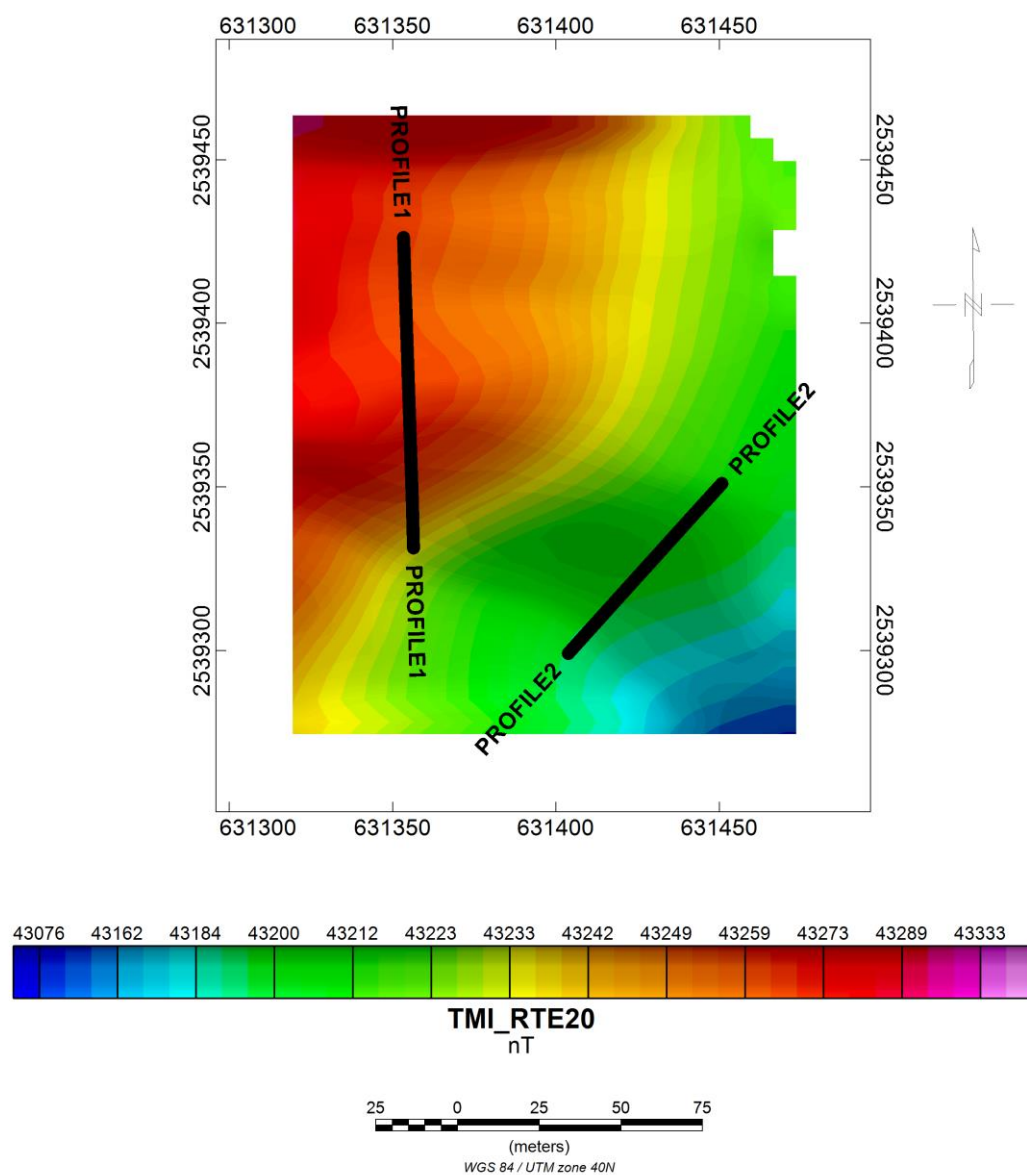
همان‌طور که مشاهده می‌شود، نقشه‌های برگردان به استوا شباهت زیادی به نقشه‌های قبل دارد؛ با این تفاوت که در این نقشه‌ها کمی پیچش و جابه‌جایی رخ داده است. دلیل این تفاوت جهت و مقدار میان مغناطیسی زمین است و در عرض‌های جغرافیایی متفاوت مقادیر مختلفی دارد. فیلتر برگردان به استوا پاسخ بهتری نسبت به فیلتر برگردان به قطب در این محدوده می‌دهد (شکل ۵-۱۹ و شکل ۵-۲۰).

۵-۳-۵ - مقایسه نقشه میدان مغناطیسی در دو ارتفاع ۲۰ متر و ۶۰ متر

برای مقایسه نقشه‌های برداشت در دو ارتفاع ۲۰ متر و ۶۰ متر، ابتدا در نرم‌افزار Oasis Montaj، یک منطقه رنگی واحد برای نمایش رنگ‌های نقشه تولید شد. دو پروفیل بر روی نقشه شدت مغناطیسی کل برای هر دو ارتفاع کشیده شد. همان‌طور که در شکل ۵-۲۱ مشاهده می‌شود، در برداشت ارتفاع ۲۰ متر دوقطبی‌های مغناطیسی، در محلی که پروفیل کشیده شده است، دیده می‌شود؛ ولی در برداشت ارتفاع ۶۰ متر این دو قطبی‌های مغناطیسی دیده نمی‌شود (شکل ۵-۲۲).

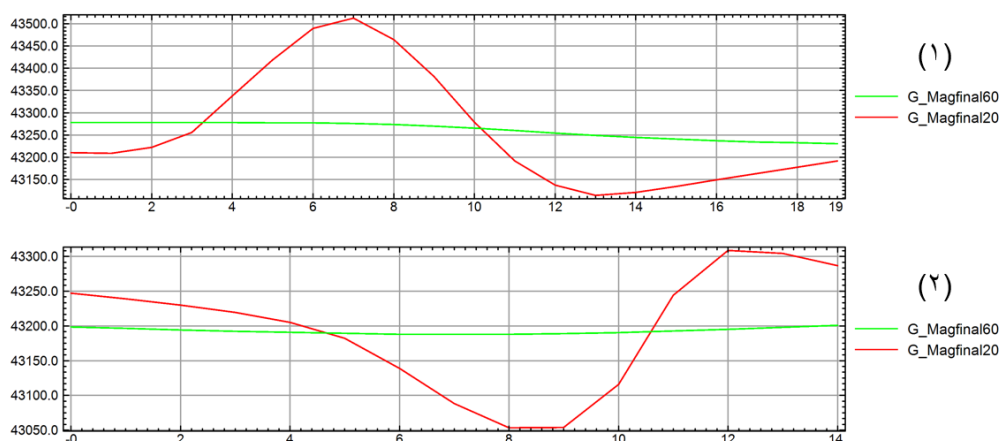


شکل ۲۱-۵. شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر.



شکل ۵-۲۲. شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر.

شکل ۵-۲۳ مقادیر شدت مغناطیسی کل را برای دو پروفیل کشیده شده برای دو ارتفاع نشان می- دهد.



شکل ۵-۲۳. (۱) مقایسه شدت مغناطیسی پروفیل ۱ در دو برداشت. (۲) مقایسه شدت مغناطیسی پروفیل ۲ در دو برداشت.

۵-۴-۵ - فیلتر ادامه فراسو^۱

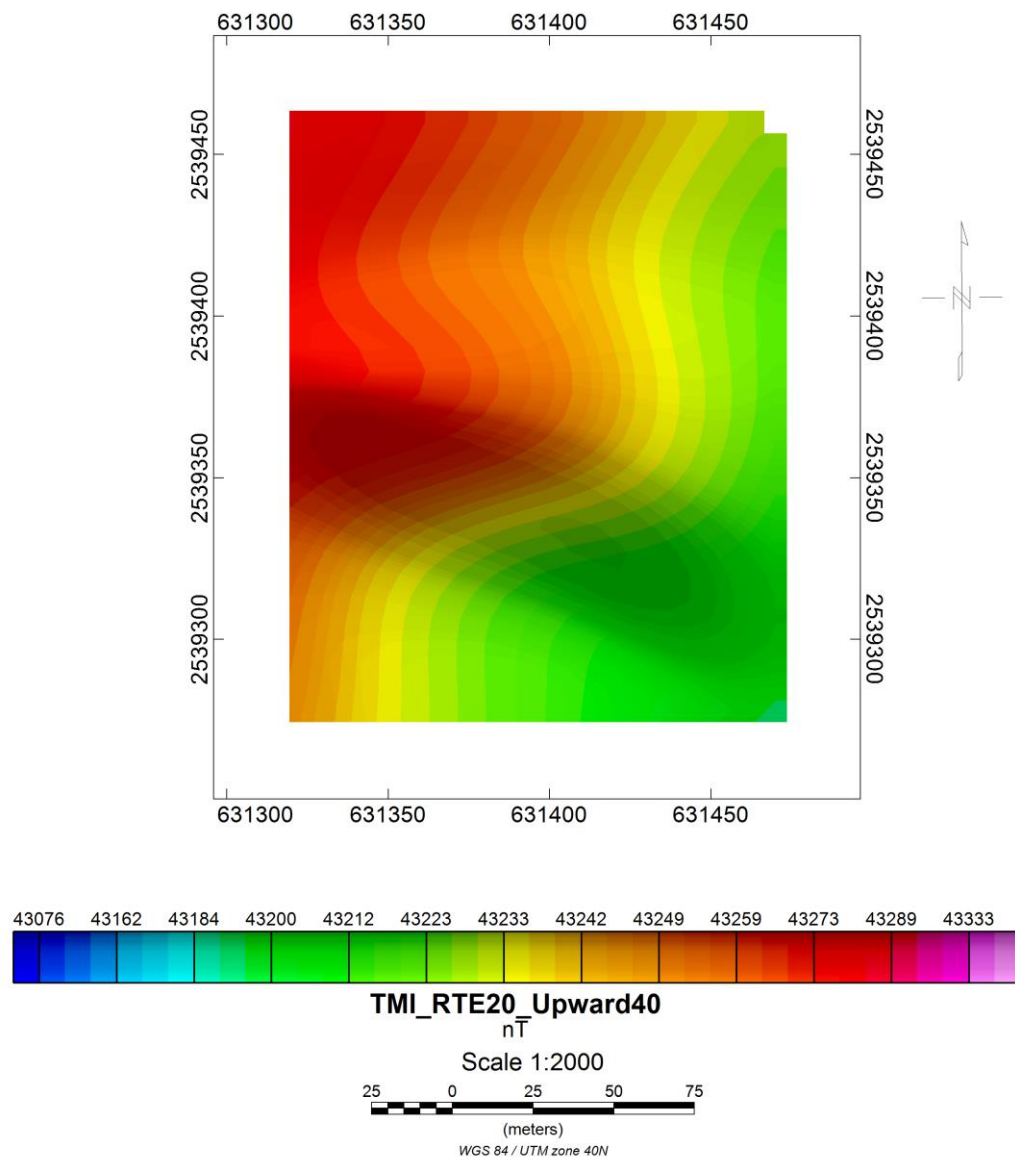
روش ادامه فراسو، داده‌های اندازه‌گیری شده را از سطح اندازه‌گیری به سطح بالاتر منتقل می‌کند. این انتقال داده‌ها به سطح یا سطوح بالاتر با ابزار ریاضی و محاسبات عددی انجام می‌شود. نتیجه این انتقال نیز تضعیف بی‌هنجاری‌هایی با طول موج کوتاه‌تر است. بنابراین با این انتقال، اثر بی‌هنجاری‌های سطحی با فرکانس بالا حذف و به این طریق اثر بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر بهتر آشکار می‌شود (Gunn, 1996). هر منبع مغناطیسی به سطح زمین نزدیک‌تر و منبع کوچک‌تر باشد، طول موج‌ها کوتاه‌تر و فرکانس‌ها در طول واحد بیش‌تر خواهد بود و برعکس (Tarlowski et al., 1997). فرمول فیلتر ادامه فراسو به صورت زیر است:

$$L(k) = e^{-2\pi h k} \quad ۷-۵$$

که در آن h میزان فاصله‌ای است که میدان مشاهده شده به اندازه آن به سمت بالا تغییر می‌کند. با افزایش مرتبه فیلتر، بی‌هنجاری‌های محلی حذف می‌شود و تنها اثرات مربوط به دامنه بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای قابل رویت است. در این تحقیق چون برداشت در دو ارتفاع انجام شده است، به

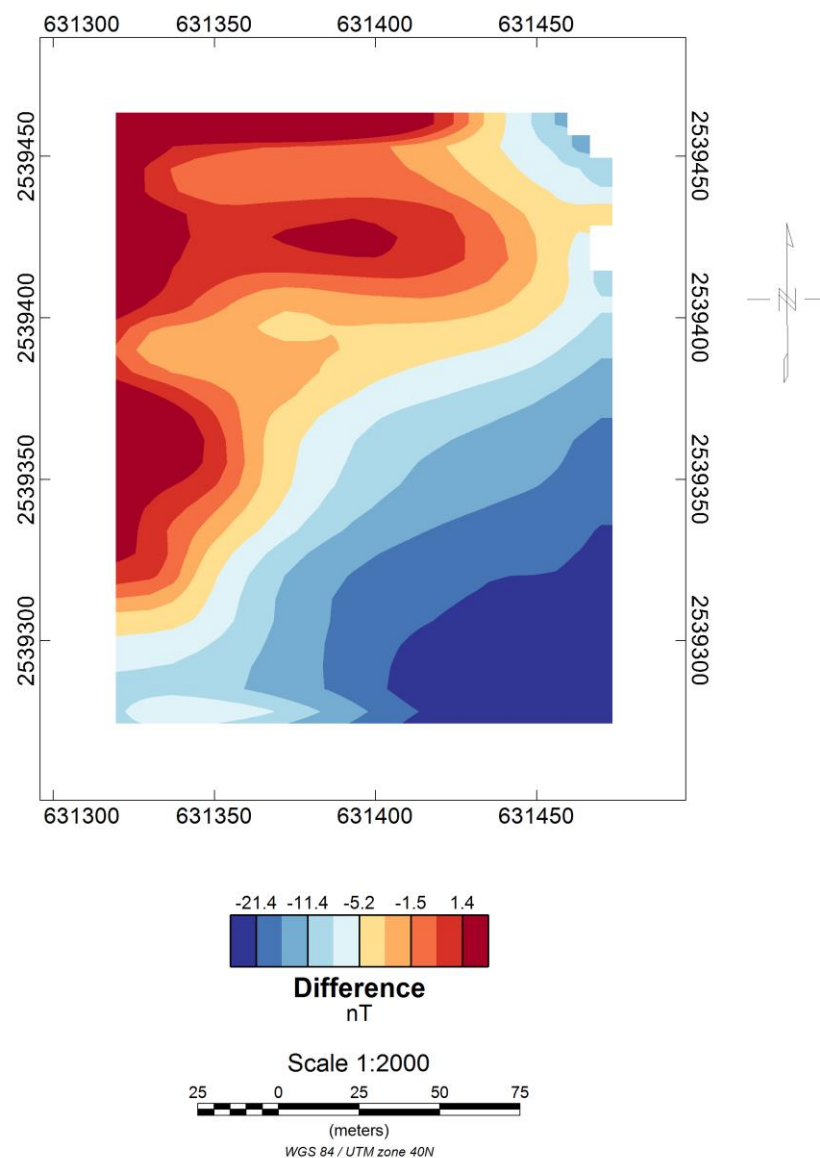
^۱ - Upward continuation

مقایسه بین برداشت در ارتفاع ۲۰ متری که فیلتر ادامه فراسو بر روی آن به اندازه ۴۰ متر اعمال شده (شکل ۵-۲۴) و برداشت در ارتفاع ۶۰ متر پرداخته می شود (شکل ۵-۲۰).



شکل ۵-۲۴. نقشه شدت مغناطیسی برداشت ۲۰ متر با اعمال فیلتر ادامه فراسو به اندازه ۴۰ متر همان طور که مشاهده شد، بین مقادیر میدان اندازه گیری شده در ارتفاع ۶۰ متر و میدان برداشت ۲۰ متر با اعمال فیلتر ادامه فراسو به اندازه ۴۰ متر، تفاوت وجود دارد. در صورتی که هر دو در یک سطح

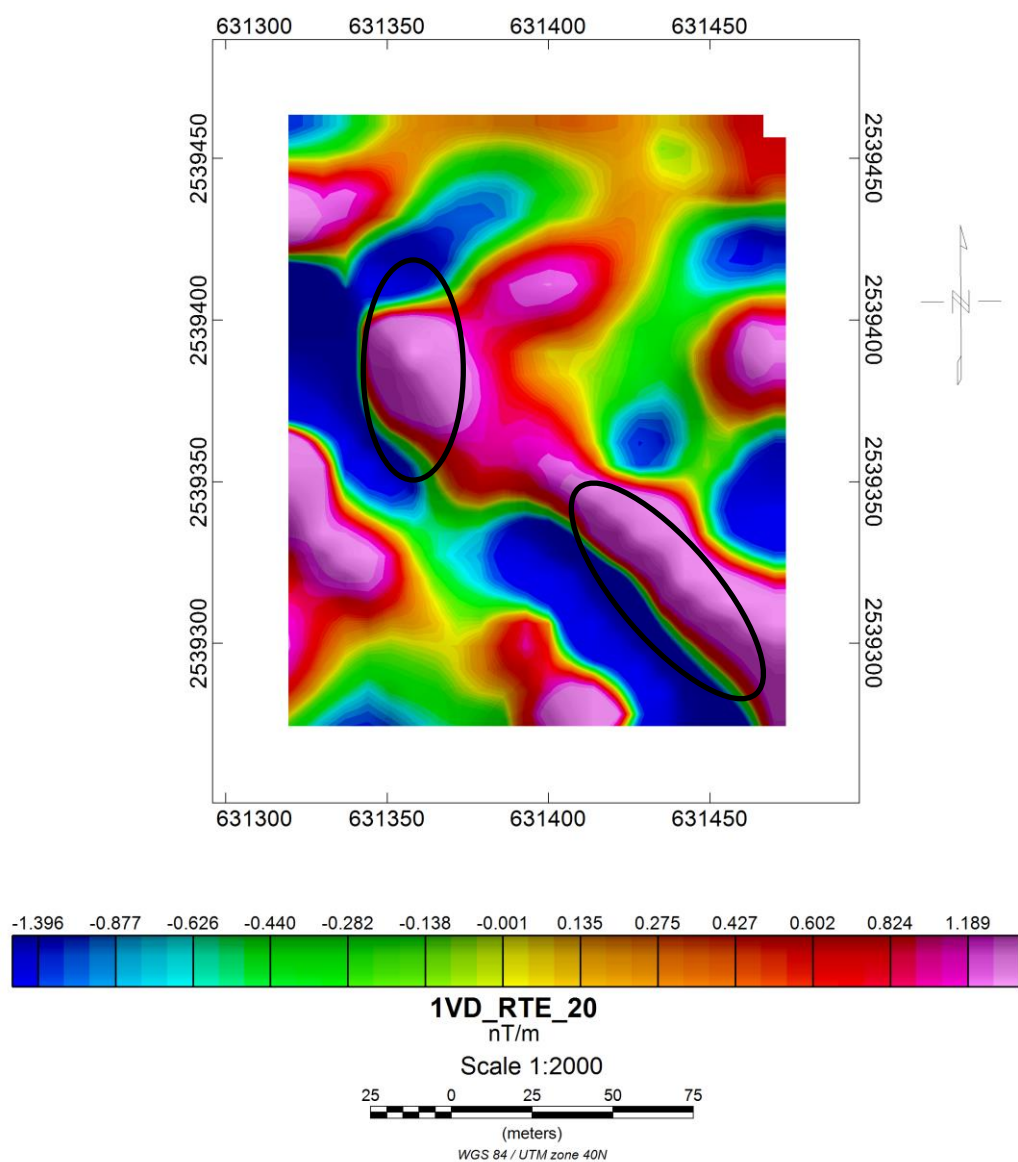
ارتفاعی هستند. با کم کردن این دو مقدار از یکدیگر میزان خطای فیلتر ادامه فراسو مشخص می‌شود. در شکل ۵-۲۵ این اختلاف مقدار به صورت نقشه نشان داده شده است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از این فیلترها دارای مقداری خطا است و در پروژه‌هایی که دقت مهم است ممکن است فیلترها مناسب نباشند؛ همچنین این موضوع نشان می‌دهد که برداشت در چند سطح در یک منطقه می‌تواند اطلاعات مفید و دقیق‌تری از منطقه را، با توجه به هدف برداشت داشته باشد.



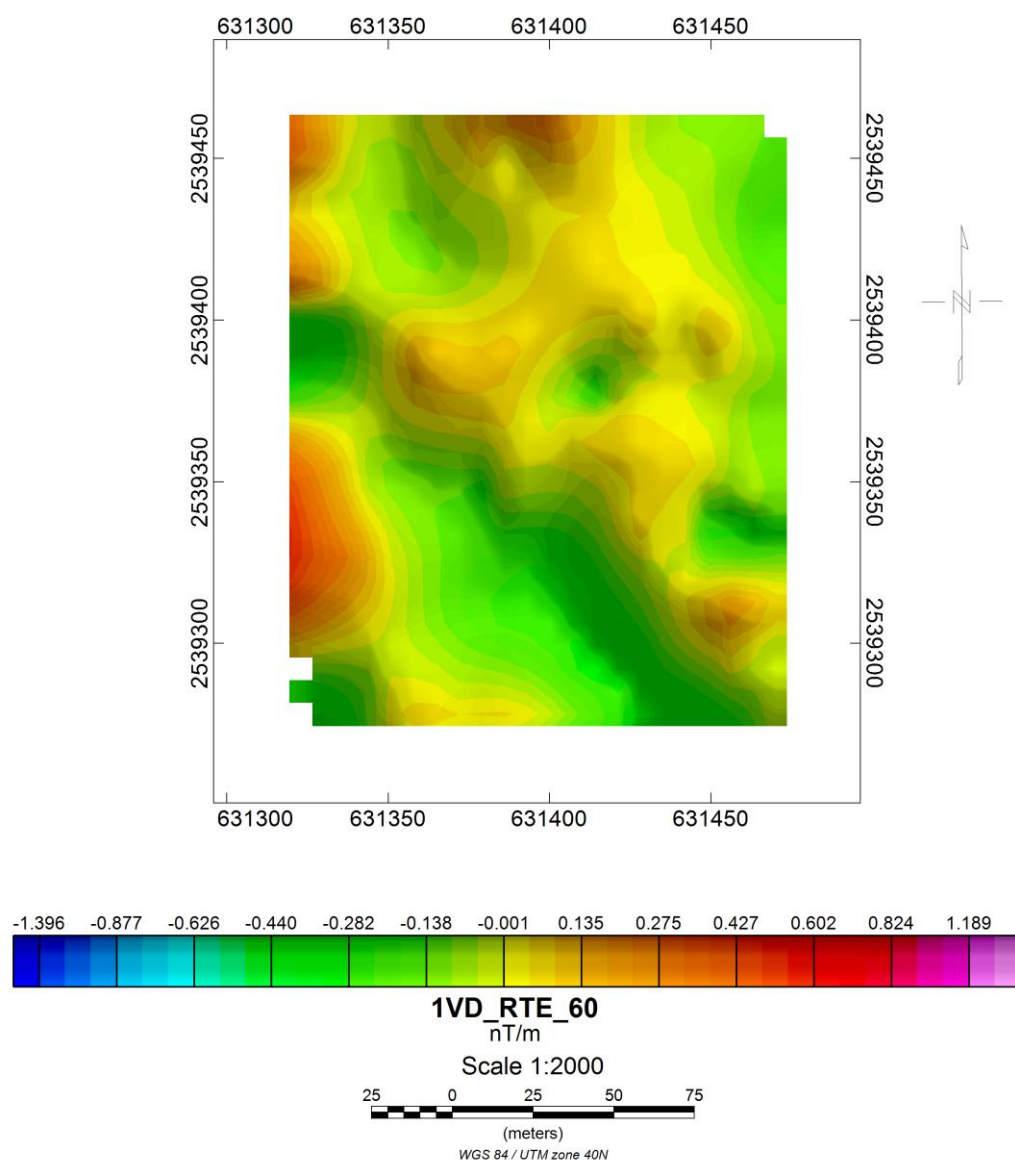
شکل ۵-۲۵. میزان اختلاف میدان اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۶۰ متر و میدان اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۲۰ متر با اعمال فیلتر ادامه فراسو به میزان ۴۰ متر.

۵-۵-۵ - فیلتر مشتق قائم

آهنگ تغییرات در عمق توسط مشتق قائم بررسی می‌شود. از آن‌جا که اثر بی‌هنجاری‌های عمیق در گرادین‌ها سریع از بین می‌رود، برای بررسی بی‌هنجاری‌هایی با منشأ سطحی ترجیح داده می‌شوند و در نتیجه روشی مناسب برای شناسایی ساختارهای کم‌عمق نظیر گسل، ناودیس و تاقدیس است (Blakely, 1996). به زبان ساده مشتق قائم میدان، عبارت است از میدان اندازه‌گیری شده در راستای قائم در ارتفاع بالاتر، منهای میدان اندازه‌گیری شده در همان راستا در ارتفاع پایین‌تر، تقسیم بر اختلاف ارتفاع بین دو نقطه. مشتق قائم، اثر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای را کاهش می‌دهد و دارای وضوح و درجه تفکیک‌پذیری بیشتری نسبت به میدان اصلی است. این فیلتر، اثر بی‌هنجاری‌های عمیق با فرکانس پایین را حذف کرده و تاثیر منابع کم‌عمق با فرکانس بالا را به نمایش می‌گذارد (Gunn, 1996). نقشه مشتق قائم از آن‌جا که نوعی فیلتر بالاگذر است، تصویری فیلتر شده از میدان مغناطیسی فراهم می‌آورد؛ که ویژگی‌های زمین‌شناسی نزدیک سطح زمین را برجسته‌تر می‌کند. از بین مشتقات قائم، مشتق مرتبه اول جهت بررسی اجسام نزدیک به سطح مناسب‌تر است، زیرا تفکیک بی‌هنجاری توسط مشتق مرحله اول راحت‌تر و حداکثر محدوده مربوط به بی‌هنجاری‌ها تعیین می‌شود (Blakely, 1996). شکل ۵-۲۶ نقشه مشتق قائم مرتبه اول برای برداشت ۲۰ متر را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، آنومالی‌های که در نقشه شدت مغناطیسی کل قبل از فیلتر مشتق اول مشاهده می‌شد، در این نقشه بارزتر شده است که این موضوع احتمالاً نشانگر سطحی بودن این آنومالی‌ها می‌تواند باشد. شکل ۵-۲۷ نقشه مشتق قائم مرتبه اول را برای برداشت ۶۰ متر نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۶. شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۲۰ متر با اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه اول.



شکل ۵-۲۷. شدت مغناطیسی کل در ارتفاع ۶۰ متر با اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه اول.

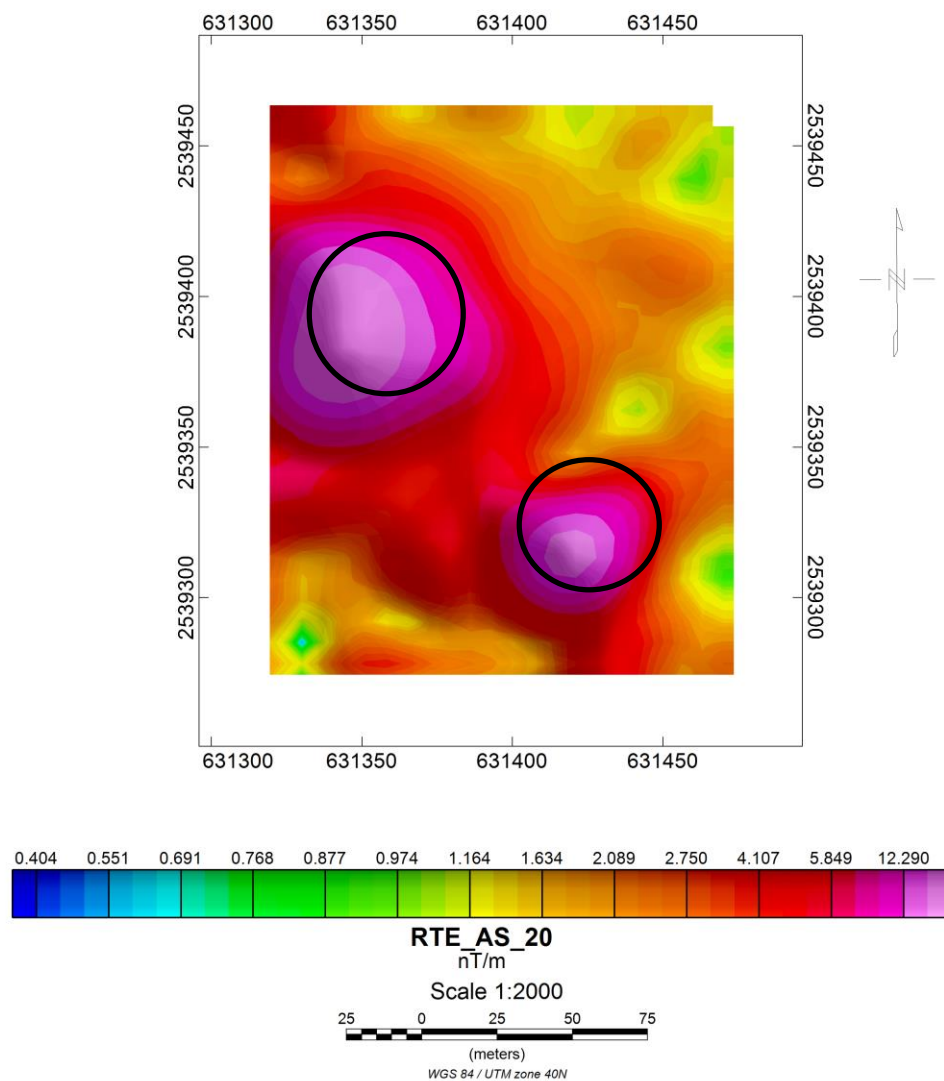
۵-۵-۶- نقشه سیگنال تحلیلی شدت کل میدان مغناطیسی

فیلتر سیگنال تحلیلی، حاشیه‌ها و لبه‌های آنومالی‌های مغناطیسی را بهتر آشکار می‌سازد و در نتیجه در تعیین نقطه حفاری و مشخص نمودن مرزها و تفسیر دقیق‌تر به ما کمک می‌کند (Gunn, 1996). بدین ترتیب گسترش طولی و عرضی کانسار را روی سطح زمین با دقت بیشتری نسبت به

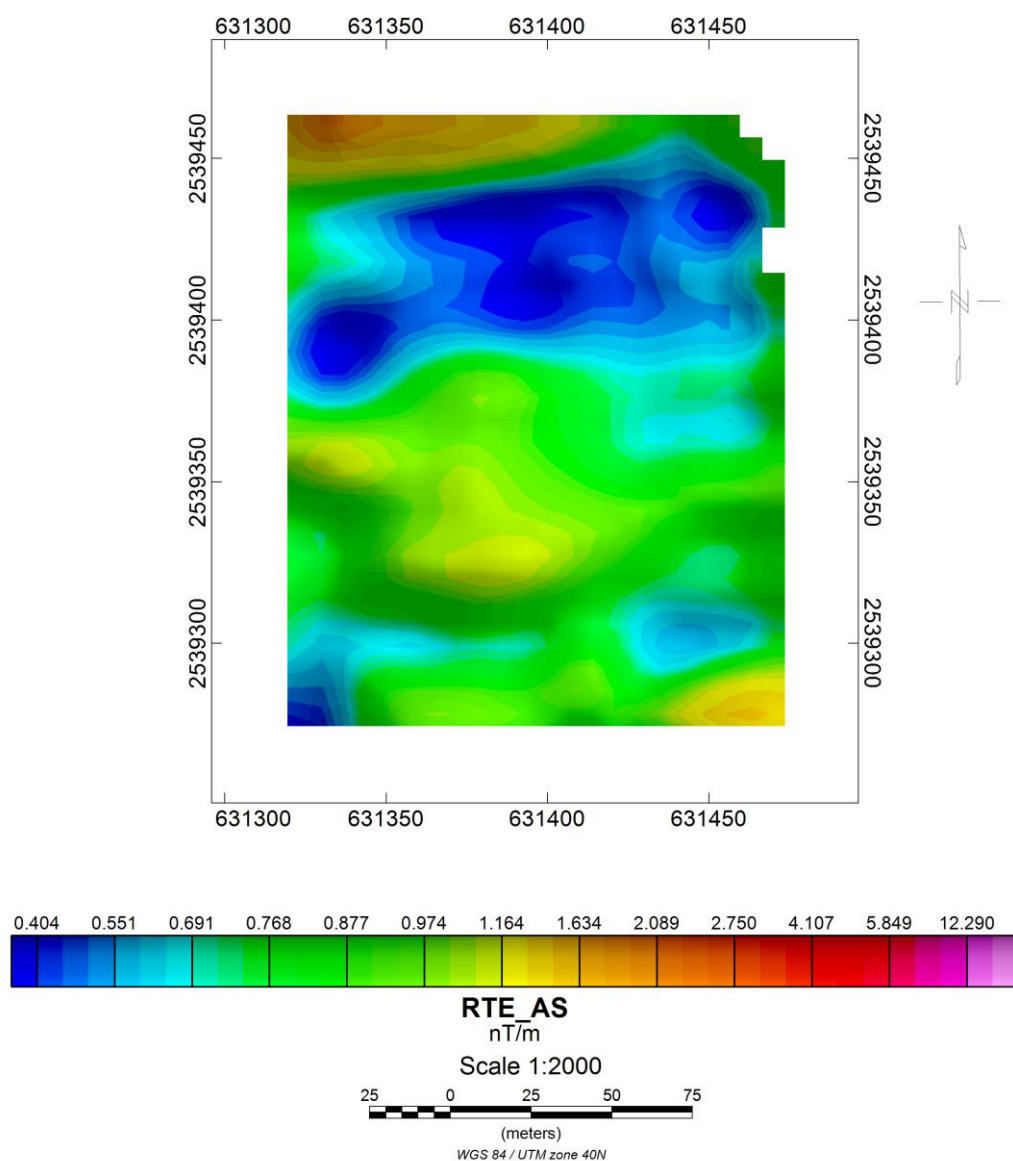
نقشه آنومالی مغناطیسی نشان می‌دهد. این فیلتر ترکیب مشتقات افقی و قائم است. در مغناطیس به علت استفاده از فیلتر برگردان به قطب و استوا، پیک آنومالی، نشان‌دهنده مرز و لبه آنومالی نبوده، بلکه روی مرکز آنومالی قرار دارد (Blakely, 1996). سیگنال تحلیلی ریشه دوم مجموع مربعات مشتقات در جهت x ، y ، z است:

$$asig = \sqrt{dx * dx + dy * dy + dz * dz} \quad ۸-۵$$

شکل ۲۸-۵ و شکل ۲۹-۵ نقشه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی منطقه مورد مطالعه را در دو ارتفاع ۲۰ متر و ۶۰ متر نشان می‌دهد.



شکل ۲۸-۵. نقشه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی محدوده برای برداشت ارتفاع ۲۰ متر.

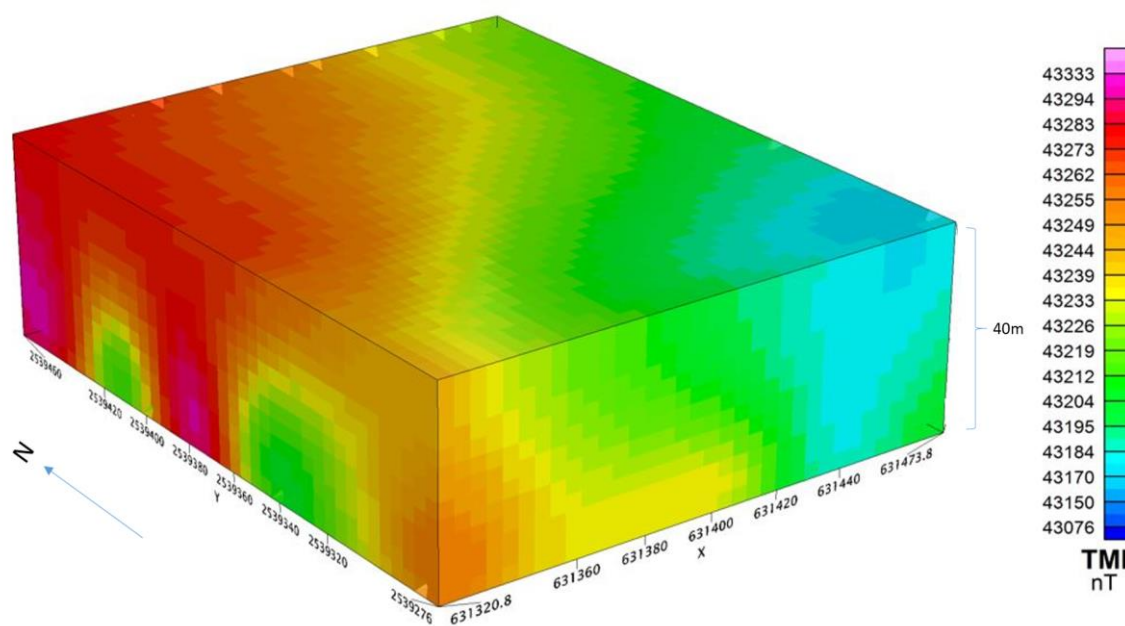


شکل ۵-۲۹. نقشه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی محدوده برای برداشت ارتفاع ۶۰ متر.

همان‌طور که در شکل ۵-۲۸ دیده می‌شود؛ دو آنومالی یکی در جنوب‌شرقی و دیگری در قسمت غرب مرکزی محدوده وجود دارد. طبق گزارشات شرکت کارفرما برای برداشت، در محدوده در قسمت غرب مرکزی یک رخمون کرومیت سرپانتینی شده مشاهده شده است (شکل ۵-۶)، که با نقشه سیگنال تحلیلی برای برداشت ارتفاع ۲۰ متر منطبق است. آنومالی مشاهده شده در قسمت جنوب-شرقی نیز با توجه با رخمون‌های منطقه احتمال وجود کرومیت بالایی داشت؛ که طبق گزارشات

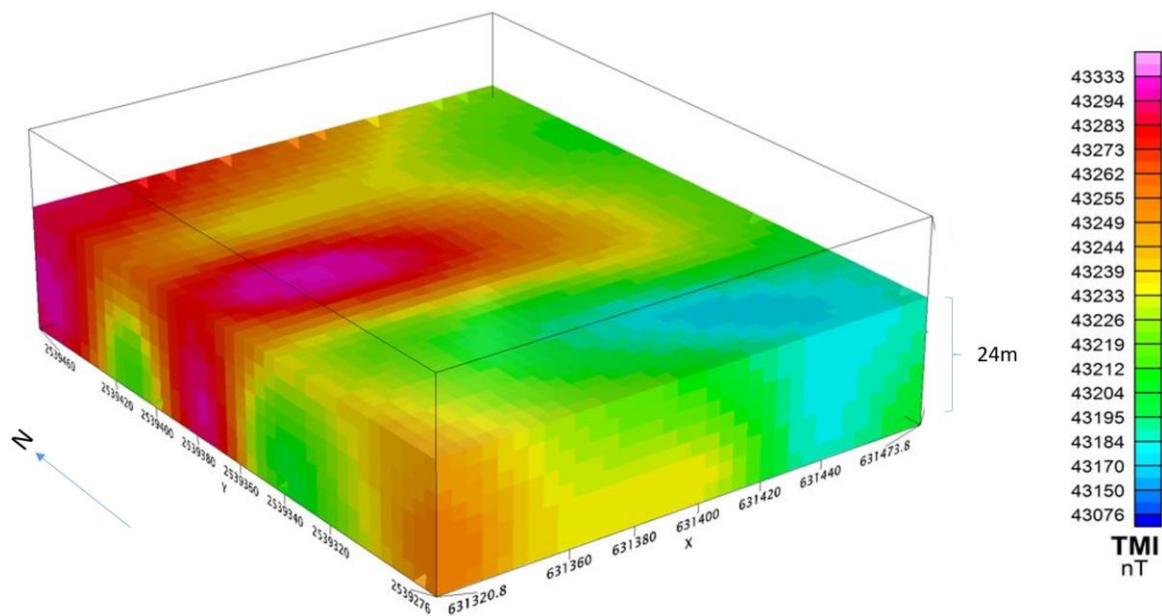
شرکت عمانی سفارش‌دهنده برداشت مغناطیسی، اخیراً در هنگام برداشت سطحی رخنمون‌های کرومیت منطقه، در این قسمت (جنوب‌شرقی)، یک توده کرومیت عدسی شکل به طول ۴۰ تا ۵۰ متر استخراج شده است.

با استفاده از 3D gridding و ابزار VOXEL در نرم افزار Oasis Montaj می‌توان نقشه شدت مغناطیسی کل را به صورت سه بعدی تولید کرد. همانطور که مشاهده شد آنومالی‌ها در نقشه میدان مغناطیسی ارتفاع ۶۰ متر مشخص نبود؛ با استفاده از نقشه سه بعدی شدت مغناطیسی کل، می‌توان ارتفاعی که آنومالی‌های سطحی در منطقه تشخیص داده می‌شوند را پیدا کرد. با درون‌یابی بین دو ارتفاع برداشت شده ۲۰ و ۶۰ متر، نقشه سه بعدی میدان مغناطیسی تشکیل می‌شود (شکل ۵-۳۰).



شکل ۵-۳۰. میدان مغناطیسی کل سه بعدی منطقه مورد مطالعه.

با توجه به نقشه سه بعدی میدان مغناطیسی کل، آنومالی در منطقه مورد مطالعه از ارتفاع ۴۴ متری از سطح زمین قابل ردیابی است؛ که در شکل ۵-۳۱ مشخص است.



شکل ۵-۳۱. میدان مغناطیسی سه بعدی منطقه. همان طور که مشاهده می شود، آنومالی از ارتفاع ۴۴ متری سطح زمین قابل ردیابی است.

فصل ۶ – نتیجه‌گیری و

پیشنهادهات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه صحار عمان، که به وسیله مغناطیس‌سنج‌های امروزی با استفاده از پهپاد در دو ارتفاع ۲۰ متر و ۶۰ متر برداشت شده است، مورد پردازش و تحلیل و تفسیر قرار گرفته است. در هنگام پردازش نتیجه شد که به جای فیلتر برگردان به قطب از فیلتر برگردان به استوا، برای این محدوده استفاده شود. چون فیلتر برگردان به استوا پاسخ بهتری با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه می‌دهد. با تولید نقشه شدت کل میدان مغناطیسی برای هر دو برداشت ارتفاع ۲۰ متر و ۶۰ متر و مقایسه این دو با هم، مشخص شد که آنومالی‌هایی که مقدار آن کم است، حتی اگر در سطح قرار داشته باشند، فقط با برداشت‌های نزدیک به سطح زمین قابل شناسایی است؛ همان‌طور که دو آنومالی در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در ارتفاع ۲۰ متر مشخص است، اما در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در ارتفاع ۶۰ متر مشخص نیست. این امر از مزایای برداشت در چند سطح است و به دلیل استفاده از پهپاد که از لحاظ هزینه و زمان مناسب است، ممکن است.

همچنین با مقایسه نقشه شدت کل مغناطیسی برای برداشت ۶۰ متر و نقشه تولید شده میدان مغناطیسی برای برداشت ۲۰ متر با اعمال فیلتر ادامه فراسو به اندازه ۴۰ متر، مشخص شد که استفاده از فیلترها، هر چند کم، باعث تولید خطا می‌شود.

نقشه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی در برداشت ارتفاع ۲۰ متر دو آنومالی را نشان می‌دهد که یکی در جنوب‌شرقی و دیگری در غرب مرکز محدوده قرار دارد که با گزارش‌های شفاهی به دست آمده از منطقه نیز انطباق دارد.

۶-۲- پیشنهادات

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، با استفاده از برداشت‌های هوایی مغناطیس در سطوح نزدیک به زمین، می‌توان منابع سطحی مغناطیسی را که آنومالی کمی را نشان می‌دهد، به راحتی

تشخیص داد؛ پیشنهاد می‌شود که با توسعه این نوع مغناطیس‌سنگ‌های نوین که ویژگی بارز آن‌ها سبک بودن و تعداد قرائت بالا در زمان کوتاه است در کشور ایران، طرح‌های اکتشافی را گسترش داد. پیشنهاد می‌شود برای بهینه‌سازی هزینه برداشت‌های هوابرد مرسوم که برای مناطق با وسعت اندک نسبتاً گران است، با توسعه پهپادهایی که اجزا آن حساسیت مغناطیسی پایینی دارند؛ هزینه برداشت‌های هوایی مغناطیسی کم شود.

پیشنهاد می‌شود با استفاده از این مجموعه سیستم مناطق بزرگ‌تری برداشت شود؛ تا معایب و مزایای این روش کامل‌تر مشخص شود.

منابع

سبلی، ا.، ۱۳۹۲، "گزارش مراحل اجرای پروژه ژئوفیزیک هوایی، مغناطیس و رادیومتری هواپرد"، کارگاه آموزشی سی و دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
نوروزی، غ.، ۱۳۸۸، "ژئوفیزیک اکتشافی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.

Abitibi Geophysics Inc. (2016). Abitibi Geophysics Webpage: www.ageophysics.com

Agocs, W. B. (1955). Line spacing effect and determination of optimum spacing illustrated by Marmora, Ontario magnetic anomaly. *Geophysics*, 20(4), 871-885.

Aina, A. (1986). Reduction to equator, reduction to pole and orthogonal reduction of magnetic profiles. *Exploration Geophysics*, 17(3), 141-145.

Ali, M., & Jahangir Khan, M. (2013). Geophysical hunt for chromite in ophiolite. *Int. J. Econ. Environ. Geol*, 4(2), 22-28.

Allen, N. R. (2002). The concept of magnetic mineral separation by particle rotation. *Physical Separation in Science and Engineering*, 11(1-2), 33-50.

Barrows, L., & Rocchio, J. E. (1990). Magnetic surveying for buried metallic objects. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 10(3), 204-211.

Billings, S., & Wright, D. (2009). Optimal total-field magnetometer configuration for near-surface applications. *The Leading Edge*, 28(5), 522-527.

Blakely, R. J. (1996). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge university press.

Burg, J.P. (2015). Oman: An Obduction Orogen. *Structural Geology and Tectonics. ETH Zürich and Universitt Zürich. Geologisches Institut Sonnegstrasse, 5, CH-8092, Zürich, Switzerland.*

Caron, R. M., Samson, C., Straznicky, P., Ferguson, S., & Sander, L. (2014). Aeromagnetic surveying using a simulated unmanned aircraft system. *Geophysical Prospecting*, 62(2), 352-363.

Clark, D. A. (1997). Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 83-104.

Coyle, M., Dumont, R., Keating, P., Kiss, F., & Miles, W. (2014). Geological Survey of Canada aeromagnetic surveys: Design, quality assurance, and data dissemination.

Cunningham, M. (2016). *Aeromagnetic surveying with unmanned aircraft systems* (Doctoral dissertation, Carleton University).

DJI. (2016). Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd. www.dji.com.

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

Eck, C., & Imbach, B. (2011). Aerial magnetic sensing with an UAV helicopter. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1).

Eppelbaum, L., & Mishne, A. (2011). *Unmanned Airborne Magnetic and VLF Investigations: Effective Geophysical Methodology for the Near Future*. *Positioning*, 2(03), 112.

GEM Systems. (2013). GSMP-35 manual v8.

GEM Systems. (2014). User Manual of LightMUX. Revised 2.1 Oct, 2014

GEM Systems. (2016). UAV Solutions Fixed-wing, Multicopter and Rotary-wing platforms featuring ultra-light Potassium Magnetometer. *Gem Systems brochure for newly developed GSM-35U. A potassium magnetometer developed for UAVs. (2016)*

Geosoft. (2015). Geosoft Oasis Montaj 8.5 Application © 2015 Geosoft Inc.

Griscom, A. (1984). Geological and Geophysical Studies of Chromite Deposits in the Josephine Peridotite, Northwestern California and Southwestern Oregon. Chapter3, A Magnetic Interpretation of the Josephine Peridotite, Del Norte County, California

Gunn, P. J. (1996). Workshop Interpretation of aeromagnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*.

Gunn, P. J., & Dentith, M. C. (1997). Magnetic responses associated with mineral deposits. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 145-158.

Hernandez-Palacios, J., Randeberg, L. L., Haug, I. J., Baarstad, I., Løke, T., & Skauli, T. Low-light hyperspectral imager for characterization of biological samples based on an sCMOS image sensor. In *Design and Quality for Biomedical Technologies IV* (Vol. 7891, p. 78910V). International Society for Optics and Photonics.

Hinze, W. J., Von Frese, R. R., Von Frese, R., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.

Horsfall, K. R. (1997). Airborne magnetic and gamma-ray data acquisition. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2), 23-30.

Klichnikov, V. A., & Segalovich, V. I. (1967). The application of geophysics to exploration for chromite and tungsten. *Mining and groundwater RESPONSE (OF MINERAL DEPOSITS 157 geophysics/1967. Department of Energy, Mines and Resources, Canada, Economic Gcology Report 26, 476–484*.

Koch, R. H., Deak, J. G., & Grinstein, G. (1999). Fundamental limits to magnetic-field sensitivity of flux-gate magnetic-field sensors. *Applied Physics Letters*, 75(24), 3862-3864.

Kospiri, A. (1999). O7-3 Case histories of the Application of Geophysical Methodes to Chromite Exploration in the Balkans.

Lin, Y., Hyypä, J., & Jaakkola, A. (2011). Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3), 426-430.

Logachev, A. A. (1946). The development and applications of airborne magnetometers in the USSR. *Geophysics*, 11(2), 135-147.

Luyendyk, A. P. J. (1997). Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 31-38.

Milligan, P. R., & Gunn, P. J. (1997). Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2), 63-75.

Parvar, K., Braun, A. (2015). Detecting Buried Metallic Objects Using UAV-mounted Magnetometer. *The winner paper in GEM systems competition on "Studies in Magnetic Methods Contest", Canada, 2015.*

Parvar, K., Braun, A., Burns, M. (2015). UAV magnetometry in Mineral Exploration and Infrastructure Detection. *A poster presented at American Geophysical Union (AGU) fall meeting, San Francisco, 2015.*

Parvar, K. (2016). *Development and evaluation of unmanned aerial vehicle (UAV) magnetometry systems* (Doctoral dissertation).

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

Pioneer Exploration.(2016).Pioneer Exploration Consultant Ltd., *Michael Burns* (2016)

Rais, A., Yousif, A. A., Worthing, M. A., & Al-Alawi, Z. (1997). Magnetic susceptibilities of chromites from Oman. *Mineralogical Magazine*, 61(5), 726-728.

Reeves, C. V., & Bullock, S. J. (2006). Airborne exploration, Fugro Airborne Surveys Limited (in press). *Logy & Geophysics*, 17(2), 145-158.

Ripka, P. (1992). Review of fluxgate sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 33(3), 129-141.

Ripka, P. (2003). Advances in fluxgate sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 106(1-3), 8-14.

Rystrom, V. L., Finn, C., & Deszcz-Pan, M. (2000). *High Resolution, Low Altitude Aeromagnetic and Electromagnetic Survey of Mt Rainier* (No. 2000-27). Geological Survey (US).

Salem, A., Ushijima, K., Gamey, T. J., & Ravat, D. (2001). Automatic detection of UXO from airborne magnetic data using a neural network. *Subsurface sensing technologies and applications*, 2(3), 191-213.

Samson, C., Straznicky, P., Laliberté, J., Caron, R., Ferguson, S., & Archer, R. (2010). Designing and building an unmanned aircraft system for aeromagnetic surveying. In *SEG*

Technical Program Expanded Abstracts 2010 (pp. 1167-1171). Society of Exploration Geophysicists.

Schmidt, P. W., & Clark, D. A. (2006). The magnetic gradient tensor: Its properties and uses in source characterization. *The Leading Edge*, 25(1), 75-78.

Schultz, J. J. (2012). *Detecting Buried Firearms Using Multiple Geophysical Technologies*. BiblioGov.

Searle, M., & Cox, J. (1999). Tectonic setting, origin, and obduction of the Oman ophiolite. *Geological Society of America Bulletin*, 111(1), 104-122.

Shayestehfar, M. R., Mohammadi, M., Rezaei, A., & Ranjbar, H. (2013). Chromite Exploration by Using the Airborne Magnetic Data Analysis of Abdasht, Esphandeghe, Kerman Province. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*.

Siebert, S., & Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, 41, 1-14.

Sterligov, B., & Cherkasov, S. (2016). Reducing magnetic noise of an unmanned aerial vehicle for high-quality magnetic surveys. *International Journal of Geophysics*, 2016.

Stoll, J., & Moritz, D. (2013, June). Unmanned aircraft systems for rapid near surface geophysical measurements. In *75th EAGE Conference & Exhibition-Workshops*.

Tarlowksi, C., Gunn, P. J., & Mackey, T. (1997). Enhancements of the magnetic map of Australia. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 77-82.

Transport Canada. (2016). Flight regulations for flying a drone for work or research. *Government of Canada*. <http://www.tc.gc.ca/eng/civilaviation/standards/standards4179.html>

Winckler, J. R. (1960). Balloon study of high-altitude radiations during the International Geophysical Year. *Journal of Geophysical Research*, 65(5), 1331-1359.

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

Abstract

One of the most efficient methods in mineral exploration is airborne geophysics (which includes most of magnetic methods, electromagnetics and radiometry). In this method vast amounts of area could be surveyed in less time compared to other geophysical methods. Nowadays Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) play a major role in mineral exploration, creating geological and topographical maps, and also identifying subsurface structures with more accuracy.

Processing and interpretation of data acquired via magnetometers and noise elimination are major stages in mineral exploration. The goal of this thesis includes processing and interpretation of data acquired through the newest generation of magnetometers attached to UAVs.

Magnetometric data used in this study have been acquired in the Sohar region of Oman. The processing stage has been done using the Oasis Montaj software. Data was acquired in two altitudes of 20 and 60 meters, in order to explore potential chromite. It should be noted that these acquisitions were carried out in order to validate the use of UAVs in mineral exploration and it is for this reason that the area of interest is on a smaller scale. The processing of data for each altitude has been carried out separately in five stages which are as follows: diurnal correction, eliminating adverse effects of magnetic anomaly displacement, heading, IGRF correction and at last, leveling. After the processing stage of the two surveying altitudes (20 and 60 meters) and producing the potential maps, the results showed that the anomalies detected at 20 meters, were not detected at the 60 meter range, and also by comparing the output results of the 60 meter range with the data of the 20 meter altitude, which an upward continuation filter of 40 meters was applied upon, it was shown that the upward continuation filter is accompanied by a small error.

Keywords: airborne magnetometry, UAVs, Oman, Sohar



Shahrood University
of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
M.Sc. Thesis in Mineral Exploration

High Resolution Aeromagnetic Data Processing And Interpretation, A Case Study: Suhar Area, Oman

By: Mohammad Niknezhad Golafzani

Supervisors:

Dr. Alireza ArabAmiri

Dr. Ali Nejati Kalateh

September 2018