



آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی باستانی در تپه حصار دامغان با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی

بهزاد سرلک^۱، حمید آقاجانی^{۲*} و علی نجاتی کلاته^۲

۱- کارشناس ارشد ژئوفیزیک (گرانی‌سنجی)، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۳؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۶

* نویسنده مسئول مکاتبات: haghajani@shahroodut.ac.ir

واژگان کلیدی

مغناطیس‌سنجی
باستان‌شناسی
آشکارسازی لبه
فیلترهای فازی
محوطه باستانی تپه حصار

چکیده

استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در کاوش‌های باستانی، قبل از حفاری، جهت تعیین مرز بی‌هنجاری‌ها می‌تواند مفید و مؤثر باشد. در این میان، به دلیل نداشتن اثرات مخرب محیطی، روش مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های پرکاربرد است. در محوطه‌های باستانی تغییر مغناطیدگی در محیط به دلایل طبیعی و فعالیت‌های بشری صورت می‌گیرد. به کمک روش مغناطیس‌سنجی، تباین خودپذیری مغناطیسی محیط پیرامون به‌طور کلی با اقلام فلزی، مصالح ساختمانی مورد استفاده و حفره‌های پر شده با مواد متنوع که دارای خاصیت مغناطیسی هستند، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این مقاله از داده‌های مغناطیس مصنوعی، واقعی و فیلترهای فازی به‌منظور بررسی ساختارهای زیرسطحی در محوطه باستانی تپه حصار دامغان استفاده شده است. در این راستا از فیلترهای زاویه تمایل، نقشه تناه، لاپلاسیان و تانژانت هاپرپولیک استفاده شد. همچنین در این مقاله یک فیلتر توانمند جدید که یک زاویه از نسبت مشتق‌های افقی است و در راستای محور قائم نرمالیزه شده، معرفی شد. این فیلتر روی لبه‌ها بیشینه می‌شود و به‌خوبی مرزها را آشکار می‌کند. نتایج حاصل از بررسی داده‌های مغناطیسی تپه حصار با نتایج حفاری‌های انجام‌شده انطباق بالایی دارد.

۱- مقدمه

کردند که نوع خاصی از باکتری است که بلورهای مغناطیسی کوچک از اکسید آهن در خاک به وجود می‌آورد. این عمل به صورت ویژه در پوسیدن چوب صورت می‌گیرد (Clark et al., 1990; Aspinall et al., 2008).

برای خشت‌های رسی که معمولاً پس از حرارت دیدن انتقال پیدا کرده‌اند و سپس در سازه‌ها قرار داده شده‌اند، آرایش حوزه‌های مغناطیسی خشت‌ها در کنار هم بعد از جابجایی اغلب متفاوت است؛ یعنی ممکن خشت‌ها در حین جابجایی چرخیده باشند و دیگر حوزه‌های یک خشت نسبت به خشت کناری هم‌جهت نباشد، لذا مغناطیدگی ترکیب شده ساختمان‌ها به اندازه آنومالی کوره‌ها و سطوح آشپزخانه‌ها قوی نیست (Hessa et al., 1997; Bevan, 1994). آنومالی‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده در سطح زمین، تباین بین پدیده‌های باستانی مدفون و محیط دربرگیرنده آنان را نشان می‌دهد؛ یعنی اندازه این آنومالی‌ها به خودپذیری مغناطیسی هر دو عامل بستگی دارد. در محیطی که خاک اکسید آهن کمی داشته باشد؛ یک پدیده باستانی مثلاً یک دیوار خشتی تا حدودی قابل شناسایی است. در داده‌های مغناطیسی تباین مثبت عموماً در مناطقی دیده می‌شود که گودال یا عارضه‌ای در خاک سطحی حفر شده باشد. این موضوع سبب به هم خوردن خاک و هوازدگی آن شده و باعث افزایش خودپذیری مغناطیسی در درون گودال می‌شود (Linford, 2006). آنومالی‌های منفی نیز می‌توانند بدین گونه به وجود آمده باشند؛ یعنی گودال با ماده‌ای که خودپذیری کمتری نسبت به خاک اطراف را دارد پر شده باشد. این مسئله اغلب در پی و دیوارها به وجود می‌آید؛ که خودپذیری کمتری دارند. مثلاً اگر از جنس سنگ‌آهک باشند.

سابقه استفاده از مغناطیس‌سنجی در باستان‌شناسی به دهه ۵۰ و ۶۰ قرن گذشته میلادی برمی‌گردد که به عنوان نمونه می‌توان به مطالعه Aitken, (1958) اشاره کرد. با تکامل مغناطیس‌سنج‌ها این فرآیند سرعت بیشتری یافت، به گونه‌ای که مدت زمان کمتری کاوش مساحت بیشتری از یک سایت ممکن گشته است (Alldred, 1964). همچنین Tite and Mullins (1971) نشان دادند که به کمک روش مغناطیس‌سنجی می‌توان آثار قدیمی و باستانی معماری زیرزمینی را شناسایی کرد. در دو دهه اخیر به واسطه تکامل فیلترها، روش‌های پردازش و امکان متعادل‌سازی آنومالی‌ها با دامنه‌های بزرگ و کوچک، استفاده از روش مغناطیس‌سنجی در باستان‌شناسی افزایش یافته است؛ که ویژگی آن ترکیبی از قدرت تفکیک فضایی بالا و پوشش گسترده منطقه است (Gaffney et al., 2000).

در ایران نیز تعدادی از پژوهشگران در این زمینه فعالیت داشته‌اند؛ که می‌توان برای نمونه به موارد کاربرد روش مغناطیس‌سنجی در شناسایی محوطه باستانی چغازنبیل به جهت وجود خاصیت مغناطیسی باقی‌مانده حرارتی در بقایای سازه‌های

از کاربردهای مهم علم ژئوفیزیک اکتشافات باستانی است؛ که این خود باعث به وجود آمدن رشته‌ی باستان ژئوفیزیک یا ژئوفیزیک باستانی شده است. مطالعه مغناطیس زمین قدیمی‌ترین شاخه ژئوفیزیک است؛ که گیلبرت (Gilbert, 1603-1540) اولین بار بررسی‌های خود را در این مورد انجام داد و نشان داد که میدان مغناطیسی زمین هم‌ارز یک آهن‌ربا است و در راستای تقریبی شمالی- جنوبی در نزدیکی محور چرخش زمین قرار دارد. در سال ۱۸۴۳ فن‌ورده (Von Wrede) برای اولین بار تغییرات میدان مغناطیسی را برای تعیین محل کانسارهای مغناطیسی بکار برد. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه‌ی ساخت دستگاه‌ها و تفسیر داده‌های این قدیمی‌ترین روش ژئوفیزیک که علاوه بر باستان‌شناسی برای تعیین محل کانی‌های پنهان و ساختارهای مربوط به نهشته‌های زیرسطحی نیز بکار می‌رود؛ پدید آمده است (Telford, 1990).

به دلیل هزینه کم و سرعت بالای برداشت داده در این روش نسبت به دیگر روش‌های ژئوفیزیک، استفاده از آن در سطح وسیعی همه‌گیر شده است. مغناطیدگی ناشی از یک خاصیت ذاتی مواد به نام خودپذیری مغناطیسی است؛ که به عوامل و شرایط مختلفی بستگی دارد. با توجه به مغناطیدگی و تباین مناسب خودپذیری مغناطیسی بین ساختارهای زیرسطحی در محوطه‌های باستانی، از این روش می‌توان در شناسایی این محوطه‌ها استفاده کرد. مغناطیدگی در مواد باستانی ناشی از کوره‌ها، تنورها، کف اتاق‌ها، آشپزخانه‌ها، سفالینه‌ها، خشت‌ها و حتی خاک هوازده است (Aspinall et al., 2008).

آنومالی مغناطیسی نشان‌دهنده‌ی خصوصیات مغناطیسی توده‌ها و اجسام مورد مطالعه است. این عامل در بررسی‌های مغناطیسی در مناطق باستانی با تغییر مقدار مغناطیدگی در محیط همراه است و این تغییرات می‌تواند وابسته به آثار فعالیت‌های بشری نظیر دست‌ساخته‌های فلزی و همچنین مصالح ساختمانی در یک محوطه باستانی باشد. افزون بر آن، به دلایل طبیعی نیز این اتفاق ممکن است صورت گیرد. به عنوان نمونه خاک سطحی در مقایسه با خاک قرار گرفته در عمق، 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 اکسیدشدگی فلزات و اثرات دوره‌ای مرطوب و خشک شدن خاک است. همچنین اثرات آتش (گرما) بر روی خاک به‌طور چشم‌گیری باعث افزایش مغناطیدگی 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. به‌گونه‌ای مشابه Fassbinder et al., (2010) یک باکتری مغناطیسی را کشف

تعادل بین نوفه و داده برای تهیه یک نقشه مشتق باکیفیت مؤثر باشد. در این مقاله هدف شناسایی ساختارهای موجود در محوطه به روش مغناطیس‌سنجی است؛ که با استفاده از فیلترهای مختلف صورت پذیرفته است. در این راستا یک فیلتر جدید به نام زاویه بهنجار بر مشتق قائم نیز معرفی می‌شود؛ که توانایی خوبی در شناسایی لبه‌ها دارد و مرزها را بیشینه می‌کند. اساس و بنیان این فیلتر بر مبنای مجموع نسبت مشتق افقی بنا شده است.

۲- روش کار

روش کار در این مطالعه بر مبنای استفاده از فیلترهای فازی، داده‌های مصنوعی و سپس اعمال فیلترها روی داده‌های مصنوعی و واقعی و در آخر مقایسه آن‌ها بنا نهاده شده است.

۲-۱- فیلترهای فازی

شدت مغناطیدگی القایی M هم مشابه با شدت میدان مغناطیسی کل H ، (TMI^1) است و با آن متناسب است.

$$M=kH \quad (1)$$

که در آن پارامتر بدون بعد k خودپذیری مغناطیسی است و اغلب با پسوند SI که معرف سیستم استاندارد جهانی است نمایش داده می‌شود. باید توجه داشت که بین خودپذیری در سیستم SI^2 و خودپذیری در سیستم emu^3 تفاوت وجود دارد ($1 \text{ emu} = 4\pi SI$). برای شدت میدان مغناطیسی نیز در باستان‌شناسی از واحد مناسب نانو تسلا (Nt) استفاده می‌شود (Telford, 1990).

پس از برداشت داده‌ها و انجام تصحیحات روزانه و تصحیح $IGRF^4$ که اثر کلی میدان مغناطیسی زمین را دربردارد؛ آنومالی مغناطیسی به دست می‌آید. تصحیح روزانه نیز برای حذف تغییرات آبی در میدان مغناطیسی زمین است؛ اما شدت میدان مغناطیسی حاصل پس از اعمال فیلتر تبدیل به قطب مغناطیسی؛ معرف مغناطیدگی هدف مورد اکتشاف در منطقه مورد مطالعه است. سپس با استفاده از فیلترهای مختلف تفکیک کیفی و کمی آنومالی مانند روش روند سطحی، گسترش میدان به سمت بالا و پایین و مشتقات قائم استفاده می‌شود. همچنین از فیلترهای فازی محلی برای شناسایی عمق و لبه‌ها می‌توان استفاده نمود؛ تا بهترین نتیجه حاصل شود. آشکارسازی لبه‌های ساختارهای ژئوفیزیکی از تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی انجام می‌شود. گرادیان افقی از میدان پتانسیل H فاصله نمونه‌برداری Δx در طول یک پروفیل در فضای مکان از معادله زیر محاسبه می‌شود.

آجری (امین پور، ۱۳۸۰)، بررسی‌های باستان ژئوفیزیکی در پیرامون تختگاه تخت جمشید (کوروش محمدخانی ۱۳۸۳)، بررسی باروی تخت جمشید (عطائی ۱۳۸۳)، کاوش‌های باستان‌شناسی در تپه‌های باستانی مرودشت در سال ۱۳۸۳ با همکاری گروه باستان‌شناسی بنیاد و دانشگاه شیکاگو اشاره کرد (شاهپور شهبازی، ۱۳۸۴).

محوطه تپه حصار با وسعت بیش از ۱۸ هکتار در جنوب شرقی شهر دامغان و در فاصله ۳۴۰ کیلومتری از شرق تهران واقع است. این محوطه ابتدا توسط اریخ اشمیت (Erich Schmidt) از دانشگاه پنسیلوانیا در طی سال‌های ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ میلادی مورد کاوش‌های باستان‌شناسی قرار گرفت و آثار ارزنده‌ای متعلق به هزاره‌های ۵ تا ۲ قبل از میلاد 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 پس‌از این کاوش به‌عنوان 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. 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. بر اساس یافته‌های به‌دست‌آمده، قدیمی‌ترین لایه‌های تپه حصار به اواسط هزاره پنجم قبل از میلاد بازمی‌گردد و استقرار در آن تا حدود ۱۷۰۰ پیش از میلاد به‌طور پیوسته ادامه داشته و پس‌از آن هیچ‌گاه مورد سکونت قرار نگرفته است (اشمیت، Roustaei, 2010؛ ۱۳۹۱).

فیلترهای بنیان شده بر روی مشتق (فاز محلی) معمولاً به‌عنوان یک ابزار مفید در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل به‌کاربرده می‌شوند. این فیلترها لبه‌های آنومالی‌ها در داده‌ها را بارز می‌کنند به همین خاطر می‌توانند در آشکارسازی لبه‌ها و تعیین مرزهای ساختارهای زمین‌شناسی مفید واقع شوند، اما چون شکلی از فیلترهای بالا گذر هستند؛ یک ظرفیت ناخواسته برای افزایش نوفه در داده را به همراه دارند. بسته به تغییرات نرم یا خشن داده‌ها می‌توان از یک مرتبه مشتق مناسب استفاده کرد؛ که در افزایش

¹ Total Magnetic Intensity

² International Standard

³ Electromagnetic Units

⁴ International Geomagnetic Reference Field

(Miller and Singh, 1994).

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{\partial H / \partial z}{\sqrt{(\partial H / \partial x)^2 + (\partial H / \partial y)^2}} \right) \quad (6)$$

که در آن H شدت میدان مغناطیسی کل است. از آنجا که این فیلتر مبتنی بر نسبت مشتقات میدان است، لذا در متعادل کردن دامنه‌های آنومالی‌های عمیق نسبت به آنومالی‌های کم عمق مؤثر است؛ اما الزاماً این فیلتر یک فیلتر تشخیص لبه نیست. به عبارتی این فیلتر زاویه‌ی تمایل دامنه‌ی آنومالی‌های عمیق تر را نسبت به سطحی تقویت می‌کند. مقدار این زاویه زمانی که بالای منبع آنومال قرار می‌گیرد، مثبت بوده و زمانی که بالا یا نزدیک لبه‌های آن منبع قرار گیرد، صفر می‌شود. این دقیقاً جایی است که مشتق قائم صفر و مشتق افقی بیشینه است و در خارج از محدوده منبع آنومال نیز مقدار آن منفی است؛ یعنی جایی که مشتق قائم منفی می‌شود. مقدار زاویه تمایل صرفه نظر از مقادیر مشتقات افقی و قائم در بازه [۹۰، -۹۰] درجه قرار می‌گیرد (Miller and Singh, 1994).

استفاده از قسمت حقیقی تابع تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت^۶ (Cooper and Cowan, 2006)، تصویر بهتری از لبه اجسام ارائه می‌دهد. بیشینه مقدار این فیلتر لبه اجسام را نشان می‌دهد.

$$HTA = \text{Re} \left[\tanh^{-1} \left(\frac{\partial H / \partial z}{\sqrt{(\partial H / \partial x)^2 + (\partial H / \partial y)^2}} \right) \right] \quad (7)$$

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

زاویه تتا نیز یک فیلتر مؤثر است که با استفاده از دامنه سیگنال تحلیلی مجموع مشتق افقی را به هنجار می‌کند. این بهنجارش به صورت کنترل گر 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 به اندازه‌ی زاویه منحصر می‌شود، ولی نتیجه آن یک تصویر خوب است؛ که تفسیر آن به آسانی امکان پذیر است (Wijns et al., 2005).

$$\cos(\theta) = \frac{\sqrt{(\partial H / \partial x)^2 + (\partial H / \partial y)^2}}{\sqrt{(\partial H / \partial x)^2 + (\partial H / \partial y)^2 + (\partial H / \partial z)^2}} \quad (8)$$

هنگام عبور بردار سیگنال تحلیلی (مخرج کسر) از روی یک مرز قائم می‌چرخد؛ بنابراین دامنه سیگنال تحلیلی یک مقدار بیشینه بالای آن مرز خواهد داشت. گرادیان کل افقی (صورت کسر) نیز بالای مرز مقداری بیشینه دارد و البته به همراه مقادیر صفری که در هر دو طرف مرز یا لبه خواهد داشت. در نتیجه مقدار $\cos \theta$ بالای مرز یا لبه بیشینه خواهد شد؛ اما به خاطر تقاطع‌های صفر مشتق افقی، با دو مقدار صفر محصور می‌شود. این موضوع مهم است به

$$\frac{dH}{dx} = \frac{H(x) + \Delta x - H(x)}{\Delta x} \quad (2)$$

و می‌توان در فضای فرکانس این گونه نوشت:

$$A'(u) = A(u)(iu)^n \quad (3)$$

که در آن $A(u)$ 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 اول در هر طرف جسم روی لبه جسم روی می‌دهد، در حالی که در همان نقطه مقدار گرادیان افقی مرتبه ۲ صفر هست. منحنی‌ها از یک نامتقارنی کامل در مرتبه $(n=1)$ با افزایش تدریجی n به تقارن کامل در مرتبه $(n=2)$ و البته معکوس نمودار داده اصلی می‌رسند و همچنین با افزایش مرتبه n جمع تر یا فشرده تر خواهند شد. در صورتی که مشتق اول افزایش زیاد نوفه را به دنبال داشته باشد، مقادیر کمتر از یک برای پارامتر n برای افزایش کمتر نوفه و همچنین با اثر جابجایی کمتر مرزها می‌تواند استفاده شود.

همچنین استفاده از روش گرادیان 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 عبارت است از:

$$A'(u) = A(u)|u|^n \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \quad (5)$$

این روش بهتر است؛ زیرا محاسبه مشتق افقی در حوزه مکان معمولاً سریع انجام می‌پذیرد و عموماً از محاسبه مستقیم معادله (۳) پایدارتر است. یک نقص این روش افزایش نویز در داده‌ها در اثر افزایش مرتبه است. به طور کلی اگر لازم باشد که داده‌ها نرم تر شوند، می‌توان از مقادیر منفی n نیز استفاده کرد (Cooper and Cowan, 2003).

استفاده از فیلترهای فازی برای شناسایی لبه در داده‌های میدان پتانسیل مفید است. این فیلترها با تغییر فازی که در داده به وجود می‌آورند؛ لبه‌ها را به خوبی بارز می‌کنند؛ اما نوفه در داده را نیز افزایش می‌دهند. فیلترهای فاز محلی معمولاً 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. به هر حال در یک تغییر ناگهانی از π تا $-\pi$ اتفاق می‌افتد، اما وجود نویز و الیاسینگ می‌تواند فرآیند را مشکل کند. فیلتر فازی متداول زاویه تیلت^۵ (کجی) است که به صورت زیر تعریف می‌شود

⁶ Tangent Hyperbolic of Tilt Angle

⁵ Tilt Angle (TA)

(Robert) که از مشتق درجه اول استفاده می‌کنند و فیلترهای جهتی می‌باشند و همچنین فیلتری مانند لاپلاس که از مشتق درجه دوم استفاده می‌کند. لاپلاس دارای چند نوع است و توانایی این را دارد که لبه‌ها را در هر جهتی بارز کند. فیلتر لاپلاس از حل مستقیم معادله لاپلاسی به وسیله روش تفاضل محدود محاسبه می‌شود. مقادیری عددی فیلترهای لاپلاسی در شکل ۱ ارائه شده است. فیلتر لاپلاس نوع اول و چهارم تا حدودی در آشکارسازی گوشه‌ها بهتر عمل می‌کنند (Arisoy and Dikmen, 2011).

۰	-۱	۰
-۱	۴	-۱
۰	-۱	۰

ب: نوع دوم

-۱	۰	-۱
۰	۴	۰
-۱	۰	-۱

د: نوع چهارم

-۱	-۱	-۱
-۱	۸	-۱
-۱	-۱	-۱

الف: نوع اول

۱	-۲	۱
-۲	۴	-۲
۱	-۲	۱

ج: نوع سوم

شکل ۱: انواع فیلترهای نوع لاپلاسی (بر اساس ترکیب مشتقات افقی داده‌ها).

مؤلفه کسری درست‌شده که این کسرها عکس هم هستند و در شرایطی که روی یک لبه حرکت شود، حداقل یکی از این کسرها به بی‌نهایت میل می‌کند و باعث می‌شود صورت کسر بیشینه شود. نکته مهم دیگر توانایی این فیلتر در متعادل‌سازی آنومالی‌های بزرگ و کوچک دامنه در کنار هم هست. محاسبه مشتق از مرتبه کمتر از یک گرچه در فضای مکان-زمان ممکن نیست؛ اما به وسیله تبدیل فوریه در فضای فرکانس امکان‌پذیر است. این فیلتر نیازمند این است که داده‌ها یک قدرت تفکیک تصویری بالایی داشته باشد؛ بنابراین در مواردی که وضوح یا قدرت تفکیک کم است، 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.

۲-۲- اعمال فیلترها روی داده‌های مصنوعی

به منظور بررسی توانمندی فیلترهای ذکر شده در تعیین و شناسایی آنومالی‌های مغناطیسی و همچنین آشکارسازی مرز آن‌ها و تفکیک لبه‌ها از یک مدل مصنوعی مشابه منطقه تپه حصار به صورت مجموعه‌ای دیواره و اتاقک استفاده شد. برای این هدف در نرم‌افزار Potensoft اثر مغناطیدگی مدل تهیه و در یک فایل مشخص ذخیره شد (شکل ۲ - الف). مدل مصنوعی شامل دیواره‌ها (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 زیر سطح زمین و یک لایه پوششی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و با گسترش بیشتر به ابعاد

خاطر اینکه $\cos \theta$ ، روی مناطق آرام مغناطیسی یا جایی که تباین چگالی اندک باشد؛ یعنی جایی که مشتقات به صفر نزدیک است، همچنان بزرگ باقی می‌ماند. به علاوه 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).

از روش‌های متداول دیگر آشکارسازی لبه، استفاده از فیلترهای پردازش تصویر هست. فیلترهایی مانند سوبل (Sobel)، روبرت

علاوه بر فیلترهای ذکر شده و بر اساس بنیان‌های فیلترهای بالا فیلتری دیگر ارائه شد. استفاده از نسبت مشتق افقی یک روش در فیلترهای پردازشی است؛ که توانایی خوبی در شناسایی لبه‌ها دارد. با الهام از این موضوع فیلتر زاویه به هنجار شده بر مشتق قائم (NAVD^۷) معرفی می‌شود؛ که لبه‌ها را مشخص می‌کند.

$$\text{NAVD} = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\left[\frac{\partial^{0.5} H / \partial x^{0.5}}{\partial^{0.5} H / \partial y^{0.5}} \right]^2 + \left[\frac{\partial^{0.5} H / \partial y^{0.5}}{\partial^{0.5} H / \partial x^{0.5}} \right]^2}{\left[\frac{\partial H}{\partial z} \right]^2} \right)}{\left| \frac{\partial H}{\partial z} \right|} \quad (9)$$

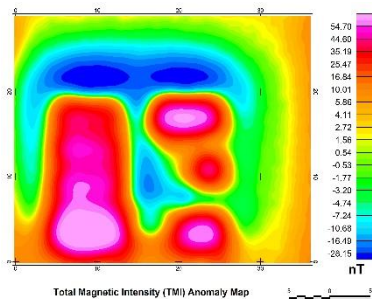
این فیلتر اگرچه از مرتبه نیم dx و dy استفاده می‌کند؛ به خوبی توانسته لبه‌ها را تا حدودی در هر جهتی بارز کرده و تغییر فازی روی داده‌ها به وجود نمی‌آورد؛ یعنی جایگاه مرزها را تغییر نمی‌دهد. همچنین در مقایسه با دیگر فیلترها جواب تیزتری اطراف قله‌های آنومالی دارد. این فیلتر لبه‌ها را به خوبی بارز می‌کند و مرزها را بیشینه می‌کند و مقدار آن همواره مثبت است. از مشتق مرتبه یک به جای مشتق مرتبه نیم نیز می‌توان استفاده کرد؛ اما مشتق نیم برای کاهش نوفه شکل بهتر نمایش آنومالی‌ها پیشنهاد می‌شود. در این فیلتر، صورت کسر درواقع یک زاویه بر اساس نسبت گرادیان کل افقی است؛ که در راستای قائم بهنجار شده و فیلتری مؤثر در آشکارسازی لبه‌ها است. عبارت زیر رادیکال در صورت کسر از دو

⁷ Normalized Angle respect to Vertical Derivative

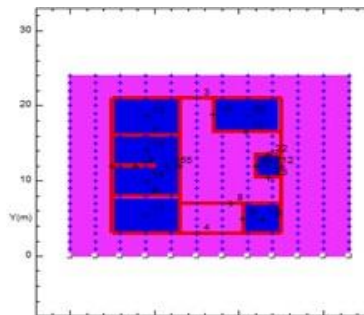
سرلک و همکاران، آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی باستانی در تپه حصار دامغان با استفاده از داده‌های مغناطیسی سنجی، صفحات ۱۴-۱.

است که ۲ درصد نوفه تصادفی به داده‌ها اضافه شده است. اثر آنومالی شدت میدان مغناطیسی کل با زاویه میل $54/6$ درجه و زاویه انحراف $3/9$ درجه مشابه محوطه در شکل (۲-ب) و حالت تبدیل به قطب یافته آن در شکل (۲-ج) نشان داده شده است.

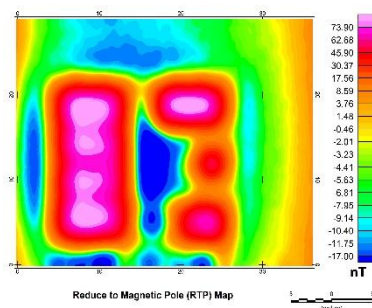
(۲۸×۳۶) روی دیواره‌ها و اتاقک‌ها را در برمی‌گیرد. مغناطیدگی اتاقک $0/015$ ، دیواره‌های خشتی $0/008$ ، لایه سطحی $0/025$ و زمینه $0/002$ در واحد SI فاصله ایستگاه‌های برداشت یک متر و فاصله پروفیل $1/5$ متر در نظر گرفته شده است، همچنین لازم به ذکر



(ب)



(الف)

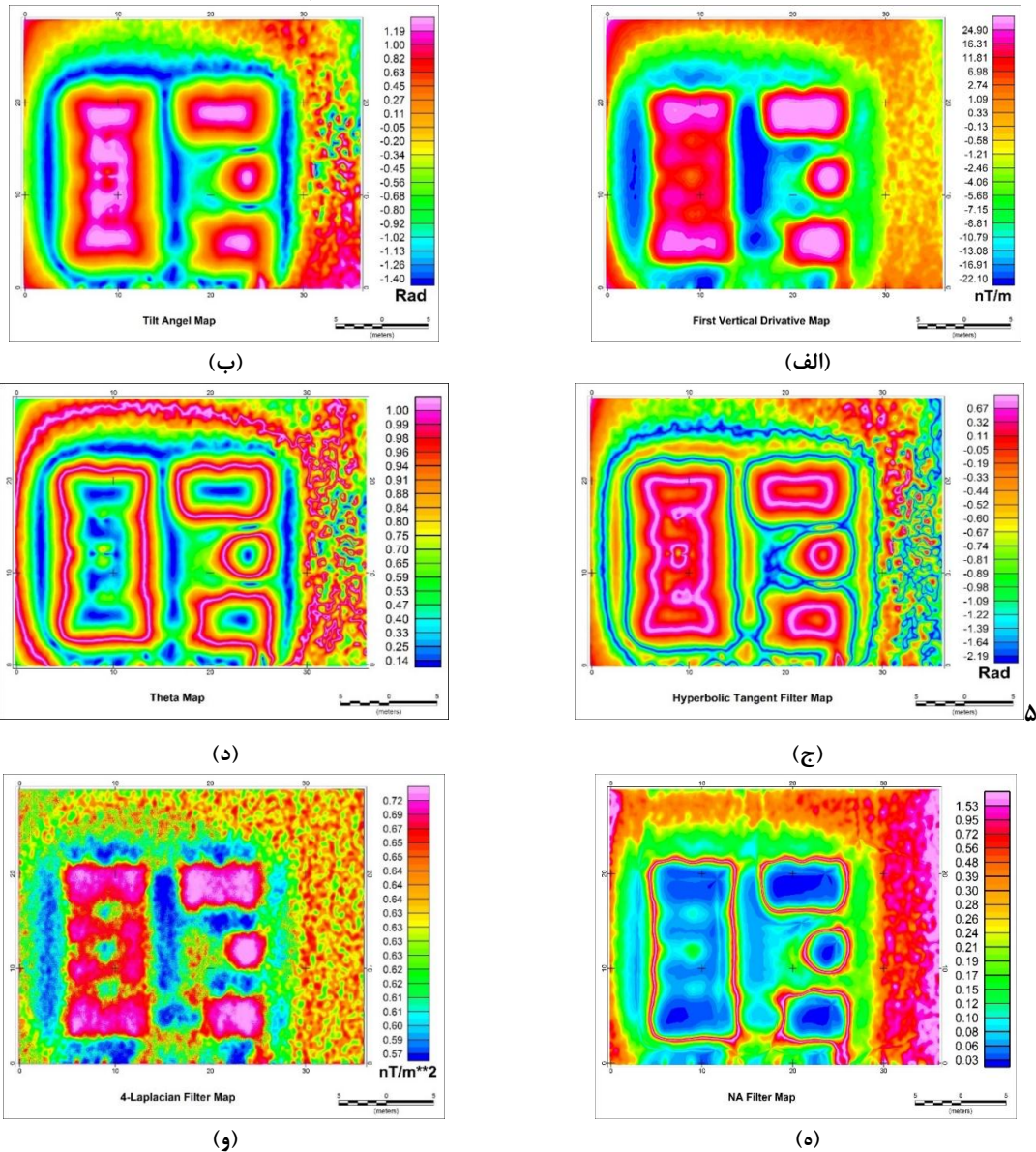


(ج)

شکل ۲: الف) مدل مصنوعی دیواره‌ها (رنگ قرمز) و اتاقک‌ها (رنگ آبی) ب) اثر مغناطیدگی ناشی از آن، ج) آنومالی تبدیل به قطب یافته.

مرزها بیشینه می‌شوند و این موضوع به‌خوبی نشان داده شده است. شکل (۳-ه) نقشه اعمال فیلتر زاویه بهنجار بر مشتق قائم روی آنومالی مغناطیسی مدل مصنوعی را نشان می‌دهد. در این نقشه مرزها به‌خوبی با یک مقدار بیشینه مشخص است و می‌توان یک نمای کلی از مدل با توجه به حساسیت به نوفه‌ی فیلتر به‌خصوص در مدل‌های مصنوعی به خاطر اعمال یک باند فرکانسی محدود مشاهده کرد. شکل (۳-و) نیز معرف نقشه فیلتر لاپلاس مرتبه ۴ است. این فیلتر نیز روی مدل مصنوعی نیز پاسخ خوبی نسبتاً به دست می‌دهد که در محیط‌های با نوفه‌ی کم قابل‌انتظار است. این فیلتر به‌نوعی مشابه مشتق دوم هست زیرا که اساس عملکرد آن مشتق دوم از داده‌هاست که این خود گواه حساسیت به نوفه‌ی این فیلتر می‌تواند باشد.

نقشه حاصل از به‌کارگیری فیلتر مشتق قائم مرتبه اول بر روی این مدل مصنوعی در شکل (۳-الف) ارائه شده است؛ که در تعیین مرزها در مدل مصنوعی نسبتاً مؤثر است؛ اما با افزایش نوفه و وجود بی‌هنجاری با دامنه کوچک‌تر و یا آنومالی‌های عمیق‌تر از کیفیت آن کاسته می‌شود. مشتق قائم به نوفه حساس است. شکل (۳-ب و ج) به ترتیب نقشه زاویه تیلت و تانژانت هایپربولیک آن را نشان می‌دهد. زاویه تیلت همان‌گونه که انتظار می‌رود تنها می‌تواند یک نمای کلی از بی‌هنجاری بدهد و از نقشه تانژانت هایپربولیک اینجا پاسخ خوبی به‌دست‌آمده می‌آید و مرزها مشخص شده است. این فیلتر بیشتر آنومالی‌های دایره‌ای را می‌تواند بارز کند؛ البته اثر نوفه روی این فیلتر قابل ملاحظه است. نقشه زاویه تتای بی‌هنجاری مذکور نیز در شکل (۳-د) نشان داده شده است. این فیلتر با متعادل کردن آنومالی‌های بزرگ و کوچک دامنه، نسبتاً پاسخ خوبی داشته است. در این فیلتر



شکل ۳: الف) نقشه مشتق قائم مرتبه اول، ب) نقشه زاویه تیلت، ج) نقشه تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت، د) نقشه زاویه تتا، ه) نقشه فیلتر NAVA، و) نقشه فیلتر لاپلاس نوع چهارم.

۲-۳- داده‌های مغناطیسی برداشت‌شده در محوطه

باستانی تپه حصار دامغان

برای برداشت داده‌ها قسمتی از تپه حصار یعنی محدوده‌ی پهنه سفال منقوش انتخاب شد. عملیات طراحی شبکه برداشت داده‌ها بر اساس ترانسه‌های حفرشده قدیمی تهیه و داده‌ها در یک شبکه منظم مستطیلی برداشت شد. عملیات مغناطیس سنجی در وسعتی حدود ۲۵×۵۳ متری انجام شده است، به طوری که نقاط برداشتی روی ۲۵ پروفیل یک متر منظور شده است. فاصله پروفیل‌ها در این برداشت که در راستای تقریبی جنوب غربی- شمال شرقی است ۱/۵ متری در نظر گرفته شد. به این ترتیب بر روی ۱۳۰۰ ایستگاه مقدار میدان کل مغناطیسی با استفاده از دو دستگاه مگنتومتر پروتون ساخت شرکت مترونیکس با دقت یک نانوتسلا اندازه‌گیری شد (شکل ۴).

سپس جهت پردازش داده‌ها، تصحیحات روزانه و IGRF روی داده‌ها انجام شد و آنومالی شدت میدان مغناطیسی کل که ناشی از ناهنجاری‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه است؛ به دست آمد (شکل ۵- الف). سپس با استفاده از فیلتر تبدیل به قطب مغناطیسی یعنی با برگردان به قطب مغناطیسی داده‌ها از طول و عرض مبدأ به قطب مغناطیسی انتقال داده شد (شکل ۵- ب). آنومالی ۱۰۰ نانوتسلائی نشان داده شده در این نقشه معرف مقدار مغناطیدگی بالای محوطه است.

البته مغناطیدگی بالای محوطه علاوه بر دلایل مطروحه در ابتدای بحث به دلیل وجود سرباره‌ها در سطح، نشانه‌های از وقوع یک آتش‌سوزی گسترده در این محوطه و باقی‌مانده‌هایی از کوره‌های ذوب فلز به‌ویژه مس که در محوطه گسترده شده، نیز هست. این

موضوع سبب یک آشفتگی در مغناطیدگی محوطه شده است که کار را برای تفسیر داده‌ها مشکل‌تر کرده است. باین‌حال منطقه شماره یک در شکل (۵-ب) شدت میدانی بالاتر از 300 nT را نشان می‌دهد؛ که حاکی از مغناطیدگی بالای آن است. این مقدار مغناطیدگی به احتمال زیاد ناشی از وجود دیوارهای خشتی پخته‌شده است؛ اما با وجود سرباره‌ها و آثار آتش‌سوزی که در دیواره‌ی ضلع شمالی یک ترانشه (محدوده شماره ۴) و همچنین شدت میدان کم در کف این ترانشه که خود نشان از سطحی بودن مغناطیدگی در محیط دارد، می‌توان این نتیجه را بسیار محتمل دانست که این محدوده یک گذرگاه یا کوچه باستانی باریک باشد که با خاک‌های سطحی، سنگ‌های پراکنده سطحی و خاکسترهای بجا مانده از آتش‌سوزی پر شده است. احتمال فرضیه کوچه بودن این بخش زمانی بیشتر قوت می‌گیرد که محدوده‌های ۲ و ۳ با یک مغناطیدگی متوسط که احتمالاً می‌توان بیشتر آن را ناشی از مصالح سازنده سازه‌های خشتی دانست؛ که در اطراف آن (محدوده ۱) مشاهده می‌شود (خشت‌ها در جای دیگر در اثر حرارت پخته‌شده‌اند و معمولاً در اثر جابجایی و چرخش نسبت به هم و جابجایی حوزه مغناطیسی آن‌ها، از مجموع شدت مغناطیدگی آن‌ها کاسته می‌شود). در بخش شماره ۴ که یک ترانشه با ابعاد 10×10 است که در کف آن شدت میدان مغناطیسی کم است و همان‌گونه که قبلاً ذکر شد نشان‌دهنده مغناطیدگی بالای سطحی و مربوط به ۳ متر روی سطح در کل محوطه است. البته با توجه به وجود دوره‌های سکونت متفاوت در تپه حصار و چندلایه بودن سازه‌های آن بخش زیادی از این تفاوت مغناطیدگی را می‌توان مرتبط با این موضوع دانست.

برای حذف نوفه‌ی سطحی قبل از اعمال روند سطحی از فیلتر ادامه فراسوی با ارتفاع نیم متر استفاده شده است. نقشه باقی‌مانده روند سطحی درجه شش از محدوده مورد مطالعه جهت تفکیک و شناسایی ساختارهای زیرسطحی تهیه گردید (شکل ۶-الف). روند سطحی درجه شش به این دلیل انتخاب شد که روند تغییرات گسترش رو به بالای منطقه با نقشه آنومالی ناحیه‌ای درجه شش هم‌خوانی دارد.

در رابطه با آنومالی مثبت محدوده شماره ۵ در این شکل اگرچه با قاطعیت نمی‌توان اظهارنظر کرد؛ اما با توجه به سطحی بودن که در این نقشه متمایز شده است این احتمال وجود دارد که این آنومالی مربوط به یک اجاق، تنور و یا چیزی مشابه باشد؛ که نمونه‌هایی از آن در حفاری‌های محوطه پیدا شده است. در مورد لبه‌های نقشه به دلیل اطلاعات ناکافی نمی‌توان اظهارنظر نمود. مشتق قائم آنومالی‌های کوچک‌تر را بارزتر می‌کند اما هم‌پوشانی آنومالی‌های کوچک و بزرگ از کیفیت نقشه کاسته است؛ ضمن آنکه به نوفه نیز حساس است (شکل ۶-ب). شکل (۶-ج) نقشه ترکیبی مشتقات افقی با مرتبه نیم را نشان می‌دهد. استفاده از مرتبه‌های کمتر از یک مشتق افقی باعث جابجایی کمتر مرزها و همچنین

حساسیت کمتر نسبت به نوفه می‌شود. تقریباً می‌توان گفت پاسخ خوبی به دست آمده است. این می‌تواند به این دلیل باشد که در اینجا تقریباً پراکندگی لبه‌ها در همه جهات هست و همچنین گستره فرکانسی در مدل واقعی پهنای باند بزرگ‌تری دارد و این باعث تشدید کمتر نوفه می‌شود. شکل (۶-د) نقشه زاویه تیلت آنومالی را نشان می‌دهد؛ که به خوبی در متعادل کردن آنومالی‌ها با دامنه بزرگ و کوچک موفق بوده است و می‌توان با استفاده از نقشه آن ساختارهای خط مانند که مغناطیدگی بالایی دارند را مشاهده کرد. شکل (۶-ه) نقشه تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت آنومالی را نشان می‌دهد؛ که هرچند به دلیل حساسیت به نوفه تحت تأثیر قرار گرفته؛ اما در شناسایی مرزها موفق بوده و می‌توان گفت در تفکیک آنومالی‌ها نیز موفق عمل کرده است.

شکل (۶-و) نقشه کسینوس تئای منطقه را نشان می‌دهد؛ این فیلتر در شناسایی لبه‌ها بسیار موفق عمل می‌کند، به لبه‌ها یک مقدار بیشینه نسبت می‌دهند؛ ولی تفسیر آن به تنهایی مشکل است. شکل (۶-ز) نقشه اعمال فیلتر NAVD روی آنومالی گرانی باقیمانده منطقه را نشان می‌دهد که توانسته مرزها را مشخص کند و یک ابزار مفید برای تفکیک لبه هست. به خصوص با مقایسه این نقشه با نقشه تتا می‌توان با قاطعیت بیشتری این امر عنوان کرد. عدم همپوشانی آنومالی‌های بزرگ و کوچک در این نقشه قابل ملاحظه است؛ اما شکل (۶-ح) نقشه آنومالی فیلتر لاپلاس است. این فیلتر اگرچه روی مدل مصنوعی بهتر عمل می‌کند، اما روی داده‌های واقعی هم به خاطر گستره باند فرکانسی بزرگ‌تر آن‌ها پاسخ نسبتاً خوبی در مقایسه با بقیه فیلترها می‌دهد. اگرچه که در حالت کلی توانسته ساختارها را تا حدودی بارز کند، اما همپوشانی یا چیره شدن آنومالی‌های بزرگ دامنه بر آنومالی‌های کوچک دامنه باعث به هم ریختگی در نقشه می‌شود.

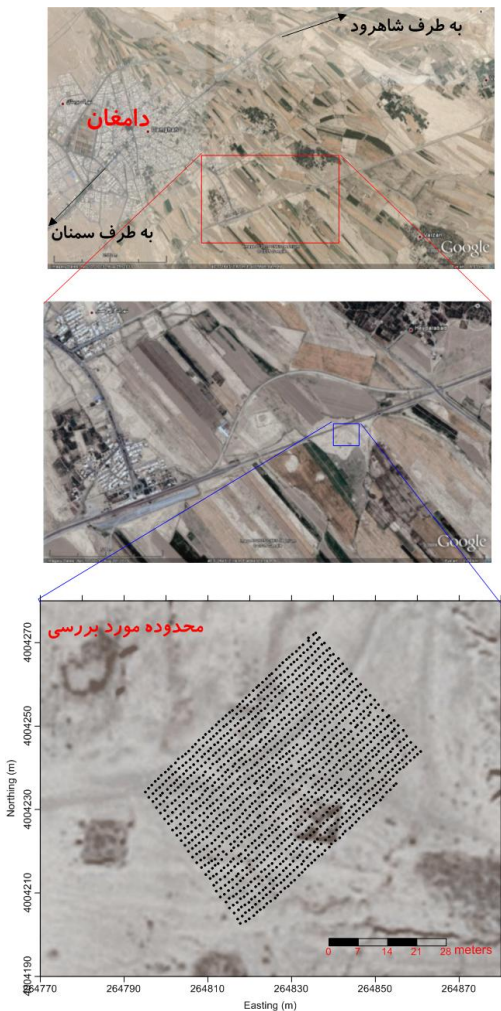
در محدوده‌ی ترانشه حفر شده با توجه به تباین مثبتی که بین مغناطیدگی دیواره‌ها و هوا وجود دارد به خوبی شکل دیواره‌ها را روی نقشه می‌توان مشخص کرد (شکل ۷). خطوط سفید به صورت چهارگوش در شکل به خوبی در هر دو تصویر مؤید هم هستند. اتاقک‌ها به شماره‌های مشابه روی هر دو شکل مشخص شده‌اند.

اما تأیید و همخوانی اطلاعات به دست آمده به روش مغناطیس‌سنجی با نقشه‌های بجا مانده از حفاری‌های دکتر اشمیت در دهه‌ی ۱۹۳۰ میلادی قابل‌انتظار است. در پهنه سفال منقوش و قسمت جنوب غربی محوطه برداشت، تقریباً چسبیده به آن یک محوطه ۷۰ متری بررسی شده در ۷ بخش مجزا وجود دارد (شکل ۸). تصاویر و نقشه‌های به دست آمده از حفاری‌ها نشان از وجود اتاقک‌های تودرتو و نامنظم، راهروهای باریک و کوچه‌های با عرض متغیر دارد. این خصوصیات مربوط به لایه‌های سطحی در تپه حصار است که در زیر لایه‌ها هم تکرار می‌شود (اشمیت، ۱۳۹۱). فاصله محدوده حفاری شده و محدوده برداشت در این تحقیق بسیار نزدیک

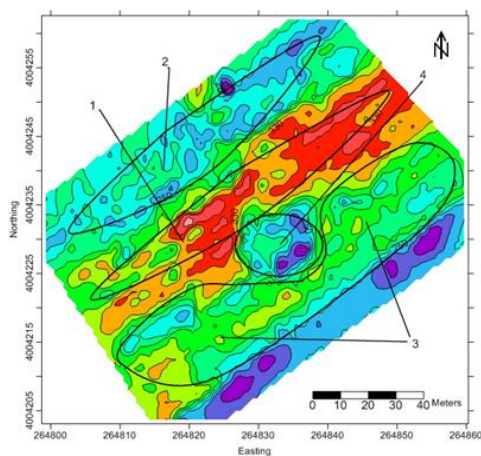
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۱، ۱۳۹۶.

قرارگیری دو کوچه در دو محدوده موردنظر است؛ که احتمالاً دو راهرو در این بخش باستانی تپه حصار بوده و در بخش بالایی به هم مرتبط بوده‌اند.

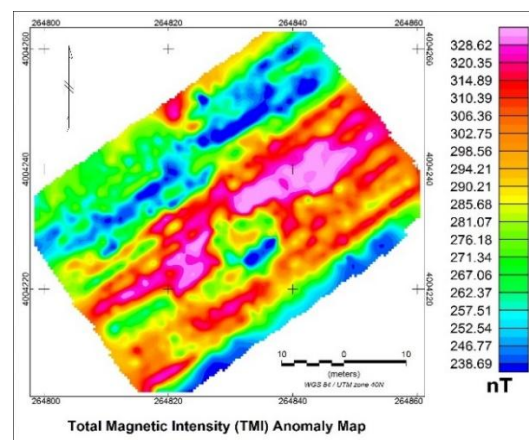
بوده و از نظر زمانی، توالی لایه‌ها، نوع سفال، گورها و اشیای به دست‌آمده مشابه یکدیگرند. این علائم مؤید هم‌عصری دو محدوده است. خطوط رنگی رسم شده در (شکل ۸- چپ) معرف کوچه‌های باستانی است. نکته مهم و درخور بررسی در شکل اخیر وضعیت



شکل ۴: موقعیت محوطه باستانی تپه حصار نسبت به شهر دامغان و ایستگاه‌های برداشت داده در محدوده مورد بررسی.



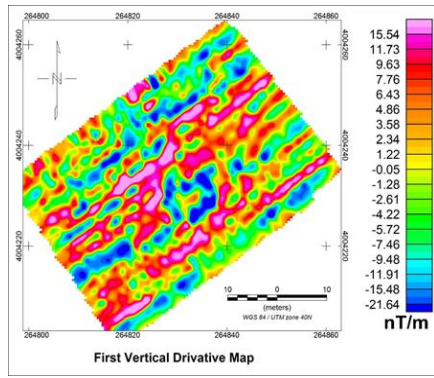
(ب)



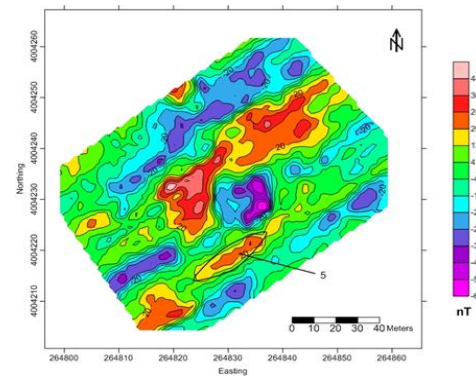
(الف)

شکل ۵: نقشه بی‌هنجاری محوطه برداشت در تپه حصار (الف) شدت میدان مغناطیسی، (ب) نقشه تبدیل به قطب یافته.

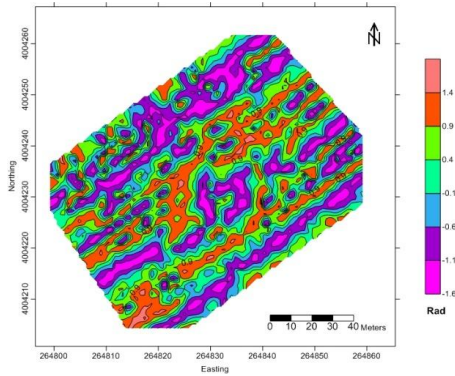
سرلک و همکاران، آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی باستانی در تپه حصار دامغان با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی، صفحات ۱۴-۱.



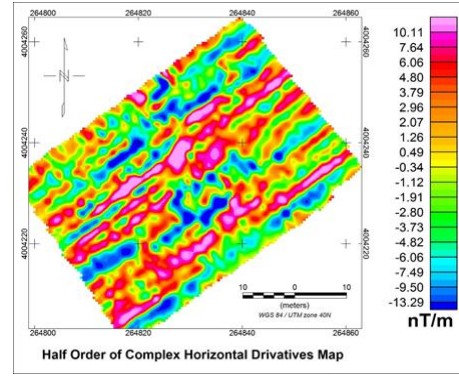
(ب)



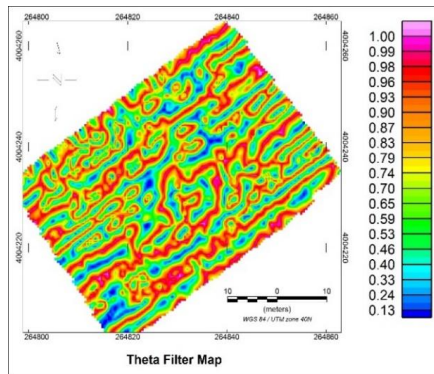
(الف)



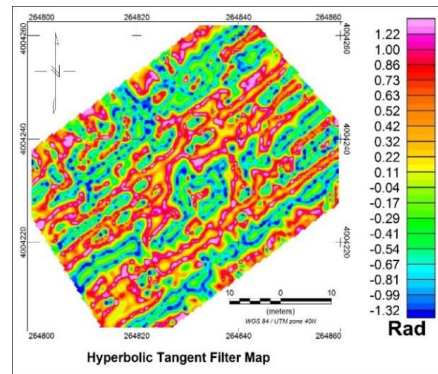
(د)



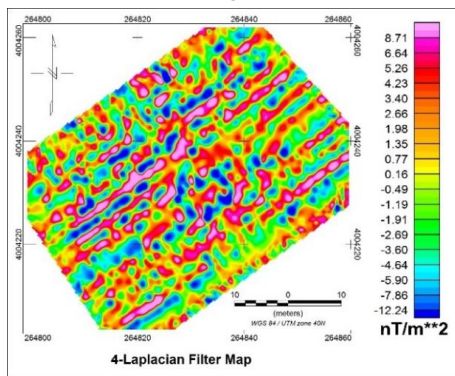
(ج)



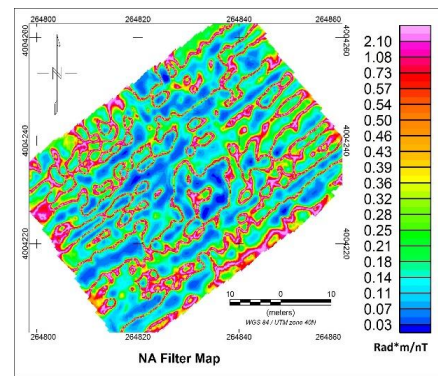
(و)



(ه)

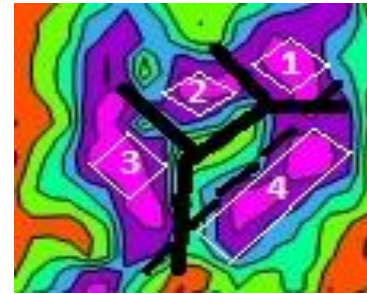


(ح)

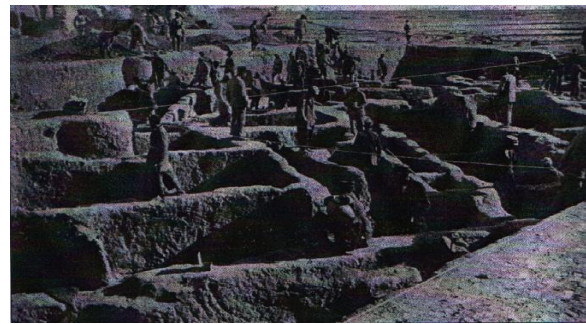
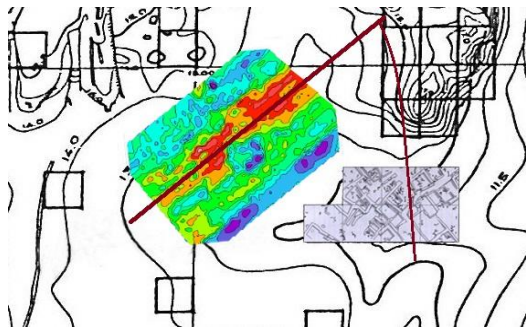


(ز)

شکل ۶: (الف) نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده درجه ۶ منطقه، (ب) نقشه مشتق قائم مرتبه اول، (ج) نقشه مشتق مرتبه نیم همزمان $dx dy$ ، (د) نقشه زاویه تیلت، (ه) نقشه تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت، (و) نقشه زاویه تتا، (ز) نقشه فیلتر NAVD، (ح) نقشه فیلتر لاپلاس ۴.



شکل ۷: (راست) نقشه زاویه تیلت از محدوده‌ی ترانشه، (چپ) عکس از ترانشه (دید به سمت شمال).



شکل ۸: (راست) حفاری‌های انجام‌شده در محدوده تپه حصار در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی و نمایش اتاقک‌ها و دیواره‌ها. (چپ) پلان معماری منطقه حفاری در جنوب شرق محدوده (کاوش‌های تپه حصار دامغان، ۱۳۹۱) و محدوده برداشت مغناطیس‌سنجی.

۳- نتیجه‌گیری

حاصل از آن با نقشه‌های حاصل از عملیات مغناطیس‌سنجی انطباق مناسبی را نشان می‌دهد. به این صورت که ابعاد اتاقک‌هایی که در حفاری‌های به‌دست‌آمده و به‌صورت پلان تهیه‌شده است؛ با نتایج فیلترهای به‌کاررفته مطابقت داشته و دارد. با این حال به دلیل ساخت چندین لایه (دوره‌های سکونت) در این محدوده و نیز وجود دیواره‌های نزدیک به هم در برخی بخش‌ها و آشفتگی مغناطیسی منطقه برای دستیابی به اطلاعات کامل‌تر بهتر است از روش‌های مکمل دیگر ژئوفیزیکی مناسب با خاک رسی منطقه نیز استفاده شود.

۴- سپاس‌گزاری

از همکاری و حمایت بی‌دریغ اداره میراث فرهنگی شهرستان دامغان، به‌ویژه ریاست اداره سرکار خانم داوودیان و نیز دانشگاه صنعتی شاهرود به جهت در اختیار قرار دادن دستگاه مغناطیس‌سنج سپاسگزاری می‌شود.

۵- فهرست نمادها

نماد	واحد (SI)	شرح
M	$A.m^{-1}$	شدت مغناطیدگی القایی
H	$A.m^{-1}$	شدت میدان مغناطیسی کل
k	-	خودپذیری مغناطیسی

نتایج مغناطیس‌سنجی در محوطه باستانی تپه حصار نشان می‌دهد که آن به‌صورت یک شهرک باستانی با مجموعه خانه‌های نامنظم و راهروهای باریک بنا شده است. راهرو یا کوچه اصلی در این مجموعه احتمالاً در امتداد شمال شرق-جنوب شرق بوده است؛ که در نقشه‌ها به دلایلی که مفصل گفته شد آنومالی بالایی را به خود اختصاص داده است. به کارگیری روش مغناطیس‌سنجی به‌خوبی توانسته ماهیت مواد زیرسطحی در تپه حصار را آشکار کرده و به‌واسطه آن می‌توان یک پلان کلی از اتاقک‌ها و دیواره‌ها پیشنهاد داد؛ که برای ادامه اکتشاف و حفر ترانشه‌های اکتشافی در دیگر محوطه‌ها استفاده نمود.

فیلترهای بکار رفته در این تحقیق توانمندی بالایی در شناسایی لبه‌ی آنومالی‌ها دارند. زاویه تیلت به‌عنوان یک فیلتر بالاگذر برای بارز سازی جزئیات موجود در داده‌ها به‌کاررفته که در متعادل نمودن دامنه آنومالی‌های مختلف مؤثر بوده است و به‌ویژه توانسته پلان کلی محوطه برداشت را به‌خوبی بارز نماید. زاویه تیلت هایپربولیک نیز در تفکیک لبه‌ها و تشخیص آنومالی‌ها موفق بوده. نقشه حاصل از فیلترهای تتا تا حدود زیادی سبب آشکارسازی دیواره‌ها و اتاقک‌ها شده است، به‌ویژه در مرزها هم خوب عمل کرده است. در این بین فیلتر NAVD روی لبه‌ها را با مقدار بیشینه نشان داده و از جدایش آنومالی‌های خوبی برخوردار بوده است و با متعادل کردن بهتر دامنه آنومالی‌ها؛ توانایی فیلتر در شناسایی ساختارهای زیرسطحی تا حدود زیادی بهتر از سایر فیلترها شده است.

مقایسه نتایج ترانشه‌های حفر شده در این محوطه و نقشه‌های

۶- منابع

- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2006, Enhancing potential field data using filters based on the local phase, *Computers & Geosciences*, 32 (10), 1585-1591.
- Fassbinder, J.W., Stanjek, H. and Vali, H., 1990, Occurrence of magnetic bacteria in soil, *Nature*, 343 (6254), 161-163.
- Gaffney, C.F., Gater, J.A., Linford, P., Gaffney, V.L. and White, R., 2000, Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the Roman city of Wroxeter, *Archaeological Prospection*, 7 (2), 81-99.
- Hesse, A., Barba, L., Link, K. and Ortiz, A., 1997, a magnetic and electrical study of archaeological structures at Loma Alta, Michoacan, Mexico, *Archaeological Prospection*, 4 (2), 53-67.
- Linford, N., 2006, The application of geophysical methods to archaeological prospection, *Reports on progress in physics*, 69 (7).
- Miller, H.G. and Singh, V., 1994, Potential field tilt- a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- 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, Università di Roma, 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, 613-633.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, *applied geophysics*, 1, Cambridge university press.
- Tite, M.S. and Mullins, C., 1971, Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites, *Archaeometry*, 13 (2), 209-219.
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C., 2004, new insights into magnetic derivatives for structural mapping, *The Leading Edge*, 23 (2), 116-119.
- Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P., 2005, Theta map, Edge detection in magnetic data, *Geophysics*, 70 (4), L39-L43.
- اشمیت، ا.، ۱۳۹۱، کاوش‌های تپه حصار دامغان، ترجمه ک. روستایی، اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان سمنان.
- امین‌پور، ب.، ۱۳۸۰، کاربرد روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی و نمونه‌ای از اجرای روش مغناطیس‌سنجی در اطراف معبد چغار زنبیل، *مجله تاریخ باستان پژوهشی*، ۸، ۶-۹.
- شاهپور شهبازی، ع.ر.، ۱۳۸۴، راهنمای مستند تخت جمشید، بنیاد پژوهشی پارسه پاسارگاد، انتشارات سفیران و انتشارات فرهنگسرای میردشتی.
- عطائی، م. ت.، ۱۳۸۳، معرفی سفال هخامنشی حوزه فارس، بررسی روشمند طبقه‌بندی شده باروی تخت جمشید، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، باستان‌شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس.
- محمدخانی، ک.، ۱۳۸۳، کاربرد روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی (آرکئوژئوفیزیک) مطالعه موردی، بررسی مغناطیس‌سنجی در تخت جمشید و پاسارگاد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، باستان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- Aitken, M.J., 1958, *Magnetic Prospecting, I - The Water Newton Survey*, *Archaeometry*, 1, 24-29.
- Allred, J.C., 1964, A fluxgate gradiometer for archaeological surveying, *Archaeometry*, 7 (1), 14-19.
- Arısoy, M.Ö. and Dikmen, Ü., 2011, Potensoft, MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping, *Computers & Geosciences*, 37 (7), 935-942.
- Aspinall, A., Gaffney, C.F. and Schmidt, A.R., 2008, *Magnetometry for Archaeologists*, AltaMira Press, United Kingdom.
- Bevan, B.W., 1994, the magnetic anomaly of a brick foundation, *Archaeological Prospection*, 1 (2), 93-104.
- Clark, A.J., 1990, seeing beneath the soil, *BT Batsford*.
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2003, the application of fractional calculus to potential field data, *Exploration Geophysics*, 34 (1/2), 51-56.



Detection of Ancient Subsurface Structures using Magnetic Data in Tepe-Hissar Area, Damghan

Behzad Sarlak¹, Hamid Aghajani^{2*} and Ali Nejati Kalateh²

1- M.Sc. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 4 September 2015; Accepted: 6 January 2016

Corresponding author: haghajani@shahroodut.ac.ir

Keywords

Magnetometry
Archaeology
Edge Detection
Fuzzy Filters
NAVD Filter
Tepe-Hissar

Extended Abstract

Summary

Geophysical methods are effective tools in archaeological investigations. Sensitive magnetometers have been used for many years to locate and characterize archaeological sites. Magnetometry is one of the most widely geophysical methods in this application as it contains no harmful environmental effects. Magnetization contrast in ancient sites is created by natural causes and human activities. Studies have shown that topsoil has generally a higher

magnetic susceptibility than most bedrocks and sub-soils. Vegetation fires and fermentation effects increase background magnetic susceptibility, and oxidation-reduction cycles associated with alternate wetting and drying of the soil; all of these tend to convert the iron compounds to strongly magnetic oxide maghaemite. In this paper, subsurface structures have been investigated in the Tepe-Hissar ancient area of Damghan. In this regard, synthetic and real magnetic data and fuzzy filters have been used to investigate these subsurface structures. Moreover, normalized derivatives respect to vertical derivative (NAVD or NA) filter has been introduced that enhance edges in potential field methods.

Introduction

Magnetization contrast has been examined between metal items, building materials, ditches, pits, and their surrounding environment. This magnetization can be either remanent magnetization, induced magnetization, or both, that creates a contrast in magnetization between the interested features and the surrounding environment. Remanent magnetization can be locked into archaeological materials such as kilns, ovens and floors that are baked (Clark et al., 1988). Induced magnetization also plays a large part in the ability to detect archaeological features. Fire has long been known to increase the magnetic susceptibility of soil. Weakly magnetic iron oxides in the clay and silt particles are transformed into highly magnetic oxides through burning. When the organic matter in a soil burns at $\sim 200^{\circ}\text{C}$, it produces a reducing atmosphere, which can change hematite to magnetite, and probably maghaemite on reoxidation as the burn ceases (Aspinall et al. 2008). For better interpretation, noise must be removed. After necessary corrections, the total magnetic intensity map is seen to be dominated by long wavelength magnetic anomalies. The anomaly appears to be about 100 nT that represents the amount of magnetization of the area.

Methodology and Approaches

Local phase filters provide an approach to detect the edges of the anomalies but conventional phase functions need to be unwrapped to remove phase ambiguity (Fitzgerald et al., 1997). Therefore, detection of the boundary of chambers or walls and the location of sources can be obtained from derivative based filters such as the horizontal gradient magnitude, tilt-angle, theta-map, Laplacian and tangent hyperbolic filters, however, these filters typically fail for archaeological investigations due to the high noise content of the acquired data. In this paper, similarly to prospect an area, a synthetic model is prepared which combines structures and the lane or rooms that have been filled with alluvium and soil. One of the conventional phase filter that is used for edge detection is the tilt angle (Miller and Singh, 1994). The tilt angle is effective in balancing the amplitudes of different anomalies, but it is not primarily an edge-detection filter. The theta map uses the analytic signal amplitude to normalize the total horizontal derivative (Wijns et al. 2005). The amplitude of the response of this filter from the deeper and shallow source bodies is similar, although the response from the deeper bodies is rather different. The hyperbolic tilt angle (HTA) filter uses of the real part of the hyperbolic tangent function in the tilt angle. Using this filter, better delineation of the edges of the anomalous body than the other

JRAG, 2017, Vol 3, No 1.

filters is achieved. The maximum value of the HTA gives location of the body edges (Cooper and Cowan, 2006). Edge enhancement in potential field methods helps to make proper geological and archaeological interpretation. There are many methods for enhancing edges, most of which are high-pass filters based on the horizontal or vertical derivatives of the field. Normalized angle respect to vertical derivative (NAVD) filter, which is a new edge-detection filter, is based on ratios of the horizontal derivatives of the field. The NAVD filter has been demonstrated on synthetic and real magnetic data from the archaeological site of Tepe-Hissar. Compared with other filters, the NAVD filter detects edges very well.

Results and Conclusions

Results of this research work indicate that the obtained information from magnetometry is compatible with the subsurface information before excavations in the area. The results of magnetic surveys in the archaeological site of Tepe-Hissar show that the site has an irregular construction with meandering lanes. The main lane in this archaeological site appears to be along northeast-southwest direction. This fact is clearly understood from the magnetic images of the site.
