کاربرد روشهای ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی
و نمونه‌ای از اجرای روش مغناطیس‌سنجی در اطراف معبد چغازنبیل

بابک امین‌پور

شاخه‌ای از دانش ژئوفیزیک رشته ژئوفیزیک اکتشافی است که با ارزیابی تغییرات فیزیکی در زمین به مدل‌سازی و تفسیر ساختارهای زیرین زمین می‌پردازد. به طور معمول روشهای اکتشافی ژئوفیزیک در عمق‌هایی از پوسته زمین که برای انسان قابل دسترسی است به منظور آشکارسازی بعضی منابع طبیعی همچون نفت و گاز و کانسارها و یا تعیین ساختارهای زمین شناسی و همچنین تعیین بعضی پارامترها و خواص فیزیکی لایه‌های زمین که در محاسبه و اجرای پروژه‌هایی همچون تونل، سد، نیروگاه، ساختمانهای ویژه و غیره کاربرد دارند اجرا می‌گردند. در این روشها از طریق اندازه‌گیری به وسیله دستگاههای مربوطه در نقاطی بر روی سطح زمین می‌توان به بخشی از ویژگیها و تغییرات فیزیکی زیرین زمین و تفاوتهایی که در نقاط مختلف وجود دارد پی‌برد. این تغییرات فیزیکی می‌تواند شامل تفاوتهای محسوسی در انتقال جریان الکتریکی، قابلیت مغناطیسی بودن مواد، چگالی، بازتاب و شکست موجهای الاستیک و الکترومغناطیسی باشد. ثبت و نمایش داده‌های مربوط به این تفاوتها (بی‌هنجاری - آنومالی) که به علت تغییر در پارامتر مورد اندازه‌گیری در یک نقطه به نسبت نقاط اطراف آن به دست می‌آید و ترسیم آن در امتدادهای افقی و عمودی می‌توان یک توده را که به نسبت اطراف خود دارای تفاوتهای فیزیکی باشد آشکارسازی نمود و تا حد امکان ژرفا، گسترش، شکل و اندازه آن را تعیین کرد. روشهای ژئوفیزیک اکتشافی را می‌توان به صورت خلاصه به این شکل برشمرد: روش گرانی سنجی، روش الکتریکی، روش مغناطیس‌سنجی، روش الکترومغناطیسی، روش لرزه نگاری و روش رادار زمینی.

البته باید به این موضوع توجه داشت که جهت اجرای صحیح روشهای ژئوفیزیک اکتشافی و به دست آوردن نتایج قابل قبول از این برداشتها باید شرایط محیط برای اینگونه اندازه‌گیریها مناسب باشد و این روشها در هر جا و تحت هر شرایطی قابل انجام نیستند. بعضی از عواملی که هر کدام یک و یا تعدادی از روشهای ژئوفیزیک اکتشافی را به صورت نامطلوب تحت تأثیر قرار می‌دهد می‌توان به این شکل برشمرد، نزدیکی به سازه‌های فلزی و ساختمانها، نزدیکی به خطوط انتقال نفت و گاز، سیمهای توری و جاده‌های پر رفت و آمد. از دیگر عوامل تأثیرگذار می‌توان نامساعد بودن موقعیت ساختاری زمین برای برداشتهای ژئوفیزیکی، وضعیت آب زیرزمینی، وجود عدسی‌های رسی در لایه‌های زیرین، اوضاع جوی و توفانهای مغناطیسی و خورشیدی، نامساعد بودن میزان رطوبت در خاک و سنگلاخ بودن سطح زمین را برشمرد.

کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در باستان‌شناسی به این شکل است که قبل از شروع به حفاری می‌توان محل و پراکندگی آثار مدفون را تعیین نمود و با استفاده از آنومالی‌های ژئوفیزیکی یک و یا چند نوع نقشه از سایت مورد نظر تهیه کرد و با دید بازتری دست به عملیات حفاری زد. این امر به خصوص در مناطقی که وجود آثار قابل پیش‌بینی بوده ولی به علت قرارگرفتن در زیر آبرفت‌ها و رسوبات جوان در ظاهر هیچگونه اثری از آنها دیده نمی‌شود کاربرد پیدا می‌کند. تأثیر دیگری که استفاده از روشهای ژئوفیزیکی در پی دارد کم کردن هزینه عملیات حفاری است که با محدود شدن مرزهای کاری و صرف زمان کمتر و انجام سریع‌تر حفاری می‌توان به آن دست یافت. از طرفی با مشخص شدن وضعیت یک محوطه باستانی در زمان کوتاهتر می‌توان تا حد زیادی از سوءاستفاده‌ها و حفاری‌های غیرمجاز پیشگیری نمود. همچنین می‌توان گفت روشهای ژئوفیزیکی جستجویی را که مورد نیاز باستان‌شناسی است با سرعت و بدون تخریب انجام می‌دهد. در طی ده سال گذشته استفاده از روشهای ژئوفیزیکی در باستان‌شناسی رشد بسیار چشمگیری داشته به صورتی که منجر به پیدایش رشته‌ای تخصصی با عنوان آرکئوژئوفیزیک گشته است که عبارت از تطبیق و اجرای مناسب روشهای ژئوفیزیک اکتشافی در سایت‌های باستانی است. به طور خلاصه با اجرای این روشها می‌توان به این نتایج دست یافت:

- تعیین محل، گستردگی و عمق آثار مدفون و به جا مانده از بقایای سازه‌های باستانی همچون دیوارها و پی‌های سنگی و آجری و بقایای جاده‌ها و سنگفرش‌ها؛ - مشخص نمودن فضاهای خالی، مقبره‌ها و راههای ورودی به مقبره‌ها در زیر تومولوس‌ها؛ - تعیین محل و ابعاد معادن باستانی و ترانشه‌های پرشده که از حفاری‌های قدیمی به جا مانده؛ - تعیین محل و عمق اجاقها و کوره‌های مدفون مربوط به پخت سفال و ذوب فلز؛ - مشخص نمودن محل و عمق توده‌های ظروف سفالی و اشیاء

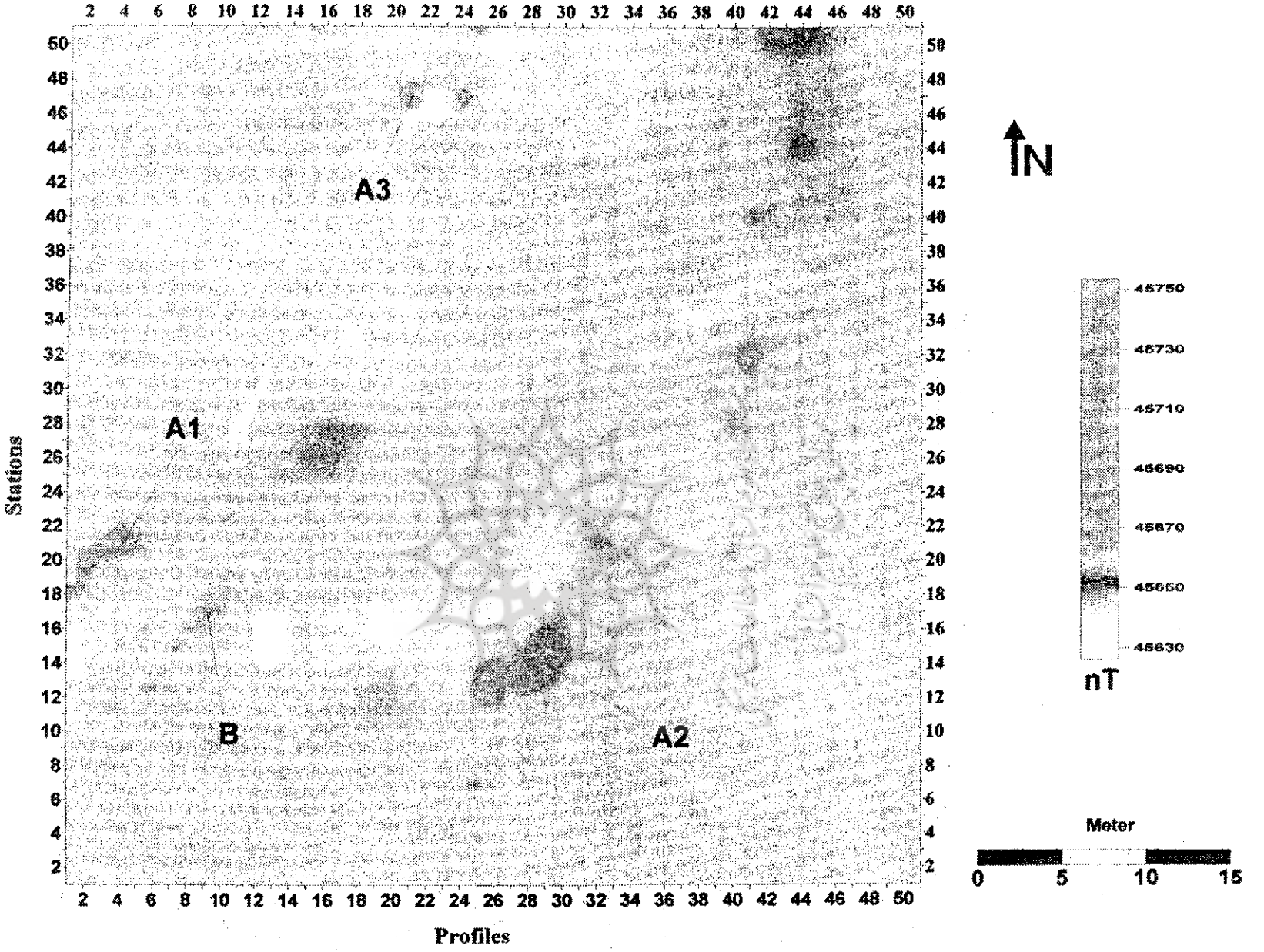
فلزی؛ – تعیین محل و ضخامت خاکهای سوخته، لایه‌های خاکستر و خاکهایی که تحت اثر عواملی با منشاء انسانی قرار داشته است؛ – تعیین محل و عمق خندق، حفره‌ها و چاله‌های باستانی مدفون مربوط به ذخیره مواد غذایی و یا دفع مواد زاید و محلهایی که در گذشته خاک‌برداری شده و به مرور پر شده است؛ – تعیین وضعیت کلی و ساختارهای تپه‌های باستانی و مشخص نمودن عمق پی‌سنگ، ضخامت و تعداد لایه‌ها و تعیین محل جهت انجام مطالعات تفصیلی.

پس به طور کلی در مورد نقش روشهای ژئوفیزیک می‌توان گفت، جهت دادن به حفاری و تعیین حدود آن و دستیابی به آثار مدفون بدون آسیب رساندن به آنها و به انجام رساندن حفاری در کوتاهترین زمان ممکن از توانایی‌های این روشها است. در نوشتار حاضر نتایج به دست آمده از اجرای روش مغناطیس‌سنجی در محوطه‌ای در اطراف معبد چغازنبیل ارایه شده است. شروع این دوره از فعالیت‌ها به اسفند ماه ۱۳۷۸ برمی‌گردد که در پی دریافت نتایج مثبت ادامه برداشتها در خرداد و تیر ماه ۱۳۷۹ انجام گرفته و در طی این مدت چند محوطه مورد برداشتهای مغناطیس‌سنجی قرار گرفته است که در اینجا به یکی از آنها اشاره می‌گردد. در پی اولین بازدید از این محل و بررسی و تبادل نظر با آقای دکتر بهزاد مفیدی در مورد این سایت با توجه به استفاده از مصالح خشت خام و آجر به همراه یکدیگر و فراوانی وجود سازه‌ها و ساختارهای آجری در این محوطه از بین روشهای ژئوفیزیک اکتشافی روش مغناطیس‌سنجی جهت پیمایش این محوطه و آشکارسازی سازه‌های احتمالی انتخاب گردید. علت انتخاب این روش استفاده از خاصیت مغناطیس باقیمانده حرارتی (Termo Remanent Magnetization) در بقایای سازه‌های آجری مدفون است. ایجاد این خاصیت مغناطیسی در اینگونه مصالح به این شکل است که ذرات کانیهای مغناطیسی که می‌توانند به صورت گسترده در خاک و سطح زمین پراکنده باشند در خاک رس اولیه که مورد استفاده جهت تهیه خشت خام قرار گرفته موجود بوده و محدوده‌های مغناطیسی موجود در این کانیها (Magnetic Domain) پس از حرارت دیدن در کوره و در طی مرحله تهیه آجر برافروخته شده و به حالت آزاد درآمده و بردارهای مغناطیسی موجود همگی هم جهت شده و در راستای میدان مغناطیسی زمین قرار می‌گیرند و هنگامی که آجرها سرد می‌شوند این خاصیت در طی هزاران سال در جسم حفظ می‌گردد و شدت آن چند برابر بیشتر از خاصیت مغناطیس القایی است. در فعالیت اخیر، محوطه‌ای که جهت برداشتهای مغناطیس‌سنجی در نظر گرفته شد در شمال مجموعه چغازنبیل در قسمتی که ناپیوستگیهایی در امتداد حصار خارجی وجود داشته و به عنوان دروازه گمشده و یا دروازه کوره‌ها از آن یاد می‌شود قرار گرفته است. با توجه به حساسیت این محدوده و شرایط سطحی آن که با رسوبات ضخیمی پوشیده شده، این قسمت را تبدیل به محوطه‌ای کرده است که برای آشکار شدن وضعیت آن می‌باید امید زیادی به نتایج روشهای ژئوفیزیکی داشت.

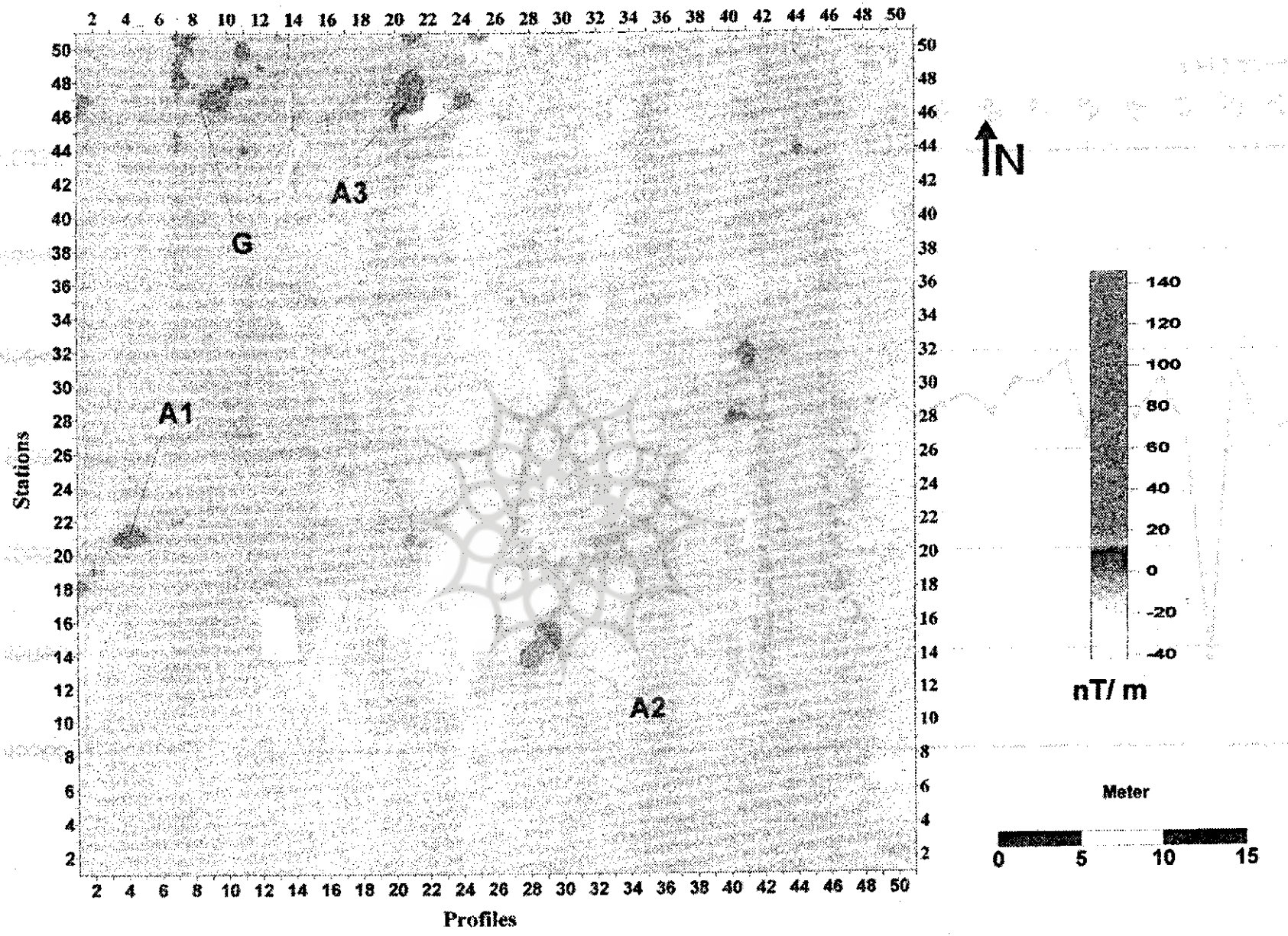
به این منظور در قطعه‌ای در این محوطه به ابعاد ۵۰×۵۰ متر تعداد ۵۱ پروفیل شمالی – جنوبی به فاصله ۱ متر از یکدیگر انتخاب شده و نقاط اندازه‌گیری نیز به فاصله ۱ متر از یکدیگر در روی این پروفیل‌ها در نظر گرفته شده است. برداشتهای مغناطیس‌سنجی با ۲ روش شدت کل میدان مغناطیسی و گرادیان عمودی مغناطیسی انجام شده است. اجرای همزمان این ۲ روش و مقایسه نتایج آن با یکدیگر در مرحله تفسیر می‌تواند بسیار مفید باشد. روش برداشت گرادیان عمودی نسبت به ساختارهای نزدیک به سطح دارای حساسیت بیشتری است و باعث بارزترشدن اثرات سطحی و پدیدار شدن آنومالی‌های منابع نزدیک به سطح زمین می‌گردد، در حالی‌که آنومالی حاصل از روش شدت کل میدان مغناطیسی در شکل ۱ دیده می‌شود و همان‌طور که مورد انتظار است وجود ساختارها و قطعات آجر باعث ایجاد آنومالی با شدت بالا در قسمتهایی از نقشه شده است. لازم به توضیح است که در نقاط A1، A2 و A3 آثار بیرون‌زدگی قطعات آجر در سطح زمین دیده می‌شود. آنومالی‌های موجود در قسمتهای دیگر نقشه نیز مربوط به وجود بقایای آثار آجری است که در سطح نشانه‌ای از آنها وجود ندارد. در نقطه B گمانه‌ای به ابعاد ۱×۱ متر بر روی آنومالی موجود حفر گشته است که در ادامه به آن اشاره خواهیم داشت. در شکل ۲ نقشه آنومالی حاصل از اندازه‌گیری گرادیان عمودی مغناطیسی دیده می‌شود که شامل اثرات سطحی و خیلی نزدیک به سطح است و همانگونه که دیده می‌شود اثرات عمیق‌تر از روی آن حذف شده‌اند. نکته جالب در نقشه پدیدار شدن آنومالی در قسمت شمال غربی محوطه از ایستگاه ۴۵ به بالا در امتداد پروفیل‌های ۱ تا ۱۸ است که با حرف G مشخص شده‌اند. وجود آنومالی‌ها در این قسمت با شکل سطحی زمین در هماهنگی بوده همانگونه که انتظار می‌رود امتداد قسمتی از حصار خارجی است.

نکته دیگر در این نقشه حذف کامل آنومالی موجود در قسمت شمال شرقی محوطه است (آنومالی شکل ۱) که گویای عمق بیشتر منبع این آنومالی است که با توجه به شدت آنومالی، شکل ظاهری و گسترش آن شاید بتوان انتظار وجود یک کوره را در این محل داشت که برای روشن شدن وضعیت آن باید در انتظار نتایج حفاری در آینده بود. جهت تعیین عمق برای آنومالی‌های مغناطیسی به دست آمده در این برداشتها از روش آنالیز طیفی (Spectral analysis) استفاده شده است که کاربرد این روش در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی نیز خود نسبتاً جدید محسوب می‌گردد. این روش به دو صورت یک بعدی و دو بعدی قابل اجرا بوده و دارای درجه صحت بالاتری نسبت به دیگر روشهای تعیین عمق است. برای اجرای یک بعدی این روش پروفیل شماره ۹ که در شکل ۳ می‌توان آن را دید در نظر گرفته شده و هدف، تعیین عمق توده‌ای است که آنومالی آن در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (شکل ۱) در حدود ایستگاه ۱۷ دیده می‌شود و با حرف B مشخص شده است.

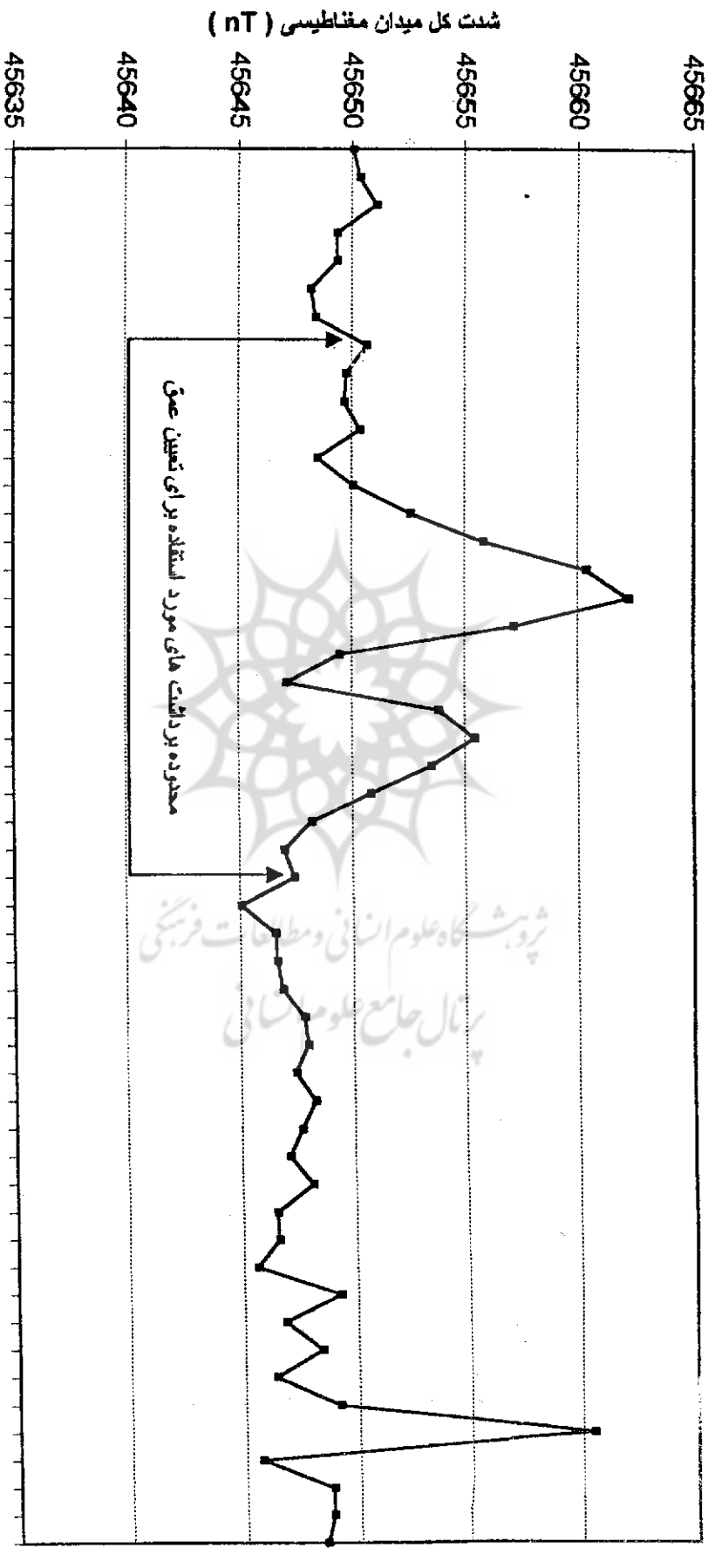
برای اجرای روش و تعیین عمق توده، قسمتی از پروفیل جهت محاسبه تبدیلات فوری و به اصطلاح انتقال داده‌ها از محیط زمان و مسافت به محیط فرکانس و طول موج انتخاب شده است. در این مرحله فرکانس زاویه‌ای برای این سری از داده‌ها محاسبه شده و نمودار آن در برابر لگاریتم دامنه طیف محاسبه شده رسم می‌گردد که در شکل ۴ دیده می‌شود. در مرحله بعدی قسمت اول این منحنی انتخاب شده و با استفاده از روش کوچکترین مربعات، خط راستی از آن گذرانده می‌شود که شیب این خط دو برابر عمق توده مورد نظر بر حسب واحد انتخاب شده است. در مورد آنومالی فوق این عمق برابر ۱/۵ متر به دست آمده است. از طرف دیگر همانطور که در ابتدا اشاره شد در نقطه B اقدام به حفر یک گمانه به ابعاد ۱×۱ متر شده است که در عمق ۱/۴ متر به بقایای ساختارهای آجری برخورد شده که نتایج حفاری را می‌توان در شکل ۵ ملاحظه نمود. به این ترتیب نتایج تعیین عمق آنومالی مغناطیسی با روش آنالیز طیفی و نتایج حفاری به یکدیگر بسیار نزدیک بوده و در تطبیق خوبی هستند. با توجه به نتایج به دست آمده از این فعالیت می‌توان به نقش ارزنده روشهای ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی پی‌برد. همچنین با توجه به تاریخ درخشان کشورمان و ضرورت شناخت بیشتر آن اهمیت همکاری بین این دو رشته علمی یعنی ژئوفیزیک و باستان‌شناسی بیش از پیش آشکار می‌گردد. امید است هر دو رشته بتوانند با برپایی فعالیت‌های مشترک و استفاده از دیدگاههای یکدیگر در راه آشکارسازی جنبه‌های بیشتری از تمدن این سرزمین کهن به نتایج مطلوبی برسند.



شکل ۱ – نقشه آنومالی شدت کل میدان مغناطیسی

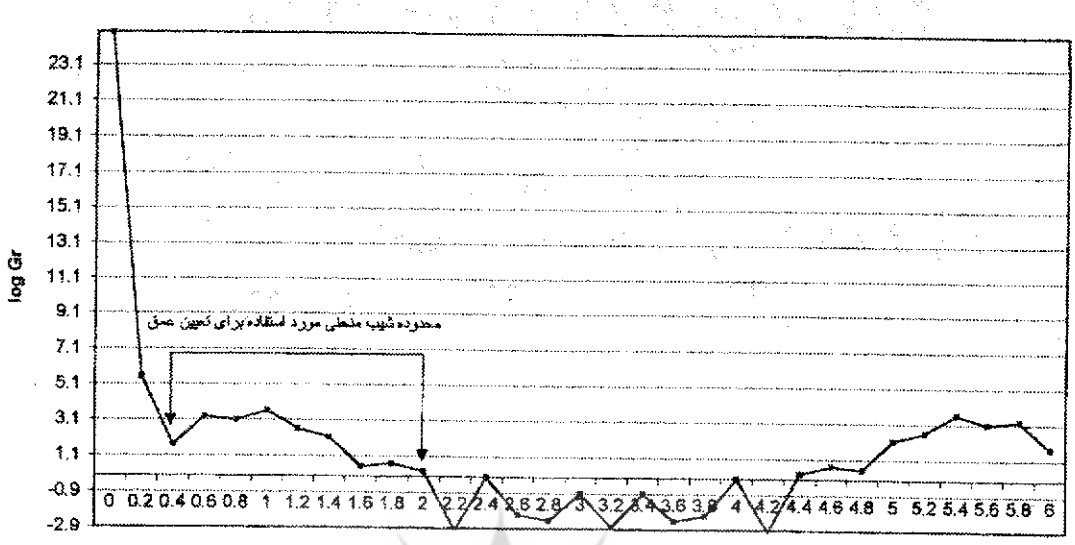


شکل۲– نقشه آنومالی گرادیان عمودی مغناطیسی



شکل ۳- آنومالی مغناطیسی مربوط به پروفیل شماره ۹

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



شکل ٤- منحنی دامنه لگاریتم اسپکتروم فوریه در برابر فرکانس زاویه ای

شکل ٥- نتایج حفاری در نقطهB