نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال سیزدهم/ ویژه‌نامه فناوری‌های نوین در باستان‌شناسی نجات‌بخشی سدها/ پاییز ۱۴۰۵

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
13th Year/ Special Issue on Modern Technologies Applied in Rescue Archaeology for Dam Projects/
October 2026

لزوم استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات باستان‌شناسی طرح‌های عمرانی حوزه‌ی مدیریت منابع آبی

کورش محمدخانی*[۱]

چکیده

در این نوشتار به اهمیت استفاده از روش‌های نوین ژئوفیزیکی در مطالعات باستان‌شناسی پرداخته می‌شود. کاوش‌های باستان‌شناسی برای دستیابی به داده‌های علمی ضروری‌اند، اما معمولاً فرآیندی زمان‌بر، پرهزینه و همراه با تخریب لایه‌های باستانی هستند. از سوی دیگر، تعیین محل مناسب ترانشه‌های کاوش اهمیت زیادی دارد، زیرا انتخاب نادرست می‌تواند به اتلاف منابع و آسیب به محوطه منجر شود. به همین دلیل، بهره‌گیری از روش‌هایی که موجب کاهش هزینه، صرفه‌جویی در زمان و حفاظت بهتر از محوطه‌های باستانی شوند، ضروری است. روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی و به‌ویژه آرکئوژئوفیزیک، امکان شناسایی ناهنجاری‌ها و پدیدارهای باستانی زیرسطحی را در کوتاه‌ترین زمان ممکن فراهم می‌کنند. این موضوع، به‌ویژه در شرایط کنونی، با گسترش شهرنشینی و افزایش طرح‌های عمرانی، مانند ساخت سد، جاده و ساختمان‌سازی، اهمیت دوچندان دارد. با توجه به باستانی بودن سرزمین ایران و وجود آثار مدفون در بسیاری از مناطق، انجام مطالعات پیش از اجرای طرح‌های عمرانی، امری اجتناب‌ناپذیر است. روش‌های آرکئوژئوفیزیکی با افزایش سرعت و دقت مکان‌یابی، نقش مهمی در تسهیل مطالعات باستان‌شناسی دارند و امکان بررسی روزانه‌ی چندین هکتار از محوطه را فراهم می‌سازند. در این نوشتار، انواع این روش‌ها و نمونه‌هایی از کاربرد آن‌ها در باستان‌شناسی معرفی و بررسی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی

باستان‌شناسی، محوطه‌ی باستانی، آرکئوژئوفیزیک، بررسی‌های ژئوفیزیکی، مغناطیس‌سنجی

[۱]*دانشیار گروه باستان‌شناسی دانشگاه شهید بهشتی، K_mohammadkhani@sbu.ac.ir

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

مقدمه

مجموع بناهای تخت‌جمشید، پاسارگاد و شوش نمونه‌های قابل مشاهده از گذشته انسان را نشان می‌دهند. این بناها قسمت بسیار کوچکی از آثار گذشتگان است که بر روی زمین، باقی مانده و بقایای زیادی از آثار گذشتگان در زیر زمین مدفون هستند. از روزگاران گذشته، عتیقه‌جویان و باستان‌شناسان بسیاری، برای یافتن این آثار مدفون در تلاش هستند. اصولاً اطلاع از گذشته‌ی انسان، برای همگان جالب و در اختیار داشتن اشیاء و آثاری از گذشتگان هیجان‌انگیز است. در صورتیکه که حفظ و نگهداری این آثار بسیار مهم و ضروری است و بدست آوردن این آثار در لایه و در بافت باستان‌شناختی، بسیار مهم و با اهمیت است. امروزه، روش‌های بسیاری، باستان‌شناسان را در شناسایی و بدست آوردن و حفظ و نگهداری این آثار ارزشمند یاری می‌رساند: تکنیک‌هایی همچون عکاسی هوایی و روش‌های مطالعات سنجش از دور و به‌ویژه روش‌های بررسی ژئوفیزیکی که از دیرباز در مطالعه‌ی زمین و اکتشاف منابع معدنی استفاده می‌شده‌اند. در روزگار ما، علاوه بر فرسایش‌های طبیعی در محوطه‌ها و تپه‌های باستانی، تخریب‌های انسانی، رشد و توسعه‌ی شهری و فرایندهای کشاورزی نیز باعث تخریب روزافزون محوطه‌ها، تپه‌ها و بناهای باستانی و تاریخی شده است. بنابراین استفاده از روش‌های بررسی سریع غیر تهاجمی و غیر تخریبی در محوطه‌های باستانی افزایش یافته است. در این زمینه، روش‌های آرکئوژئوفیزیکی می‌تواند به باستان‌شناسان در شناسایی سریع محوطه‌های باستانی و مکان‌یابی پدیدارهای باستانی زیر سطحی کمک کند. منظور از بررسی‌های آرکئوژئوفیزیکی، استفاده از روش‌ها، تکنیک‌ها و دستگاه‌هایی، برای بررسی غیر تهاجمی زمین، جهت شناسایی و نشان دادن ویژگی‌های مواد مدفون در زیر سطح زمین است.

باستان‌شناسان اطلاعات و مواد پژوهشی مورد نیاز خود را با بررسی و کاوش در مکان‌های باستانی که انسان‌ها زمانی در آنها زندگی و کار می‌کرده‌اند، گردآوری می‌کنند (علیزاده[1]، ۱۳۸۰: ۵۵). کاوش‌های باستان‌شناسی، عمده‌ترین و مستقیم‌ترین روشی است که باستان‌شناسان برای بازسازی جوامع گذشته بکار می‌گیرند. اما کاوش باستان‌شناسی با تخریب همراه است. اینکار مسئولیت علمی و اخلاقی سنگینی به دوش باستان‌شناسان می‌گذارد که نادیده گرفتن آن، باعث زیان‌های جبران‌ناپذیری خواهد شد. چون هرگز نمی‌توان آنچه را که به وسیله‌ی ابزار کاوش، جابجا شده، دوباره به جای قبلی‌اش برگرداند (علیزاده، ۱۳۷۴: ۷). بررسی‌های باستان‌شناسی نیز، بطورکلی برای تعیین موقعیت مکان‌های باستانی و ویژگی‌های آنها انجام می‌گیرد. به معنای بسیار محدود، بررسی باستان‌شناسی بدین منظور انجام می‌شود تا اطلاعات کلی درباره‌ی تاریخ و تحول اسکان جوامع در مناطق گوناگون بدست آید، پیش از آنکه در آن مناطق، کاوش باستان‌شناسی که در واقع به معنای بازسازی آنها است، انجام‌گیرد (علیزاده ۱۳۷۴: ۲).

اصولاً کاوش در یک محوطه‌ی باستان‌شناختی، توسط نیروی انسانی انجام می‌شود. در این فعالیت مقادیر حجیمی خاک جابجا می‌گردد. حفاظت از ترانشه بعد از کاوش و همچنین محافظت از دست‌ساخت‌های بشری در پایان کاوش، هزینه‌های زیادی را می‌طلبد. با توجه به محدودیت بودجه، روش‌هایی که بتواند هزینه‌ها را پائین آورده و در کوتاه‌ترین زمان، به سئوالات باستان‌شناسان پاسخ داده و فرضیات آنها را تکمیل کند، بسیار حائز اهمیت است. از جمله روش‌هایی که می‌تواند به باستان‌شناسان در این زمینه کمک کند، روش‌های آرکئوژئوفیزیکی است. بررسی‌های ژئوفیزیکی، بسیار سریع و دقیق انجام می‌شوند و از طرفی غیر مخرب هستند و محوطه‌ها را مضطرب نمی‌کنند. همچنین همه محوطه‌های باستان‌شناختی را نمی‌توان کاوش نمود. گاهی اوقات، کاوش در یک محوطه، سال‌ها و دهه‌های زیادی را نیاز دارد و این امکان وجود دارد که عمر یک باستان‌شناس برای اتمام کاوش یک محوطه بطور کامل، پاسخگو نباشد. در حقیقت، ممکن است کاوش تمام یک محوطه غیر قابل اجرا باشد که در واقع، کاوش تمام محوطه هم درست نیست. اما با بکارگیری روش‌های ژئوفیزیکی در یک محوطه‌ی باستانی، می‌توان در مدت زمان کوتاهی، در حد چند هفته یا چند ماه، به نتایج مفیدی دست یافت، که این نتایج

[1] Alizadeh, A.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

می‌توانند در سرعت بخشیدن به مراحل بعدی (به عنوان مثال، تعیین اولویت محل کاوش) مثمر ثمر باشند (محمدخانی[1]، ۱۳۸۳). امروزه، توسعه‌های عمرانی در کشور ایران نیز باعث شده است که شاخه‌ی باستان‌شناسی نجات‌بخشی، بسیار مورد توجه قرار گیرد. ساخت سدها، جاده‌ها، توسعه‌ی خطوط لوله‌های فراوردهای نفتی و گازی و ساخت و سازهای شهری، باعث شده است که نیاز به پیوست فرهنگی و لزوم مطالعات باستان‌شناسی، قبل از اقدامات عمرانی، از اهمیت به سزایی برخوردار باشد. با توجه به آنکه مطالعات باستان‌شناسی، بسیار زمان‌بر است، لزوم استفاده از روش‌های نوین در مطالعات باستان‌شناسی، علاوه بر سرعت بخشیدن به روند پاسخگویی، در حفاظت از مواریث فرهنگی بسیار مثمر ثمر خواهد بود. اطمینان از وجود یا عدم وجود پدیدارهای باستانی در محل فعالیت‌های عمرانی، هم برای باستان‌شناسان و هم برای متولیان امور عمرانی بسیار حائز اهمیت است. روش‌های آرکئوژئوفیزیکی می‌تواند در زمینه مکان‌یابی و وجود یا عدم وجود پدیدارهای باستانی زیر سطحی کمک فراوانی نماید.

در یک محوطه‌ی باستانی، باستان‌شناس همواره در فکر انتخاب بهترین مکان برای کاوش است. با توجه به اینکه کاوش، امری زمان‌بر و پر هزینه است، این امر از اهمیت دو چندانی برخوردار است. این مهم، با تهیه‌ی نقشه‌ی پراکندگی تراکم سفال یا وجود بقایای معماری بر روی سطح صورت می‌گیرد. گاهی اوقات این انتخاب ترانشه برای کاوش، با اشتباه مواجه می‌گردد و هزینه و زمان زیادی را از بین می‌برد. بنابراین انتخاب گمانه و ترانشه برای کاوش، باید با دقت بسیار انجام شود. بررسی‌های آرکئوژئوفیزیک در این زمینه، به باستان‌شناسان کمک می‌کند تا با بیشترین دقت و در کمترین زمان، بهترین مکان‌ها را برای کاوش انتخاب نمایند.

با استفاده از روش های آرکئوژئوفیزیکی، می‌توان نتایج زیر را بدست آورد: شناسایی فضاهای خالی، مقبره‌ها، تونل‌ها و گالری‌های زیر سطحی، دیوارها، بقایای معماری، جاده‌ها و سنگفرش‌ها، اجاق‌ها، کوره‌های پخت سفال یا ذوب فلز و بطور کلی مکان‌های حرارت دیده، محل و عمق خندق‌ها، حفره‌ها و چاله‌ها و تعیین وضعیت کلی ساختار تپه‌های باستانی (محمدخانی، ۱۳۸۳).

اولین تلاش‌ها برای استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در باستان‌شناسی در دهه‌ی ۵۰ میلادی انجام شد (آیتکن[2]، ۱۹۵۸). توسعه‌ی فناوری، تغییرات در اولویت‌های باستان‌شناسی، قوانین حفاظت و در نهایت تغییر در برنامه‌های آموزش باستان‌شناسی، استفاده از این روش‌ها در باستان‌شناسی را رو به افزایش نهاد. امروزه در فعالیت‌های باستان‌شناسی در بیشتر کشورها، باستان‌شناسان بدون در دست داشتن نقشه‌های ژئوفیزیکی، اقدام به کاوش نمی‌کنند. در کشور ایران نیز اولین تلاش‌ها برای استفاده از روش‌های آرکئوژئوفیزیکی توسط آلبر هس[3]، ۲۰۱۰، از مرکز ملی پژوهش های علمی فرانسه در محوطه شوش و پس از آن، در فیروزآباد و بیشاپور انجام شد. پس از آن از سال ۱۳۷۸، باستان‌شناسان آلمانی با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی در محوطه‌ی اریسمان، مناطق ذوب فلز را شناسایی نمودند. در همین سال، استفاده از روش مغناطیس‌سنجی در محوطه‌ی پاسارگاد به سرپرستی رمی بوشارلا[4] آغاز شد (محمدخانی، ۱۳۸۳) که تا به امروز ادامه دارد. تاکنون در بیش از صد محوطه‌ی باستانی در ایران از روش‌های مختلف آرکئوژئوفیزیکی، استفاده شده است.

روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده در باستان‌شناسی

روش‌های ژئوفیزیکی، اصولاً در زمین‌شناسی و اکتشاف معدن برای کشف ذخایر و منابع معدنی و همچنین مطالعات زمین‌شناسی فعالیت‌های عمرانی یا مهندسی زمین‌شناسی استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی در بررسی‌های ژئوفیزیکی استفاده می‌شوند، همچون: روش‌های مغناطیسی، الکتریکی، ژئورادار، الکترومغناطیسی، الکترواستاتیکی، گرانی‌سنجی، رادیواکتیویته، لرزه‌نگاری، چاه نگاری و غیره. تمامی این روش‌ها در باستان‌شناسی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، ولی از این بین، روش‌های مغناطیسی، الکتریکی، الکترومغناطیسی، ژئورادار و الکترواستاتیکی، بیشتر از سایر موارد، جوابگو بوده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بنا بر

[1] Mohammadkhani, K.
[2] Aitken, M.J.
[3] Albert Hesse
[4] Rémy Boucharlat

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

شرایط محیطی، وضعیت توپوگرافی و نوع محوطه‌ی باستانی، می‌توان یکی از روش‌های مورد اشاره را انتخاب نمود. اما در باستان‌شناسی ایران، بررسی‌های مغناطیسی معمولاً در بیشتر محوطه‌های باستانی ایران پاسخگو بوده و به دلیل سرعت در انجام بررسی و تهیه نقشه‌ها، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بررسی مغناطیس‌سنجی

روش بررسی مغناطیسی بر اساس توانایی انواع مختلف ابزارها (مغناطیس‌سنج‌ها)، برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بسیار کوچک مرتبط با بقایای باستانی مدفون استوار هستند. به طور کلی، خندق‌ها، گودال‌ها، اجاق‌ها یا کوره‌ها می‌توانند مانند یک آهن‌ربای کوچک یا مجموعه‌ای از آهن‌رباها عمل کنند که اختلالات یا آنومالی‌ها/ ناهنجاری‌هایی در میدان مغناطیسی زمین ایجاد کنند. با تهیه‌ی نقشه از این تغییرات اندک، می‌توان طرح‌های دقیقی از محوطه‌ها تهیه نمود که مکان پدیدارهای مدفون را مشخص کنند. مغناطیس‌سنج‌ها به‌طور خاص برای شناسایی مواد و مکان‌های حرارت دیده، مثل کوره‌ها تنورها و اجاق‌ها، مناسب هستند. همچنین نسبت به ویژگی‌های منفی مانند خندق‌ها و چاله‌هایی که در زیر خاک ایجاد شده‌اند واکنش نشان می‌دهند. پایه‌ی بررسی‌های مغناطیسی، حضور اکسیدهای آهن با مغناطیس ضعیف در خاک است. بسته به حالت فیزیکی و

شیمیایی اکسیدهای آهن، مواد ممکن است مغناطیس‌پذیریِ ضعیف یا قوی از خود نشان دهند. دستگاه‌های مغناطیس‌سنج، دو نوع مغناطیس باقیمانده و مغناطیس القایی را اندازه‌گیری می‌کنند.

اول مغناطیس باقیمانده در اثر حرارت بوجود می‌آید. بعضی از مواد در اثر حرارت و سرد شدن در حضور میدان مغناطیسی زمین، یک خاصیت مغناطیسی دائمی و جهت‌دار را کسب می‌کنند. برای وقوع این پدیده، ماده باید ابتدا تا دمایی خاص، که به آن نقطه کوری[1] گفته می‌شود، گرم شود. این دما بسته به نوع کانی‌های موجود متفاوت است؛ برای مثال، نقطه‌ی کوری برای هماتیت برابر با ۶۷۵ درجه سانتی‌گراد و برای مگنتیت، ۵۶۵ درجه سانتی‌گراد است. وقتی ماده، از این دما عبور می‌کند، محتوای آهن موجود در خاک رس، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد؛ به‌عبارتی، مغناطیس‌زدایی شده و به‌طور کامل «پاک» می‌شود. در هنگام سرد شدن، ماده دوباره مغناطیسی می‌شود و یک ویژگی مغناطیسی جدید و دائمی را به‌دست می‌آورد که منطبق با جهت میدان مغناطیسی زمین در آن موقعیت خاص است. در واقع، کانی‌های مغناطیسی با میدان مغناطیسی زمین در زمان سرد شدن هم‌راستا می‌شوند و این ویژگی را مغناطیس‌مانده حرارتی[2] می‌نامند. این تغییر بنیادی در خواص مغناطیسی، معمولاً با تغییرات شیمیایی و فیزیکی قابل توجهی نیز همراه است. در باستان‌شناسی، پدیدارهایی مانند اجاق‌ها و کوره‌هایی که خاک رس آن‌ها در فرآیند پخت حرارت دیده است، از این مکانیزم پیروی می‌کنند. اهمیت این پدیده در آن است که سیگنالی قابل شناسایی و در بسیاری موارد مشخص و شاخص ایجاد می‌کند.

دوم قابلیت مغناطیسی/ پذیرندگی مغناطیسی[3] یک ماده است، به صورت میزانی تعریف می‌شود که در آن، ماده در هنگام قرار گرفتن در یک میدان مغناطیسی دچار مغناطیس القایی می‌شود. هر چه ماده مغناطیسی‌تر شود، گفته می‌شود که قابلیت مغناطیسی آن بیشتر است. نکته‌ی مهم این است که قابلیت مغناطیسی، یک ویژگی موقتی است و تنها در حضور میدان مغناطیسی قابل اندازه‌گیری است. با این حال، از آن‌جا که میدان مغناطیسی زمین همیشه فعال است، قابلیت مغناطیسی نیز به طور دائمی قابل اندازه‌گیری است. در نتیجه، یک دستگاه شناسایی غیرفعال (نظیر مغناطیس سنج) می‌تواند تغییرات در قابلیت مغناطیسی را اندازه‌گیری کند (اسکولار[4] و همکاران، ۱۹۹۰).

فعالیت‌های انسانی بطور کلی (از جمله استقرارهای انسانی و شیوه‌های دفع زباله) موجب افزایش قابلیت مغناطیسی خاک شده و تأثیر مستقیمی بر آشکارسازیِ ویژگی‌های مدفون

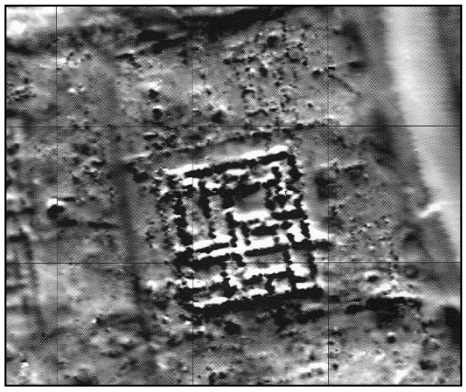
[1] Curie Point
[2] Thermoremanent magnetism
[3] Magnetic Susceptibility
[4] Scollar, I.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

دارند (تیت و مولینز[1]، ۱۹۷۱). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حتی سوختن در دماهای پایین – مانند آتش‌های موقت و کوتاه‌مدت در محل‌های استقرار – نیز می‌تواند افزایش قابل‌توجهی در قابلیت مغناطیسی خاک ایجاد کند (لینفورد و کانتی[2]، ۲۰۰۱). آنچه مسلم است، وجودِ تضاد مغناطیسی میان یک ساختار مدفون و خاک اطراف آن شرط اساسی برای شناسایی آن توسط مغناطیس‌سنج به شمار می‌آید. این تضاد ممکن است حاصلِ مغناطیسِ باقی‌مانده حرارتی یا پذیرندگی مغناطیسی یا ترکیبی از هر دوی آن‌ها باشد(گافنی و گتر[3]، ۲۰۰۴).

خوشبختانه ابزارهایی که برای بررسی‌های باستان‌شناختی در دسترس‌اند ـ که با عنوان مغناطیس‌سنج[4] شناخته می‌شوند ـ از حساسیت بسیار بالایی برخوردارند، به‌گونه‌ای که حتی ساختارهایی با آنومالی‌های مغناطیسی بسیار ضعیف نیز قابل شناسایی هستند (شکل ۱). تغییراتی به کوچکی ۰/۱ نانوتسلا (nT) در برابر شدت میدان مغناطیسی زمین که در حدود ۴۸۰۰۰ نانوتسلا است، به‌آسانی توسط این ابزارهای تخصصی قابل آشکارسازی است (شکل ۲). در زمینه‌ی شناسایی مغناطیسی آثار باستان‌شناختی، ساده‌ترین حالت برای تصور این پدیده، وضعیتی است که در آن یک خندق در بستر زیرین خاک حفر شده باشد. آنومالی‌های قابل‌توجه اغلب صرفاً ناشی از تضاد نسبی میان بستر زیرین و خاک سطحی مغناطیسی‌شده‌ای هستند که فضای خالی ساختار را پُر کرده است. فرایند پرشدگی طبیعی یا عمدی خندق، منجر به افزایش مواد غنی از آهن در نتیجه‌ی ورود رسوبات سطحی می‌شود. این امر می‌تواند آنومالی مغناطیسی مشخصی ایجاد کند که شکل آن به‌واسطه‌ی برهم‌کنش میدان مغناطیسی موضعی با میدان مغناطیسی زمین تغییر می‌کند. با این روش شناسایی، می‌توان مقبره‌ها و گورهای مدفون را به خوبی شناسایی نمود. روش مغناطیس‌سنجی یک روش موثر در تعیین حدود و عرصه محوطه‌های باستانی به‌خصوص گورستان‌های باستانی می‌تواند باشد. در روش مغناطیس‌سنجی باید محوطه تا حد امکان از آلودگی‌های فلزی عاری و در صورت امکان فلزات اضافی از محوطه جمع‌آوری شود تا نویز کمتری در نقشه مغناطیسی ایجاد شود. در صورت وجود تیرهای برق، دکل‌ها، فنس‌های فلزی و هر نوع آلودگی مغناطیسی دیگر، باید در هنگام برداشت مغناطیسی، فاصله مناسبی با این منابع آلودگی ایجاد نمود تا کمترین آشفتگی در نقشه مغناطیسی ایجاد شود.

شکل (۱): بررسی مغناطیس‌سنجی با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج سزیوم- روبیدیم، محوطه خان باجی سرا ماسوله (عکس از بامشاد یغمایی)



شکل (۲): نقشه‌ی مغناطیسی از یک بنای مدفون آشکار شده در محوطه بابل (فاسبیندر[5]، ۲۰۱۵)

بررسی ژئوالکتریکی یا مقاومت ویژه الکتریکی

بررسی ژئوالکتریکی روش‌های متفاوتی دارد که دو روش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی و توموگرافی (شکل ۳) بیشتر در باستان‌شناسی استفاده می‌شود. اساس این روش، مبتنی بر ارسال جریان الکتریکی به درون زمین و اندازه‌گیری میزان

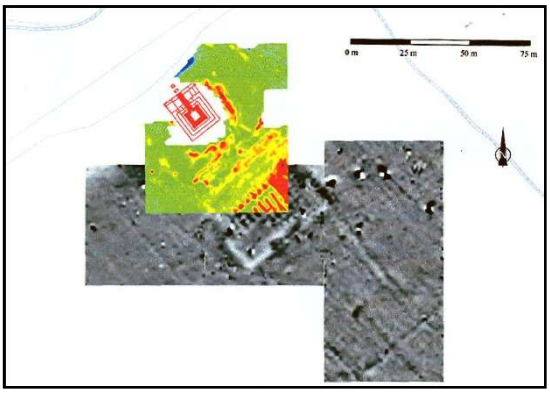
[1] Tite, M.S. and Mullins, C.
[2] Linford, N.T. and Canti, M.G.
[3] Gaffney, C. and Gater, J.
[4] Magnetometer
[5] Faßbinder, J.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

مقاومت در برابر عبور این جریان است. در نقاطی که جریان به پی‌های مدفون دیوارها برخورد می‌کند، مقادیر بالای مقاومت ثبت می‌شود، در حالی که مواجهه با خندق‌های پُر شده از رسوبات (که معمولاً از زمین‌های مجاور مرطوب‌تر هستند)، منجر به ثبت مقادیر پایین مقاومت می‌گردد. به عنوان مثال، از طریق بررسی و تهیه‌ی نقشه از پهنه‌های دارای مقاومت بالا و پایین، می‌توان پلان بناها یا ابعاد یک محوطه‌ی محصور با خندق را شناسایی نمود. تفسیر داده‌های حاصل از بررسی‌های مقاومت الکتریکی، می‌تواند بسیار پیچیده باشد؛ عوامل متعددی بر میزان رطوبت نزدیک به سطح خاک تأثیر می‌گذارند که این داده‌ها را تا حد زیادی چالش‌برانگیز می‌سازد. با این حال، مفاهیم اساسی مربوط به عوارض با مقاومت بالا و پایین، نسبتاً ساده هستند و به این شرح هستند: آنومالی‌های مقاومت بالا مثل: دیوارها، خرده سنگ‌ها، جاده‌ها، تابوت‌های سنگی (شکل ۴) و آنومالی‌های مقاومت پایین همانند: خندق‌ها و چاله‌ها، شیارها، آب‌راه‌ها، زهکش‌ها، قبرها و لوله‌های فلزی (اسکولار و همکاران، ۱۹۹۰).

مشکل داده‌های مقاومت ویژه این است که پاسخ "عادی" می‌تواند با فصل تغییر کند. برای مثال، در طول زمستان ممکن است هیچ کنتراستی بین یک خندق و خاک اشباع شده اطراف وجود نداشته باشد. مشکل دیگری که وجود دارد این است که اگر خندق خیلی عریض باشد، می‌تواند مانند یک چاله‌ی بزرگ عمل کند و رطوبت به سمت پایین آن رفته و قسمت‌های بالایی آن نسبتاً خشک بمانند، مخصوصاً در خاک‌هایی که مقدار زیادی رس دارند. به ندرت پیش می‌آید که یک جسم با مقاومت بالا مانند یک ساختمان، به صورت یک ناهنجاری با مقاومت پایین ظاهر شود، مگر زمانی که آب روی یک سطح نفوذناپذیر جمع شود. با این حال، نمونه‌های فراوانی از دیوارهای مدفون وجود دارد که با این روش قابل شناسایی نیستند. به طور کلی در این روش میزان رطوبت خاک، بسیار حائز اهمیت است. این روش مبتنی بر سنجش توانایی خاک در هدایت جریان الکتریکی است. این خاصیت، رابطه‌ای مستقیم با میزان آب بین ذره‌ای موجود در خاک و همچنین غلظت نمک‌های محلول در آن دارد (گافنی[1] و گتر، ۲۰۰۴).

شکل (۳): نمونه‌ای از بررسی ژئوالکتریکی به روش توموگرافی (عکس از کورش محمدخانی)



شکل (۴): هم‌پوشانی نقشه مغناطیسی (بخش سیاه و سفید) و نقشه مقاومت ویژه الکتریکی در اطراف بنای برج سنگی زندان سلیمان در پاسارگاد (بنش[2] و دیگران ۲۰۱۲)

بررسی الکترومغناطیسی (EM)

بررسی‌های الکترومغناطیسی، ژئورادار و الکترواستاتیک را می‌توان در زمره‌ی فنون شناسایی الکترومغناطیسی (EM) دسته‌بندی کرد. چرا که همگی بر پایه‌ی اصول مشابهی عمل می‌کنند، اگرچه فرکانس کاری آن‌ها می‌تواند از چند کیلوهرتز تا چند گیگاهرتز متغیر باشد. تمامی روش‌های بررسی الکترومغناطیسی بر پایه واکنش زمین نسبت به انتشار امواج الکترومغناطیسی استوار هستند. در اغلب سامانه‌های الکترومغناطیسی، فرستنده و گیرنده به‌صورت مجزا عمل می‌کنند، اگرچه در برخی موارد، فاصله‌ی میان

[1] Gaffney, C and Gater, J.

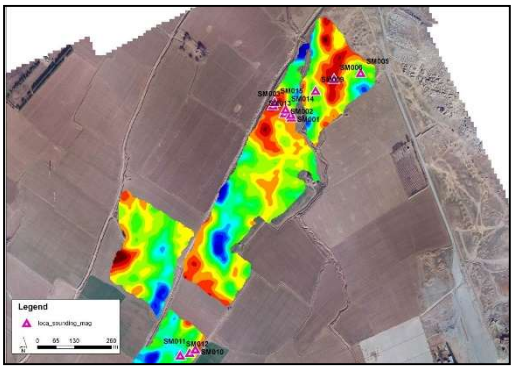
[2] Benech, C.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

آن‌ها ثابت است. به‌طور ساده، عملکرد این ابزارها بدین صورت است که سیم‌پیچ فرستنده، یک میدان مغناطیسی متناوب تولید می‌کند که موجب القای جریان‌های الکتریکی در زیرسطح می‌شود. این جریان‌ها متناسب با رسانایی الکتریکی خاک در آن نقطه هستند. جریان‌های القاشده نیز به نوبه‌ی خود یک میدان مغناطیسی ثانویه، ایجاد می‌کنند که توسط سیم‌پیچ گیرنده، اندازه‌گیری می‌شود. شدت این میدان مغناطیسی ثانویه، با میزان رسانایی الکتریکی خاک، در محدوده‌ی اطراف ابزار رابطه‌ی مستقیم دارد. با توجه به اینکه این سامانه‌ها، نسبت به رسانایی الکتریکی زمین (که معکوس مقاومت ویژه است) بسیار حساس‌اند، در شناسایی ویژگی‌هایی مشابه با آنچه در روش مقاومت‌سنجی مورد بررسی قرار می‌گیرد، کاربرد دارند (شکل ۵). بررسی‌های الکترومغناطیسی می‌توانند برای تهیه‌ی نقشه‌ی بقایای تپه‌های باستانی، شناسایی استحکامات پُر شده، شناسایی سازه‌های سنگی مدفون یا توده‌های سنگی، تعیین حدود مکان استقرارهای باستانی، گودال‌ها و اشیای فلزی مورد استفاده قرار گیرند. یکی از مزایای اساسی بررسی‌های الکترومغناطیسی، این است که جریان القاشده در زیرسطح، بدون نیاز به تماس فیزیکی با زمین ایجاد می‌شود. این عدم نیاز به تماس مستقیم، باعث می‌شود که دستگاه‌های الکترومغناطیسی در مناطقی که تماس با سطح زمین متغیر است یا مقاومت تماسی بالا دارد (مانند نواحی شنی)، بسیار کارآمد باشند. در بررسی‌های الکترومغناطیسی، دو ویژگی مهمِ خاک اندازه‌گیری می‌شود: پذیرفتاری مغناطیسی و رسانایی الکتریکی. این امر به این دلیل امکان‌پذیر است که نرخ تغییرات میدان مغناطیسی اندازه‌گیری‌شده در گیرنده با رسانایی الکتریکی خاک، نسبت مستقیم دارد، در حالی که سیگنال مغناطیسی با میزان خواص مغناطیسی خاک مرتبط است. یکی از دلایل اصلی استفاده از ابزار الکترومغناطیسی در اقلیم‌های خشک، این است که این دستگاه‌ها، نیازی به تماس مستقیم با سطح زمین ندارند و در مقایسه با روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، عملکرد بهتری در محوطه‌هایی با سطح خشک از خود نشان می‌دهند. این ویژگی باعث می‌شود که دستگاه‌های الکترومغناطیس بتوانند در شرایطی مانند اوج گرمای تابستان، بر روی سطوح آسفالتی، یا در مناطقی با خاک سست، ناپایدار یا با کیفیت پایین مورد استفاده قرار گیرند؛ به عبارت دیگر، در عرصه‌هایی که روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی اغلب کارایی خود را از دست می‌دهند، روش‌های الکترومغناطیسی همچنان قابل‌اعتماد و مؤثر باقی می‌مانند. فعالیت‌های انسانی می‌توانند تأثیر چشمگیری بر مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک داشته باشند. به‌ویژه در اطراف یک محوطه‌ی باستانی مدفون، مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌سطحی، اغلب نسبت به زمینه‌ی طبیعی منطقه افزایش یافته یا به‌اصطلاح تقویت‌شده است. این افزایش، معمولاً در نتیجه‌ی تخریب لایه‌ها یا ساختارهای زیرین به‌واسطه‌ی شخم‌زدن، فعالیت‌های جانوری یا فرایندهای طبیعی رخ می‌دهد. به‌عنوان معیاری برای سنجش تغییرپذیری پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌سطحی، این روش می‌تواند بخشی مکمل از پازل تفسیر داده‌های باستان‌شناختی مدفون را فراهم آورد و در تحلیل اهمیت یا گوناگونی شواهد زیرسطحی نقش بسزایی ایفا کند(شکل ۶) (گافنی و گتر ۲۰۰۴).

شکل (۵): بالا: دستگاه الکترومغناطیس مینی اکسپلورر CMD و پایین: دستگاه الکترومغناطیس GEM استفاده شده در محوطه میراث جهانی پاسارگاد- هیئت باستان‌شناسی مشترک ایران- فرانسه (عکس از کورش محمدخانی)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

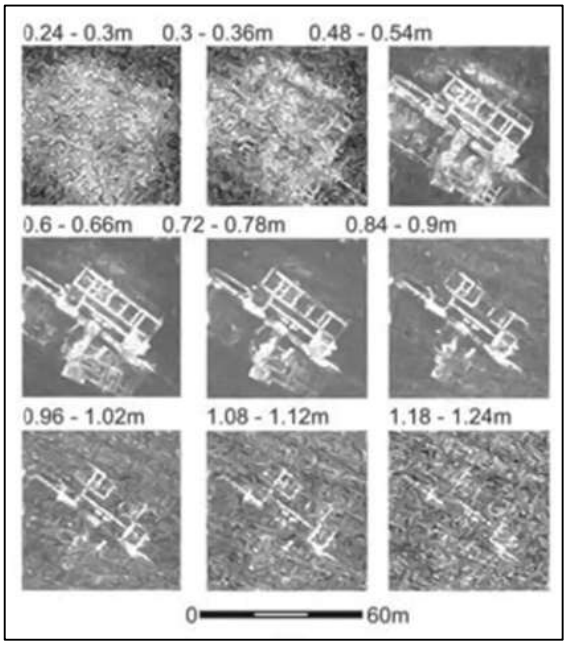


شکل (۶): نمونه ای از نقشه های الکترومغناطیس- بخش غربی تخت گاه تخت جمشید (گندت[1] و محمدخانی، ۲۰۱۷: شکل ۸)

بررسی رادار نافذ در زمین (GPR)

استفاده از این روش، از اواسط دهه‌ی هفتاد میلادی در باستان‌شناسی مورد توجه قرار گرفت. در بررسی‌های GPR، پالس‌های رادیویی با فرکانس بسیار بالا (VHF) در بازه‌ای حدود ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز از یک آنتن فرستنده به‌سوی زمین ارسال می‌شوند (شکل ۷). زمانی که این پالس‌ها، به ناپیوستگی‌هایی در زیرسطح یا سطوحی همچون کف‌سازی‌ها برخورد می‌کنند، بخشی از انرژی آن‌ها، بازتاب یافته و توسط آنتن گیرنده دریافت می‌شود؛ در حالی‌که باقی پالس‌ها، به عمق‌های بیشتر نفوذ کرده و ممکن است از دیگر ویژگی‌های مدفون بازتاب یابند. با اندازه‌گیری زمان بازگشت این بازتاب‌ها، می‌توان عمق تقریبی اهداف مدفون را در مقاطع عمودی تخمین زد. این فناوری به‌ویژه برای شناسایی و ترسیم فونداسیون‌های آجری و سنگی، یا در مواردی که دستیابی به اطلاعات عمقی ضرورت دارد، بسیار کارآمد است (شکل ۸) (گافنی و گتر، ۲۰۰۴).

شکل (۷): نمونه‌ای از دستگاه رادار نافذ در زمین (عکس از کورش محمدخانی)



شکل (۸): نمونه‌ای از نتایج بدست آمده از یک بررسی ژئورادار در لایه‌های مختلف

نتایج

مثال‌هایی از بررسی‌های مغناطیس‌سنجی در محوطه‌های باستانی ایران

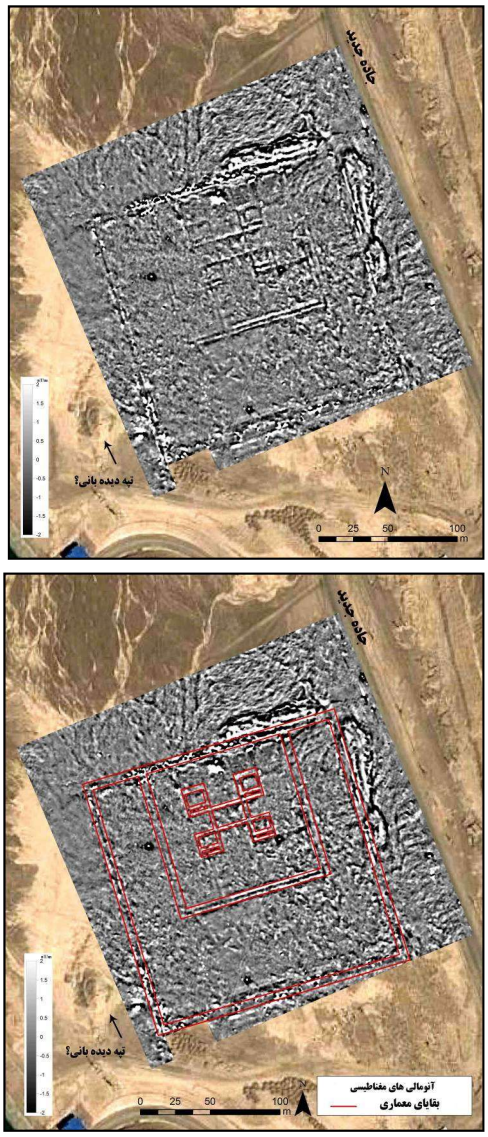
کشف بنای هخامنشی در دهانه غلامان سیستان

محوطه هخامنشی دهانه‌ی غلامان در ۴۴ کیلومتری جنوب شرقی زابل در سیستان قرار دارد. این محوطه بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۶۵ توسط هیئت باستان‌شناسی ایتالیایی به سرپرستی اومبرتو شراتو کاوش گردید و پس آنگاه بین سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۴ توسط سید منصور سید سجادی کاوش شد. بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ بررسی‌های آرکئوژئوفیزیک به روش مغناطیس‌سنجی توسط نگارنده در این محوطه صورت گرفت که در بخش جنوبی آن در محوطه‌ای موسوم به پادگان، بررسی‌های مغناطیسی منجر به آشکارسازی یک بنای هخامنشی در زیر سطح گردید. این بنا که در حدود ۵۰ متر در ۵۰ متر وسعت دارد، یک تالار مرکزی احتمالاً ستوندار دارد که چهار اتاق در چهار گوشه و چهار ایوان دارد و از ساختمان‌های هخامنشی در فارس

[1] Gondet, S. and Mohammadkhani, K.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

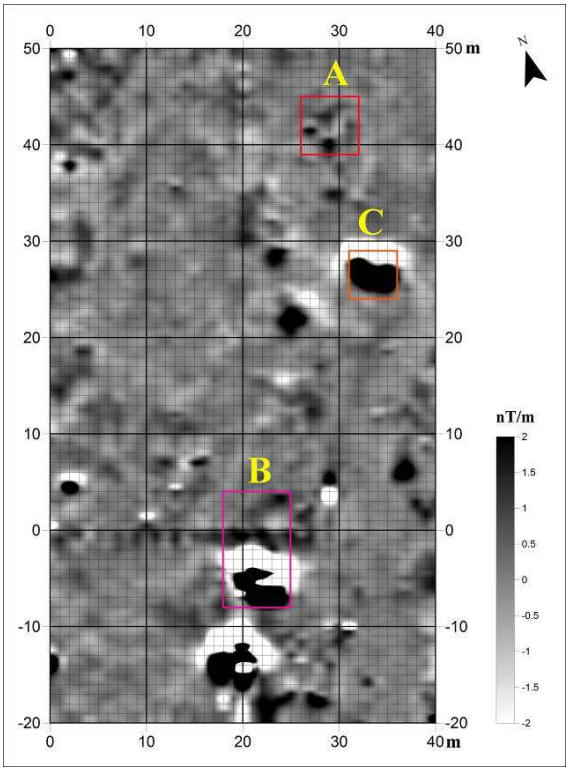
مرکزی و خوزستان الگوبرداری شده است(شکل ۹) (محمدخانی ۲۰۱۴ و محمدخانی، ۲۰۱۲).



شکل (۹): بالا: نقشه مغناطیسی بخش جنوبی محوطه هخامنشی دهانه غلامان سیستان
پایین: تفسیر نقشه مغناطیسی و آشکارسازی سازه هخامنشی شناسایی شده (محمدخانی، ۲۰۱۴)

کشف گورهای هزاره‌ی چهارم پیش از میلاد در محوطه چگاسفلا

محوطه‌ی باستانی چگاسفلا در دشت زهره، در ۳۰ کیلومتری جنوب غربی بهبهان، در جنوب شرقی استان خوزستان قرار گرفته است. تحقیقات باستان‌شناسی در این محوطه، توسط عباس مقدم از سال ۱۳۹۴ آغاز شده و تا به امروز ادامه دارد. بررسی مغناطیس‌سنجی در روی تپه و در آبکند غربی این تپه توسط نگارنده در سال ۱۳۹۴ انجام گرفت. بررسی‌های مغناطیسی در آبکند غربی، منجر به آشکارسازی گورهای باستانی از هزاره‌ی چهارم پیش از میلاد گردید (شکل ۱۰). در یکی از سه ناحیه‌ی مورد کاوش در این آبکند، بررسی‌های مغناطیسی منجر به آشکارسازی آنومالی دو قطبی قوی شد که کاوش‌های هیئت باستان‌شناسی یک گور دسته جمعی را کشف نمود (شکل ۱۱) (مقدم[1]، ۱۳۹۷).



شکل (۱۰): نقشه مغناطیسی آبکند غربی محوطه چگاسفلا، سه کارگاه کاوش شده در تصویر مشخص شده است (مقدم، ۱۳۹۷: شکل ۳۹)

[1] Moghadam, A.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

شکل (۱۱): گور جمعی کشف شده در کارگاه B گورستان چگاسفلا (مقدم، ۱۳۹۷)

نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی از دهه‌ی ۵۰ میلادی آغاز شد. این روش‌ها کمک بسیار مؤثری به باستان‌شناسان در مکان‌یابی پدیدارهای باستانی زیر سطحی می‌کند تا باستان‌شناسان در مدت زمان بسیار کوتاهی به وجود و یا عدم وجود پدیدارهای باستانی زیرسطحی پی برده و برای ادامه‌ی فعالیت، برنامه‌ریزی مناسبی انجام دهند. فعالیت‌های عمرانی همانند سدسازی و طرح های عمرانی حوزه‌ی مدیریت آب، جاده‌سازی و راه‌سازی و به طور کلی توسعه‌ی شهری و روستایی و همچنین فعالیت‌های کشاورزی، امری ناگزیر است. ایران با پیشینه‌ی باستانی بسیار زیاد، در جای جای سرزمین، شاهد وجود آثار و بقایای باستانی هستیم. بنابراین لزوم مطالعات باستان‌شناسی قبل از هر گونه فعالیت عمرانی امری ضروری است تا بهترین مسیر توسعه، با حفظ مواریث فرهنگی صورت پذیرد. از آنجاییکه زمان در اجرای فعالیت‌های عمرانی به خصوص طرح‌های عمرانی حوزه‌ی مدیریت آب، بسیار حائز اهمیت است و فعالیت‌های باستان‌شناسی بسیار زمان‌بر است، بنابراین لزوم استفاده از روش‌های نوین در فعالیت‌های باستان‌شناسی، بسیار حائز اهمیت و پر ثمر است. امروز با پیشرفت علم و تکنولوژی علوم مختلفی به یاری باستان‌شناسان، برای تشخیص دقیق و سریع پدیدارهای باستان‌شناسی و سنتز و تفسیر آنها آمده‌اند. در زمینه‌ی مکان‌یابی پدیدارهای باستان‌شناسی یکی از مؤثرترین و کارآمدترین روش‌ها، استفاده از بررسی‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی است. این روش‌ها، بسیار سریع و دقیق بوده و علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، هزینه‌ها را نیز بسیار کاهش می‌دهد. از میان روش‌های گوناگون، روش مغناطیس‌سنجی بسیار سریع و کارآمد بوده و در کمترین زمان سطح وسیعی را پوشش می‌دهد. با این روش، می‌توان بین ۱ تا ۲ هکتار در روز از یک محوطه‌ی باستانی را بررسی نمود و با استفاده از نتایج آن برای برنامه‌ریزی مطالعات باستان‌شناسی و متعاقباً فعالیت‌های عمرانی استفاده کرد. این روش در تمامی محیط‌ها کارایی دارد و در مطالعات‌باستان‌شناسی پشت سدها قبل از افتتاح، یا قبل از احداث سدها بسیار مفید بوده و در کوتاه‌ترین زمان وجود و یا عدم وجود آنومالی و پدیدارهای باستانی در یک منطقه را مشخص می‌نماید. این امر باعث می‌شود که با علم به وجود و یا عدم وجود پدیدارهای باستانی، بتوان در کمترین زمان، برنامه‌ریزی دقیق و مفیدی را برای ادامه بحث توسعه عمرانی انجام داد.

مراجع

1. Aitken, M.J., (1958), Magnetic Prospecting. The Water Newton Survey. “Archaeometry 1” (1). 24-29
2. Alizadeh, A. (1995), “The importance and understanding of survey methods in archaeology”, The journal of Archaeology and History, vol. 17, Markaz Nashr_e Daneshgahi, 2-8. (In Persian)
3. Alizadeh, A. (2001), “Theory and Practice in Archaeology (with Chapters on Evolutionary Biology and Epistemology)”, Tehran, Cultural Heritage Organization Publications (Research Institute). (In Persian)
4. Benech, C., Boucharlat, R., Gondet, S., (2012), Organisation et aménagement de l’espace à Pasargades : Reconnaissance archéologique de surface, 2003-2008, ARTA 2012.003, www.achemenet.com/Arta 2012.003.
5. Faßbinder, J., (2015), Magnetometer prospecting in Iran, Iraq-Kurdistan and in the South Caucasus, Azerbaijan and Armenia, in “13th Annual Symposium on the Iranian Archaeology”, 1-3 March 2015, National Museum, Tehran-Iran.
6. Gaffney, C., Gater, J., (2004), “Revealing the Buried Past, Geophysics for Archaeologists”, Tempus Publishing Ltd, 192p.
7. Gondet, S., Mohammadkhani K., (2017), Reports on magnetic and electromagnetic surveys over Persepolis West. In “Persepolis West (Fars, Iran), Report on the fieldwork carried out by Iranian-Italian Joint Archaeological Mission in 2008-2009”, by Alireza Askari Chaverdi and Pierfrancesco Callieri, BAR International Series 2870.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

8. Hesse, A. (2010), La prospection électrique des padiers Achéménides, Le Palais de Darius à Suse : une résidence royale sur la route de Persépolis à Babylone, Presses de l'Université de Paris-Sorbonne, Paris. 146-158

9. Linford, N.T., and Canti, M.G., (2001), Geophysical Evidence for fires in Antiquity: Preliminary Results from an Experimental Study, "Archaeological Prospection" 8(4), 211-26.

10. Moghadam, A. (2018), "Archaeological excavations in the cemetery of Tell Chagasfala, first season (2015)", Tehran, Cultural Heritage and Tourism Research Institute Publications. (In Persian)

11. Mohammadkhani, K. (2004), "A study of exploration geophysical methods in archaeology, a case study of magnetic surveys in Persepolis and Pasargadae", Master's thesis. Department of Archaeology. Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University. (In Persian)

12. Mohammadkhani, K., (2012), Une nouvelle construction monumentale achéménide à Dahaneh-e Gholaman, Sistan- Iran, www.achemenet.com/ressources/Arta 2012.001.

13. Mohammadkhani, K., (2014), « Étude de l'urbanisme des villes achéménides : reconnaissances de surface et prospection géophysique à Dahaneh-e Gholaman (Sistan, Iran) », Thèse de doctorat « Longues, Histoire et Civilisations des Mondes Anciens ». Université Lumière Lyon 2.

14. Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A. & Herzog, I., (1990), "Archaeological prospecting and remote sensing", Cambridge University Press, Cambridge, 692p.

15. Tite, M.S., and Mullins, C. (1971), Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites. "Archaeometry" 13. 209-19

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال سیزدهم/ ویژه‌نامه فناوری‌های نوین در باستان‌شناسی نجات‌بخشی سدها/ پاییز ۱۴۰۵

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
13th Year/ Special Issue on Modern Technologies Applied in Rescue Archaeology for Dam Projects/ October 2026

The necessity of using geophysical methods in archaeological studies of development projects in the field of water resources management

Kourosh Mohammadkhani*[1]

Abstract

This paper addresses the importance of using modern geophysical methods in archaeological studies. Archaeological excavations are essential for obtaining scientific data; however, they are generally time-consuming, costly, and inevitably involve the destruction of archaeological layers. Moreover, selecting appropriate locations for excavation trenches is of great importance, as incorrect placement can lead to wasted resources and damage to archaeological sites. Therefore, the application of methods that reduce costs, save time, and enhance the protection of archaeological sites is essential. Exploration geophysical methods, particularly archaeogeophysics, enable the identification of subsurface archaeological anomalies and features in the shortest possible time. This is especially significant under current conditions, with the expansion of urbanization and the increase in development projects such as dam construction, roads, and building activities. Given the ancient nature of Iran and the presence of buried archaeological remains across many regions, conducting archaeological investigations prior to the implementation of development projects is unavoidable. By increasing the speed and accuracy of site detection, archaeogeophysical methods play a crucial role in facilitating archaeological research and make it possible to survey several hectares of a site on a daily basis. This paper introduces and examines various geophysical methods used in archaeology and presents examples of their applications.

Keywords

Archaeology, Archaeological site, Archaeogeophysics, Geophysical prospection, Magnetometry

[1]* Associate Professor, Department of Archaeology, Shahid Beheshti University. K_mohammadkhani@sbu.ac.ir

Received: 2025/12/15 Accepted: 2026/06/03

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]