JOURNAL OF RESEARCH ON ARCHAEOMETRY

Original Paper **Received: 10/01/2016**
Vol. 2, No.2, Semi-Annual 2017, 19-34 **Accepted: 23/01/2017**

Archaeological investigations at Tepe Hissar-Damghan using Gravity and Magnetics methods

Behzad Sarlak[1], Hamid Aghajani[*2]

[1]*MSc Geophysics, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, IRAN*
[2]*Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, IRAN*

Abstract

Research and exploration of the remaining relics from the past has special importance in 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 the need for excavation and destruction of antiquities can be found useful information. Today, the non-destructive geophysical methods such as gravimetry and Magnetometry used to detect the archaeological discoveries without harmful environmental effects that only use natural properties of the subsurface material. For archeology studying, the target is detection of sub-surface structures which was made in the enceinte. But here it's possible was covered by some overburden such as alluvium. The gravity method is based on density contrast between the anomalous body (walls and chambers) and the host deposits and environments of them. While, in magnetic survey we use contrast of magnetization in between the environment and anomalous bodies, which is caused by natural factors or human activities such as metal products, building materials and cavities are filled. In this paper; to investigate the subsurface structures of walls and rooms in a part of the Teppe-Hissar archaeological site in Damghan, the gravity and magnetic data were used. In order to this work, the gravity and magnetic data measured in a regular grid in the desired area and then after do corrections such as instrument drift correction, free air and slab Bougure, latitude and terrain corrections on gravity data and the daily correction and Reduction to pole (RTP) correction on the magnetic data, the gravity and magnetic anomalies map were obtained. When the data quality permits, a range of highpass filters, such as downward continuation or vertical derivatives, can be applied to bring out fine detail. Also, In order to separate the residual anomaly from regional we used trend surface method. Local phase filters provide an alternative approach but conventional phase functions need to be unwrapped to remove phase ambiguity. Therefore, detection of the boundary of chambers or walls and the horizontal location of sources can be obtained from derivative based filters such as the horizontal gradient magnitude, tilt-angle, theta-map, Laplacian and tangent hyperbolic. Since the tilt angle is based on a ratio of derivatives, it enhances large and small amplitude anomalies well. The results show that the tilt angle is effective in balancing the amplitudes of the 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. 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 diffuse. The hyperbolic tilt angle (HTA) filter uses of the real part of the hyperbolic tangent function in the tilt angle calculation achieved better delineation of the edges of the anomalous body than the other filters we use here. The maximum value of the HTA gives location of the body edges. Normalized Derivatives Ratio (NDR), a new edge-detection filter, is based on ratios of the derivatives orthogonal to the horizontal of the field. The NDR is demonstrated using synthetic

[*] Corresponding author: haghajani@shahroodut.ac.ir

and real gravity and magnetic data from an archaeology site, Tepe-Hissar. Compared with other filters, the NDR filter produces more detailed results as can see that the separation and detection walls and chambers have a high compliance with the results of excavations carried out. The results of these methods with the results of excavations carried out in the last few decades are highly adaptable, as it can be, according to the results of drilling, subsurface structures such as streets, walls or houses on the data obtained by gravity and magnetic survey. The information and data from these methods in an ancient area can be used as a basic plan by archaeologists for the archaeological exploration and excavation depth of field.

Keywords: Archaeometry, Gravity and Magnetic, Edge detection, Fuzzy filters, Teppe-Hissar.

پژوهه باستان‌سنجی

مقاله پژوهشی | تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۰
سال دوم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۵، ۱۹-۳۴ | تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴

بررسی‌های باستان‌سنجی در تپه‌حصار دامغان با استفاده از روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی

بهزاد سرلک[۱]، حمید آقاجانی[۲]*

۱. کارشناس ارشد ژئوفیزیک (گرانی‌سنجی)، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲. دانشیار گروه نفت و ژئوفیزیک، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

کاوش در آثار به جای مانده از گذشتگان دارای اهمیت ویژه‌ای در شناسایی تاریخ و هویت یک سرزمین دارد. پیشرفت دانش بشری روش‌های نوینی در شناسایی مکان‌های باستانی ارائه داده است که با استفاده از آن‌ها بدون نیاز به حفاری یا تخریب آثار باستانی به اطلاعات مفیدی می‌توان دست یافت. امروزه از روش‌های ژئوفیزیکی غیرمخربی مانند گرانی‌سنجی (Gravimetry) و مغناطیس‌سنجی (Magnetometery) که تنها از خاصیت‌های طبیعی و ذاتی مواد زیرسطحی بهره می‌برند، در اکتشافات باستان‌شناسی استفاده می‌شود. در گرانی‌سنجی از تباین چگالی بین دیواره‌ها و اتاقک‌ها استفاده می‌شود. درحالی‌که در روش مغناطیس‌سنجی از تباین مغناطیدگی (Magnetization) موجود بین اجسام آنومال و محیط پیرامون ناشی از عوامل طبیعی و یا فعالیت‌های بشری نظیر اقلام فلزی، مصالح ساختمانی و حفره‌های پرشده استفاده می‌شود. در این مقاله سعی شده است با استفاده روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی به شناسایی ساختارهای زیرسطحی در قسمتی از محوطه باستانی تپه حصار دامغان موسوم به پهنه سفال منقوش، پرداخته شود. به این منظور در یک شبکه منظم مربع‌مستطیلی داده‌های میدان گرانی و مغناطیس در محدوده مورد نظر برداشت شد و پس از تصحیحات لازم روی داده‌های گرانی و مغناطیس مانند رانه دستگاه، تصحیح هوای آزاد، تخته بوگه، توپوگرافی و اصلاحات روزانه، نقشه آنومالی‌های گرانی و مغناطیس تهیه گردید. بر اساس این نقشه‌ها موقعیت و محدوده دیواره‌ها و اتاقک‌های باستانی شناسایی گردید. سپس با استفاده از فیلترهای روند سطح، مشتق قائم اول و فازی اثر میدان ناشی از آثار باقیمانده از ناحیه‌ای تفکیک شد. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده داده‌های گرانی و مغناطیس در شناسایی ساختارهای زیرسطحی مانند دیواره‌ها و اتاقک‌ها انطباق بالایی با نتایج حاصل از کاوش‌های انجام شده در دهه‌های گذشته دارد. با توجه به اینکه عملیات کاوش به روش حفاری هزینه‌بر، وقت‌گیر و از همه مهم‌تر امکان آسیب رساندن به سازه‌های قدیمی را در بردارد، با استفاده از نتایج بررسی‌های غیرمستقیم ژئوفیزیکی می‌توان یک طرح کلی برای کاوش‌های باستان‌شناسی به‌وسیله حفاری طراحی و اجرا نمود تا آثار زیرسطحی کمتر آسیب دیده و حفریات هدفمند باشند.

واژه‌های کلیدی: باستان‌سنجی، گرانی و مغناطیس‌سنجی، بارزسازی لبه، فیلترهای فازی، تپه‌حصار.

* مسئول مکاتبات: استان سمنان، شاهرود، بلوار دانشگاه، دانشگاه شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، گروه ژئوفیزیک و نفت- اتاق ۳۰
پست الکترونیکی: haghajani@shahroodut.ac.ir

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

۱. مقدمه

یکی از کاربردهای مهم و اساسی علم ژئوفیزیک (Geophysics) در اکتشافات باستان‌شناسی صورت می‌پذیرد. روش‌های ژئوفیزیکی هرکدام به‌نوبه خود قابلیت زیادی در اکتشافات مواد و ساختارهای باستانی دارند. با این‌حال انتخاب روش مناسب نیز دارای اهمیت است که به آگاهی از منطقه، نوع پدیده‌های هدف اکتشاف و محیط دربرگیرنده آنان و همچنین میزان هزینه و منطقه تحت پوشش بستگی دارد. بسته به هدف برداشت می‌توان از یک یا چند روش ژئوفیزیکی در یک پروژه اکتشافی استفاده کرد زیرا این روش‌ها مکمل هم بوده و استفاده از روش‌های متفاوت در صورت امکان باعث افزایش اطمینان به تفسیرهای به‌دست‌آمده می‌شود و کیفیت پاسخ را بهبود می‌بخشد. تحقیقات و پژوهش‌های بکار رفته نشان می‌دهد که در حیطه باستان‌شناسی روش‌های ژئوفیزیکی را می‌توان در شناسایی و بارزسازی ساختار معماری مدفون در خاک، تعیین محل، اندازه و عمق آثار باستانی (تشخیص پلان بناهای مدفون، بقایای پی‌ها و 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 بکار می‌رود (Alitajer & Afshari azad, 2013, p. 175). شایان‌ذکر است که در استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، محدودیت‌هایی نظیر وجود آلودگی‌های آهنی در خاک، کابل‌های برق و فنس کشی‌های موجود در منطقه، توسعه اراضی کشاورزی، مواد صنعتی، رشد زندگی شهرنشینی و ارتباطات دارد که سبب ایجاد نوفه‌هایی (Noise) در داده‌های (Data) تولیدی در برخی از روش‌های ژئوفیزیکی می‌شود (Alitajer & Afshari azad, 2013, p. 175).

هدف از این کار تحقیقی شناسایی ساختارهای زیرسطحی مسکونی در بخشی از محوطه باستانی تپه حصار؛ پهنه سفال منقوش؛ با استفاده از داده‌های گرانی و مغناطیس اندازه‌گیری شده است. لذا با توجه به تباین چگالی و مغناطیدگی بین دیواره‌ها و جاهای پر شده با خاک دستی یا اتاقک‌ها، می‌توان ساختارها را تا حدودی بدون حفاری شناسایی نمود و این کار می‌تواند نقشه راهی برای حفاری هدفمند در کاوش‌های باستانی باشد.

۲. پیشینه استفاده از روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در باستان‌شناسی

تخمین محل بی‌هنجاری‌های (Anomaly) منفی (حفره‌ها) و بی‌هنجاری‌های مثبت (دیواره‌ها و آرامگاه‌های بزرگ مدفون) در یک بستر مانند یک محوطه باستانی به روش میکرو گرانی‌سنجی جالب‌توجه و کاربردی است (Bishop et al., 1997, p. 156). تاریخچه کاربرد گرانی (میکروگرانی) در محوطه‌های باستانی به پژوهش‌های لینینگتون (Linington, 1966) برمی‌گردد. تلاش او برای اکتشاف آرامگاه‌های حجره‌دار اتروسکن (Etruscan) در ایتالیا خیلی موفق نبود.

البته بعد از آن کارهای موفقی در اکتشاف سرداب‌ها، دهلیزها و تونل‌های باستانی صورت گرفته است، اما کاربردهای میکروگرانی بعدی در باستان‌شناسی چشم‌انداز خوبی از این روش نشان داد. اسلپاک (Slepak, 1999) آنومالی‌های گرانی بین ۳۰-۸۰ میکروگال را از بازمانده‌های مدفون یک ساختمان قدیمی در کازان کرملین (Kazan Kremlin) روسیه برداشت کرد. همچنین آنومالی‌های میکروگرانی بالای باقی‌مانده‌های دیواره‌های کلیسای بیزانس در اردن بین ۱۵-۲۰ میکروگال گزارش شده است (Batayneh et al., 2007, p .156). پاستکا و پانیسف (Pánisová & Pašteka, 2009) با استفاده از روش گرادیان قائم روی داده‌های میکروگراویتی در داخل کلیسای قدیمی نیکلاس (Nicolas) در شهر پیوکانچ (Pukanec) کشور اسلواکی پرداختند. به این ترتیب آن‌ها توانستند با آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی وضعیت زیرسطح این بنا را توصیف و حفره‌ای در یک متری زیر سطح آن شناسایی نمایند. کاستلو و همکاران (Castiello

et al., 2010) نیز حفره‌های زیرسطحی در محیط‌های شهری ناپل (Napoli) را به روش گرانی بررسی کردند. در ایران از روش گرانی‌سنجی برای اولین بار در باستان‌شناسی استفاده می‌شود. در مقدار گرانی مشاهده‌ای یا قرائت‌شده 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 نوفه خیلی مؤثر هستند، باید کلیه تصحیحات مثل اثر رانه دستگاه و جزر و مد، هوای آزاد، تخته بوگه و توپوگرافی با دقت بالاتری انجام شوند. نتایج حاصل از بررسی‌های صحرایی‌گرانی پس از حذف عوامل مزاحم به‌عنوان آنومالی گرانی بوگه کامل (Complete Bouguer) خوانده می‌شود؛ که دارای دو مؤلفه ناحیه‌ای (Regional) مربوط به ساختارهای عمیق و در مقیاس وسیع و محلی (Residual) مربوط به ساختارهای کوچک‌تر و سطحی است (Telford et al., 1990, p. 11-13).

مطالعه مغناطیس زمین قدیمی‌ترین شاخه ژئوفیزیک است که اولین بار توسط ویلیام گیلبرت (Gilbert, 1603-1540) صورت گرفت و مشخص شد که میدان مغناطیسی زمین هم‌ارز یک مغناطیس ماندگار (آهن‌ربا) است و در راستای تقریبی شمالی–جنوبی در نزدیکی محور چرخشی زمین قرار دارد. ویژگی‌های میدان مغناطیسی زمین از زمان گیلبرت موردمطالعه قرارگرفته بود اما در سال ۱۸۴۳ فن‌ورده (Von Wrede) برای اولین بار تغییرات میدان را برای تعیین محل کانسارهای مغناطیسی بکار برد. در سال‌های اخیر پیشرفته‌های قابل‌توجهی درزمینه‌ی ساخت دستگاه‌ها و تفسیر داده‌های قدیمی‌ترین روش ژئوفیزیکی پدید آمده است که علاوه بر باستان‌شناسی برای تعیین محل کانی‌های پنهان و ساختارهای مربوط به نهشته‌های نفت و گاز نیز بکار می‌رود (Telford et al., 1990, p. 62). هزینه کم و سرعت بالا در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی باعث شده است تا این روش به‌خصوص در پروژه‌های در سطح وسیع استفاده شود. مغناطیدگی ناشی از یک خاصیت ذاتی مواد به نام خودپذیری مغناطیسی است که به عوامل و شرایط مختلفی بستگی دارد.

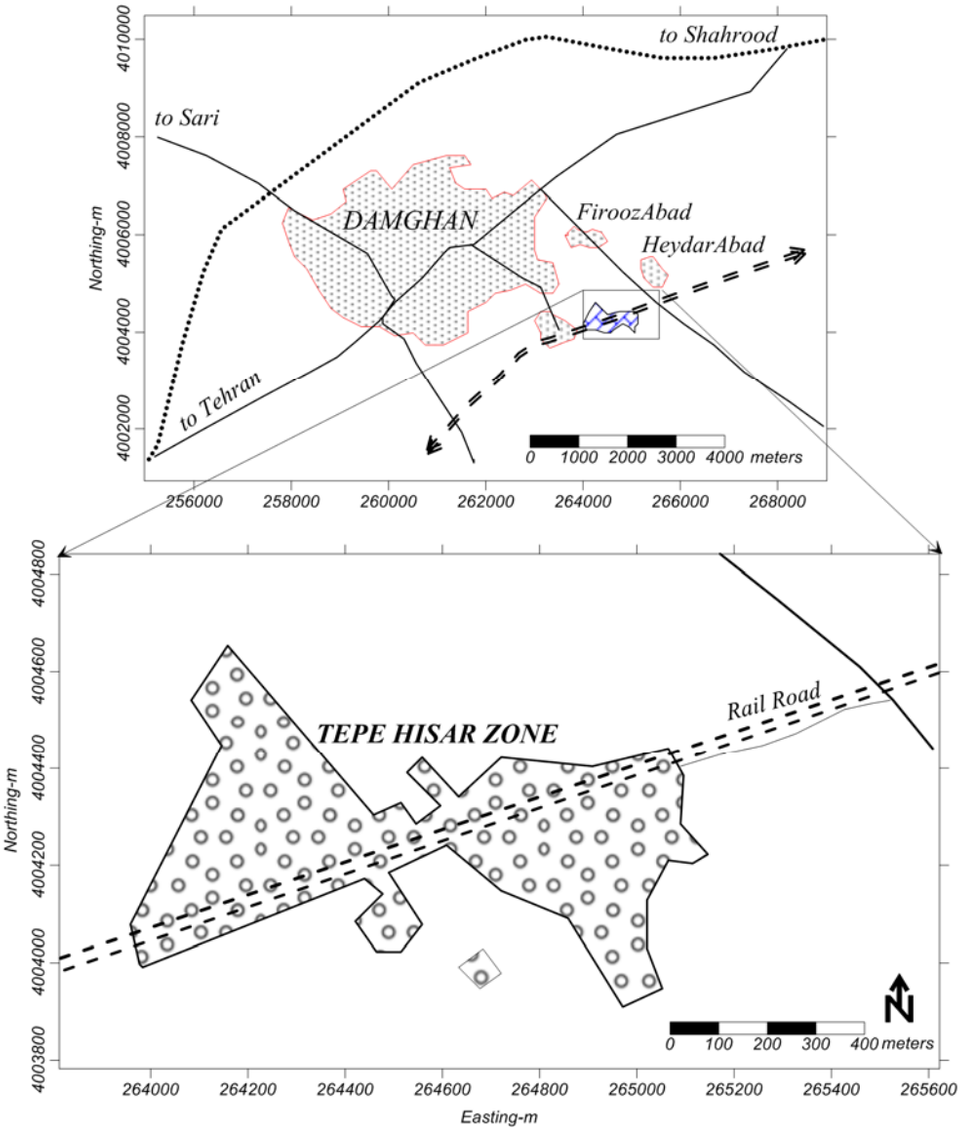
سابقه استفاده از مغناطیس‌سنجی در باستان‌شناسی به دهه ۵۰ و ۶۰ قرن گذشته میلادی برمی‌گردد که به عنوان نمونه می‌توان به مطالعه آیتکن اشاره کرد (Aitken, 1959). با تکامل مغناطیس‌سنج‌ها این فرآیند سرعت بیشتری یافت، به‌گونه‌ای که مدت‌زمان کمتری کاوش مساحت بیشتری از یک محوطه ممکن گشته است (Alldred, 1964). همچنین تیت و مولینز (Tite & Mullins, 1971) نشان دادند که به کمک روش مغناطیس‌سنجی می‌توان آثار قدیمی و باستانی معماری زیرزمینی را شناسایی کرد. هسه و همکاران (Hesse et al., 1997) از روش‌های مغناطیسی و مقاومت ویژه الکتریکی با قدرت تفکیک مکانی زیاد برای بررسی سایت باستانی لوما آلتای مکزیک استفاده کردند. در دو دهه اخیر به‌واسطه تکامل فیلترها، روش‌های پردازشی و امکان متعادل‌سازی آنومالی‌ها با دامنه‌های بزرگ و کوچک، استفاده از روش مغناطیس‌سنجی در باستان‌شناسی افزایش‌یافته است که ویژگی آن ترکیبی از قدرت تفکیک فضایی بالا و پوشش گسترده منطقه است (Gaffney et al., 2000).

در ایران نیز از سال ۱۳۵۳ تاکنون محوطه‌های بسیار زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها دشت تخت جمشید، پاسارگاد و دیوار بزرگ گرگان، دهانه غلامان و شهر سوخته می‌توان نام برد. برای نمونه می‌توان به موارد کاربرد روش مغناطیس‌سنجی در شناسایی محوطه باستانی چغازنبیل به جهت وجود خاصیت مغناطیسی باقی‌مانده حرارتی در بقایای سازه‌های آجری (Aminpour, 2001)، بررسی‌های باستان‌ژئوفیزیکی (آرکئوژئوفیزیک) در پیرامون تختگاه تخت جمشید (Mohammadkhani, 2004) اشاره کرد.

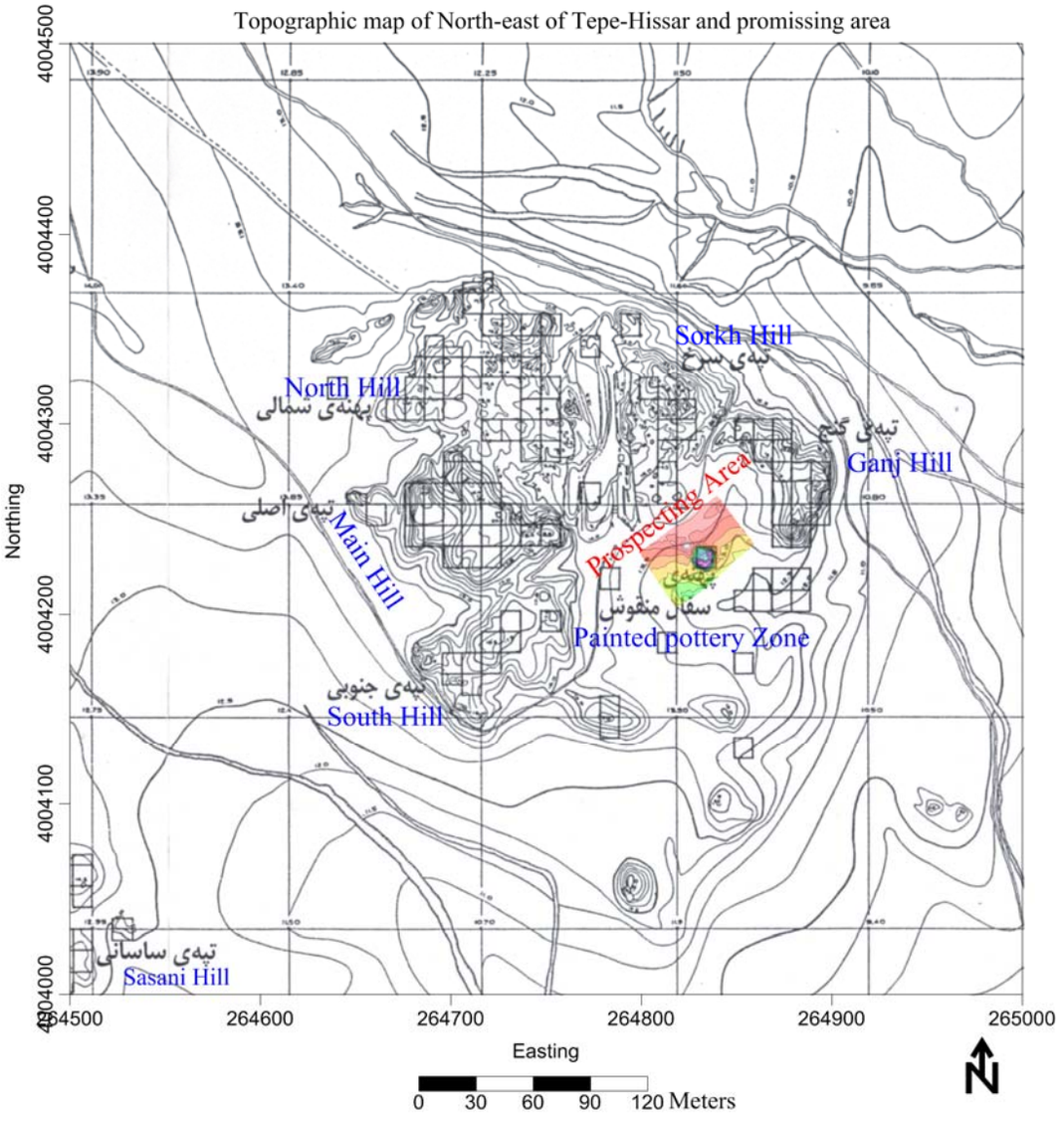
۳. معرفی منطقه و دستگاه‌ها و روش‌های استفاده شده

محوطه باستانی تپه حصار (Teppe-Hissar) در جنوب شرقی شهر دامغان (Damghan) در استان سمنان با وسعت بیش از ۱۸ هکتار قرار دارد (شکل۱–Fig. 1). این محوطه ابتدا توسط اریخ اشمیت (Erich Schmidt) از دانشگاه پنسیلوانیا در طی سال‌های ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲

میلادی مورد کاوش‌های باستان‌شناسی قرار گرفت (Roustaei, 2010). در این کاوش‌ها آثار ارزنده‌ای متعلق به هزاره‌های ۵ تا ۲ ق.م آشکار شد (شکل۲-Fig. 2). در نتیجه این کاوش‌ها مشخص شد که این تپه باستانی دارای سه دوره اصلی فرهنگی از اواخر نوسنگی (Neolithic) تا پایان عصر مفرغ (Bronze age) است. این محوطه پس از این کاوش به‌عنوان یکی از محوطه‌های کلیدی برای شناسایی فرهنگ های همزمان در فلات مرکزی ایران مورد استناد باستان شناسان قرارگرفته 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 گل نبشته ها به حدود ۲ هزار سال پیش از میلاد برمی گردد که شاهد بسیار خوبی بر وجود مبادلات تجاری/فرهنگی بین تمدن‌های بین‌النهرین و فلات ایران بوده است. آخرین فصل کاوش



شکل ۱: موقعیت محوطه‌ی باستانی تپه حصار و شهر دامغان و راههای دسترسی به آن
Fig. 1: Location of archaeological site of Tepe Hissar in Damghan and the access road



شکل ۲: نقشه توپوگرافی محوطه تپه حصار دامغان، محدوده‌های کاوش شده به‌صورت مربع‌های کوچک دیده می‌شود.

Fig. 2: Tepe Hissar (Damghan) topographic map and gravity surveying area, the main areas of excavated are shown in squares (After Schmidt, 1937; Roustaei, 2010 p. 53).

در تپه حصار توسط هیئتی باستان‌شناسی به سرپرستی کوروش روستایی (Roustaei, 2010) 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 لایه های تپه حصار به اواخر هزاره پنجم قبل از میلاد بازمی گردد و استقرار در آن تا حدود ۱۷۰۰ پیش از میلاد به‌طور پیوسته ادامه داشته و پس از آن هیچ‌گاه مورد سکونت قرار نگرفته است (Roustaei, 2010 p. 23-27؛ تابلوی ورودی تپه حصار). در این محوطه باستانی چندین کار تحقیق در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد انجام شده است. همچنین در کار پژوهشی احمدپور و همکاران (Ahmadpour et al., 2017) جهت بررسی وضعیت ساختارهای زیرسطحی در محدوده از مدلسازی مستقیم و معکوس داده‌های رادار نفوذی به زمین استفاده کردند.

گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی دو روش در ژئوفیزیک هستند که به خاطر نداشتن آثار مخرب

محیطی می‌توانند در باستان‌شناسی کاربردهای زیادی داشته باشند. هرکدام از این روش‌ها بدون کاوش اطلاعات مفیدی از منطقه به‌دست می‌دهد. همچنین فیلترهای بنیان شده بر روی مشتق‌گیری از داده‌ها، فیلترهای فاز محلی (Local phase)، در داده‌های گرانی و مغناطیسی معمولاً به عنوان یک ابزار در مراحل تفسیر داده‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. این فیلترها روابط ریاضی هستند که با ترکیب مشتق داده‌ها در راستای محورهای مختصات لبه‌های آنومالی‌ها را بارزتر کرده و تفسیر داده‌ها آسان‌تر می‌کنند، بنابراین از آن‌ها می‌توان در آشکارسازی لبه‌ها و تعیین مرز ساختاری استفاده نمود که اینجا از فیلتر تیلت (Tilt) یا زاویه تمایل (Miller & Singh, 1994) به‌عنوان یک فیلتر متداول آشکارساز لبه (Edge detection) استفاده شده است.

برای جمع‌آوری داده‌های گرانی از دستگاه گرانی‌سنج CG5 (ساخت شرکت سینترکس کانادا) با دقت یک هزارم میلی‌گال استفاده شده است و برای جمع‌آوری داده‌های مغناطیس‌سنجی از دستگاه مگنتومتر پروتون ساخت شرکت ژئوماتریکس با دقت یک نانوتسلا استفاده شده است.

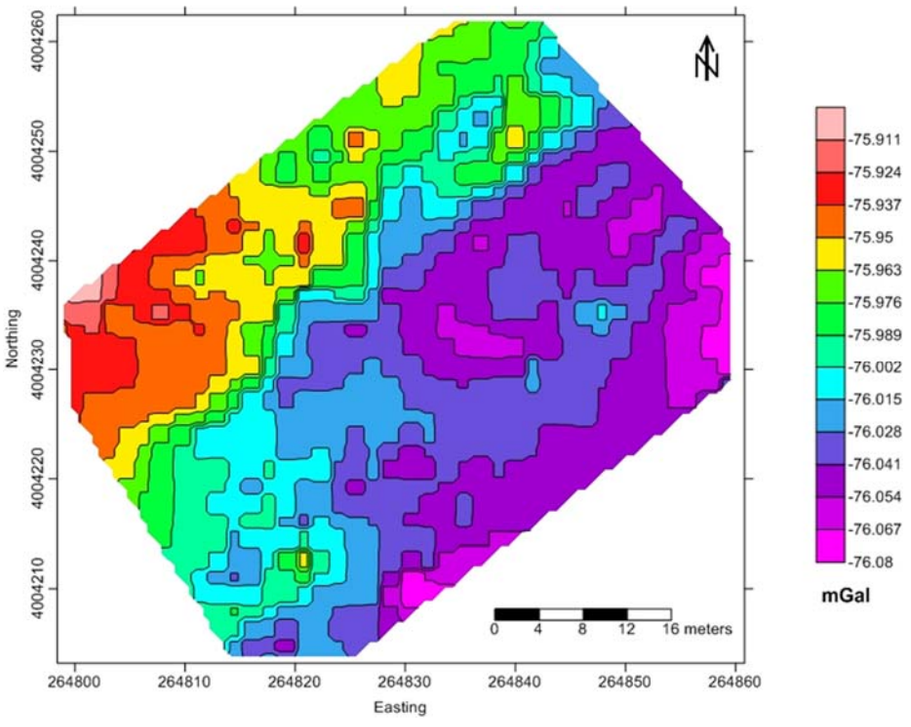
۴. داده‌های گرانی‌سنجی و بحث درباره نتایج آن

گرانی‌سنجی روشی مفید و کارایی در مطالعه اهداف اکتشافی می‌باشند. روش گرانی‌سنجی بر مبنای اختلاف چگالی توده‌ی مورد مطالعه و محیط دربرگیرنده آن استوار است، که به‌منظور تعیین و تخمین چگالی، عمق دفن، شکل و تعیین حفرات زیرزمینی بکار می‌رود. در این میان، میکروگرانی به‌واسطه‌ی فاصله کم برداشت نقاط و دقت بیشتر آن به مطالعه آثار سطحی و کم‌عمق می‌پردازد. به‌کارگیری گرانی‌سنج‌های پیشرفته و دقیق و ایجاد روش‌های پردازشی و تفسیری جدید برای داده‌های گرانی‌سنجی، باعث شده تا رویکرد استفاده از گرانی‌سنجی در عملیات باستان‌شناسی تغییریافته و افزایش چشمگیری در دنیا پیدا کند. در این شاخه با توجه به نوع کار از روش میکروگرانی‌سنجی به‌عنوان یک ابزار مؤثر در تحلیل غیریکنواختی زیرسطحی در پدیده‌های مختلف استفاده می‌شود.

آنومالی محلی به‌دست‌آمده در باستان‌شناسی نشان‌دهنده آثار دیواره‌ها و حفره‌ها و یا بسته به منطقه می‌تواند محل آرامگاه‌های مدفون و یا پی دیواره‌های سنگی قدیمی باشد. برای برداشت داده‌های گرانی قسمتی از تپه حصار یعنی محدوده‌ی پهنه سفال منقوش با وسعتی در حدود ۵۰×۳۵m انتخاب شد و روی هر ۱۳ پروفیل (Profile) با فاصله ۱m داده‌ها برداشت شد. فاصله پروفیل‌ها در این برداشت که در راستای تقریبی جنوب غربی- شمال شرقی است ۳m در نظر گرفته شد. این فاصله شبکه‌بندی با توجه به ابعاد دیواره‌ها و اتاقک‌هایی که در گمانه‌های حفاری شده در منطقه وجود داشت انتخاب شده است. در کل شبکه‌ای با بیش از ۶۵۰ نقطه ایستگاهی برای میکروگرانی‌سنجی طراحی شد. پس از برداشت داده‌های گرانی، پایگاه داده‌ای لازم که شامل مختصات نقاط برداشت، ارتفاع نقاط، مقدار گرانی و زمان برداشت داده‌ها تنظیم و در یک فایل داده‌ای در نرم‌افزار Exel ذخیره گردید. کلیه تصحیحات مورد نیاز برای حذف آثار سطحی و نوفه‌ها و انجام و در نتیجه نقشه آنومالی بوگه تهیه گردید (شکل۳-Fig. 3).

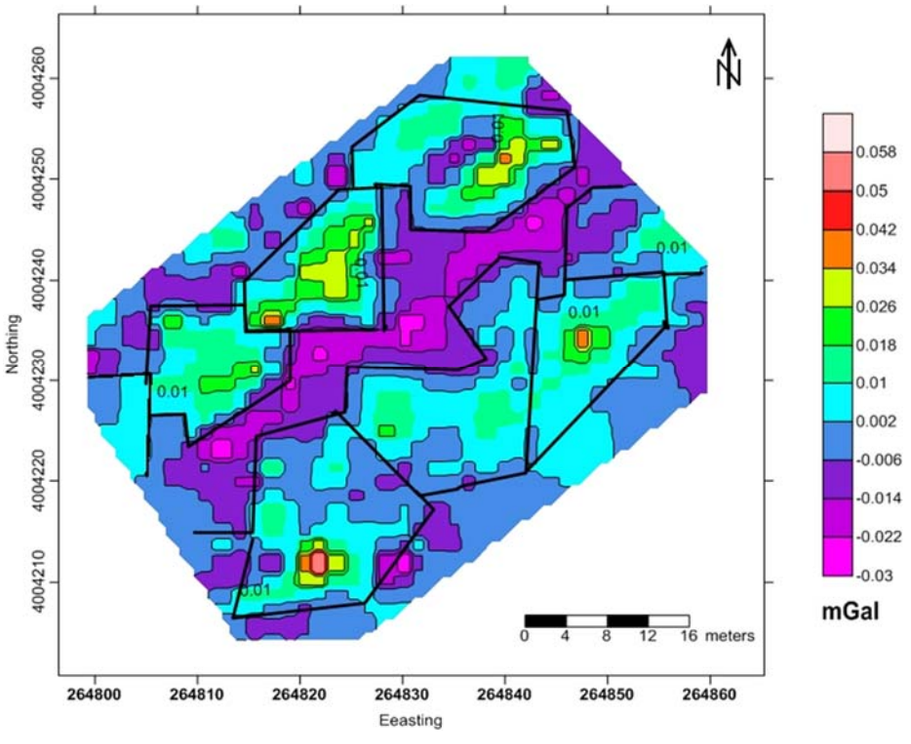
همان‌گونه که ذکر شد، این نقشه شامل اطلاعات ساختارهای عمیق و سطحی بوده و برای تفکیک این دو از هم و شناسایی آنومالی که ناشی از دیواره‌ها و اتاقک‌ها هست، از روش‌های مختلفی مثل روش روند سطحی، گسترش میدان گرانی و مشتقات میدان استفاده گردید، در نتیجه نقشه آنومالی‌های محلی (باقیمانده) که بیان‌کننده‌ی وضعیت آثار باستانی تهیه گردید (شکل ۴- Fig. 4).

با توجه به اینکه در محدوده باستانی تپه حصار دیواره‌ها از تراکم و چگالی بالا و اتاقک‌ها نسبت به محیط اطراف به‌وسیله‌ی موادی با چگالی کم‌تر پر شده است، لذا محل آنومالی‌های مثبت (قرمز) و آنومالی‌های منفی (آبی) می‌تواند مشخص‌کننده این پدیده‌ها باشد. بر اساس این نقشه می‌توان گفت که یک معبر یا گذرگاه (کوچه) با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی در وسط محدوده وجود دارد که دو بخش مسکونی را از هم تفکیک نموده است. ابعاد محوطه یا سازه‌های زیرسطحی همانند بخش‌های کاوش شده قابل بررسی و پیگیری است. به منظور بررسی بیشتر این موضوع از فیلتر مشتقات قائم و افقی به‌صورت هم‌زمان در قالب فیلتر زاویه تمایل استفاده گردید (شکل ۵-Fig. 5).



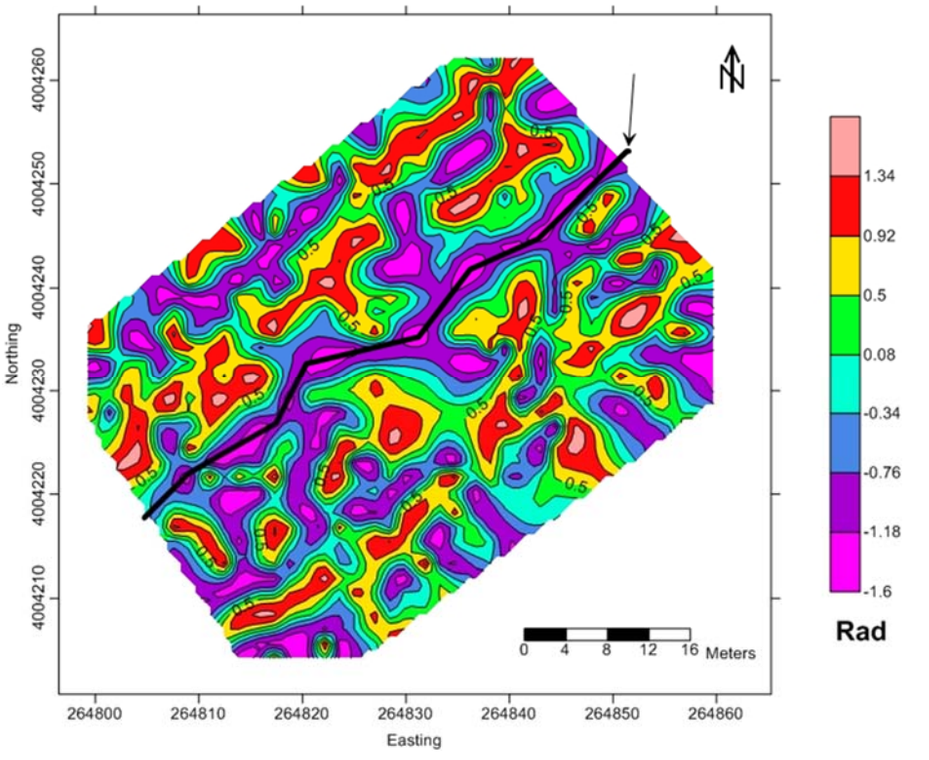
شکل ۳: بی‌هنجاری گرانی بوگه محدوده مورد مطالعه

Fig. 3: Bouguer gravity anomalies on the study area



شکل ۴: بی‌هنجاری گرانی باقیمانده از روند سطح مرتبه هفت محدوده مورد مطالعه

Fig. 4: Residual gravity anomaly from 7th order trend surface method on the study area



شکل ۵: نقشه اعمال فیلتر زاویه تمایل روی بی‌هنجاری گرانی محدوده مورد مطالعه
Fig. 5: Tilt angle map of gravity data covering study area, Tepe Hissar

مطابق این شکل آثار دیواره‌ها و اتاقک‌ها با وضوح بهتری به تصویر کشیده شده است. با توجه به اینکه مرز تغییرات به‌وسیله‌ی این فیلتر بهتر آشکار می‌شود، بنابراین از این روش برای تفکیک ساختارهای زیرسطحی استفاده شد. مقایسه این شکل با شکل قبلی نشان می‌دهد که این فیلتر توانسته نقش موثری در تفکیک دیواره‌ها از هم داشته باشد و کوچه مذکور در این شکل بهتر دیده می‌شود. این کوچه در برخی قسمت‌ها پهن و در قسمتی‌هایی هم باریک است مشابه آن را در بعضی روستاهای امروزی مشرق زمین می‌توان مشاهده کرد (Roustaei, 2010, p. 67). با مقایسه نتایج حاصل از عملیات گرانی‌سنجی (بدون تخریب و حفاری) با نتایج به‌جای مانده از کاوش‌ها (که در اثر عوامل طبیعی و جوی تا حدود زیادی تخریب شده و دیواره‌ها از بین رفته‌اند) می‌توان گفت که این روش تا حد زیادی توانسته است ساختارهای زیرسطحی را نشان دهد. به این ترتیب می‌توان از روش گرانی‌سنجی برای این‌گونه اکتشافات بهره مناسب را برد.

۵. داده‌های مغناطیس‌سنجی و بحث درباره نتایج آن

با توجه به مغناطیدگی و تباین مناسب این ویژگی بین ساختارهای زیرسطحی در محوطه‌های باستانی از این روش می‌توان در شناسایی مناطق باستانی استفاده کرد. مغناطیدگی می‌تواند در مواد باستانی مثل کوره‌ها، تنورها، کف اتاق‌ها، آشپزخانه‌ها، سفالینه‌ها، خشت‌ها و حتی خاک هوازده ایجاد شود.

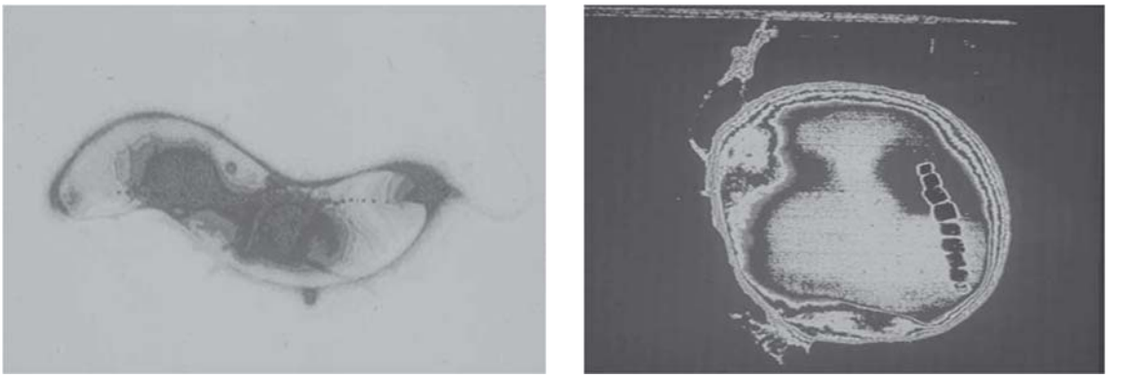
به‌طور کلی نتایج بررسی‌های مغناطیسی در مناطق باستانی به دلیل تغییر مغناطیدگی در محیط اولاً در اثر وجود فعالیت‌های بشری، اجسام فلزی مصنوعی و همچنین مصالح ساختمانی در یک محوطه باستانی می‌تواند به وجود آید. ثانیاً افزون بر این به دلایل طبیعی نیز این اتفاق صورت می‌گیرد (Hesse et al., 1997; Gaffney et al., 2000; Linford, 2006). به‌عنوان مثال به خاطر افزایش ترکیبات آهن‌دار، به ویژه اثرات اکسید شدن فلزات و اثرات دوره‌ای مرطوب و خشک شدن خاک، خاک سطحی در مقایسه با خاکی که در عمق

بیشتر قرار می‌گیرد مغناطیدگی بیشتری دارد، لذا جابجایی خاک موجود در گورها و اتاقک‌های یک محوطه باستانی باعث آشفتگی در مغناطیدگی منطقه می‌شود. همچنین اثرات آتش (گرما) بر روی خاک مثلاً در کوره‌ها به‌طور چشم‌گیری باعث افزایش مغناطیدگی می‌شود. هنگامی‌که ماده آلی در ۲۰۰°C در خاک می‌سوزد، شرایطی را ایجاد می‌کند که سبب تبدیل هماتیت به مگنتیت می‌شود. واسطه‌های میکروبی و پوسیدگی‌های ارگانیک نیز می‌توانند عامل مغناطیدگی در یک محوطه باستانی باشند. در این شیوه باکتری شرایط تبدیل را به وجود می‌آورد. به‌گونه‌ای مشابه فاسبیندر و همکاران (Fassbinder et al., 1990) یک باکتری مغناطیسی را کشف کردند که نوع خاصی از باکتری است که بلورهای مغناطیسی کوچک از اکسید آهن در خاک به وجود می‌آورد (شکل ۶–Fig. 6). این عمل به‌صورت ویژه در پوسیدن چوب صورت می‌گیرد (Clark, 2003, p. 99-101 ; Aspinall et al., 2008, p. 23-26).

برای خشت‌های رسی که معمولاً پس از حرارت دیدن انتقال پیدا کرده‌اند و سپس در سازه‌ها قرار داده‌شده‌اند، آرایش حوزه‌های مغناطیسی خشت‌ها در کنار هم بعد از جابجایی اغلب متفاوت است یعنی ممکن است خشت‌ها در حین جابجایی چرخیده باشند و دیگر حوزه‌های یک خشت نسبت به خشت کناری هم‌جهت نباشد، لذا مغناطیدگی ترکیب‌شده ساختمان‌ها به اندازه آنومالی کوره‌ها و سطوح آشپزخانه‌ها قوی نیست (Bevan, 1994, p. 96-98; Hessa et al., 1997, p. 63).

آنومالی‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده در سطح، تباین بین پدیده‌های باستانی 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 اما دیوارها یا پی دیواره‌های سنگ مرمر به‌خوبی قابل شناسایی نیست. در مورد خاک با اکسید آهن زیاد تباین خودپذیری مغناطیسی بین جسم آنومال و محیط معمولاً اطلاعاتی درباره نوع ماده‌ای که آنومالی را تولید کرده آشکار نمی‌کند و به عنوان مثال در این‌گونه محیط‌ها دیوار خشتی قابل شناسایی نیست ولی در عوض دیوارها یا پی دیواره‌های سنگ مرمر به‌خوبی قابل شناسایی است.

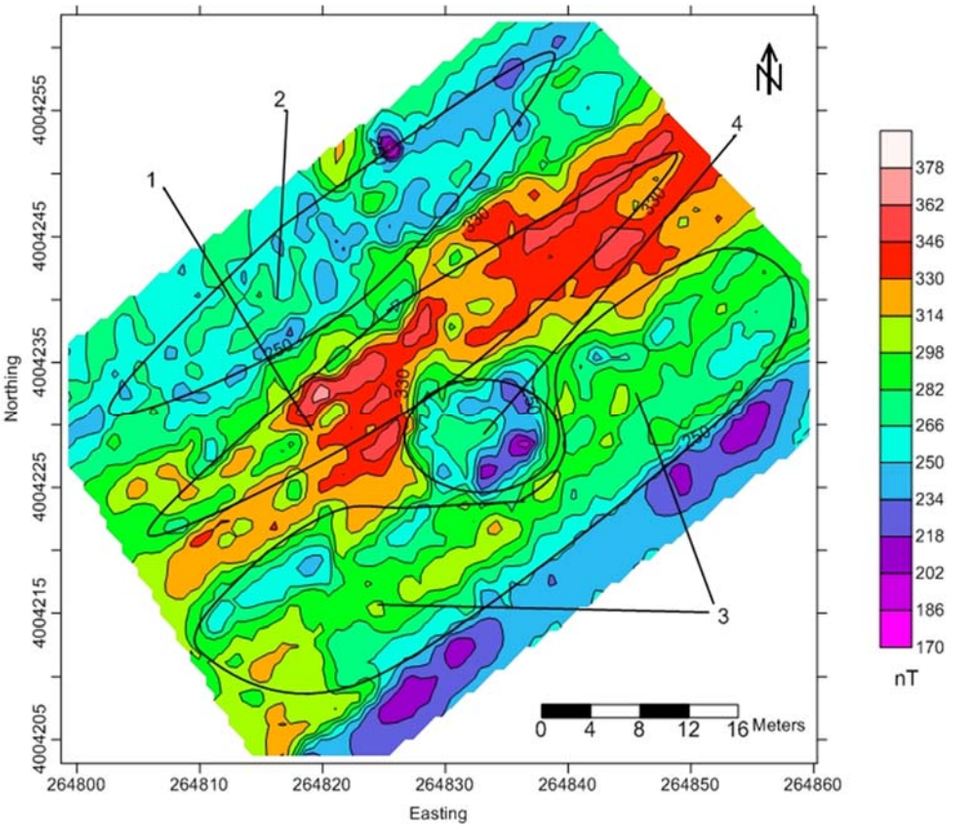
در داده‌های مغناطیسی تباین مثبت عموماً در مناطقی دیده می‌شود که گودال یا عارضه‌ای در خاک سطحی حفرشده باشد. این سبب به هم خوردن خاک شده و باعث افزایش خودپذیری (Susceptibility) مغناطیسی می‌شود که قابلیت ذاتی مغناطیدگی مواد است (Linford, 2006, p. 2224). آنومالی‌های منفی نیز می‌توانند بدین گونه به وجود آمده باشند؛ گودال با ماده‌ای پرشده باشد که خودپذیری کمتری نسبت به خاک اطراف را دارد. این اغلب در پی و دیوارها به وجود می‌آید که خودپذیری کمتری دارند، مثلاً اگر از جنس سنگ‌آهک باشند. یا جایی که گودال‌ها در یک خاک با مغناطیدگی بالا حفرشده باشند و با موادی با خودپذیری پائین پرشده باشند.



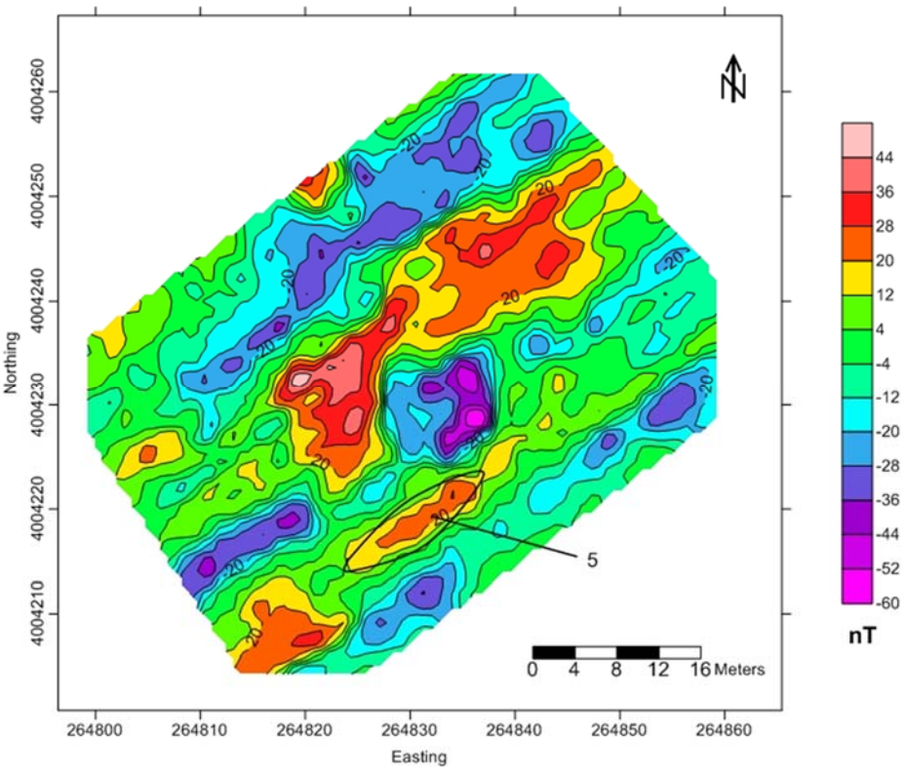
شکل۶: تولید بلورهای ریزساختار مغناطیسی به وسیله باکتری مغناطیسی
Fig. 6: Magnetic Microstructure crystals which is built by means of Magnetotactic Bacteria (Fassbinder et al, 1990 p.162)

داده‌های مغناطیسی نیز در یک شبکه‌ی منظم در امتداد شمال شرق- جنوب غرب برداشت گردید. برای داده‌برداری مغناطیس‌سنجی از شبکه‌ای منطبق با شبکه گرانی‌سنجی با فاصله‌ی نقاط برداشت ۱m و پروفیل ۱/۵m استفاده شد که به ۲۵ پروفیل با تقریباً ۵۲ ایستگاه روی هر پروفیل منتج شد. این فاصله شبکه‌بندی با توجه به ابعاد دیواره‌ها و اتاقک‌هایی که در گمانه‌های حفاری‌شده در منطقه وجود داشت انتخاب شد. در کل شبکه‌ای با بیش از ۱۳۰۰ ایستگاه مغناطیس‌سنجی برای داده‌برداری طراحی شد. پس از برداشت داده‌ها و انجام تصحیحات روزانه و تصحیح IGRF (International Geomagnetic Reference Field) که اثر کلی میدان مغناطیسی زمین را شامل می‌شود آنومالی مغناطیسی حاصل می‌شود. تصحیح روزانه نیز برای حذف تغییرات آنی در میدان مغناطیسی زمین است. با توجه به اینکه میدان مغناطیسی زمین (یا داده‌های برداشت شده‌ی ناشی از آن) حالت دوقطبی دارد، لذا محل آنومالی‌ها روی نقشه دقیقاً بر روی اجسام یا ساختارهای مسببشان نبوده و لازم است این حالت اصلاح شود که برای انجام این کار اصطلاحاً عمل تبدیل به قطب (Reduce to magnetic pole یا به اختصار RTP) صورت می‌پذیرد. شدت میدان مغناطیسی حاصل پس از تبدیل به قطب مغناطیسی معرف مغناطیدگی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۷- Fig. 7). البته شامل دو مؤلفه ناحیه‌ای و محلی است که باید تفکیک شود (شکل ۸- Fig. 8).

همچنین همانند روش گرانی‌سنجی از فیلتر فازی محلی زاویه تمایل برای شناسایی عمق و لبه‌ها استفاده شد تا بهترین نتیجه حاصل شود (شکل ۹- Fig. 9). در اینجا نیز همانند گرانی‌سنجی، آنومالی محلی نشانگر مغناطیدگی ساختارهای هدف مورد اکتشاف است که بسته به نوع منطقه متفاوت است.

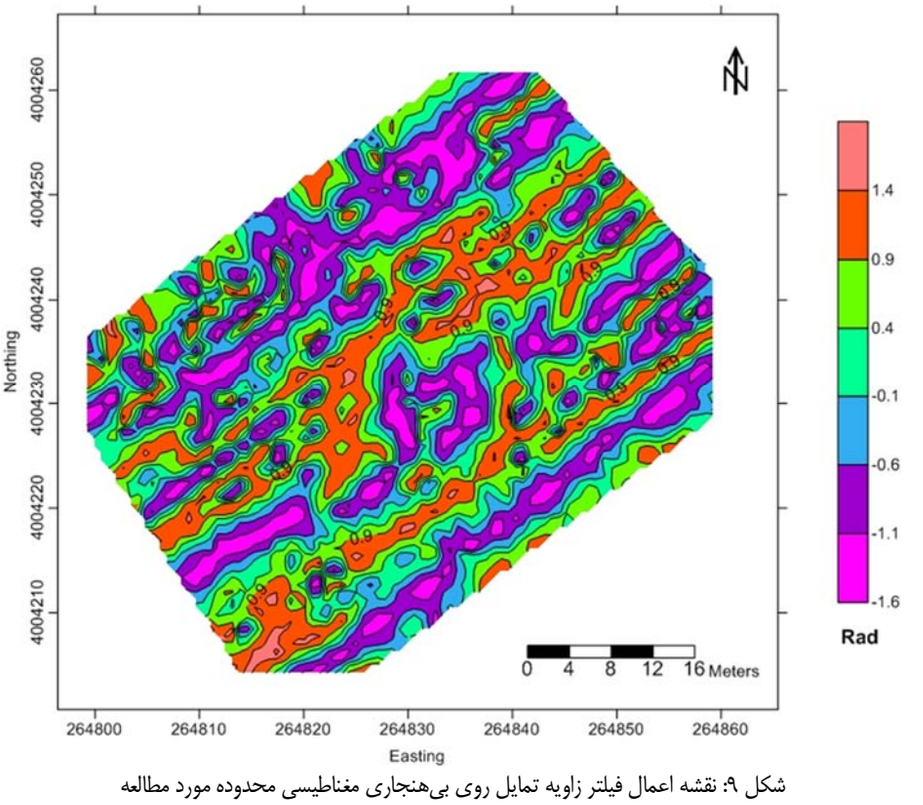


شکل ۷: بی‌هنجاری مغناطیسی تبدیل به قطب شده محدوده مورد مطالعه
Fig. 7: Reduction to pole of magnetic anomalies on the study area



شکل ۸: بی‌هنجاری مغناطیسی باقیمانده از روند سطح مرتبه شش محدوده مورد مطالعه

Fig. 8: Residual magnetic anomaly from 6th order trend surface method on the study area



شکل ۹: نقشه اعمال فیلتر زاویه تمایل روی بی‌هنجاری مغناطیسی محدوده مورد مطالعه

Fig. 9: Tilt angle map of magnetic data covering study area, Tepe Hissar

مغناطیدگی (Magnitization) بالای محوطه علاوه بر دلایل مطروحه باستان‌شناسی به دلیل وجود سنگ‌های پراکنده در سطح، نشانه‌های از وقوع یک آتش‌سوزی گسترده در این محوطه و باقی‌مانده‌هایی از کوره‌های ذوب فلز به‌خصوص مس که در محوطه گسترده شده، نیز هست. این سبب آشفتگی در مغناطیدگی محوطه شده است که کار را برای تفسیر داده‌ها مشکل‌تر کرده است. با این حال منطقه شماره ۱ در شکل ۷، 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 دیوارهای خشتی حرارت ندیده (خشت خام) نسبت داد؛ اما با وجود سرباره‌ها و اثرات آتش‌سوزی که در دیواره‌ی ضلع شمالی گمانه حفاری (منطقه شماره ۴) و همچنین شدت میدان کم در کف این گمانه حفاری که خود نشان از سطحی بودن مغناطیدگی در محیط دارد، می‌توان این نتیجه را بسیار محتمل دانست که منطقه مذکور یک گذرگاه یا کوچه باشد که با خاک‌های سطحی، سنگ‌های سطحی و خاکسترهای بجا مانده از آتش‌سوزی پرشده است.

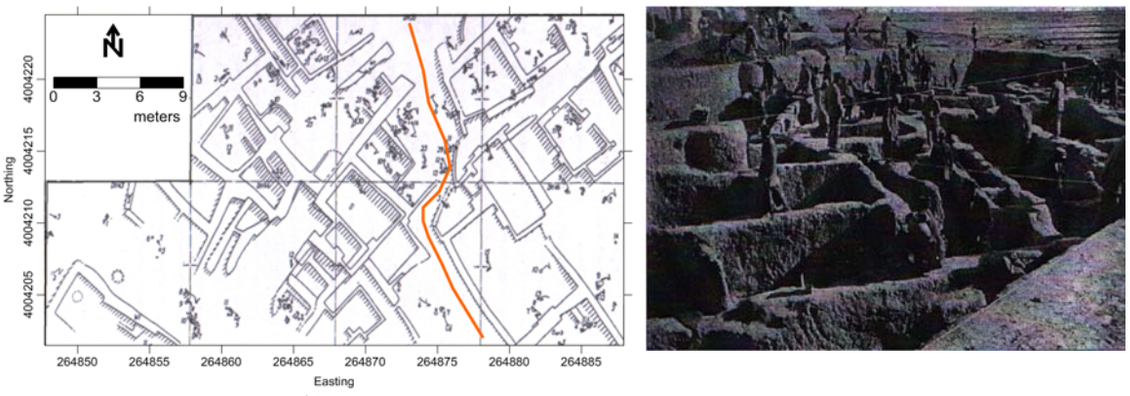
کوچه‌های باستانی با شکل هندسی نامنظم است که البته هنوز هم در روستاهای قدیمی و مخروبه مشابه آن دیده می‌شود. فرضیه کوچه بودن این منطقه وقتی محتمل‌تر می‌شود که مناطق ۲ و ۳ با یک مغناطیدگی متوسط که می‌توان بیشتر آن را ناشی از سازه‌های خشتی دانست در اطراف آن (منطقه ۱) مشاهده می‌شود. این خشت‌ها که در جای دیگر حرارت دیده‌اند و سپس در دیوار به‌کاررفته‌اند. منطقه شماره ۴ در نقشه شماره ۷ نشان‌گر محدوده‌ی حفاری‌شده با ابعاد ۱۰×۱۰m است. در آن چند اتاقک وجود دارد که در عملیات گرانی‌سنجی بنا به دلایلی امکان برداشت وجود نداشت اما در این روش کاملاً شناسایی شده است. در درون (کف) این قسمت شدت میدان مغناطیسی کم است و این نشان می‌دهد که این مغناطیدگی بالا در این محوطه سطحی است و تقریباً مربوط به ۳m روی سطح در کل محوطه است. شکل ۸ نیز نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده مرتبه ۶ را نشان می‌دهد. در رابطه با آنومالی مثبت منطقه 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 هست که این آنومالی مربوط به یک اجاق، تنور آشپزی و یا چیزی مشابه باشد که نمونه‌هایی از آن در کاوش‌های منطقه پیدا شده است. در مورد لبه‌های نقشه به دلیل اطلاعات و داده ناکافی نمی‌توان اظهارنظر نمود. شکل ۹ نیز نقشه فیلتر زاویه تیلت آنومالی است که برای شناسایی لبه‌ها مؤثرتر است و مؤید نقشه‌های قبلی است.

نتیجه بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که اطلاعات به‌دست آمده از گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی با نقشه‌های بجا مانده از کاوش‌های 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 کاوش 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 ۱۰– Fig. 10). این خصوصیات مربوط به لایه‌های سطحی در تپه حصار است که در زیر لایه‌ها هم تکرار می‌شود (Roustaei, 2010, p. 62-72). فاصله محدوده کاوش شده و محدوده برداشت در این تحقیق بسیار نزدیک بوده و از نظر زمانی، توالی لایه‌ها، نوع سفال، گورها و اشیای به‌دست 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 سمت راست در شکل ۱۰ب معرف یک کوچه باستانی است.

با تلفیق نتایج بالا می‌توان یک نمای کلی از وضعیت منطقه موردمطالعه 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 موردنظر است که احتمالاً دو راهرو در این بخش باستانی تپه حصار بوده و در بخش میانی تپه سرخ و تپه گنج به هم مرتبط می‌شده‌اند (شکل ۱۱–Fig. 11).

۶. نتیجه‌گیری

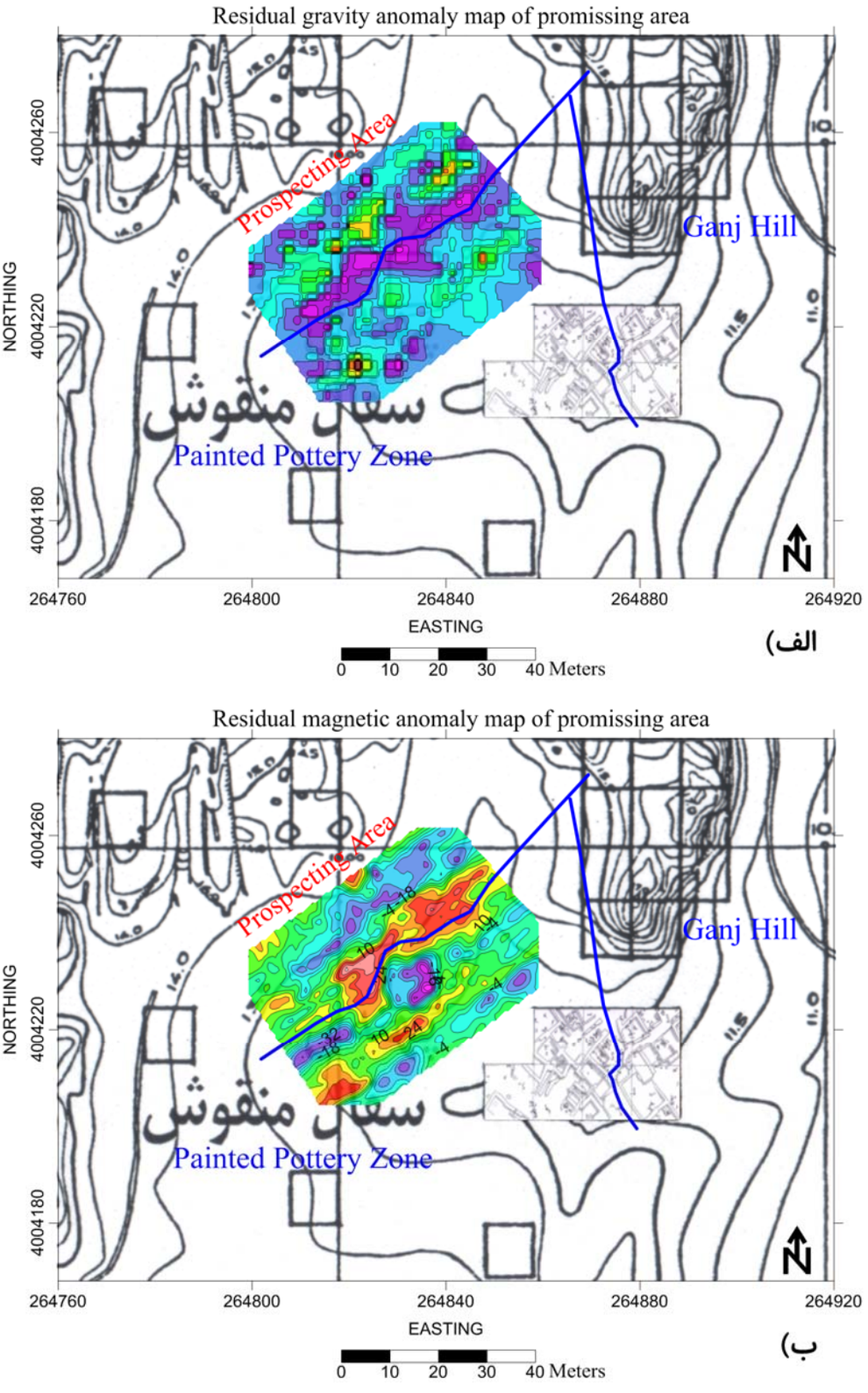
آثار و جاذبه‌های تاریخی به عنوان نماد و فرهنگ ملی و قومی اهمیت فراوانی داشته و حفظ و مرمت آن‌ها حائز



شکل ۱۰: a) کاوش باستانی شناسی در تپه حصار دامغان (۱۹۳۰)، b) پلان معماری لایه سطحی محدوده مورد مطالعه
Fig. 10: a) Archaeological excavations in Tepe Hissar, Damghan (1930), b) the surface layer of the architectural plan in study area (Roustaei, 2010)

اهمیت است. شناسایی این‌گونه آثار در مناطق باستانی بدون تخریب و از بین بردن آثار گذشتگان از ویژگی‌های بی‌بدیل روش‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه میدان پتانسیل یعنی گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی است. اساس کار این دو روش به ترتیب بر مبنای اختلاف چگالی و تباین مغناطیدگی ساختار مورد مطالعه و محیط دربرگیرنده‌ی آن است. با توجه به این تفاوت‌ها از این دو روش برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی ساخته دست بشر در محدوده باستانی تپه حصار دامغان در استان سمنان استفاده گردید. نتایج بررسی‌های انجام شده در این محدوده نشان می‌دهد که استفاده از این روش‌ها به‌خصوص در مکان‌هایی که امکان یا شرایط حفاری نباشد و یا به‌دست آوردن اطلاعات قبل از حفاری لازم باشد بسیار مفید است. نتایج بررسی ژئوفیزیکی در محوطه باستانی تپه حصار نشان می‌دهد که این محدوده از ساخت و سازهای پیچ‌درپیچ برخوردار بوده که به صورت یک شهرک باستانی با مجموعه خانه‌های مشخص و راهروهای باریک اما بدون هیچ طراحی قبلی بنا شده است. راهرو یا کوچه اصلی در این مجموعه در امتداد شمال شرق–جنوب غرب بوده است که به وضوح به وسیله نقشه آنومالی‌های گرانی و مغناطیس‌سنجی به دلیل تغییر در ماهیت مواد زیرسطحی در تپه حصار قابل مشاهده و پیگیری است.

مقایسه نتایج حفاری در این محوطه و نقشه‌های حاصل از آن با نقشه‌های حاصل از عملیات گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی انطباق مناسبی را نشان می‌دهد به این صورت که ابعاد اتاقک‌ها در کاوش‌های به دست آمده به‌صورت نقشه پلان موجود با نتایج روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی مطابقت داشته و مؤید آن است. با توجه به اینکه عملیات کاوش هزینه‌بر، وقت‌گیر و از همه مهم‌تر امکان آسیب‌رسانی به سازه‌های قدیمی در آن وجود دارد، با استفاده از نتایج بررسی‌های غیرمستقیم ژئوفیزیکی می‌توان یک پلان کلی برای کاوش‌های باستانی طراحی و اجرا نمود تا آثار زیرسطحی کمتر آسیب دیده و حفریات هدفمند باشند. علاوه بر موارد ذکر شده با مراجعه به نقشه آنومالی‌های گرانی و مغناطیس می‌توان گفت که در برخی نقاط به نظر می‌رسد اجسام بی‌هنجار بر روی هم سبب مخدوش شدن نتایج شده و در نتیجه سبب عدم تفکیک خوب ساختارها شده است. این نشان می‌دهد که محدوده موردنظر در طی چند دوره ساخت‌وساز داشته است. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، به منظور جستجو و کاوش بیشتر در محوطه مورد نظر پیشنهاد می‌شود که از این دو روش در سطح بیشتری استفاده شود. همچنین برای مطالعه مکان‌های باستانی در محدوده کوچک و ناشناخته ابتدا به‌وسیله‌ی روش‌های ژئوفیزیکی بسته به شرایط و وسعت منطقه، عملیات شناسایی اولیه انجام شود تا با صرف هزینه کمتر مناسب‌ترین نقاط برای حفاری تعیین شود.



شکل ۱۱: مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعات ژئوفیزیک با کاوش‌های انجام شده در تپه حصار در سال ۱۹۳۰
الف) گرانی‌سنجی، ب) مغناطیس‌سنجی

Fig. 11: Comparison of the results obtained from geophysical studies respect to excavations results on the Tepe Hissar in 1930, A) gravimetry, B) magnetometry

سپاسگزاری

در پایان شایسته است از همکاری و حمایت بی‌دریغ اداره میراث فرهنگی شهرستان دامغان به‌ویژه رئیس محترم اداره سرکار خانم داوودیان جهت اجرای این پروژه و نیز از مساعدت دانشگاه صنعتی شاهرود به دلیل در اختیار قرار دادن دستگاه‌های گرانی‌سنج و مغناطیس‌سنج صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. همچنین برای کلیه کسانی که ما را در اجرای این کار یاری دادند سلامتی و توفیق روزافزون از خداوند منان آرزومندیم.

References

Ahmadpour, A., Kamkar-Rouhani, A. and Ahmadi, R. (2017). Archaeological Exploration of Tappeh Hissar, Damghan Using Forward and Inverse Modeling of Ground-Penetrating Radar Data. *Journal of Research on Archaeometry, 2*(1), 1-16. [in Persian with English abstract].

Aitken, M. J. (1959). Magnetic prospecting: An interim assessment. *Antiquity, 33*(131), 205-208.

AliTajer, S., and Afshari Azad, S. (2013). Investigating the Role of Geomatics Engineering in the Applications of Cultural Heritage, Archeology and Architecture. *Journal of Archaeological Researches in Iran*, *5*, 169-195. [in Persian with English abstract].

Alldred, J. C. (1964). A fluxgate gradiometer for archaeological surveying. *Archaeometry, 7*(1), 14-19.

Aminpour, B. (2001). Application of Geophysics methods in archeology and an example of the implementation of the magnetic method in around of Chgharznbyl Temple. *Journal History: Ancient Research*, 8, 6-9. [in Persian].

Aspinall, A., Gaffney, C. F., & Schmidt, A. R. (2008). *Magnetometry for Archaeologists*. United Kingdom: AltaMira Pres.

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), 60-70.

Bevan, B. W. (1994). The magnetic anomaly of a brick foundation. *Archaeological Prospection, 1*(2), 93-104.

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), 153-166.

Castiello, G., Florio, G., Grimaldi, M., & Fedi, M. (2010). Enhanced methods for interpreting microgravity anomalies in urban areas. *first break, 28*(8).

Clark, O. A., & Clark, A. (2003). *Seeing beneath the soil: prospecting methods in archaeology*. Routledge.

Fassbinder, J. W., Stanjek, H., & Vali, H. (1990). Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature, 343*(6254), 161.

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), 81-99.

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), 53-67.

Linford, N. (2006). The application of geophysical methods to archaeological prospection. *Reports on progress in physics, 69*(7), 2205.

Linington, R. E. (1966). Test use of a gravimeter on Etruscan chamber tombs at Cerveteri. *Prospezioni Archeologiche, 1*, 37-41.

Miller, H. G., & Singh, V. (1994). Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics, 32*(2-3), 213-217.

Mohammadkhani, K. (2004). *Geophysical exploration methods in archeology case study, magnetometry in Takht-Jamshid and Pasargad* (Unpublished master's thesis). Tarbiat Modares University. [in Persian].

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), 237-254.

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, In P. Matthiae, F. Pinnock, L. Nigro and N. Marchetti (Eds.), *Wiesbaden: Harrasowitz Verlag*, 613-633.

Schmidt, E. F., & Kimball, F. (1937). *Excavations at Tepe Hissar, Damghan*. University Museum.

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), 147-160.

Telford, W. M., Geldart, L. P., and 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), 209-219.