



شناسایی موقعیت قبرهای پنهان با استفاده از ژئورادار (GPR) در کارهای باستان‌شناسی

رضا احمدی*

استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۹

چکیده

روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR) یک روش سنجش غیرمخرب است که قادر به آشکارسازی و تصویر کردن انواع ساختارهای دست‌ساز بشر، ناهمگنی‌های زیرسطحی به دلیل وجود اجسام مدفون در زیر زمین، مشخص کردن فضاهای خالی در محیط‌ها و اهداف مدفون در اعماق کم است. در پژوهش حاضر بررسی توانایی به‌کارگیری روش GPR به‌منظور آشکارسازی و تعیین موقعیت قبرهای نامشخص و اجساد مدفون، در مقاصد باستان‌شناسی و نظایر آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR به روش اختلاف محدود دوبعدی بهبودیافته در حوزه فرکانس، برای مدل‌های مصنوعی متناظر با قبرهای خالی، استخوان بخش‌هایی از اعضای بدن انسان و نیز تابوت‌های با جنس‌های مختلف (فلزی و چوبی) صورت گرفته است. همچنین با هدف بررسی‌های زیرسطحی در یک قبرستان قدیمی، داده‌های واقعی GPR با استفاده از یک سامانه GPR مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۸۰۰ MHz (مگاهرتز)، برداشت شده است. نگاشت راداری نهایی منطبق بر یکی از پروفیل‌های برداشت شده در این منطقه، با اعمال توالی پردازشی مختلف شامل تصحیح استاتیک (ساکن)، بردارنده واو (دی‌واو)، اعمال فیلتر میان‌گذر، بردارنده زمینه و برابری بر روی داده‌های خام، با استفاده از نرم‌افزار Reflexw نیز آورده شده است. نتایج این پژوهش بر اساس پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی مختلف تولیدشده و نگاشت راداری داده‌های واقعی GPR، قابلیت کاربرد این روش را در زمینه بررسی‌های باستان‌شناسی به‌منظور آشکارسازی و تعیین موقعیت قبرهای پنهان، تابوت‌ها و جسد انسان با صرف هزینه کم در مدت‌زمان کوتاه بدون دست‌کاری و تخریب محیط نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: باستان‌سنجی، ژئوفیزیک، رادار نفوذی به زمین (GPR)، مدل‌سازی پیشرو، قبر، استخوان

* مسئول مکاتبات: اراک، خیابان دانشگاه، دانشگاه صنعتی اراک، دانشکده مهندسی علوم زمین، گروه مهندسی معدن، کد پستی ۳۸۱۸۱۴۶۷۶۳

پست الکترونیکی: Rezahmadi@gmail.com

«این نشریه با احترام به قوانین اخلاق در نشریات تابع قوانین کمیته اخلاق در انتشار (COPE) است و از آیین‌نامه اجرایی قانون پیشگیری و مقابله با تقلب در آثار علمی پیگیری می‌نماید.»

۱. مقدمه

روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین یا GPR (Ground-Penetrating Radar) یک تکنیک غیرمخرب مؤثر و کارآمد است که برای تصویر کردن اهداف و ویژگی‌های اشیای مدفون در زیر زمین (یا ساختارهای دست‌ساز بشر) مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. برای این روش، چندین مترادف و علائم اختصاری، نظیر بازتاب الکترومغناطیسی یا EMR (Electromagnetic reflection)، رادار مرز زیرسطحی یا SIR (Subsurface Interface Radar)، رادار زمین‌رادار (Georadar)، رادار نفوذکننده در زیر سطح یا SPR (Subsurface Penetrating Radar) و رادار خاک (Soilradar) وجود دارد [2].

GPR در عمل دارای کاربردهای بسیاری در زمینه‌های مختلف مهندسی و علوم است. مهم‌ترین کاربردهای GPR در زمینه تأسیسات، تعیین محل، موقعیت‌یابی و تعیین اندازه خطوط لوله و کابل‌های فلزی و پلاستیکی و دیگر اشیاء مدفون دست‌ساز بشر (همانند بشکه‌ها و مخازن)، معدنکاری، زمین‌شناسی مهندسی، ژئوتکنیک و شناسایی ساختار، باستان‌شناسی (کاوش‌های اشیاء و ساختارهای باستانی، تشخیص موقعیت قبرهای نامشخص و شناسایی قبرستان‌های قدیمی و تعیین محل جاده‌های قدیمی مدفون)، آزمون بتن و کنترل محل میله‌های مقاوم‌سازی (میلگرد) درون آن، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی، شناسایی مین‌های زمینی و مهمات منفجرنشده مدفون، تعیین عمق سطح سفره‌های آب زیرزمینی، برف و یخ و یخبندان‌شناسی و غیره است (ویرایش شده از [1]).

روش GPR در کاربرد دارای یک سری مزایا و محدودیت‌هایی نیز است. یکی از جذاب‌ترین توانایی‌های روش GPR در کاربردهای مختلف، ایجاد تصویر زیرسطحی با تفکیک‌پذیری بالا بدون تخریب و دست‌کاری محیط بوده و از جمله نارسایی‌های این روش، وجود پیچیدگی‌هایی در ویژگی‌های الکتریکی محیط‌هاست. اگر لایه‌های رویی شامل مواد دارای هدایت الکتریکی خوب همانند رس‌های بسیار مرطوب و ترکیبات آهن‌دار باشند، روش GPR ناموفق خواهد بود [1].

هدف از مطالعه حاضر که یک پژوهش کاربردی است، بررسی توانایی روش GPR به منظور آشکارسازی موقعیت قبرهای نامشخص در مقاصد باستان‌شناسی، آشکارسازی و شناسایی اجساد قربانیان حوادث و بلایای طبیعی همانند زلزله (زمین‌لرزه)، زمین‌لغزه، سقوط بهمن، امور جنایی و نیز قربانیان جنگی مدفون در گورستان‌های دسته‌جمعی است. برای این منظور شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR به روش اختلاف محدود (Finite difference) دوبعدی بهبودیافته در حوزه فرکانس، برای آشکارسازی قبرهای پنهان، استخوان بخش‌هایی از اعضای بدن انسان و نیز تابوت‌های با جنس‌های مختلف (فلزی و چوبی) صورت گرفته است.

پیشینه کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در باستان‌شناسی به چند دهه قبل بازمی‌گردد. نخستین بار در اواسط دهه ۱۹۴۰ از این روش‌ها استفاده شد و سپس در شروع دهه ۱۹۵۰ این فعالیت‌ها با تمرکز بر روش مغناطیس‌سنجی به انجام رسید. از دهه ۱۹۸۰ استفاده از ماهواره‌ها، روش‌های لرزه‌نگاری با قدرت تفکیک بالا، GPR، گرانی‌سنجی و تصویربرداری با پرتوهای مادون قرمز، در دسترس باستان‌شناسان قرار گرفته است. آشکارسازی ساختار معماری و نقشه بناهای مدفون، مشخص کردن بقایای پی‌ها و دیوارها و تعیین جنس آن‌ها از قبیل خشت، آجر و سنگ، مشخص کردن بقایای مدفون راه‌ها و سنگ‌فرش‌ها در زیر زمین، تعیین محل قبرستان‌ها، پل‌ها و خندق‌ها، محل‌هایی که در گذشته خاک‌برداری شده و سپس با رسوبات جدید پر شده باشد، تعیین محل کوره‌های پخت سفال، کوره‌های ذوب فلز، محل خاک‌های سوخته و خاکستر و تعیین محل چاله‌های باستانی، گورخمره‌ها و خمره‌های بزرگ نگهداری مواد غذایی از کاربردهای روش‌های ژئوفیزیک در باستان‌شناسی است [3].

ایده استفاده از امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیرسطحی در سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر پژوهشگر آلمانی ارائه شد [4]. یکی از اولین کاربردهای GPR در باستان‌شناسی، در سال ۱۹۷۵ در

منجر به میرایی سریع امواج و کاهش عمق نفوذ امواج می‌شود.

موفقیت کاوش و شناسایی استخوان بدن انسان مدفون با استفاده از روش GPR اولین بار توسط ملت (Mellett) (۱۹۹۲) [17] ارائه شده است که توانست استخوان مجسمه انسان مدفون در عمق ۸۰ سانتی‌متری در محیط شن و ماسه خشک را شناسایی کند. وی همچنین اسکلت یک خزنده را در عمق ۰/۵ متری با استفاده از آنتن با فرکانس مرکزی ۵۰۰ MHz کشف نمود. مطابق گزارش Patch (۲۰۰۹) [18] داده‌های GPR در نه شبکه جداگانه در بخش‌های مختلف گورستان ب.ف. رندولف (B.F. Randolph) جمع‌آوری شد. تقریباً ۱۶۴ هدف منحصر به فرد که با گورهای تاریخی مطابقت داشتند، شناسایی شدند که برخی از آن‌ها ممکن است گورهای چندگانه و یا دارای همپوشانی باشند و اکثریت قریب به اتفاق این اهداف قبلاً گورهای ناشناخته بودند. همچنین بررسی زیرسطحی غیرمخرب با روش GPR برای قدیمی‌ترین بخش گورستان مخصوص خارجیان غیرکاتولیک در رم (ایتالیا) مربوط به سه قرن گذشته انجام شده است [19].

طی سال‌های ۱۹۳۶ تا ۱۹۳۹ کاوش موقعیت جغرافیایی یک گور دسته‌جمعی مربوط به جنگ داخلی اسپانیا در کوه‌های آستوریاس در شمال اسپانیا با روش GPR، سپس حفاری‌های باستان‌شناسی به صورت قانونی و مقایسه نتایج با سایر مطالعات جستجوی گورهای دسته‌جمعی در محیط‌های مشابه گزارش شده است [20]. زمین‌شناسی بستر این منطقه شامل آهک‌های دوره کربونیفر بوده و ضخامت خاک از ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متری سطح زمین با بوته‌های ضخیم و پوشش گیاهی است. منطقه شناسایی شده توسط باستان‌شناسان به صورت قانونی مورد بررسی قرار گرفت و بقایای انسانی با موفقیت کشف شد. یک جستجوی دقیق GPR در گورستان بندانگ سیکوترا (Cikutra Bandung) اندونزی برای اجساد ناشی از وقوع زلزله که یک هفته تا دو ماه قبل از تجسس، دفن شده بودند، انجام شد. پروفیل‌های راداری این بررسی نشان از بی‌هنجاری‌هایی مبنی بر احتمال وجود اجساد دارد و مقیاس دامنه در عمق حدود ۱/۲m

محوطه چوکونیون (Chaco Canyon) در نیومکزیکوی آمریکا انجام شد [5]. هدف از این مطالعه اکتشاف محل دیواره‌های احتمالی در اعماق کمتر از ۱m بود. بعد از موفقیت‌های به دست آمده در این محوطه، کاربرد GPR در سال ۱۹۷۹ در هالاسلطان تکه (Hala Sultan Tekke) واقع در قبرس [6] و محوطه باستانی «سیرن» (Ceren) کشور السالوادور [7] ادامه یافت [8]. از جمله بررسی‌های ژئوفیزیکی کم‌عمق با استفاده از روش‌های الکتریکی و GPR می‌توان به محوطه باستانی پالوبلانکو (Palo Blanco) واقع در شمال غرب آرژانتین [9] و بررسی‌های مغناطیس‌سنجی و GPR در سایت باستانی سن میگوئل تکیلا (San Miguel Tocuila) حوزه آبگیر مکزیکو (Basin of Mexico) [10] اشاره نمود. از دیگر مطالعات و تحقیقات موجود در زمینه به کارگیری روش GPR در تحقیقات باستان‌شناسی می‌توان به بررسی تپه‌های مدفون [11]، بازرسی بناهای تاریخی همچون چشمه باستان، پل تاریخی، ساختمان [12,13] و آشکارسازی و بررسی ساختارهای باستانی مدفون اشاره کرد. در مجموعه باستانی سونگی باتو در رومانی با هدف تشخیص و انتقال شواهد باستان‌شناسی موجود، سایت SB2K با استفاده از روش GPR طراحی و ایجاد شده است [14]. بررسی و تفسیر سه‌بعدی شبکه برداشت‌شده نشان می‌دهد که روش GPR در شناسایی این ساختارها موفق عمل کرده است. مطالعه آیدین و همکاران (۲۰۱۴) [15] در خصوص بررسی و شناسایی سیستم توزیع آب قدیمی در منطقه باستانی پاتارای آنتالیا با بهره‌گیری از روش GPR نشان داده که اختلاف گزردهی دی‌الکتریک بین خطوط آب زیرزمینی و محیط دربرگیرنده منجر به مشخص شدن ویژگی‌های بارزی در مقاطع GPR و در نهایت اطلاعات بسیار مفیدی شده است. شناسایی و بررسی ساختارهای باقی‌مانده در سایت باستانی زیبر در منطقه بصره نیز با انجام مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR با استفاده از روش تفاضل محدود توسط آلامر انجام شده است [16]. نتایج نشان‌دهنده تفاوت بودن مدل‌سازی از بازتاب امواج با ساختار مدفون و تعامل پیچیده امواج الکترومغناطیسی با شرایط زیرسطحی است. هم‌چنین وجود بنایی با تراکم بالا

مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) در کاوش‌های باستانی منطقه تپه حصار دامغان [24]، از روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی و GPR در بررسی‌های ژئوفیزیکی اطراف محوطه تراس سلطنتی پرسپولیس (تخت جمشید) و چغازنبیل [25] استفاده شده است.

در بسیاری از مناطق کشور ایران آثاری از قبرستان‌های قدیمی و مقبره‌های تاریخی وجود دارد که در پاره‌ای از موارد به‌طور کامل از بین رفته و یا همانند شکل ۱ کاربری‌های دیگری پیدا نموده‌اند و شناسایی کامل زیرسطحی آن‌ها مستلزم به‌کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی غیرمخرب و کارآمد همانند روش GPR است.

۲. تاریخچه تدفین و نحوه تجزیه جسد انسان

دفن اجساد در دل خاک در بسیاری از فرهنگ‌ها وجود دارد. از دوران قدیم زمین‌هایی را می‌توان پیدا کرد که در آن اجساد مختلفی خاک شده‌اند. باینکه در دورانی استفاده از تابوت‌های بزرگ و متفاوت، در غرب رواج پیدا کرد، اما از اوایل دهه ۹۰ میلادی در کشورهای غربی

است که با عمق اجساد دفن شده سازگار است [21]. بازرسی محل به روش GPR برای آشکارسازی گورهای نامعلوم در گورستان تاریخی مزرعه شهرستان پولاسکی واقع در وینسویل (Waynesville) میسوری نیز صورت گرفته است. در جریان این تحقیقات، بازرسی چندین مکان از گورستان به‌صورت بصری انجام شده و داده‌های رادار به دست آمد. بر اساس بازرسی بصری مکان و تفسیر داده‌های GPR در مجموع ۱۵۱ قبر مشخص شد؛ ۸۷ قبر با استفاده از تکنیک‌های بازرسی قبرستان به‌صورت بصری نقشه‌برداری شدند و ۶۴ قبر بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های GPR شناسایی شد [22].

در کشور ایران روش GPR در زمینه باستان‌شناسی به‌ویژه آشکارسازی مقبره‌ها و کشف اجساد مدفون، چندان مورد استفاده قرار نگرفته است. تنها در چند مورد محدود از این روش همراه با روش مغناطیس‌سنجی در بررسی آثار باستانی مدفون در خاک‌های نزدیک به سطح در قصر شیرین [23]، پلدختر، دیوار گران و محوطه تنگه بلاغی، از روش GPR همراه با توموگرافی



شکل ۱: تصاویر مربوط به یکی از پارک‌های کلان‌شهر اراک. در تمام تصاویر آثار برخی از قبرهای قدیمی دیده می‌شود.

Fig. 1: Images of one of the parks in Arak metropolis. In all images remains of some ancient graves can be seen.

دمای 10°C تجزیه شوند و اسکلت آن باقی بماند. پس از تجزیه بخش‌های نرم بدن، نوبت به تجزیه اسکلت استخوانی بدن می‌رسد که بسته به شرایط (حیوانات، دما، میزان اسیدی بودن خاک، مواجهه با هوا و غیره) اسکلت انسان می‌تواند یک تا چند سال باقی بماند و به‌طور حدودی ۵۰ سال پس از مرگ، استخوان‌ها نیز ناپدید می‌شوند. استخوان‌های مجسمه و فک پایین بیشتر دوام دارند. مراقبت از بدن با مواد شیمیایی (مومیایی کردن) سرعت فرآیند تجزیه را کم می‌کند (ویرایش شده از [27]).

۳. اندازه و ابعاد تابوت و استخوان بدن انسان

برای آشکارسازی موقعیت دقیق گورهای نامشخص و شناسایی اجساد انسان در زیر زمین به‌وسیله روش‌های باستان ژئوفیزیک، داشتن اطلاعات کامل از اندازه و ابعاد اسکلت (استخوان‌های) بدن انسان، ابعاد و جنس‌های مختلف تابوت، انواع مومیایی و تأثیر مومیایی بر میزان ماندگاری جسد و نحوه تجزیه آن، نحوه تدفین در ادیان مختلف و عمق قرارگیری جسد در زیر زمین موردنیاز است که در ادامه به‌طور مختصر به آن‌ها اشاره شده است.

در جدول ۱ اندازه و ابعاد استخوان قسمت‌های مختلف بدن انسان به تفکیک جنسیت آورده شده است. مطابق داده‌های این جدول به‌طور کلی اندازه استخوان قسمت‌های مختلف بدن مردان، قدری بزرگ‌تر از زنان است. همچنین بنا بر شواهدی انسان‌ها از زمان‌های قدیم تابوت را از جنس چوب (از نوع چوب گردو و افرا)، فلز، سنگ، سفال و پوست حیوانات می‌ساخته‌اند که شکل و اندازه آن در میان اقوام گوناگون، فرق داشته است.

۴. روش‌شناسی پژوهش

۴-۱. مبانی نظری و فیزیکی روش GPR

سیستم GPR، سیگنال‌های الکترومغناطیسی در محدوده فرکانسی ۱ MHz تا بیش از یک گیگاهرتز را از طریق فرستنده، به درون زمین ارسال کرده و نحوه رفتار میدان الکترومغناطیسی بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی را از

نیز کمتر از تابوت استفاده می‌شود؛ یا تابوت‌ها از موادی ساخته می‌شوند که به‌آسانی تجزیه می‌شوند. در برخی فرهنگ‌ها این تصور وجود دارد که مرده‌ها در زندگی پس از مرگ به وسایل شخصی خود نیاز پیدا می‌کنند، بنابراین وسایل شخصی مرده را نیز همراه وی دفن می‌کنند (ویرایش شده از [26]).

شکل قرارگیری اجساد در فرهنگ‌ها و ادیان مختلف نیز با یکدیگر متفاوت است؛ در قرن ۱۰ پیش از میلاد مسیح در فرهنگ‌های باستانی، X نماد خدای آسمان بوده که دست‌های اجساد را به همین شکل قرار می‌دادند. در مسیحیت جسد فرد را درحالی‌که به پشت خوابیده از شرق به غرب قرار می‌دهند و سر او را در انتهای غربی قبر می‌گذارند. در اسلام فرد متوفی را روبه‌قبله و به پهلو راست در قبر می‌گذارند. گورهایی از ۳۵۰۰ سال پیش از میلاد کشف شده که بسیار بزرگ بودند، طولی به‌اندازه ۱۲m که با تخته‌سنگ آن‌ها را مشخص می‌کردند، در این گورها صد جنازه جا می‌گرفت و روی آن را با خاک می‌پوشاندند. در یونان قدیم مردگان را در تابوتی از جنس سنگ‌آهک قرار می‌دادند. در یهودیت هر گور، تنها به یک جنازه اختصاص دارد اما در ایران با افزایش جمعیت، به‌تدریج از اوایل دهه پنجاه خورشیدی، گورهای دو و سه طبقه نیز به وجود آمد و گاهی اعضای یک خانواده را در یک گور سه طبقه قرار می‌دهند. سنگی به نام سنگ لحد هر یک از این طبقات را از هم جدا می‌کند و به هر مرده یک سنگ‌قبر مجزا تعلق می‌گیرد. در بهائیت جسد را در صندوقی از جنس چوب سخت یا بلور و یا سنگی می‌گذارند و صندوق میت را در خاک قرار می‌دهند که باید پایش به‌طرف قبله باشد. در مورد شخص یهودی، مرده را در قبر با پشت به‌سوی بیت‌المقدس می‌خوابانند (ویرایش شده از [26]).

بدن انسان درواقع از مواد مختلفی تشکیل شده که جنس، مقاومت و ترکیب هرکدام از آن‌ها با یکدیگر متفاوت است و این باعث می‌شود پس از مرگ با سرعت‌های مختلفی تجزیه شوند. همچنین سرعت تجزیه شدن بستگی بسیار زیادی به نحوه مرگ و شرایط محیطی دارد. درواقع حدود چهار ماه طول می‌کشد تا همه بافت‌های نرم بدن یک انسان مرده در

جدول ۱: اندازه و ابعاد استخوان قسمت‌های مختلف بدن مردان و زنان [28,29]

Table 1: Bone size of various parts of men's and women's body [28,29]

جنسیت Gender	نام استخوان Name of bone	طول (cm) Length (cm)	عرض (cm) Width (cm)	قطر (cm) Diameter (cm)	حجم (ml) Volume (ml)
مرد Male	بازو Arm	33.5	6.6	5	
	ساعد Forearm	26.5	3.4	2.6	
	ران Thigh	48		2.3	
	جمجمه Skull	18.6	15		1548
	ساق پا Leg	36.5	7.41	3.4	
	ستون فقرات Spinal cord	45	1.3		
زن Female	بازو Arm	30.5	5.8	4.4	
	ساعد Forearm	23.8	2.9	2.2	1425
	جمجمه Skull	17.9	14.8		
	ستون فقرات Spinal cord	43	13		

انرژی موج رادیویی که به سطح شیء برخورد می‌کند، بازتابیده شود. این امر مستلزم آن است که تفاوتی بین ویژگی‌های الکتریکی شیء و محیط دربرگیرنده آن وجود داشته باشد. با آشکار کردن انرژی پراکنده شده، تعیین محل و موقعیت چشمه‌های پراکنده کننده انرژی، امکان پذیر می‌شود [1].

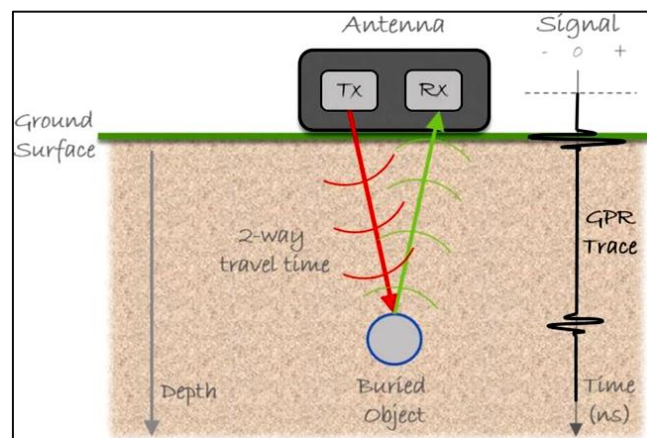
متداول ترین شیوه نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنه سیگنال امواج EM بازتابی، در مقابل زمان تأخیر است که رد (Trace) نامیده می‌شود. در حقیقت رخدادهای فضای سه بعدی درون یک رکورد زمان یک بعدی ترسیم می‌شوند (شکل ۲). پلاریته سیگنال بازتابی GPR نیز که بر اساس علامت ولتاژ نیمه اول سیکل تعریف می‌شود با ماهیت تغییر ویژگی‌های الکتریکی (به ویژه ϵ) کنترل شده و در تفسیر داده‌ها بسیار مفید است [1].

در حالت کلی، نگاشت راداری (Radargram) یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مطابق شکل ۳ مجموعه‌ای از ردهای بازتابی است و رخداد حاصل شده

طریق گیرنده، آشکار می‌کند. سیگنال منتشر شده که در محیط، سیر می‌کند پراکنده (Scatter) شده و یا با تغییراتی در مقاومت الکترومغناطیسی (Impedance)، با ارائه رخدادهایی مشابه با سیگنال منتشره، بازتاب می‌یابد. به عبارت دیگر بازشناخت سیگنال، ساده است زیرا سیگنال بازگشتی شبیه سیگنال منتشره به نظر می‌رسد [30].

ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در یک محیط کنترل می‌کنند، گذردهی دی‌الکتریک، ϵ (Dielectric permittivity)، نفوذپذیری مغناطیسی، μ (Magnetic permeability) و هدایت الکتریکی، σ (Conductivity) هستند. تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی سنگ‌ها و خاک‌های سطحی معمولاً ضعیف بوده و بنابراین در کاوش‌های باستانی GPR به ویژه در زمینه تعیین محل قبرهای نامشخص و شناسایی قبرستان‌ها در اکثر مواقع ϵ و σ مهم‌ترین پارامترها هستند.

به منظور آشکارسازی یک شیء بایستی بخشی از



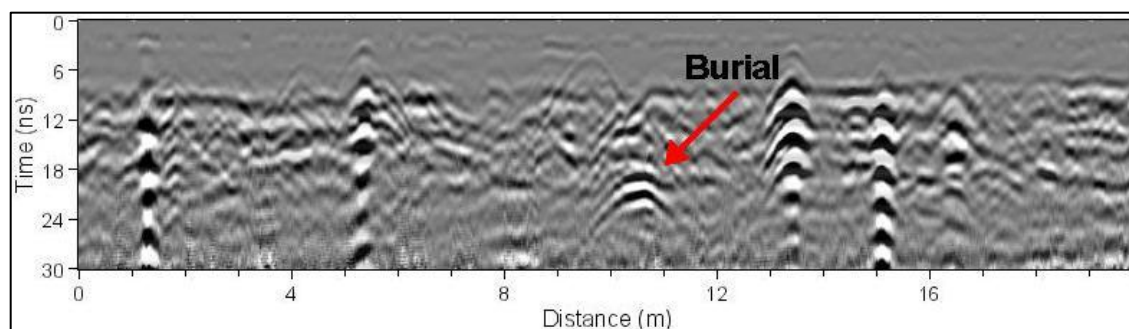
شکل ۲: داده‌های نوعی ثبت‌شده توسط سیستم GPR. برای تحلیل، دامنه در مقابل زمان تأخیر ترسیم می‌شود [31].
 Fig. 2: Typical data recorded by a GPR system. For analysis amplitude is plotted against the delay time [31].

برداشت در راستای یک پروفیل و معمولاً با یک فاصله آنتنی ثابت به صورت تک حالت (Single-fold) انجام می‌گیرد. بیشتر سیستم‌های GPR از آنتن‌های جداگانه برای ارسال و دریافت، معروف به عملیات هر دو ثابت (Bistatic) استفاده می‌کنند؛ اگرچه ممکن است آنتن‌ها در یک سیستم اندازه‌گیری واحد بدون امکان تغییر جدایش آنتنی جای گیرند (تک ثابت: Monostatic). متداول‌ترین شیوه برداشت، پروفیل‌زنی بازتابی تک حالت با فاصله ثابت (Common distance) است.

میان تفکیک‌پذیری، عمق تجسس و فرکانس مرکزی پالس‌های GPR، ارتباط وجود دارد، به گونه‌ای که با افزایش فرکانس مرکزی، تفکیک‌پذیری افزایش یافته و عمق تجسس، کاهش می‌یابد و برعکس با کاهش فرکانس مرکزی، تفکیک‌پذیری کاهش یافته و

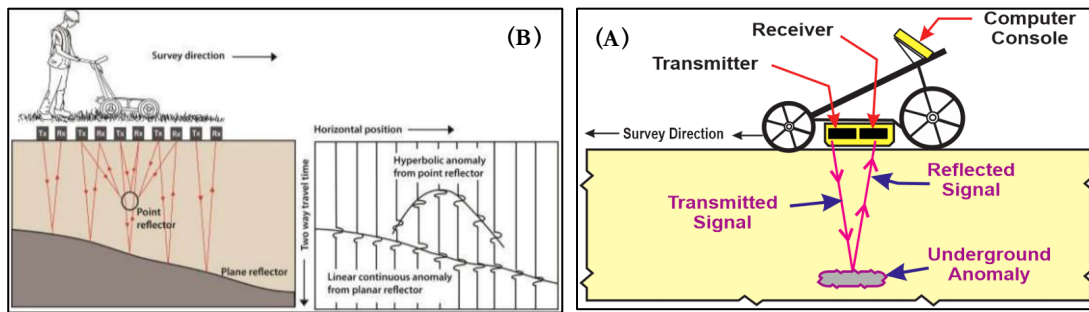
در تصویر نیز برای اغلب اهداف مدفون به صورت هذلولی است. برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابیده از ناهمگنی‌های زیرسطحی از سیگنال‌های زمینه بزرگ‌تر هستند. در این شکل اهداف و ساختارهای با ویژگی‌های الکتریکی معین از جمله یک قبر (با پاسخ هذلولی شکل در مرکز تصویر) در یک محیط با ویژگی الکتریکی متفاوت مشخص شده‌اند.

برداشت‌های GPR به صورت سه شیوه (Mode) پایه‌ای پروفیل‌زنی بازتابی (شکل ۴)، گمانه‌زنی نقطه میانی مشترک (Common Mid-Point (CMP)) و عبور از میان یک محیط و دریافت (Transillumination) صورت می‌گیرند [1]. این‌ها متداول‌ترین فرم‌های برداشت GPR هستند و روش برداشت پروفیل‌زنی بازتابی از بقیه متداول‌تر است. در این روش عملیات



شکل ۳: نگاشت راداری داده‌های واقعی GPR بر روی اهداف مدفون و رخدادهای مربوطه در تصویر به صورت هذلولی. پاسخ هذلولی شکل در مرکز تصویر مشخص شده با فلش قرمز رنگ مربوط به یک قبر است [32].

Fig. 3: Radargram of real GPR data on buried targets and related events as hyperbolic in the image. Hyperbolic response at the center of the image shown by red arrow corresponds to a grave [32].



شکل ۴: نمایش سیستم GPR، نحوه برداشت داده‌های GPR به روش پروفیل‌زنی بازتابی با فاصله آنتنی ثابت و رخداد‌های متداول در پاسخ سیستم GPR (الف: [33]، ب: [34])

Fig. 4: Illustration of GPR system, the procedure of GPR data acquisition through reflection profiling with bistatic antennae and common events in the response of a GPR system (A: [33], B: [34])

جهت‌یافتگی ساختار دوبعدی معلوم باشد، فاصله بین خطوط می‌تواند خیلی بزرگ باشد. اگر ساختار دارای جهت‌یافتگی مشخصی نباشد، آنگاه فاصله خطوط برداشت باید به اندازه فاصله ایستگاهی باشد تا اطمینان حاصل شود که پاسخ زمین، دچار دگرنامی (Aliasing) نمی‌شود.

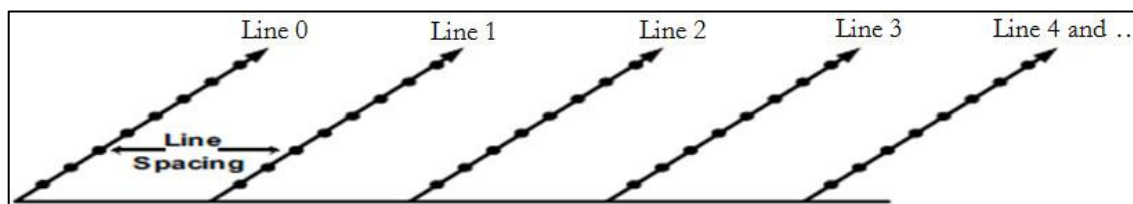
به‌طور کلی مطابق شکل ۴ (ب) رخداد حاصل در تصویر دوبعدی GPR برای اغلب اهداف مدفون نقطه‌ای، کروی و استوانه‌ای، به‌صورت هذلولی و برای ناهمگنی‌های صفحه‌ای افقی یا مایل همانند مرز لایه‌ها، به‌صورت یک خط راست است.

۴-۲. به‌کارگیری روش GPR در زمینه آشکارسازی قبرهای نامشخص

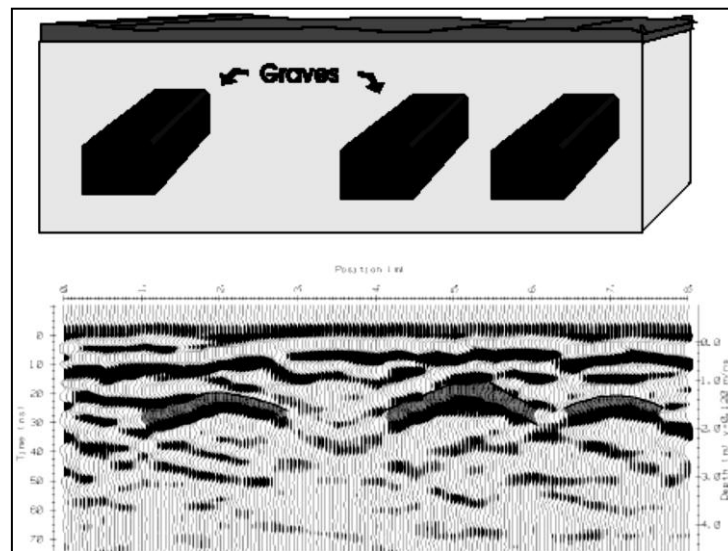
یکی از مهم‌ترین کاربردهای روش GPR در زمینه باستان‌شناسی، آشکارسازی موقعیت قبرها و شناسایی محتویات درون آن‌هاست. گورهای نامعلوم در یک گورستان تاریخی ره‌اشده می‌توانند با استفاده از

عمق تجسس، افزایش می‌یابد. انتخاب فرکانس عملکرد بهینه برای یک برداشت راداری بسیار مهم بوده و بدیهی است که همواره بایستی یک توازن بین عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری سیستم، برقرار شود. به‌طور کلی بیشترین عمق قابل‌شناسایی با روش GPR توسط سیستم با آنتن‌های بدون پوشش (Unshielded) با فرکانس مرکزی کم (۲۵ MHz) در زمین‌های معمول بدون حضور روباره‌های مرطوب و هادی و مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی، حدود ۵۰m است.

فاکتور مهم در طراحی برداشت، مطابق شکل ۵ ایجاد یک شبکه برداشت و سیستم مختصات است. عموماً به‌منظور کاهش تعداد خطوط برداشت، راستای خطوط برداشت عمود بر روند ویژگی‌های هدف مورد کاوش، طراحی و پیاده می‌شوند. انتخاب موقعیت و مکان خط برداشت باید به‌گونه‌ای صورت گیرد تا آشکارسازی هدف، بیشینه شود. اگر هدف دارای امتداد مشخصی باشد، تمام خطوط برداشت باید عمود بر امتداد هدف، موقعیت‌یابی شوند. در مواقعی که امتداد و



شکل ۵: پروفیل‌های برداشت GPR [35]
Fig. 5: GPR surveyed profiles [35]



شکل ۶: شکل طرح وار سه قبر همراه با پاسخ سیستم GPR مربوطه [1]
 Fig. 6: Schematic picture of 3 graves with the related GPR system response [1]

شود تا این هسته مدل‌سازی پیشرو منجر به شناسایی رفتار مدل‌های مختلف در پاسخ‌ها شده و عملیات تفسیر داده‌های GPR در کاربردهای عملی را فراهم نماید. بنابراین هدف از مدل‌سازی داده‌های GPR آن است که معلوم شود تحت شرایط مختلف محیطی، چه اطلاعات معقولی از داده‌های واقعی میدانی به دست می‌آید. برای دستیابی به این هدف می‌توان از روش‌های عددی مختلفی استفاده نمود که در همه آن‌ها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، بر اساس رفتار امواج EM و برهمکنش آن‌ها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود. در میان روش‌های عددی مختلف، روش تفاضل محدود به خاطر دارا بودن مزیت‌هایی همانند درک نسبتاً ساده مفاهیم آن، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ‌های آن در موارد بکار رفته، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [36]. برای مدل‌سازی پیشرو دوبعدی داده‌های GPR در مطالعه حاضر، بازتاب امواج GPR ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو بر روی سطح زمین قرار دارند)، به روش تفاضل محدود در حوزه زمان با فرمول‌بندی روش میدان مغناطیسی عرضی (مد Transverse magnetic field: TM) شبیه‌سازی شده است. برای این منظور کدهای تفاضل محدود دوبعدی

تکنیک‌های بازرسی محل به روش GPR آشکارسازی شوند. گفتنی است که هندسه گورهای دسته‌جمعی با گورهای منفرد، بسیار متفاوت است. سیستم‌های GPR با ایجاد یک روش قدرتمند برای تعیین و تشخیص موقعیت‌های قبر، به اشیای مدفون همانند خاک به هم‌خورده، پاسخ می‌دهند. در شکل ۶ شکل طرح‌وار از موقعیت سه قبر مدفون در خاک برجا از نوع ماسه سیلتی و پاسخ سیستم GPR مربوطه در یک نگاهت راداری نشان داده شده است.

۳-۴. فرآیند مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR

از آنجایی که سیگنال‌های GPR از نوع امواج EM هستند، بنابراین الکترومغناطیس پایه و اساس GPR است. معادلات ماکسول نیز پایه و اساس الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند، به گونه‌ای که تمام پدیده‌های EM در مقیاس ماکروسکوپی توسط این معادلات قابل توصیف بوده و رفتار حاکم بر میدان‌های GPR را می‌توان با اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی مناسب، شبیه‌سازی نمود.

پاسخ سیستم GPR برای مدل‌های مصنوعی فرضی مختلف متناظر با اهداف و ساختارهای واقعی، باید توسط یکی از روش‌های مدل‌سازی عددی تولید

مستقیم (هوا و زمین) که همواره به صورت یک رخداد خطی افقی است، از پاسخ حذف گردیده است. در فرم بهبودیافته برنامه مدل‌سازی پیشرو، بخش عمده‌ای از محاسبات، از درون مرحله مدل‌سازی پیشرو خارج می‌شود و برای دستیابی به تفکیک‌پذیری بالا، در حیطه فوریه عملیات دیگری بر روی آن انجام می‌گیرد. در نتیجه این محاسبات در مدت‌زمان بسیار کوتاهی انجام می‌شود که نتیجه آن بهبود کیفی و بصری پیوستگی تریس‌ها در پاسخ نهایی مقطع GPR و تولید پاسخ با تفکیک‌پذیری زیاد است.

۴-۴. شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی

برای این منظور با استفاده از برنامه مدل‌سازی عددی پیشرو بهبودیافته در حوزه فرکانس در محیط نرم‌افزار MATLAB و داده‌ها و اطلاعات جداول ۱ و ۲، پاسخ GPR با تفکیک‌پذیری زیاد برای مدل‌های مصنوعی فرضی به شکل قبرهای خالی، اسکلت (استخوان قسمت‌های مختلف بدن انسان) و تابوت‌های با جنس‌های مختلف با هدف شناسایی موقعیت قبرها و کاوش اجساد انسان مدفون در زیر زمین، شبیه‌سازی شده تا با بررسی و تجزیه و تحلیل داده‌ها از نتایج آن‌ها برای تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی استفاده شود. در جدول ۲ برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه در پژوهش حاضر شامل گذردهی دی‌الکتریک نسبی، هدایت الکتریکی و سرعت سیر امواج EM (نوعاً در محدوده فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰۰ MHz) آورده شده است. به منظور انطباق بیشتر نتایج شبیه‌سازی با عمل، مقادیر ویژگی‌های الکتریکی محیط‌های میزبان و اهداف، واقع‌بینانه انتخاب شده است.

در مدل‌سازی پیشروی مصنوعی داده‌ها، موارد زیر لحاظ شده است: در خصوص آشکارسازی قبرهای نامشخص، تابوت‌ها و اجساد مدفون در شناسایی قبرستان‌های قدیمی و مقاصد باستان‌شناسی، انتخاب فرکانس مرکزی آنتن در حدود ۲۵۰ تا ۵۰۰ MHz یک سازش خوب بین اندازه هدف و عمق تجسس است و با

ارائه شده توسط ایروینگ و نایت (۲۰۰۶) [37] مورد استفاده قرار گرفته و برای مدل‌سازی پیشرو اشیاء مصنوعی فرضی متناظر با اهداف متداول در کاربردهای ژئوتکنیکی و شناسایی ساختار، در محیط نرم‌افزار MATLAB بهبودیافته است [38]. تئوری پایه کدهای مدل‌سازی پیشرو GPR، معادلات کرل ماکسول (قانون القای فاراده و تعمیم قانون مداری آمپر) می‌باشند. از آنجایی که مطابق شکل ۴(ب) سیگنال تریس‌های پاسخ GPR در محدوده ناهمگنی‌های زیرسطحی، یک جابجایی زمانی دارند، این ویژگی اجازه به کارگیری تبدیل فوریه تریس‌ها و اعمال جابجایی زمانی در حوزه فرکانسی را فراهم می‌آورد. با این نگرش از تبدیل فوریه سریع هر دو تریس متوالی که دارای یک جابجایی زمانی معین می‌باشند و اعمال قضیه جابجایی زمانی در حیطه فوریه مطابق رابطه ۱ استفاده شده است [38].

(۱)

$$f(t-t_0) \xleftrightarrow{F} e^{-i\omega t_0} F(\omega)$$

که در این قضیه معروف تبدیل فوریه، t و t_0 زمان، ω فرکانس زاویه‌ای و F علامت تبدیل فوریه است. $i = \sqrt{-1}$

در این روش ابتدا بیشترین مقدار دامنه هر تریس به عنوان شروع سیگنال بازتابی اول، برای تمام تریس‌ها شناسایی شده، سپس اختلاف زمانی بین سیگنال بازتابی اول در هر دو تریس متوالی، تعیین گردیده و به صورت جابجایی زمانی در فواصل مکانی بین هر دو تریس متوالی، ذخیره می‌گردد. بعد با استفاده از تبدیل فوریه هر دو تریس مجاور و داشتن این میزان جابجایی زمانی، با استفاده از درون‌یابی در فاصله بین هر دو تریس متوالی و ایجاد دامنه‌های پاسخ‌های بازتابی مقادیر تریس‌های تخمینی، به تعداد دلخواه، تریس مصنوعی محاسبه می‌شود. از آنجایی که پاسخ GPR اغلب اهداف مدفون مطابق شکل ۳ به صورت هذلولی است، بنابراین برای درون‌یابی بین دو تریس مجاور، جهت حفظ شکل منحنی‌وار، از درون‌یابی یک‌بعدی مکعبی (Cubic) استفاده شده است. به منظور افزایش سرعت اجرای برنامه و تمرکز بیشتر بر روی پاسخ هدف، رخداد مربوط به موج

نشان داده شده است. محیط میزبان در این حالت خاک رس سیلتی بوده و فرکانس مرکزی آنتن GPR، ۲۵۰ MHz، انتخاب شده است. مطابق این شکل در مورد یک قبر خالی، پاسخ سقف مدل به صورت یک شبه هذلولی با پیک مسطح و پاسخ کف مدل به صورت یک شبه هذلولی ناقص با پیک مسطح است. به عبارت دیگر تصویر دو شکل هذلولی که توسط خط بازتابنده افقی جدا شده است، قابل مشاهده است. بنابراین در تفسیر نتایج برداشت‌های واقعی GPR این نوع پاسخ، نشانه حضور یک ساختار مکعبی شکل همانند یک قبر مدفون است. در پاسخ کف قبر، تا حدودی تضعیف سیگنال در امواج راداری مشاهده می‌شود. در مورد داده‌های واقعی در اثر وجود نوفه (پارازیت)، اختلاف بیشتری در دامنه بازتاب‌های سقف و کف قبر دیده می‌شود.

در شکل ۸ در قسمت پایین، مدل هندسی - فیزیکی و در قسمت بالا پاسخ GPR بخش‌هایی از استخوان بدن انسان در دو بعد، شبیه‌سازی شده است. در شکل الف) پیمایش در راستای درازای استخوانی به طول ۵۰ cm و

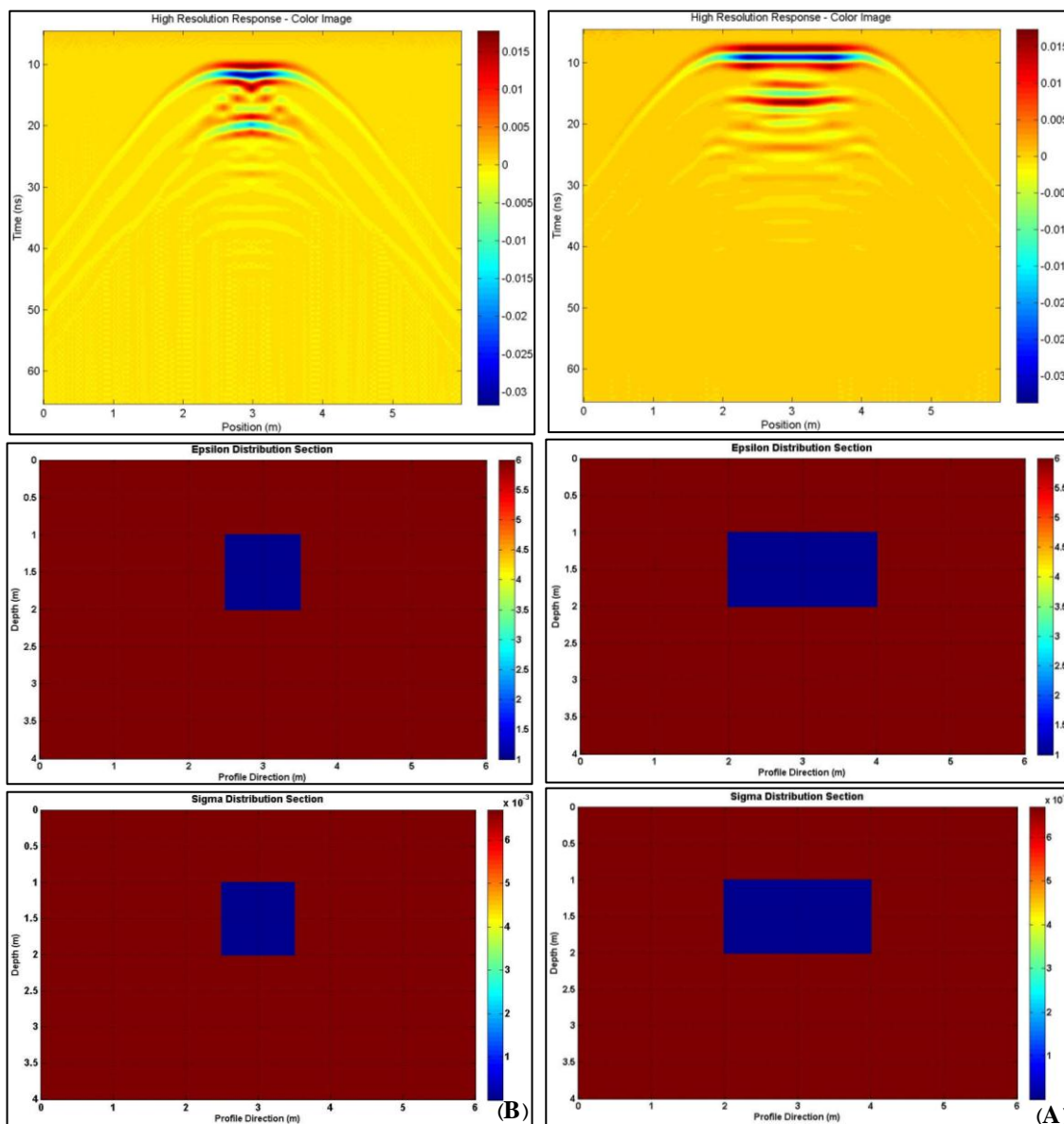
موفقیت در این زمینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. جنس محیط میزبان از نوع خاک رس سیلتی، شن و ماسه خشک یا خاک ماسه‌ای انتخاب شده است. به منظور اجتناب از پراکندگی عددی (دگرنامی مکانی)، فواصل گسسته‌سازی مکانی (ابعاد شبکه) در راستای محورهای X و Z برابر با ۰/۰۱m و برای جلوگیری از ناپایداری عددی، فاصله گسسته‌سازی زمانی (فواصل نمونه‌برداری زمانی) برابر با ۰/۰۰۵ نانوثانیه تعیین شده است. در واقعیت معمولاً تابوت‌ها در عمق ۱ft تا ۲ft قرار دارند؛ عمق دفن سطح بالایی جسد یا تابوت نیز ۰/۸m تا ۱/۲m و عمق کلی قبر، حداکثر ۲m است که در مدل‌سازی‌ها نیز این مقادیر منظور شده است.

در شکل ۷ مدل هندسی - فیزیکی (در قسمت پایین) و پاسخ GPR آن (در قسمت بالا) برای شبیه‌سازی دوبعدی پاسخ GPR یک قبر خالی واقع در عمق ۱m (فاصله از سطح زمین تا سطح بالایی فضای خالی) در دو حالت الف) پیمایش در راستای امتداد طولی قبر و ب) پیمایش در راستای عمود بر امتداد طولی قبر

جدول ۲: برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه [39-41]

Table 2: Some of the electrical properties of studied materials [39-41]

سرعت موج EM (m/ns) Velocity of EM wave (m/ns)	هدایت الکتریکی (mS/m) Conductivity (mS/m)	گذردهی دی‌الکتریک نسبی Relative dielectric permittivity	ماده (محیط) Material (medium)
0.12	6.67	6	خاک رس سیلتی Silty clay soil
0.3	0	1	هوا Air
	1.4	10	خاک ماسه‌ای معمولی Ordinary sandy soil
0.15	0.05	4	شن و ماسه خشک Dry sand and gravel
0.07	10	19	شن و ماسه مرطوب Wet sand and gravel
0.017	10 ⁴ -10 ⁷	100-300	فلز Metal
	0.33*10 ⁻¹²	2.3	چوب خشک Dry wood
	0.14	2.6	خاک ماسه‌ای خشک Dry sandy soil
	6.9	25	خاک ماسه‌ای مرطوب Wet sandy soil
	0.7	23	استخوان بدن انسان Bone of the human body

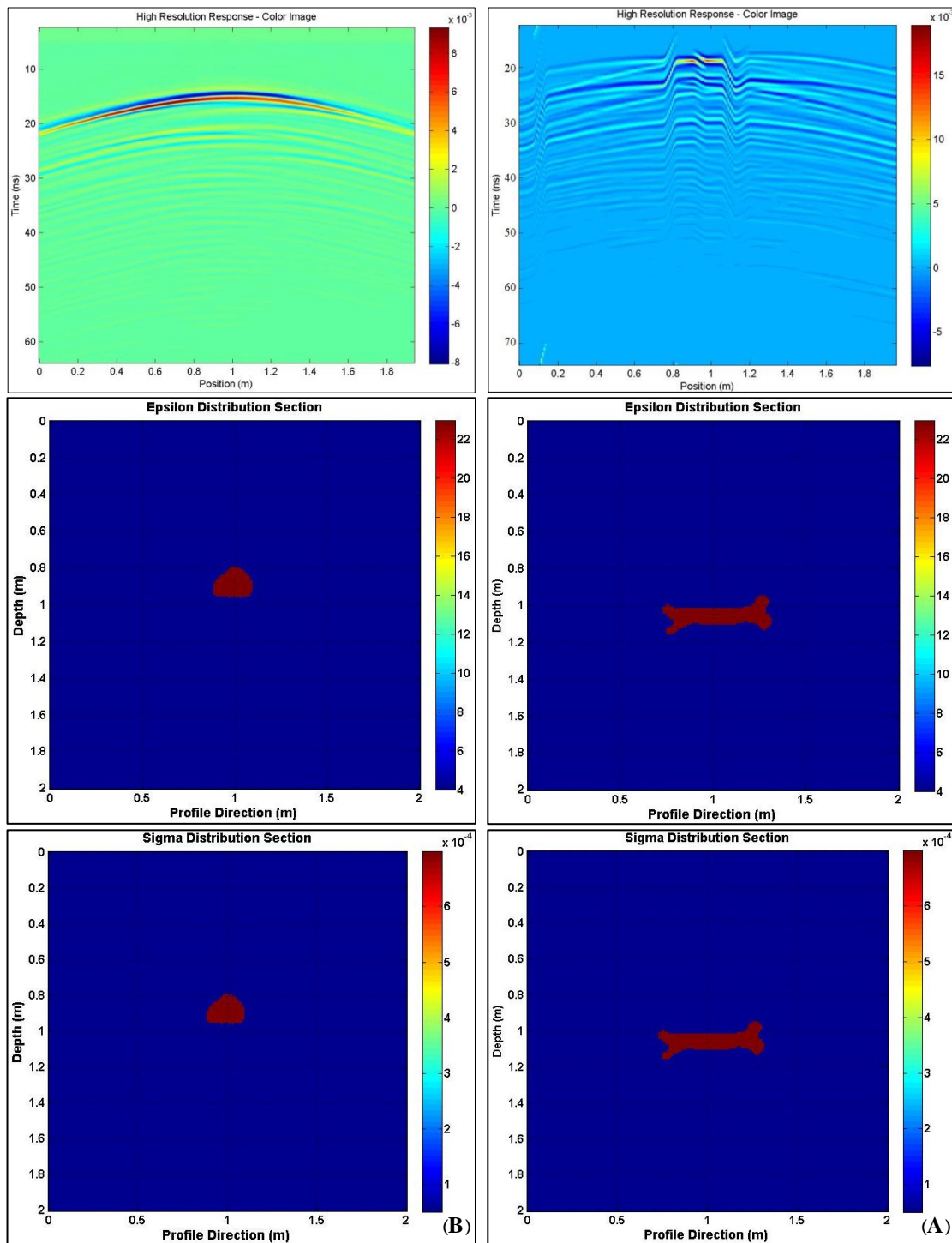


شکل ۷: مدل هندسی - فیزیکی (ردیف وسط، گذردهی دی‌الکتریک و ردیف پایین، هدایت الکتریکی) و پاسخ GPR آن (در قسمت بالا) برای (الف) پیمایش در راستای امتداد طولی یک قبر خالی و (ب) پیمایش در راستای عمود بر امتداد طولی یک قبر خالی

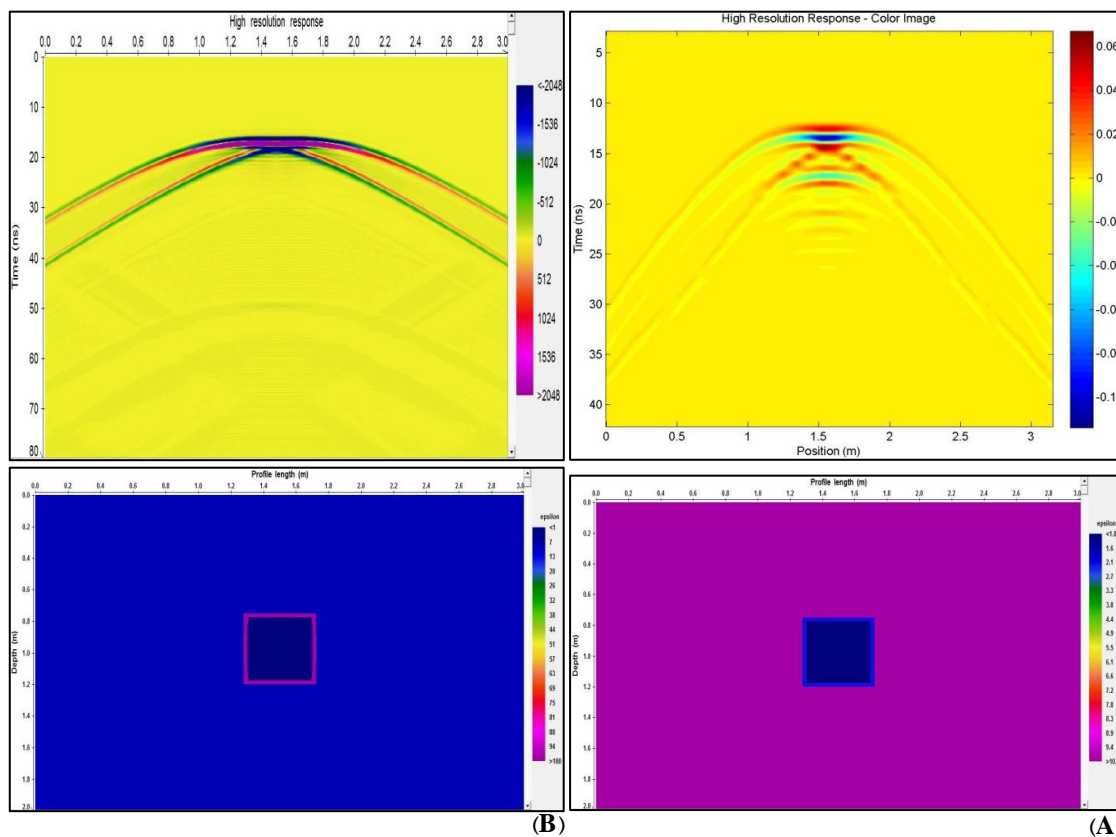
Fig. 7: Geometrical-physical model (middle and bottom rows indicate dielectric permittivity and electrical conductivity, respectively) and its GPR response (at the top) for A) traverse along the longitude of an empty grave, B) traverse along perpendicular the longitude of an empty grave

با توجه به این شکل می‌توان گفت که به‌طور کلی پاسخ GPR استخوان بدن انسان، خود را به‌صورت یک بازتاب هذلولی شکل نشان می‌دهد. در مورد استخوان قسمت‌های مختلف بدن انسان (به‌جز استخوان جمجمه که تقریباً کروی شکل است) با اشکال هندسی نامنظم، به‌هم‌ریختگی‌هایی در پاسخ هذلولوی شکل GPR مشاهده می‌شود و برای استخوان‌های کشیده و طویل،

عرض ۸ cm واقع در عمق دفن یک متر (فاصله از سطح زمین تا بالاترین قسمت استخوان) و در شکل ب) پیمایش بر روی استخوان جمجمه به ابعاد ۱۵×۱۸ cm واقع در عمق دفن ۸۰ سانتی‌متری (فاصله از سطح زمین تا بالاترین قسمت استخوان) صورت گرفته است. در این مورد محیط میزبان، شن و ماسه خشک بوده و فرکانس مرکزی آنتن GPR، ۵۰۰ MHz انتخاب شده است.



شکل ۸: مدل هندسی- فیزیکی (ردیف وسط، گذردهی دی‌الکتریک و ردیف پایین، هدایت الکتریکی) و پاسخ GPR آن (در قسمت بالا) برای (الف) پیمایش در راستای طولی یک استخوان بلند و (ب) پیمایش بر روی استخوان جمجمه
 Fig. 8: Geometrical-physical model (middle and bottom rows indicate dielectric permittivity and electrical conductivity, respectively) and its GPR response (at the top) for A) traverse along the longitude of the long bone, B) traverse on the skull bone



شکل ۹: مدل هندسی- فیزیکی - فیزیکی (هدایت الکتریکی در قسمت پایین) و پاسخ GPR آن (در قسمت بالا) برای تابوت با دو جنس مختلف (الف) چوبی و (ب) فلزی با پیمایش در راستای عمود بر امتداد طولی تابوت

Fig. 9: Geometrical-physical model (electrical conductivity at the bottom) and its GPR response (at the top) for a coffin with 2 different material types A) wooden, B) metallic by traverse along perpendicular the longitude of the coffin

تابوت‌ها در سطح مقطع دوبردی ۴۵×۴۵ cm، ضخامت دیواره آن‌ها ۵ cm و عمق دفن آن‌ها ۷۵ cm (فاصله از سطح زمین تا سطح بالایی تابوت) است. در این مورد جنس محیط میزبان، خاک ماسه‌ای معمولی و فرکانس مرکزی آنتن GPR، ۴۰۰ MHz انتخاب شده است.

با توجه به این شکل‌ها هنگامی که هدف مدفون دارای شکل هندسی مانند یک تابوت چوبی بوده و با هوا پر شده باشد، دو اثر متفاوت در پاسخ دیده می‌شود. در این مورد پاسخ سقف تابوت در حدود ۱۳ نانوثانیه و اثر کف تابوت در حدود ۱۷ نانوثانیه به‌وضوح مشخص بوده و شدت بازتاب هر دو پاسخ نسبتاً قوی است. همچنین جنس دیواره چوبی هیچ‌گونه تأثیری در پاسخ ندارد زیرا از یکسو ضخامت دیواره چوبی در مقایسه با ابعاد تابوت نسبتاً کوچک است و از سوی دیگر چوب و هوا از نظر هدایت الکتریکی و گذردهی دی‌الکتریک، اختلاف

گاهی هذلولوی به‌قدری پهن و هموار می‌شود که شبیه یک رخداد افقی نمایان می‌گردد. در این مورد هم وجود بازتاب‌های چندگانه در زیر پاسخ قسمت فوقانی استخوان، ناشی از بازتاب امواج وارد شده به درون استخوان و برخورد به نقاط مختلف قسمت پایینی استخوان است که بعضاً به‌صورت مکرر درون خود استخوان صورت می‌گیرد.

در شکل ۹ مدل هندسی- فیزیکی و پاسخ GPR دوبردی تابوت توخالی (صد درصد پر از هوا) با دو جنس مختلف (الف) چوبی و (ب) فلزی در راستای عمود بر امتداد طولی تابوت‌ها شبیه‌سازی شده است. اغلب تابوت‌های قدیمی از جنس چوب با طرح و فرم‌های گوناگون و زینتی هستند و تابوت‌های نسبتاً جدیدتر از فلز ساخته شده‌اند. به همین دلیل در این بخش این دو نوع جنس برای مدل‌سازی استفاده شده است. ابعاد

انجام گرفته که توالی مراحل پردازشی شامل تصحیح ساکن (Static correction)، بردارنده میانگین (Subtract mean) یا دی‌واو (Dewow)، اعمال فیلتر میان‌گذر (Band pass filter)، بردارنده زمینه (Background removal) و برانبارش (Stacking) است. تصحیح ساکن برای تصحیح ارتفاع سیگنال‌ها مطابق ارتفاع سطح مبنای ژئوتیوید، فیلتر دی‌واو به منظور حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده‌ها و افزایش تفکیک‌پذیری تصویر، فیلتر میان‌گذر از نوع باتوروث (Butterworth) با دامنه فرکانسی ۶۵۰ تا ۹۵۰ MHz (بر اساس سعی و خطا) برای جداسازی نوفه‌ها از سیگنال ارسال شده اولیه، فیلتر بردارنده زمینه برای حذف نوفه‌های باقیمانده و برانبارش به منظور افزایش نسبت سیگنال به نوفه استفاده شد. نداشت راداری مربوط به این پروفیل نشان می‌دهد که با استفاده از روش GPR مؤلفه‌هایی از مواد زیرسطحی قابل مشاهده هستند. بر روی پاسخ GPR از طریق بیضی‌های آبی‌رنگ، موقعیت قبرهای شناخته شده (معلوم) با شدت بازتاب‌های قوی به وضوح قابل مشاهده است که با استفاده از فلش‌های قرمز رنگ به موقعیت واقعی قبرها ارتباط داده شده‌اند (فلش قرمز رنگ نشان‌دهنده ظاهر شدن جسد در نداشت راداری است).

در بیضی‌های آبی‌رنگ با توجه به موقعیت قبرها احتمالاً پاسخ‌ها، مربوط به اجساد مدفون (استخوان‌های بدن انسان) هستند و نمی‌توان آن‌ها را مبنی بر وجود تابوت درون زمین تفسیر نمود. زیرا اگر تابوت فلزی وجود می‌داشت، هیچ پاسخی از زیر تابوت دریافت نمی‌شد و اگر هم تابوت غیرفلزی مدفون می‌بود، فاصله زمانی بین سقف و کف تابوت خیلی بیشتر از زمان‌های به دست آمده می‌شد. هرچند در این مورد شکل هذلولی‌ها بسیار به هم ریخته، تکه‌تکه و هموار شده است به گونه‌ای که پاسخ نهایی، تقریباً به صورت یک‌سری رخدادهای افقی به نظر می‌رسد. این موضوع به نوع استخوان بدن انسان، راستای پیمایش و ناهمگنی‌های زیرسطحی در برداشت‌های واقعی مربوط است. به هر جهت راهنمای اصلی در این مورد تباین دامنه امواج نسبت به زمینه است. بیضی‌های قرمز رنگ مربوط به موقعیت قبرهایی در سطح زمین است که رخداد خاصی در پاسخ آن‌ها

چندانی ندارند. اثراتی هم که در زیر پاسخ کف تابوت مشاهده می‌شوند، ناشی از بازتاب‌های چندگانه امواج در فضای خالی درون تابوت هستند. در مورد تابوت فلزی، پاسخ سقف (در حدود ۱۳ نانوثانیه) نسبت به نمونه چوبی قوی‌تر است (به دلیل بالا بودن گذردهی دی‌الکتریک فلزات) اما در زیر تابوت فلزی، تضعیف سیگنال قابل توجهی در امواج راداری مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر هیچ بازتابی از کف آن مشاهده نمی‌شود که دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج الکترومغناطیسی به واسطه هدایت الکتریکی بالای فلزات است. اگر هم در مدل‌سازی به هر دلیل (مثلاً در نظر گرفتن ضخامت بسیار ناچیز برای پوسته فلزی تابوت یا انتخاب هدایت الکتریکی بسیار کم برای آن) بخشی از موج الکترومغناطیسی بتواند از سقف تابوت عبور نماید، به خاطر کم بودن فاصله بین سقف و کف تابوت و نیز سرعت بسیار زیاد موج الکترومغناطیسی در هوا، دو پاسخ سقف و کف با یکدیگر ترکیب می‌شوند و در نتیجه پاسخ واضحی از کف تابوت قابل مشاهده نیست و این نشانه بارز شناسایی جنس تابوت فلزی در عمل است. به علت میرایی زیاد در حضور تابوت فلزی عملاً هیچ موجی وارد آن نشده و حتی اگر داخل تابوت فلزی استخوان سالم هم وجود داشته باشد، چیزی مشاهده نخواهد شد.

۴-۵. بررسی پاسخ داده‌های واقعی GPR

به منظور بررسی‌های زیرسطحی و تعیین موقعیت قبرهای ناشناخته در یک قبرستان نسبتاً قدیمی، عملیات برداشت GPR با استفاده از یک دستگاه GPR ساخت شرکت MALA سوئد مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار (Shielded) با فرکانس مرکزی ۸۰۰ MHz [42] انجام شد. به عنوان نمونه در شکل ۱۰ شیوه انجام عملیات برداشت به روش پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت تک حالتی و پاسخ GPR یکی از پروفیل‌های GPR نشان داده شده است. گفتنی است که به دلیل وجود اختلاف ارتفاعی حدود ۱۰ cm روی هر قبر با سطح زمین، برای حرکت راحت‌تر سیستم برداشت GPR بین دو قبر متوالی، یک تخته مورد استفاده قرار گرفت. پردازش داده‌های برداشت شده نیز با استفاده از نرم‌افزار ReflexW



شکل ۱۰: برداشت داده‌های GPR بر روی یک قبرستان قدیمی
Fig. 10: GPR data acquisition on the ancient cemetery

آشکارسازی و تشخیص موقعیت قبرهای نامشخص و اجساد مدفون، به‌ویژه مدل‌های مصنوعی فرضی به شکل قبرهای خالی، اسکلت (استخوان قسمت‌های مختلف بدن انسان) و تابوت‌های با جنس‌های معمول چوبی و فلزی و نیز پردازش و تفسیر نگاشت راداری واقعی منطبق بر یکی از پروفیل‌های برداشت‌شده در یک قبرستان نسبتاً قدیمی، صورت گرفت. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که آثار اهداف مذکور در پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی، به شکل‌های مختلف از جمله هذلولی و هذلولوی مشهود است و نتایج مدل‌سازی پیشروی داده‌ها با نگاشت راداری داده‌های واقعی GPR نیز تطابق دارد. البته در داده‌های واقعی GPR به دلیل پیچیدگی بیشتر محیط‌ها به‌ویژه به‌هم‌ریختگی‌های خاک‌های روی اهداف و نیز آغشته بودن محیط‌ها به انواع نوفه‌ها، آثار به‌هم‌ریختگی‌ها و اثرات نوفه‌ها در قسمت بالای پاسخ اهداف نیز قابل مشاهده هستند.

به‌طور کلی بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت روش GPR یک روش باستان‌ژئوفیزیک است که

مشهود نیست؛ به‌عبارت‌دیگر تباین دامنه‌چندانی بین سیگنال بازتابی و زمینه وجود ندارد. در شکل ۱۰ فلش‌های قائم، موقعیت‌های خاص را نشان می‌دهند و فلش تیره اثر تخته را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال فلش قائم دوم از سمت چپ موقعیت پرش در زمان اولین رسید موجک هوا-زمین تحت عنوان نقطه زمان-صفر را نمایش می‌دهد و مربوط به ناهمواری‌های سطح زمین (کنده‌کاری‌های مابین قبرها) در راستای پروفیل برداشت است. مطابق این شکل در بسیاری از مواقع در عمل، به‌هم‌ریختگی‌های خاک روی سطح جسد یا تابوت در پاسخ امواج GPR به‌وضوح قابل مشاهده است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر امکان به‌کارگیری روش ژئوفیزیکی GPR به‌عنوان یکی از روش‌های غیرمخرب و با قدرت تفکیک زیاد، در مقاصد باستان‌سنجی موردبررسی قرار گرفت. در این راستا شبیه‌سازی و مدل‌سازی مصنوعی پیشروی داده‌های GPR متناظر با اهداف متداول در زمینه

نامشخص، تابوت‌های با جنس‌های گوناگون و اجساد مدفون در زیر زمین را دارا است.

قابلیت کاربرد در زمینه مطالعات باستان‌شناسی در خصوص آشکارسازی و تعیین موقعیت قبرهای

References

- [1] Annan AP. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors & Software Inc., Ontario, Canada. 2001.
- [2] Knödel K, Lange G, Voigt HJ. Environmental geology: handbook of field methods and case studies. Springer Science & Business Media; 2007 Dec 31.
- [3] Ali Tajer S, Afshari Azad S. Investigating the role of geomatics engineering in the applications of cultural heritage, archeology and architecture. *Pazhohesh-ha-ye Bastanshenasi Iran*. 2014; 3(5):169-195. [in Persian]
 [علیتاجر سعید، افشاری‌آزاد سمیه. بررسی جایگاه مهندسی ژئوماتیک در کاربردهای میراث فرهنگی- باستان‌شناسی و معماری. دو فصلنامه علمی- پژوهشی پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران. ۱۳۹۲، ۵(۳): ۱۶۹-۱۹۵.]
- [4] Sleep NH, Fujita K. Principles of geophysics. Malden, Massachusetts: Blackwell Science; 1997.
- [5] Vickers R, Dolphin L, Johnson D. Archeological investigations at chaco canyon using a subsurface radar.
- [6] Fischer PM, Follin SG, Ulriksen P. Subsurface Interface Radar Survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus. *Swedish Annual Studies in Mediterranean Archaeology*. 1980;63:48-64.
- [7] Sheets PD, Loker WM, Spetzler HA, Ware RW. Geophysical exploration for ancient Maya housing at Ceren, El Salvador. *National Geographic Research Reports*. 1985;20:645-56.
- [8] Conyers LB, Goodman D. Ground-penetrating radar. An Introduction for Archaeologist: AltaMira Press; 1997 Mar.
- [9] Martino L, Bonomo N, Lascano E, Osella A, Ratto N. Electrical and GPR prospecting at Palo Blanco archaeological site, northwestern Argentina. *Geophysics*. 2006 Nov;71(6):B193-9. [doi.org/10.1190/1.2345193]
- [10] Arciniega-Ceballos A, Hernandez-Quintero E, Cabral-Cano E, Morett-Alatorre L, Diaz-Molina O, Soler-Arechalde A, Chavez-Segura R. Shallow geophysical survey at the archaeological site of San Miguel Tocuala, Basin of Mexico. *Journal of Archaeological Science*. 2009 Jun 1;36(6):199-205. [doi.org/10.1016/j.jas.2009.01.025]
- [11] Goodman D, Piro S, Nishimura Y, Schneider K, Hongo H, Higashi N, Steinberg J, Damiata B. GPR archaeometry. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. 2008 Dec 8:479-508. [doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00015-6]
- [12] Sambuelli L, Calzoni C, Stocco S, Rege R. Geophysical measurements on the occasion of the moving of an ancient Egyptian sculpture. In *Proc. GNGTS Conf.(Trieste, Italy, 16–19 November) 2010 Nov (pp. 595-9)*.
- [13] Solla M, Lorenzo H, Novo A, Riveiro B. Evaluation of ancient structures by GPR (ground penetrating radar): the arch bridges of Galicia (Spain). *Scientific Research and Essays*. 2011 Apr 18;6(8):1877-84.
- [14] Shyeh SK, Nordiana MM, Anuar S, Saad R, Saidin M. Archaeological Evidences Detection by using GPR Method: SB2K Site. *EJGE, Bund. Y*. 2014;19:8569-78.
- [15] Aydin A, Baykan O, Akyol E. Detecting ancient water distribution system using GPR in Patara, Antalya, Turkey. *Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*. 2014;1(5):32-8.
- [16] Ahmadpour A, Kamkar Rouhani A, Ahmadi R. Archeological exploration of Tappeh Hissar, Damghan using forward and inverse modeling of Ground-Penetrating Radar data. *Journal of Research on Archaeometry*. 2016 Sep 10;2(1):1-6. [doi.org/10.29252/jra.2.1.1]

- [17] Mellett JS. Location of human remains with ground-penetrating radar. In Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar 1992 Jun 8 (pp. cp-303). European Association of Geoscientists & Engineers. [doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.303.45]
- [18] Patch, Sh., (2009), Identification of unmarked graves at B.F. Randolph cemetery using Ground Penetrating Radar (GPR), Report submitted to Historic Columbia Foundation.
- [19] Barone PM, Swanger KJ, Stanley-Price N, Thursfield A. Finding graves in a cemetery: preliminary forensic GPR investigations in the non-Catholic cemetery in Rome (Italy). *Measurement*. 2016 Feb 1;80:53-7. [doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.023]
- [20] Fernández-Álvarez JP, Rubio-Melendi D, Martínez-Velasco A, Pringle JK, Aguilera HD. Discovery of a mass grave from the Spanish Civil War using Ground Penetrating Radar and forensic archaeology. *Forensic Science International*. 2016 Oct 1;267:e10-7. [doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.05.040]
- [21] Widodo W, Aditama IF, Syaifullah K, Mahya MJ, Hidayat M. Detecting buried human bodies using ground-penetrating radar. *Earth Science Research*. 2016;5(2):59. [doi.org/10.5539/esr.v5n2p59]
- [22] Amari IE, Alsulaimani GS. Detecting and Imaging Historical Graves by Using Visual Inspection and Ground Penetrating Radar Investigation.
- [23] Oveisi-Moakhar M, Ghasemi V, Shah-Nazari, H. Magnetic and radar studies on the arches of Khosrow historical structure in Ghasr-e-Shirin city. 12th Geophysics Conference of Iran, 2005. [in Persian]
[اویسی موخر محسن، قاسمی وحید، شاه نظری حسین. مطالعه مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین. دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۱۳۸۴].
- [24] Reshmeh-Karim A, Kamkar-Rouhani A, Arab-Amiri A. Application of Ground-Penetrating Radar (GPR) method in archaeology investigations, case study: Damghan Tappeh-Hissar. 15th Symposium of Geological Society of Iran, 2001. [in Persian]
[رشمه کریم ارژنگ، کامکار روحانی ابوالقاسم، عرب امیری علیرضا. استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در کاوش‌های باستان‌شناسی، مطالعه موردی سایت تپه حصار دامغان. پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۱۳۹۰].
- [25] Mohammad khani K. Application of exploration geophysics methods in archaeology (archaeogeophysics), case study: study of magnetometry in Takht-e-Jamshid and Pasargad, MSc. Thesis on archaeology, Tarbiat Modares University 2004. [in Persian]
[محمدخانی، کورش. کاربرد روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی (آرکئوژئوفیزیک)، مطالعه موردی: بررسی مغناطیس‌سنجی در تخت جمشید و پاسارگاد. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، باستان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس ۱۳۸۳].
- [26] <http://jamejamonline.ir/online/2853378112472890822/>
- [27] <http://elmi.akaup.com/elmi/chemistry1/news20177822331357613.html>
- [28] Golalipour M.J, Jahanshahi M, Haydari K, Rezaee N. Estimation of cranial capacity of Turkman's 17-20 years old in Gorgan-North of Iran 2005, 7(1): 31-33. [in Persian]
[گلعلی‌پور محمدجعفر، جهانشاهی مهرداد، حیدری کامران، رضائی نورالله. تعیین حجم جمجمه در بالغین ۱۷-۲۰ ساله گروه قومی ترکمن در شهرستان گرگان. مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی گرگان ۱۳۸۴، ۷(۱): ۳۱-۳۳].
- [29] [https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bones_of_the_human_skeleton#Spine_\(vertebral_column\)](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bones_of_the_human_skeleton#Spine_(vertebral_column))
- [30] Annan AP. GPR—History, trends, and future developments. *Subsurface sensing technologies and applications*. 2002 Oct 1;3(4):253-70.

- [doi.org/10.1023/A:1020657129590]
- [31] <https://www.impulseradar.se/technology>
- [32] tagrsi.com/examples/. Sturm Inc., TAG research, Technical. Archaeological. Geophysical. Solutions.
- [33] www.google.com/search?q=gpr+images
- [34] Jol HM, editor. Ground penetrating radar theory and applications. elsevier; 2008 Dec 8.
- [35] Annan AP. GPR methods for hydrogeological studies. In Hydrogeophysics 2005 (pp. 185-213). Springer, Dordrecht. [doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_7]
- [36] Sadiku MN. Numerical techniques in electromagnetics. CRC press; 2000 Jul 12. [doi.org/10.1201/9781420058277]
- [37] Irving J, Knight R. Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB. Computers & Geosciences. 2006 Nov 1;32(9):1247-58. [doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.006]
- [38] Ahmadi R, Fathianpour N, Norouzi G.H. Improving Ground-Penetrating Radar (GPR) forward modeling approach using the numerical finite difference method, Iranian Journal of Geophysics 2014, 8(3): 114-130. [in Persian]
 [احمدی رضا، فتحیان‌پور نادر، نوروزی غلامحسین. بهبود مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به روش عددی تفاضل متناهی. مجله ژئوفیزیک ایران ۱۳۹۳، ۸(۳): ۱۱۴-۱۳۰.]
- [39] Davis JL, ANNAN AP. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1. Geophysical prospecting. 1989 Jul;37(5):531-51. [doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x]
- [40] Zeng X, McMechan GA. GPR characterization of buried tanks and pipes. Geophysics. 1997 May;62(3):797-806. [doi.org/10.1190/1.1444189]
- [41] Ahmadi R, Fathianpour N, Norouzi GH. Detecting physical and geometrical parameters of some common geotechnical targets through their effects on GPR responses. Arabian Journal of Geosciences. 2015 Jul 1;8(7):4843-54. [doi.org/10.1007/s12517-014-1517-5]
- [42] Ahmadi R. Developing an intelligent algorithm to detect geometrical and physical parameters of geotechnical targets using GPR responses. Ph.D thesis, Mining engineering department, College of engineering, University of Tehran. 2015. [in Persian]
 [احمدی رضا. تهیه الگوریتمی هوشمند جهت شناسایی مشخصات فیزیکی و هندسی اهداف ژئوتکنیکی با استفاده از پاسخ امواج GPR، رساله دکترای تخصصی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ۱۳۹۳.]