

تفسیر داده‌های گرانی ساختارهای زیرسطحی باستانی در تپه حصار دامغان

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

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲. استادیار، گروه نفت و ژئوفیزیک، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(دریافت: ۹۴/۳/۲۳، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در کاوش‌های باستان‌شناسی جهت تعیین مرز بی‌هنجاری قبل از حفاری می‌تواند مفید و مؤثر باشد. در این میان روش گرانی‌سنجی به دلیل نداشتن آثار مخرب محیطی، از روش‌های پرکاربرد است. در گرانی‌سنجی تباین چگالی بین دیواره‌ها و اتاقک‌ها مطالعه می‌شود. در این مقاله از داده‌های گرانی و فیلترهای فازی برای بررسی دیواره‌های ساختارهای زیرسطحی در محوطه باستانی تپه حصار دامغان استفاده شده است. در این راستا علاوه بر فیلترهای زاویه‌نمایی، نقشه‌تثا، لاپلاسی و تانژانت هاپرپولیک، از یک فیلتر جدید برای تفکیک و بارزسازی ساختارهای زیرسطحی در داده‌های مصنوعی و داده‌های واقعی محوطه باستانی تپه حصار استفاده شد. فیلتر جدید نسبت مشتق به‌هنجار نامیده شده است که با نرمال کردن مجموع مشتق‌های متعامد در راستای محورهای افقی به دست می‌آید. نتایج بررسی داده‌های گرانی تپه حصار نشان می‌دهد که تفکیک و بارزسازی دیواره‌ها و اتاقک‌ها در محدوده برداشت با نتایج حفاری‌های گروه باستان‌شناسی انطباق بسیاری دارد.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی لبه، باستان‌شناسی، فیلترهای فازی، گرانی‌سنجی، محوطه باستانی تپه حصار، نسبت مشتق به‌هنجار.

۱. مقدمه

تونل‌های باستانی صورت گرفته است و کاربردهای میکروگرانی بعدی در باستان‌شناسی چشم‌انداز خوبی از این روش نشان داد. اسلپاک (۱۹۹۹) بی‌هنجاری‌های گرانی بین ۳۰-۸۰ میکروگال را از بازمانده‌های مدفون یک ساختمان قدیمی در کازان کرملین روسیه برداشت کرد. همچنین بی‌هنجاری‌های بالای میکروگرانی باقیمانده‌های دیواره‌های کلیسای بیزانس در اردن بین ۲۰-۱۵ میکروگال گزارش شده است (باتینه و همکاران، ۲۰۰۷). پانیسوا و پاستکا (۲۰۰۹) از روش گرادیان قائم روی داده‌های میکروگراویتی داخل کلیسای قدیمی نیکلاس در شهر پیوکانچ (Pukanec) کشور اسلواکی استفاده کردند. به این ترتیب آن‌ها توانستند با آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی، وضعیت زیرسطح این بنا را توصیف و حفره‌ای را در یک متری زیر سطح آن شناسایی کنند. در سال ۲۰۱۰ کاستلو و همکاران حفره‌های زیرسطحی را در محیط‌های شهری ناپل به روش گرانی بررسی کردند. محوطه باستانی تپه حصار با وسعت چندین هکتار در جنوب شرقی شهر دامغان در استان سمنان قرار دارد. این

یکی از کاربردهای مهم علم ژئوفیزیک در اکتشاف‌های باستان‌شناسی است که به ایجاد رشته باستان ژئوفیزیک یا ژئوفیزیک باستانی انجامیده است. به کارگیری گرانی‌سنج‌های پیشرفته و دقیق و ایجاد روش‌های پردازشی و تفسیری جدید برای داده‌های گرانی‌سنجی، باعث شده است تا رویکرد استفاده از گرانی‌سنجی در عملیات باستان‌شناسی تغییر یابد و در بخش‌های مختلف استفاده شود. در این شاخه با توجه به نوع کار از روش میکروگرانی‌سنجی به‌عنوان ابزاری مؤثر در تحلیل غیریکنواختی زیرسطحی در زمین‌شناسی استفاده می‌شود. تخمین محل بی‌هنجاری‌های منفی (حفره‌ها) و بی‌هنجاری‌های مثبت (دیواره‌ها و آرامگاه‌های بزرگ مدفون) در بستری مانند یک سایت باستانی به‌وسیله میکروگرانی‌سنجی می‌تواند جالب توجه باشد (بیشاپ و همکاران، ۱۹۹۷). تاریخچه کاربرد گرانی (میکروگرانی) در سایت‌های باستانی به کار لینینگتون (۱۹۶۶) برمی‌گردد. تلاش او برای اکتشاف آرامگاه‌های حجره‌دار اتروسکن در ایتالیا خیلی موفق نبود؛ البته بعد از آن کارهای موفق در اکتشاف سرداب‌ها، دهلیزها و

افزایش تعادل بین نوفه و داده برای تهیه نقشه مشتق با کیفیت مؤثر باشد. در این مقاله هدف شناسایی دیواره‌ها و اتاقک‌های موجود در محوطه باستانی گفته شده با استفاده از فیلترهای مختلف روی داده‌های میکروگرانی است.

۲. روش کار

گرانی‌سنجی روشی مفید و کارا در مطالعه اهداف اکتشافی است. روش گرانی‌سنجی بر مبنای اختلاف چگالی توده مورد مطالعه و محیط دربرگیرنده آن استوار است که به منظور تعیین و تخمین چگالی، عمق دفن، شکل و تعیین حفرات زیرزمینی به کار می‌رود. در این میان، میکروگرانی به واسطه فاصله برداشت نقاط و دقت بیشتر آن، به مطالعه آثار سطحی و کم عمق می‌پردازد. در مقدار گرانی مشاهده‌ای یا قرائت شده آثار مزاحمی از عوامل و پدیده‌های مختلف وجود دارد که باعث تضعیف آثار ناشی از باستان‌شناسی می‌شود؛ بنابراین باید از داده‌های گرانی حذف گردد. در این گونه مطالعات چون آثار نوفه و حاشیه‌ای خیلی مؤثرند؛ بنابراین باید همه تصحیحات مثل اثر رانه دستگاه و جزرومد، هوای آزاد، تخته بوگه و توپوگرافی با دقت بیشتری صورت پذیرند. نتایج بررسی‌های صحرائی گرانی پس از حذف عوامل مزاحم به عنوان بی‌هنجاری گرانی (بوگه) خوانده می‌شود که دارای دو مؤلفه ناحیه‌ای، مربوط به ساختارهای عمیق و مقیاس وسیع و محلی، مربوط به ساختارهای سطحی و کم‌مقیاس است (بلیکلی، ۱۹۹۵).

$$\Delta g_{CB} = g_{obs} - \gamma_{\phi} - \delta g_{dc} \pm \delta g_{\phi} + \delta g_{fa} - \delta g_{sb} + \delta g_{TC} \quad (1)$$

که در آن، به ترتیب از چپ به راست بی‌هنجاری بوگه کامل، مقدار گرانی مشاهده‌ای، مقدار گرانی نرمال، اثر تصحیح رانه دستگاه، اثر عرض جغرافیایی، اثر هوای آزاد، اثر تخته بوگه و اثر تصحیح توپوگرافی لحاظ شده است. پس از محاسبه بی‌هنجاری بوگه، از فیلترهای مختلف تفکیک کیفی و کمی بی‌هنجاری مانند روش

محوطه ابتدا توسط دکتر اشمیت از دانشگاه پنسیلوانیا در سال‌های ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ میلادی مورد کاوش‌های باستان‌شناسی قرار گرفت و آثار ارزنده‌ای متعلق به اولین استقرار دهکده‌ای آشکار شد. در این حفاری سه طبقه اصلی اکتشاف شد که هر طبقه شامل چند لایه باستانی است. در نتیجه 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 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 شمسی نشان داد که تپه حصار در هزاره‌های چهارم و سوم 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 در سال ۱۳۷۳ شمسی 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 فرهنگی بین تمدن‌های بین‌النهرین و فلات ایران است. براساس یافته‌ها، قدیمی‌ترین لایه‌های تپه حصار به اواسط هزاره پنجم قبل از میلاد بازمی‌گردد و استقرار در آن تا حدود ۱۷۰۰ پیش از میلاد پیوسته ادامه داشته و پس از آن هیچگاه در آن سکونت نبوده است (روستایی، ۱۳۹۱).

فیلترهای بنیان‌شده بر مشتق (فاز محلی) معمولاً به‌عنوان ابزار در مراحل تفسیر داده‌های میدان پتانسیل به کار گرفته می‌شوند. این فیلترها لبه‌های بی‌هنجاری‌ها را در داده‌ها بارز می‌کنند، به این سبب از آن‌ها می‌توان در آشکارسازی لبه‌ها و تعیین مرز ساختارهای زمین‌شناسی استفاده کرد، ولی چون به‌نوعی از فیلترهای بالاگذر هستند، ناخواسته تا حدی سبب افزایش نوفه در داده‌ها می‌شوند. بسته به تغییرات نرم یا خشن داده‌ها می‌توان از یک مرتبه مشتق مناسب استفاده کرد که در

گرادیان و با بهره‌گیری از معادلات لاپلاس محاسبه کرد:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}\right) \quad (5)$$

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 نوفه در داده‌ها در اثر افزایش مرتبه است. به‌طور کلی اگر لازم باشد که داده‌ها نرم‌تر شوند، می‌توان از مقادیر منفی n نیز استفاده کرد (کوپر و کوهن، ۲۰۰۳). مشتق افقی در هر راستا فقط می‌تواند دامنه بی‌هنجاری را تنها در راستای عمود بر آن بارز کند، اما استفاده از فیلتر گرادیان کل افقی نرمال‌شده نسبت به مشتق قائم (TDX: Normalized total horizontal derivative) سبب بارزسازی دامنه لبه‌ها در هر جهت می‌شود و مقدار آن روی لبه بی‌هنجاری‌ها زیاد خواهد شد. این فیلتر مرز بی‌هنجاری‌ها را تغییر نمی‌دهد، در حالی که در مشتق افقی یا جهتی یک جابه‌جایی در بیشینه روی می‌دهد. علاوه بر آن فیلتر مجموع مشتق افقی پاسخ به نسبت بهتری نیز در مقایسه با مشتق افقی از بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر ارائه می‌دهد (کوپر و کوهن، ۲۰۰۶). شکل بهنجارشده این فیلتر به‌صورت رابطه (۶) است:

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

که در آن g میدان گرانی زمین است. اندازه‌گیری فاز محلی از داده‌های میدان‌های پتانسیل نقش مؤثری در تفسیر داده‌ها دارد. فیلترهای فاز محلی نتیجه مناسبی می‌دهد، ولی باید این توابع فاز تصحیح شوند تا بتوانند ابهام فاز را نشان دهند، زیرا توابع فاز متناوب هستند. در داده‌های بدون نوفه فاز می‌تواند با جمع کردن ساده 2π با فاز محلی تصحیح شود؛ به هر حال یک تغییر ناگهانی از π تا $-\pi$ اتفاق می‌افتد، اما وجود نوفه و دگرنامی (الیاسینگ) می‌تواند فرایند را مشکل کند. فیلتر فازی متداول دیگر زاویه تیل (تمایل) است که توسط میلر و سینگ (۱۹۹۴) به صورت رابطه (۷) تعریف شده است:

روند سطحی، گسترش میدان به سمت بالا و پایین و مشتقات قائم استفاده می‌شود. همچنین از فیلترهای فازی محلی می‌توان برای شناسایی عمق و لبه‌ها استفاده کرد تا بهترین نتیجه حاصل شود. تقویت لبه‌ها در داده‌های میدان پتانسیل می‌تواند به تفسیر زمین‌شناسی داده‌های میدان پتانسیل کمک شایانی کند. فیلترهای فاز محلی که برای این منظور به کار می‌روند، توابعی برحسب گرادیان قائم و افقی میدان پتانسیل هستند.

آشکارسازی لبه‌های ساختارهای ژئوفیزیکی از تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی انجام می‌گیرد. گرادیان افقی از میدان پتانسیل g فاصله نمونه برداری Δx در طول یک پروفیل در فضای مکان از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$\frac{dg}{dx} = \frac{g(x+\Delta x) - g(x)}{\Delta x} \quad (2)$$

و می‌توان در فضای فرکانس این گونه نوشت:

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

به‌گونه‌ای که $A(u)$ دامنه فرکانس u و n مرتبه مشتق است و می‌تواند مقادیر عدد صحیح و اعشاری را شامل شود. مقدار بیشینه مطلق گرادیان افقی مرتبه یک در هر طرف جسم روی لبه جسم روی می‌دهد، درحالی‌که در همان نقطه مقدار گرادیان افقی مرتبه ۲، صفر است. 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 جمع‌تر یا فشرده‌تر خواهند شد. در صورتی که مشتق اول افزایش زیاد نوفه را به دنبال داشته باشد، مقادیر کمتر از یک پارامتر n برای افزایش کمتر نوفه و همچنین با اثر جابه‌جایی کمتر مرزها می‌تواند استفاده شود. همچنین استفاده از روش گرادیان قائم میدان پتانسیل نقش مهمی در بارزسازی ساختارهای زیرسطحی دارد و سبب وضوح بهتر اشکال بی‌هنجار به‌ویژه در لبه‌های آن‌ها خواهد شد (وردوزکو و همکاران، ۲۰۰۴). محاسبه آن‌ها در فضای فرکانس نیز به شکل رابطه (۴) خواهد بود:

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

یا می‌توان آن‌ها را با جایگزین کردن روش مشتق دوم

بهنجارش به صورت کنترل‌گر عمل می‌کند و سبب از دست رفتن برخی اطلاعات دامنه می‌شود و برخی دیگر را آشکارتر می‌کند. با توجه به اینکه در این روش از گرادیان افقی برای تعریف سطح افق استفاده می‌شود، اندازه این زاویه بین صفر تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند. اگرچه این روش فقط به اندازه زاویه منحصر می‌شود، نتیجه آن یک تصویر خوب است که تفسیر آن به آسانی امکان‌پذیر است.

$$\cos(\theta) = \frac{\sqrt{(\partial g/\partial x)^2 + (\partial g/\partial y)^2}}{\sqrt{(\partial g/\partial x)^2 + (\partial g/\partial y)^2 + (\partial g/\partial z)^2}} \quad (9)$$

هنگامی که بردار سیگنال تحلیلی (مخرج کسر) از بالای یک مرز قائم می‌گذرد، می‌چرخد؛ بنابراین دامنه سیگنال تحلیلی مقدار بیشینه‌ای بالای آن مرز خواهد داشت. مجموع مشتق افقی نیز (صورت کسر) 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 دلیل تقاطع‌های صفر مشتق افقی، با دو مقدار صفر محصور می‌شود. این موضوع مهم است زیرا مقدار $\cos(\theta)$ در مناطقی که تغییرات مقادیر مغناطیدگی یا اختلاف و تباین چگالی اندک باشد، یعنی نقاطی که مقادیر مشتق در آن نزدیک صفر است، همچنان بزرگ باقی می‌ماند. به علاوه مقادیر کمینه، مشخصات و ویژگی‌هایی از عمق مرز و جهت شیب ارائه می‌دهد. هنگامی که مرز به سطح نزدیک‌تر است، مقدار $\cos(\theta)$ حالت تیزتری دارد. محدوده تغییرات این فیلتر بین صفر تا یک متغیر است.

۰	-۱	۰
-۱	۴	-۱
۰	-۱	۰

(ب)

۰	-۱	۰
-۱	۸	-۱
۰	-۱	۰

(الف)

-۱	۰	-۱
۰	۴	۰
-۱	۰	-۱

(د)

۱	-۲	۱
-۲	۴	-۲
۱	-۲	۱

(ج)

شکل ۱. انواع فیلترهای نوع لاپلاسی؛ (الف) نوع اول، (ب) نوع دوم، (ج) نوع سوم و (د) نوع چهارم

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{\partial g/\partial z}{\sqrt{(\partial g/\partial x)^2 + (\partial g/\partial y)^2}} \right) \quad (7)$$

که در آن g میدان گرانی زمین است. از آنجایی که این فیلتر مبتنی بر نسبت مشتقات میدان است، در متعادل کردن دامنه‌های بی‌هنجاری‌های عمیق نسبت به بی‌هنجاری‌های کم‌عمق مؤثر است؛ اما الزاماً این فیلتر یک فیلتر تشخیص لبه نیست. به عبارتی زاویه تمایل دامنه بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر را نسبت به سطحی تقویت می‌کند. مقدار این زاویه زمانی که بالای منبع بی‌هنجار قرار می‌گیرد، مثبت است و زمانی که بالا یا نزدیک لبه‌های آن منبع قرار گیرد، صفر می‌شود؛ درست جایی که مشتق قائم صفر و مشتق افقی بیشینه است. در خارج از محدوده منبع بی‌هنجار مقدار آن منفی است، یعنی جایی که مشتق قائم منفی می‌شود. مقادیر زاویه تمایل صرف نظر از مقادیر مشتقات افقی و قائم در بازه $[-\pi/2, \pi/2]$ درجه تغییر می‌کند (میلر و سینگ، ۱۹۹۴).

بر اساس تحقیقات کوپر و کوهن (۲۰۰۶) استفاده از قسمت حقیقی تابع تانژانت هایپربولیک زاویه تمایل (HTA: Hyperbolic Tangent Angle)، تصویر بهتری از لبه اجسام ارائه می‌دهد. مقدار بیشینه این فیلتر لبه اجسام را نشان می‌دهد.

$$HTA = \text{Real} \left[\tanh^{-1} \left(\frac{\partial g/\partial z}{\sqrt{(\partial g/\partial x)^2 + (\partial g/\partial y)^2}} \right) \right] \quad (8)$$

این فیلتر در مقایسه با فیلتر گرادیان (مشتقات) کل افقی زاویه تمایل (THDR: Total horizontal derivative of the tilt angle) به دلیل استفاده از مشتقات مرتبه پایین‌تر، به نوبه کمتر حساس است. منحنی‌های پربندی منفی از این فیلتر که جسم را احاطه می‌کند، ناخواسته است و فقط باعث پیچیده‌تر شدن تفسیر می‌شود که بیشتر شدن مقادیر تابع تانژانت هایپربولیک بیشتر از یک مقدار آستانه تعریف شده در داده اصلی این مشکل را بهبود می‌بخشد.

زاویه تتا (ویجنز و همکاران، ۲۰۰۵) از دیگر فیلترهای فازی مؤثر است که با استفاده از دامنه سیگنال تحلیلی مجموع مشتق افقی را بهنجار می‌کند. این

توجه فیزیکی و یکی شدن ابعاد صورت و مخرج کسر می‌گردد.

حاصل فیلتر NDR یک زاویه است که میزان تغییرات فاز داده را روی سطح نشان می‌دهد و بزرگی آن بین صفر تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند. مقدار حاصل از این فیلتر روی بخش‌هایی از نقشه که داده به تدریج تغییر می‌کند، یک مقدار حداقل می‌شود و در قسمت‌هایی از نقشه که داده تغییرات سریع دارد، بسیار حساس و روی لبه‌ها بیشینه است. به همین دلیل همه لبه‌ها را به خوبی آشکار می‌کند. نکته مهم دیگر توانایی این فیلتر در متعادل‌سازی بی‌هنجاری‌های بزرگ و کوچک دامنه در کنار هم است. محاسبه مشتق از مرتبه کمتر از یک به وسیله تبدیل فوریه در فضای فرکانس امکان‌پذیر است، اما نکته مهم در این فیلتر این است که داده‌ها احتیاج به قدرت تفکیک تصویری زیادی دارد. 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.

۳. مدل‌سازی مصنوعی

به منظور بررسی وضعیت و توانمندی فیلترهای ذکر شده در تعیین و شناسایی بی‌هنجاری‌های گرانی و همچنین جدایی و آشکارسازی مرز آن‌ها و تفکیک لبه‌ها، از یک مدل مصنوعی مشابه محدوده باستانی تپه حصار که در حفاریات ظاهر شده است، یعنی یک‌سری دیواره و اتاقک استفاده شد (شکل ۲-الف). مدل مصنوعی شامل دیواره‌ها (رنگ قرمز) با عرض ۵۰ سانتی‌متر و اتاقک‌ها (رنگ آبی) با ابعاد مختلف است؛ عمق هر دو ۲ متر و مرکز آن‌ها در فاصله ۱/۳ متر زیر سطح زمین است و یک لایه پوششی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و با گسترش بیشتر به ابعاد (۲۸×۳۶) و با چگالی ۱/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب روی دیواره‌ها و اتاقک‌ها را می‌گیرد. چگالی دیواره‌ها ۲/۶ و چگالی اتاقک‌ها ۲ و چگالی زمینه ۲/۷

از روش‌های متداول دیگر آشکارسازی لبه، استفاده از فیلترهای پردازش تصویر است. فیلترهایی مانند سوبل، روبرت که جهتی‌اند و از مشتق درجه اول استفاده می‌کنند (آچاریا و ری، ۲۰۰۶؛ بورگر و بورگ، ۲۰۰۸؛ سلیمان و بریکن، ۲۰۱۱) و 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 روش تفاضل محدود محاسبه می‌شود (شکل ۱). فیلتر لاپلاس نوع اول و دوم اگرچه توانایی کمتری در آشکارسازی لبه‌ها دارند، ولی حساسیت کمتری به نوفه دارند. همچنین فیلتر لاپلاسی نوع سوم و چهارم در آشکارسازی گوشه‌ها بهتر عمل می‌کنند.

علاوه بر فیلترهای ذکر شده و براساس بنیان فیلترهای فازی موجود و با الگوبرداری از گرادیان قائم و افقی به‌ویژه نسبت مشتق، فیلتر دیگری طراحی و تعریف شد؛ به طوری که با مجموع نسبت مشتق متعامد در راستای x و y به وسیله dz که خود با مجموع مشتق افقی مرتبه نیم بهنجار شده است، فیلتر نسبت مشتق بهنجار (Normalized Derivatives Ratio: NDR) به صورت

رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$NDR = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y^2}\right)^2}} \right] \quad (10)$$

این فیلتر به خوبی لبه‌ها را در هر جهتی بارز می‌کند و درحالی‌که از dx و dy استفاده می‌کند، ولی تغییر فازی روی داده‌ها به وجود نمی‌آورد؛ به عبارت دیگر جایگاه مرزها را تغییر نمی‌دهد. همچنین همانند فیلتر نسبت مشتق در مقایسه با دیگر فیلترها جواب تیزتری اطراف پیک‌های بی‌هنجاری دارد. در واقع این فیلتر مشابه فیلتر گرادیان کل افقی نرمال شده نسبت به مشتق قائم است که به وسیله مشتقات افقی از مرتبه نیم بهنجار شده است و شباهت‌هایی نیز با این فیلتر و فیلتر تتا دارد. بهنجار کردن مخرج کسر فوق به وسیله رادیکال مخرج و عبارت زیر آن سبب افزایش کیفیت تصویر و همچنین

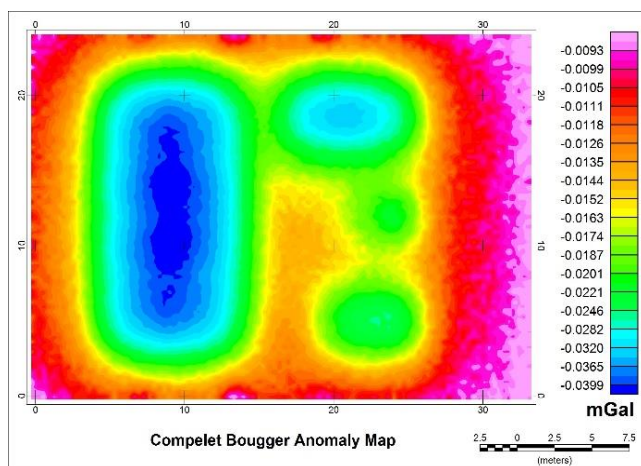
مدل مصنوعی را نشان می‌دهد. در این نقشه مرزها به خوبی با یک مقدار بیشینه مشخص است و می‌توان یک نمای کلی از مدل با توجه به حساسیت به نوفه فیلتر به خصوص در مدل‌های مصنوعی به خاطر اعمال یک باند فرکانسی محدود مشاهده کرد. شکل ۳- و نیز معرف نقشه فیلتر لاپلاس مرتبه ۴ است. این فیلتر نیز روی مدل مصنوعی نیز پاسخ خوبی نسبتاً به دست می‌دهد که در محیط‌های با نوفه کم با توجه به سادگی این فیلتر قابل انتظار است. این فیلتر به نوعی مشابه مشتق دوم است زیرا که اساس عملکرد آن مشتق دوم از داده‌هاست که این خود گواهِ حساسیت به نوفه این فیلتر می‌تواند باشد.

۴. داده‌های گرانی سنجی محدوده باستانی تپه حصار دامغان برای داده برداری قسمتی از تپه حصار یعنی محدوده پهنه سفال منقوش انتخاب شد (شکل ۶). با شروع پروژه عملیات شبکه بندی، نقشه برداری و برداشت گرانی سنجی در این محدوده طی ۱۰ روز انجام گرفت. عملیات میکروگرانی در وسعتی حدود ۵۰×۳۵ متری انجام پذیرفت، به طوری که نقاط برداشتی روی ۱۳ پروفیل ۱ متر منظور شده است. فاصله پروفیل‌ها در این برداشت که در راستای تقریبی جنوب غربی- شمال شرقی است، سه متر در نظر گرفته شد. این فاصله شبکه بندی با توجه به ابعاد دیوارها و اتاقک‌هایی که در گمانه‌های حفاری شده در منطقه وجود داشت، انتخاب شده است.

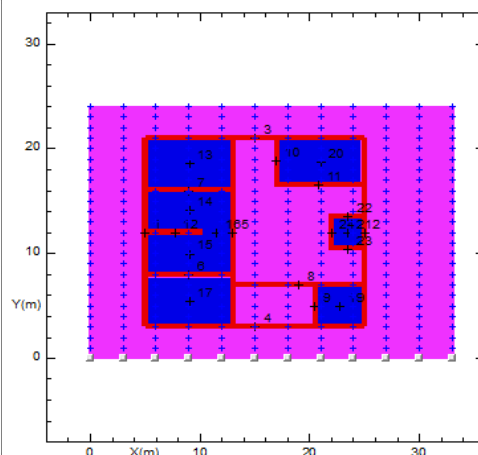
گرم بر سانتی متر مکعب منظور شده است. به این ترتیب در نرم افزار Potensoft اثر گرانی مدل، تهیه و خروجی آن برای تجزیه و تحلیل به صورت نقشه بی‌هنجاری بوگه (شکل ۲-ب) و مقادیر عددی در یک فایل ذخیره شد. فاصله ایستگاه‌های برداشت، ۱ متر و فاصله پروفیل‌ها از هم ۳ متر در نظر گرفته شده است؛ همچنین به داده‌ها ۲ درصد نوفه تصادفی اضافه شده است.

شکل ۳-الف و ۳-ب به ترتیب نقشه زاویه تیلت و تانژانت هایپربولیک آن را نشان می‌دهد. زاویه تیلت همان گونه که انتظار می‌رود تنها می‌تواند یک نمای کلی از بی‌هنجاری بدهد، در حالی که از نقشه تانژانت هایپربولیک پاسخ نسبتاً خوبی به دست می‌آید. مرزها تا حدودی مشخص شده اما شکل اتاقک‌ها خیلی بارز نیست که شاید به این دلیل باشد که این فیلتر بیشتر بی‌هنجاری‌های دایره‌ای را می‌تواند بارز کند البته اثر نوفه روی این فیلتر چشمگیر است.

شکل ۳-ج نقشه TDX از بی‌هنجاری گرانی را نشان می‌دهد که تا حدودی توانسته بی‌هنجاری‌ها را از هم تفکیک کند. نقشه زاویه تانژانت بی‌هنجاری مذکور نیز در شکل ۳-د نشان داده شده است. این فیلتر با متعادل کردن بی‌هنجاری‌های بزرگ و کوچک دامنه، نسبتاً پاسخ خوبی داشته است. در دو فیلتر اخیر مرزها بیشینه می‌شوند به خوبی نشان داده شده‌اند. شکل ۳-ه) نقشه اعمال فیلتر NDR روی بی‌هنجاری گرانی باقی‌مانده

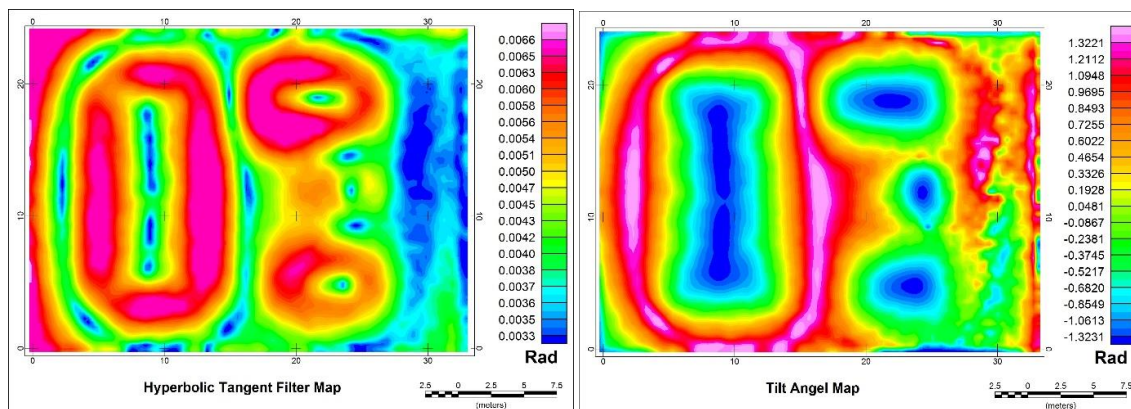


(الف)



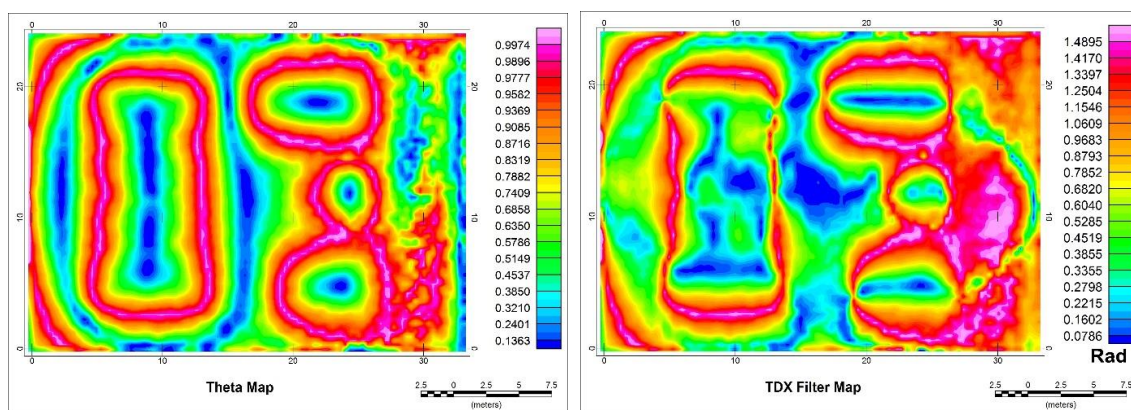
(ب)

شکل ۲. الف) مدل مصنوعی شامل دیوارها (رنگ قرمز) و اتاقک‌ها (رنگ آبی) و ب) اثر گرانی ناشی از مدل مصنوعی



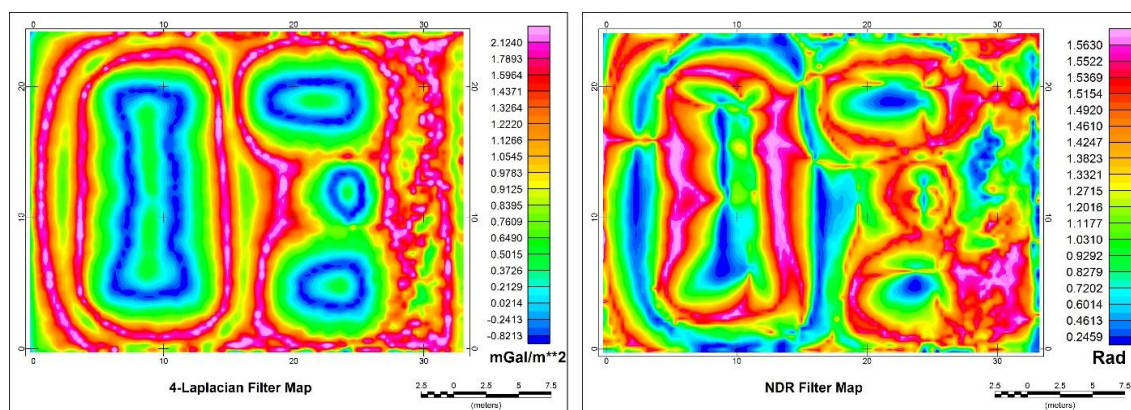
(ب)

(الف)



(د)

(ج)



(و)

(ه)

شکل ۳. (الف) نقشه زاویه تیلت، (ب) نقشه تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت، (ج) نقشه فیلتر TDX، (د) نقشه زاویه تنا، (ه) نقشه فیلتر NDR و (و) نقشه فیلتر لاپلاس نوع چهارم

عملیات نقشه برداری، برداشت داده‌های گرانی سنجی با دستگاه گرانی سنج CG5 با دقت یک هزارم میلی گال روی ۶۵۰ نقطه ایستگاهی انجام گرفت.

پس از برداشت داده‌های گرانی برای پردازش داده‌ها ابتدا اثر همه عوامل مزاحم و نوفه حذف شد. به

در این برداشت به منظور تعیین بی‌هنجاری بوگه در محدوده، ابتدا یک ایستگاه مبنای محلی در محدوده اکتشافی تعیین شد و سپس مقدار گرانی مطلق آن با استفاده از انتقال گرانی مطلق یک ایستگاه مبنای گرانی در میانه راه شاهرود به دامغان محاسبه گردید. بعد از شبکه‌بندی و

صورت درصد بیان می‌شود، نسبت مجموع مربعات کل پراش مقادیر (روند) محاسبه‌ای به مجموع مربعات کل پراش داده‌های مشاهده‌ای را بیان می‌کند. برای این منظور ابتدا مجموع مربعات کل پراش داده‌های مشاهده‌ای (اندازه‌گیری شده روی زمین) از رابطه (۱۱) محاسبه شد:

$$SSO = \sum_{i=1}^N g(x_i, y_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N g(x_i, y_i))^2}{N} \quad (11)$$

سپس مجموع مربعات کل پراش مقادیر محاسبه‌ای یعنی روند از فرمول (۱۲) محاسبه شد:

$$SSC = \sum_{i=1}^N T(x_i, y_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N T(x_i, y_i))^2}{N} \quad (12)$$

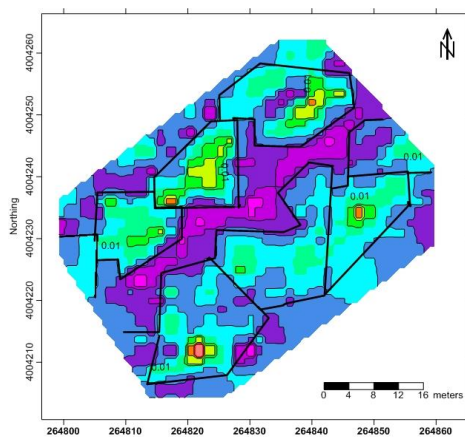
از اختلاف دو فرمول بالا مجموع مربعات کل باقی‌مانده یا انحرافات از روند منطقه‌ای حاصل شد که درجه‌ای که نتیجه به صفر نزدیک‌تر بوده، مورد قبول است. همچنین درصد خوبی تطابق روند سطحی برابر به صورت رابطه (۱۳) بررسی شد:

$$\%R^2 = \frac{SSC}{SSO} \times 100 \quad (13)$$

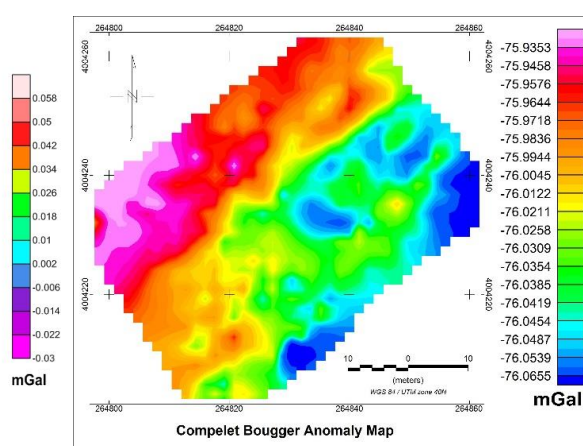
حال با توجه به درجه سطح، مقدار R محاسبه‌ای با مقدار R بحرانی (قابل دسترسی در جداول استاندارد آماری) مقایسه شد. در این تحقیق پس از محاسبه روند سطحی مربوط به مرتبه‌های مختلف و تعیین مقادیر R و مقایسه، روند سطحی درجه ۷ انتخاب شد.

این منظور تمام تصحیحات لازم مانند تصحیح دریافت یا رانه دستگاه و کشند زمین، گرانی نرمال، هوای آزاد، تخته بوگه، توپوگرافی و عرض جغرافیایی اجرا شد تا بی‌هنجاری بوگه کامل به دست آید (شکل ۴-الف). بی‌هنجاری به دست آمده دارای گستره تغییرات در حدود ۱۳۰ میکروگال است که معرف اثرات دیواره‌ها، اتاقک‌ها و ساختارهای عمیق‌تر موجود در محدوده کاوش است. مقادیر کم مربوط به تأثیرات اتاقک‌ها و مقادیر بالا متناسب با تأثیرات دیواره‌هاست. برای حذف نوفه سطحی قبل از اعمال روند سطحی از فیلتر ادامه فراسو با ارتفاع نیم متر استفاده شده است. به منظور حذف یا تضعیف روند کلی منطقه‌ای موجد برای بارزسازی ساختارهای مرتبط با آثار باستانی از روش روند سطح استفاده شد؛ بنابراین برای تفکیک بی‌هنجاری‌های محلی از بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای در محدوده مورد مطالعه، روش روند سطحی با مرتبه‌های ۲، ۳، ۴ تا ۸ با استفاده از نرم‌افزارهای Geosoft و Winglink، روی بی‌هنجاری بوگه محدوده اعمال شد. این کار سبب نمایش برخی ساختارهای زیرسطحی شد که نمونه‌ای از آن یعنی نقشه باقیمانده روند سطحی درجه هفت از محدوده مورد مطالعه در شکل ۴-ب ارائه شده است.

به منظور تشخیص و انتخاب درجه چندجمله‌ای تحلیل روند سطحی از روش مناسب آماری درصد مقدار کاهش مربعات استفاده شد. این نسبت ساده که به



(ب)



(الف)

شکل ۴. الف) نقشه بی‌هنجاری گرانی و ب) نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده مرتبه هفت

مرزها را مشخص کند. به‌خصوص با مقایسه این نقشه با نقشه تتا و TDX می‌توان با قاطعیت بیشتری این امر را عنوان کرد. عدم همپوشانی بی‌هنجاری‌های بزرگ و کوچک در این نقشه قابل ملاحظه است. در شکل ۵- و نقشه بی‌هنجاری حاصل از فیلتر لاپلاس نوع چهار دیده می‌شود. این فیلتر اگرچه روی مدل مصنوعی بهتر عمل می‌کند، اما روی داده واقعی به خاطر گستره باند فرکانسی بزرگ‌تر آن پاسخ نسبتاً خوبی در مقایسه با بقیه فیلترها می‌دهد. هرچند در کل عملکرد این فیلتر تا حدودی سبب بارز شدن ساختارهای زیرسطحی شود، اما اثر همپوشانی بی‌هنجاری‌های بزرگ دامنه بر بی‌هنجاری‌های کوچک دامنه غالب است.

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، هدف اصلی این تحقیق شناسایی ساختارهای زیرسطحی و تهیه نقشه اولیه و پایه از محدوده باستانی تپه حصار است؛ بنابراین برای نمایش بهتر نقشه اتاقک‌ها، از روش نزدیک‌ترین همسایگی برای شبکه‌بندی نقشه بی‌هنجاری باقیمانده از مرتبه هفت، نقشه زاویه تیلت و نقشه فیلتر NDR استفاده شده است (شکل ۵). در بی‌هنجاری محلی که در شکل ۴- ب نشان داده شده است، می‌توان ساختارهایی را در کنار هم به‌خوبی مشاهده کرد که هرکدام معرف یک یا چند خانه در کنار هم هستند؛ اما فضای میانی بین آن‌ها را که در شکل ۵- ه با خط شماره یک مشخص شده است، معبر و کوچه باستانی می‌توان معرفی کرد که این مدل در خرابه‌های شهرها و روستاهای قدیمی هم‌اکنون نیز دیده می‌شود. این اشکال معمولاً دارای عرض ثابت نیستند و در قسمت‌هایی بسیار فراخ و در قسمت‌های دیگر آن‌قدر باریک می‌شوند که به‌زحمت دو نفر می‌توانند از کنار هم همزمان از آن عبور کنند. در اطراف این کوچه باید به سازه‌هایی اشاره کرد که با شماره دو مشخص شده است. قسمتی از شکل ۵- الف که با عدد سه مشخص شده است گویای یک اتاقک یا محوطه است که حتی اثر آن روی نقشه بی‌هنجاری بوگه به‌خوبی مشخص است. بخش مورد نظر با شماره چهار روی شکل نشانگر محوطه‌ای از سازه‌هایی با اتاقک‌های کوچک و تودرتوست که در شکل ۵- ه نیز مشخص

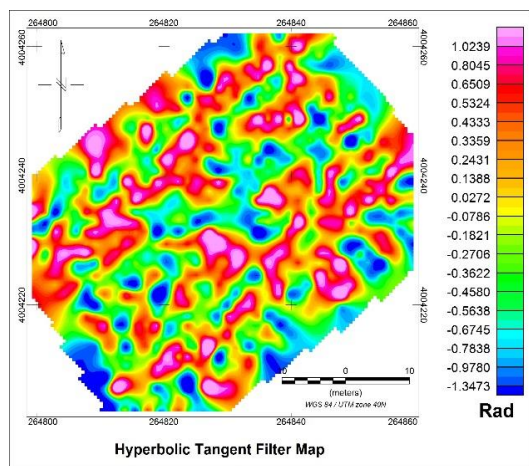
مطابق شکل ۴- ب به نظر می‌رسد که محدوده موردبررسی از چند بخش تشکیل شده است. بخش اصلی که در نگاه اول به چشم می‌خورد وجود بی‌هنجاری منفی ممتد و جهت‌دار است که نشان از وجود یک ساختار طولی و کشیده است. در تفسیر این بخش می‌توان گفت که یک کوچه احتمالی است که دو بخش شمالی و جنوبی آن متشکل از خانه‌هایی است که دارای ساختار و نظم یکسان نیست و دو طرف متفاوت به نظر می‌رسد. همان‌گونه که در شکل با خطوط بسته‌مشکی مشخص شده است، می‌توان در این محدوده چند مجموعه متصور شد که در کنار هم احداث شده‌اند. این موضوع به‌خوبی در نتایج اعمال فیلترها در شکل ۵ دیده می‌شود، هرچند در نگاه اول به نظر افزایش نوفه دیده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این بی‌هنجاری مثبت و منفی حاصل از اعمال فیلترهای فازی محلی ناشی از وجود ساختارهای زیرسطحی است.

نقشه عملکرد مناسب فیلتر زاویه تیلت روی بی‌هنجاری گرانی سبب متعادل کردن بی‌هنجاری‌ها با دامنه بزرگ و کوچک شده است (شکل ۵- الف) و براساس نقشه حاصل می‌توان ساختارهای اتاقک‌مانند را تا حد زیادی تفکیک و مشاهده کرد. نتایج کاربرد فیلتر تانژانت هایپربولیک روی داده‌ها در شکل ۵- ب ارائه شده است. مطابق این شکل هرچند به دلیل حساسیت به نوفه تحت تأثیر قرار گرفته است، اما در شناسایی ساختارها عملکرد خوبی داشته و می‌توان گفت در تفکیک بی‌هنجاری‌ها نیز خوب عمل کرده است. شکل ۵- ج و ۵- د به ترتیب عملکرد فیلترهای فازی TDX و کسینوس تئای محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد که شباهت بسیاری به هم دارند. این دو فیلتر در شناسایی لبه‌ها بسیار موفق عمل می‌کنند، هر دو به لبه‌ها یک مقدار بیشینه نسبت می‌دهند، ولی تفسیر آن‌ها به‌تنهایی سخت است. از میان این دو، تنها کمی نقشه‌ها را تیزتر می‌کند و تفکیک‌پذیری بهتری دارد.

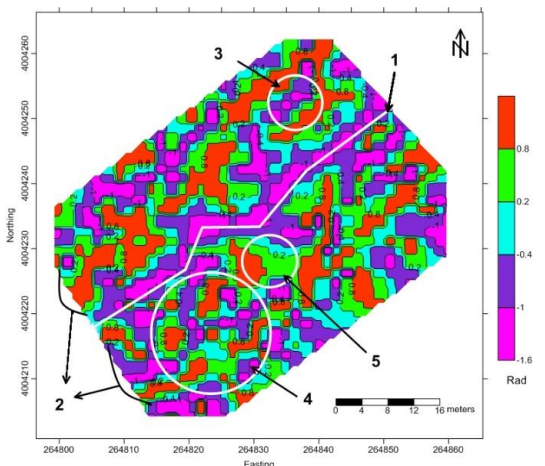
شکل ۵- ه نقشه اعمال فیلتر NDR روی بی‌هنجاری گرانی باقیمانده منطقه را نشان می‌دهد که توانسته است

برای عملیات داده‌برداری به وجود آورد که اثر آن در تمامی نقشه‌ها به‌ویژه در شکل ۵-۵ مشخص است.

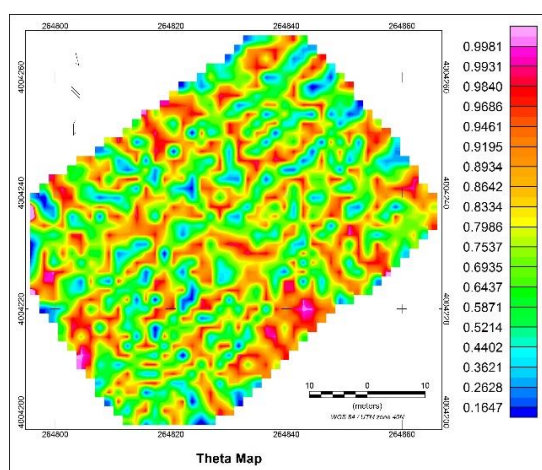
است. در قسمت ۵ روی شکل نیز یک ترانسه با ابعاد 10×10 حفاری شده بود و ملاحظاتی را به دلایل محیطی



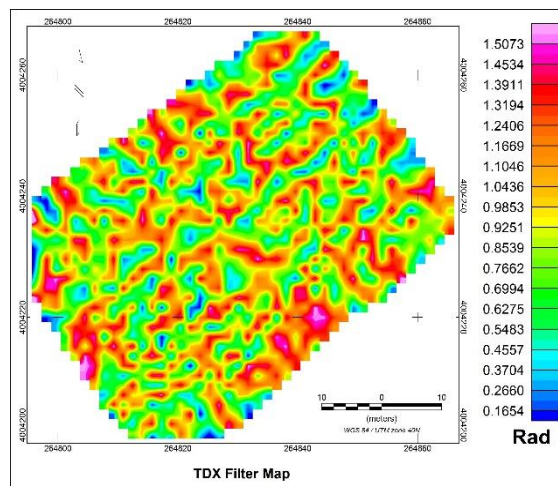
(ب)



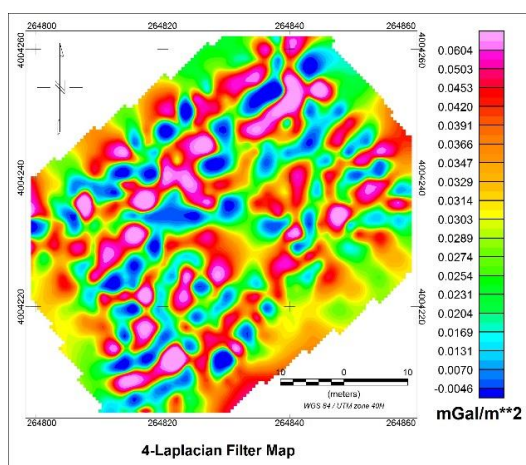
(الف)



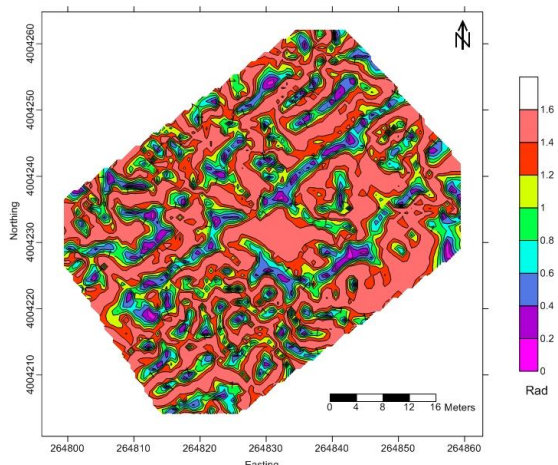
(د)



(ج)

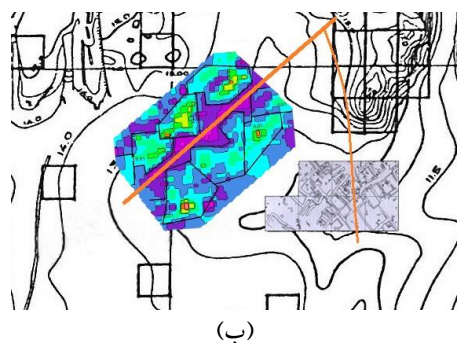


(و)



(ه)

شکل ۵. (الف) نقشه زاویه تیلت، (ب) نقشه تانژانت هایپربولیک زاویه تیلت، (ج) نقشه فیلتر TDX، (د) نقشه زاویه تتا، (ه) نقشه فیلتر NDR و (و) نقشه فیلتر لاپلاس ۴



شکل ۶. (الف) حفاری‌های انجام‌گرفته در محدوده تپه‌حصار در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی و نمایش اتاقک‌ها و دیواره‌ها. (ب) پلان معماری منطقه حفاری در جنوب شرق محدوده (روستایی، ۱۳۹۱) و محدوده برداشت گرانی‌سنجی

فیلترهای مختلف فازی توانسته است تا حدود زیادی در تفکیک این گونه 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. نتایج بررسی گرانی‌سنجی در محدوده باستانی تپه‌حصار نشان می‌دهد که این محدوده از ساخت‌وسازهای زیبای برخوردار بوده که به صورت یک شهرک باستانی با مجموعه خانه‌های مشخص و راهروهای باریک بنا شده است. راهرو یا کوچه اصلی در این مجموعه در امتداد شمال شرق-جنوب شرق بوده است و به‌خوبی 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 تا حدی متفاوت به نظر می‌رسد.

بررسی‌ها روی نقشه‌های مختلف نشان می‌دهد که زاویه تیلت به‌عنوان یک فیلتر بالاگذر در متعادل کردن دامنه بی‌هنجاری‌های مختلف مؤثر بوده و راهروی اصلی به‌خوبی در آن تفکیک و بارز شده است. زاویه تیلت هاپربولیک نیز در تفکیک و تشخیص دیواره‌ها و اتاقک‌ها موفق بوده است، ولی جزئیات کمتر بارز شده و اثر راهرو با تغییراتی همراه است. دو نقشه حاصل از فیلترهای تتا و TDX تا حدود زیادی سبب آشکارسازی دیواره‌ها و اتاقک‌ها شده است؛ به‌ویژه در مرزها نیز خوب عمل کرده است به‌طوری‌که نقاط بیشینه در دیواره‌ها تجمع یافته و با

بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده به روش گرانی با نقشه‌های به‌جامانده از حفاری‌های دکتر اشमित در دهه ۱۹۳۰ میلادی همخوانی فراوانی دارد. در پهنه سفال منقوش و قسمت جنوب غربی محوطه برداشت، تقریباً چسیبده به آن یک محوطه ۷۰ متری بررسی شده در هفت بخش مجزا وجود دارد (شکل ۶).

تصاویر و نقشه‌های به‌دست‌آمده از این حفاری نشان از وجود اتاقک‌های تودرتو و نامنظم، راهروهای باریک و کوچه‌های با عرض متغیر دارد. این خصوصیات مربوط به لایه‌های سطحی در تپه‌حصار است که در زیر لایه‌ها هم تکرار می‌شود (روستایی، ۱۳۹۱). فاصله محدوده حفاری‌شده و محدوده برداشت در این تحقیق بسیار نزدیک بوده و از نظر زمانی، توالی لایه‌ها، نوع سفال، گورها و اشیای به‌دست‌آمده مشابه یکدیگر هستند. این علائم مؤید هم‌عصری دو محدوده است. براساس نقشه‌های موجود خطوط نارنجی‌رنگ در شکل ۶-ب می‌تواند معرف کوچه‌های موجود در محدوده مسکونی باشد که با نتایج داده‌های گرانی‌سنجی همخوانی خوبی دارد؛ بنابراین می‌توان تصور کرد که دو کوچه در دو محدوده موردنظر احتمالاً دو راهرو باشد که در بخش میانی تپه سرخ و تپه گنج به هم مرتبط بوده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

شناسایی ساختارهای زیرسطحی در مناطق باستانی بدون تخریب و ازین‌بردن آثار گذشته از ویژگی‌های روش‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه میدان پتانسیل است. در این راستا ارائه

می‌توان گفت که ساخت چندین لایه (دوره‌های سکونت) در این محدوده و نیز وجود دیواره‌های نزدیک به هم در برخی بخش‌ها، سبب شده است که تفکیک مناسبی در آن‌ها ایجاد نشود و اتاقک‌های کوچک تحت تأثیر تباین چگالی بالای دیواره‌های چندلایه‌ای باشند.

مراجع

روستایی، ک.، ۱۳۹۱، کاوش‌های تپه‌حصار دامغان، الف، اشمیت، اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان سمنان، چاپ اول، ۵۸۴ صفحه.

- Acharya, T. and Ray, A. K., 2006, Image processing: principles and applications, Wiley InterScience, 452p. ISBN-13: 978-0471719984.
- Batayneh, A., Khataibeh, J., Alrshdan, H., Tobasi, U. and Al-Jahed, N., 2007, The use of microgravity, magnetometry and resistivity surveys for the characterization and preservation of an archaeological site at Ummer-Rasas, Jordan, *Archaeological Prospection*, 14, 60-70.
- Blakely, J. R., 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press, 346p.
- Bishop, I., Styles, P., Emsley, S. J. and Ferguson, N. S., 1997, The detection of cavities using the microgravity technique: case histories from mining and karstic environments, *Modern Geophysics in Engineering Geology*, 12, 153-166.
- Burger, W. and Burge, M. J., 2008, Digital image processing: an algorithmic approach using Java, Springer-Verlag., ISBN 978-1-84628-968-2.
- Castiello, G., Florio, G., Grimaldi, M. and Fedi, M., 2010, Enhanced methods for interpreting microgravity anomalies in urban areas, *First Break*, 28, 93-98.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2003, The application of fractional calculus to potential field data, *Exploration Geophysics*, 34, 51-56.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2006,

جزئیات بیشتری بارز شده‌اند. فیلتر NDR روی دیواره‌ها را مقدار بیشینه نشان داده و از تفکیک پذیری خوبی برخوردار بوده است و با متعادل کردن دامنه بی‌هنجاری‌های توانسته تا حد زیادی بهتر از بقیه فیلترها جزئیات ساختارهای زیرسطحی را بارز کند. مقایسه نتایج بررسی‌های حفاری 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 در حفاری‌ها به صورت نقشه پلان تهیه شده است و با نتایج فیلترهای به کاررفته مطابقت داشته و مؤید آن است. همچنین با توجه به بررسی‌ها

Enhancing potential field data using filters based on the local phase, *Computers and Geosciences*, 32, 1585-1591.

- Linnington, R. E., 1966, The test uses of a gravimeter on Etruscan chambered tombs at Cerveteri, *Prospezioni Archaeology*, 1, 37-41.
- 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.
- Pánisová, J. and 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), 237-254.
- Slepek, Z., 1999, Electromagnetic sounding and high precision gravimeter survey define ancient stone building remains in the territory of Kazan Kremlin, *Archaeological Prospection*, 6, 1147-160.
- Solomon, C. and Breckon, T., 2011, Fundamentals of digital image processing: a practical approach with examples in Matlab, John Wiley & Sons, 344 p.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., and MacKenzie, C., 2004, New insights into magnetic derivatives for structural mapping, *The Leading Edge*, 23, 116-119.
- Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P., 2005, Theta map: edge detection in magnetic data, *Geophysics* 70, 39-43.