



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مهندسی نفت و ژئوفیزیک

رشته ژئوفیزیک - گرانی سنجی

پایان نامه کارشناسی ارشد

آشکارسازی ساختارهای زیر سطحی در محوطه باستانی تپه حصار دامغان با استفاده از داده‌های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی

بهزاد سرلک

اساتید راهنما:

دکتر حمید آقاجانی ، دکتر علی نجاتی کلاته

شهریورماه ۱۳۹۴



خداوندا

آرامشی عطا فرما

تا بپذیرم آنچه را که نمی توانم تغییر دهم

و

شهامتی که تغییر دهم آنچه را که می توانم

و

دانشی که تفاوت این دو را بدانم...

..آمین..

..خلیل جبران..

تقدیم بہ

پدرم و مادرم

سیہ سار زندگیںم از کو دکی تا امروز

و دیگر عزیزانی کہ دلسوزانہ و صبورانہ حمایت کردند و برخطایم چشم پوشیدند.

...پاس...



ز خاکیم باید شدن سوی خاک همه جای ترس است و تیار و باک

جهان سربه سر حرکت و عبرت است چرا بهره ما بهره غفلت است؟

تقدیر و شکر

شایسته است از زحمات کلیه کسانی که در به ثمر رساندن این مجموعه مروری نمودن شکر نمایم. از اساتید راهنمای پایان نامه، آقای دکتر حمید آقاجانی و همچنین دکتر علی نجفی کلاته که در طول دوره کارشناسی ارشدیاری رسان من بوده اند، پاسکزارم. از بهکاری و حمایت بی دریغ اداره میراث فرهنگی شهرستان دامغان و همچنین از کلیه معلمان و اساتیدی که از دبستان تا کنون دلسوزانه به من علم و دانش آموختند، شکر می کنم.

بر خود لازم می دانم شکر می ویژه از دوستان عزیزم؛ آقایان حمید باغزندانی، ابراهیم میرکالی، سید حسین موسوی، علی صیادی، ایمان خانگی، وحید جعفرزاده، فرزاد غلامیان، ناصر فارسی و جزء طالبی و خانم ها کزل شیدایی و مهین محمدزاده که هر کونه کلی در عملیات صحرائی برداشت داده ها، پردازش، تفسیر و هم فکری در این اثر مروری رسانند، صمیمانه پاسکزاری نمایم.

بنزاد سرلک - شهریور ۹۴

تعهدنامه

اینجانب بهزاد سرلک دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی ژئوفیزیک گرایش گرانی سنجی دانشکده‌ی مهندسی نفت، معدن، ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی آشکار سازی ساختارهای زیر سطحی در محوطه باستانی تپه حصار دامغان با استفاده از داده‌های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی تحت راهنمایی دکتر حمید آقاجانی و 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 شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنام‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه 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.

چکیده:

جستجو و کاوش در آثار به جای مانده از گذشتگان نقش مهمی در شناسایی تاریخ و هویت یک سرزمین دارد. پیشرفت دانش بشری سبب ارائه روش‌های نوینی شده که با استفاده از آن‌ها بدون نیاز به حفاری و یا تخریب آثار باستانی می‌توان به اطلاعات مفیدی دست یافت. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مانند گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در کاوش‌های باستان‌شناسی به‌منظور تعیین مرز بی‌هنجاری، قبل از انجام حفاری سودمند است. در روش گرانی‌سنجی تباین چگالی بین دیواره‌ها و اتاقک‌ها و یا گورها با محیط اطرافش مورد بررسی قرار می‌گیرد. به کمک روش مغناطیس‌سنجی نیز در یک محوطه باستانی، تباین خودپذیری مغناطیسی بین محیط پیرامون و اقلام فلزی، مصالح ساختمانی و حفره‌های پر شده با مواد مغناطیده متفاوت بررسی می‌شود. هدف این تحقیق شناسایی ساختارهای زیرسطحی در محوطه باستانی تپه حصار دامغان با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی است. برای این منظور در یک شبکه منظم مربع-مستطیلی به تعداد حدود ۶۰۰ ایستگاه گرانی و ۱۲۰۰ نقطه مغناطیس اندازه‌گیری شد. پس از انجام تصحیحات و پردازش لازم روی داده‌های اندازه‌گیری شده، نقشه آنومالی‌های گرانی و مغناطیس ترسیم شد.

برای بررسی و تفسیر داده‌های برداشت شده از فیلترهای فازی محلی استفاده شد. برای بررسی قابلیت هر فیلتر بر روی داده‌ها، در محیط نرم افزار Potent مدل مصنوعی متشکل از دیواره‌ها و اتاقک‌ها براساس ویژگی‌های موجود در محدوده تپه حصار، ساخته و اثر گرانی و مغناطیس آن محاسبه شد. سپس فیلترهای فازی محلی زاویه تمایل، نقشه تتا، لاپلاسن، تانژانت هایپربولیک و دو فیلتر جدید به نام‌های نسبت مشتق بهنجار و زاویه بهنجار نسبت بر مشتق قائم روی این داده‌ها اعمال شد و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس از این فیلترها برای تفسیر و آشکارسازی لبه بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیس تپه حصار استفاده شد. با کاربرد این فیلترها روی داده‌های واقعی، موقعیت دیواره‌ها و اتاقک‌های باستانی برآورد و شناسایی گردید. نتایج به دست آمده از عملکرد فیلترها نشان می‌دهد که با نتایج حفاری‌های دهه‌های گذشته منطبق است، یعنی ساختارهای زیرسطحی موجود در محدوده مانند کوچه، دیواره‌ها و یا خانه‌ها، نتایج حاصل از روش گرانی-سنجی و مغناطیس‌سنجی را تایید می‌کند. با توجه به اینکه کاوش‌های باستانی با حفاری محدوده‌های مورد

نظر بررسی می‌شود، بنابراین با استفاده از نتایج بررسی‌های غیرمستقیم ژئوفیزیکی می‌توان یک طرح کلی برای کاوش تهیه کرد که علاوه بر هدفمند نمودن عملیات حفاری، در هزینه‌های اضافی نیز صرفه جویی کرده و سبب جلوگیری از تخریب آثار قدیمی شود.

کلمات کلیدی: گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، محوطه باستانی تپه‌حصار، باستان‌شناسی، آشکارسازی لبه، فیلترهای فاز محلی، فیلتر نسبت مشتق بهنجار، فیلتر زاویه بهنجار بر مشتق قائم.

مقالات مستخرج از پایان نامه:

مقاله کنفرانسی:

سرلک، ب.، باغزدانی، ح.، آقاجانی، ح.، نجاتی، ع.، (۱۳۹۳) " تعیین مرز حفره ها و دیواره های باستانی با استفاده از داده های میدان پتانسیل - تپه حصار دامغان "، کنفرانس علوم معدنی مازندران.

مقالات علمی و پژوهشی:

سرلک، ب.، آقاجانی، ح.، نجاتی، ع.، (۱۳۹۴) " تفسیر داده های گرانی جهت تعیین ساختارهای زیرسطحی باستانی در تپه حصار دامغان "، مجله فیزیک زمین و فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (در دست داوری).

سرلک، ب.، آقاجانی، ح.، نجاتی، ع.، (۱۳۹۴) " تفسیر داده های مغناطیس سنجی جهت تعیین ساختارهای زیرسطحی باستانی در تپه حصار دامغان "، پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دانشگاه شاهرود (در دست داوری).

سرلک، ب.، آقاجانی، ح.، نجاتی، ع.، (۱۳۹۴) " کاوش های باستانی در تپه حصار دامغان با استفاده از روش های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی "، پژوهش های باستان شناسی ایران، دانشگاه همدان (در دست داوری).

فهرست مطالب

۱- فصل اول	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- سابقه و ضرورت تحقیق	۴
۳-۱- فرضها و سؤالات تحقیق	۷
۴-۱- روش تحقیق	۸
۵-۱- ساختار پایان نامه	۸
۲- فصل دوم	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۲
۲-۲- روش گرانی سنجی	۱۳
۱-۲-۲- مفاهیم اساسی	۱۳
۲-۲-۲- تغییرات جاذبه در سطح زمین	۱۴
۳-۲-۲- مراحل بکارگیری روش گرانی سنجی در اکتشافات ژئوفیزیکی	۱۶
۳-۲- مغناطیس سنجی	۲۰
۱-۳-۲- مفاهیم اساسی	۲۰
۲-۳-۲- میدان مغناطیسی زمین	۲۳
۳-۳-۲- مغناطیس سنگها و کانیها	۲۴
۴-۳-۲- حلقه‌ی پسماند (هیستریس)	۲۵
۵-۳-۲- انواع مغناطیدگی بازماند	۲۶

- ۲۸.....۲-۳-۶- مغناطیدگی در باستان‌شناسی
- ۳۰.....۲-۳-۷- منبع نوفه در مغناطیس‌سنجی باستانی
- ۳۱.....۲-۳-۸- نوع آنومالی مغناطیسی در مغناطیس‌سنجی باستانی
- ۳۳.....۲-۳-۹- مگنتومتر نوع پروتون
- ۳۳.....۲-۴- جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده
- ۳۴.....۲-۵- فیلترهای فاز محلی
- ۳۵.....۲-۵-۱- مشتقات افقی و قائم
- ۳۶.....۲-۵-۲- مجموع مشتق افقی
- ۳۷.....۲-۵-۳- زاویه تیلت
- ۳۷.....۲-۵-۴- مجموع مشتق افقی زاویه تیلت
- ۳۸.....۲-۵-۵- تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت
- ۳۸.....۲-۵-۶- نسبت مشتق متعامد
- ۳۹.....۲-۵-۷- زاویه تتا
- ۴۰.....۲-۵-۸- اختلاف استاندارد بهنجار
- ۴۰.....۲-۵-۹- فیلتر پردازش تصویری لاپلاس
- ۴۱.....۲-۵-۱۰- نسبت مشتق بهنجار و زاویه بهنجار بر مشتق قائم
- ۴۳.....۳- فصل سوم
- ۴۴.....۳-۱- مقدمه
- ۴۴.....۳-۲- تعریف ساختار مدل مصنوعی
- ۴۶.....۳-۲-۱- داده‌ی مصنوعی گرانی حاصل از مدل مصنوعی
- ۴۶.....۳-۲-۲- داده‌ی مصنوعی مغناطیسی حاصل از مدل مصنوعی

- ۳-۳-۳- اعمال فیلترها روی داده‌های مصنوعی ۴۷
- ۳-۳-۳-۱- مشتقات افقی و قائم ۴۷
- ۳-۳-۳-۲- مجموع مشتق افقی ۴۹
- ۳-۳-۳-۳- زاویه تیلت ۵۰
- ۳-۳-۳-۴- مجموع مشتق افقی زاویه تیلت ۵۱
- ۳-۳-۳-۵- تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت ۵۲
- ۳-۳-۳-۶- نسبت مشتق متعامد ۵۳
- ۳-۳-۳-۷- زاویه تتا ۵۴
- ۳-۳-۳-۸- اختلاف استاندارد بهنجار ۵۵
- ۳-۳-۳-۹- لاپلاس ۵۶
- ۳-۳-۳-۱۰- نسبت مشتق بهنجار و زاویه بهنجار بر مشتق قائم ۵۷
- ۳-۴-۴- جمع‌بندی مطالب ۵۹
- ۴- فصل چهارم ۶۱
- ۴-۱- مقدمه ۶۲
- ۴-۲- محوطه‌ی باستانی تپه‌حصار ۶۲
- ۴-۳- انتخاب روش ژئوفیزیکی و طراحی شبکه برداشت ۶۵
- ۴-۳-۱- هدف‌گذاری ۶۵
- ۴-۳-۲- طراحی شبکه برداشت ۶۵
- ۴-۳-۳- طراحی شبکه برداشت در محدوده مورد مطالعه ۶۶
- ۴-۴- برداشت صحرائی ۶۸
- ۴-۴-۱- برداشت داده‌های گرانی‌سنجی ۶۸

- ۷۰-۴-۲- برداشت داده‌های مغناطیسی ۷۰
- ۷۱-۴-۵- تصحیح داده‌های گرانی‌سنجی ۷۱
- ۷۱-۴-۵-۱- تصحیح رانه‌ی دستگاه ۷۱
- ۷۲-۴-۵-۲- تصحیح عرض جغرافیایی ۷۲
- ۷۲-۴-۵-۳- تصحیح ارتفاعی (هوای آزاد و بوگه) ۷۲
- ۷۳-۴-۵-۴- تصحیح توپوگرافی ۷۳
- ۷۵-۴-۶- تصحیح داده‌های مغناطیسی ۷۵
- ۷۵-۴-۶-۱- تصحیح روزانه ۷۵
- ۷۶-۴-۶-۲- تصحیح IGRF ۷۶
- ۷۹-۴-۷- تفکیک آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی محوطه تپه‌حصار ۷۹
- ۸۱-۴-۹- پردازش داده‌های تپه‌حصار به‌وسیله‌ی فیلترهای فازی محلی ۸۱
- ۸۱-۴-۹-۱- مشتق افقی مرتبه نیم ۸۱
- ۸۱-۴-۹-۲- نقشه‌ی فیلتر زاویه تیلت و تانژانت هایپربولیک آن ۸۱
- ۸۳-۴-۹-۳- نقشه‌ی زاویه تتا ۸۳
- ۸۳-۴-۹-۴- نقشه‌ی فیلتر نسبت مشتق بهنجار و زاویه بهنجار بر مشتق قائم ۸۳
- ۸۵-۴-۱۰- تفسیر داده‌ها در محدوده مورد مطالعه ۸۵
- ۹۵-۵- فصل پنجم ۹۵
- ۹۶-۵-۱- مقدمه ۹۶
- ۹۶-۵-۲- جمع‌بندی مطالب پایان‌نامه ۹۶
- ۹۸-۵-۳- پیشنهادها ۹۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: دستگاه گرانی‌سنج CG5 ۱۷
- شکل ۲-۲: فلوجارت تصحیح مقادیر گرانی مشاهده‌ای ۱۸
- شکل ۳-۲: صفت‌بندی حوزهای مغناطیسی در انواع فرومغناطیسی ۲۵
- شکل ۴-۲: حلقه‌ی پسماند ۲۶
- شکل ۵-۲: باکتری مغناطیسی با بلورهای از رشته‌های مغناطیسی ۳۰
- شکل ۶-۲: حفر یک گودال در دولایه با خودپذیری متفاوت ۳۲
- شکل ۷-۲: مگنتومتر پردازش پروتون ۳۳
- شکل ۸-۲: انواع فیلتر لاپلاس ۴۱
- شکل ۱-۳: مدل مصنوعی ۴۵
- شکل ۲-۳: آنومالی گرانی مصنوعی بوگه کامل مدل مصنوعی ۴۶
- شکل ۳-۳: نقشه تبدیل به قطب آنومالی مغناطیسی شدت میدان کل مدل مصنوعی ۴۷
- شکل ۴-۳: نقشه مشتق افقی مرتبه نیم مشتق قائم مرتبه اول آنومالی گرانی مدل مصنوعی ۴۸
- شکل ۵-۳: نقشه مشتق افقی مرتبه نیم مشتق قائم مرتبه اول آنومالی مغناطیسی مدل مصنوعی ۴۸
- شکل ۶-۳: نقشه مشتق قائم دوم داده‌های مصنوعی گرانی و مغناطیسی ۴۹
- شکل ۷-۳: نقشه فیلتر TDX روی داده‌های مصنوعی ۵۰
- شکل ۸-۳: نقشه فیلتر زاویه تیلر روی داده‌های مصنوعی ۵۱
- شکل ۹-۳: نقشه فیلتر HDR روی داده‌های مصنوعی ۵۲
- شکل ۱۰-۳: نقشه تانژانت هایپربولیک روی داده‌های مصنوعی ۵۳
- شکل ۱۱-۳: نقشه فیلتر نسبت مشتق روی داده‌های مصنوعی ۵۴
- شکل ۱۲-۳: نقشه فیلتر زاویه تتا روی داده‌های مصنوعی ۵۵
- شکل ۱۳-۳: نقشه فیلتر NSTD روی داده‌های مصنوعی ۵۶

- شکل ۳-۱۴: نقشه فیلتر لاپلاس ۴ روی داده‌های مصنوعی ۵۷
- شکل ۳-۱۵: نقشه فیلتر NDR روی داده‌های مصنوعی ۵۸
- شکل ۳-۱۶: نقشه فیلتر NAVD روی داده‌های مصنوعی ۵۹
- شکل ۴-۱: نقشه هوایی دامغان و محوطه تپه حصار ۶۲
- شکل ۴-۲: نقشه توپوگرافی محوطه تپه حصار ۶۳
- شکل ۴-۳: تابلوی ورودی محوطه تپه حصار ۶۴
- شکل ۴-۴: ترانسه حفاری شده درون محوطه برداشت ۶۴
- شکل ۴-۵: طراحی شبکه برداشت ۶۷
- شکل ۴-۶: نمای کلی از محوطه برداشت ۶۷
- شکل ۴-۷: نقاط ایستگاههای برداشت گرانی و ایستگاههای توپوگرافی ۶۹
- شکل ۴-۸: نقشه زون نزدیک و زون دور منطقه ۷۳
- شکل ۴-۹: نقشه آنومالی بوگه کامل محوطه برداشت ۷۵
- شکل ۴-۱۰: نقشه آنومالی مغناطیسی به دست آمده از داده‌های تپه حصار ۷۸
- شکل ۴-۱۱: نقشه آنومالی مغناطیسی تبدیل به قطب داده‌های تپه حصار ۷۸
- شکل ۴-۱۲: نقشه روند سطحی مرتبه ۷ از آنومالی گرانی داده‌های تپه حصار ۸۰
- شکل ۴-۱۳: نقشه روند سطحی مرتبه ۶ از آنومالی مغناطیسی داده‌های تپه حصار ۸۰
- شکل ۴-۱۴: نقشه مشتق افقی مرتبه نیم روی داده‌های تپه حصار ۸۱
- شکل ۴-۱۵: نقشه زاویه تیلت و تیلت هایپربولیک داده‌های تپه حصار ۸۲
- شکل ۴-۱۶: نقشه زاویه تتای داده‌های تپه حصار ۸۳
- شکل ۴-۱۷: نقشه فیلترهای NDR و NAVD داده‌های تپه حصار ۸۴
- شکل ۴-۱۸: نقشه‌های آنومالی گرانی باقیمانده مرتبه هفت و زاویه تیلت و زاویه تتا و فیلتر NDR داده‌های گرانی تپه حصار ۸۶

- شکل ۴-۱۹: نقشه‌های تبدیل به قطب آنومالی مغناطیسی و آنومالی مغناطیسی باقیمانده مرتبه شش و زاویه تیلت و نقشه زاویه تتا داده‌های مغناطیسی تپه‌حصار..... ۸۸
- شکل ۴-۲۰: نقشه زاویه تیلت محدوده ترانشه حفر شده و عکس از همان محدوده. ۸۹
- شکل ۴-۲۱: تصویری از کاوش در محدوده حفاری شده و پلان معماری همان محدوده..... ۹۰
- شکل ۴-۲۲: ارتباط حفاری‌های محوطه تپه‌حصار با نتایج به دست آمده از روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی. ۹۲
- شکل ۴-۲۳: نقشه فیلتر NAVD..... ۹۳
- شکل ۴-۲۵: پلان معماری بدست آمده از نقشه فیلتر NAVD داده‌های گرانی ۹۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مشخصات دستگاه گرانی سنج CG5..... ۱۷
- جدول ۱-۴: جدول انتقال گرانی مطلق..... ۷۰
- جدول ۲-۴: نمونه‌ای از داده‌های گرانی برداشت‌شده در روز چهارم- درون گمانه حفاری..... ۷۰
- جدول ۳-۴: بخشی از عملیات تصحیح داده‌ها گرانی محوطه برداشت در محیط اکسل..... ۷۴

فصل اول

کلیات پایان نامه

۱-۱- مقدمه

باستان‌شناسی به معنی جستجو و کاوش در تاریخ، آیین و رسوم نیاکان است و از نظر جامعه‌شناسی، گردشگری، اقتصادی و حتی از نظر سیاسی دارای اهمیت بسیار است. باستان‌شناسی مانند همه علوم پویا و تکامل پذیر است. تحولاتی که از آغاز قرن بیستم تاکنون در جمع‌آوری و پردازش داده‌ها در پژوهش‌های باستان‌شناسی به وجود آمده‌است، به یافتن روش‌های جدید تجزیه و تحلیل داده‌ها با توجه به تفاوت در شکل ظاهری، کاربرد، تزئینات، نوع فناوری و مواد تشکیل دهنده یافته‌ها منجر شده‌است. باستان‌شناسی به دنبال شواهد مورد نیاز برای ترسیم دوباره ساختار سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی جوامع مختلف است. باستان‌شناسان با تعیین محدوده زمانی پیشرفتهای فرهنگی و فناوری در مکانی مشخص و نیز تعیین محدوده زمانی این پیشرفتها در مناطق مختلف، به بررسی فرایند نفوذ و تأثیر پیشرفت‌های علمی و فرهنگی جوامع مرتبط با یکدیگر و نیز شناخت چگونگی تحولات همزمان در این جوامع می‌پردازد. علاوه بر حفاری، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و سنجش از دور^۱ (RS) در باستان‌شناسی می‌تواند به منظور دستیابی به اطلاعات قبل از حفاری و تعیین حریم محوطه‌های باستانی استفاده شود.

روش‌های ژئوفیزیکی، قابلیت زیادی در اکتشافات ساختارها و مواد مدفون زیرزمینی (مانند اهداف باستانی) دارند و هر یک به‌نوبه خود کاربرد خاص خود را دارند. در این میان، دو روش گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در مطالعه اهداف اکتشافی باستانی دارای کارایی بالایی هستند. روش گرانی‌سنجی بر مبنای اختلاف چگالی توده‌ی مورد مطالعه و محیط دربرگیرنده آن استوار است و به‌منظور تعیین و تخمین چگالی، عمق دفن، شکل و تعیین حفرات زیرزمینی بکار می‌رود. میکروگرانی به‌واسطه‌ی فاصله برداشت کم آن به مطالعه آثار سطحی و کم‌عمق می‌پردازد. همچنین روش مغناطیس‌سنجی که بر پایه اختلاف مغناطیدگی توده‌های زیرزمینی بنیان شده است؛ می‌تواند اجرام و توده‌های مغناطیده را در یک

^۱Remote sensing

محیط آشکار کند که بر پایه اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی کل زمین بر روی پروفیل‌های مشخص انجام می‌شود [Telford et al., 1990].

در هر پیمایش ژئوفیزیکی سعی می‌شود که اهداف زیرسطحی مشخص شود؛ اما این مسئله بسیار حائز اهمیت است که قدم اول پیمایش، صحیح برداشته شود. انتخاب روش ژئوفیزیکی مناسب باید با یک برنامه‌ریزی دقیق برداشت و اجرای صحیح آن‌ها دنبال شود؛ تا بتوان به یک کاوش نیرومند که مؤثر دست یابد. به‌طور کلی موارد زیر باعث نتایج ضعیف و نامناسب در مطالعات ژئوفیزیکی می‌شوند:

- برنامه‌ریزی نادرست یا برداشت‌های ناکافی در یک مطالعه
- انتخاب نادرست و خصوصیات نامناسب روش و تجربه ناکافی افرادی که برداشت و تفسیر را انجام می‌دهند.

- هر برداشت ژئوفیزیکی باید بر اساس راهکار مناسبی برنامه‌ریزی شود. در غیر این صورت تبدیل به مجموعه آشفته‌ای خواهد شد. تعداد زیاد داده‌ها لزوماً تضمین‌کننده موفقیت مطالعه نیست؛ بلکه باید به تعداد کافی و در نقاط مناسب این داده‌ها برداشت شوند.

یک استراتژی نه‌چندان مناسب آن است که تعدادی از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی انتخاب گردد و برای منطقه مورد مطالعه آزمایش شود؛ تا روشی که نتیجه بهتری ارائه می‌دهد انتخاب شود. این راهکار کاملاً علمی ولی پرهزینه است. با بهره‌گیری از مطالعات قبلی در موارد مشابه، اطلاعات موجود در خصوص منطقه به درک استراتژی صحیح‌تر و هزینه کم‌تر کمک قابل توجهی می‌کند [نوروزی، ۱۳۸۸].

هدف از انجام این پایان‌نامه، آشکارسازی ساختارهای باستانی به‌وسیله‌ی پردازش داده‌های گرانی-سنجی و مغناطیس‌سنجی با بکارگیری فیلترهای مختلف است. به این منظور بخشی از محوطه باستانی تپه‌حصار دامغان مورد مطالعه گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی قرار گرفته است.

۱-۲- سابقه و ضرورت تحقیق

در کاوش‌های باستان‌شناسی معمولاً دو هدف اصلی مدنظر است. یکی از این اهداف شناسایی و کشف ساختارهای دست بشری در دوره‌های تاریخی مختلف است؛ که بیانگر تاریخ سازه‌ها است. دیگری شناسایی مود و منابع موجود در این ساختارها است که جهت مطالعات بعدی مفید است؛ لذا آنچه اهمیت کاوش در این زمینه را دوچندان می‌کند، عدم بهم‌ریختگی و تخریب این مواد و منابع است. به همین دلیل استفاده از روش‌هایی ژئوفیزیکی که کمتر این ساختارها را تحت تاثیر قرار دهند از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین استفاده از روش میکروگرانی برای آشکارسازی آنومالی‌های کم‌عمق در یک سایت باستان‌شناسی سودمند هست. آنومالی گرانی به دست آمده پس از برداشت داده‌ها و حذف عوامل مزاحم به‌عنوان آنومالی بوگه کامل خوانده می‌شود.

تصحیحات لازم روی داده‌ها از جمله دریافت، تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه، تصحیح توپوگرافی محاسبات مربوط به انتقال نقطه مبنا و تعیین مقادیر گرانی مطلق نقاط برداشت به‌منظور دستیابی به آنومالی بوگه کامل لازم هست [Telford et al., 1990]. آنومالی بوگه کامل حاصل در یک سایت باستانی می‌تواند ناشی از دیوارها با چگالی بیشتر و حفرات و اتاقک‌هایی باشد که توده جرمی آن چگالی کمتری داشته باشد. افزون بر آن می‌توان اجرام با تباین چگالی زیاد مثلاً آرامگاه‌های مدفون را نیز در صورت وجود آشکار نمود.

تاریخچه کاربرد گرانی (میکروگرانی) در سایت‌های باستانی به کار لینینگتون برمی‌گردد [Linnington, 1966]. تلاش او برای اکتشاف آرامگاه‌های حجره‌دار اتروسکن^۱ در ایتالیا خیلی موفق نبود. هرچند بعد از آن کارهای موفق در اکتشاف سرداب‌ها، دهلیزها و تونل‌های باستانی صورت گرفته است، تا کاربردهای میکروگرانی در باستان‌شناسی چشم‌انداز خوبی از این روش ارائه دهد. استفاده از تبدیل مشتق دوم بر روی داده‌های گرانی برداشت شده از روی دالان‌های زیرزمینی سبب تحول اساسی

^۱Etruscan

در پی جویی شد [Fajklewicz, 1976]. اسلپاک نیز با استفاده از آنومالی باقی مانده گرانی که بین ۳۰-۸۰ میکروگال متغیر بوده است، بازمانده‌های مدفون یک ساختمان قدیمی در کازان روسیه را شناسایی کرده است [Slepak, 1999]. همچنین با استفاده از آنومالی‌های میکروگرانی برای شناسایی دیواره‌های کلیسای بیزانس در اردن استفاده شد که مقادیر باقیمانده بین ۱۵-۲۰ میکروگال را نشان داد [Batayneh et al., 2007]. پانیسوا^۱ و پاستکا با استفاده از روش گرادیان قائم روی داده‌های میکروگراوبیتی در داخل کلیسای قدیمی نیکلاس^۱ در شهر پیوکانچ^۲ کشور اسلواکی پرداختند. به این ترتیب آن‌ها توانستند با آشکارسازی ساختارهای زیرین وضعیت زیرسطحی این بنا را توصیف و حفره‌ای در یک متری زیر سطح آن شناسایی نمایند [Pánisová & Pašteka, 2009]. در سال ۲۰۱۰ کاستلو و همکاران حفره‌های زیرسطحی در محیط‌های شهری ناپل را به روش گرانی بررسی کردند [Castiello et al., 2010].

آنومالی مغناطیسی نشان‌دهنده‌ی خصوصیات مغناطیسی توده‌ها و اجسام مورد مطالعه است. که این عامل در بررسی‌های مغناطیسی در مناطق باستانی با تغییر مقدار مغناطیدگی در محیط همراه است که ناشی از این موارد است: نخست اینکه این تغییر در اثر وجود فعالیت‌های بشری مثل اجسام فلزی مصنوعی و همچنین مصالح ساختمانی در یک محوطه باستانی می‌تواند متفاوت باشد. افزون بر آن به دلایل طبیعی نیز این اتفاق صورت می‌گیرد. به عنوان نمونه خاک سطحی در مقایسه با خاکی که در عمق بیشتری قرار دارد، از مغناطیدگی بیشتری برخوردار است؛ لذا جابجایی خاک موجود در گورها و اتاقک‌های یک محوطه باستانی باعث آشفتگی در مغناطیدگی منطقه می‌شود. این موضوع به دلیل افزایش ترکیبات آهن‌دار، به‌ویژه اثرات اکسید شدگی فلزات و اثرات دوره‌ای مرطوب و خشک شدن خاک است. همچنین اثرات آتش (گرما) بر روی خاک به‌طور چشم‌گیری باعث افزایش مغناطیدگی

^۱Nicolas

^۲Pukanec

می‌شود. هنگامی که ماده آلی در ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در خاک می‌سوزد، شرایطی را فراهم می‌نماید که در این شرایط هماتیت می‌تواند به مگنتیت تبدیل شود [Clark et al., 1990].

تحقیقات و پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در حیطه باستان‌شناسی روش‌های ژئوفیزیکی را می‌توان در شناسایی موارد زیر بکار برد [علیتاجر، ۱۳۹۲]:

- تشخیص پلان بناهای مدفون، بقایای پی‌ها، دیوارها و تعیین جنس مواد سازنده آن‌ها (خشت، آجر و سنگ)، تعیین راهروها، سنگ‌فرش‌ها و آجرفرش‌ها.

- تعیین محل آرامگاه‌ها، پل‌ها و خندق‌ها.

- تعیین محل و ابعاد معادن باستانی و تعیین محل کوره‌های مدفون مربوط به ذوب فلزات.

- تعیین محل کوره‌های مدفون در مناطق مسکونی برای پخت سفال، بقایای ظروف و اشیای سفالی.

- تعیین محل ضخامت خاک‌های سوخته لایه‌های خاکستر و خاک‌های دست‌خورده توسط بشر.

شایان‌ذکر است که در استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، محدودیت‌هایی نظیر وجود آلودگی‌های آهنی در خاک، کابل‌های برق و فنس‌کشی‌های موجود در منطقه، توسعه اراضی کشاورزی، مواد صنعتی، رشد زندگی شهرنشینی و ارتباطات وجود دارد؛ که سبب ایجاد نویزهایی در داده‌های تولیدی در برخی از روش‌های ژئوفیزیکی می‌شود [علیتاجر، ۱۳۹۲].

سابقه استفاده از مغناطیس‌سنجی در باستان‌شناسی به دهه ۵۰ و ۶۰ میلادی برمی‌گردد؛ که به‌عنوان نمونه می‌توان به کار آیتکن [Aitken, 1958] اشاره کرد. با تکامل مغناطیس‌سنج‌ها این فرآیند سرعت بیشتری یافت، به‌گونه‌ای که در مدت‌زمان کمتری، کاوش مساحت بیشتری از یک سایت ممکن گشته است [Allred, 1964]. همچنین تیت و مولینز (۱۹۷۱) نشان دادند که روش مغناطیس‌سنجی قابلیت شناسایی آثار پیشینه معماری زیرزمینی را دارد [Tite & Mullins, 1971]. در دو دهه اخیر به‌واسطه‌ی تکامل فیلترها، روش‌های پردازشی و امکان متعادل‌سازی آنومالی‌ها با دامنه‌های بزرگ و

کوچک، استفاده از مغناطیس‌سنجی در باستان‌شناسی افزایش یافته است؛ که ویژگی آن ترکیبی از قدرت تفکیک فضایی بالا و پوشش گسترده منطقه است [Gaffney et al., 1990].

در ایران نیز تعدادی از پژوهشگران در این زمینه فعالیت داشته‌اند؛ که می‌توان برای مثال به موارد کاربرد روش مغناطیس‌سنجی در شناسایی محوطه باستانی چغازنبیل به جهت وجود خاصیت مغناطیس باقی‌مانده حرارتی در بقایای سازه‌های آجری [امین‌پور، ۱۳۸۰]، بررسی‌های باستان ژئوفیزیکی (آرکئوژئوفیزیک) در پیرامون تختگاه تخت جمشید [محمدخانی ۱۳۸۳]، بررسی باروی تخت جمشید [عطائی ۱۳۸۳] و کاوش‌های باستان‌شناسی در تپه‌های باستانی مرودشت (تل جری، تل موشکی و تل-باکون) در سال ۱۳۸۳ با همکاری گروه باستان‌شناسی بنیاد و دانشگاه شیکاگو [شهبازی، ۱۳۸۴] اشاره نمود.

در بخش کوچک‌تری از محوطه باستانی تپه‌حصار قبلاً روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی^۱ (ERT) و رادار نفوذی به زمین^۲ (GPR) برای شناسایی دیواره‌ها و اتاقک‌ها انجام شده است؛ که به این طریق توانسته تا حدودی ساختارها را نمایش دهد [رشمه کریم، ۱۳۹۰].

۱-۳- فرض‌ها و سؤالات تحقیق

در راستای اجرای این پروژه، با فرض اطلاعاتی از محوطه از جمله اینکه:

- در محوطه باستانی تپه حصار دامغان اختلاف و تباین چگالی بین دیواره‌ها و فضای خالی پر شده به‌اندازه کافی وجود دارد که بتوان با روش میکروگرانی آن‌ها را شناسایی کرد.
- در محوطه باستانی تپه حصار دامغان اختلاف و تباین مغناطیدگی در محدوده‌های زندگی، خانه‌ها و یا اشیاء فلزی با رسوبات اطراف و همچنین بین دیواره‌ها و اتاقک‌ها برای شناسایی این آثار به روش مغناطیس‌سنجی کافی است.

^۱Electrical Resistivity Tomography

^۲Ground Penetrating Radar

می توان به سوالات زیر پاسخ داد.

- مغناطیس سنجی به چه صورت نشان دهنده ساختارهای زیرسطحی محوطه است؟
 - کدامیک از این فیلترهای اشاره شده می تواند نتیجه بهتری ارائه دهد؟
 - شبکه برداشت یا پروفیل زنی به چه صورتی باشد تا نتیجه مناسبی ارائه شود؟
- پاسخ به سوالات بالا نیازمند مطالعه و بررسی گسترده روش های مذکور هست.

۱-۴- روش تحقیق

در این پژوهش پس از برداشت داده های گرانی و مغناطیس در یک شبکه منظم، سعی خواهد شد که پس از پردازش داده ها از فیلترهای مختلفی جهت تفسیر داده های ژئوفیزیکی استفاده شود. در این تحقیق به منظور پردازش داده ها، مدل سازی مصنوعی، تهیه نقشه خروجی و... از نرم افزارهای Oasis montaj، Surfer، Global Mapper، Potent و Microsoft Excel استفاده شده است. به این ترتیب با تهیه و ساخت مدل مصنوعی و محاسبه اثر گرانی و مغناطیس آنها در یک شبکه منظم، روش های تفکیک و بارزسازی به وسیله فیلترهای فاز محلی بکار گرفته شده است. سپس با برداشت و تصحیح داده های محدوده تپه حصار از روش های مختلف برای تفکیک آنومالی ها استفاده شده است. پس تعیین آنومالی محلی از فیلترهای فاز محلی برای بارزسازی و آشکارسازی لبه ها، دیواره ها و اتاقک ها استفاده شده است. لازم به ذکر است برای طراحی شبکه برداشت داده ها از حفاری های باستانی در محدوده بررسی نیز استفاده شد است.

۱-۵- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل تنظیم گردیده است. در فصل اول در خصوص روش گرانی سنجی و مغناطیس سنجی و کاربردشان در باستان شناسی، سابقه و ضرورت، فرضیات و اهداف انجام آن و همچنین روش شناسی کار صحبت شده است. در فصل دوم مبانی روش های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی

به صورت خلاصه بیان شده است. در فصل سوم مدل مصنوعی به منظور بررسی روش های مورد استفاده در پردازش داده ها و فیلترهای فازی محلی تهیه شده است. در فصل چهارم عملیات صحرائی، تصحیحات، پردازش و تفسیر داده های میدان گرانی و مغناطیس ارائه شده است و سرانجام در فصل پنجم بحث و نتیجه گیری آمده است.

مبانی روش های میدان پتانسیل

(کرائی و مغناطیس)

کشف گیلبرت درباره مغناطیس زمین و تئوری نیوتن درباره نیروی گرانی زمین را می‌توان آغاز علم ژئوفیزیک دانست. هدف اکتشافات ژئوفیزیکی کشف پدیده‌های زمین‌شناسی (تله‌های نفتی، توده‌های معدنی، آثار باستانی مدفون و ...) به روش غیرمستقیم است. در این میان ارسال امواج لرزه‌ای یا جریان‌های الکتریکی به درون زمین و یا استفاده از میدان‌های گرانی و مغناطیسی زمین اساس اکتشافات ژئوفیزیکی مدرن می‌باشند؛ که دسته اولی را می‌توان نمونه‌ی روش‌های فعال و دسته دومی را از روش‌های غیرفعال ژئوفیزیکی نامید. در دو روش گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی کوشش بر این است که تغییرات اندک در یک میدان نسبتاً بزرگ که ناشی از بی‌نظمی‌های چگالی و یا خودپذیری مغناطیسی در سنگ‌های زیرزمینی و یا پدیده‌های زیرسطحی است، اندازه‌گیری می‌شوند [Telford et al., 1990].

روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در حکم روش‌های میدان پتانسیل، از پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی هستند؛ که در شناسایی ساختارهای زیرسطحی نتایج مطلوب و موثقی ارائه می‌دهند. ویژگی مشترکی که این دو روش را از سایر روش‌های ژئوفیزیکی متمایز می‌سازد، پایستار بودن میدان‌های اندازه‌گیری شده است. با استفاده از این روش‌ها در مرحله اکتشافات مقدماتی که هیچ‌گونه اطلاعات قبلی موجود نیست با صرف وقت و هزینه کم، می‌توان مشخصات ساختاری منطقه را بررسی کرد [Dobrin and Savit, 1988]. در کنار مزیت‌های گفته‌شده، این دو روش دارای معایبی نیز هستند، از جمله اینکه آنومالی حاصله مربوط به یک منبع منحصربه‌فرد نیست؛ یعنی تعداد بی‌شماری اشکال زیرسطحی مختلف می‌توانند آنومالی‌های یکسانی در سطح زمین نشان دهند. برای کاستن از دامنه ابهامات؛ باید از اطلاعات زمین‌شناسی نیز بهره گرفت. هرچه میزان اطلاعات بیشتر باشد از ابهامات کاسته شده و تعبیر و تفسیر مطمئن‌تری انجام می‌شود [کلاگری، ۱۳۷۱].

۲-۲- روش گرانی‌سنجی

گرانی‌سنجی در ابتدا برای تعیین محل گنبد‌های نمکی در مکزیک و آمریکا و بعدها برای یافتن ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی مانند تاقدیس‌ها در جنوب غرب آمریکا به کار برده شده است. امروزه این روش در اکتشافات نفتی معمولاً برای اکتشافات مقدماتی بکار می‌رود ولی در کارهای اکتشافی معدنی، مهندسی و باستان‌شناسی به عنوان یک روش اکتشافی مطرح و موثر استفاده می‌شود. این روش قدیمی‌ترین و اولین روش برای اکتشافات نفت بوده و با وجود حساسیت دستگاهی بالا و هزینه نسبتاً زیاد باز هم به میزان بسیار زیاد از روش لرزه‌نگاری ارزان‌تر است [دولتی ارده جانی، ۱۳۷۲].

۲-۲-۱- مفاهیم اساسی

الف) شتاب جاذبه

نیروی گرانش با قانون دوم نیوتن بیان می‌شود؛ که مبنای کارهای گرانی‌سنجی است. طبق این قانون نیروی موجود بین دو ذره به جرم‌های m_1 و m_2 با حاصل ضرب جرم آن‌ها نسبت مستقیم و با مجذور فاصله آن‌ها رابطه عکس دارد [Telford et al., 1990].

$$F = G(m_1 m_2) / r^2 \quad (۱-۲)$$

که در آن G ثابت عمومی جاذبه نامیده شده و مقدارش برابر با $G = 6.67 \times 10^{-11} m^3 / kg \cdot s^2$ است و طبق قانون دوم نیوتن شتاب جرم m_2 ناشی از حضور جرم m_1 از تقسیم F بر m_2 به دست می‌آید. در حالت خاص اگر m_1 بابر M_e یعنی جرم زمین در نظر گرفته شود، با توجه به معادله (۱-۲) شتاب جاذبه در سطح زمین برابر است با [Telford et al., 1990]:

$$g = \frac{F}{m_2} = G \frac{M_e}{R_e^2} \quad (۲-۲)$$

واحد اندازه‌گیری شتاب جاذبه گال ($1Gal = 1 cm/s^2$) است؛ اما در عمل معمولاً از واحدهای کوچکتری به نام میلی‌گال ($1Gal = 10^3 mGal$) و میکروگال ($1Gal = 10^6 mGal$) استفاده می‌شود.

ب) پتانسیل گرانشی

شتاب جاذبه یک میدان تابعی پیوسته است که می‌توان آن را به صورت گرادیان یک پتانسیل اسکالر

نمایش داد:

$$g = \nabla U \quad (۳-۲)$$

که در آن U ، کار انجام شده توسط میدان بر روی یک ذره است و پتانسیل گرانشی نامیده می‌شود.

بنابراین پتانسیل گرانشی ناشی از جرم m برابر است با [Telford et al., 1990]:

$$U = G \frac{m}{r} \quad (۴-۲)$$

۲-۲-۲- تغییرات جاذبه در سطح زمین

شدت جاذبه یا به عبارت دیگر شتاب گرانشی در نقاط مختلف سطح زمین یکسان نبوده و در اثر

عواملی که مهمترین آن‌ها پنج دسته زیر تقسیم بندی می‌شود، از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر متغیر است

[Blakely, 1995].

الف) عرض جغرافیایی نقاط

موقعیت جغرافیایی نقاط سطح زمین عامل مؤثری در تغییرات شتاب جاذبه است؛ زیرا اجسام در

سطح زمین تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز (جانب از مرکز) ناشی از حرکت وضعی زمین قرار داشته و

این نیرو که در جهت مخالف جاذبه اثر می‌نماید و در استوا حداکثر و در قطب مساوی صفر است. برآیند

مؤلفه آن در راستای شعاع زمین با گرانش زمین میدان گرانی نام دارد.

$$g = G \frac{M_e}{R_e^2} - \frac{V}{R_e \cos \varphi} \quad (۵-۲)$$

که V سرعت گردش به دور خود زمین و φ زاویه بین استوا و شعاع زمین یا عرض جغرافیایی نقطه

محاسبه‌ای است.

ب) اختلاف ارتفاع بین ایستگاه‌های اندازه‌گیری و سطح مبنا

با توجه به معادله (۲-۴) و معادله (۲-۵) واضح است که هرچه ارتفاع نقطه‌ای از سطح دریا بیشتر باشد شدت جاذبه در آن نقطه کمتر خواهد بود. بنابراین تصحیح اثر ارتفاعی برای هر نقطه بالای سطح مبنا به صورت زیر خواهد بود که جمله اول تصحیح هوای آزاد و جمله دوم تصحیح بوگه (تصحیح جرمی) است.

$$\delta g_E = \delta g_{FA} + \delta g_B = 0.3086h + 0.0419\rho h \quad (۲-۶)$$

ج) اثر جذر و مد

اجسام سطح زمین تحت تأثیر جاذبه ماه و خورشید نیز می‌باشند و موقعیت نسبی این دو کره در فضا در زمان اندازه‌گیری باعث مشاهده تغییراتی در شتاب جاذبه می‌شود. این عامل مزاحم در اندازه‌گیری داده‌ها، با اندازه‌گیری تکراری روی نقاط مبنای گرانی و نیز فناوری جدید روی گرانی‌سنج‌های پیشرفته قابل محاسبه و حذف است

د) عوامل توپوگرافی

وجود عوارض توپوگرافی مانند کوه‌های مرتفع و دره‌های عمیق در نزدیکی محل اندازه‌گیری باعث مشاهده تغییراتی در شتاب جاذبه می‌شود. هر دوی این آثار توپوگرافی در یک جهت روی مقدار گرانی اثر می‌گذارند، زیرا کشش به سمت بالا و عدم کشش به سمت پایین (در مورد دره‌ها) هر دو باعث کاهش مقدار گرانی در نقطه اندازه‌گیری می‌شود؛ بنابراین هر دو موجب می‌شوند تا مقدار جاذبه در ایستگاه‌های گرانی، کمتر از مقدار واقعی اندازه‌گیری شود [Telford et al., 1990]. برای محاسبه اثر توپوگرافی روش‌های چون روش هامر (۱۹۳۱) و روش‌های محاسباتی کامپیوتری نظیر ناگی و غیره وجود دارد.

ه) تغییرات زمین‌شناسی

تغییرات در وزن مخصوص سنگ‌های نسبتاً سطحی زمین در محل اندازه‌گیری و یا وجود پدیده‌های زمین‌شناسی نظیر گنبد‌های نمکی، طاق‌دیس‌ها، ناودیس‌ها و گسل‌ها که باعث اختلافاتی بین مقادیر

گرانی قرائت شده در ایستگاه‌های مختلف می‌شود. هدف اصلی در مطالعات گرانی‌سنجی اندازه‌گیری تغییرات عامل اخیر یعنی تغییرات زمین‌شناسی و یا در باستان‌شناسی مربوط به عوامل زیرسطحی یا پدیده‌های باستان‌شناسی است.

۲-۲-۳- مراحل بکارگیری روش گرانی‌سنجی در اکتشافات ژئوفیزیکی

مراحل به‌کارگیری روش گرانی‌سنجی در اکتشافات ژئوفیزیکی به‌کارگیری روش‌های گرانی‌سنجی را برای اکتشافات ژئوفیزیکی را می‌توان در چهار مرحله زیر خلاصه کرد:

الف) جمع‌آوری داده‌ها و دستگاه گرانی‌سنج

این مرحله شامل طراحی شبکه برداشت، جمع‌آوری داده‌ها و اعمال تصحیحات لازم بر روی آن‌ها می‌شود. در مرحله طراحی شبکه برداشت ابتدا بایستی مشخص شود که برداشت داده‌ها به کدام صورت زمینی، هوایی و یا دریایی انجام می‌شود. سپس بر اساس هدف مورد مطالعه و مشخصات منطقه، پارامترهایی از قبیل فواصل ایستگاه‌های برداشت، امتداد پروفیل‌های برداشت، فواصل پروفیل‌ها، ارتفاع پرواز در برداشت‌های هوایی و نوع و دقت وسیله اندازه‌گیری و ... تعیین و طراحی می‌شوند. پس از طراحی شبکه برداشت داده‌ها بر اساس دقت موردنظر اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند.

گرانی‌سنج‌ها را می‌توان به دو گروه پایدار و ناپایدار تقسیم‌بندی کرد. امروزه در برداشت‌های گرانی‌سنجی از گرانی‌سنج‌های حساس‌تر مانند لاکوست رمبرگ مدل G440 و گرانی‌سنج‌های CG3 و CG5 استفاده می‌شود. در این پروژه از میان گرانی‌سنج‌ها از دستگاه CG5 استفاده شد. دقت این دستگاه با دقت یک‌هزارم میلی‌گال است و ساخت شرکت سینترکس کانادا است (شکل ۲-۱ و جدول ۲-۱).

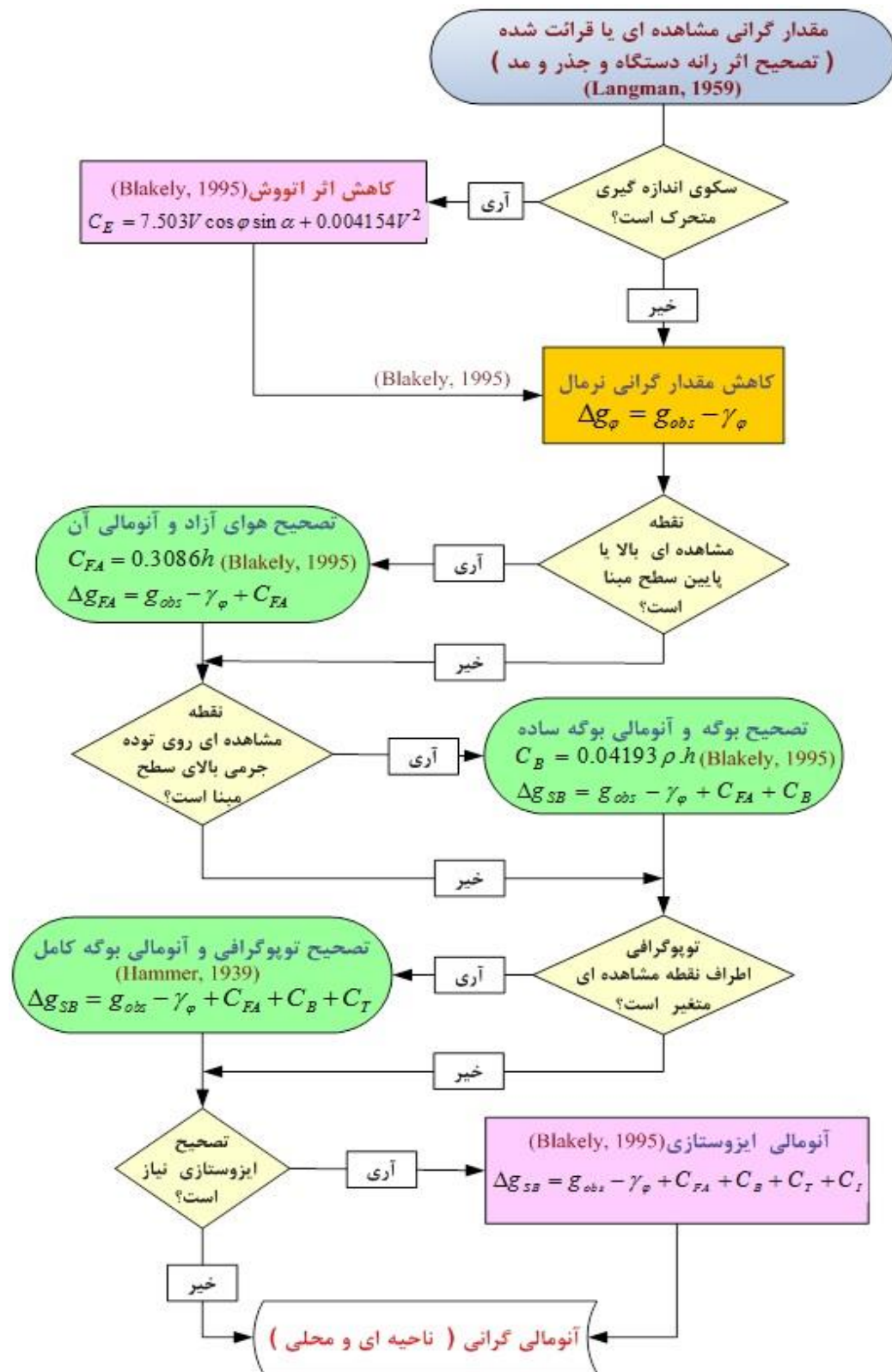
در مقدار گرانی مشاهده‌ای یا قرائت شده آثار مزاحمی از عوامل و پدیده‌های مختلفی وجود دارد که باعث تضعیف آثار ناشی از باستان‌شناسی می‌شود. بنابراین باید از داده‌های گرانی حذف گردد. در این‌گونه مطالعات چون اثرات نویز و حاشیه‌ای خیلی مؤثر هستند، لذا باید کلیه تصحیحات مثل اثر رانه دستگاه و جزر و مد، هوای آزاد، تخته بوگه و توپوگرافی با دقت بالاتری انجام شوند.



شکل ۱-۲: دستگاه گرانی سنج CG5 (میرکمالی، ۱۳۹۳).

جدول ۱-۲: مشخصات دستگاه گرانی سنج CG5 (میرکمالی، ۱۳۹۳).

مشخصه	توضیحات
نوع حس گر	کوارتز فیوز شده با نولینگ الکترواستاتیکی
دقت اندازه گیری	حدود ۱ میکروگال و دامنه کاری: ۸۰۰۰ میلی گال بدون استراحت
میزان رانه دستگاه	۰/۰۲ میلی گال در روز
تصحیحات خودکار	جزر و مد، انحراف از افق دستگاه، درجه حرارت، رانه دستگاه، توپوگرافی نزدیک و فیلتر نویز لرزه‌ای
محدوده دمایی کارا	۴۰- تا +۴۵ درجه سانتی‌گراد
ابعاد دستگاه	۲۱ × ۲۲ × ۳۰ سانتی متر و وزن دستگاه: با باتری ۸ کیلوگرم
ظرفیت باتری	– 2 × 6.6Ah(11.1V)rechargeable Lithium – Ion Smart Batteries
توان دستگاه	۴/۵ وات در ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سطح مورد نیاز: ۳ مترمربع
ولتاژ ورودی به دستگاه	۱۱۰-۲۴۰ ولت (AC) و قابلیت GPS همراه و حاوی کنترل از دور و قابلیت اتصال به حافظه



شکل ۲-۲: فلوجارت تصحیح مقادیر گرانی مشاهده ای در ایستگاه اندازه گیری [آقاجانی، ۱۳۸۸].

نتایج حاصل از بررسی‌های صحرایی گرانی پس از حذف عوامل مزاحم به‌عنوان آنومالی گرانی (بوگه) خوانده می‌شود؛ که دارای دو مؤلفه ناحیه‌ای؛ مربوط به ساختارهای عمیق و مقیاس وسیع و محلی؛ مربوط به ساختارهای سطحی و کم مقیاس است [Blakey, 1995].

$$\Delta g_{CB} = g_{obs} - \gamma_{\phi} - \delta g_{dc} \pm \delta g_{\phi} + \delta g_{fa} - \delta g_{sb} + \delta g_{TC} \quad (7-2)$$

که در آن مؤلفه‌ها به ترتیب از چپ به راست آنومالی بوگه کامل، مقدار گرانی مشاهده‌ای، مقدار گرانی نرمال، اثر تصحیح رانه دستگاه، اثر عرض جغرافیایی، اثر هوای آزاد، اثر تخته بوگه، اثر تصحیح توپوگرافی هست. فلوجارت تصحیحات گرانی در (شکل ۲-۲) نشان داده شده است

ب) تفکیک آنومالی‌ها

داده‌های حاصل از مرحله قبل شامل اثرات تمامی توده‌ها و منابع زمین‌شناسی موجود در منطقه مورد مطالعه با خواص فیزیکی و عمق قرارگیری آن‌ها است. به عبارت دیگر داده‌های برداشت‌شده در یک منطقه، طیفی از آنومالی‌های سطحی تا آنومالی‌های عمیق یا ناحیه‌ای را شامل می‌گردد. آنومالی‌های ناحیه‌ای دارای طول‌موج بلند می‌باشند و آنومالی‌های باقی‌مانده دارای طول‌موج کوتاه هستند [Roynolds, 1997]. بنابراین لازم است این دو دسته آنومالی از یکدیگر تفکیک شوند.

ج) تعیین مشخصات زیرسطحی منابع مولد آنومالی‌ها

وقتی خصوصیات و مشخصات آنومالی‌ها شامل شکل، اندازه، دامنه و ... با اطلاعات محلی و یا زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه ترکیب می‌شود یک مدل مفهومی برای منبع مولد آنومالی و اختلاف خواص فیزیکی آن با مواد زیرزمینی دربرگیرنده آن صورت می‌پذیرد.

د) تفسیر مدل فیزیکی به مفهوم زمین‌شناسی

در مرحله نهایی، مدل فیزیکی با استفاده از اصول و اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و یا در عوامل محیطی در یک سایت باستانی ارائه می‌گردد؛ که منطبق یا توجیه‌گر آنومالی‌های به‌دست‌آمده

از منطقه باشد. مدل مفهومی زمین‌شناسی که از آنومالی‌های ژئوفیزیکی تعیین و تفسیر می‌گردند، الزاماً ساده‌شده و برحسب کیفیت‌های فیزیکی بیان می‌گردند؛ تا روش‌های محاسباتی را ساده‌تر نمایند.

۲-۳- مغناطیس‌سنجی

یکی از اولین و پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی است که به‌صورت گسترده در کاوش‌های باستان‌شناسی نیز استفاده می‌شود. این روش در یک گستره بزرگ از هدف‌های اکتشافی کاربرد دارد، هدف‌های که تفاوت‌های زیادی در ساختارهای زمین‌شناسی دارند. نتایج به‌دست‌آمده در این روش ناشی از انحرافات کوچک از میدان مغناطیسی زمین هست.

۲-۳-۱- مفاهیم اساسی

الف) نیروی مغناطیسی

یک ماده مغناطیسی می‌تواند به‌صورت یک زوج از قطب‌های مثبت و منفی مغناطیسی لحاظ شود؛ که از لحاظ جهت‌گیری مایل به شمال یا جنوب باشند. گویی که قصد دارند در راستای شمال زمین یا جنوب زمین حرکت کنند و به ترتیب قطب مثبت و منفی نام‌گذاری می‌شوند. نیروی بین دو قطب هم نام یا غیر هم نام p_1 و p_2 از رابطه زیر محاسبه می‌شود [Blakely, 1995]:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi\mu_r} \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad (۸-۲)$$

که μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی در خلأ ($4\pi \times 10^{-7} \text{wbA}^{-1}\text{m}^{-1}$) و همچنین μ_r نفوذپذیری مغناطیسی نسبی بین دو قطب و r فاصله بین آن‌ها است. جهت این نیرو در راستای خط واصل دو قطب است و اگر قطب‌ها هم نام باشند نیرو دافعه و اگر غیر هم نام باشند نیرو جاذبه است [Blakely, 1995].

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (۹-۲)$$

μ نفوذپذیری در ماده است.

ب) میدان مغناطیسی القایی

یک آهنربای مغناطیسی شامل دو قطب مثبت و منفی می‌شود. اطراف یک آهنربا میدان مغناطیسی که فضایی است که اثر آهنربا وجود دارد؛ یعنی تمام دوقطبی‌های مغناطیسی آزاد در آن میدان سعی می‌کند تا محورشان را با آن میدان هم‌جهت کنند. اندازه میدان حاصل از قطب P در فاصله r از آهنربا از رابطه زیر به دست می‌آید [Blakely,1995]:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi\mu_r} \frac{P}{r^2} \quad (10-2)$$

در سیستم استاندارد بین‌المللی^۱ (SI)، B در واحد تسلا (T) اندازه‌گیری می‌شود، برای اندازه‌گیری در باستان‌شناسی از واحد کوچک‌تر نانو تسلا (nT) استفاده می‌شود. در سیستم^۲ cgs با واحد گوس اندازه‌گیری می‌شود.

ج) شدت میدان مغناطیسی

کمیت کاربردی شدت میدان مغناطیسی از این رابطه به دست می‌آید:

$$H = \frac{F}{p'} \quad (11-2)$$

که p' یک قطب مجازی نقطه‌ای و بسیار کوچک در فضا هست که نمی‌تواند باعث آشفتگی در H شود. واحد آن هانری در SI یا اورستد در cgs تعریف می‌شود. میدان مغناطیسی به شدت میدان مغناطیسی وابسته است یعنی می‌توان میدان مغناطیسی را با استفاده از این رابطه نیز تعریف کرد [Blakely,1995].

^۱International Standard

^۲Centimetre–gram–second system of units

(د) شدت مغناطیدگی القایی

مغناطیدگی می تواند درون یک ماده زمانی که آن در معرض میدان قرار گرفته است القا شود. این به صورت دوقطبی های که در راستای میدان قرار می گیرند به وجود می آید. شدت مغناطیدگی القایی M هم مشابه با شدت میدان H دارای بعد Am^{-1} است و با آن متناسب است.

$$M = kH \quad (12-2)$$

که در آن پارامتر بدون بعد k (در بعضی منابع با χ نمایش داده می شود) خودپذیری مغناطیسی است. اگرچه آن اغلب با پسوند SI که معرف سیستم استاندارد جهانی است نمایش داده می شود. همچنین باید توجه کرد تفاوتی بین خودپذیری در سیستم SI و خودپذیری در emu^1 (واحدهای الکترومغناطیسی) وجود دارد که برابر است با $[Blakely, 1995] 1emu = 4\pi SI$.

وقتی جسم مغناطیسی در میدان خارجی H قرار بگیرد، قطب های آن در اثر میدان H کم و بیش در یک خط قرار می گیرد و خود میدان H' را به وجود می آورد، این میدان باعث افزایش میدان کل در داخل جسم می شود. طبق تعریف القای مغناطیسی B میدان کل در داخل جسم است. در واحد SI داریم:

$$B = H + H' = H + M = (1+k)H \quad (13-2)$$

$$B = \mu H \quad (14-2)$$

اگر واحد B گوس باشد آنگاه μ گوس بر اورستد می شود ولی چون μ بدون بعد است در نتیجه گوس و اورستد بعدشان یکی می شود و باعث می شود به جای هم به کار برده شوند ولی در واقع هم ارز نیستند؛ زیرا H قدرت ذاتی میدان مغناطیسی است و در حالی که B معرف میدان مغناطیسی القایی به علاوه

¹Electromagnetic Units

میدان مغناطیسی ذاتی است. مثلاً در برخی مواد مغناطیسی، در نتیجه مغناطیدگی پیشین که ارتباطی با میدان خارجی کنونی H ندارد، ممکن است B بسیار بزرگ باشد [Telford et al., 1990].

ه) خودپذیری و نفوذپذیری مغناطیسی

خودپذیری مغناطیسی یک ثابت است و به اندازه تحلیل شده ماده بستگی ندارد اما به نفوذپذیری مغناطیسی μ وابسته است. نفوذپذیری در هوای آزاد برابر با یک است؛ بنابراین در سیستم CGS معادله زیر می‌تواند دیده شود که خود پذیرگی در خلأ یا هوای آزاد صفر است [Blakely, 1995].

$$\mu = 1 + k \quad (15-2)$$

۲-۳-۲- میدان مغناطیسی زمین

الف) میدان اصلی

مؤلفه میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در سطح زمین ناشی از میدان تولیدشده به وسیله خود زمین است. جریان انتقالی در هسته مایع بیرونی اطراف هسته داخلی حرکت می‌کند. هسته داخلی و خارجی هر دو شامل آهن و نیکل هستند؛ بنابراین هر دو رساناهای الکتریکی خوبی هستند. این حرکت مدل هسته داخلی یک میدان تولید می‌کند که با یک دوقطبی که در مرکز زمین در حالی که محور آن در زاویه ۱۱ درجه با محور چرخش زمین افتراق دارد، تقریب زده می‌شود. تغییرات این میدان در نزدیکی استوا در حدود ۲۵۰۰۰ نانوتسلا و تا نزدیکی قطب‌های ژئومغناطیسی در حدود ۶۵۰۰۰ نانوتسلا اندازه‌گیری می‌شود، [Hansen et al., 2005]. در ایران این میدان بطور میانگین در حدود ۴۸۰۰۰ نانوتسلا اندازه‌گیری می‌شود، که بسته به طول و عرض جغرافیایی متفاوت است.

اما در حقیقت میدان زمین بسیار پیچیده‌تر از یک مدل ساده دوقطبی است زیرا اختلالات زیادی به وسیله جابجایی مواد در میدان به وجود می‌آید [Telford et al., 1990]. میدان مذکور به صورت تجربی به وسیله داده‌های ماهواره‌ای و رصدخانه‌ای برای تولید میدان مرجع بین‌المللی ژئومغناطیس (IGRF^۱)

^۱International Geomagnetic Reference Field

مدل شده است. IGRF برای اعمال تصحیحات ناحیه‌ای روی داده‌ها می‌تواند اعمال شود که البته در برداشت‌های بزرگ مقیاس می‌تواند حائز اهمیت باشد. به‌رحال این تصحیحات ناحیه‌ای یک طول موج کمینه در حدود ۳۰۰۰ کیلومتر دارد. تغییرات IGRF به‌طور مرتب رصد می‌شود و هر ۵ سال یک‌بار تجدیدنظر می‌شود [Finally et al, 2010].

ب) میدان ژئومغناطیسی خارجی

میدان ژئومغناطیسی همچنین شامل از چشمه‌ی خارجی ناشی می‌شود. پرتوهای یونیزه در لایه‌های بالای جو می‌تواند آنومالی‌هایی در حدود چند ده نانتوسلا در طول روز تولید کند. اطراف استوا اختلالات روزانه می‌تواند بزرگ‌تر باشد و آنومالی‌های در حدود چند صد نانتوسلا تولید می‌کنند. طوفان‌های مغناطیسی ناشی از لکه‌های خورشیدی نیز می‌توانند آنومالی‌هایی در حدود چند صد نانتوسلا با دوره‌های زمانی کوتاه‌تر تولید کنند.

ج) تغییرات عمده در میدان اصلی

نتیجه تغییرات در محتوای کانی مغناطیسی سنگ‌های نزدیک به سطح زمین است و منظور هدف کاوش‌های مغناطیسی است. این بی‌هنجاری‌ها گاهی آن‌قدر بزرگ هستند که میدان اصلی را در محل بطور قابل ملاحظه افزایش می‌دهند و عموماً در فواصل بسیار زیاد ماندگار نیستند.

۲-۳-۳- مغناطیس سنگ‌ها و کانی‌ها

مواد می‌توانند باتری‌های الکتریکی ناشی از شکل‌بندی و آرایش منظم الکترون‌ها و پروتون‌ها در ساختار اتمی باشند. به همین دلیل تمام عنصرها، کانی‌ها و ترکیب‌ها را می‌توان برحسب ویژگی مغناطیسی‌شان به سه دسته تقسیم کرد: دیامغناطیسی، پارامغناطیسی و فرومغناطیسی که آخری خود به زیرشاخه‌هایی تقسیم می‌شود [Telford et al., 1990].

مواد دیامغناطیسی دارای خودپذیری مغناطیسی منفی هستند یعنی شدت مغناطیدگی القا شده در جسم بر اثر میدان خارجی برخلاف جهت آن است. بسیاری از عناصر و ترکیبات دیامغناطیس هستند

و مغناطیدگی در آن‌ها بسیار ضعیف است. معمولی‌ترین مواد دیامغناطیس زمین آب، گرافیت، ژئیس، مرمر، کوارتز و نمک هستند که لایه اتمی آن‌ها کاملاً پرشده است. اگر در لایه اتمی عناصر الکترون جفت نشده وجود داشته باشد آن ماده پارامغناطیس است، یعنی باید گشتاور مغناطیسی دائمی داشته باشند و این گشتاورها تمایل دارند که با میدان اعمال شده همسو شوند. این مواد دارای k مثبت هستند. پلاتین از این نوع است؛ اما آهن، نیکل و کبالت عنصرهایی فرومغناطیسی هستند و مقدار k آن‌ها بسیار بزرگ است و به خط شدگی حوزه‌های مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی بسیار زیاد است.

موادی که حوزه‌های مغناطیسی آن‌ها به نواحی‌ای تقسیم شده باشند و به خط شدگی آن‌ها خلاف جهت یکدیگر باشد ولی گشتاور خالص آن‌ها وقتی که $H=0$ است، صفر نباشد، فری مغناطیس نامیده می‌شوند؛ یعنی یک سری از حوزه‌های فرعی قوی‌تر از دیگر حوزه‌هاست. درحالی‌که تعداد هر دو حوزه برابر است و یا حوزه‌های فرعی از یک نوع بیشتر از نوع دیگر است. مانیتیت و پیروتیت به ترتیب از این دو دسته هستند. مگنتیت نیز یک کانی فری مغناطیس نوع اول است. در این بین مواد پاد فرومغناطیس موادی هستند که گشتاورهای مغناطیسی خالص مربوط به حوزه‌های فرعی موازی و پادموازی یکدیگر را خنثی کنند که اگر این چنین نبود آن ماده فرومغناطیس بود. خودپذیری مغناطیسی حاصل در حد مواد پارامغناطیس است. هماتیت یک کانی پادفرومغناطیس است (شکل ۲-۳) [Telford et al., 1990].

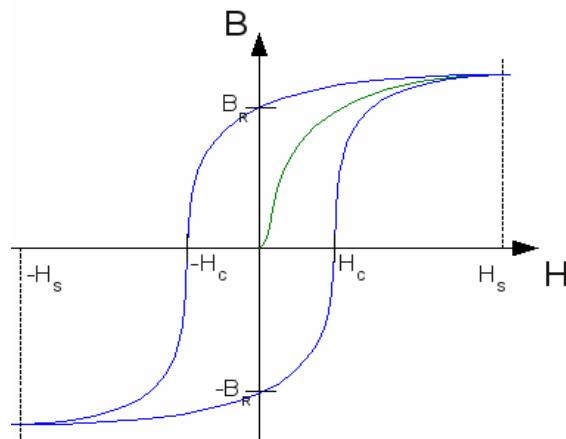


شکل ۲-۳: صفبندی حوزه‌های مغناطیسی در انواع مواد فرومغناطیسی

۲-۳-۴ - حلقه‌ی پسماند (هیستریس)

در مواد فرومغناطیسی رابطه بین B و H یعنی معادله (۲-۱۴) یک رابطه کاملاً خطی نیست بلکه کاملاً پیچیده است. اگر نمونه در ابتدا وامغناطیده باشد بخش اول منحنی به دست می‌آید که در آن B با افزایش می‌یابد تا جایی که به علت اشباع به حالت حدی می‌رسد و نمودار شروع به تخت شدن

می‌کند. با کاهش میدان خارجی منحنی از مسیر قبل تبعیت نمی‌کند و برای $H=0$ مقدار مثبت B_R را نشان می‌دهد، این به مغناطیس بازماند (پسماند) معروف است. وقتی که H معکوس می‌شود B به ازای مقدار منفی از H_C به نام نیروی وادارنده سرانجام صفر می‌شود با منفی کردن بیشتر H و رسیدن به اشباع معکوس و القا در جهت معکوس ادامه پیدا می‌کند. سپس با بازگرداندن H به مقدار اولیه مقدار اشباع اولیه به دست می‌آید. محل‌های برخورد با محور B آنی از القایی قطبیدگی القایی است که با صفر شدن میدان خارجی در نمونه باقی می‌ماند و محل برخورد با محور H نشان‌دهنده‌ی میدان معکوس موردنیاز برای حذف مغناطیدگی القایی است. سطح زیر منحنی نشانگر اتلاف انرژی هر چرخه برای واحد حجم ماده مغناطیسی است و برای مواد مختلف متفاوت است (شکل ۲-۴) [Telford et al., 1990].



شکل ۲-۴: حلقه‌ی پسماند.

۲-۳-۵- انواع مغناطیدگی بازماند

اگرچه در بیشتر موارد مغناطیدگی بازماند عمدتاً بستگی به شدت میدان مغناطیسی اطراف و محتوای کانی مغناطیسی آن‌ها دارد، ولی این مسئله عموماً درست نیست. در عمل مغناطیس باقیمانده اغلب در مغناطیس شدگی کلی سنگ‌ها، چه از لحاظ دامنه و چه از لحاظ راستا، دخالت دارد. این اثر بسیار پیچیده است زیرا به تاریخچه مغناطیسی سنگ‌ها مربوط می‌شود و بر اثر یکی از چند علل زیر به وجود آید [Telford et al., 1990].

الف (مغناطیدگی بازماند شیمیایی^۱) (CRM)

به علت کنش‌های شیمیایی در دماهای متوسط، یعنی زیر نقطه کوری، وقتی که دامنه‌های مغناطیسی از لحاظ اندازه بزرگ شده و یا تغییر شکل دهند، به وجود می‌آید. این فرآیند در سنگ‌های رسوبی و دگرگونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است یعنی حاصل رشد آرام دانه‌های کانی است.

ب (مغناطیدگی بازماند آواری^۲) (DRM)

در اثنای فرونشست آرام ذرات ریزدانه در حضور یک میدان خارجی به وجود می‌آید. خاک رس چنین بازماندی را ارائه می‌کند.

ج (مغناطیدگی بازماند تک دما^۳) (IRM)

باقیمانده‌ای است که پس از حذف یک میدان خارجی بر جای می‌ماند. میدان مغناطیسی زمین برای ایجاد مقدار قابل ملاحظه‌ای از IRM بسیار کوچک است. آذرخش بر روی ناحیه‌های کوچک بی‌نظم IRM تولید می‌کند.

د (مغناطیس شدگی بازماند حرارتی^۴) (TRM)

در نتیجه‌ی سرد شدن مواد مغناطیسی از نقطه کوری، در حضور یک میدان خارجی به وجود می‌آید. بازماند حاصل از این طریق پایدار است. در بعضی موارد این بازماند ممکن است در جهت عکس میدان مغناطیسی باشد. این فرآیند، سازوکار عمده در مغناطیس‌شدگی سنگ‌های آذرین است.

ه (مغناطیدگی بازماند چسبنده^۵) (VRM)

^۱Chemical remnant magnetization

^۲Detrital remnant magnetization

^۳Isothermal remnant magnetization

^۴Thermo remnant magnetization

^۵Viscous remnant magnetization

در اثر قرار گرفتن مواد به مدت طولانی در معرض یک میدان خارجی به وجود می‌آید. روی هم جمع شدن این بازماند، تابعی لگاریتمی از زمان است. VRM احتمالاً بیشتر سرشتی سنگ‌های ریزدانه است تا درشت‌دانه. این بازماند کاملاً پایدار است [Telford et al., 1990].

۲-۳-۶- مغناطیدگی در باستان‌شناسی

پدیده‌های زیرسطحی باستانی را می‌توان به وسیله روش مغناطیس‌سنجی آشکار کرد. این اتفاق به این دلیل است که آن‌ها یک مغناطیدگی بازماند یا القایی و یا هر دو را به همراه دارند که یک تباین مغناطیدگی وجودی بین پدیده‌های مورد علاقه و محیط دربرگیرنده را به وجود می‌آورد. دلایل زیادی برای این امر وجود دارد. مغناطیدگی بازماند می‌تواند در مواد باستانی مثل کوره‌ها، تنورها، کف اتاق‌ها، آشپزخانه‌ها و خشت‌ها می‌تواند حبس شود. در مواد موجود در این پدیده‌ها با حرارت دیدن یک مغناطیدگی گرمایی بالا ایجاد می‌شود، به گونه‌ای که وقتی مقدار اکسید آهن در ماده مورد نظر بالاست فرآیند گرم کردن رفتار پارامغناطیسی بالای دمای کوری را سبب می‌شود و متعاقباً هنگام سرد شدن مماند مغناطیسی ماده در جهت میدان زمین هم‌تراز می‌شود. در مورد کوره‌ها و سیلوها این اثر باقی خواهد ماند و می‌تواند برای تاریخ‌گذاری زمان گرم کردن استفاده شود [Clark et al., 1998]. برای خشت‌های رسی که معمولاً پس از آتش دیدن انتقال پیدا کرده‌اند و سپس در سازه‌ها قرار داده شده‌اند، صف‌بندی مغناطیسی فضای اطراف خشت‌ها اغلب متفاوت است و مغناطیدگی ترکیب‌شده ساختمان‌ها به اندازه آنومالی کوره‌ها و سطوح آشپزخانه‌ها قوی نیست [Hessa et al., 1997 Bevan, 1994].

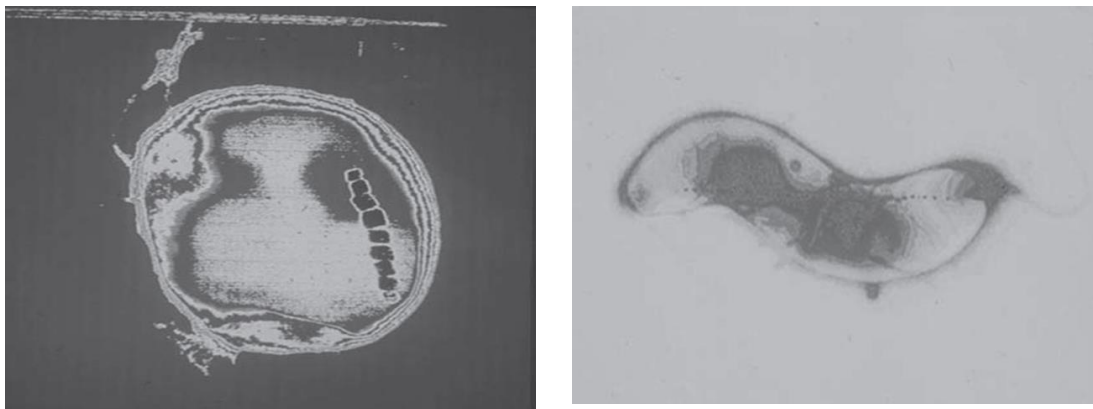
همچنین مغناطیدگی القایی همچنین بزرگی در آشکارسازی پدیده‌های باستانی ایفا می‌کند. استفاده‌های انسانی پیشین از زمین و یا به بیان دیگر در مناطقی از زمین که انسان در روند طبیعت دخالت کرده است، این دخالت در آن منطقه اغلب به افزایش خودپذیری مغناطیسی منجر شده است. این ناشی از وجود و تمرکز اکسید آهن به صورت مختلف هماتیت ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)، مگنتیت (Fe_3O_4) و مگهمیت ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) است. هماتیت آنتی‌فررومگنتیت است و بنابراین یک خودپذیری خیلی پایین

دارد. افزایش خودپذیری مغناطیسی در محوطه‌های باستانی به‌وسیله انسان‌ها از تبدیل هماتیت به مگنتیت و البته کمتر مگمیت ناشی می‌شود. هماتیت و مگمیت هر دو در حالت فول اکسید (Fe^{3+}) وجود دارند و آرایش مشابهی دارند، با این حال که از نظر ترکیب یونی در شبکه بلوری متفاوت هستند. اما مگنتیت به‌صورت پاره‌ای و نامتعادل اکسید شده است و بعضی یون‌ها (Fe^{3+}) و بقیه (Fe^{2+}) هستند. دلایل این تبدیل‌ها که باعث افزایش خودپذیری مغناطیسی در محوطه‌های باستانی هستند را می‌توان شمرد. آن‌ها عبارت‌اند از [Aspinall et al., 2008]:

- سوختن گیاهان و یا آتش‌های سطحی دیگر موجب یک کاهش اکسیژن در خاک زیرسطحی (subsoil) می‌شود، بنابراین باعث تبدیل هماتیت به مگنتیت می‌شود. [Le Borgne, 1955].
- واسطه میکروبی در پوسیدگی باطله‌های ارگانیک نیز می‌توانند شرایط تبدیل هماتیت به مگنتیت را فراهم کنند. در این شیوه باکتری شرایط تبدیل را به وجود می‌آورد [linford, 2004].
- به‌گونه‌ی مشابه حالت قبل فاسیندر و دیگران (۱۹۹۰) یک باکتری مغناطیسی را کشف کردند که نوع خاصی از باکتری است که بلورهای مغناطیسی کوچک از اکسید آهن در خاک به وجود می‌آورد. این عمل به‌صورت ویژه در پوسیدن چوب صورت می‌گیرد (شکل ۲-۵) [Fassbinder et al, 1990].
- مجموع مواد مغناطیسی مثل سفال شکسته و تکه‌های خشت به خاطر حرارتی که دیده‌اند، همچنین خرده‌های فلزی ابزارآلات (در صورت وجود) نیز می‌توانند شرایط این تبدیل را تسریع کنند. [Weston; 2002].
- افزایش طبیعی خودپذیری مغناطیسی که خاک در طول پیدایش و انباشته شدن خاک و غبار در محل بوجود می‌آید. این عمل بدون حضور و دخالت میکروارگانیک‌ها انجام می‌شود [Maher & Teylor, 1988].

هنگامی که در یک توده خاک هماتیت ($SI \times 10^{-6} 40,000 - 500$) به مگنتیت ($- 1,000,000$) تبدیل می‌شود اکسیدشدگی مجدد اتفاق می‌افتد؛ که به‌صورت برعکس ممکن

نیست یعنی مگنتیت به هماتیت تبدیل نمی‌شود. اما مگنتیت می‌تواند به مگهمیت ($2,000,000$ -) SI ($2,500,000 \times 10^{-6}$) تبدیل شود که خودش نیز فرومگنتیت است و بنابراین خودپذیری مغناطیسی بالایی دارد، که باعث می‌شود مغناطیدگی محیط در یک مرتبه بالایی حفظ شود.



شکل ۲-۵: باکتری مغناطیسی با بلورهای از رشته‌های مغناطیسی ساخته شده به وسیله آن [Fassbinder et al, 1990].

بیشتر فعالیت‌هایی که در بالا ارائه شد برای افزایش خودپذیری به حضور مواد ارگانیک نیازمند است. مواد ارگانیک اغلب در لایه‌های سطحی خاک با فراوانی بیشتر یافت می‌شوند؛ بنابراین خودپذیری خاک سطحی افزایش پیدا می‌کند. وجود آب و فرآیند دوره‌ای اشباع از آب و خشک شدن نیز به افزایش اکسیداسیون کمک می‌کند. این نتایج در یک تباین خودپذیری مغناطیسی قابل شناسایی است و در اکتشاف سازه‌های مدفون ساخته شده به دست انسان‌های پیشین می‌تواند استفاده شود.

۲-۳-۷- منبع نوفه در مغناطیس‌سنجی باستانی

در داده‌های مغناطیسی نوفه معمولاً به دو گونه تولید می‌شود؛ یک نوفه مربوط به دستگاه و سیستم اندازه‌گیری و دوم اختلالات ناخواسته مغناطیسی ناشی از عوامل ناخواسته. نوفه نوع اول به وسیله مدارات الکتریکی دستگاه و دریافت ناشی از حساسیت آن تولید می‌شود. این نوفه بسیار کوچک است؛ ولی با این حال باعث می‌شود مقداری از داده محو شود. به هر حال نوفه دستگاهی اغلب یک مقدار ثابت است و با تست و کالیبره کردن دستگاه کاهش می‌یابد [Aspinall et al., 2008].

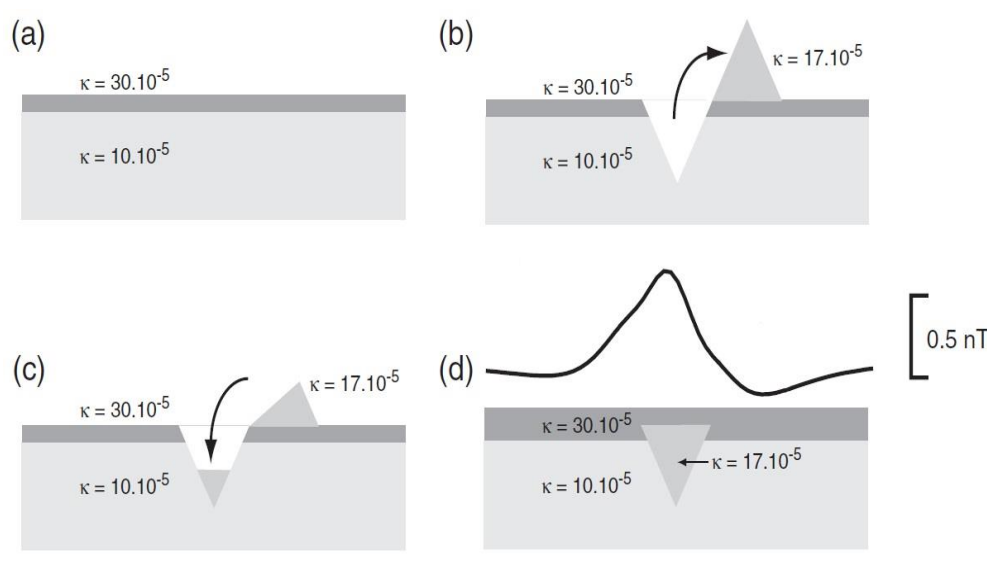
اما دسته دوم، گاهی اوقات سیگنال‌های در یک مطالعه دقیق از یک منطقه باستانی به‌طور ناخواسته وارد می‌شوند. آن ممکن است همدوس یا ناهمدوس باشند. مثلاً یک شی متحرک در فاصله نزدیک یک نوفه ناهمدوس و متغیر با زمان در داده تولید می‌کند. در کل نوفه ناهمدوس به‌صورت عمومی به‌وسیله اتمسفر زمین، رفت‌وآمد ترافیکی، مردم یا فنس‌های الکتریکی به وجود می‌آیند [Aspinall et al., 2008]. کابل‌های برق یا حفاظ کاتدی لوله‌کشی همچنین اختلالات وابسته به زمان را ناشی می‌شوند و تفسیر آنومالی‌ها را دشوار می‌سازند [Gharibi & Pedersen, 2000].

انواع دیگر نوفه‌های وابسته به مصنوعات ساخت دست بشر تکرار شونده هستند. به‌عنوان مثل یک شی ایستای دور یا نزدیک یک نویز مستقل از زمان و همدوس را در سیگنال ناشی می‌شوند. مثل مصنوعات فلزی، سکه‌ها، مهره‌ها، ساختمان‌ها، ایستگاه وسایل نقلیه و غیره. همچنین اثرات روباره‌ها و سنگ‌های آذرین که در طول زمان در این نهشته‌ها جایگذاری شده است، نیز می‌تواند تولید نویز کند. اپراتور نیز در برداشت‌های مغناطیسی مستعد تولید نویز است. اپراتور باید از حمل و پوشیدن البسه‌ای که تکه‌های فلزی دارد خودداری کند. همچنین از تنظیم دستگاه، موقعیت‌یابی و ارتفاع ثابت حس‌گر در تمام برداشت مراقبت کند.

۲-۳-۸- نوع آنومالی مغناطیسی در مغناطیس‌سنجی باستانی

آنومالی‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده در روی زمین، تباین بین پدیده‌های باستانی و محیط دربرگیرنده آنان را نشان می‌دهند؛ بنابراین شدت میدان این آنومالی‌ها به خودپذیری مغناطیسی پدیده‌ی مورد نظر و محیط اطراف آن بستگی دارد. آنومالی‌ها در محیطی که خاک اکسید آهن کمی داشته باشد در مقایسه با حالتی که خاک اکسید آهن زیادی دارد، دامنه کوچک‌تری دارند. برای عارضه‌های مشابه در مورد حالت اخیر تباین خودپذیری بین جسم آنومال و محیط معمولاً اطلاعاتی درباره نوع ماده‌ای که آنومالی را تولید کرده آشکار نمی‌کند.

تباين مثبت در داده‌هاي باستان‌ژئوفيزيكي عموماً در مناطقي نشان داده مي‌شود كه گودال يا ديگر عارضه‌هايي در داخل خاك سطحي حفر شده باشد. اين عارضه‌ها خودپذيري را افزايش مي‌دهد [Linford, 2006]; يعني گودال يا حفره يك شكاف در خاك سطحي مشابه (شكل ۲-۶) كه مغناطيدگي بالاتري دارد ايجاد کرده كه تا درون خاك كمتر مغناطيسي شده ادامه دارد. هر دو نوع خاك بيرون ريخته شده بنابر اين مخلوط مي‌شوند. در طول زمان با رها شدن دوباره اين خاك درون گودال يك تباين مثبت برخلاف خاك اصلي به وجود مي‌آيد.



شكل ۲-۶: حفره يك گودال در دولايه با خودپذيري متفاوت چنانچه در شكل نشان داده شده و مخلوط شدن دو نوع خاك و رها شدن دوباره آن در گودال مسبب ايجاد يك آنومالي ۰/۵ nT شده است از [Cheyney, 2012].

آنومالي‌هاي منفي نيز مي‌توانند بدين گونه به وجود آمده باشند؛ يعني گودال با ماده‌اي كه خودپذيري كمترى نسبت به خاك اطراف را دارد پر شده باشد. اين اغلب در پي و ديوارها به وجود مي‌آيد كه خودپذيري كمترى را دارند، مثلاً اگر از جنس سنگ‌آهك باشند. يا جايي كه گودال در يك خاك با مغناطيدگي بالا حفر شده و با موادي با خودپذيري پايين پر شده باشد [Aspinall et al., 2008].

۲-۳-۹- مگنتومتر نوع پروتون



شکل ۲-۷: مگنتومتر پردازش پروتون

مگنتومتر پروتون علاوه بر قسمت اصلی (شکل ۲-۷) شامل یک محفظه پر شده با مایعی غنی از اتم هیدروژن (مثل آلکالوئیدهای هیدروکربنی خیلی خالص) است. همچنین دارای دو سیم پیچ اولیه و ثانویه است. مغناطیس‌سنجی بر این اساس کاری است که هسته یک گشتاور مغناطیسی خالص جفت شده اسپینی دارد که یک انحراف مسیر فرفره‌ای اطراف محور میدان مغناطیسی را نتیجه می‌دهد و با اندازه‌گیری این حرکت تقدیمی شدت میدان را محاسبه می‌کند. این دستگاه می‌تواند برای مطالعات سریع و پیوسته استفاده شود و دقت آن بین 0.1nT تا 1nT متغیر است. در این مطالعه از دستگاه مگنتومتر پروتون ساخت شرکت ژئوماتریکس استفاده شد.

۲-۴- جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقی‌مانده

آنومالی‌های مشاهده‌ای^۱ در حاصل از اشکال زمین‌شناسی در داده‌های میدان پتانسیل معمولاً به دو بخش آنومالی ناحیه‌ای^۲ با طول موج بلند مربوط به اشکال زمین‌شناسی با گسترش زیاد و آنومالی باقی‌مانده^۳ با طول موج کوتاه مربوط به اشکال زیرسطحی با محلی با گسترش محدود تقسیم می‌شود.

^۱Observational

^۲Regional

^۳Residual

معمولاً جهت جداسازی آنومالی ناحیه‌ای و باقی‌مانده از روش‌های ترسیمی و محاسباتی استفاده می‌شود. روش‌های ترسیمی غالباً به قضاوت مفسر وابسته است بنابراین بیشتر از روش‌های محاسباتی استفاده می‌شود. یک روش فراگیر برای حذف و جداسازی آنومالی‌ها روند سطحی است که با استفاده از توابع خطی چندجمله‌ای و محاسبه ضرایب مناسب برای هر یک از جمله‌ها انجام می‌شود. انتخاب درجه مناسب برای چندجمله‌ای از مسائل حائز اهمیت در این روش است [کلاگری، ۱۳۷۱].

اما آنومالی باقی‌مانده که در کارهای اکتشافی مورد نظر است دارای ابهام هست زیرا اگر دو ساختار یا جسم هم‌اندازه و هم‌عمق وجود داشته باشد، در این حالت چنین به نظر می‌رسد که آنومالی حاصله از آنها مربوط به یک منبع باشد. در چنین مواقعی لازم است روش‌های پیچیده‌تری برای تفکیک آنومالی‌ها مثل فیلترهای فازی محلی استفاده کرد [کلاگری، ۱۳۷۱].

۲-۵- فیلترهای فاز محلی

تعیین محل، آشکار سازی لبه‌ها و بارزسازی آنومالی‌ها در اکتشاف معدنی، باستانشناسی و تحلیل رویدادهای زمین‌شناسی از نظر علمی و اقتصادی بسیار مهم می‌باشد. فیلترهای بنیان شده بر روی مشتق (فاز محلی) معمولاً به‌عنوان یک کمک در مراحل تفسیر داده‌های میدان پتانسیل به‌کاربرده می‌شوند. اما چون یک شکل از فیلترهای بالا گذر هستند، ناخواسته تا حدی سبب افزایش نوفه در داده‌ها می‌شوند و این خود کار تفسیر را مشکل‌تر می‌کند. بسته به تغییرات نرم یا خشن داده‌ها می‌توان از یک مرتبه مشتق مناسب در طراحی فیلترها استفاده کرد که در افزایش تعادل بین نوفه و داده برای تهیه یک نقشه مشتق باکیفیت موثر باشد. این فیلترها لبه‌های آنومالی‌ها در داده را در یک جهت خاص و یا بعضاً در همه‌ی جهات بارز می‌کنند. به این دلیل می‌توانند در آشکارسازی لبه‌ها و تعیین مرزهای ساختارهای زمین‌شناسی مفید واقع شوند. بهبود توسعه این فیلترها به‌عنوان یک ابزار آشکار سازی اثر منابع عمیق‌تر و یا آنومالی‌های با دامنه کوچکتر در کنار منابع سطحی و یا آنومالی‌های با دامنه بزرگتر همواره به ارائه تکنیک‌های جدیدتر و کارا تر انجامیده است. دریافت پاسخ از منابع عمیق‌تر

یا اجسام آنومال‌های کوچکتر که در ژئوفیزیک از اهمیت زیادی برخوردار است که به واسطه‌ی وجود اجسام آنومال بزرگتر با منابع سطحی سخت‌تر است، زیرا آنومالی‌های با دامنه بزرگتر بر آنومالی‌های با دامنه کوچکتر توفیق پیدا می‌کنند و باعث هم‌پوشانی آنها می‌شود. فیلترهای فاز محلی نتیجه مناسبی ارائه می‌دهد ولی این توابع فاز باید تصحیح شوند تا بتوانند ابهام فاز را نشان دهند، زیرا توابعی متناوب هستند. در داده‌های بدون نویز فاز می‌تواند با جمع زدن ساده 2π با فاز محلی تصحیح شود که به هر حال در یک تغییر ناگهانی از π تا $-\pi$ اتفاق می‌افتد، اما وجود نویز و الیاسینگ می‌تواند این فرآیند را مشکل کند.

۲-۵-۱- مشتقات افقی و قائم

گرادیان افقی میدان پتانسیل گرانی یا مغناطیس در فاصله نمونه‌برداری Δx در طول یک پروفیل در فضای مکان از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{df}{dx} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (16-2)$$

و می‌توان در فضای فرکانس این‌گونه نوشت:

$$A'(u) = A(u)(iu)^n \quad (17-2)$$

به‌گونه‌ای که $A(u)$ دامنه فرکانس u است و n مرتبه مشتق است و می‌تواند مقادیر عدد صحیح و اعشاری را شامل شود. مقدار بیشینه مطلق گرادیان افقی مرتبه‌ی $1,0$ در هر طرف جسم روی لبه جسم روی می‌دهد، درحالی‌که در همان نقطه مقدار گرادیان مرتبه‌ی دوم افقی صفر هست. تغییرات منحنی‌ها با افزایش n به‌گونه‌ای است که از یک نامتقارنی کامل در مشتق مرتبه اول ($n=1$) با افزایش تدریجی n به تقارن کامل در مشتق مرتبه دوم ($n=2$) و البته معکوس نمودار داده اصلی خواهد رسید. همچنین با افزایش مرتبه n پیک نمودار جمع‌تر یا فشرده‌تر خواهند شد. در صورتی که مشتق سبب اول افزایش زیاد مقدار نوفه شود، مقادیر کمتر از یک برای پارامتر n جهت کاهش اثر نوفه و همچنین کاهش اثر جابجایی مرزها استفاده شود.

همچنین استفاده از روش گرادبان قائم میدان پتانسیل نیز نقش مهمی در بارز سازی ساختارهای زیرسطحی دارد و سبب وضوح بهتر اشکال آنومال به ویژه در لبه‌های آن‌ها خواهد شد. محاسبه آن‌ها در فضای فرکانس نیز به شکل زیر خواهد بود.

$$A'(u) = A(u)|u|^n \quad (18-2)$$

و یا می‌توان با جایگزین نمودن مشتق دوم با بهره‌گیری از معادلات لاپلاس محاسبه نمود.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right) \quad (19-2)$$

این روش بهتر است زیرا محاسبه مشتق افقی در حوزه مکان معمولاً سریع انجام می‌پذیرد و عموماً از محاسبه مستقیم پایدارتر است. یک نقص این روش افزایش نویز در داده‌ها در اثر افزایش مرتبه است. به‌طور کلی اگر لازم باشد که داده‌ها نرم‌تر شوند می‌توان از مقادیر منفی n نیز استفاده کرد [Cooper & Cowan, 2003].

۲-۵-۲- مجموع مشتق افقی

مشتق افقی در هر راستا فقط می‌تواند دامنه بی‌هنجاری را تنها در راستای عمود بر آن بارز کند، اما استفاده از فیلتر مجموع مشتق افقی TDX سبب بارز سازی دامنه لبه‌ها در هر جهت می‌شود و مقدار آن روی لبه آنومالی‌ها زیاد خواهد شد. این فیلتر مرز آنومالی‌ها را تغییر نمی‌دهد در حالی که در مشتق افقی یا جهتی یک جابجایی در بیشینه روی می‌دهد. علاوه بر آن فیلتر مجموع مشتق افقی پاسخ نسبتاً بهتری نیز نسبت به مشتق افقی از آنومالی‌های عمیق‌تر به دست می‌دهد [Cooper & Cowan, 2006]. شکل بهنجار شده این فیلتر به‌صورت زیر است از:

$$TDX = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{((\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2)}}{|\partial f / \partial z|} \right) \quad (20-2)$$

که در آن f میدان پتانسیل (گرانی و مغناطیس) است.

۲-۵-۳- زاویه تیلت

. فیلتر فازی متداول زاویه تیلت (کجی) است که به صورت زیر تعریف می شود [Miller & Singh,

1994].

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{\partial f / \partial z}{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2}} \right) \quad (21-2)$$

از آنجا که این فیلتر مبتنی بر نسبت مشتقات میدان است، لذا در متعادل کردن دامنه های آنومالی - های عمیق نسبت به آنومالی های کم عمق مؤثر است؛ اما الزاماً این فیلتر یک فیلتر تشخیص لبه نیست. به عبارتی زاویه ی تمایل دامنه ی آنومالی های عمیق تر را نسبت به سطحی تقویت می کند. مقدار این زاویه زمانی که بالای منبع آنومال قرار می گیرد، مثبت بوده و زمانی که بالا یا نزدیک لبه های آن منبع قرار گیرد صفر می شود، درست دقیقاً جایی که مشتق قائم صفر و مشتق افقی بیشینه است و در خارج از محدوده منبع آنومال مقدار آن منفی است، یعنی جایی که مشتق قائم منفی می شود. مقادیر زاویه تمایل صرفه نظر از مقدار مشتقات افقی و قائم در بازه [۹۰، -۹۰] درجه قرار می گیرند [Miller & Singh, 1994].

۲-۵-۴- مجموع مشتق افقی زاویه تیلت

زاویه تیلت به خوبی آنومالی های با دامنه بزرگ و کوچک را بارز می کند، این عمل سبب می شود پاسخ از آنومالی های نسبتاً عمیق تر محو شود، برای رفع این مشکل ورداسکو و همکاران استفاده از مجموع مشتق افقی از زاویه تیلت، THDR را پیشنهاد کردند [Verduzco et al., 2004].

$$THDR = \sqrt{(\partial T / \partial x)^2 + (\partial T / \partial y)^2} \quad (22-2)$$

که T زاویه تیلت میدان مورد نظر است. فیلتر THDR به خوبی آنومالی های دامنه بزرگ را بارز می کند اما برای بی هنجاری های ناشی از اجسام عمیق تر کمتر مؤثر است، همچنین دارای یک ظرفیت ناخوشایند برای افزایش نوفه در داده هست، یعنی یک مشتق از یک تابع مشتق دیگری باشد. تأثیر استفاده از مشتق افقی مجدد در این فیلتر باعث می شود بی هنجاری های با دامنه بزرگ بهتر مشخص

شود ولی این خود افزایش نوفه را در پی دارد. مضاف بر آن باعث وضوح کمتر بی‌هنجاری‌های کوچک دامنه می‌شود، ولی عملاً در مقایسه با زاویه تیلت آنومالی‌های کوچک بهتر مشخص می‌شود. به خاطر مطالبی که ذکر شد در عمل کار را برای تفسیر مشکل‌تر می‌شود.

۲-۵-۵- تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت

استفاده از قسمت حقیقی تابع تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت (HTA) تصویر بهتری از لبه اجسام ارائه می‌دهد [Cooper & Cowan, 2006]. مقدار بیشینه HTA لبه اجسام را نشان می‌دهد.

$$HTA = \text{Real} \left(\tanh^{-1} \left(\frac{\partial f / \partial z}{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2}} \right) \right) \quad (2-23)$$

منحنی‌های کنوری منفی از این فیلتر که جسم را احاطه می‌کند، به صورت ناخواسته بوده و فقط باعث پیچیده‌تر شدن تفسیر می‌شود که بیشتر شدن مقادیر HTA بالای یک مقدار آستانه تعریف شده در داده‌ی اصلی این مشکل را بهبود می‌بخشد.

۲-۵-۶- نسبت مشتق متعامد

اما اشکال فیلترهای مذکور بخصوص فیلترهای بنیان شده بر روی زاویه تیلت این است که آن‌ها به محاسبه مشتق قائم از داده نیاز دارند و این عمل سبب می‌شود که فیلتر نسبت به محاسبات حساس می‌شود. کوپر و کوهن (۲۰۰۷) فیلتر نسبت مشتق متعامد (DR) به صورت زیر ارائه دادند.

$$DR = \tan^{-1} \left(\frac{\partial f / \partial x}{|\partial f / \partial y|^n} \right) \quad (2-24)$$

به‌گونه‌ای که فاکتور n اجازه می‌دهد که توانای فیلتر کنترل شود، زمانی که n کوچک (مثلاً از مرتبه ۰,۱) است، مخرج تقریباً تاثیر خود را از دست می‌دهد. نتیجه مشابه مشتق جهت‌ی استاندارد می‌شود و هنگامی که n به صورت تدریجی افزایش پیدا می‌کند، پاسخ فیلتر در لبه‌ها بیشینه می‌شود. این افزایش تا جایی که پاسخ مناسبی داشته باشد و بسته به داده متفاوت است می‌تواند ادامه پیدا کند.

نسبت مشتق در مقایسه با دیگر فیلترها جواب واضح تری اطراف پیک‌های آنومالی دارد و به‌خاطر عدم استفاده از مشتق قائم برای محاسبه نیز بسیار سریع است. در واقع نسبت مشتق از این حقیقت استفاده می‌کند که نه فقط اشکال خطی یک گرادیان قائم بزرگ در جهت برخوردشان خواهند داشت آن‌ها همچنین یک گرادیان کوچک‌تر موازی با آن خواهند داشت. این فیلتر در شناسایی لبه در ساختارهای افقی به‌طور مثال گسل‌ها و دایک‌ها و در متعادل کردن دامنه‌های آن‌ها خوب عمل می‌کند [Cooper & Cowan, 2007].

۲-۵-۷- زاویه تنا

زاویه تنا نیز یک فیلتر مؤثر است که با استفاده از دامنه سیگنال تحلیلی مجموع مشتق افقی را به هنجار می‌کند. این بهنجارش به‌صورت کنترل‌گر عمل می‌کند و سبب از دست رفتن برخی اطلاعات دامنه و برخی دیگر آشکارتر می‌شود. اندازه این زاویه بین صفر تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند؛ زیرا از گرادیان افقی برای تعریف سطح افق استفاده می‌شود. اگرچه این روش فقط به‌اندازه‌ی زاویه منحصر می‌شود، ولی نتیجه آن یک تصویر خوب است که تفسیر آن به‌آسانی امکان‌پذیر است [Wijns et al., 2005].

$$\cos(\theta) = \frac{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2}}{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2 + (\partial f / \partial z)^2}} \quad (2-25)$$

هنگامی که بردار سیگنال تحلیلی (مخرج کسر) از بالای یک مرز قائم می‌گذرد می‌چرخد، بنابراین دامنه سیگنال تحلیلی یک مقدار بیشینه بالای آن مرز خواهد داشت. مجموع مشتق افقی نیز (صورت کسر) بالای مرز مقداری بیشینه دارد و مقادیر صفری نیز در هر دو طرف مرز یا لبه خواهد داشت. در نتیجه مقدار $\cos(\theta)$ در بالای مرز یا لبه بیشینه خواهد شد، اما به‌خاطر تقاطع‌های صفر مشتق افقی، با دو مقدار صفر محصور می‌شود. این موضوع مهم است به‌خاطر اینکه $\cos(\theta)$ ، روی مناطق آرام مغناطیسی یا جایی که تباین چگالی اندک باشد یعنی جایی مشتقات نزدیک صفر است، همچنان بزرگ باقی می‌ماند. به‌علاوه مقادیر کمینه مشخصاتی هم از عمق مرز و هم جهت شیب ارائه می‌دهد. هنگامی که

مرز به سطح نزدیک‌تر است، $\cos(\theta)$ یک حالت تیزتری دارد. محدوده تغییرات این فیلتر بین صفر تا یک متغیر است [Wijns et al., 2005].

۲-۵-۸- اختلاف استاندارد بهنجار

فیلتر اختلاف استاندارد بهنجار شده^۱ NSTD که بر تکنیک‌های آماری بنا شده است، می‌تواند دامنه لبه آنومالی‌های بزرگ و کوچک را به صورت هم‌زمان قابل مشاهده کند [Cooper & Cowan, 2008].

$$NSTD = \frac{\sigma \frac{\partial f}{\partial z}}{\sigma \frac{\partial f}{\partial x} + \sigma \frac{\partial f}{\partial y} + \sigma \frac{\partial f}{\partial z}} \quad (۲۶-۲)$$

که در آن که مقدار انحراف استاندارد (σ) در معادله با استفاده از یک پنجره مربعی متحرک در داده‌های نقطه‌ای محاسبه می‌شود. انحراف استاندارد می‌تواند در یک جهت معین محاسبه شود که ترجیحاً لبه‌های آنومالی در آن جهت را بارز می‌کند. پنجره‌های بزرگ‌تر در مقایسه با پنجره‌های کوچک‌تر کمتر به نویز حساس هستند، اما این باعث می‌شود که لبه‌های کوچک‌تر کمتر بارز شوند. این به عهده کاربر است که اندازه پنجره مطلوب را انتخاب کند. محاسبه اختلاف استاندارد با استفاده از یک پنجره متحرک موجب از دست رفتن یک محدوده تقریباً ۱/۲ سایز پنجره، در اطراف لبه‌های تصویر می‌شود. اگر مشتقات افقی و عمودی از میدان در دسترس باشند، NSTD می‌تواند برای داده‌های شبکه‌بندی نشده نیز محاسبه شود، اگرچه که آن برای داده‌های شبکه‌بندی شده طراحی شده است.

۲-۵-۹- فیلتر پردازش تصویری لاپلاس

از روش‌های متداول دیگر آشکارسازی لبه، استفاده از فیلترهای پردازش تصویر هست. فیلترهایی مانند سوبل، روبرت که از مشتق درجه اول استفاده می‌کنند و فیلترهای جهتی می‌باشند. همچنین فیلتری مانند لاپلاس که از مشتق درجه دوم استفاده می‌کند. لاپلاس دارای چند نوع است و توانایی

^۱ Normalized Standard Deviation

این را دارد که لبه‌ها را در هر جهتی بارز کند. فیلتر لاپلاس از حل مستقیم معادله لاپلاسی به وسیله روش تفاضل محدود در روش‌های عددی محاسبه می‌شود. مقادیری عددی فیلترهای لاپلاسی در (شکل ۸-۲) ارائه شده است. فیلتر لاپلاس نوع اول و چهارم تا حدودی در آشکارسازی گوشه‌ها بهتر عمل می‌کنند [Arısoy & Dikmen, 2011].

-۱	۰	-۱
۰	۴	۰
-۱	۰	-۱

د: نوع چهارم

۱	-۲	۱
-۲	۴	-۲
۱	-۲	۱

ج: نوع سوم

۰	-۱	۰
-۱	۴	-۱
۰	-۱	۰

ب: نوع دوم

-۱	-۱	-۱
-۱	۸	-۱
-۱	-۱	-۱

الف: نوع اول

شکل ۸-۲: الف) فیلتر لاپلاس نوع اول، ب) فیلتر لاپلاس نوع دوم، ج) فیلتر لاپلاس نوع سوم، د) فیلتر لاپلاس نوع چهارم.

۲-۵-۱۰- نسبت مشتق بهنجار و زاویه بهنجار بر مشتق قائم

بر اساس بنیان فیلترهای بالا فیلتری دیگر ارائه شد که با بهنجار کردن مجموع نسبت مشتق متعامد

در راستای X و Y به وسیله مجموع مشتق افقی مرتبه نیم به صورت زیر به دست می‌آید.

$$NDR = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f / \partial x}{\partial^{0.5} f / \partial y^{0.5}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f / \partial y}{\partial^{0.5} f / \partial x^{0.5}}\right)^2}}{|\partial f / \partial z|} \right) \quad (27-2)$$

$$\sqrt{\left(\partial^{0.5} f / \partial x^{0.5}\right)^2 + \left(\partial^{0.5} f / \partial y^{0.5}\right)^2}$$

این فیلتر که نسبت مشتق بهنجار^۱ NDR نامیده شده، به خوبی لبه‌ها را در هر جهتی بارز می‌کند

و در حالی که از dx و dy مرتبه نیم استفاده می‌کند ولی تغییر فازی روی داده‌ها به وجود نمی‌آورد یعنی

جایگاه مرزها را تغییر نمی‌دهد همچنین در مقایسه با دیگر فیلترها جواب تیزتری اطراف بیشینه‌های

آنومالی دارد. استفاده از مرتبه کامل مشتق افقی بجای مرتبه نیم به خاطر هم‌ترازی در صورت و مخرج

کسرها پاسخ خوبی ندارد. در واقع این فیلتر مشابه مجموع مشتقات افقی بهنجار است که به وسیله‌ی

مشتقات افقی از مرتبه نیم نیز بهنجار شده است و شباهت‌های هم با فیلتر تتا دارد.

^۱ Normalized Derivatives Ratio.

حاصل فیلتر NDR یک زاویه است که میزان تغییرات فاز داده را روی سطح نشان می‌دهد و بزرگی آن بین صفر تا ۹۰ تغییر می‌کند. مقدار حاصل از فیلتر NDR روی قسمت‌های از نقشه که داده به تدریج و آرام تغییر می‌کند، یک مقدار حداقل می‌شود و در قسمت‌های از نقشه که داده تغییرات سریع دارد بسیار حساس است و مشابه فیلتر تتا روی لبه‌ها بیشینه می‌شود. به همین دلیل همه لبه‌ها را به خوبی آشکار می‌کند.

نکته مهم دیگر توانایی این فیلتر در متعادل‌سازی آنومالی‌های بزرگ و کوچک دامنه در کنار هم هست. محاسبه مشتق از مرتبه کمتر از یک به وسیله تبدیل فوریه در فضای فرکانس امکان‌پذیر است؛ اما است که داده‌ها دارای یک قدرت تفکیک تصویری بالایی باشند. در مواردی که وضوح یا قدرت تفکیک کم است به‌ویژه در داده‌های گرانی می‌توان به وسیله درون‌یابی داده‌ها تعداد نقاط شبکه را به صورت مصنوعی افزایش داد که به این ترتیب وضوح یا تعداد نقاط نیز به صورت مصنوعی افزایش پیدا می‌کند که البته همواره چنین کاری امکان‌پذیر نیست.

فیلتر نسبت مشتق را به صورت یک زاویه بهنجار شده در راستای قائم نیز می‌توان تعریف نمود که زاویه بهنجار نسبت به مشتق قائم^۱ (NAVD) نام دارد و به صورت زیر معرفی می‌شود.

$$\text{NAVD} = \frac{\tan^{-1} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial^{0.5} f / \partial x^{0.5}}{\partial^{0.5} f / \partial y^{0.5}} \right)^2 + \left(\frac{\partial^{0.5} f / \partial y^{0.5}}{\partial^{0.5} f / \partial x^{0.5}} \right)^2} \right)}{\left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|} \quad (28-2)$$

این فیلتر لبه‌ها را به خوبی بارز می‌کند و مرزها را بیشینه می‌کند و مقدار آن همواره مثبت است. از مشتق مرتبه یک بجای مشتق مرتبه نیم نیز می‌توان استفاده کرد؛ اما مشتق نیم برای کاهش نوفه داده‌ها و نمایش بهتر آنومالی‌ها پیشنهاد می‌شود. در واقع یک زاویه بر اساس نسبت مشتقات افقی است که به وسیله dz بهنجار شده است و یک فیلتر مؤثر در آشکارسازی لبه‌هاست.

^۱ Normalized Angle respect to Vertical Derivative

اعمال فیلترهای فازی

روی داده‌های مصنوعی

۳-۱- مقدمه

هدف از مدل‌سازی افزایش فهم از مکانیسم فرآیندهایی است که در یک سیستم اتفاق می‌افتد و همچنین بررسی اثر تغییر پارامترهای مختلف در مدل بر روی آنومالی حاصل از آن را امکان‌پذیر می‌سازد. در واقع مدل‌سازی هنر نمایش یک واقعیت فیزیکی به صورت یک مدل انتزاعی است که برای تحلیل و محاسبه در دسترس هستند [شریفی، ۱۳۹۱].

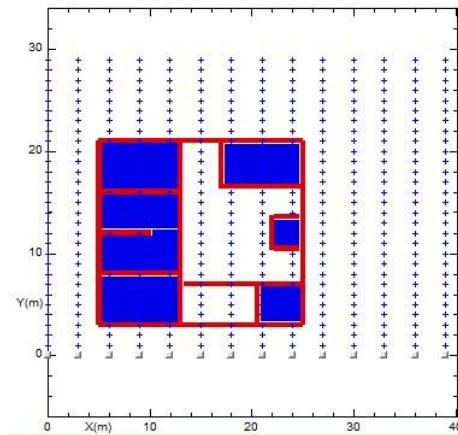
به‌طور کلی در داده‌های میدان پتانسیل، به ترتیب، مدل‌سازی تعیین شکل دو یا سه‌بعدی همراه با تباین چگالی و مغناطیدگی آنومالی گرانی و مغناطیسی است و یکی از مهم‌ترین بخش‌های تفسیر داده‌ها به شمار می‌رود. در مجموع مدل‌سازی به دو شیوه‌ی مدل‌سازی پیشرو و مدل‌سازی وارون انجام می‌شود. در این فصل سعی بر این است که با توجه به شرایط واقعی موجود در محدوده برداشت و بهره‌گیری از مدل‌های هندسی، مدل مصنوعی مرتبط ساخته شود.

در داده‌های مصنوعی برخلاف داده‌های واقعی چشمه‌ی آنومالی‌ها مشخص است. به همین دلیل تهیه مدل مصنوعی برای بررسی روش‌های مختلف پردازشی، تأثیر پارامترهای مختلف بر آنومالی گرانی مشاهده‌ای و شناخت اثرات گرانشی اجسام با اشکال هندسی ساده و ترکیبی مفید است. همچنین می‌توان دقت روش‌های پردازشی را برای تعیین پارامترهای مختلف را بررسی کرد. برای تهیه و ساخت مدل‌های مصنوعی از نرم‌افزار Potensoft استفاده شده است.

۳-۲- تعریف ساختار مدل مصنوعی

با توجه به اینکه هدف اصلی در این تحقیق بررسی کارآیی فیلترهای فازی محلی در تفکیک و شناسایی ساختارهای قدیمی است؛ بنابراین در تهیه و ساخت مدل سعی شده است از اطلاعات شناخته شده و موجود در محوطه‌ی باستانی تپه حصار استفاده شود. بدین معنی که مدل چهارگوش با تفکیک دیوارها و اتاقک‌های همانند (شکل ۳-۱) ساخته شد و اثر گرانی و مغناطیس آنها محاسبه گردید. مشابه

داده‌های واقعی فاصله ایستگاه‌های برداشت ۱ متر و فاصله پروفیل‌های ۳ متر برای مدل گرانی و برای مدل مغناطیسی همان فواصل ایستگاهی یک متر و فاصله پروفیل ۱/۵ متر در نظر گرفته شد.



شکل ۳-۱: مدل مصنوعی متشکل از دیوارها (رنگ قرمز) با عرض ۵۰ سانتی‌متر و اتاقک‌ها (رنگ آبی) با ابعاد مختلف عمق هر دو ۲ متر و مرکز آن‌ها در فاصله ۱/۳- متر در راستای محور Z. یک لایه‌ی پوششی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و با گسترش بیشتر به ابعاد (۲۸×۳۶).

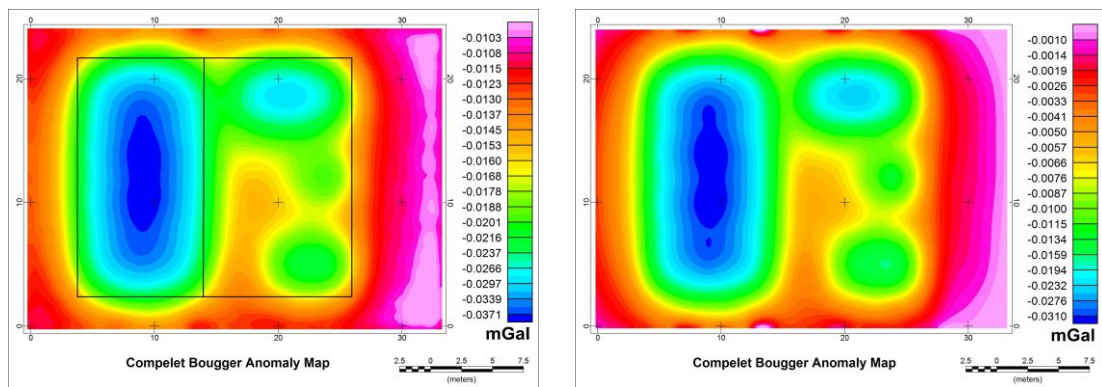
در این مدل از ۷ اتاقک با اندازه‌های متنوع (با رنگ آبی) و دیوارهایی نیز به ارتفاع ۲ متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر (با رنگ قرمز) استفاده شده‌است. یک لایه‌ی سطحی به ارتفاع ۰/۳ متر که مرکز آن در فاصله ۰/۱۵ متری زیر سطح زمین در راستای محور Z قرار گرفته نیز در نظر گرفته شد تا که کل سطح مدل و بیشتر از آن را بپوشاند (شکل ۳-۱). برای هم‌خوانی مدل با عارضه‌های واقعی در محوطه تپه‌حصار این شرایط به مدل تحمیل شد.

اما چگالی دیوارها ۲/۶ و اتاقک‌ها ۲/۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. تباین چگالی ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بین دیوار و اتاق یک تباین نسبتاً واقعی در سازه‌های باستانی است. لایه سطحی نیز به‌عنوان یک لایه خاک با چگالی ۱/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب که محوطه را پوشانده نیز تعبیه شده است. چگالی زمینه نیز برای مشکل‌تر کردن مسئله ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نزدیک چگالی دیوارها در نظر گرفته شد. مغناطیدگی اتاقک‌ها ۰/۰۱۵۰، دیوارهای خشتی ۰/۰۰۸۰، لایه سطحی ۰/۰۰۰۲۵ و زمینه نیز ۰/۰۰۰۲۰ در واحد SI در نظر گرفته شده است؛ زیرا مغناطیدگی برای

خاک رس بین ۰/۰۰۰۲۵۰ - ۰/۰۰۰۱۷۰ گزارش شده است [Newson, 1988]. به دلیل طبیعت رسی تپه حصار این مبنا برای مغناطیدگی در مدل سازی استفاده شد.

۳-۲-۱- داده‌ی مصنوعی گرانی حاصل از مدل مصنوعی

بر اساس مدل تعریف شده در بخش قبل، اثر گرانی آن در نرم افزار potent محاسبه و نقشه گرانی آن ترسیم شد (شکل ۲-۳). (شکل ۲-۳ الف) نقشه بوگه کامل حاصل از مدل مصنوعی (شکل ۱-۳) را نشان می‌دهد؛ که به منظور بررسی بهتر و نتیجه مدل فوق با ۲ درصد نوفه تصادفی نیز تهیه و ترسیم شد (شکل ۲-۳ ب).



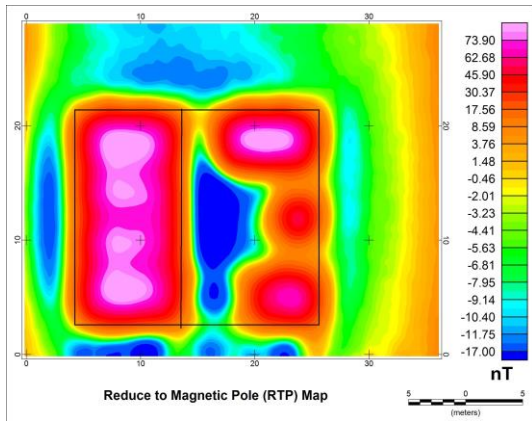
(ب)

(الف)

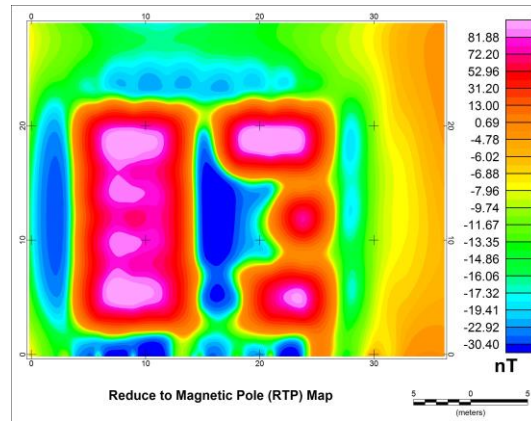
شکل ۲-۳: آنومالی گرانی مصنوعی بوگه کامل مدل مصنوعی. الف) بدون نوفه. ب) همراه با ۲ درصد نوفه تصادفی استاندارد.

۳-۲-۲- داده‌ی مصنوعی مغناطیسی حاصل از مدل مصنوعی

همانند نقشه گرانی در (شکل ۳-۳ الف) نقشه شدت میدان کل تبدیل به قطب حاصل از مدل مصنوعی در (شکل ۱-۳) ارائه شده است، البته در قسمت (ب) همین شکل نیز ۲ درصد نوفه تصادفی به آن اضافه شده است. برای تهیه این مدل براساس پارامترهای زاویه میل $54/6$ و انحراف $3/9$ درجه (براساس مختصات جغرافیایی تپه حصار) میدان کل محاسبه شده و سپس به قطب مغناطیسی برگردانده شده است.



(ب)



(الف)

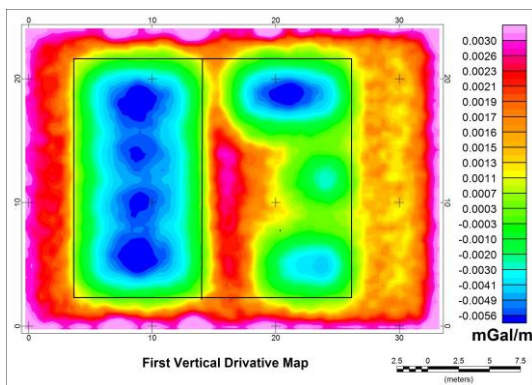
شکل ۳-۳: نقشه تبدیل به قطب آنومالی مغناطیسی شدت میدان کل مدل مصنوعی. الف) بدون نوفه. ب) همراه با ۲ درصد نوفه تصادفی استاندارد.

۳-۳- اعمال فیلترها روی داده‌های مصنوعی

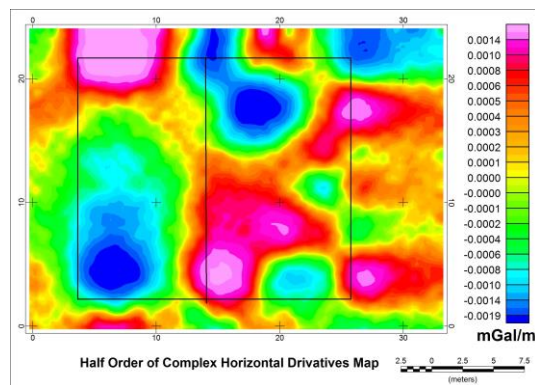
۳-۳-۱- مشتقات افقی و قائم

نقشه حاصل از عملکرد ترکیبی مشتقات افقی با مرتبه نیم روی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی به ترتیب در (شکل ۳-۴-الف) و (شکل ۳-۵-الف) ارائه شده است. استفاده از مرتبه‌های کمتر از یک مشتق افقی باعث جابجایی کمتر مرزها و همچنین حساسیت کمتر نسبت به نوفه شده است. نقشه ترکیبی عوارض خطی در آزیموت مثبت و منفی ۴۵ درجه را بهتر بارز می‌کند. جابجایی مرزها نیز در این نقشه مشخص است.

(شکل ۳-۴-ب) و (شکل ۳-۵-ب) نیز به ترتیب نقشه مشتق قائم اول آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی مربوطه را نشان می‌دهد همان‌طور که انتظار می‌رود این فیلتر مرزها را به صورت ویژه مشخص نکرده است؛ اما در تعیین مرزها در مدل مصنوعی نسبتاً مؤثر است. از سوی دیگر با افزایش نوفه و وجود بی‌هنجارهای با دامنه کوچک‌تر و یا عمیق‌تر، از کیفیت آن کاسته می‌شود.

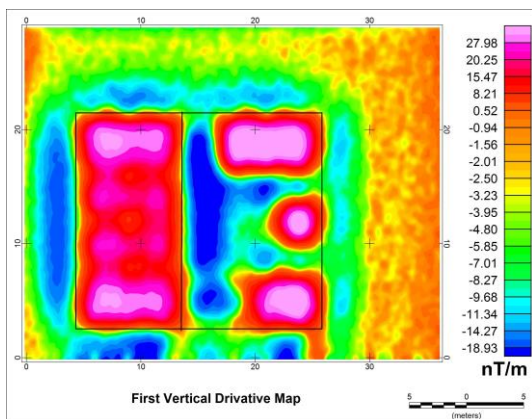


(ب)

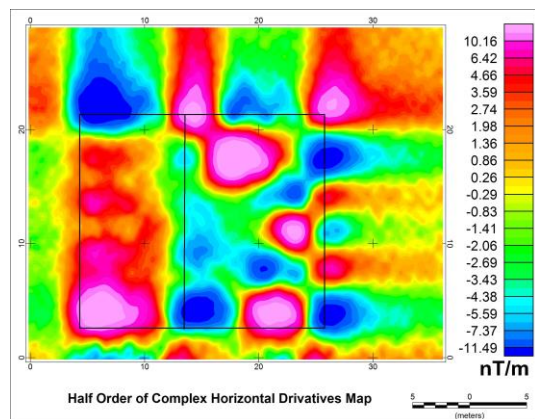


(الف)

شکل ۳-۴: الف) نقشه مشتق افقی مرتبه نیم آنومالی گرانی مدل مصنوعی. ب) نقشه مشتق قائم مرتبه اول آنومالی گرانی مدل مصنوعی.



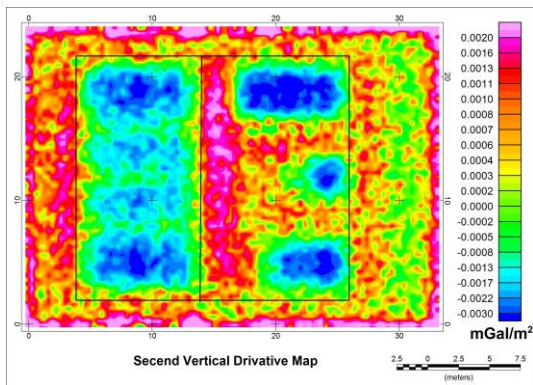
(ب)



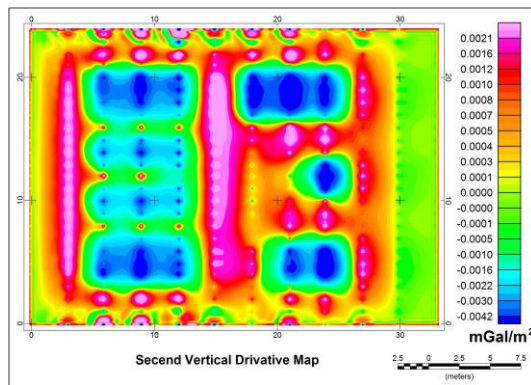
(الف)

شکل ۳-۵: الف) نقشه مشتق مرتبه نیم آنومالی مغناطیسی. ب) نقشه مشتق قائم مرتبه اول آنومالی مغناطیسی مدل مصنوعی.

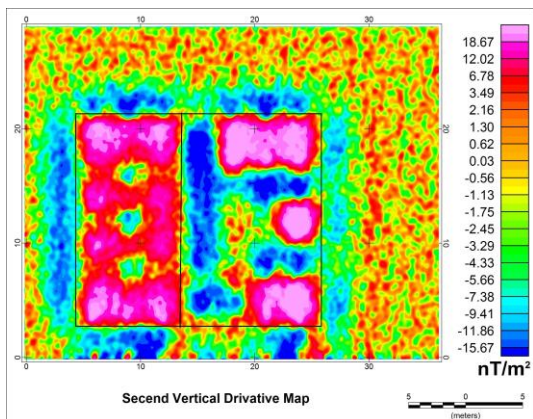
(شکل ۳-۶) نقشه مشتق قائم روی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی مربوطه را در دو حالت بدون و با نوفه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هرچند شناسایی و تفکیک دیواره‌ها و ساختارهای کلی خوب نشان داده شده؛ اما این نتایج به نوفه حساس بوده و بنابراین پیش‌بینی می‌شود که عملکرد آن‌ها برای داده‌های واقعی چندان مناسب نباشد.



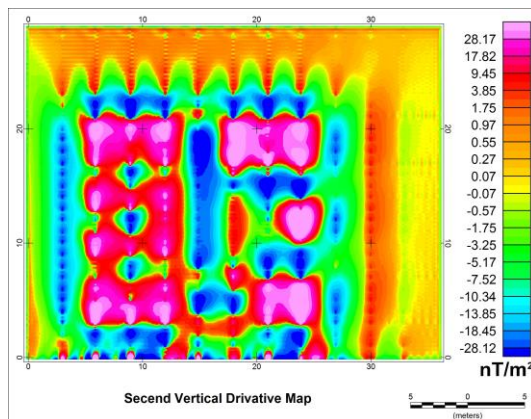
(ب)



(الف)



(د)

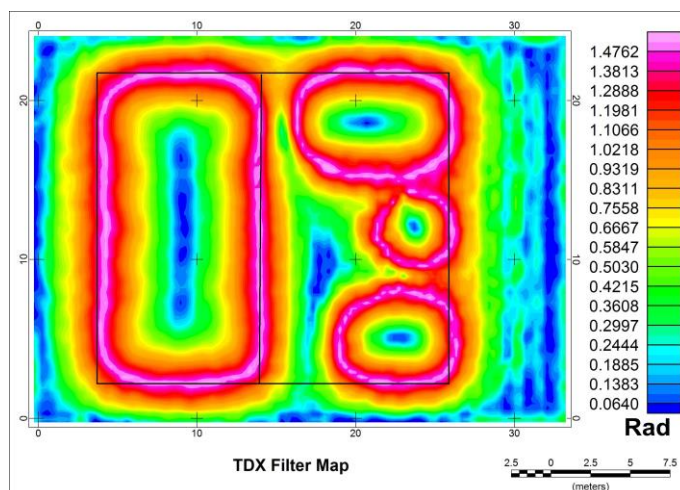


(ج)

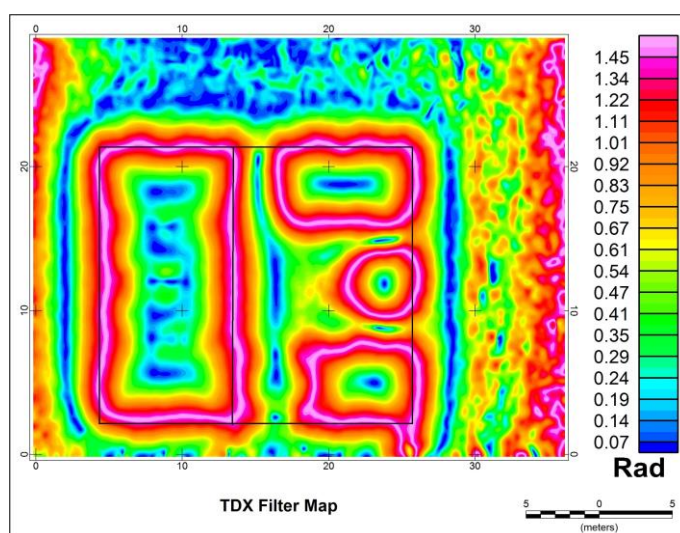
شکل ۳-۶: نقشه مشتق قائم دوم داده‌های مصنوعی. (الف) روی آنومالی گرانی بوگه کامل. (ب) روی آنومالی گرانی بوگه کامل به همراه نوفه. (ج) روی آنومالی مغناطیسی. (د) روی آنومالی مغناطیسی به همراه نوفه.

۳-۲-۳- مجموع مشتق افقی

همان‌گونه که در فصل قبل اشاره شد، در این فیلتر از داده‌های پتانسیل در راستای محورهای X و Y مشتق گرفته و از فرمول مربوطه مقدار TDX محاسبه شد (شکل ۳-۷). مطابق شکل می‌توان گفت که حتی با وجود نوفه عملکرد خوبی در تفکیک مرزها داشته است؛ بطوری که روی مرزها مقدار فیلتر بیشینه است. البته اثر آن روی نقشه مغناطیسی به خاطر طبیعت متراکم‌تر آن نسبت به گرانی بهتر بوده است. به‌رحال این فیلتر مرز آنومالی‌ها را بیشینه می‌کند.



(الف)

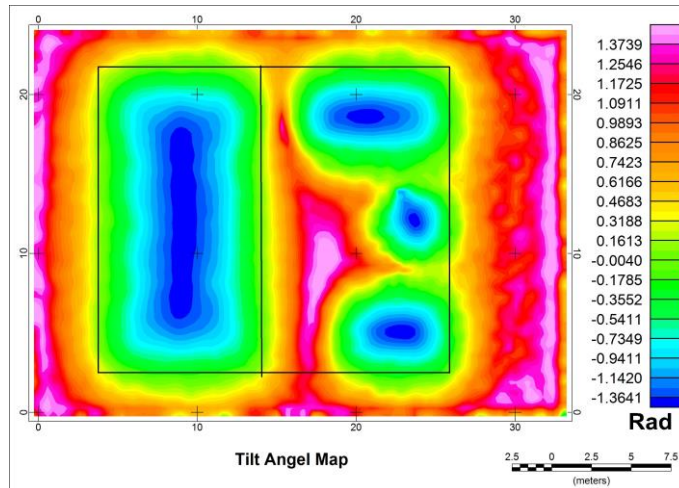


(ب)

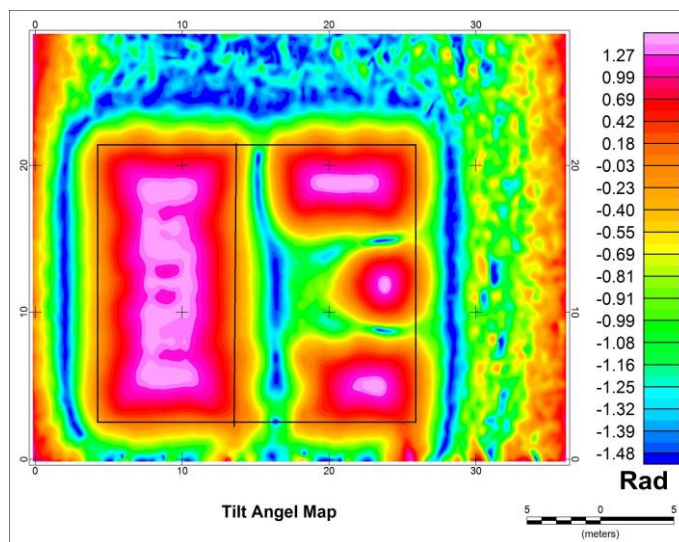
شکل ۳-۷: نقشه فیلتر TDX روی داده‌های مصنوعی همراه با نوفه‌ی. (الف) گرانی. (ب) مغناطیسی.

۳-۳-۳- زاویه تیلت

(شکل ۳-۸) نقشه اثر عملکرد فیلتر زاویه تیلت روی داده‌های مصنوعی گرانی و مغناطیسی نشان می‌دهد. زاویه تیلت همان‌گونه که انتظار می‌رود، در داده‌های گرانی تنها می‌تواند یک نمای کلی از بی‌هنجاری ارائه دهد و در متعادل کردن دامنه‌های آنومالی‌های عمیق‌تر مؤثر است. همان‌گونه که از اشکال اشاره شده قابل مشاهده است، عملکرد این روش‌ها توانمندی خوبی در تشخیص خوب دیواره‌های درونی بخش غربی مدل را ندارد و این موضوع در داده‌های گرانی مشهود است.



(الف)



(ب)

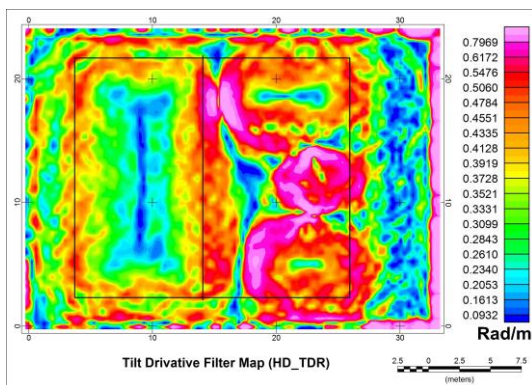
شکل ۳-۸: نقشه فیلتر زاویه تیلت روی داده‌های مصنوعی همراه با نوفه‌ی الف (گرانی. ب) مغناطیسی.

۳-۳-۴- مجموع مشتق افقی زاویه تیلت

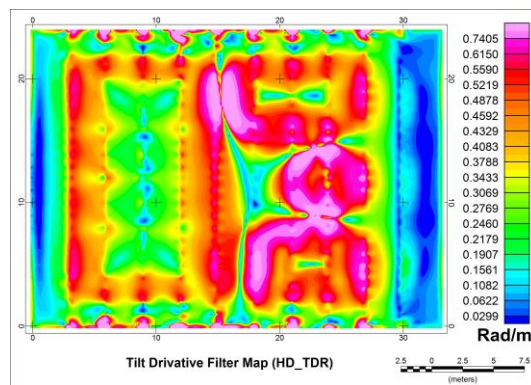
(شکل ۳-۹) نقشه عملکرد فیلتر HDR روی داده‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل هم‌پوشانی

آنومالی‌ها به خوبی مشخص است؛ ولی همان‌طور که انتظار می‌رود نوع فیلتر که منتج از مشتق تیلت

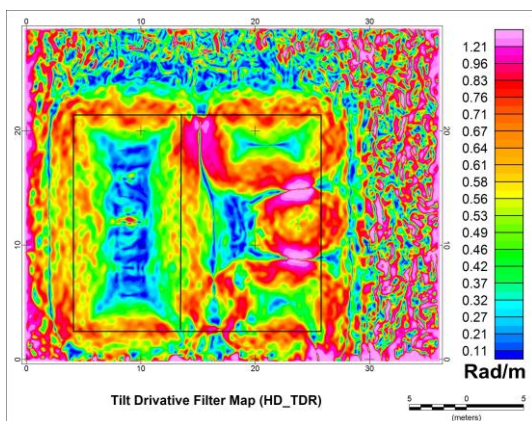
است و به نوفه حساس بوده و از کیفیت ظاهری نقشه‌ها کاسته است.



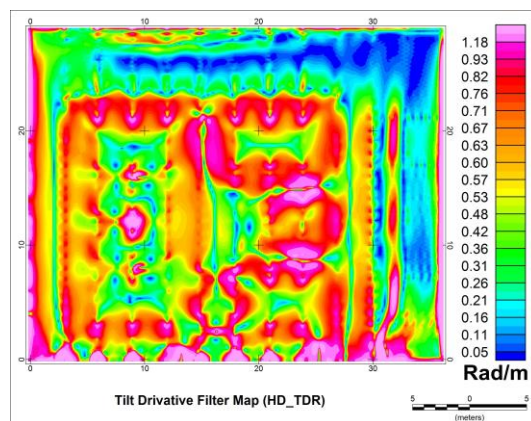
(ب)



(الف)



(و)

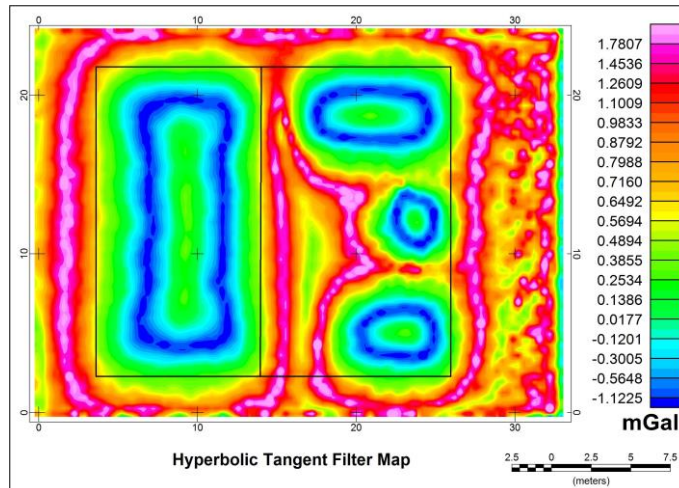


(ه)

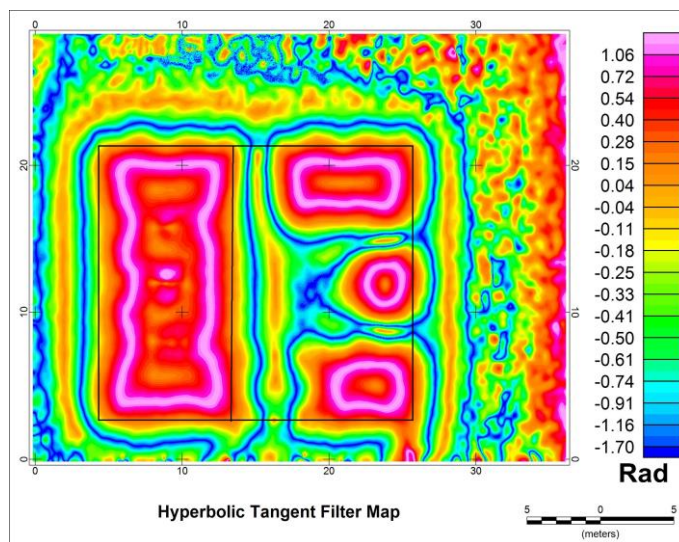
شکل ۳-۹: نقشه فیلتر HDR روی داده‌های مصنوعی (الف) آنومالی گرانی بدون نوفه. (ب) آنومالی گرانی با نوفه. (ج) آنومالی مغناطیسی بدون نوفه. (د) آنومالی مغناطیسی با نوفه.

۳-۳-۵- تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت

عملکرد فیلتر تانژانت هایپربولیک (شکل ۳-۹) در تفکیک مرزها و حدود اتاقک‌ها به صورت کلی پاسخ خوبی ارائه داده است و همچنین در متعادل کردن دامنه آنومالی‌های بزرگ و کوچک موفق است. به‌رحال این فیلتر بیشتر آنومالی‌های دایره‌ای را می‌تواند بارز کند البته اثر نوفه روی این فیلتر قابل ملاحظه نیست.



(الف)

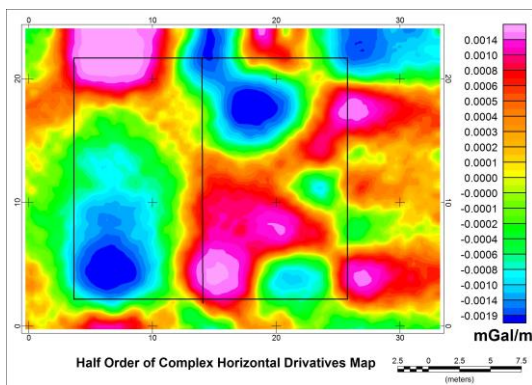


(ب)

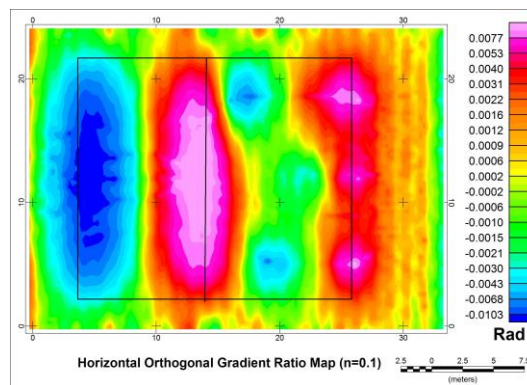
شکل ۳-۱۰: نقشه تانژانت هایپربولیک روی داده‌های مصنوعی همراه با نوفه الف) روی مدل گرانی. ب) روی مدل مغناطیسی.

۳-۳-۶- نسبت مشتق متعامد

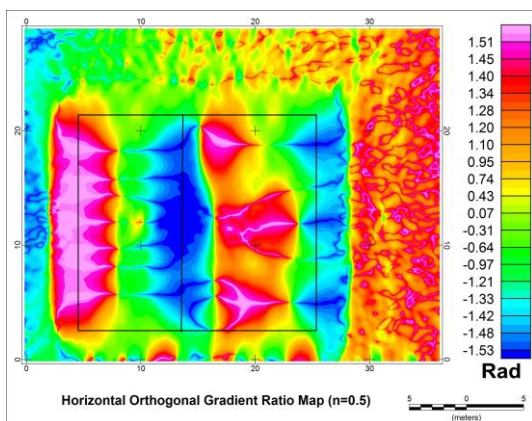
فیلتر نسبت مشتق برای شناسایی آنومالی‌های خطی مناسب است. به ازای n های کوچک ($0/1$) در معادله نسبت مشتق مشابه مشتق افقی در راستای x خواهد شد. به ازای n های بزرگ‌تر مشتق در راستای مولفه‌های افقی متعامد به‌نجار شده و آنومالی‌های خطی در هر جهتی را بارز می‌کند. این فیلتر به علت سادگی و عدم استفاده از مشتق قائم در آن به نوفه حساسیت کمتری است.



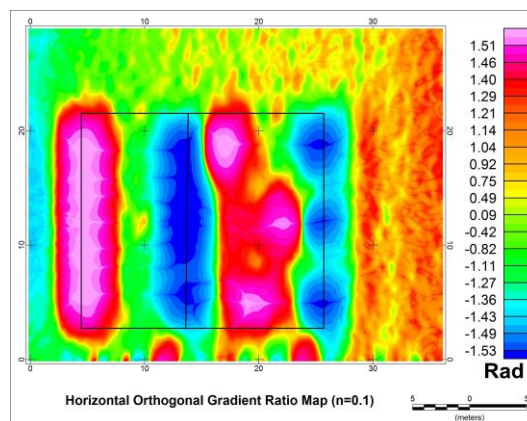
(ب)



(الف)



(د)

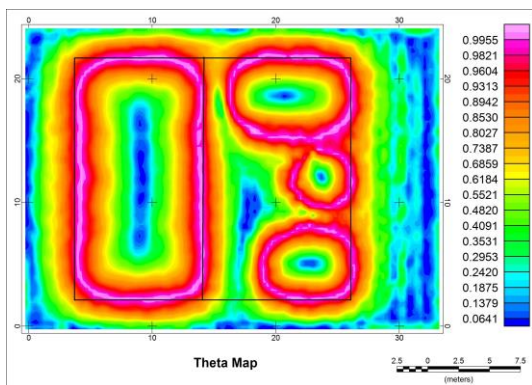


(ج)

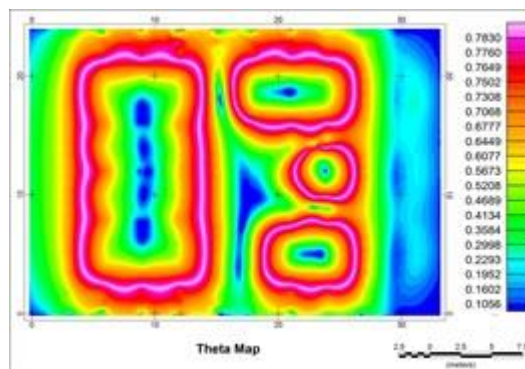
شکل ۳-۱۱: فیلتر نسبت مشتق روی داده‌های مصنوعی همراه با نوفه (الف) روی آنومالی گرانی ($n=0.1$). (ب) روی آنومالی‌های گرانی ($n=0.5$). (ج) روی آنومالی مغناطیسی ($n=0.1$). (د) روی آنومالی مغناطیسی ($n=0.5$).

۳-۳-۷- زاویه تتا

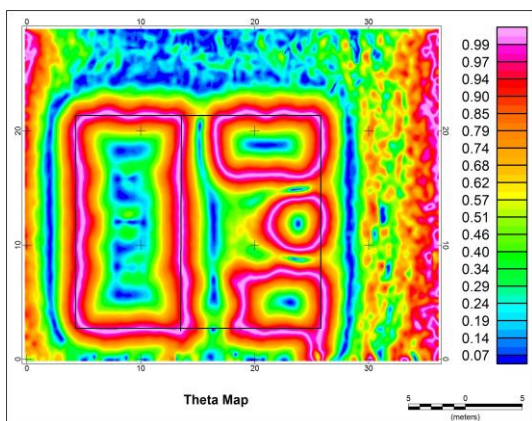
نقشه فیلتر زاویه تتای آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی حاصل از مدل مصنوعی در (شکل ۳-۱۲) ارائه شده است. این فیلتر با متعادل کردن آنومالی‌های بزرگ و کوچک دامنه، پاسخ خوبی داشته است. مرزها بارزسازی شده و به خوبی نشان داده شده‌اند. مرزهای داخلی به خصوص در نقشه‌ی مغناطیسی مشخص شده است که نشان از متعادل شدن آنومالی‌های با دامنه بزرگ و کوچک در نقشه‌های حاصل از این فیلتر است. در نقشه گرانی این فیلتر می‌توان دید که نوفه باعث شده است که مرزهای داخلی محو شوند. این فیلتر به نوفه چندان حساس نیست. به هر حال این فیلتر به عنوان یک فیلتر موثر می‌تواند مرز آنومالی‌ها را بارزسازی می‌کند.



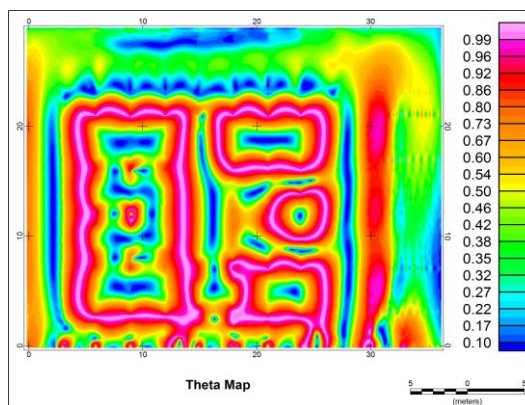
(ب)



(الف)



(د)

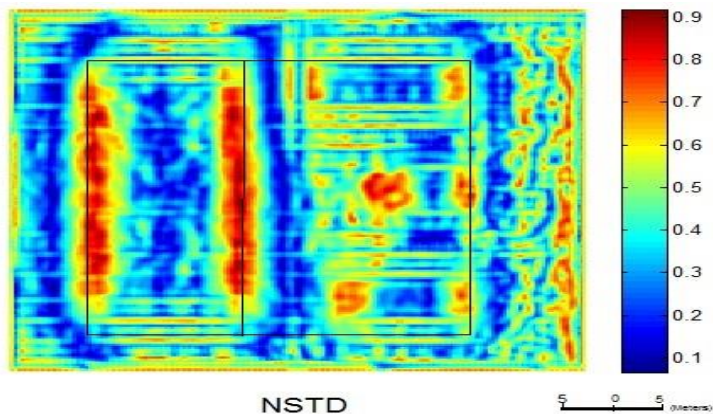


(ج)

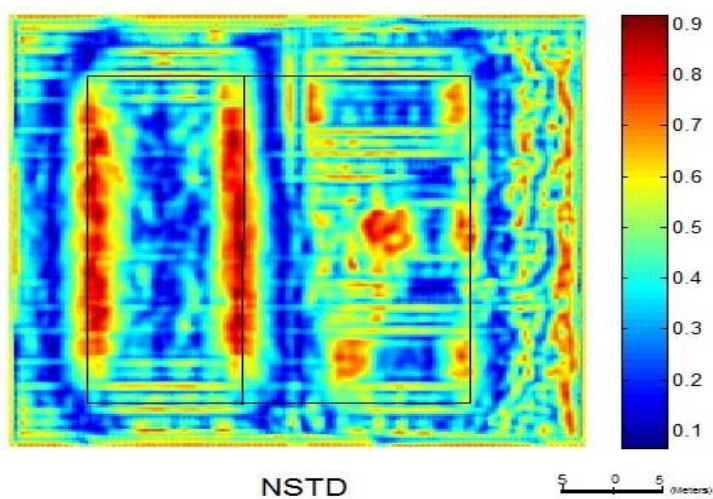
شکل ۳-۱۲: نقشه فیلتر زاویه تنا روی داده‌های مصنوعی الف) آنومالی گرانی بدون نوفه. ب) آنومالی گرانی با نوفه. ج) آنومالی مغناطیسی بدون نوفه. د) آنومالی مغناطیسی با نوفه.

۳-۳-۸- اختلاف استاندارد بهنجار

(شکل ۳-۱۳) نقشه فیلتر عملکرد اختلاف استاندارد بهنجار (NSTD) را روی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی مصنوعی نشان می‌دهد. این فیلتر با متعادل کردن دامنه آنومالی‌های بزرگ و کوچک لبه آنومالی‌های بزرگ و کوچک را در یک زمان قابل مشاهده کند؛ هرچند این عمل با کاهش قدرت تفکیک در پردازش تصاویر همراه است و باعث از بین رفتن کیفیت تصویر می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که معمولاً بر روی داده‌های واقعی که طیف دامنه آنومالی‌ها یا بازه فرکانسی گسترده‌تری دارند نتوان پاسخ مناسبی به خاطر هم‌پوشانی داده‌ها به دست آورد.



(الف)

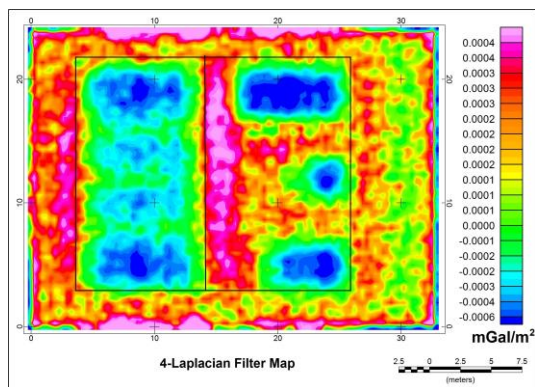


(ب)

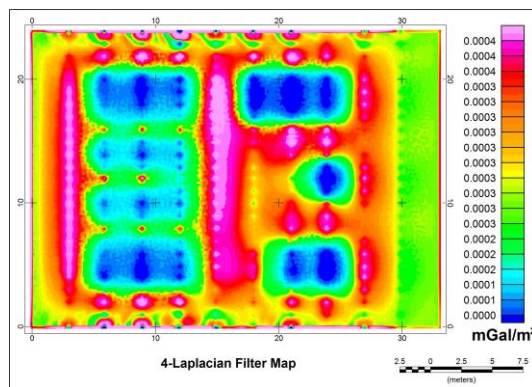
شکل ۳-۱۳: نقشه فیلتر NSTD روی داده‌های مصنوعی همراه با نوفه الف) گرانی. ب) مغناطیسی.

۳-۳-۹- لاپلاس

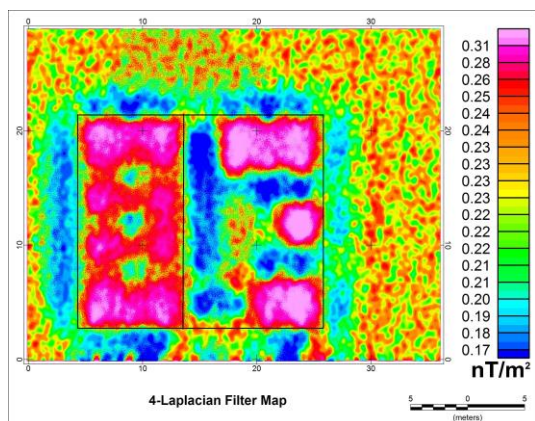
(شکل ۳-۱۴) عملکرد فیلتر لاپلاس مرتبه ۴ روی داده‌های حاصل از مدل مصنوعی گرانی و مغناطیسی است. مطابق این شکل این فیلتر روی مدل مصنوعی نسبتاً پاسخ خوبی ارائه می‌دهد؛ که در محیط‌های با نوفه کم با توجه به سادگی این فیلتر قابل استفاده است.



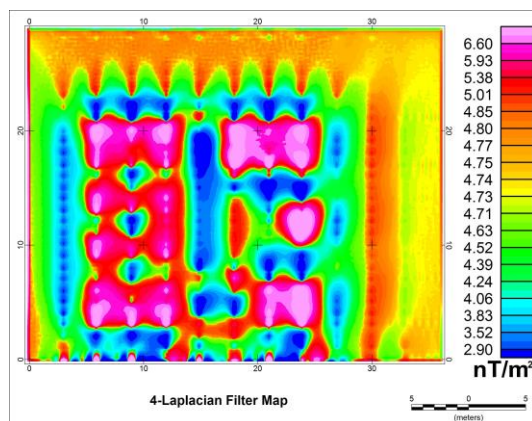
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

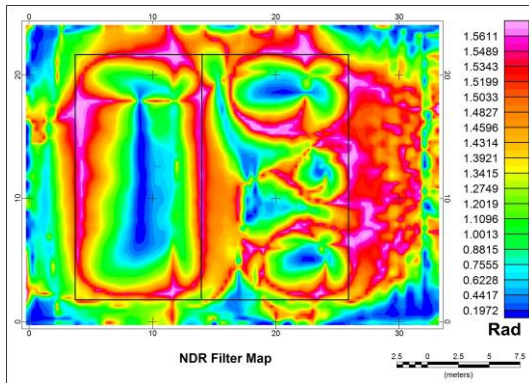
شکل ۳-۱۴: نقشه فیلتر لاپلاس ۴ روی داده‌های مصنوعی الف) آنومالی گرانی بدون نوفه. ب) آنومالی گرانی با نوفه. ج) آنومالی مغناطیسی بدون نوفه. د) آنومالی مغناطیسی با نوفه.

این فیلتر به نوعی مشابه مشتق دوم است زیرا اساس عملکرد آن مشتق دوم داده‌ها است که این خود گواه حساسیت به نوفه‌ی این فیلتر می‌تواند باشد. اما به‌هرحال پیش‌بینی می‌شود که معمولاً در داده‌های واقعی که طیف دامنه آنومالی‌ها گستره فرکانسی نوفه گسترده‌تر هست، نتواند پاسخ مناسبی به خاطر هم‌پوشانی داده‌ها و غلبه نوفه بر آن‌ها ارائه دهد.

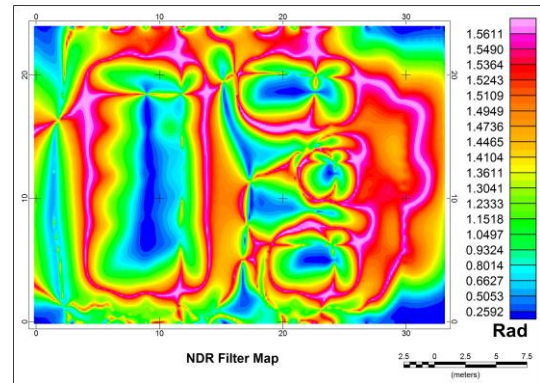
۳-۳-۱۰- نسبت مشتق به‌نجار و زاویه به‌نجار بر مشتق قائم

(شکل ۳-۱۵) نقشه فیلتر نسبت مشتق به‌نجار روی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی مصنوعی را نشان می‌دهد. این فیلتر مرزهای اصلی را مشخص کرده اما در شناسایی مرزهای فرعی نتوانسته عملکرد

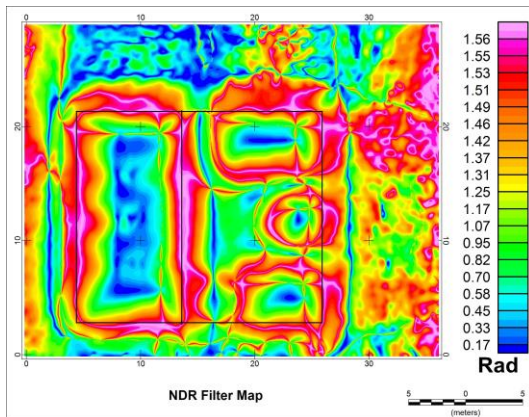
مناسبی داشته باشد. همچنین این فیلتر توانایی زیادی در متعادل کردن آنومالی‌هایی با دامنه بزرگ و کوچک و نمایش آنها در کنار هم دارد.



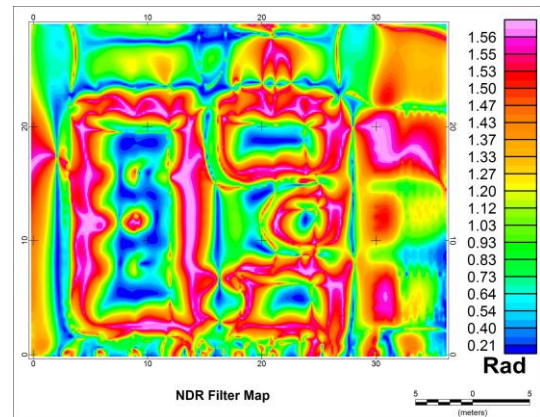
(ب)



(الف)



(د)

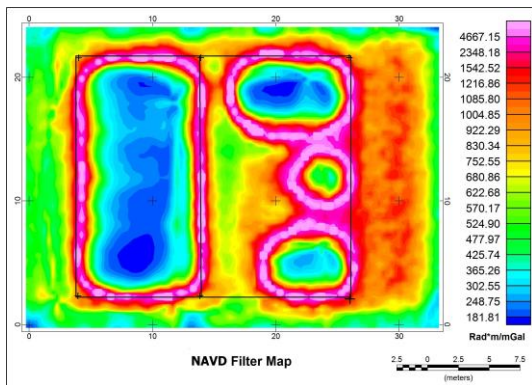


(ج)

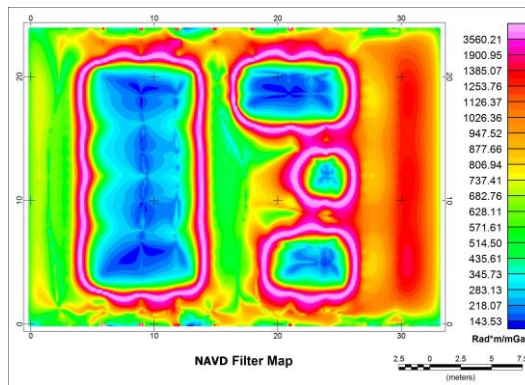
شکل ۳-۱۵: نقشه فیلتر NDR روی داده‌های مصنوعی الف) آنومالی گرانی بدون نوفه. ب) آنومالی گرانی با نوفه. ج) آنومالی مغناطیسی بدون نوفه. د) آنومالی مغناطیسی با نوفه.

پاسخ فیلتر NAVD روی آنومالی گرانی و مغناطیسی در (شکل ۳-۱۶) مشاهده می‌شود. این فیلتر

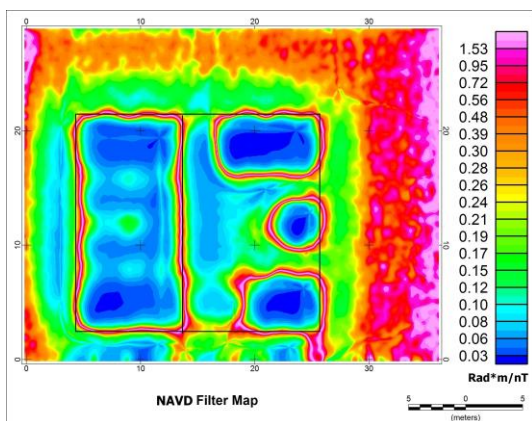
نیز با متعادل کردن دامنه آنومالی‌های بزرگ و کوچک توانسته مرزها را مشخص کند. مرزهای اصلی و مرزهای داخلی نیز به خوبی قابل مشاهده‌اند. تاثیر نوفه نیز در نقشه‌ها کم است.



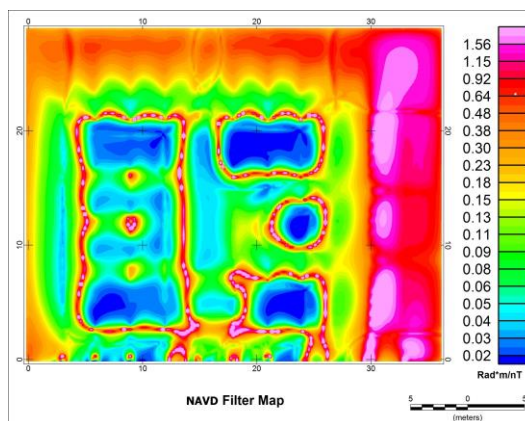
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳-۱۶: نقشه فیلتر NAVD روی داده‌های مصنوعی (الف) آنومالی گرانی بدون نوفه. (ب) آنومالی گرانی با نوفه. (ج) آنومالی مغناطیسی بدون نوفه. (د) آنومالی مغناطیسی با نوفه.

۳-۴- جمع‌بندی مطالب

با توجه گزارش تحلیلی مطروحه در این فصل، اعمال فیلترها روی مدل‌های مصنوعی داده‌های گرانی و مغناطیسی (در دو حالت با و بدون نوفه) می‌تواند شناخت خوبی نسبت به ظرفیت عملکرد هر یک از این فیلترها ارائه نماید. توانایی در شناسایی لبه‌ها، عدم حساسیت به نوفه، توانایی در تفکیک آنومالی‌ها و عدم هم‌پوشانی آنومالی‌های بزرگ و کوچک از شاخصه‌های یک فیلتر مناسب است. همچنین لازم است فیلتر مناسب اهداف اکتشافی این پروژه یعنی آنومالی‌های مربوط به پدیده‌های باستانی باشد. اما از بین فیلترهای ارائه شده بعضی از فیلترها مانند مشتق افقی و قائم، HDR و لاپلاس به نوفه حساس می‌باشند، لذا می‌توان انتظار داشت پاسخ ضعیف‌تری روی داده‌های واقعی داشته باشند، بنابراین

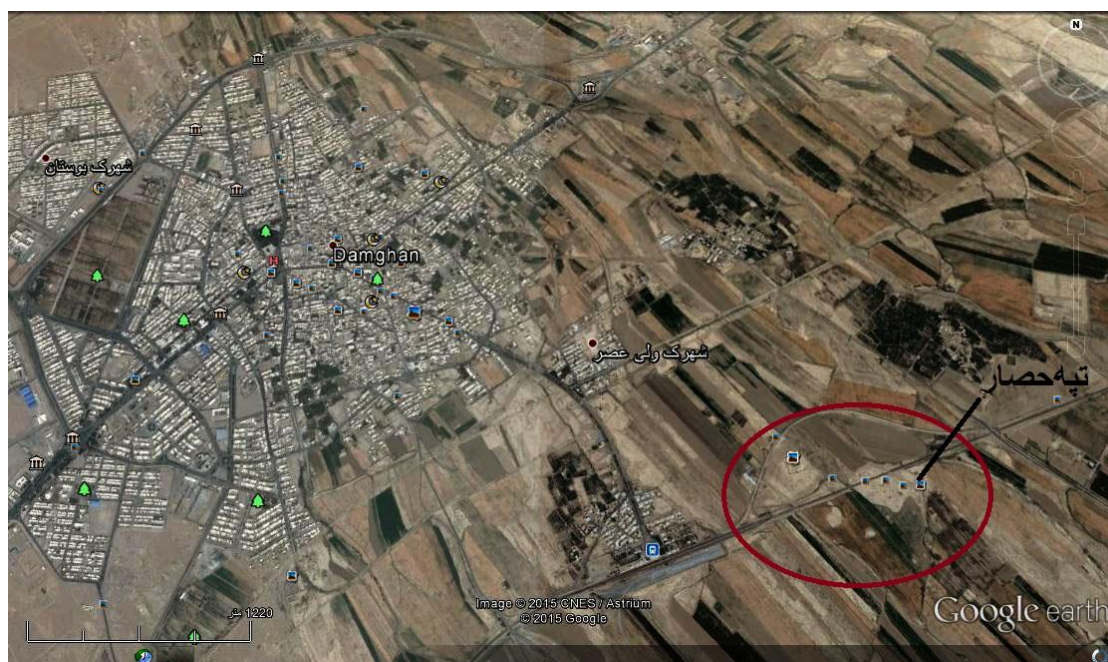
گزینه‌های مناسبی برای داده‌های باستانی نمی‌باشند. فیلتر نسبت مشتق نیز که از مشتق قائم استفاده نمی‌کند، بیشتر برای بارسازی آنومالی‌های خطی مناسب است. TDX و زاویه تتا نیز از لحاظ عملکرد روی داده‌ها؛ فیلترهایی مشابه هستند و هر دو لبه‌های آنومالی را بیشینه می‌کنند. از بین این دو فیلتر زاویه تتا لبه‌های آنومالی‌ها را تیزتر می‌کند و وضوح نقشه را افزایش می‌دهد. زاویه تیلت اگرچه ذاتاً فیلتر شناسایی لبه نیست، ولی برای شناسایی کلی ساختارها مناسب است. نوع هایپربولیک آن نیز به‌عنوان یک فیلتر با قدرت تفکیک بالا مناسب این پروژه است. فیلتر NDR و NAVD که در این تحقیق معرفی شد توانایی خوبی در شناسایی لبه‌ی آنومالی‌ها دارند.

مطالعہ محوطہ باستانی تہ حصار

(کرائی سنجی و معناتیس سنجی)

۴-۱- مقدمه

پیش‌تر مبان‌های روش‌های گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، انواع فیلترهای فازی و عملکرد آنها روی داده‌های مصنوعی ارائه شد. برای بیان عملی و قابل استفاده بودن روش‌های مذکور در باستان‌شناسی، سعی شد تا کارایی آن‌ها روی داده‌های واقعی نیز بررسی شود. در این راستا یک محوطه باستانی به نام تپه‌حصار واقع در جنوب شرق شهر دامغان در استان سمنان برای مطالعه انتخاب شد (شکل ۴-۱).



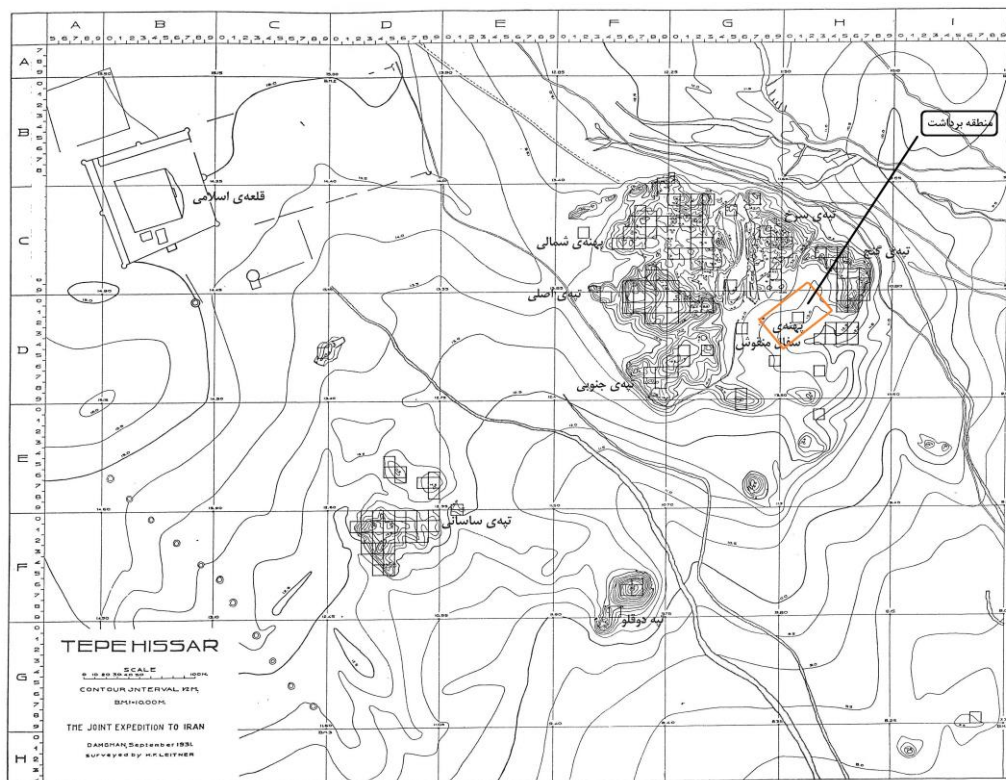
شکل ۴-۱: نقشه هوایی دامغان و محوطه تپه‌حصار در جنوب شرقی آن.

۴-۲- محوطه‌ی باستانی تپه‌حصار

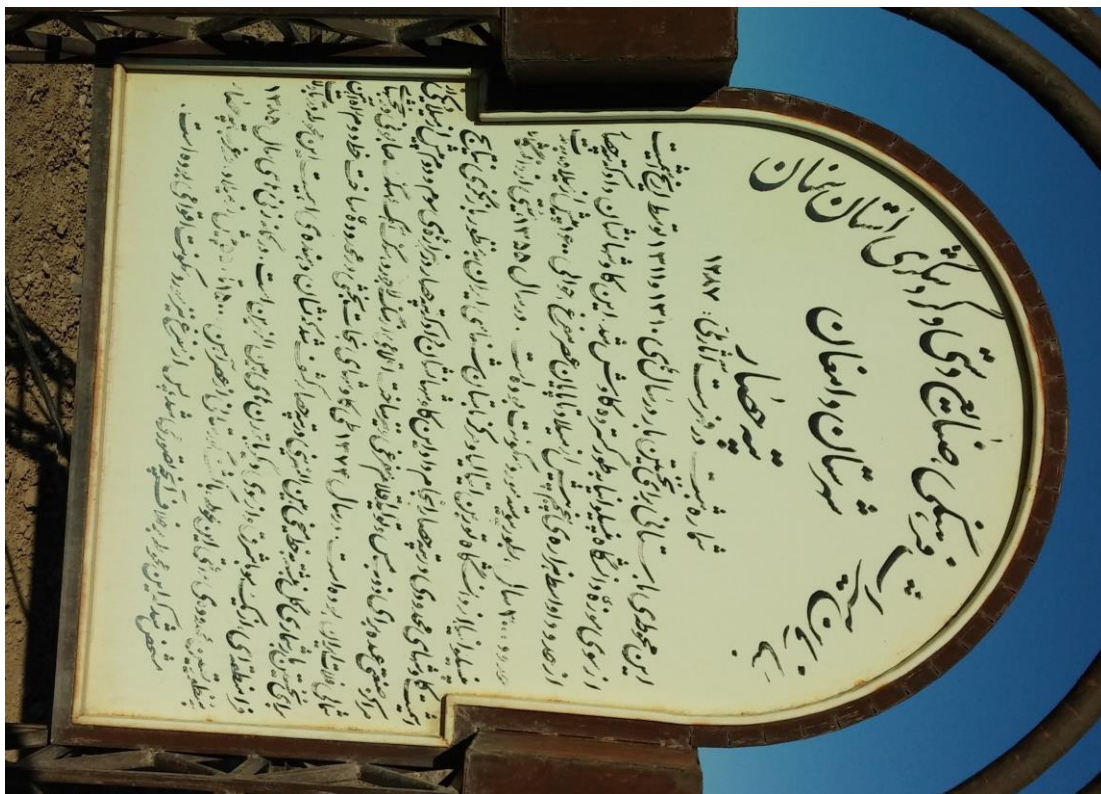
محوطه تپه‌حصار با وسعت بیش از ۱۸ هکتار در جنوب شرقی شهر دامغان و در فاصله ۳۴۰ کیلومتری از شرق تهران واقع است. شکل ۴-۲ نقشه توپوگرافی محوطه باستانی تپه‌حصار به همراه محدوده برداشت داده‌ها را نشان می‌دهد. این محوطه ابتدا توسط اریخ اشمیت^۱ از دانشگاه پنسیلوانیا در طی سال‌های ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ میلادی مورد کاوش‌های باستان‌شناسی قرار گرفت و آثار ارزنده‌ای متعلق به هزاره‌های ۵ تا ۲ ق م آشکار شد. در نتیجه‌ی این کاوش‌ها مشخص شد که این تپه باستانی دارای سه دوره اصلی فرهنگی از اواخر نوسنگی تا پایان عصر مفرغ است. این محوطه پس از این کاوش به‌عنوان

^۱Erich Schmidt

یکی از محوطه‌های کلیدی برای شناسایی فرهنگ‌های همزمان در فلات مرکزی ایران مورد استناد باستان‌شناسان قرار گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته در مرحله دوم باستان‌شناسی در سال ۱۳۵۵ خورشیدی نشان داد که تپه حصار در هزاره‌های چهارم تا دوم پیش از میلاد یکی از مراکز مهم تولیدی برای ساخت انواع اقلام صادراتی نظیر اشیای سنگی و فلزی در فلات ایران بوده است. مرحله سوم کاوش‌ها، به سرپرستی احسان یغمایی، در سال ۱۳۷۴ خورشیدی با کشف شماری گل‌نبشته به خط میخی بابلی قدیم همراه بود. قدمت این گل‌نبشته‌ها به حدود ۲ هزار سال پیش از میلاد برمی‌گردد؛ که شاهد بسیار خوبی بر وجود مبادلات تجاری و فرهنگی بین تمدن‌های بین‌النهرین و فلات ایران بوده است (شکل ۳-۴). آخرین فصل کاوش در تپه حصار توسط هیئتی باستان‌شناسی به سرپرستی کوروش روستایی، از پژوهشکده باستان‌شناسی، در سال ۱۳۸۵ انجام شد. طی این برنامه‌ی میدانی که به‌منظور تعیین عرصه‌ی واقعی محوطه انجام شد، شواهد روشنی مبنی بر استقرار کوچکی از عصر آهن در حاشیه‌های جنوبی و غربی تپه حصار، کارگاه ذوب کانسنگ مس و گورستانی از همین دوره آشکار شد [Roustaei 2010].



شکل ۳-۴: نقشه توپوگرافی محوطه تپه حصار. مربع‌های کوچک بخشه‌های مختلف مناطق حفاری شده است [روستایی، ۱۳۹۱].



شکل ۴-۳: تابلوی ورودی محوطه تپه حصار

درون محوطه برداشت آن چنان که در (شکل ۴-۴) مشاهده می شود یک ترانشه با ابعاد ۱۰×۱۰

متری حفر شده؛ که که دیواره‌های درون آن قابل مشاهده است.



شکل ۴-۴: ترانشه حفاری شده درون محوطه برداشت.

۳-۴- انتخاب روش ژئوفیزیکی و طراحی شبکه برداشت

۳-۴-۱- هدف گذاری

روش‌های ژئوفیزیکی زمانی که بین اهداف مورد مطالعه با محیط اطراف تباین مشخصی از پارامتر فیزیکی موردنظر در اندازه‌گیری وجود داشته باشد، قابلیت تفکیک و آشکارسازی اهداف موردنظر را دارند. تعیین موقعیت این اختلاف‌ها و منبع این آنومالی‌ها و هرگونه اطلاعات دیگری که در مطالعات اکتشافی مطرح است، هدف مطالعات ژئوفیزیکی است. به‌طور کلی اگر تباین ویژگی فیزیکی مورد نظر در هدف بیشتر یا کمتر از محیط میزبان باشد، به کمک روش‌های ژئوفیزیکی قابل شناسایی هستند. در انتخاب طراحی شبکه برداشت ژئوفیزیکی، نوع هدف از اهمیت بسیاری برخوردار است. هر هدفی روش یا روش‌هایی را که باید انتخاب شوند، دیکته می‌کنند، بنابراین در مرحله اول درک اصول هر روش ژئوفیزیکی حائز اهمیت است. خواص فیزیکی وابسته به یک هدف که مدنظر روش‌های ژئوفیزیکی است، بیان‌کننده نوع روش یا روش‌هایی است که باید انتخاب شوند. بدین ترتیب آگاهی از خواص فیزیکی هدف‌های اکتشافی نیز در این مطالعات لازم است (میرکمالی، ۱۳۹۳).

۳-۴-۲- طراحی شبکه برداشت

پیش از این در خصوص انتخاب مناسب روش‌های ژئوفیزیکی برای اهداف مختلف مطالبی ارائه شد. در راستای تکمیل مطالعه ژئوفیزیکی موفق، چندین پارامتر دیگر وجود دارد. در واقع ادامه کار پس از انتخاب روش ژئوفیزیکی در گرو پاسخ دقیق و صحیح به این سؤال است که چگونه باید داده‌ها جمع‌آوری شوند تا آنومالی ژئوفیزیکی به‌طور صحیح مشخص شود. به دو صورت پروفیلی و شبکه‌ای می‌توان داده‌های ژئوفیزیکی را برداشت نمود.

در روش پروفیل زنی تغییرات پارامتر فیزیکی در راستای یک پروفیل در یک امتداد مشخص در سطح زمین انجام می‌پذیرد و نتایج به‌صورت یک مقطع یا برش ترسیم می‌گردد. در روش پیمایش

شبکه‌ای داده‌های ژئوفیزیکی روی یک سری نقاط گرهی روی یک شبکه منظم با شکل هندسی مشخص یا نقاط پراکنده در یک محدوده برداشت و نتایج به صورت نقشه‌های پربندی (کنتوری) ترسیم می‌شود. در تمام عملیات ژئوفیزیک اکتشافی زمینی یا هوایی که به منظور مشخص کردن محل توده آنومال و گسترش آن صورت می‌پذیرد، از برداشت‌های شبکه‌ای استفاده می‌شود. یکی از نیازهای اصلی در این گونه برداشت‌ها تعیین دقیق محل خطوط برداشت و ایستگاه‌های اندازه‌گیری است. در برداشت‌های زمینی در محل تلاقی خطوط واقعی که با نقشه برداری به وسیله‌ی دوربین‌های نقشه برداری یا دستگاه GPS دقیق تعیین می‌شود انجام می‌پذیرد.

معمولاً داده‌های حاصل از شبکه برداشت در یک منطقه مورد مطالعه به صورت نقشه‌های پربندی ارائه می‌شود. اگر اندازه شبکه برداشت (فاصله خطوط برداشت و ایستگاه‌ها) نسبت به ابعاد نهشته کانساری زیاد باشد یا ارتباط این فاصله‌ها با عمق دفن کانسار به صورت منطقی انتخاب نشده باشد، ممکن است قسمتی از اطلاعات ژئوفیزیکی مربوط به هدف ثبت نشود. در این صورت تفسیر نقشه‌های حاصل با خطا همراه بود [نوروزی، ۱۳۸۸].

۴-۳-۳- طراحی شبکه برداشت در محدوده مورد مطالعه

به منظور طراحی شبکه‌ی برداشت داده‌ها پس از بازدید از منطقه، با توجه به اینکه هدف تحقیق آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی یعنی دیواره‌ها و اتاقک‌های مدفون در محوطه باستانی بوده است، یک شبکه برداشت با ایستگاه‌های چگال (کم فاصله) در نظر گرفته شد. این با توجه ضخامت حداکثر نیم‌متری دیواره‌های تپه حصار انتخاب شد.

برای داده برداری قسمتی از تپه حصار یعنی محدوده‌ی پهنه سفال منقوش به وسعت تقریبی ۵۰×۳۵ متر انتخاب شد (شکل ۴-۲). راستای تقریبی پروفیل‌ها جنوب غربی- شمال شرقی و با تقریباً ۵۲ ایستگاه روی هر پروفیل برگزیده شد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵: طراحی شبکه برداشت.



شکل ۴-۶: نمای کلی از محوطه برداشت (خطوط نارنجی پروفیل‌های برداشت گرانی).

برای عملیات میکروگرانی‌سنجی ۱۳ پروفیل با فواصل سه متر از یکدیگر و فاصله ایستگاه‌های برداشت یک متر در نظر گرفته شد (شکل ۴-۶). برای برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی از شبکه‌ای با فاصله‌ی نقاط برداشت یک متر و پروفیل ۱/۵ متر استفاده شد؛ که در نهایت ۲۵ پروفیل شد. در کل

شبکه‌ای با بیش از ۶۵۰ نقطه ایستگاهی برای میکروگرانی‌سنجی و بیش از ۱۳۰۰ ایستگاه مغناطیس-سنجی برای داده‌برداری طراحی شد.

۴-۴- برداشت صحرائی

پس از طراحی شبکه برداشت و نقشه‌برداری در محدوده موردنظر، عملیات برداشت داده‌های میکروگرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی انجام شد.

۴-۴-۱- برداشت داده‌های گرانی‌سنجی

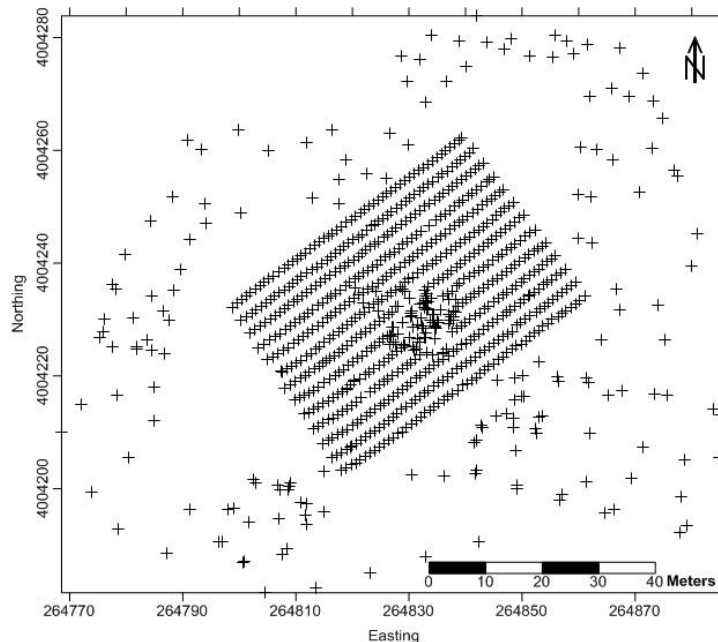
برداشت داده‌های گرانی‌سنجی طی مراحل زیر در چهار روز انجام شد.

الف) تهیه مختصات ایستگاه‌ها و نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

یکی از مشخصه‌های لازم هر مقدار گرانی موقعیت و یا همان مختصات ایستگاه مشاهده‌ای است. بدیهی است اندازه‌گیری و آزمایش خواص و مشخصات زمین بدون در نظر گرفتن پارامتر موقعیت و مختصات بی‌فایده و ناقص بوده و لازم است که مختصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در یک سیستم شناخته‌شده ریاضی اندازه‌گیری و ثبت گردند؛ تا در مواقع لزوم مورد استفاده قرار گیرند. از این رو مختصات تمامی ایستگاه‌های گرانی با دقتی که برآورد کننده نیازهای آن باشد؛ محاسبه گردید. این مختصات شامل طول و عرض جغرافیایی ایستگاه و همچنین تصویر این مختصات در سیستم تصویری مشخص (UTM) بود. ارتفاع ایستگاه به‌عنوان بعد سوم مختصات، نسبت به سطح‌مبنای ارتفاعی ژئوئید اندازه‌گیری شد. به‌منظور به دست آوردن مختصات نقاط گرانی قبل از برداشت گرانی، عملیات نقشه-برداری با استفاده از یک دوربین توتال استیشن انجام شد. همچنین تغییرات توپوگرافی محدوده موردنظر به‌منظور استفاده در تصحیح توپوگرافی برداشت گردید.

با توجه به لزوم اعمال تصحیحات مختلف روی داده‌های گرانی به‌ویژه تصحیح توپوگرافی، وجود مختصات ارتفاعی نقاط اندازه‌گیری شبکه برداشت و همچنین عوارض طبیعی محدوده برداشت لازم

است؛ بنابراین نقشه توپوگرافی محدوده برداشت نیز تهیه گردید. عملیات نقشه برداری ایستگاه‌های برداشت و ایستگاه‌های توپوگرافی توسط نقشه بردار انجام شد (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷: نقاط ایستگاه‌های برداشت گرانی و ایستگاه‌های توپوگرافی

ب) کالیبره کردن دستگاه گرانی سنجی

قبل از شروع برداشت؛ گرانی سنج به مدت ۲۴ ساعت در یک نقطه ثابت در داخل آزمایشگاه گرانی-سنجی روشن و تغییرات گرانی برای بررسی خطی بودن رانه دستگاه قرائت گردید. بدین ترتیب میزان خطای به دست آمده، در طول برداشت روزانه با دستگاه به صورت خودکار بر روی داده‌ها اعمال شد.

ج) انتقال گرانی مطلق برای ایستگاه مبنای محلی

انتقال گرانی مطلق از یک ایستگاه به نام ورچنگ کوه در میانه راه شاهرود- دامغان به یک نقطه در محوطه تپه حصار با چهار بار رفت و برگشت در آن مسیر و داده برداری و سپس انجام محاسبات لازم صورت گرفت و مقدار گرانی مطلق برای ایستگاه مبنا به دست آمد (جدول ۴-۱).

د) قرائت ایستگاه‌ها

پس از طراحی شبکه برداشت و تعیین محل پروفیل‌ها، برداشت ایستگاه‌های گرانی با گرانی سنج CG5 انجام شد. (جدول ۴-۲) نیز نمونه‌ای از داده‌های گرانی برداشت شده را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱: جدول انتقال گرانی مطلق.

St.	time	Gravity-obs	gravity-avr
NCC-2522	ق.ظ 11:19:01	4865.949	4865.951
	ق.ظ 11:23:28	4865.942	
	ق.ظ 11:25:17	4965.961	
Tapeh Hesar	ب.ظ 12:21:44	4847.644	4847.645
	ب.ظ 12:23:25	4847.646	
NCC-2522	ب.ظ 01:39:40	4865.895	4865.896
	ب.ظ 01:41:21	4865.893	
	ب.ظ 01:42:46	4865.899	
Tapeh Hesar	ب.ظ 02:48:01	4847.636	4847.633
	ب.ظ 02:50:17	4847.631	
	ب.ظ 04:52:02	4847.631	
	ورچنگکوه	979500.3026	
	تپه حصار	979482.0481	

مدت قرائت هر ایستگاه ۳۰ ثانیه تنظیم شد و انحراف معیار برای داده‌های برداشت شده به وسیله‌ی دستگاه در هر ایستگاه محاسبه می‌شد. در طول برداشت اگر انحراف معیار اندازه‌گیری بیش‌تر از ۰/۰۱ می‌شد، قرائت تکرار می‌شد. نقطه مبنا نیز ابتدای پروفیل اول در نظر گرفته شد.

جدول ۴-۲: نمونه‌ای از داده‌های گرانی برداشت‌شده در روز چهارم- درون گمانه حفاری (p=profil - s=station)

st.	Time	Gra
p7s24	05:37:08	4819.287
p7s25	05:40:46	4819.694
p7s26	05:43:25	4819.679
p7s27	05:49:24	4819.677
p7s28	05:54:11	4819.636
p7s29	05:59:25	4819.636
p7s30	06:01:56	4819.602
p8s22	06:05:15	4819.610
p8s23	06:12:31	4819.638
p8s24	06:15:12	4819.699
p8s25	06:20:10	4819.648
p8s26	06:24:40	4819.607
p8s27	06:28:05	4819.956
p8s28	06:32:41	4819.987
p8s29	06:36:17	4819.987
p8s30	06:42:30	4819.839
p8s31	06:47:10	4819.837
p8s32	06:52:40	4819.750
p9s30	07:02:06	4819.885
p9s31	07:04:59	4819.908
p9s32	07:08:27	4819.884
p9s33	07:11:14	4819.803
p9s29	07:15:04	4819.648
p9s28	07:18:10	4819.645
p9s27	07:21:20	4819.230
p9s26	-	-
p9s25	07:26:05	4820.044
p9s24	07:29:45	4820.039
p9s23	07:33:26	4820.004
p1s1	07:37:06	4819.294
p10s25	07:45:25	4819.949
p10s26	07:50:25	4820.013
p10s27	07:53:23	4820.015
p10s28	07:56:06	4820.016
p10s29	07:58:49	4819.957
p10s30	08:04:32	4820.091

۴-۲-۴- برداشت داده‌های مغناطیسی

قبل برداشت داده‌های مغناطیسی باید از نبود طوفان‌های دوره‌ای خورشیدی مطمئن شد. زیرا طوفان‌های خورشیدی روی میدان زمین و در نتیجه روی قرائت دستگاه اثر خواهد گذاشت. انتخاب

دستگاهی با حساسیت بالا نیز در برداشت‌های مغناطیسی باستانی مهم است. البته در مکان‌های که آنومالی کوچک است، برداشت گرادیان مناسب‌تر است.

برداشت داده‌های مغناطیسی نسبت به برداشت گرانی ساده‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود به همین دلیل برداشت داده‌های مغناطیسی تنها در یک روز اما به صورت تمام‌وقت انجام شد. عملیات برداشت داده‌ها به این صورت انجام شد که ابتدا یک ایستگاه مبنا خارج از منطقه برداشت انتخاب شد و اپراتور پس از قرائت این نقطه قرائت داده روی پروفیل‌ها را آغاز کرد. سپس در فواصل زمانی منظم ۵ دقیقه‌ای (با توجه به هدف اکتشافی و فاصله کم نقاط برداشت) قرائت نقطه مبنا تکرار می‌شد. این عمل برای انجام تصحیح روزانه هنگامی که با یک دستگاه برداشت انجام می‌شود، لازم است. تفاوت ایستگاه مبنا در مغناطیس و ایستگاه مبنا در گرانی این است که ایستگاه مبنا مغناطیس باید بیرون محوطه برداشت، حتی‌المقدور در مکانی با ساختار متفاوت با محوطه برداشت، انتخاب شود. برداشت داده‌های مغناطیس-سنجی با دستگاه مگنتومتر پروتون با دقت یک نانو تسلا انجام شده است.

۴-۵- تصحیح داده‌های گرانی سنجی

پس از برداشت داده‌ها و استخراج آن‌ها از دستگاه گرانی‌سنج، جهت تعیین اثر زمین‌شناسی و پدیده‌های مرتبط با آن لازم است که کلیه عوامل مزاحم و نوفه از داده‌ها حذف شود. بدین منظور پس از برداشت داده‌ها و استخراج آن‌ها از دستگاه گرانی‌سنج، داده‌ها در یک فایل اکسل نوشته شد و سپس در محیط نرم‌افزار مذکور تصحیحات مربوطه انجام شد.

۴-۵-۱- تصحیح رانه‌ی دستگاه

اگرچه دستگاه گرانی‌سنج رانه را به‌طور خودکار از داده‌ها حذف می‌کند؛ اما به‌منظور دقت بیشتر، تصحیح رانه به روشی که در فصل دوم گفته شد، انجام گردید. جهت تصحیح رانه، در برداشت صحرائی، تقریباً هر دو ساعت مقدار گرانی مبنا قرائت‌شده است. همچنین در شروع هر روز ایستگاه مبنا

برداشت شده و میزان اختلاف آن بر روی تمام داده‌ها اعمال شده است و همه‌ی داده‌ها به شرایط داده‌های روز اول برگردانده شده‌اند.

چون عملیات برداشت صحرایی داده‌ها بیش از یک روز طول کشید، لازم بود که داده‌هایی که در هر روز برداشت می‌شوند طوری تصحیح شوند که با هم قابل مقایسه باشند. بدین منظور در شروع روز دوم نخست ایستگاه مبنا قرائت می‌شد و میزان اختلاف آن با مقدار گرانی آن ایستگاه در روز قبل بر روی همه‌ی داده‌های روز بعد اعمال شد.

۴-۵-۲- تصحیح عرض جغرافیایی

به‌منظور انجام تصحیح عرض جغرافیایی، همه‌ی داده‌ها نسبت به پایین‌ترین عرض جغرافیایی (عرض ۳۶/۱۵۴۰۶۴ شمالی) در محدوده‌ی اکتشافی مرتب شدند و سپس تصحیح عرض جغرافیایی محاسبه شد. چون همه‌ی داده‌ها به عرض پایین‌تر یعنی خط مبنا منتقل شده‌اند، لذا مقدار تصحیح هر ایستگاه از گرانی مشاهده‌ای ایستگاه مربوطه کم گردید.

۴-۵-۳- تصحیح ارتفاعی (هوای آزاد و بوگه)

پس از تصحیح رانه و عرض جغرافیایی به‌منظور انتقال داده‌ها به یک سطح مبنای ارتفاعی، تصحیح هوای آزاد انجام شد و همه‌ی داده‌ها به سطح مبنا که سطح آب‌های آزاد است، منتقل شد. با توجه به اینکه منطقه‌ی برداشت بالاتر از سطح دریا قرار دارد، در نتیجه داده‌ها به سطح مبنایی پایین‌تر منتقل می‌شود. پس مقدار تصحیح هوای آزاد به داده‌ها اضافه گردیده است.

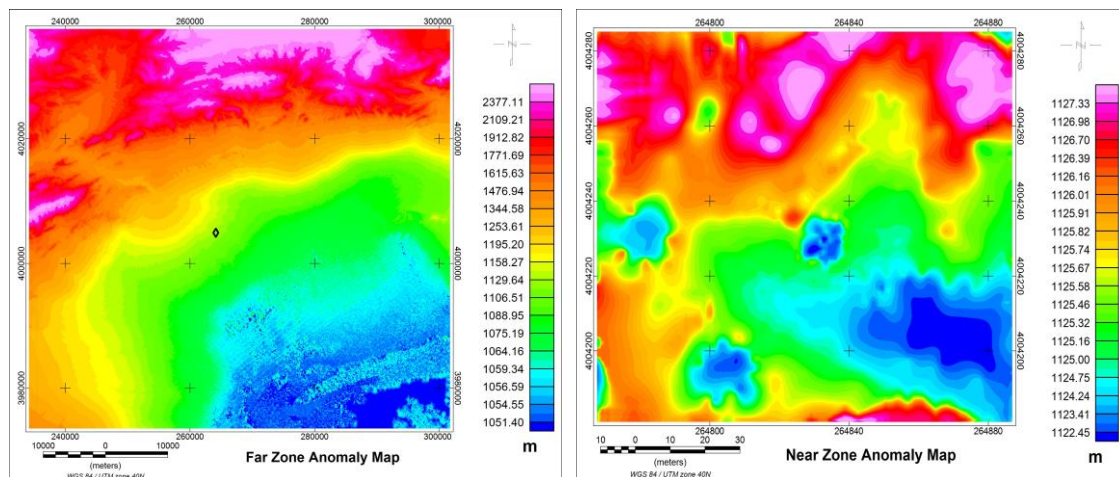
این تصحیحات مطابق فلوجارت تصحیح مقادیر گرانی مشاهده‌ای (شکل ۲-۲) انجام شده است. برای انجام تصحیح بوگه نیاز به محاسبه متوسط چگالی منطقه است. با توجه به اینکه عمده‌ی منطقه از رس سطحی و سبک پوشیده شده، از مقدار ۱/۵۵ گرم بر سانتی مترمکعب استفاده گردید. اثر گرانی تخته‌ی بوگه در محیط نرم‌افزار اکسل محاسبه شد و از مقادیر آنومالی هوای آزاد کم شد.

۴-۵-۴- تصحیح توپوگرافی

همان گونه که گفته شد، مقادیر اجرام اطراف نقاط اندازه گیری که ناشی از وجود توپوگرافی است، در تصحیح بوگه لحاظ نمی شود؛ لذا لازم است که تصحیح زمینگان (توپوگرافی) نیز محاسبه و به مقادیر آنومالی بوگه داده ها اضافه شود. به این منظور نقشه توپوگرافی منطقه در دو بخش زون دور و نزدیک تهیه و استفاده شد (شکل ۴-۸).

با استفاده از اطلاعات نقشه توپوگرافی زون دور و زون نزدیک، تصحیح توپوگرافی انجام شد. برای محاسبه این تصحیح از گزینه ی Terrain در نرم افزار ژئوسافت استفاده شد. در نرم افزار ژئوسافت برای محاسبه ی اثر توپوگرافی دو نقشه توپوگرافی مورد نظر استفاده شد و مقادیر تصحیح توپوگرافی برای هر ایستگاه محاسبه گردید.

پس از افزودن مقادیر تصحیح توپوگرافی به داده ها، آنومالی بوگه کامل به دست آمد (جدول ۴-۳). بدین ترتیب بی هنجاری به دست آمده دارای گستره تغییراتی در حدود ۱۳۰ میکروگال است (شکل ۴-۹).



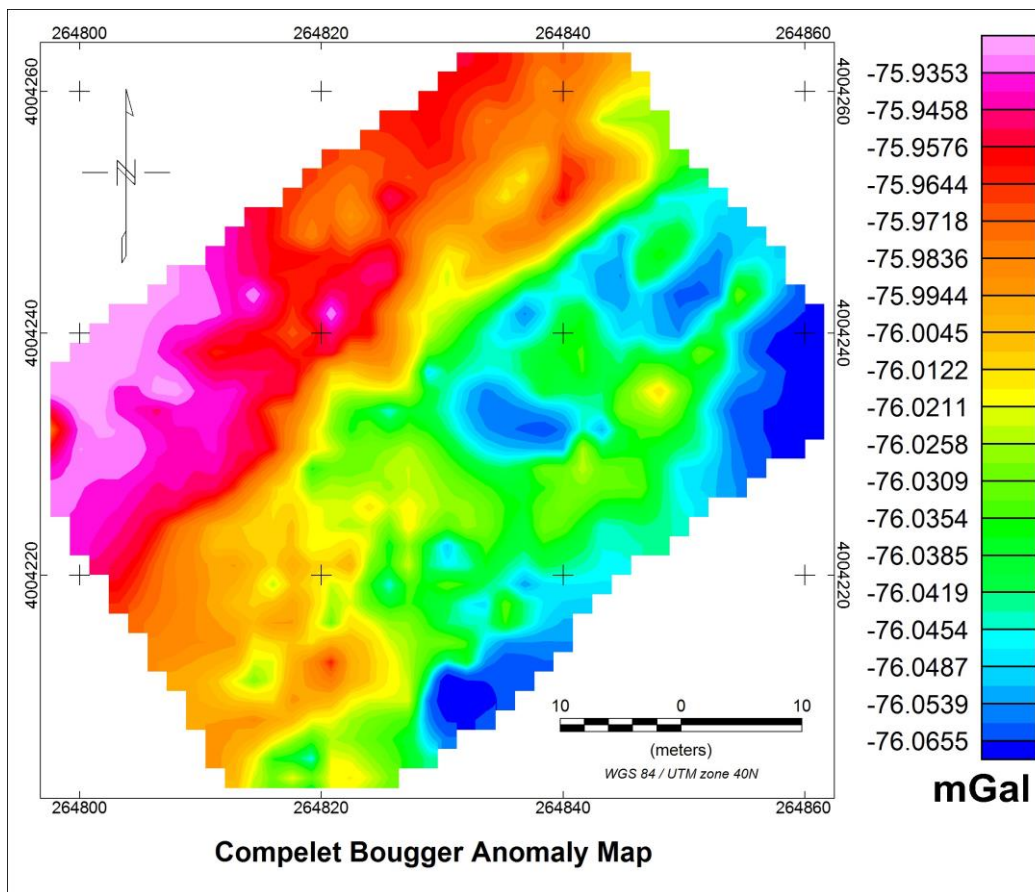
(ب)

(الف)

شکل ۴-۸: الف) نقشه زون نزدیک، ب) نقشه زون دور منطقه. (نقطه سیاه محوطه تپه حصار است.)

جدول ۳-۴: بخشی از عملیات تصحیح داده‌ها گرانی محوطه برداشت در محیط اکسل.

St.	x	y	z	long	lat	g_normal	g_abs	dg_fa	g_fa	dg_phi	dg_b1.55	Terrain	Com_bugger
p1s1(Base)	264798.9	4004232	1125.549	54.38553	36.15432	979832.54	-350.49	347.344	-3.146	0.022	-76.267	0.306	-75.961
p1s2	264799.7	4004233	1125.556	54.38554	36.15433	979832.54	-350.469	347.347	-3.122	0.023	-76.245	0.306	-75.939
p1s3	264800.5	4004234	1125.58	54.38555	36.15433	979832.54	-350.447	347.354	-3.093	0.024	-76.218	0.306	-75.912
p1s4	264801.2	4004234	1125.615	54.38555	36.15434	979832.54	-350.464	347.365	-3.099	0.024	-76.226	0.306	-75.920
p1s5	264802	4004235	1125.671	54.38556	36.15434	979832.54	-350.473	347.382	-3.091	0.024	-76.223	0.306	-75.916
s6	264802.8	4004235	1125.728	54.38557	36.15435	979832.54	-350.515	347.400	-3.115	0.025	-76.251	0.306	-75.944
s7	264803.7	4004236	1125.78	54.38558	36.15436	979832.54	-350.501	347.416	-3.086	0.025	-76.225	0.306	-75.919
s8	264804.4	4004237	1125.824	54.38559	36.15436	979832.54	-350.517	347.429	-3.088	0.026	-76.230	0.306	-75.924
s9	264805.3	4004237	1125.852	54.3856	36.15437	979832.54	-350.535	347.438	-3.097	0.026	-76.242	0.306	-75.936
s10	264806.1	4004238	1125.856	54.38561	36.15437	979832.54	-350.539	347.439	-3.100	0.027	-76.245	0.306	-75.939
s11	264807	4004238	1125.869	54.38562	36.15438	979832.54	-350.536	347.443	-3.093	0.027	-76.240	0.306	-75.934
s12	264808	4004239	1125.861	54.38563	36.15438	979832.54	-350.546	347.441	-3.105	0.028	-76.252	0.306	-75.946
s13	264808.7	4004240	1125.82	54.38564	36.15439	979832.54	-350.532	347.428	-3.104	0.028	-76.249	0.306	-75.943
s14	264809.6	4004240	1125.826	54.38565	36.1544	979832.54	-350.521	347.430	-3.091	0.029	-76.236	0.306	-75.930
s15	264810.2	4004241	1125.831	54.38565	36.1544	979832.55	-350.529	347.431	-3.098	0.029	-76.244	0.306	-75.938
s16	264810.9	4004241	1125.83	54.38566	36.15441	979832.55	-350.529	347.431	-3.098	0.030	-76.244	0.307	-75.938
s17	264811.7	4004242	1125.841	54.38567	36.15441	979832.55	-350.52	347.435	-3.086	0.030	-76.233	0.307	-75.927
s18	264812.6	4004242	1125.849	54.38568	36.15442	979832.55	-350.545	347.437	-3.108	0.031	-76.256	0.307	-75.950
s19	264813.3	4004243	1125.847	54.38569	36.15442	979832.55	-350.537	347.436	-3.101	0.031	-76.250	0.307	-75.943
s20	264814.2	4004244	1125.875	54.3857	36.15443	979832.55	-350.522	347.445	-3.077	0.031	-76.228	0.307	-75.921
s21	264815	4004244	1125.873	54.3857	36.15443	979832.55	-350.549	347.444	-3.105	0.032	-76.256	0.307	-75.949
s22	264815.7	4004245	1125.887	54.38571	36.15444	979832.55	-350.576	347.449	-3.128	0.032	-76.281	0.307	-75.973
s23	264816.3	4004245	1125.901	54.38572	36.15444	979832.55	-350.557	347.453	-3.104	0.033	-76.258	0.308	-75.950
s24	264817.1	4004246	1125.935	54.38573	36.15445	979832.55	-350.566	347.464	-3.103	0.033	-76.260	0.308	-75.952
s25	264818.1	4004247	1125.981	54.38574	36.15445	979832.55	-350.585	347.478	-3.107	0.034	-76.268	0.308	-75.960
p1s26	264818.9	4004247	1126.026	54.38575	36.15446	979832.55	-350.593	347.492	-3.102	0.034	-76.266	0.308	-75.957



شکل ۴-۹: نقشه آنومالی بوگه کامل محوطه برداشت.

۴-۶- تصحیح داده‌های مغناطیسی

پس از اتمام عملیات صحرایی کار وارد فاز بعدی یعنی پردازش داده‌های ژئوفیزیکی شده و برای پردازش داده‌های مغناطیسی مراحل زیر انجام شد. تغییرات ارتفاع در داده‌های مغناطیسی تأثیر بسیار ناچیزی دارد؛ لذا از آن صرف‌نظر می‌شود.

۴-۶-۱- تصحیح روزانه

با این تصحیح اثر تغییرات آنی در میدان مغناطیسی زمین از روی داده‌ها حذف می‌شود و به نوعی یکسان‌سازی در سطح داده‌ها صورت می‌گیرد. اگر برداشت با دو دستگاه مشابه صورت گیرد؛ یکی روی نقطه‌ی مبنا ثابت می‌ماند و پیوسته مقدار میدان در ایستگاه مبنا را قرائت و ثبت می‌کند و دستگاه دوم

هم‌زمان ایستگاه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. بدین ترتیب مقدار ایستگاه مبنا در زمان برداشت داده ثبت می‌شود.

اگر تنها یک دستگاه در دسترس بود، ابتدا برای این کار یک مقدار میانگین نیز برای داده‌های مبنا نیز لازم است. مقدار میانگین ایستگاه مبنا ۴۸۶۴۰ نانوتسلا انتخاب شد؛ که با انطباق یک خط راست بر داده‌های مبنا به دست آمد؛ سپس با استفاده از دو مقدار متوالی نقطه مبنا و زمان آن‌ها یک معادله خط تعریف شد و مقدار تصحیح روزانه هر نقطه با استفاده از این معادله و زمان انجام برداشت داده محاسبه و روی داده‌ها اعمال شد. با جایگذاری زمان انجام برداشت هر ایستگاه در معادله‌ی خطی که به‌وسیله‌ی مقادیر مبنایی که از نظر زمانی قبل و بعد از برداشت ایستگاه موردنظر اندازه‌گیری شده‌اند، مقدار مبنا در آن زمان به‌دست می‌آید. درواقع این مقدار نزدیک به مقداری است که اگر دستگاه دومی تغییرات مبنا را ثبت می‌کرد در همان زمان نشان می‌داد. با کم کردن مقدار میانگین مبنا از این مقدار (مقدار مبنا محاسبه‌ای در زمان برداشت داده) مقدار تصحیح روزانه برای هر ایستگاه محاسبه‌شده و از داده‌های مغناطیسی کم شده است.

۴-۶-۲- تصحیح IGRF

همان‌گونه که در بخش (۲-۳-۲- الف) توضیح داده شد؛ مؤلفه‌ی میدان مغناطیس هسته زمین دارای دوره تناوب تغییرات بلندمدت در حد چندین سال هست. ایستگاه‌های ثابتی برای اندازه‌گیری تغییرات این مؤلفه از میدان مغناطیسی زمین در سرتاسر جهان برپا شده‌اند؛ که این مراکز به‌طور دائم به اندازه‌گیری تغییرات مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین مشغول هستند.

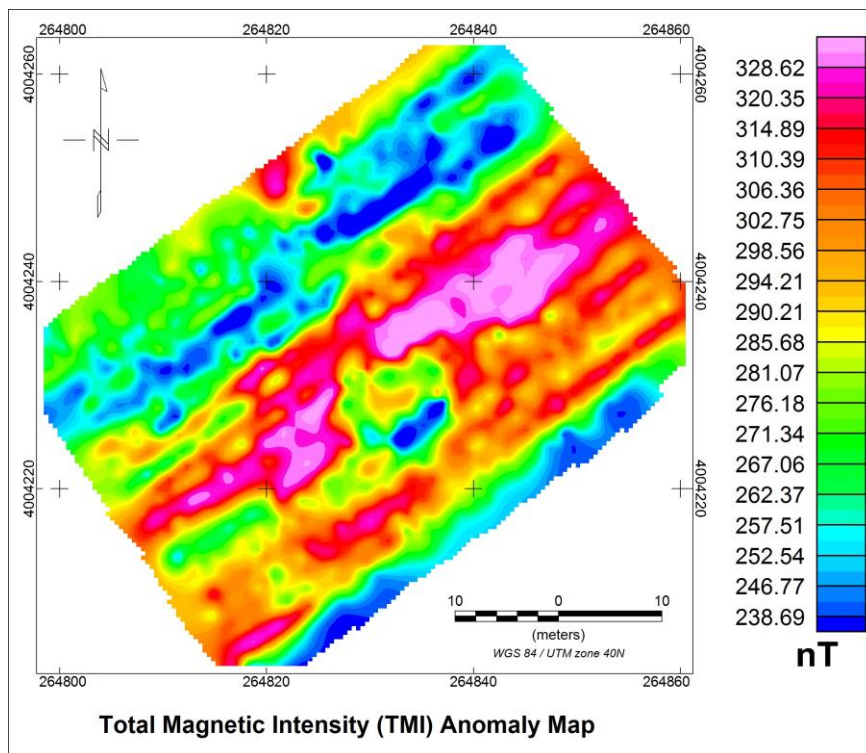
از این مشاهدات یک مدل ریاضی به نام میدان مرجع مغناطیسی جهانی با نام اختصای IGRF منتشر می‌شود؛ که این مدل هر ۵ سال یک‌بار به‌روز می‌گردد. به کمک این مدل ریاضی و داشتن پارامترهای طول و عرض و ارتفاع جغرافیایی محل به‌علاوه زمان موردنظر، به‌عنوان ورودی، می‌توان

شدت و جهت بردار (زاویه میل و انحراف) میدان مغناطیسی هسته زمین را در محل دلخواه محاسبه کرد [Finlay et al., 2010].

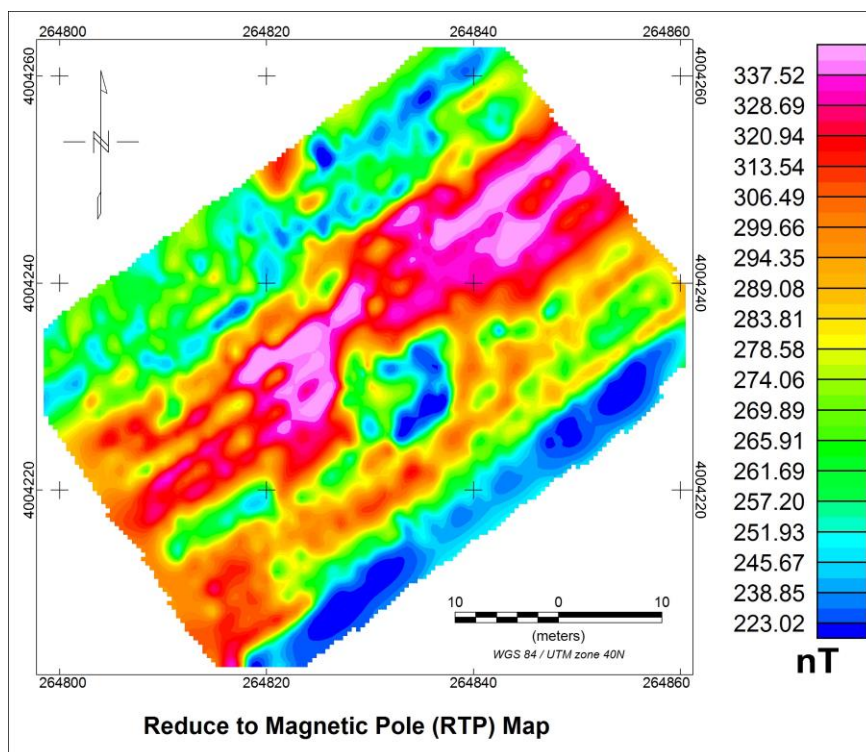
در تپه حصار، زاویه میل و انحراف مغناطیسی به ترتیب $54/6^\circ$ و $3/9^\circ$ درجه اندازه‌گیری شده است. مقدار این تصحیح روی داده‌های تپه حصار بین $48372/1$ تا $48372/3$ تغییر می‌کند؛ که همان‌طور که مشخص است تغییرات اندکی را روی داده‌ها اعمال می‌کند. زیرا فاصله نقاط اندازه‌گیری کم و محدوده برداشت خیلی کوچک است.

مقدار باقیمانده به‌عنوان آنومالی شدت میدان مغناطیسی کل که ناشی از ناهنجاری‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه است شناخته می‌شود (شکل ۴-۱۰). داده‌های مغناطیسی به دست آمده تقریباً بین 238 تا 328 نانو تسلا تغییر کنند. شدت میدان به دست آمده مقدار بالایی دارد و همچنین آنومالی تقریبی 90 نانوتسلایی نشان داده شده در نقشه معرف این است که منطقه از نظر عوامل محیطی مغناطیسی و اکسید آهن بسیار غنی است.

به کمک فیلتر تبدیل به قطب مغناطیسی اصطلاحاً با برگردان به قطب مغناطیسی داده‌ها از طول و عرض مبدأ به قطب مغناطیسی انتقال می‌یابند. این باعث می‌شود همانند نقشه بوگه کامل گرانی-سنجی، مقدار بیشینه آنومالی روی مرکز جسم منشأ آنومال قرار گیرد (شکل ۴-۱۱).



شکل ۴-۱۰: نقشه آنومالی مغناطیسی به دست آمده از داده‌های تپه‌حصار.



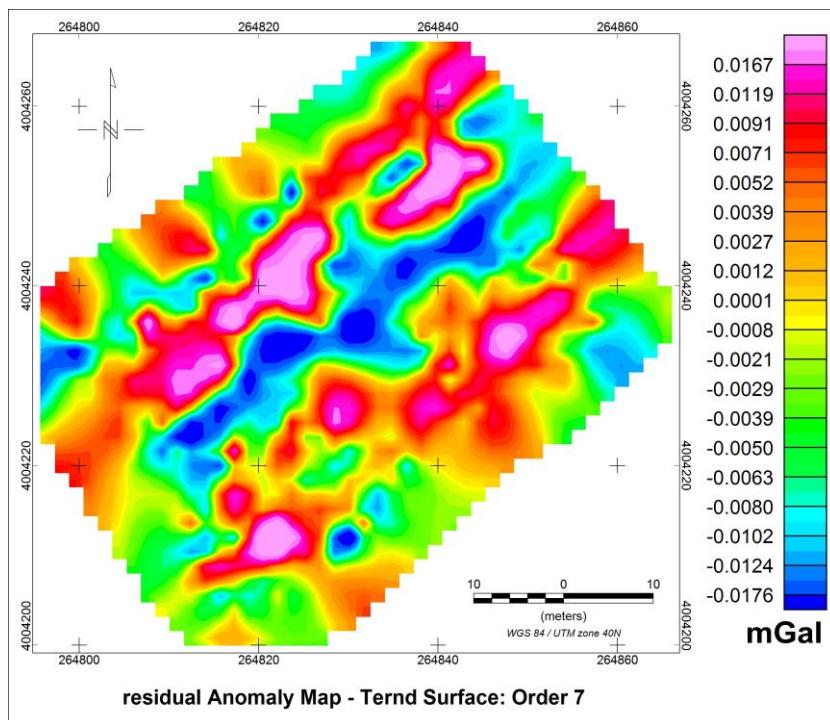
شکل ۴-۱۱: نقشه آنومالی مغناطیسی تبدیل به قطب داده‌های تپه‌حصار.

۴-۷- تفکیک آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی محوطه تپه حصار

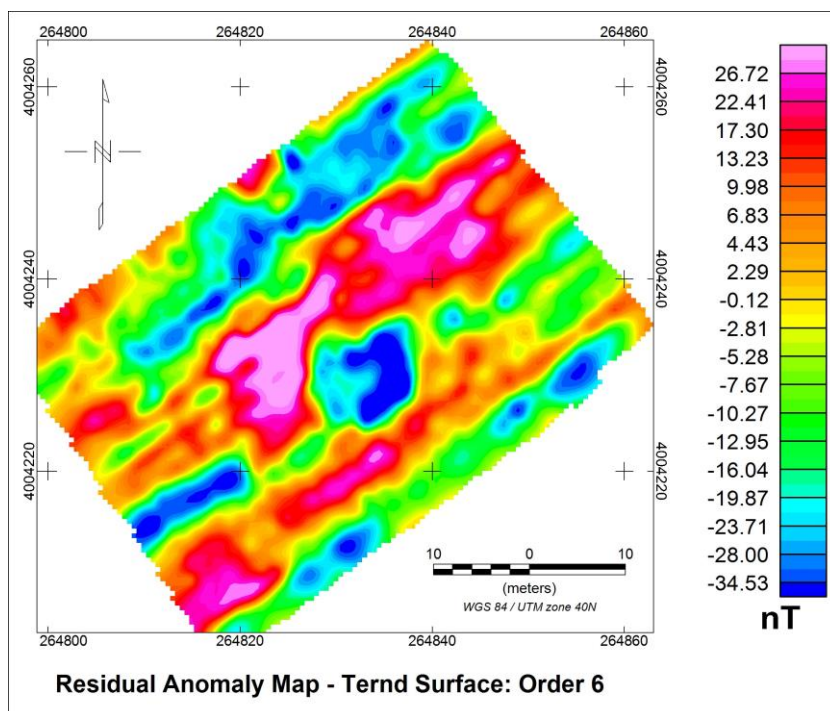
با انجام تصحیحات مختلف و حذف اثرات اضافی، آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی محاسبه شدند؛ اما این آنومالی‌ها از منابع زمین‌شناسی سطحی و عمیق را در برمی‌گیرند. به همین دلیل با توجه به هدف اکتشافی باید اثر منابع عمیق از اثرات منابع کم‌عمق جدا شوند. برای جداسازی آنومالی ناحیه‌ای و محلی (باقیمانده) که به ترتیب مربوط به ساختارهای عمیق و کم‌عمق هستند داده‌های تپه حصار از روش روند سطحی استفاده شد. در این روش با انطباق یا انطباق یک چندجمله‌ای درجه n بر داده‌ها سعی در جداسازی آنومالی‌ها می‌شود. افزایش n به معنای کاهش طول موج و یا افزایش فرکانس در داده است و نشان از سطحی‌تر بودن داده‌ها را دارد. برای حذف نوفه‌ی سطحی قبل از اعمال روند سطحی از فیلتر ادامه فراسوی با ارتفاع نیم متر استفاده شده است.

برای تفکیک آنومالی گرانی از روند سطحی درجه هفت استفاده شد و نقشه باقی‌مانده آن از محدوده مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۴-۱۲). برای آنومالی مغناطیسی نیز از روند سطحی درجه ۶ استفاده شد و نقشه باقی‌مانده آن نیز تهیه گردید (شکل ۴-۱۳).

به منظور ارزیابی خوبی روند سطحی از آزمون فیشر F استفاده شده است. برای این منظور ابتدا پراش کل مجموع مربعات آنومالی گرانی یا مغناطیسی و بر مجموع پراش رگرسیون یا روند سطحی نیز تقسیم شد و مجذور ضریب همبستگی (R) از این تقسیم حاصل می‌شود. اگر R حاصل کوچکتر از R بحرانی (بدست آمده از جدول) شد درجه روند سطح افزایش می‌یابد و اگر مقدار آن بزرگتر از R بحرانی باشد؛ در آن صورت انحراف بیش از حد مجاز است.



شکل ۴-۱۲: نقشه روند سطحی مرتبه ۷ از آنومالی گرانی داده‌های تپه‌حصار.



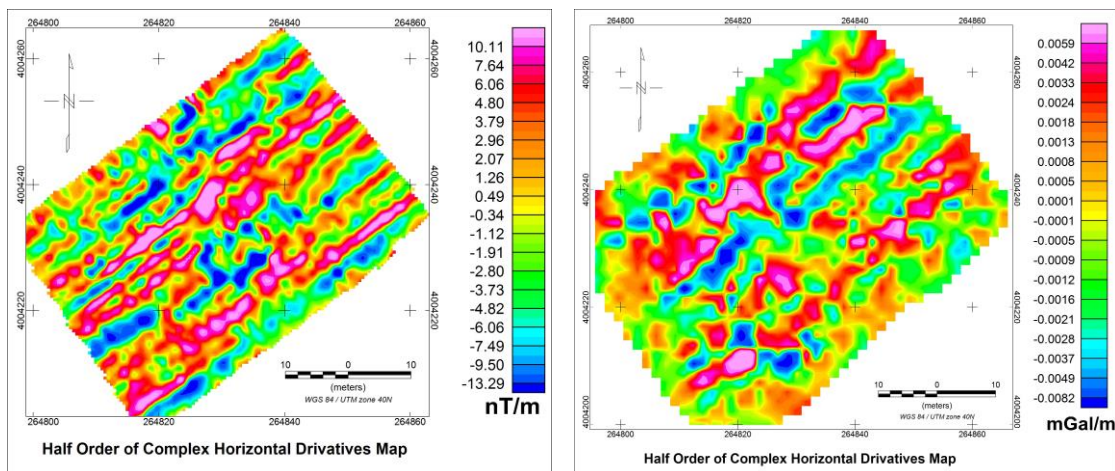
شکل ۴-۱۳: نقشه روند سطحی مرتبه ۶ از آنومالی مغناطیسی داده‌های تپه‌حصار.

۴-۹- پردازش داده‌های تپه حصار به وسیله فیلترهای فازی محلی

بعد از جداسازی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی، برای شناسایی لبه‌ها از فیلترهای متنوع فازی استفاده شد. با توجه به ظرفیت نوفه در داده‌ها انتخاب یک فیلتر مناسب می‌تواند مفید باشد. فیلترهای فازی در عین شباهت، تفاوت‌هایی نیز باهم دارند که در فصول گذشته بحث شد.

۴-۹-۱- مشتق افقی مرتبه نیم

(شکل ۴-۱۴) نقشه مشتق افقی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی را نشان می‌دهد. در (شکل ۴-۱۴-الف) یعنی نقشه گرانی این فیلتر به خوبی دیواره‌ها و اتاقک‌ها مشخص نموده؛ ولی تفکیک آنومالی‌ها به خوبی صورت نگرفته است. در (شکل ۴-۱۴-ب) نیز ساختارهای با لبه‌های مشخص به صورت کشیده در راستای خطوط برداشت دیده می‌شوند؛ که با نقشه گرانی آن نیز هم‌خوانی دارند.



(ب)

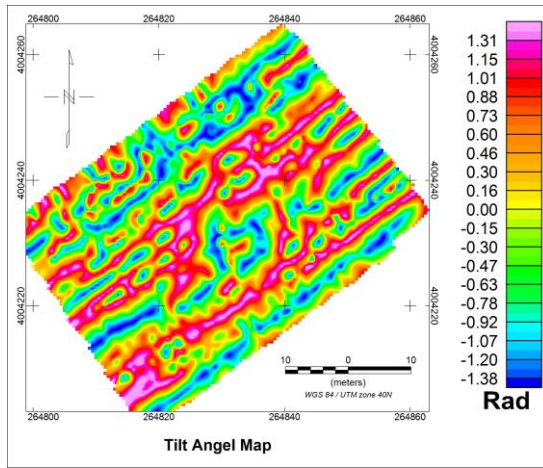
(الف)

شکل ۴-۱۴: نقشه مشتق افقی مرتبه نیم روی داده‌های تپه حصار (الف) آنومالی گرانی، (ب) آنومالی مغناطیسی.

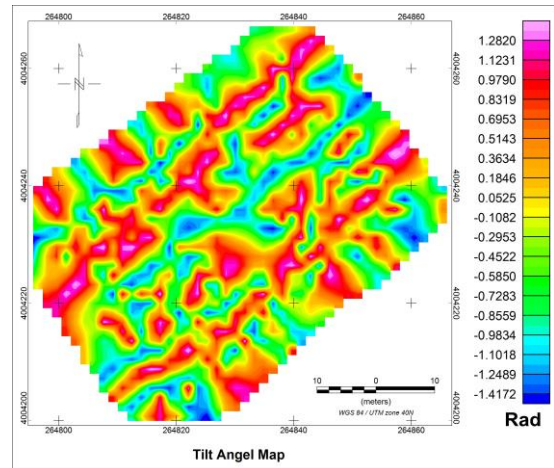
۴-۹-۲- نقشه‌ی فیلتر زاویه تیلت و تانژانت هایپربولیک آن

در (شکل ۴-۱۵-الف و ب) به ترتیب نقشه زاویه تیلت آنومالی گرانی و مغناطیسی ارائه شده است. به کمک زاویه تیلت می‌توان تنها یک شمای کلی از محوطه برداشت به دست آورد؛ زیرا یک فیلتر

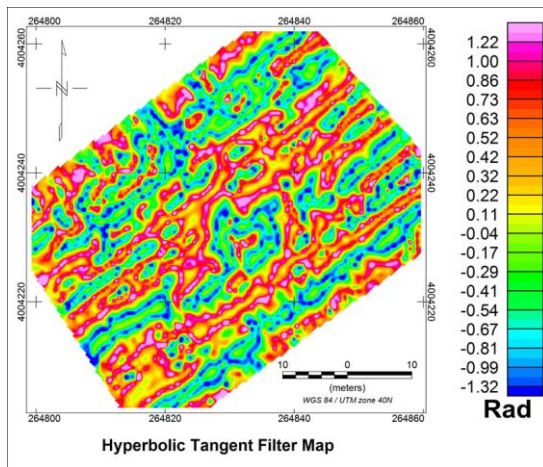
تشخیص لبه نیست. در مقایسه با دیگر فیلترها به خصوص زاویه تتا که بعدا نشان داده می شود، لبه های مجاور آنومالی گرانی و حتی مغناطیسی را نتوانسته از هم تفکیک کند.



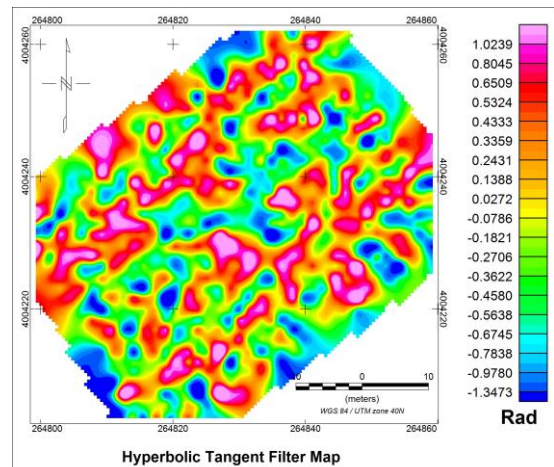
(ب)



(الف)



(د)



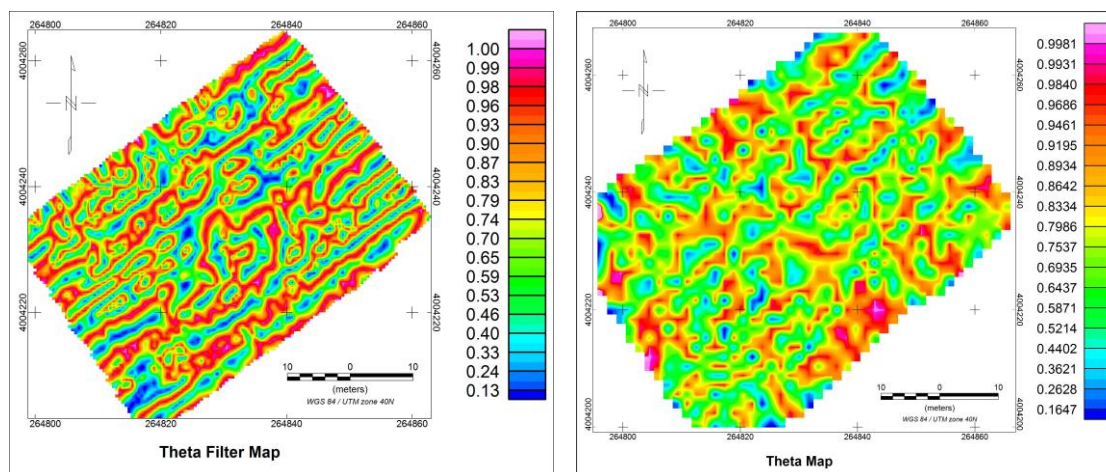
(ج)

شکل ۴-۱۵: الف) نقشه زاویه تیلت آنومالی گرانی تپه حصار ، ب) نقشه زاویه تیلت آنومالی مغناطیسی تپه حصار ، ج) نقشه زاویه تیلت هایپربولیک آنومالی گرانی تپه حصار ، د) نقشه زاویه تیلت هایپربولیک آنومالی مغناطیسی تپه حصار.

هرچند در مدل هایپربولیک آن یعنی در (شکل ۴-۱۵ ج و د) این امر تا حدودی بهتر شده و آنومالی های مجاور از هم تفکیک شده اند. با این حال در این نقشه ها نیز هم پوشانی آنومالی های دامنه بزرگ و کوچک مشهود است این امر در قسمت های که داده بیشینه شده به خوبی مشهود است.

۴-۹-۳- نقشه‌ی زاویه تتا

فیلتر زاویه تتا را می‌توان یک فیلتر مناسب برای تشخیص لبه‌ها دانست؛ زیرا با بیشینه کردن لبه‌های آنومالی به خوبی آن‌ها را در نقشه متمایز می‌کند. در (شکل ۴-۱۶-الف و ب) به ترتیب نقشه زاویه تتای آنومالی گرانی و مغناطیسی محدوده ارائه شده است. مطابق شکل، زاویه تتای آنومالی گرانی به صورت مناسب لبه ساختارهای آنومال را تفکیک کرده است. دیواره‌ها و ساختارهای خانه مانند به خوبی آشکار شده‌اند. در زاویه تتای مغناطیسی نیز لبه‌های آنومالی‌ها بارز شده اگرچه تفسیر آن‌ها به تنهایی مشکل است.



(ب)

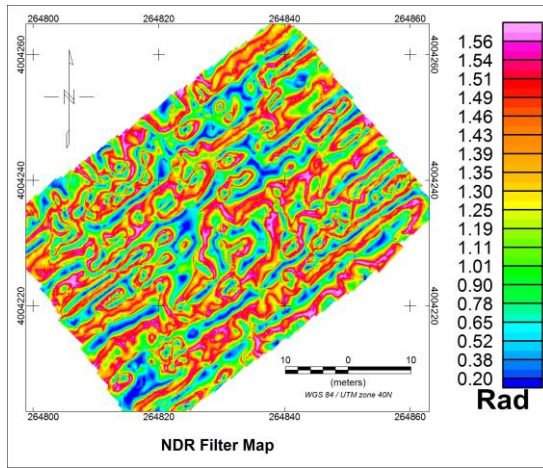
(الف)

شکل ۴-۱۶: نقشه زاویه تتای داده‌های تپه‌حصار الف) آنومالی گرانی، ب) آنومالی مغناطیسی.

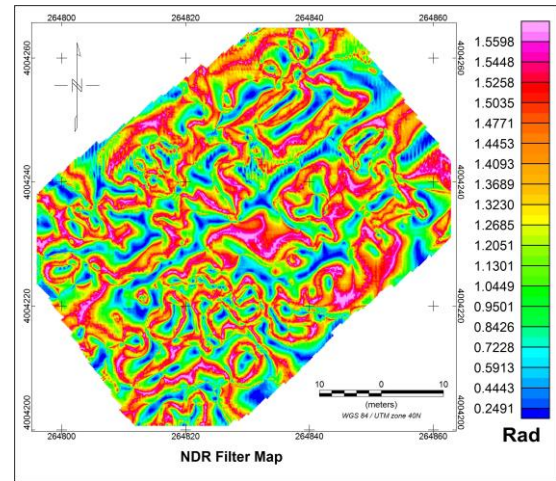
۴-۹-۴- نقشه‌ی فیلتر نسبت مشتق بهنجار و زاویه بهنجار بر مشتق قائم

از بین تمام فیلترهای که در فصول قبلی معرفی شد فیلتر نسبت مشتق بهنجار (NDR) و زاویه‌ی بهنجار نسبت به مشتق قائم (NAVD) نیز برای آشکارسازی لبه‌ها مناسب تشخیص داده شد. (شکل ۴-۱۷-الف و ب) نقشه حاصل از اعمال فیلتر NDR روی نقشه‌های آنومالی باقی‌مانده گرانی و مغناطیسی را نشان می‌دهد. همچنین (شکل ۴-۱۷-ج و د) نیز زاویه بهنجار بر مشتق قائم آنومالی گرانی و

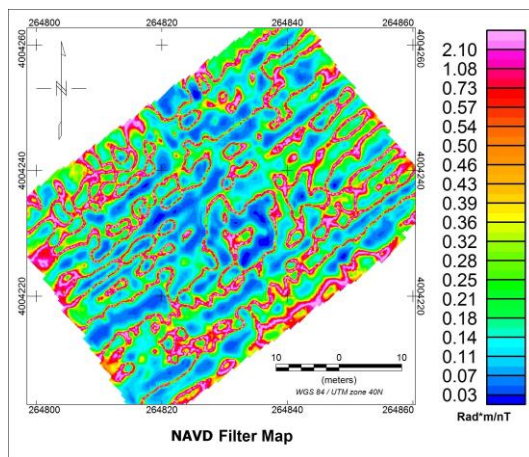
مغناطیسی محدوده را نشان می‌دهد. در تمامی این نقشه‌ها می‌توان گفت که لبه‌ها به خوبی با یک مقدار بیشینه مشخص شده‌اند. در این نقشه‌ها آنومالی‌ها با دامنه بزرگ کوچک متعادل شده‌اند.



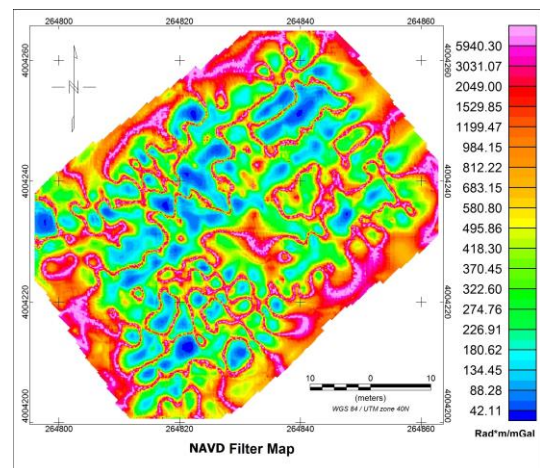
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۱۷: الف) نقشه فیلتر NDR آنومالی گرانی تپه حصار، ب) نقشه فیلتر NDR آنومالی مغناطیسی تپه حصار، ج) نقشه زاویه فیلتر NAVD آنومالی گرانی تپه حصار، د) نقشه زاویه فیلتر NAVD آنومالی مغناطیسی تپه حصار.

با دقت روی این نقشه، می‌توان محدوده دیواره‌ها و اتاقک‌ها را تا حدود زیادی مشخص کرد. بدین ترتیب این فیلتر عملکردی مناسب دارد و ساختارهای خطی را به خوبی می‌توان با این فیلتر مشخص نمود. این فیلتر در شناسایی لبه‌ها بسیار موفق عمل می‌کند.

۴-۱۰- تفسیر داده‌ها در محدوده مورد مطالعه

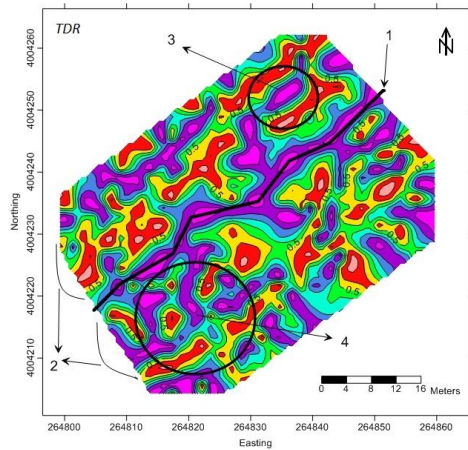
همان‌گونه پیش‌تر اشاره شد، هدف اصلی این تحقیق شناسایی ساختارهای زیرسطحی و تهیه یک نقشه اولیه و پایه از محوطه باستانی تپه حصار است؛ که تا حدودی هم از اطلاعات حاصل از حفاری‌های موجود می‌توان در تفسیر استفاده نمود. بنابراین برای نمایش بهتر این نقشه‌ها می‌توان از روش‌های مختلف شبکه‌بندی داده‌ها در یک محدوده استفاده کرد. در نرم‌افزارهای مختلف برای شبکه‌بندی از روش‌های متفاوتی نظیر کمترین انحناء، کریجینگ، عکس مجذور فاصله، نزدیکترین نقاط همسایگی^۱ و ... استفاده می‌شود. روش نزدیک‌ترین همسایگی با توجه به استفاده از تعداد نقاط کم و در همسایگی نزدیک استفاده می‌کند و سبب هموارسازی کمتر داده‌ها می‌شود که معمولاً در تهیه نقشه‌های تپوگرافی و یا عیارسنجی استفاده می‌شود. با توجه به هدف کار و ساختارهای زیرسطحی این روش شبکه‌بندی می‌تواند نتیجه معقول‌تری ارائه دهد (شکل ۴-۱۸). در این روش مطابق با راهنمای نرم‌افزار Surfer مقدار نزدیک‌ترین همسایه به هر نقطه از نقشه اختصاص پیدا می‌کند؛ یعنی بیشترین وزن را به همسایه-ی نزدیک می‌دهد و سبب می‌شود که آنومالی‌ها به‌گونه‌ای چهارگوش نمایش داده شود و لازمه آن این است که شبکه برداشت داده منظم باشد. در مقایسه با روش کمترین انحناء^۲ که مناسب تغییرات نرم، هموار و تدریجی در داده است.

در روش نزدیک‌ترین همسایگی آنومالی‌ها تغییرات تیز و ناگهانی خواهند داشت و برای به نقشه درآوردن پدیده‌های باستانی به‌ویژه در گرانی‌سنجی مناسب‌تر است. بنابراین برای نمایش بهتر نقشه اتاقک‌ها، از این روش برای شبکه‌بندی نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده از مرتبه هفت، نقشه زاویه تیلت و نقشه فیلتر NDR استفاده شد ولی این روش پاسخ خوبی برای زاویه تتا به دنبال نداشت زیرا در نقشه زاویه تتا به خاطر ماهیتش لبه‌ها تیزتر نشان داده می‌شوند. به همین دلیل از روش کمترین انحناء

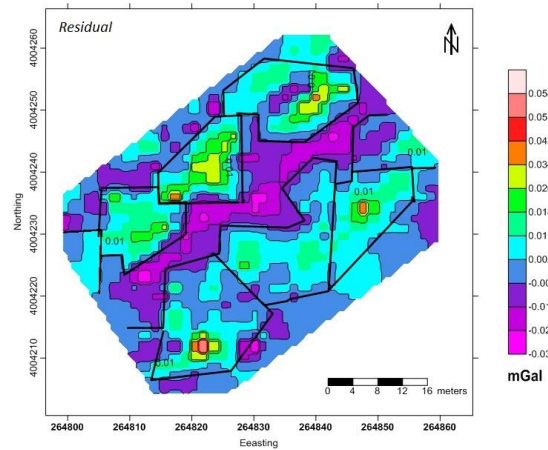
^۱ Nearest Neighbor

^۲ Minimum Curvature

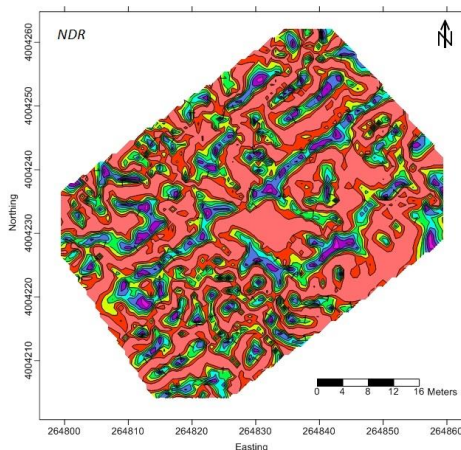
استفاده شد (شکل ۴-۱۸). در نقشه آنومالی محلی که در (شکل ۴-۱۸ الف) نشان داده شده می توان ساختارهایی را در کنار هم به خوبی مشاهده کرد که هرکدام معرف یک یا چند خانه در کنار هم هستند.



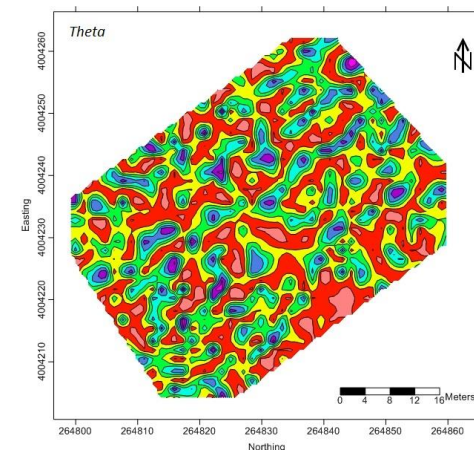
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۱۸ الف) نقشه آنومالی گرانی باقی مانده مرتبه هفت داده های تپه حصار ، (ب) نقشه زاویه تیلت داده های گرانی تپه حصار ، (ج) نقشه زاویه تتا داده های گرانی تپه حصار ، (د) نقشه فیلتر NDR داده های گرانی تپه حصار.

اما فضای میانی بین آن ها که در (شکل ۴-۱۸ ب) با خط شماره یک مشخص شده را می توان به عنوان یک معبر و کوچه باستانی معرفی نمود که این مدل در خرابه های شهرها و روستاهای قدیمی نیز دیده می شود. این اشکال معمولاً دارای عرض ثابت نبوده و در قسمت هایی بسیار فراخ و در قسمت های دیگر آن قدر باریک می شوند که به زحمت دو نفر از کنار هم می توانند همزمان عبور کنند. در اطراف این کوچه باید به سازه هایی اشاره کرد که با شماره دو مشخص شده اند. قسمتی از این شکل که با عدد

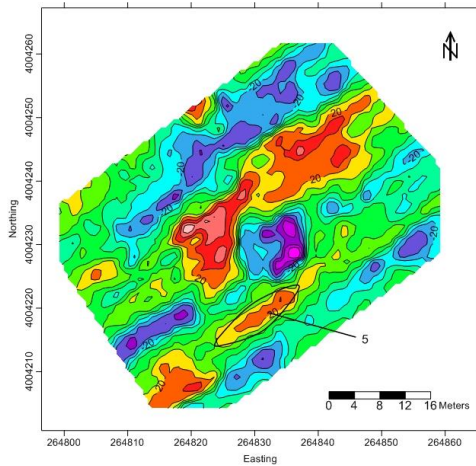
سه مشخص شده است گویای یک اتاقک یا محوطه است که حتی اثر آن روی نقشه آنومالی بوگه به خوبی مشخص است. بخش موردنظر با شماره چهار روی شکل نشانگر یک محوطه از سازه‌هایی با اتاقک‌های کوچک و تودرتو هست که در (شکل ۴-۱۸ ج و د) نیز مشخص است. (شکل ۴-۱۸ د) نتیجه اعمال فیلتر NDR روی نقشه آنومالی باقی مانده است؛ که به خوبی توانسته لبه‌ها را تفکیک کند و معبر میانی و اتاقک‌ها را نشان دهد. هرچند این موضوع در مورد حاشیه‌های نقشه به دلیل اطلاعات و داده ناکافی خیلی اعتبار ندارد.

محوطه تپه حصار به دلایلی از نظر مغناطیسی آشفته است. اکسید آهن زیاد در سبب مغناطیدگی بالای محوطه شده است. این موضوع علاوه بر دلایل مطروحه در فصل دوم به دلیل وجود سرباره‌های آذرین بالادستی در سطح، نشانه‌های از وقوع یک آتش‌سوزی گسترده در این محوطه و باقی‌مانده‌هایی از کوره‌های ذوب فلز به خصوص مس که در محوطه گسترده شده، سبب یک آشفتنگی و ایجاد نوفه در مغناطیدگی محوطه شده است؛ که کار را برای تفسیر داده‌ها مشکل‌تر می‌کند. در چنین محیط‌هایی به سختی می‌توان با این روش دیواره‌ها و اتاقک‌ها را از هم تفکیک کرد. با این حال می‌توان اطلاعات گرانقدری از محیط به دست آورد.

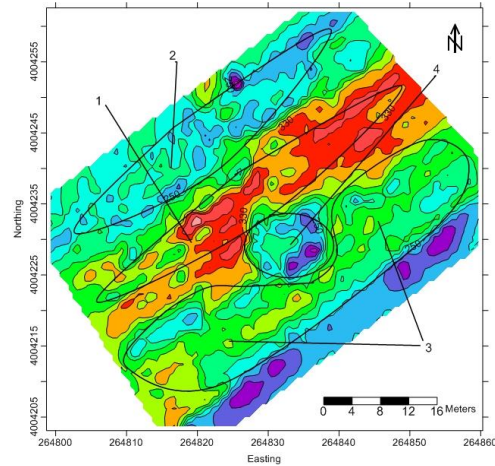
در اینجا برای آنومالی مغناطیسی نیز سعی شده است نقشه‌ها البته به غیر از زاویه تتا با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایه ترسیم شوند. (شکل ۴-۱۹) به ترتیب نمایانگر نقشه تبدیل به قطب، بی-هنجاری باقیمانده روند سطحی درجه ۶ و نقشه زاویه تیلت و تتای محوطه است.

در (شکل ۴-۱۹ الف) منطقه شماره ۱ شدت میدانی بالاتر از ۳۰۰ نانوتسلا را نشان می‌دهد؛ که حاکی از مغناطیدگی بالای آن است. این مغناطیدگی بیشتر از آن است که بتوان آن را به دیواره‌های خشتی حرارت دیده نسبت داد. زیرا همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد، جابجایی خشت‌ها پس از گرمایش و قرار گرفتن تصادفی آن‌ها روی هم در چینش دیوارها سبب ناهمسانی حوزه‌های مغناطیسی آن‌ها می‌شود. با وجود سرباره‌ها و اثرات آتش‌سوزی که در دیواره‌ی ضلع شمالی ترانشه (منطقه شماره ۴) و همچنین شدت میدان کم در درون (کف) این ترانشه که خود نشان از سطحی بودن مغناطیدگی

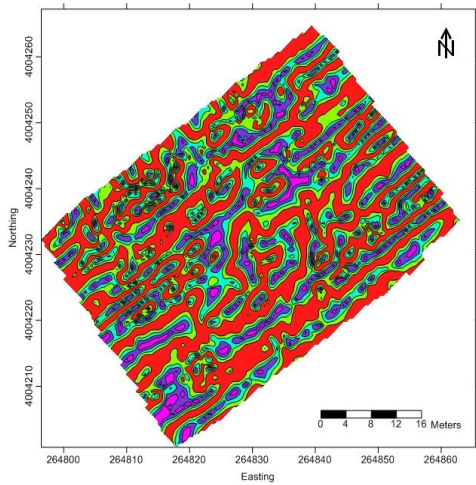
در محیط دارد، می توان این نتیجه را بسیار محتمل دانست که منطقه مذکور یک گذرگاه یا کوچه یا حداقل یک محوطه خالی باشد؛ که با خاک های سطحی، سنگ های آذرین و خاکسترهای بجا مانده از آتش پر شده است.



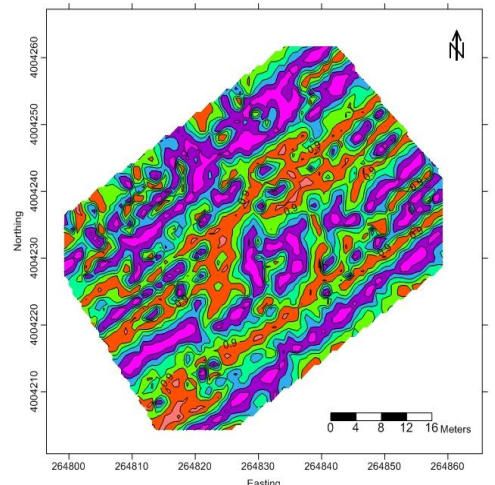
(ب)



(الف)



(د)



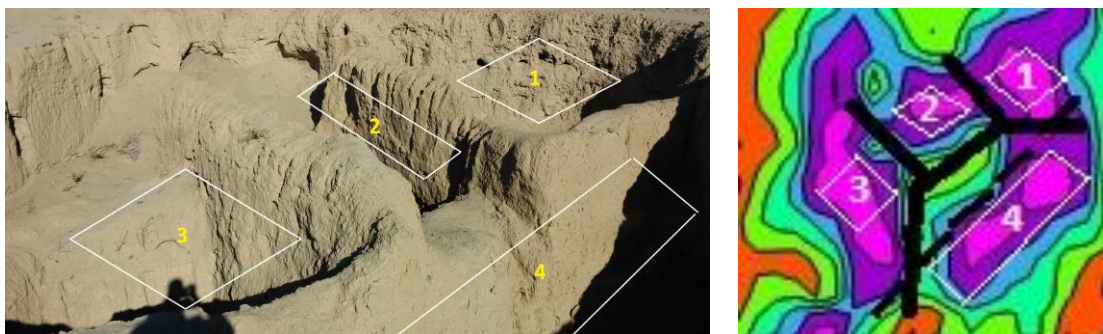
(ج)

شکل ۴-۱۹: الف) نقشه تبدیل به قطب آنومالی مغناطیسی داده های تپه حصار، ب) نقشه آنومالی مغناطیسی باقیمانده مرتبه شش داده های تپه حصار، ج) نقشه زاویه تیلت داده های مغناطیسی تپه حصار، د) نقشه زاویه تتا داده های مغناطیسی تپه حصار.

فرضیه معبر یا کوچه بودن این محوطه وقتی محتمل تر می شود که مناطق ۲ و ۳ با یک مغناطیدگی متوسط که می توان بیشتر آن را ناشی از سازه های خشتی دانست در اطراف آن (منطقه ۱) مشاهده می شود. این خشت ها که در جای دیگر حرارت دیده اند و سپس در دیوار بکار رفته اند. در منطقه ۴ شدت

میدان مغناطیسی کم است و همان‌گونه که گفته شد نشان می‌دهد، که این مغناطیدگی بالا سطحی است و مربوط به ۳ متر روی سطح در این منطقه از محوطه است. البته با توجه به وجود دوره‌های سکونت متفاوت در تپه حصار چندلایه‌ی باستانی روی هم قرار گرفته‌اند و مغناطیدگی مربوط به لایه‌های بالایی است. در رابطه با آنومالی مثبت محدوده شماره ۵ در (شکل ۴-۱۹-ب) اگرچه نمی‌توان با قاطعیت اظهار نظر نمود. ولی با توجه به سطحی بودن محل، این احتمال وجود دارد که این آنومالی مربوط به یک اجاق، تنور آشپزی و یا چیزی مشابه برای پخت و پز باشد؛ که سبب افزایش میزان مغناطیدگی شده است و نمونه‌هایی از آن در حفاری‌های منطقه پیدا شده است.

در قسمتی که ترانشه حفر شده، با توجه به تباین مثبتی که بین مغناطیدگی دیواره‌ها و هوا وجود دارد به خوبی شکل دیواره‌ها را روی نقشه می‌توان مشاهده کرد (شکل ۴-۲۰). خطوط سیاه در (شکل ۴-۲۰ الف) همان دیواره‌ها و مربع‌های سفید اتاقک‌ها هستند که در (شکل ۴-۲۰ ب) نیز محل آنها در ترانشه حفر شده دیده می‌شود. خط سیاه دیواره‌ها روی نقشه خط نقطه‌چین در این شکل در واقع راستای تقریبی دیوار است که به خاطر ضلع جنوبی ترانشه دو سر خط مشکی به بیرون کج شده است.



(ب)

(الف)

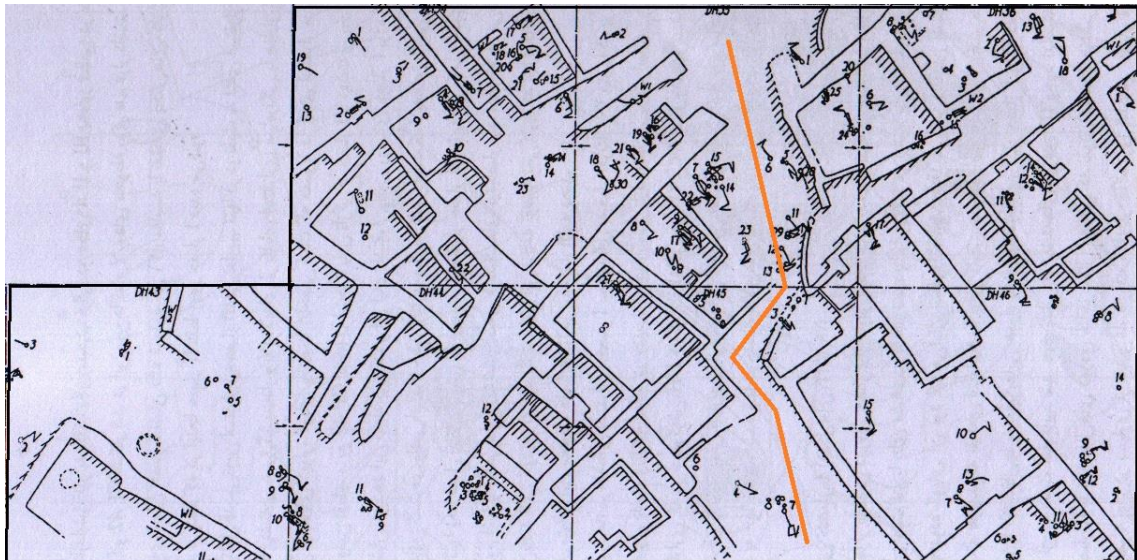
شکل ۴-۲۰: الف) نقشه زاویه تیلت محدوده ترانشه حفر شده ب) عکس از همان محدوده.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی با نقشه‌های بجا مانده از حفاری‌های دکتر اشمیت در دهه‌ی ۱۹۳۰ میلادی همخوانی فراوانی دارد. در پهنه سفال منقوش و قسمت جنوب غربی محوطه برداشت، تقریباً چسبیده به آن یک محوطه ۷۰ متری حفاری شده وجود

دارد. تصاویر و نقشه‌های به‌دست آمده از این حفاری نشان از وجود اتاقک‌های تودرتو و نامنظم، راهروهای باریک و کوچه‌های با عرض متغیر دارد (شکل ۴-۲۱).



(الف)



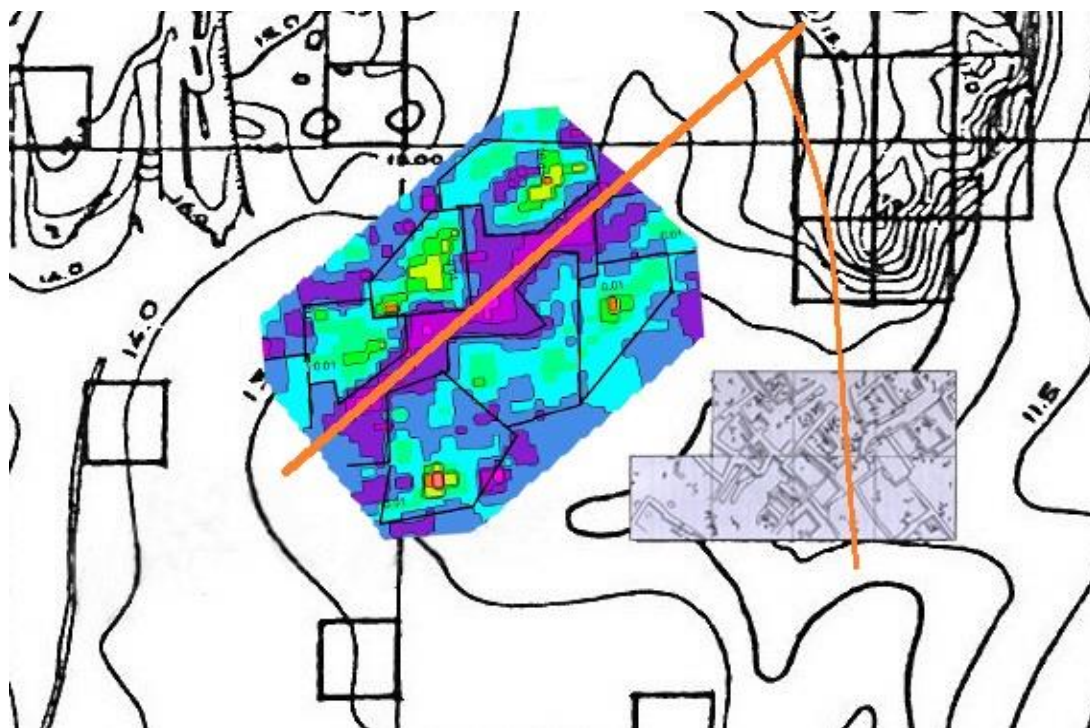
(ب)

شکل ۴-۲۱: الف) کاوش در محدوده حفاری موردنظر در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی. ب) پلان معماری محدوده حفاری موردنظر (روستایی، ۱۳۹۱).

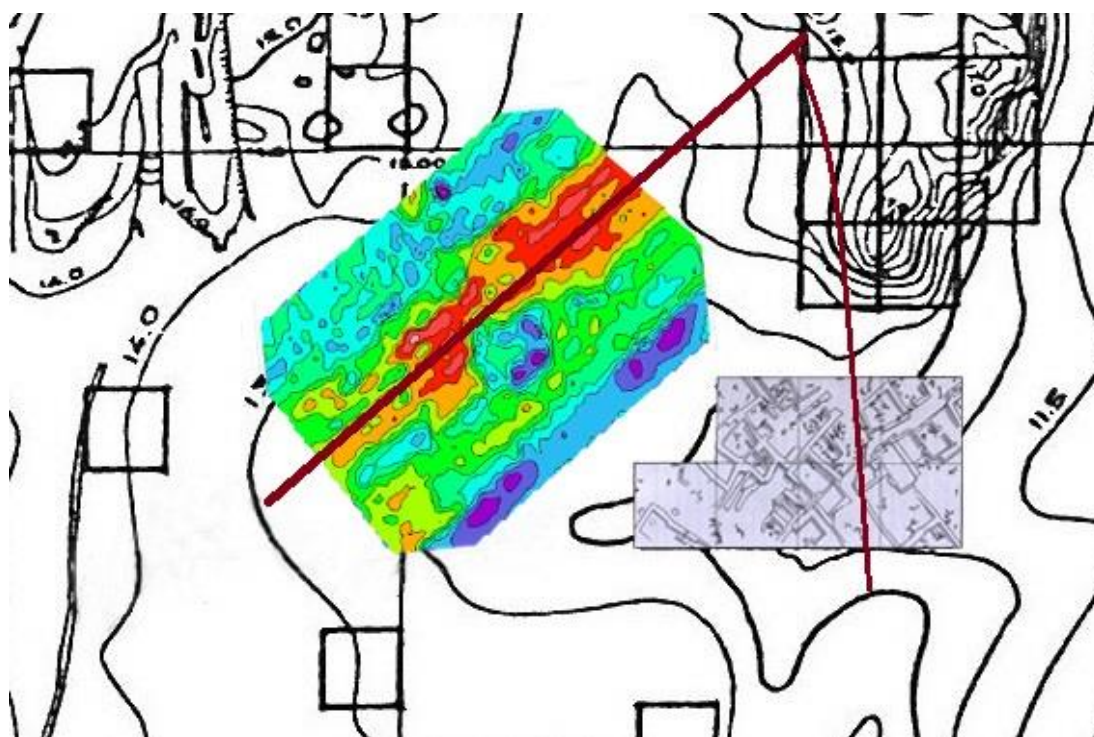
این خصوصیات مربوط به لایه‌های سطحی در تپه حصار است؛ که در زیر لایه‌ها هم تکرار می‌شود (روستایی، ۱۳۹۱). فاصله محدوده حفر شده و محدوده برداشت در این تحقیق بسیار نزدیک بوده و از نظر زمانی، توالی لایه‌ها، نوع سفال، گورها و اشیای به دست آمده مشابه یکدیگر هستند؛ به همین دلیل می‌توان انتظار داشت که از لحاظ معماری و ساختاری هم مشابه باشند، زیرا این علائم مؤید هم‌عصری دو محدوده است. خط نارنجی در (شکل ۴-۲۱ ب) معرف یک کوچه باستانی است.

با تلفیق نتایج بالا می‌توان یک نمای کلی از وضعیت منطقه مورد مطالعه به دست آورد که وضعیت این کوچه‌ها در کنار هم جالب توجه هست. نکته مهم و درخور بررسی در شکل اخیر وضعیت قرارگیری دو کوچه در دو محدوده مورد نظر است که احتمالاً دو راهرو در این بخش باستانی تپه حصار بوده و در بخش میانی تپه سرخ و تپه گنج را به هم مرتبط می‌کرده است. (شکل ۴-۲۲).

با استفاده از فیلتر NAVD که در این پایان‌نامه برای اولین بار معرفی شد و به خوبی مرز آنومالی‌ها و محل دیواره‌ها را مشخص کرده است (شکل ۴-۲۳). در این شکل که حاصل فیلتر NAVD بوسیله روش نزدیکترین همسایه رسم شده است به خوبی می‌توان اتاقک‌ها و دیواره‌ها را روی آن مشخص کرد. پلان معماری حاصل از این نقشه در (شکل ۴-۲۴) نمایش داده شده است که با پلان بدست آمده از حفاری مطابقت زیادی دارد.

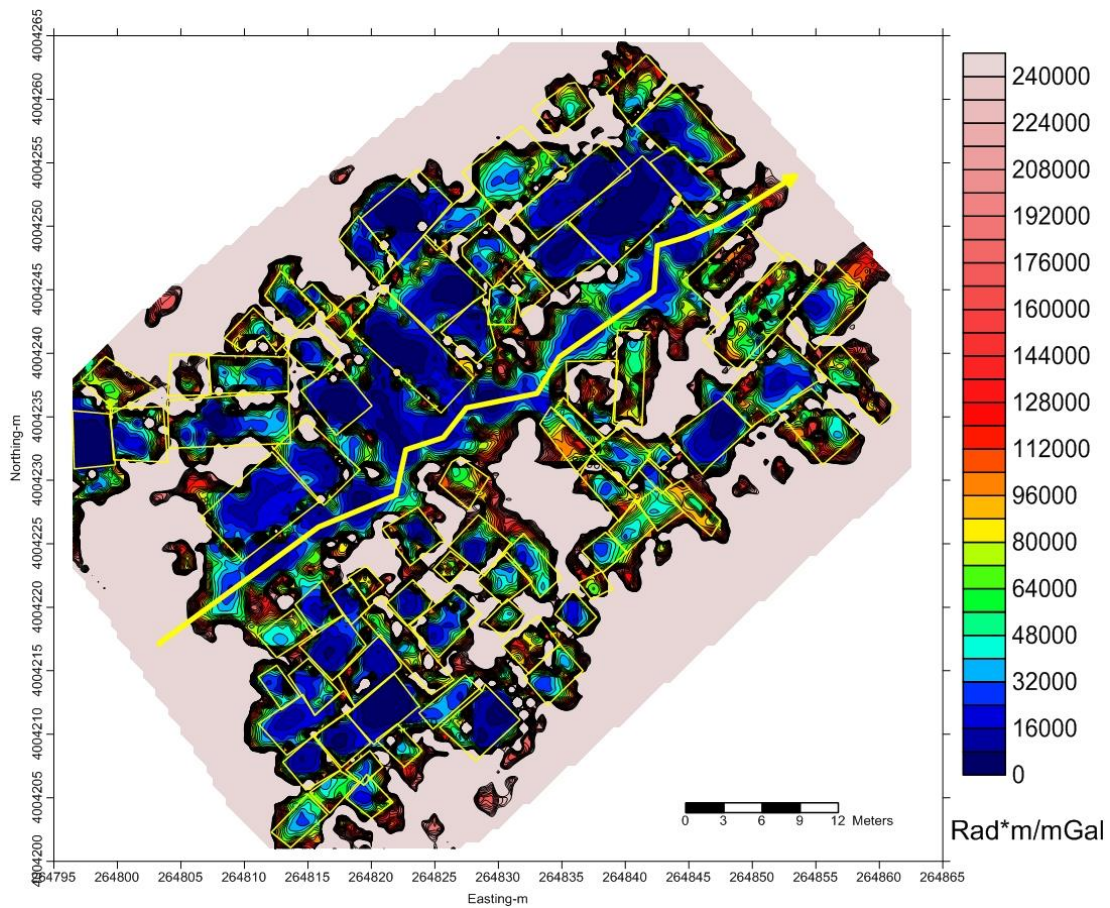


(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۲: ارتباط حفاری‌های محدوده تپه‌حصار با نتایج به دست آمده از روش الف) گرانی‌سنجی، ب) مغناطیس‌سنجی.



شکل ۴-۲۳: نقشه فیلتر NAVD.



شکل ۴-۲۴: پلان معماری بدست آمده از نقشه فیلتر NAVD داده‌های گرانی.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہ ماہ

۵-۱- مقدمه

اساس کار گرانی‌سنجی بر مبنای اختلاف چگالی ساختار مورد مطالعه و محیط دربرگیرنده‌ی آن است. هنگامی که در یک محدوده کوچک بحث گرانی نسبی مطرح است، بهتر است از میکروگرانی استفاده شود. مسلماً استفاده از میکروگرانی مزایا و معایبی خواهد داشت. به‌عنوان مثال اگر توپوگرافی منطقه برداشت شدید باشد، در تفسیرها مشکل وجود خواهد داشت. به همین دلیل نباید انتظار داشت که خروجی‌های داده‌ها کاملاً واضح و آشکار ظاهر شوند. در باستان‌شناسی این روش به‌عنوان یک مبنای مناسب برای آشکارسازی عوارض محیطی مانند دیواره‌ها و اتاقک‌ها می‌تواند استفاده شود.

اساس کار مغناطیس‌سنجی نیز بر مبنای اختلاف مغناطیدگی در توده‌های زیرسطحی و محیط دربرگیرنده‌ی آن است. این تباین مغناطیدگی که می‌تواند دلایل متفاوتی داشته باشد و تغییرات کوچکی در میدان مغناطیسی زمین را شامل شود. در محیط‌های باستانی برای مغناطیس‌سنجی بسته به ساختار محیط و مقدار اکسید آهن می‌توان انتظار نتایج متفاوتی را داشت. به‌رحال استفاده از این روش اطلاعات گرانقدری را از محدوده مورد مطالعه را به‌دنبال خواهد داشت.

۵-۲- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب پایان‌نامه

شناسایی ساختارهای زیرسطحی در مناطق باستانی بدون تخریب و از بین بردن آثار گذشته از ویژگی‌های روش‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه میدان پتانسیل است. در این راستا ارائه فیلترهای مختلف فازی توانسته تا حدود زیادی در تفکیک این‌گونه سطوح و دیواره‌ها موفق باشد. مبنای اصلی این فیلترها عمدتاً مشتق‌های قائم و افقی با فرمت‌های مختلف است؛ اما افزایش نوفه به دلیل مشتق‌گیری از داده‌ها این فیلترها را حساس می‌کند. بنابراین در استفاده از آن‌ها با مرتبه مشتق استفاده‌شده باید دقت کرد. همچنین به دست آوردن کارآمدترین مرتبه مشتق کامل یا غیر کامل در فیلترهای مشتق قائم یا افقی مهم است. نتایج بررسی گرانی‌سنجی در محوطه باستانی تپه حصار نشان می‌دهد که این محدوده از ساخت‌وسازهای جالبی برخوردار بوده که به‌صورت یک شهرک باستانی با مجموعه خانه‌های مشخص و

راهروهای باریک بناشده است. راهرو یا کوچه اصلی در این مجموعه در امتداد شمال شرق-جنوب شرق بوده است و به خوبی در نقشه‌های حاصل از فیلترهای فازی محلی به‌ویژه فیلتر تیلت دیده می‌شود. نوع ظاهری اتاقک‌ها، خانه‌ها و تجمع اتاقک‌ها در محدوده بررسی در بخش شمالی و جنوبی راهروی موردنظر متفاوت به نظر می‌رسد.

بررسی‌ها روی نقشه‌های مختلف نشان می‌دهد که زاویه تیلت به‌عنوان یک فیلتر بالاگذر در متعادل نمودن دامنه آنومالی‌های مختلف مؤثر بوده و راهروی اصلی به‌خوبی در آن تفکیک و بارز شده است. زاویه تیلت هایپربولیک نیز در تفکیک و تشخیص دیواره‌ها و اتاقک‌ها موفق بوده ولی جزئیات کمتر بارز شده و اثر راهرو با تغییراتی همراه است. دو نقشه حاصل از فیلترهای TDX و TDA تا حدود زیادی سبب آشکارسازی دیواره‌ها و اتاقک‌ها شده است. به‌ویژه در مرزها نیز خوب عمل کرده است، به طوری که نقاط بیشینه در دیواره‌ها تجمع یافته و با جزئیات بیشتری بارز شده‌اند. فیلترهای NDR و NAVD روی دیواره‌ها را مقدار بیشینه نشان داده‌اند و از تفکیک‌پذیری خوبی نیز برخوردار بوده‌اند و با متعادل کردن دامنه آنومالی‌ها توانسته‌اند تا حد زیادی بهتر از بقیه فیلترها جزئیات ساختارهای زیرسطحی را بارز نمایند.

مقایسه نتایج حفاری‌ها در این محوطه و نقشه‌های حاصل از آن با نقشه‌های حاصل از عملیات گرانی‌سنجی انطباق مناسبی را نشان می‌دهد به این صورت که ابعاد اتاقک‌ها که در حفاری‌های به دست آمده و به صورت نقشه پلان تهیه شده است؛ با نتایج فیلترهای به کاررفته مطابقت زیادی دارد. همچنین با بررسی‌های انجام‌شده می‌توان این‌گونه عنوان کرد که به علت ساخت چندین لایه (دوره‌های سکونت) در این محدوده و نیز وجود دیواره‌های نزدیک به هم در برخی بخش‌ها، تفکیک مناسبی در آن‌ها ایجاد نشده و اتاقک‌های کوچک تحت تأثیر تباین چگالی بالای دیواره‌های چندلایه‌ای قرار گرفته‌اند.

روش میکروگرانی‌سنجی بر مبنای اختلاف چگالی توده‌ها می‌تواند در آشکارسازی پدیده‌های باستانی استفاده شود و نتایج خوبی به دنبال داشته باشد. طراحی شبکه برداشت (به‌خصوص در میکروگرانی) بسیار مهم است. انتخاب فاصله پروفیل و ایستگاه مناسب در برداشت داده‌ها بسیار مهم

است؛ یعنی بسته شدن خطوط روی نقشه علاوه بر عمق ساختار به طراحی شبکه برداشت نیز بستگی دارد.

برای بارسازی لبه‌ها در داده‌ها از فیلترهای متنوعی می‌توان استفاده کرد. زاویه تیلت برای شناسایی فرم کلی ساختارها مناسب است؛ ولی از گونه هایپربولیک آن و زاویه تتا می‌توان در داده‌های با نوفه زیاد و پدیده‌های متنوع به خصوص داده‌های ژئوفیزیکی باستانی استفاده کرد. فیلترهای NDR و NAVD نیز برای آشکارسازی لبه‌های داده‌ها مؤثر هستند و در متعادل کردن دامنه آنومالی‌ها موفق استفاده شوند.

۵-۳- پیشنهادها

برای ادامه این پروژه پیشنهادهایی ارائه شده که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. با توجه به ظرفیت بالای باستانی ایران و منطقه، همچنین مهجور ماندن روش‌های ژئوفیزیکی در باستان‌شناسی در کشور ما پیشنهاد می‌شود از این روش‌ها به خصوص گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در شناسایی و اکتشافات باستانی استفاده شود. همچنین برای دستیابی به اطلاعات تکمیلی استفاده از دیگر روش‌های ژئوفیزیکی و حفاری در صورت امکان پیشنهاد می‌شود. در مبحث فیلترهای فازی نیز در داده‌هایی که دارای نوفه هستند استفاده از فیلترهایی که کمتر به نوفه حساس هستند و توانایی متعادل کردن آنومالی‌های با دامنه بزرگ و کوچک دارند مثل زاویه تیلت، زاویه تتا، فیلتر NDR و NAVD پیشنهاد می‌شوند. فیلتر NAVD نیز به عنوان یک فیلتر موثر در آشکارسازی لبه پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- آقاجانی، ح.، (۱۳۸۸)، "بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله‌های نفتی"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- امین‌پور، ب.، (۱۳۸۰)، "کاربرد روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی و نمونه‌ای از اجرای روش مغناطیس‌سنجی در اطراف معبد چغازنبیل"، **مجله تاریخ: باستان پژوهشی**، شماره ۸، ص ۶-۹.
- دولتی ارده‌جانی، ف.، (۱۳۷۵)، "تفکیک آنومالی‌های گرانی منطقه بابلسر به روش روند سطحی ارتونرمال" نهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.
- رشمه کریم، ا.، (۱۳۹۰)، "کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین و توموگرافی الکتریکی در کاوش‌های باستان‌شناسی مطالعه موردی تپه حصار دامغان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- روستایی، ک.، (۱۳۹۱)، "کاوش‌های تپه حصار دامغان" اشمیت، الف.، اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان سمنان، چاپ اول.
- شاهیپور شهبازی، ع.ر.، (۱۳۸۴)، **راهنمای مستند تخت جمشید. بنیاد پژوهشی پارسه- پاسارگاد، تهران**، انتشارات سفیران و انتشارات فرهنگسرای میردشتی، چاپ اول.
- شریفی، ف.، (۱۳۹۱)، "اکتشاف آب‌های زیرزمینی کارستی در منطقه جنوب غربی تپال شاهرود با استفاده از مدل‌سازی با روش عددی اجزاء محدود و معکوس‌سازی داده‌های ژئوالکتریک"، پایان-نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود.
- عطائی، م.ت.، (۱۳۸۳)، "معرفی سفال هخامنشی حوزه فارس، بررسی روشمند طبقه‌بندی شده باروی تخت جمشید"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس.

علیتاجر، س.، افشاری آزاد، س.، (۱۳۹۲)، "بررسی جایگاه مهندسی ژئوماتیک در کاربردهای میراث-فرهنگی - باستان‌شناسی و معماری"، *مجله پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران*، شماره ۵، ص

۱۶۹-۱۹۵.

کلاگری، ع.ا.، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، جلد اول، انتشارات دانشگاه تبریز، چاپ اول. محمدخانی، ک.، (۱۳۸۳)، "کاربرد روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی (آرکتئوژئوفیزیک) مطالعه موردی، بررسی مغناطیس‌سنجی در تخت جمشید و پاسارگاد"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد باستان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

میرکمالی، ا.، (۱۳۹۳)، "تعیین امتداد، عمق و مناطق ریزشی قنات حاجی آباد در دامغانبا استفاده از تفسیر آنومالی‌های میکروگرانی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

نوروزی، غ.ج.، (۱۳۸۸)، "ژئوفیزیک اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول.

References:

- Aitken, M.J., (1958) "Magnetic Prospecting: I - The Water Newton Survey" *Archaeometry*, 1, pp24-29.
- Allred, J.C., (1964) "A fluxgate gradiometer for archaeological surveying" *Archaeometry*, 7(1), pp14-19.
- Arsoy, M.Ö., & Dikmen, Ü., (2011) "Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping" *Computers & Geosciences*, 37(7), pp935-942.
- Aspinall, A., Gaffney, C.F., & Schmidt, A. R., (2008) "Magnetometry for Archaeologists" AltaMira Press, United Kingdom.
- Batayneh, A., Khataibeh, J., Alrshdan, H., Tobasi, U., & Al-Jahed, N., (2007). "The use of microgravity, magnetometry and resistivity surveys for the characterization and

- preservation of an archaeological site at Umm er-Rasas, Jordan” *Archaeological Prospection*, 14(1), pp60-70.
- Bevan, B.W., (1994) “The magnetic anomaly of a brick foundation” *Archaeological Prospection*, 1(2), pp93-104.
- Bishop, I., Styles, P., Emsley, S.J., & Ferguson, N.S., (1997) “The detection of cavities using the microgravity technique: case histories from mining and karstic environments” *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 12(1), pp153-166.
- Blakely, R.J., (1996) “*Potential theory in gravity and magnetic applications*” Cambridge University Press.
- Castiello, G., Florio, G., Grimaldi, M., & Fedi, M., (2010) “Enhanced methods for interpreting microgravity anomalies in urban areas” *first break*, 28(8), pp93-98.
- Cheyney, S., (2012) PhD. thesis, “3D quantitative interpretation of archaeomagnetic surveys: application of mathematical modelling to determine depths and physical characteristics of buried materials” Department of Geology, University of Leicester.
- Clark, A., (1990) “*Seeing beneath the soil prospecting methods in archaeology*” BT Batsford Ltd. London.
- Cooper, G.R.J., & Cowan, D.R., (2003) “The application of fractional calculus to potential field data” *Exploration Geophysics*, 34(1/2), pp51-56.
- Cooper, G.R.J., & Cowan, D.R., (2006) “Enhancing potential field data using filters based on the local phase” *Computers & Geosciences*, 32(10), pp1585-1591.
- Cooper, G.R.J., & Cowan, D.R., (2007) “Enhancing linear features in image data using horizontal orthogonal gradient ratios” *computer & Geosciences*, 33, pp981-984.
- Cooper, G.R.J., & Cowan, D.R., (2008) “Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics” *Geophysics*, 73(3), ppH1-H4.
- Dobrin, M.B., & Savit, C.H., (1960) “*Introduction to geophysical prospecting*” 4, McGraw-hill, New York.
- Fajkiewicz, Z. J., (1976) “Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropogenic forms” *Geophysics*, 41(5), pp 1016–1030.
- Fassbinder, J.W., Stanjek, H., & Vali, H., (1990) “Occurrence of magnetic bacteria in soil” *Nature*, 343(6254), pp161-163.

- Finlay, C.C., Maus, S., Beggan, C.D., Bondar, T.N., Chambodut, A., Chernova, T.A., ... & Zvereva, T.I., (2010) "International geomagnetic reference field: the eleventh generation" *Geophysical Journal International*, 183(3), pp1216-1230.
- Gaffney, C.F., Gater, J.A., Linford, P., Gaffney, V.L., & White, R., (2000) "Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the Roman city of Wroxeter" *Archaeological Prospection*, 7(2), pp81-99.
- Gharibi, M., & Pedersen, L.B., (2000) "Removal of DC power-line magnetic-field effects from airborne total magnetic-field measurements" *Geophysical prospecting*, 48(3), pp617-627.
- Hansen, R.O., Racic, L., & Grauch, V.J.S., (2005) "Magnetic methods in near-surface geophysics. Near-surface geophysics" *Society of Exploration Geophysicists U.S.A.*, first edition, pp151–176.
- Hesse A., Barba, L., Link, K., & Ortiz, A., (1997) "A magnetic and electrical study of archaeological structures at Loma Alta, Michoacan, Mexico" *Archaeological Prospection*, 4(2), pp53-67.
- Le Borgne, E., (1955) "Susceptibilit magnétique anormale du sol superficiel" *Annales de Geo- physique*, 11, pp399–419.
- Linford, N., (2004) "Magnetic ghosts: mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves" *Archaeological Prospection*, 11(3), pp167-180.
- Linford, N., (2006) "The application of geophysical methods to archaeological prospection" *Reports on progress in physics*, 69(7), pp2205.
- Linington, R.E., (1966) "Test use of a gravimeter on Etruscan chamber tombs at Cerveteri" *Prospezioni Archeologiche*, 1, pp37-41.
- Maher, B.A., & Taylor, R.M., (1989) "Formation of ultrafine—grained magnetite in soils" *Nature*, 336, pp368-370.
- Miller, H.G., & Singh, V., (1994) "Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources" *Journal of Applied Geophysics*, 32, pp213–217.
- Newson, M., (1988) "Environmental magnetism by Roy Thompson and Frank Oldfield, Allen and Unwin, London 1986. No. of pages: 227" *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, pp94-95.
- Pánisová, J., & Pašteka, R., (2009) "The use of microgravity technique in archaeology: A case study from the St. Nicolas Church in Pukanec, Slovakia" *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 39(3), pp237-254.

- Reynolds, J.M., (2011) "An introduction to applied and environmental geophysics" *John Wiley & Sons*.
- Roustaei, K. 2010. Tappeh Hesar: Once Again. Proceedings of the Sixth International Congress on Archaeology of the Ancient Near East, May 5th-8th 2008, Sapienza, Universita di Roma, Volume 2, Excavations, Surveys and Restorations: Reports on Recent Field Archaeology in the Near East, Edited by Paolo Matthiae, Frances Pinnock, Lorenzo Nigro and Nocolo Marchetti, Wiesbaden: Harrasowitz Verlag, pp 613-633.
- Slepak, Z., (1999) "Electromagnetic sounding and high-precision gravimeter survey define ancient stone building remains in the territory of Kazan Kremlin (Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)" *Archaeological Prospection*, 6(3), pp147-160.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sheriff, R.E., (1990) "Applied geophysics" Vol. 1, Cambridge university press.
- Tite, M.S., & Mullins, C., (1971) "Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites" *Archaeometry*, 13(2), pp209-219.
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M., & MacKenzie, C., (2004) "New insights into magnetic derivatives for structural mapping" *The Leading Edge*, 23(2), pp116-119.
- Weston, D.G., (2002) "Soil and susceptibility: aspects of thermally induced magnetism within the dynamic pedological system" *Archaeological Prospection*, 9(4), pp207-215.
- Wijns, C., Perez, C., & Kowalczyk, P., (2005) "Theta map: Edge detection in magnetic data" *Geophysics*, 70(4), ppL39-L43.

Abstract:

Prospecting and research of the remaining relics from the past has special importance to identifying the date, history and the identity of a country. Development and the advancement of human knowledge have offered new methods for the detection archaeological sites that by using them without excavation and destruction of the antiquities could be found useful information. Before excavations and drilling, using geophysical methods such as gravimetry and magnetometry is useful for detecting these structures. In the gravity method, the density contrast between the anomalous bodies and the country rocks or around of them has been investigated. By means of magnetic method, magnetization contrast to the surrounding environment with metal items, building materials and cavities filled with different magnetic materials are investigated.

The study aims to identify subsurface structures at the archaeological site of Tepe-Hissar, Damghan using gravimetric and magnetic data. To achieve this goal in a regular grid of square-rectangular, the gravity values at 600 stations and the magnetic values at 1,200 points were measured. After doing correction and processing on the measured data, the anomalies map of gravity and magnetic were prepared.

To review and interpret the collected data, the local phase filters were used. So, for evaluating the ability of each of these filters on the field data, based on the features of structures in the Tepe-Hissar sites, a synthetic model of the chambers and walls was prepared by using Potent software and then the gravity and the magnetic value due to this model were calculated. After that, the local phase filters such as tilt angle, theta map, Laplacian, Hyperbola tangent and two new filters named the normalized derivatives ratio and the normalized angle respect to vertical derivative imposed on the data and the results were analyzed. Then these filters were used to detect and interpretation of gravity and magnetic anomalies boundary in Tepe-Hissar. By using the filters on the anomalies, the position of the walls and the ancient chambers were identified. The results of these methods with the results of carried out excavations in the last few decades are highly adaptable. In the other hand, the subsurface structures in areas such as lane, walls or homes confirm the results of gravimetric and magnetic surveys. Since archeology exploration usually investigate by drilling and excavation but using indirect geophysical studies can provide an outline to exploration them. In addition, saving cost and time and to prevent the destruction of the old targets it can be useful.

Keywords: Gravimetry, Magnetometry, archaeological site of Tepe-Hissar, Archeology, Edge detection, Local phase filters, Normalized derivatives ratio filter, normalized angle respect to vertical derivative filter.



Shahrood University

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

**Using gravity and magnetic data to detect subsurface structures in
the Teppe-hissar ancient area-Damghan**

Behzad Sarlak

Supervisors:

Hamid Aghajani
and **Ali Nejati Kalateh**

September 2015