
Archaeological Exploration of Tappeh Hissar, Damghan Using Forward and Inverse Modeling of Ground- Penetrating Radar Data

Afsaneh Ahmadpour^{*1}, Abolghasem Kamkar-Rouhani², Reza Ahmadi³

¹ *M.S in the field of Geoelectric, Shahrood University of Technology, Shahrood. IRAN*

² *Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering Shahrood University of Technology, Shahrood. IRAN*

³ *Assistance Professor, Faculty of Mining Engineering Arak University of Technology, Arak. IRAN*

Abstract

Ground penetrating radar (GPR) method is a non-destructive geophysical method that is used to detect subsurface heterogeneities and also recognition of various shallow targets. In present research, forward and inverse modeling of GPR data applied for archaeological study has been made. The study area is Tappeh Hissar, Damghan, in which GPR data along several survey lines have been acquired using 250 MHz shielded antenna for archaeological investigations. To achieve the goal, the real radar-gram of a survey line in the area has been obtained after applying different processing operations containing signal saturation correction and applying band-pass, auto-gain control and background re-moval filters on the GPR data using Reflexw software. Then, the synthetic radargram corresponding to the real radargram has been simulated using finite-different time domain (FDTD) method. After-ward inversion method with solution of an optimization problem was employed for validation of in-terpretation of GPR radargram in order to detect buried targets. The results of this research, that are based on the agreement between the radargram obtained from the real GPR data and the synthetic radargram corresponding to the real radargram, confirm the correctness of the interpretation of sub-surface archaeological investigations in the area, and thus, indicate the capability of application of GPR method for archaeological exploration.

Keywords: Archaeology, Tappeh Hissar, Ground penetrating radar (GPR), Forward modeling, Inverse modeling.

* Corresponding author: aahmadpour_geo@shahroodut.ac.ir

بررسی‌های باستان‌شناسی منطقه تپه حصار دامغان با استفاده از مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های رادار نفوذی به زمین

افسانه احمدپور^{۱*}، ابوالقاسم کامکار روحانی^۲، رضا احمدی^۳

۱. کارشناسی ارشد ژئوالکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

چکیده

روش رادار نفوذی به زمین (GPR) یک روش ژئوفیزیکی غیر مخرب است که قادر به آشکارسازی انواع ناهمگنی‌های زیرسطحی و نیز شناسایی انواع اهداف مدفون در اعماق کم است. در پژوهش حاضر مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR با هدف کاربرد در زمینه باستان‌شناسی، انجام شده است. منطقه مورد مطالعه، منطقه باستانی تپه حصار دامغان است که در این منطقه با هدف بررسی‌های باستان‌شناسی زیرسطحی، تعدادی پروفیل GPR با استفاده از یک سامانه GPR مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، برداشت شده است. برای دستیابی به هدف، نگاشت راداری نهایی مطلوب داده‌های واقعی GPR منطبق بر یکی از پروفیل‌های برداشت در این منطقه، با اعمال مراحل پردازشی مختلف مانند تصحیح اشباع سیگنال، فیلترهای میان‌گذر، کنترل بهره خودکار و بردارنده زمینه بر روی داده‌های خام، با استفاده از نرم‌افزار Reflexw آماده‌سازی شد. سپس پاسخ GPR مدل مصنوعی متناظر با نگاشت راداری منطبق بر این پروفیل، به روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) دوبعدی، شبیه‌سازی شد. در ادامه برای اعتبارسنجی تعبیر و تفسیر برداشت‌های GPR واقعی به‌منظور آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون، از روش مدل‌سازی وارون با حل یک مسأله بهینه‌سازی، استفاده شد. نتایج این پژوهش بر اساس بررسی میزان تطابق نگاشت راداری داده‌های واقعی GPR با پاسخ GPR مدل مصنوعی تولید شده متناظر با آن، ضمن تأیید درستی تفسیر زیرسطحی انجام شده در منطقه باستانی تپه حصار دامغان، قابلیت کاربرد این روش را در زمینه بررسی‌های باستان‌شناسی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: باستان‌شناسی، تپه حصار دامغان، رادار نفوذی به زمین (GPR)، مدل‌سازی پیشرو، مدل‌سازی وارون.

* نویسنده مسئول: مکاتبات: دانشگاه صنعتی شاهرود، کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱

پست الکترونی: Aahmadpour_geo@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی‌های باستان ژئوفیزیکی شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌ها و روش‌هایی است که در راستای ثبت ویژگی‌های فیزیکی بخش‌های نزدیک به سطح زمین گسترش یافته است. در این روش‌ها با اندازه‌گیری در نقاطی بر روی سطح زمین می‌توان به بخشی از ویژگی‌ها و تغییرات در شرایط فیزیکی زیرین زمین و تفاوت‌هایی که در نقاط مختلف وجود دارد پی برد. با اندازه‌گیری و تعیین این تفاوت در بخش‌های مختلف که از آن با عنوان بی‌هنجاری یا آنومالی یاد می‌شود و به سبب تغییر در مقادیر مورد اندازه‌گیری در یک محل به نسبت محیط اطراف آن به دست می‌آید و سپس انجام پردازش‌های ویژه بر روی داده‌ها و در نهایت تهیه نقشه‌های مربوطه می‌توان یک توده را که نسبت به اطرافش دارای تفاوت‌های فیزیکی محسوس باشد در زیر سطح زمین آشکار نمود. روش‌های ژئوفیزیکی که در باستان‌شناسی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد دارای طیف وسیعی است که می‌توان به تصویربرداری‌های فضایی و هوایی، روش‌های سنجش از راه دور، روش‌های حرارتی و تصویربرداری با استفاده از پرتوهای فروسرخ، روش‌های مغناطیس‌سنجی، الکتریکی، رادار زمینی، الکترومغناطیسی، چگالی‌سنجی، لرزه‌نگاری و رادیومتری اشاره نمود. روش رادار نفوذی به زمین (GPR)، یک روش ژئوفیزیکی مبتنی بر انتشار امواج الکترومغناطیسی است که به‌عنوان روشی غیر مخرب برای به تصویر درآوردن لایه‌ها و ناهمگنی‌های زیرسطحی به کار می‌رود (Daniels, 2004; Conyers, 2004). سیستم GPR بدون نیاز به حفاری و تغییر در محیط، یک مقطع پیوسته از زیر زمین را در اختیار قرار می‌دهد. روش GPR در برداشت‌ها دارای چهار مزیت اساسی است: ساده، سریع، غیر مخرب و دقیق با قدرت تفکیک زیاد (Shafri et al., 2008). این خصوصیات باعث شده است تا این روش برای بررسی‌های کم‌عمق، کاربرد روزافزونی پیدا کند. در عین حال کم‌هزینه‌تر بودن این روش نسبت به سایر روش‌های ژئوفیزیکی و اکتشافی و نیز دارا بودن طیف وسیعی از کاربردها به‌ویژه در زمینه باستان‌شناسی از مزایای قابل‌ملاحظه این روش است. بنابراین موفقیت‌آمیز بودن این روش و کاربرد آن در

بررسی‌های مختلف، سبب اهمیت فزاینده این روش و توجه ویژه پژوهشگران به روش‌های مختلف پردازش و مدل‌سازی داده‌های این روش در دهه اخیر شده است. وجود یک دیوار که نسبت به محیط دربرگیرنده‌اش (خاک) از تراکم بیش‌تری برخوردار است، یا وجود یک فضای خالی مانند یک دالان در زیر سطح زمین باعث به وجود آمدن تباین (Contrast) خوبی در خصوصیات فیزیکی یک سازه مدفون با محیط دربرگیرنده می‌شود. از این جهت محوطه‌های باستانی و به‌طور خاص سازه‌های باستانی مدفون در زیر سطح زمین، اهداف اکتشافی مناسبی برای روش‌های مختلف ژئوفیزیکی هستند (Arisoy et al., 2007; Conyers & Goodman, 2004).

از طرفی با توجه به غیر مخرب بودن، سرعت بالای انجام عملیات ژئوفیزیکی و هزینه کم‌تر این روش‌ها نسبت به کاوش‌های اکتشافی، به نظر می‌رسد که استفاده از این روش‌ها در بررسی‌های باستان‌شناسی به‌خصوص پیش از شروع به کار باستان‌شناسان، می‌تواند کمک قابل توجهی به بهینه شدن عملیات اکتشافی نماید. با توجه به محدودیت‌های این روش گاهی در مقاطع به دست آمده از داده‌های رادار، هیچ‌گونه نشانه‌ای از اهداف مورد مطالعه مشاهده نمی‌شود. از این‌رو شناسایی اهداف مدفون یا ناپیوستگی‌ها به وسیله روش GPR، همواره به‌سادگی سایر بی‌هنجاری‌های ناشی از بازتابش امواج رادار نیست (Radzevicius et al., 2000). تمامی مراحل پردازش باید بجا و در حد نیاز صورت پذیرد وگرنه ممکن است پردازش به حدی مقطع داده‌های رادار را ساده نماید که مفسر دچار تصویری اشتباه در مورد شرایط واقعی حاکم در زمین شود. بنابراین در این موارد به‌کارگیری الگوریتم مناسب پردازشی، بسیار مفید خواهد بود. برای آزمودن توانایی روش GPR، در مطالعات این‌چنینی لازم است علاوه بر برداشت و تفسیر داده‌های واقعی، یک مدل مصنوعی متناظر با هدف مورد مطالعه که ویژگی‌های آن شناخته شده است، طراحی و ایجاد گردد. در مدل‌سازی سعی بر آن است تا از بازتاب امواج الکترومغناطیسی ارسال شده به درون زمین، بهترین شبیه‌سازی از ساختار زیرسطحی انجام شود. باید توجه داشت که این روش‌ها می‌توانند نتایج

مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR با هدف بررسی کاربرد آن در زمینه باستان‌شناسی صورت گرفته است. به عبارت دیگر در این پژوهش سعی بر آن است برای اعتبارسنجی تعبیر و تفسیر برداشت‌های GPR و ایجاد مدلی از زمین که پاسخی مشابه داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشد، از روش مدل‌سازی وارون استفاده شود.

۲- پیشینه تحقیق

روش رادار نفوذی به زمین نیز با فرستادن امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا به زمین و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت موج در گیرنده، شکل هندسی، ابعاد، عمق قرارگیری اهداف زیرسطحی و موقعیت فصل مشترک‌ها را در اعماق کم مشخص می‌کند و در نتیجه می‌تواند در بررسی‌های باستان‌شناسی بسیار مؤثر باشد. روش GPR کاربردهای فراوانی در علوم مختلف دارد و به طور گسترده در به تصویر کشیدن اهداف زیرسطحی کم عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقالات و مطالعات گوناگونی در حوزه علوم زمین‌شناسی (Denis et al., 2009; Christie et al., 2009; Pauselli et al., 2010)، زیست‌محیطی (al., 2009; Reynolds, 1997; Knight, 2001)، آب‌شناسی (Hubbard & Rubin, 2005; Lin et al., 2009) مطالعه یخچال‌ها (Brandt et al., 2007; Hagg et al., 2013; Singh et al., 2012)، باستان‌شناسی (Negri et al., 2008; Grandjean et al., 2000; Gracia et al., 2000)، شناسایی اهداف مدفون شامل لوله، قنات و غیره (Al-Nuaimy et al., 2000) و فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی دیده شده است. پیمایش‌های ژئوفیزیکی در محوطه‌های باستانی که می‌توان از آن با عنوان باستان‌ژئوفیزیک یاد کرد با وجود سابقه طولانی تنها در سال‌های اخیر گسترش یافته و با نتایج چشمگیری همراه بوده است. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیر در دانش الکترونیک و کامپیوتر سبب رشد توانایی‌های این روش‌ها در بررسی محوطه‌های باستانی شده است.

پیشینه کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در باستان‌شناسی به چند دهه قبل باز می‌گردد. نخستین بار در اواسط دهه ۱۹۴۰ از این روش استفاده شد و سپس در شروع دهه ۱۹۵۰ با تمرکز بر روش مغناطیس‌سنجی این

جامع و مفیدی برای تفسیر ابتدایی پاسخ‌های GPR از ساختارها و اهداف مورد نظر به دست دهند. برای دستیابی به این هدف روش‌های عددی مختلفی همانند ردیابی پرتو مقدماتی و تکنیک‌های عبور بازتاب یک‌بعدی (Goodman, 1994; Olhoeft, 2001) تا گونه‌های مختلف روش اختلاف محدود (Bergmann et al., 1998; Giannopoulos, 2005; Teixeira et al., 1998)، تکنیک‌های حجم محدود، تبدیل Z و اجزاء گسسته (Weedon et al., 1997; Roberts & Daniels, 1996; Bourgeois & Smith, 1997) و بحث‌های مرتبط با آن‌ها برای کاربران GPR وجود دارند. اگرچه روش‌شناسی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است، در همه آن‌ها انتشار و بازتاب امواج GPR به درون زمین، بر اساس رفتار امواج الکترومغناطیسی و برهم‌کنش آن‌ها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود (Jol, 2009).

در این پژوهش سعی شده است علاوه بر رسیدن به دیدی واضح‌تر از زیر سطح و تفسیری دقیق‌تر، کارایی این روش در بررسی‌های باستانی در منطقه تپه حصار دامغان بررسی شود. با توجه به ویژگی‌های مورد مطالعه فرض بر این بود که اگر بنایی در زیر سطح مدفون باشد، با توجه به مترکم‌تر بنا نسبت به محیط دربرگیرنده احتمالاً سرعت میرایی امواج GPR در محیط دربرگیرنده بیشتر از بنای مدفون خواهد بود. این امر در مقاطع به صورت بخش‌هایی با عمق نفوذ کمتر مشخص می‌شود. در صورتی که اگر در زیر زمین حفره‌ای وجود داشته باشد (مثل قبر) باز هم تباین خصوصیات الکترومغناطیسی آن به میزان قابل توجهی با اطراف متفاوت خواهد بود. در هر دو حالت وجود بنا و یا حفره در زیر سطح، تباین فیزیکی مربوطه لازم بین هدف مدفون و مواد محصورکننده‌اش برای این روش ژئوفیزیکی وجود خواهد داشت. از طرفی با در نظر گرفتن موفقیت روش‌های ژئوفیزیکی در تعیین محل و گستره ساختارهای مدفون، بدون هیچ‌گونه آسیب‌رسانی به محوطه باستانی یا ساخت‌های مدفون در زمانی بسیار کوتاه‌تر و با هزینه‌ای بسیار کمتر نسبت به حفاری‌های اکتشافی، معرفی این روش‌ها به باستان‌شناسان با هدف به‌کارگیری آن‌ها در کاوش‌های باستانی کشور، امری ضروری به نظر می‌رسد. هم‌چنین

روش‌های الکتریکی و GPR می‌توان به محوطه باستانی پالوبلانکو (Palo Blanco) واقع در شمال غرب آرژانتین (Martino et al., 2006) و بررسی‌های مغناطیس‌سنجی و GPR در سایت باستانی سن میگوئل تکیلا (San Miguel Arciniega-Ceballos et al., 2009) اشاره نمود. از دیگر مطالعات و تحقیقات موجود در زمینه به‌کارگیری روش GPR در تحقیقات باستان‌شناسی می‌توان به بررسی تپه‌های مدفون (Goodman et al., 2009)، نظارت بر بناهای تاریخی همچون چشمه باستان، پل تاریخی، ساختمان (Sambuelli et al., 2009; Solla et al., 2011) و آشکارسازی و بررسی ساختارهای باستانی مدفون (Muztaza, 2012) اشاره نمود. 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 (Shyeh et al., 2014). بررسی و تفسیر سه‌بعدی شبکه برداشت شده نشان می‌دهد که روش GPR در شناسایی این ساختارها موفق عمل کرده است. مطالعه‌ی دیگری در خصوص بررسی و شناسایی سیستم توزیع آب قدیمی در منطقه باستانی پاتارای آتالیا با بهره‌گیری از روش GPR صورت گرفته است. نتایج نشان داده است که اختلاف گذردهی دی-الکتریک بین خطوط آب زیرزمینی و محیط در برگیرنده منجر به مشخص شدن ویژگی‌های بارزی در مقاطع GPR و در نهایت اطلاعات بسیار مفیدی شده است. همچنین GPR به عنوان یک روش بسیار مؤثر برای شناسایی چنین بقایای باستانی به خاک سپرده معرفی شده است (Aydin et al., 2014). شناسایی و بررسی ساختارهای باقی‌مانده در سایت باستانی زیر در منطقه بصره نیز با انجام مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR با استفاده از روش تفاضل محدود (Finite difference) انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی متفاوت بودن مدل‌سازی از بازتاب امواج با ساختار مدفون شده و تعامل پیچیده امواج الکترومغناطیسی با شرایط زیرسطحی است. همچنین وجود بنایی با تراکم بالا منجر به میرایی سریع امواج و کاهش عمق نفوذ امواج می‌شود (Alaamer, 2015). در کشور ما روش GPR در زمینه باستان‌شناسی

فعالیت‌ها به انجام رسید. استفاده از روش‌های لرزه‌نگاری با قدرت تفکیک بالا، روش‌های رادار زمینی و ماهواره‌ای و همچنین تصویربرداری با پرتوهای فروسرخ از دهه ۱۹۸۰ در دسترس باستان‌شناسان قرار گرفته است. آشکارسازی ساختار معماری مدفون در خاک، مشخص کردن پلان بناهای مدفون، مشخص کردن بقایای پی‌ها و دیوارها و تعیین جنسیت آن‌ها از قبیل خشت، آجر و سنگ، مشخص شدن بقایای مدفون راه‌ها، سنگفرش‌ها و آجرفرش‌ها در زیر زمین از مزایای استفاده از این روش است.

تعیین محل آرامگاه‌ها، پل‌ها و خندق‌ها، محل‌هایی که در گذشته خاک‌برداری شده و سپس با رسوبات جدید پر شده باشد، تعیین محل کوره‌های پخت سفال، کوره-های ذوب فلز، محل خاک‌های سوخته و خاکستر و تعیین محل چاله‌های باستانی، گورخمره‌ها و خمره‌های بزرگ نگهداری مواد غذایی از دیگر ویژگی‌های روش ژئوفیزیک در باستان‌شناسی است. در استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. وجود آلودگی‌های آهنی در خاک، کابل‌های برق و فنس‌کشی‌های موجود در منطقه مانع استفاده از این روش می‌شود. از روش ژئوفیزیک در شناسایی محوطه‌های تخت جمشید، تنگه بلاغی، شهر استخر، دشت حلقه مرودشت، جرجان و محوطه ربط در نزدیکی سردشت استفاده شده است (مصاحبه با بابک امین پور، ۹۱/۱۱/۲۳، گزارش میراث آریا).

ایده استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیرسطحی در سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر محقق آلمانی ارائه شده است (Parasnis, 1997). یکی از اولین کاربردهای GPR در باستان‌شناسی، در سال ۱۹۷۵ در محوطه چاکوکانیون (Chaco Canyon) در نیومکزیکوی آمریکا انجام شد (Vickers et al., 1976). هدف از این مطالعه اکتشاف محل دیواره‌های احتمالی در اعماق کمتر از یک متر بود. بعد از موفقیت‌های به‌دست آمده در این محوطه، کاربرد GPR در سال ۱۹۷۹ در هلا سلطان تکیه واقع در قبرس (Fischer et al., 1980) و محوطه باستانی سیرن کشور السالوادور (Sheets et al., 1985) ادامه یافت (Conyers & Goodman, 2004). از جمله بررسی‌های ژئوفیزیکی کم عمق با استفاده از

چندان مورد استفاده قرار نگرفته و تنها در چند مورد محدود، از روش GPR همراه با مغناطیس‌سنجی در بررسی آثار باستانی مدفون در خاک‌های نزدیک به سطح در قصر شیرین (اویسی مؤخر و همکاران، ۱۳۸۴) و روش GPR به همراه توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) در کاوش‌های باستانی منطقه تپه حصار دامغان (رشمه-کریم و همکاران، ۱۳۹۰) استفاده شده است. هم‌چنین تعدادی از پژوهشگران در این زمینه نیز فعالیت داشته‌اند؛ که می‌توان برای نمونه به بررسی کاربرد روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی (محمدخانی، ۱۳۸۳) و کاربرد روش GPR در بررسی‌های ژئوفیزیکی در اطراف محوطه تراس سلطنتی پرسپولیس (تخت جمشید) با استفاده از فرکانس مرکزی ۲۲۵ مگاهرتز و نیز به‌کارگیری روش الکتروستاتیک (Gondet et al., 2009) اشاره نمود.

۳- روش‌شناسی پژوهش

به‌طور کلی مدل، بیان ریاضی ایده‌آلی از مقطع زمین است که مدل‌سازی به دو روش پیشرو و وارون انجام می‌شود. در تمام روش‌های مدل‌سازی سعی بر آن است تا مدلی برای زیر سطح تعیین شود که نزدیک‌ترین و شبیه‌ترین پاسخ را به پاسخ داده‌های برداشت شده داشته باشد. در پژوهش حاضر از روش‌های مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR به‌منظور تعبیر و تفسیر برداشت‌های صحرائی با هدف آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون استفاده شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از الگوریتمی مؤثر و با انجام کد نویسی در محیط GUI نرم‌افزار MATLAB، برنامه کامپیوتری مناسبی برای انجام مدل‌سازی وارون تهیه شد و از آن برای مقایسه و تطابق پاسخ GPR مدل مصنوعی و واقعی استفاده گردید. با توجه به این‌که هر روش مدل‌سازی وارون به برنامه مدل‌سازی پیشرو مناسب برای محاسبه پاسخ مدل در نقاط و فرکانس‌های مورد نظر، به‌عنوان هسته اصلی نیاز دارد، قبل از انجام مدل‌سازی وارون، ابتدا تلاش شد تا بر اساس ماهیت و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی هدف زیرزمینی مورد نظر در برداشت صحرائی، مدل مصنوعی آن تهیه شده و پاسخ GPR دوبعدی آن به روش مدل‌سازی پیشرو، به‌دست آید.

در این مطالعه از الگوریتم مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR به روش تفاضل محدود دو بعدی ارائه شده توسط ایروینگ و نایت با استفاده از فرمولاسیون روش میدان مغناطیسی عرضی یا مود TM، استفاده شده است. در این پژوهش با طراحی مناسب و کدنویسی‌های لازم، الگوریتم، اصلاح شده و به‌منظور شبیه‌سازی پاسخ GPR داده‌های برداشت شده در منطقه تپه حصار دامغان، کدنویسی گردیده است. برداشت داده‌های صحرائی بر روی سطح زمین انجام شده و نگاشت‌های راداری داده‌های GPR نیز بعد از پردازش‌های ضروری و مناسب توسط نرم‌افزار Reflexw، به نمایش درآمده است.

۴- مبانی فیزیکی و نظری روش GPR

رادار نفوذی به زمین (GPR) یکی از روش‌های با قدرت تفکیک زیاد ژئوفیزیکی است که با امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا (۱۲/۵ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز) تغییرات خواص الکتریکی در اعماق کم را به‌منظور آشکارسازی زیرسطحی اندازه‌گیری می‌کند (Van Dam & Schlager, 2000). این روش مشابه با لرزه‌نگاری بازتابی است که بر مبنای انتشار و بازتاب موج عمل می‌کند (Blindow et al., 2007). دستگاه‌های اندازه‌گیری GPR مطابق شکل ۱ معمولاً از دو آنتن یکی فرستنده (تولیدکننده سیگنال) و دیگری گیرنده تشکیل می‌شوند. سیگنال ایجاد شده توسط آنتن فرستنده به درون زمین ارسال می‌شود. امواج با سرعت زیادی در زمین منتقل می‌شوند. هنگامی که این امواج به یک شیء و یا سطح بازتاب برخورد می‌کنند، بر اثر تغییر امپدانس الکترومغناطیسی در این محل‌ها، قسمتی از امواج از سطح بازتاب خواهد شد (Parasnis, 1997). آنتن گیرنده مستقر در دستگاه، این بازتاب‌ها را به‌صورت یک پیک بالا نشان می‌دهد و زمان سیر حرکت و دامنه‌های بازتاب را ضبط می‌کند. زمان رفت و برگشت موج از آنتن فرستنده و بازتاب از اهداف زیرسطحی و دریافت در گیرنده، از چند ده تا چند هزار نانو ثانیه متغیر است. دستگاه‌های GPR در واقع زمان رسید امواج را اندازه‌گیری می‌کنند. در نتیجه مقطع اولیه نمایش داده‌های برداشت شده یک مقطع زمانی است که در آن

بسیاری از مواد زمین‌شناسی، جریان‌های جابه‌جایی (قطبش) بیش از جریان‌های رسانش غالب هستند، بنابراین در بین خصوصیات الکترومغناطیسی مذکور، تباین در گذردهی الکتریکی فاکتور اصلی بازتاب امواج الکترومغناطیسی است و تفسیر داده‌های GPR نیز بر همین مبنا انجام می‌گیرد (Annan, 2001). با فرض دی-الکتریک بودن، رسانندگی پایین و در غیاب مواد با تراوایی مغناطیسی بالا، مقدار امپدانس برابر با $\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ در نظر گرفته می‌شود که در آن μ تراوایی مغناطیسی و ϵ گذردهی الکتریکی است. بنابراین ضریب بازتاب فقط به صورت تابعی از گذردهی الکتریکی است. در این دیدگاه رسانندگی الکتریکی فقط به عنوان پارامتر مهمی در تضعیف امواج الکترومغناطیسی و محدودکننده عمق نفوذ در نظر گرفته می‌شود (Jol, 2009). تغییرات تراوایی مغناطیسی سنگ‌ها هم معمولاً کم است و نادیده گرفته می‌شود.

موج الکترومغناطیس درون زمین به صورت یک مخروط سه‌بُعدی به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین عواملی بر سرعت و اتلاف این امواج تأثیر می‌گذارند. سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی وابسته به سه پارامتر الکترومغناطیسی مذکور در بالا به‌ویژه گذردهی الکتریکی محیط انتشار امواج است. عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی در این روش نیز با بسامد مرکزی آنتن فرستنده GPR، مقاومت ویژه و گذردهی محیط انتشار کنترل می‌شود و به‌طور کلی بسامد مرکزی زیاد آنتن

محور قائم، فاصله زمانی ارسال موج از فرستنده و دریافت با گیرنده را نشان می‌دهد. برای تعیین موقعیت مکانی رویدادها، باید این زمان‌ها به عمق تبدیل شوند یعنی این مقطع به مقطعی که محور قائم آن عمق را نمایش دهد، تبدیل شود (شکل ۱). برای این منظور لازم است تا سرعت سیر موج در ساختارهای زیرسطحی منطقه مورد بررسی، محاسبه شود. مهم‌ترین پارامترهایی که رفتار امواج الکترومغناطیس در یک محیط را کنترل می‌کنند عبارت‌اند از گذردهی الکتریکی، رسانندگی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی (Neal, 2004) که در بین خصوصیات الکترومغناطیسی مذکور، گذردهی الکتریکی مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده امواج الکترومغناطیس در محیط انتشار موج است. آگاهی از رابطه بین این خصوصیات و بازتاب‌های امواج الکترومغناطیسی، نقش کلیدی در تفسیر داده‌های GPR دارد. اگر برخورد و بازتاب امواج الکترومغناطیسی به یک مرز (تباین الکترومغناطیسی) به صورت عمودی در نظر گرفته شود، ضریب بازتاب

امواج الکترومغناطیس به صورت زیر تعریف می‌شود:

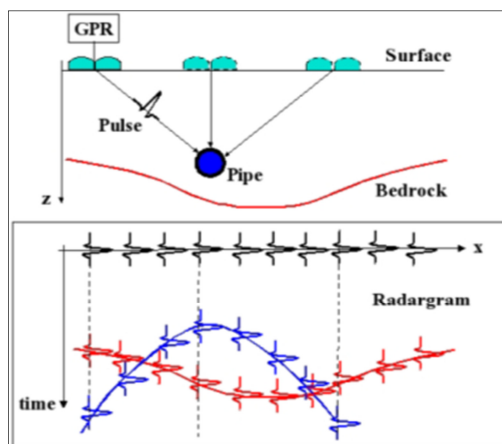
$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

که در رابطه بالا Z_1 و Z_2 امپدانس امواج الکترومغناطیسی

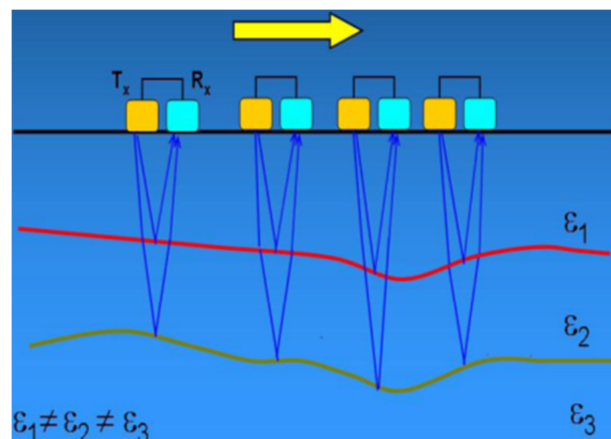
در دو طرف مرز بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{\omega\mu}{(\omega^2\epsilon\mu + i\omega\mu\sigma)^{1/2}} \quad (2)$$

که در این رابطه $i = \sqrt{-1}$ و σ رسانندگی است (Parasnis, 1997). معمولاً با توجه به این‌که در فرکانس‌های بالای مورد استفاده در روش GPR برای



(ب)



(الف)

شکل ۱: الف) نمایش سیستم GPR با ارائه مثالی از برداشت پروفیلی؛ ب) قالب مقطع بازتابی GPR (Müller, 2005)

فرستنده و رسانندگی بالای مواد زیر سطح زمین موجب کاهش عمق نفوذ امواج GPR می‌شود (Reynolds, 1997). کیفیت اطلاعات به دست آمده از زیر سطح به عواملی همچون نوع و جنس مورد مطالعه، جنس محیط به لحاظ زمین‌شناسی و عمق مورد مطالعه بستگی دارد.

۵- پیشینه تاریخی منطقه برداشت داده‌ها

تپه حصار از تپه‌های پیش از تاریخ است که تنها مصالح موجود در محیط برای ساختن بناهای آن خاک رس بوده و باقی مانده بناها نیز در آوارهای خود که دارای جنس یکسانی هستند، مدفون شده‌اند. اولین کاوش‌های باستان‌شناسی در این منطقه در سال‌های ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ توسط یک هیئت آمریکایی از دانشگاه پنسیلوانیا، تحت سرپرستی اریک اشمیت انجام گرفت که در نهایت دو تپه در این منطقه حفاری و آثار ارزنده‌ای متعلق به اولین استقرار دهکده‌ای آشکار شد. در این حفاری سه طبقه اصلی مشخص شد، که هر طبقه شامل چند لایه باستانی است (افشارفر، ۱۳۸۵). قدیمی‌ترین و عمیق‌ترین طبقه تپه حصار، طبقه I است (تقریباً مربوط به ۴۲۰۰-۳۵۰۰ ق.م) که معرف اولین اجتماع مستقر در این تپه است و خود دارای ۳ لایه است. آثار معماری که از این طبقه به دست آمده عبارت است از خانه‌های کوچکی که دیواره‌های آن‌ها از چینه و خشت خام ساخته شده‌اند. این خانه‌ها بدون هیچ نقشه اصلی ساخته شده و دارای هیچ‌گونه نظم واحد و مشخصی نیست. اتاق‌ها کوچک و فاقد یک نقشه واحد یا شکل خاص هستند که برای

استفاده‌های مختلف ساخته شده‌اند. طبقه دوم حصار (II) که از دو لایه فرعی تشکیل شده، چندان قطور نیست و تقریباً همان محوطه‌ای را که دوران حصار I فرا گرفته است، می‌پوشاند. در شکل ۲ اتاقک‌ها و دیواره‌های آشکارسازی شده در محدوده تپه حصار در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی نشان داده شده است. قطر آثار باستانی حصار III با جدیدترین طبقه حدود ۴ متر است (اشمیت، ۱۳۹۱). این لایه خود به سه طبقه مربوط به دوره‌های متفاوت تقسیم می‌شود. آثار معماری تپه حصار در طبقه سوم به نحو کاملاً محسوسی توسعه یافته و بقایای ساختمان بزرگی در این طبقه مشاهده می‌گردد (افشارفر، ۱۳۸۵). 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 همانند اشیاء سنگی و فلزی در فلات ایران بوده است. مرحله سوم کاوش‌ها، در سال ۱۳۷۴ خورشیدی با کشف شماری گل‌نشته به خط میخی بابلی قدیم همراه بود. قدمت این گل‌نشته‌ها به حدود ۲ هزار سال پیش از میلاد برمی‌گردد که شاهد بسیار خوبی بر وجود مبادلات تجاری و فرهنگی بین تمدن‌های بین‌النهرین و فلات ایران بوده است. آخرین فصل کاوش در تپه حصار توسط هیئتی از پژوهشکده باستان‌شناسی، در سال ۱۳۸۵ انجام شد. طی این برنامه میدانی که به منظور تعیین عرصه واقعی محوطه انجام شد، شواهد روشنی مبنی بر استقرار کوچکی از عصر آهن در حاشیه‌های جنوبی و غربی تپه



شکل ۲: کاوش‌های انجام شده در محدوده تپه حصار در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی و نمایش اتاقک‌ها و دیواره‌ها



شکل ۳: موقعیت مکانی تپه حصار دامغان (Google Earth, 2015)

به منظور انجام مطالعات باستان‌شناسی محدوده و برداشت داده‌ها با استفاده از روش ژئوفیزیکی GPR در بخشی از محوطه تپه حصار که به پهنه سفال رنگی معروف است، محدوده‌ای به ابعاد 10×20 متر واقع در بین دو ترانشه انتخاب شد (شکل ۴). دلیل اصلی انتخاب این محدوده، هموار بودن آن است که عملیات برداشت داده‌ها با سهولت بیشتری انجام شده و در نتیجه نیازی به تصحیح اثر توپوگرافی در داده‌های اندازه‌گیری شده نیست. عملیات برداشت داده‌ها بر اساس ترانشه‌های حفر شده قدیمی، طراحی شده و داده‌ها با یک شبکه منظم مستطیلی برداشت شده است. ۲۱ پروفیل در راستای طولی (آزیموت 50° درجه) با طول ۲۰ متر و به فاصله جانبی $0/5$ متر از یکدیگر و تعداد ۴۱ عدد پروفیل در راستای عرضی (عمود بر راستای پروفیل‌های طولی) به طول ۱۰ متر و

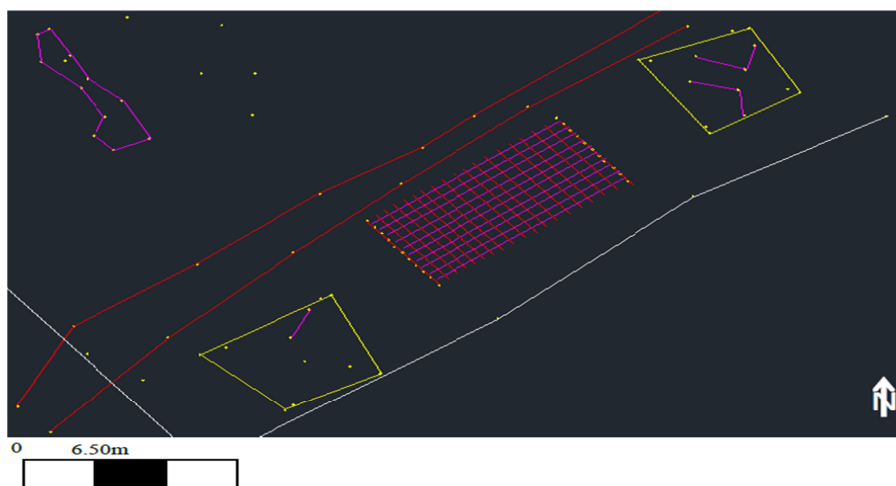
حصار، کارگاه ذوب کانسنگ مس و گورستانی از همین دوره آشکار شد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، قدیمی‌ترین لایه‌های تپه حصار به اواسط هزاره پنجم قبل از میلاد بازمی‌گردد و استقرار در آن تا حدود سال ۱۷۰۰ پیش از میلاد به طور پیوسته ادامه داشته و پس از آن هیچ‌گاه مورد سکونت قرار نگرفته است (اشمیت، ۱۳۹۱).

۶- برداشت داده‌های GPR در منطقه تپه حصار دامغان

محوطه باستانی تپه حصار دامغان با وسعت بیش از ۱۸ هکتار در منطقه کویری فلات مرکزی ایران در فاصله ۲ کیلومتری جنوب شرق شهر دامغان و ۳۴۰ کیلومتری شرق تهران قرار دارد. در شکل ۳ موقعیت مکانی محوطه باستانی تپه حصار دامغان نشان داده است.



شکل ۴: عکس هوایی از محدوده مورد مطالعه و ترانشه‌های حفر شده (Google Earth, 2015)



شکل ۵: شبکه برداشت داده‌های GPR

فیلترهای مختلف و بررسی اثر آن‌ها بر روی مقاطع در نرم‌افزار Reflexw، توالی پردازشی مناسبی برای داده‌ها انتخاب شود. رانه گرمایی، بی‌ثباتی دستگاه‌های الکترونیکی، اختلاف طول کابل‌ها و تغییرات در شکاف هوایی آنتن منجر به «پرش» در زمان اولین ورود موجک زمین- هوا می‌شود (که معمولاً به آن نقطه زمان- صفر اطلاق می‌گردد) (Nobes, 1999; Young et al., 1995). این پدیده روی موقعیت مرز زمین و هوا در مقطع، زمان رسید رخدادهای بعدی و درجه تشابه تریس‌ها و مقاطع مجاور، تأثیر می‌گذارد. بنابراین قبل از به‌کارگیری روش‌های پردازشی می‌بایست تمام تریس‌ها را به یک زمان صفر مشترک برگرداند. با این نگرش در نخستین مرحله پردازش با توجه به شکل ۶ و فاصله زمانی ایجاد شده تا پدیدار شدن دامنه سیگنال‌ها که در حدود ۶ نانوثانیه است، با شیفت به میزان مذکور در استفاده از پارامتر تصحیح ایستا (static correction) صفر زمانی نگاشت راداری تصحیح می‌شود.

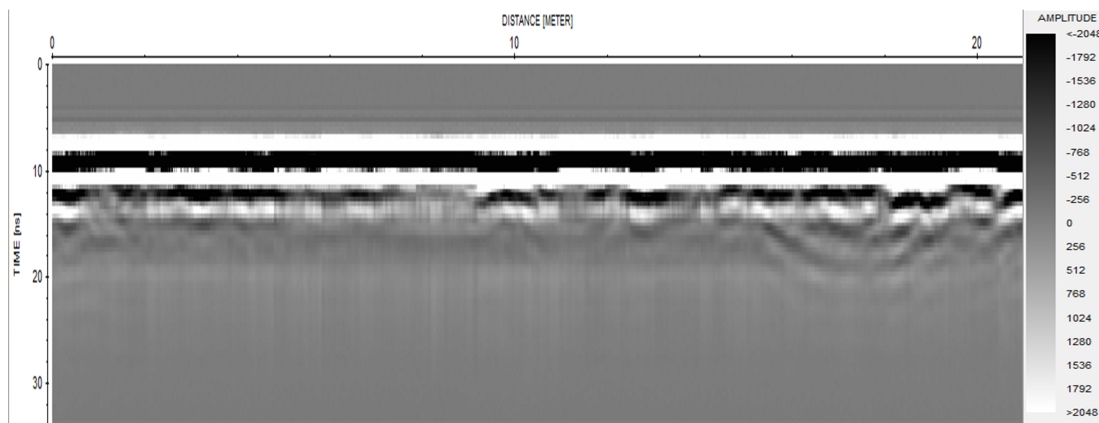
به علت فواصل زمانی کوتاه بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده و پالس‌هایی که به صورت مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و همچنین وجود بازتاب‌هایی که از توده‌های کم‌عمق نشأت می‌گیرند، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود (Neal, 2004). این مسأله سبب به وجود آمدن یک روند آهسته فرکانس پایین (Wow) می‌گردد. این روند فرکانس پایین بر روی

فاصله جانبی ۰/۵ متر طراحی شد (شکل ۵).

با توجه به ساختار منطقه از دیدگاه ژئوفیزیکی، عاملی که به نظر می‌رسد می‌تواند باعث به وجود آمدن تباین فیزیکی مطلوب بین اهداف زیرسطحی مورد نظر و محیط دربرگیرنده شود، متراکم‌تر بودن ساخت‌های مدفون نسبت به محیط اطراف است. از طرفی این عامل نیز با عبور خط راه آهن از میان محوطه باستانی، تحت تأثیر لرزش‌های مداوم ناشی از تردد قطارها قرار گرفته و با گذشت زمان، این بافت سخت‌تر بناهای احتمالی مدفون نیز سست‌تر شده است. در نتیجه، تباین اولیه خصوصیات فیزیکی (مقاومت ویژه و گذردهی نسبی) سازه‌ها با محیط اطرافشان بیش از پیش کاهش پیدا کرده است (رشمه کریم و همکاران، ۱۳۹۰).

۷- پردازش داده‌های واقعی GPR

برداشت داده‌ها به روش پروفیل زنی بازتابی با استفاده از دستگاه رادار Noggin Plus مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰MHz در بخشی از منطقه تپه حصار دامغان صورت گرفته است. شکل ۳ نگاشت راداری داده‌های خام برداشت شده منطبق بر یکی از پروفیل‌های برداشت شده را، بدون اعمال هیچ‌گونه عملیات پردازشی نشان می‌دهد. به دلیل نداشتن آگاهی از نحوه رفتار امواج در محیط و نامشخص بودن محدوده فرکانسی سیگنال و نوفه، با استفاده از روش آزمون و خطا سعی شد تا با اعمال



شکل ۶: نمایش مقطع نگاشت راداری داده‌های خام برداشت شده

کاهش می‌یابد.

از جمله مهم‌ترین عوامل تضعیف انرژی سیگنال، تضعیف ناشی از رسانندگی محیط زیرسطحی و پخش هندسی امواج است (Reynolds, 1997). بنابراین پاسخ دریافتی از توده‌های ژرف، ضعیف‌تر است. برای حل این مشکل و یکسان‌سازی پاسخ ساختارهای واقع در ژرفاهای مختلف با استفاده از بهره‌ها (Gain)، توان سیگنال در ژرفاهای بیش‌تر افزایش می‌یابد. در ادامه برای تبدیل محور زمان رسید به عمق و همچنین محاسبه عمق کاوش آنتن به کار گرفته شده از مقدار سرعت 0.1 متر بر نانوثانیه که در حین برداشت، با استفاده از روش برازش هذلولی، سرعت سیر موج در محیط معادل 0.1 m/ns محاسبه شده، استفاده می‌شود. نتیجه به‌کارگیری پارامترهای پردازشی مورد اشاره، در نگاشت راداری شکل ۷ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در مقطع GPR نشان داده شده در این شکل نمایان است در قسمت میانی پروفیل (مشخص شده با بیضی خط چین) عمق نفوذ نسبت به بخش انتهایی آن (مشخص شده با بیضی خط پر) به شدت کاهش پیدا کرده است. علت این رخداد در قسمت‌های میانی، احتمالاً افزایش رسانندگی در اثر وجود بافت سست‌تر و رسوبات دانه‌ریزی است که در اثر تخریب سازه‌ها و یا روی هم انباشته شدن رسوبات ناشی از جریان‌ات حاصل از ریزش‌های جوی است.

در بخش انتهایی پروفیل که عمق نفوذ بیش‌تر است، احتمالاً بافت متراکم‌تر (با مقاومت ویژه بالاتر نسبت به بخش میانی) وجود دارد که در این صورت این بافت

فرکانس‌های بالاتر قرار گرفته و آن‌ها را مغشوش می‌کند. اندازه و شدت این فرکانس‌های پایین به فاصله آنتن‌ها و همچنین مشخصات الکتریکی زمین بستگی دارد. برای حذف این نوفه‌های فرکانس پایین می‌توان از فیلترهای بالاگذر استفاده کرد. یکی از فیلترهای بالاگذر مناسب برای حذف این اثرات که در همه نرم‌افزارهای GPR موجود است، فیلتر دی‌واو (Dewow) است. خوشبختانه تمام سیستم‌های پیشرفته GPR به‌صورت خودکار فیلتر دی‌واو را با اعمال پارامترهای شرایط بهینه به هر تریس اعمال می‌کنند.

مرحله بعدی پردازش، محدود نمودن پهنای باند فرکانسی است. معمولاً فرکانس‌های قطع به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که باندهای فرکانسی یکسانی نسبت به فرکانس مرکزی ایجاد نمایند (Davis & Annan, 1989). در این مرحله با انتخاب بسامدهای قطع مناسب می‌توان با نگه داشتن بسامدهای مطلوب، نسبت سیگنال به نوفه را افزایش داد، زیرا بیشتر نوفه‌ها خارج از محدوده انتخاب شده واقع می‌شوند. در پردازش مقاطع رادار، معمولاً فرکانس‌های قطع به‌صورت تقریبی از یک چهارم تا یک دوم و دو برابر تا چهار برابر فرکانس مرکزی آنتن، اعمال می‌شوند. در پژوهش حاضر مقادیر ۱۲۵، ۲۵۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ مگاهرتز، انتخاب شده است.

برای افزایش کیفیت مقطع به‌دست آمده، از فیلتر دوبعدی بردارنده زمینه (Background Removal) استفاده می‌شود. از سوی دیگر توان سیگنال انتشاری در توده‌های زیرسطحی با افزایش زمان پیمایش، به‌صورت تصاعدی



شکل ۷: نمایش مقطع زمانی و عمقی پروفیل برداشت شده با اعمال مراحل پردازشی مناسب

گردیده است. برای مدل‌سازی پاسخ GPR هدف مورد نظر لازم است ابعاد مدل GPR، ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی (ϵ ، μ و σ) محیط میزبان و هدف، فاصله‌های گسسته‌سازی مکانی و زمانی، نوع موجک مدل‌سازی و نیز فرکانس مرکزی آنتن، انتخاب گردد. ابتدا با استفاده از مدل‌سازی پیشرو و طراحی مدل بر اساس شرایط محیط مورد مطالعه، رفتار امواج الکترومغناطیسی و پاسخ محیط، بررسی گردید. همچنین با تفسیر کیفی مقطع به دست آمده از برداشت داده‌های واقعی GPR نتایج به دست آمده، با شرایط واقعی زمین، مقایسه خواهد شد.

به منظور شبیه‌سازی داده‌های GPR برداشت شده در منطقه تپه حصار، در شکل ۸ مدل هندسی و فیزیکی و پاسخ GPR متناظر با یکی از پروفیل‌های برداشت شده در این منطقه، نشان داده شده است. در این شکل فقط بخشی از پروفیل که پاسخ هدف (آنومالی) در آن قرار دارد، مد نظر قرار گرفته است (بیضی خط پر در شکل ۷). پروفیل مورد نظر در راستای عمود بر امتداد ناهمگنی‌های زیرسطحی، برداشت شده و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی محیط میزبان و هدف (ساختار) برابر با نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد، منظور شده است.

۹- مدل‌سازی وارون داده‌های GPR

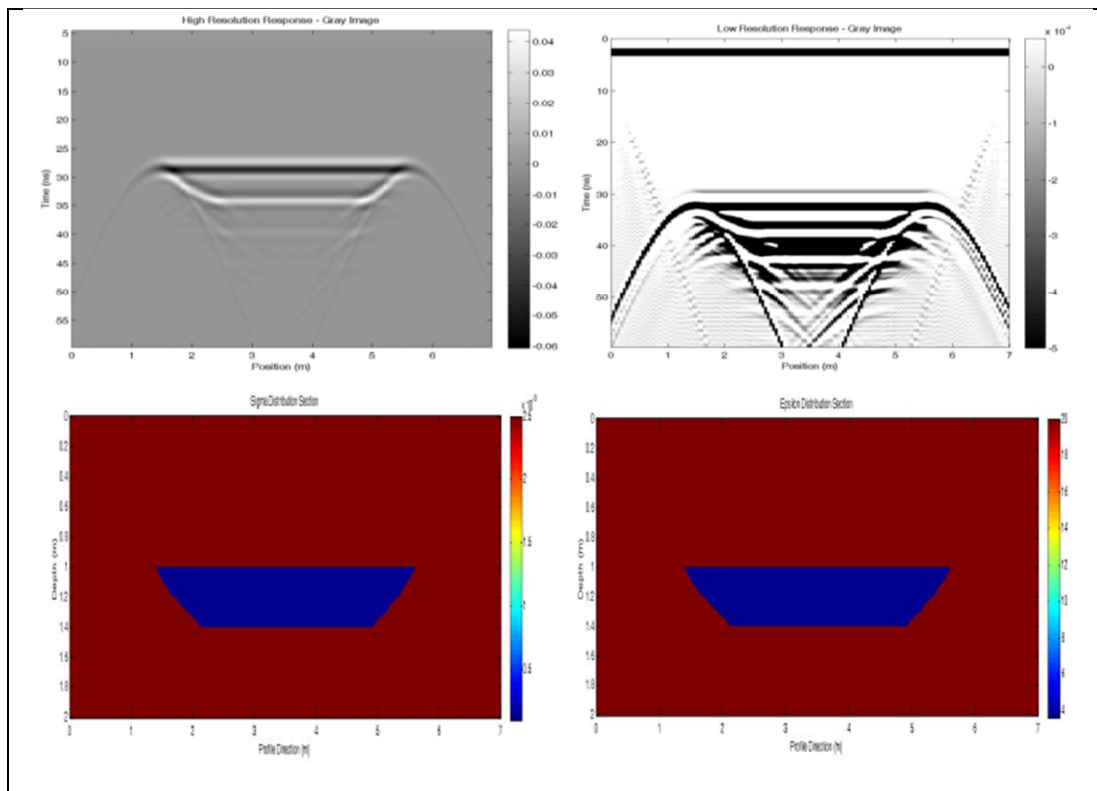
در مدل‌سازی وارون سعی می‌شود تا بر اساس داده‌های برداشت شده، مدل مربوطه ایجاد شود. بقیه مراحل مدل‌سازی وارون همانند مدل‌سازی پیشرو است. هدف از وارون‌سازی، مشخص کردن مدلی از زمین است که

متراکم می‌تواند مربوط به سازه‌های مدفون زیر سطح باشد. بیضی خط پر مشخص‌کننده نواحی با مقاومت ویژه بالاست و با بازتاب‌های با دامنه بزرگ‌تر نسبت به دیگر بخش‌ها قابل تشخیص است. ناهمگنی‌های این قسمت ناشی از دیواره‌های مدفون احتمالی هستند که عمق قرارگیری این آنومالی کم‌تر از ۱۰ سانتی‌متر است.

۸- مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR

روش GPR بر اساس تئوری الکترومغناطیس استوار است. معادلات ماکسول، فیزیک میدان‌های الکترومغناطیسی را به صورت ریاضی تشریح می‌کنند درحالی که روابط ساختاری، خواص مواد را کمی می‌کنند و تلفیق این دو، اساس نمایش عددی سیگنال‌های GPR است. روش اختلاف محدود مبتنی بر تخمین معادلات دیفرانسیلی حاکم بر شرایط مسئله GPR از بسط سری تیلور است. در این روش محیط مورد بررسی، به شبکه‌ای با فواصل معین، تقسیم‌بندی شده و مؤلفه‌های میدان بر اساس سلول یی (Yee, 1966) و روابط ماکسول، برای یک زمان معین در گره‌ها و مرکز سلول، محاسبه می‌شود و در نهایت مقادیر برای زمان‌های متوالی به‌روزرسانی می‌گردد. در پژوهش حاضر از الگوریتم مدل‌سازی پیشرو داده-

های GPR به روش اختلاف محدود دوبعدی که توسط ایروینگ و نایت (۲۰۰۶) انجام گرفته و توسط احمدی و همکاران (۱۳۹۱) بهبود یافته، استفاده شده است. در این تحقیق الگوریتم اصلاح شده برای شبیه‌سازی پاسخ GPR داده‌های برداشتی در منطقه تپه حصار دامغان استفاده



شکل ۸: مدل هندسی و فیزیکی شامل چند ضلعی دوبعدی در قسمت پایین شکل و پاسخ سامانه GPR در قسمت بالای شکل (تفکیک‌پذیری بالا در سمت راست و تفکیک‌پذیری پایین در سمت چپ)

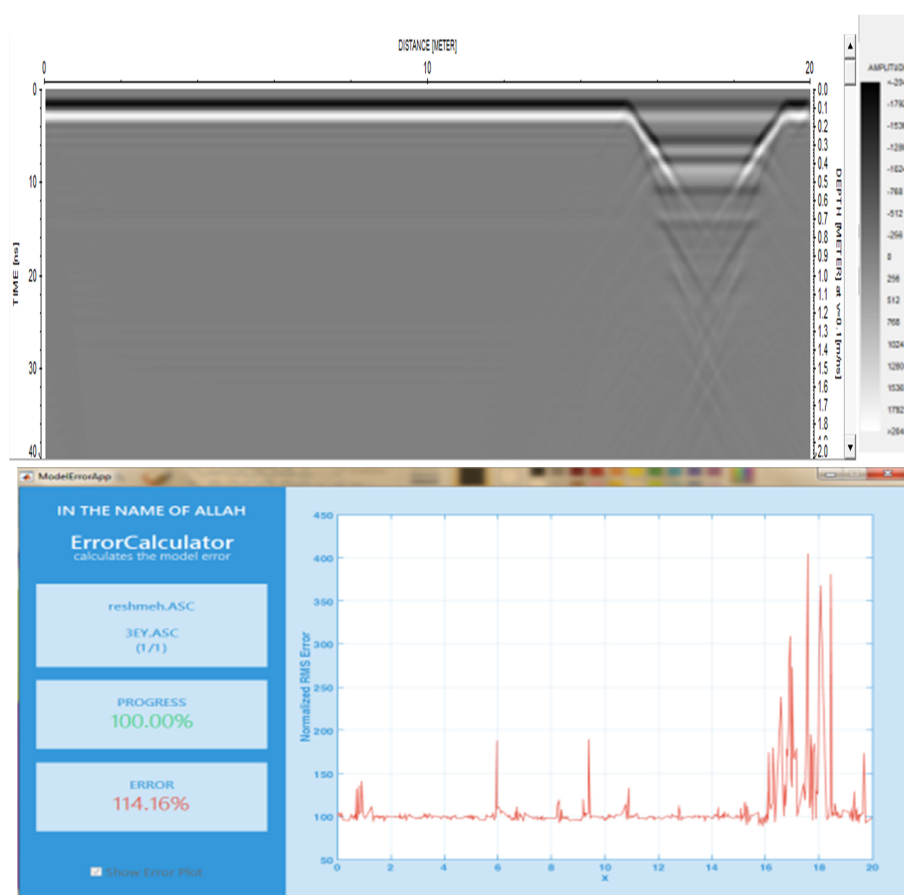
مربعات خطا - اختلاف بین مقادیر پاسخ‌های مدل و داده‌های برداشت شده - کمینه شود. بدین ترتیب پارامترهایی از مدل باید تغییر کنند تا مجموع مربعات خطا کاهش یابد. در این پژوهش از رابطه به هنجار (نرمالیزه) شده (۳) جهت محاسبه خطا به روش کم‌ترین مربعات خطا، استفاده شده است:

$$\text{RMS error} = \sqrt{\frac{\sum (Ez_{\text{real}} - Ez_{\text{model}})^2}{n}} \times 100 \quad (3)$$

نتیجه حاصل از مدل‌سازی وارون برای داده‌های صحرائی برداشت شده در منطقه مورد نظر همراه با میزان خطای به دست آمده برای مدل مذکور، در شکل ۹ نشان داده شده است. در این پژوهش آخرین مقطعی که خطای کم‌تری داشته است، به عنوان نتیجه آورده شده است.

در نگاه کلی خطاهای به دست آمده از مدل‌سازی وارون و داده‌های واقعی GPR، دور از انتظار به نظر می‌رسد که البته عوامل مختلفی در بالا بودن میزان این خطاها نقش داشته و به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

مشاهدات ما را به بهترین وجه تشریح نماید و محدودیت‌های وارد شده از طرف فیزیک مسأله را پاسخ‌گو باشد. در این پژوهش سعی بر آن است تا از روش مدل‌سازی وارون برای اعتبارسنجی تعبیر و تفسیر برداشت‌های GPR واقعی به منظور آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون استفاده شود. برای این منظور باید نتایج مدل‌سازی وارون با نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده قبلی، مورد مقایسه قرار گیرد تا از مجموع نتایج به دست آمده بتوان برای ارزیابی‌های دقیق‌تر داده‌های برداشت شده، استفاده نمود. در واقع هدف از انجام مدل‌سازی وارون در این پژوهش ایجاد مدلی از زمین است که پاسخی مشابه داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشد. این مسأله را می‌توان با حل یک مسأله بهینه‌سازی، معادله‌بندی نمود که در آن محاسبه خطای مدل‌های مختلف نیز مفید است. در تمامی روش‌های بهینه‌سازی از جمله روش بهینه‌سازی کم‌ترین مربعات خطا، مدل اولیه در فرآیندی تکرار شونده طوری بهبود می‌یابد که مجموع



شکل ۹: مدل زمین با بیش‌ترین شباهت به مقطع حاصل از برداشت داده‌های صحرایی در منطقه تپه حصار دامغان همراه با میزان خطای به‌دست آمده

معمولاً زمین‌های واقعی بسیار پیچیده بوده و مقادیر گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی آن‌ها از سطح زمین تا یک عمق مشخص، متفاوت است، بنابراین زمانی می‌توان به‌طور دقیق این مقادیر را تعریف نمود که محیط مورد نظر، نقطه به نقطه با آزمایش، مورد بررسی قرار گیرد. این در حالی است که برای شبیه‌سازی پاسخ مدل‌ها، محیط میزبان و هدف، کاملاً یکنواخت، همگن و همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین در مدل‌های واقعی زمین، انواع نوفه‌ها وجود دارد که اعمال آن‌ها در مدل‌سازی مصنوعی، امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این به-دلیل وجود محدودیت‌های گوناگون در تمامی الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی پیشرو، امکان انجام مدل‌سازی دقیقاً مطابق با مدل‌های واقعی، به‌دلیل پیچیدگی‌های طبیعت زمین، امکان‌پذیر نبوده و تنها تولید پاسخ مدل‌های ساده امکان‌پذیر است.

۱۰- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از روش GPR با هدف کاربرد در زمینه مطالعات باستان‌شناسی در منطقه باستانی تپه حصار دامغان استفاده شد. برای این منظور مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR برای نگاشت راداری منطبق بر یکی از پروفیل‌های شاخص برداشت شده در این منطقه، صورت گرفت. نتایج پژوهش حاضر بر اساس خروجی مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR نشان می‌دهد که میزان تطابق پاسخ مدل‌سازی پیشرو با نگاشت راداری داده‌های واقعی منطبق بر یکی از پروفیل‌های برداشت شده در منطقه تپه حصار، حاکی از تفسیر درست زیرسطحی آن منطقه است. هم‌چنین خطای بالای مدل‌سازی وارون داده‌ها به دلیل تأثیر عوامل مختلف و وجود محدودیت‌های گوناگون در مدل‌سازی به ویژه

موردی سایت تپه حصار دامغان، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
 محمدخانی، کوروش. (۱۳۸۳). کاربرد روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی در باستان‌شناسی (آرکئو ژئوفیزیک)، مطالعه موردی: بررسی مغناطیس‌سنجی در تخت جمشید و پاسارگاد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، باستان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

منابع لاتین

- Alaamer, H.A. (2015). Modeling of GPR Profile: An Example from Archaeological Site in Basrah, Iraq. *Basic Sciences and Applied Research*, 1(3): 1-10.
- Al-Nuaimy, W., Huang, Y., Nakhkash, M., Fang, M. T. C., Nguyen, V. T., & Eriksen, A. (2000). Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition. *Journal of applied Geophysics*, 43(2), 157-165.
- Annan, A. P. (2001). *Ground Penetrating Radar Workshop Notes: Sensors and Software*.
- Arciniega-Ceballos, A., Hernandez-Quintero, E., Cabral-Cano, E., Morett-Alatorre, L., Diaz-Molina, O., Soler-Arechalde, A., & Chavez-Segura, R. (2009). Shallow geophysical survey at the archaeological site of San Miguel Tocuila, Basin of Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 36(6), 1199-1205.
- Arısoy, M. Ö., Koçak, Ö., Büyüksaraç, A., & Bilim, F. (2007). Images of buried graves in Bayat, Afyon (Turkey) from high-resolution magnetic data and their comparison with preliminary excavations. *Journal of archaeological science*, 34(9), 1473-1484.
- Aydin, A., Baykan, O., and Akyol, E. (2014). Detecting ancient water distribution system using GPR in Patara, Antalya, Turkey. *Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 1(5): 32-38.
- Bergmann, T., Robertsson, J. O., & Holliger, K. (1998). Finite-difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. *Geophysics*, 63(3), 856-867.
- Bourgeois, J. M., & Smith, G. S. (1996). A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(1), 36-44.
- Brandt, O., Langley, K., Kohler, J., & Hamran, S. E. (2007). Detection of buried ice and sediment layers in permafrost using multi-frequency Ground Penetrating Radar: A case examination on Svalbard. *Remote Sensing of Environment*, 111(2), 212-227.

مدل‌سازی وارون داده‌های GPR است. بر اساس نتایج این پژوهش روش GPR به‌عنوان یک روش ژئوفیزیکی غیر مخرب، قابلیت کاربرد در مطالعات باستان‌شناسی را دارا است.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده در دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود با عنوان «مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR و بررسی نتایج در چند مورد مطالعاتی» است. که در همین راستا نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از آقای ارژنگ رشمه کریم به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های برداشت شده در منطقه تپه حصار دامغان تشکر ویژه نمایند. همچنین از زحمات جناب آقای علی شهنا که در کدنویسی برنامه مدل‌سازی وارون داده‌های این مقاله همکاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع فارسی

- احمدی، رضا، فتحیان‌پور، نادر، و نوروزی، غلامحسین. (۱۳۹۱). ارائه روشی نوین جهت افزایش سرعت مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) در حوزه فرکانسی، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران.
- اشمیت، اریک. (۱۳۹۱). کاوش‌های تپه حصار دامغان، (ترجمه: کوروش روستایی)، اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان سمنان.
- افشارفر، ناصر. (۱۳۸۵). هزاره‌های تاریک دامغان. تهران: انتشارات پایزنه.
- اویسی موخر، محسن، قاسمی، وحید، و شاه نظری، حسین. (۱۳۸۴). مطالعه مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین، دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- رشمه کریم، ارژنگ، کامکار روحانی، ابوالقاسم، و عرب امیری، علیرضا. (۱۳۹۰). استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در کاوش‌های باستان‌شناسی، مطالعه

- Christie, M., Tsoflias, G. P., Stockli, D. F., & Black, R. (2009). Assessing fault displacement and off-fault deformation in an extensional tectonic setting using 3-D ground-penetrating radar imaging. *Journal of applied geophysics*, 68(1), 9-16.
- Conyers L.B., Goodman, D. (2004). *Ground-Penetrating Radar, An Introduction for Archaeologists*. Altaamira press. USA. pp. 232.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar* The Institution of Electrical Engineers. London, UK.
- Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy1. *Geophysical prospecting*, 37(5), 531-551.
- Denis, A., Huneau, F., Hœrlé, S., & Salomon, A. (2009). GPR data processing for fractures and flakes detection in sandstone. *Journal of Applied Geophysics*, 68(2), 282-288.
- Fischer, P. M., Follin, S. G., & Ulriksen, P. (1980). Subsurface Interface Radar Survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus. *Swedish Annual Studies in Mediterranean Archaeology*, 63, 48-64.
- Giannopoulos, A. (2005). Modelling ground penetrating radar by GprMax. *Construction and building materials*, 19(10), 755-762.
- Gondet, S., Dhemaied, A., Mohammadkhani, K., & Rejiba, F. (2009). Geophysical investigations in the vicinity of the Persepolis Royal Terrace (Fars province, Iran). *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, (33 (suppl.)), 69-72.
- Goodman, D. (1994). Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59(2), 224-232.
- Goodman, D., Piro, S., Schneider, K., Nishimura, Y., Hongo, H., Higashi, N., ... & Damiata, B. (2009). GPR Archaeometry in GPR Theory and Applications, ed. H. Jol.
- Gracia, V. P., Canas, J. A., Pujades, L. G., Clapés, J., Caselles, O., Garcia, F., & Osorio, R. (2000). GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 43(2), 167-174.
- Grandjean, G., Gourry, J. C., & Bitri, A. (2000). Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, 45(3), 141-156.
- Irving, J., & Knight, R. (2006). Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1247-1258.
- Hagg, W., Mayer, C., Lambrecht, A., Kriegel, D., & Azizov, E. (2013). Glacier changes in the big Naryn basin, central Tian Shan. *Global and planetary change*, 110, 40-50.
- Jol, H.M. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Oxford: Elsevier Science, 508 pages.
- Knight, R. (2001). Ground penetrating radar for environmental applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29(1), 229-255.
- Lin, M. C., Kang, Y. M., Lee, K. F., & Hsu, H. C. (2009). A Study on the Technologies for Detecting Underground Water Level and Processing Image. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 7(1), 61-68.
- Martino, L., Bonomo, N., Lascano, E., Osella, A., & Ratto, N. (2006). Electrical and GPR prospecting at Palo Blanco archaeological site, northwestern Argentina. *Geophysics*, 71(6), B193-B199.
- Müller, K. (2005). *Modelling of GPR Wave Propagation and Scattering in Inhomogeneous Media*. PhD. Thesis, Master Thesis in Geosciences Petroleum Geology and Geophysics Department of Geosciences University of Oslo.
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science reviews*, 66(3), 261-330.
- Negri, S., Leucci, G., & Mazzone, F. (2008). High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3), 111-120.
- Nobes, D. C. (1999). Geophysical surveys of burial sites: a case study of the Oaro urupa. *Geophysics*, 64(2), 357-367.
- Olhoeft, G.R. (2001). *GRORADAR™, Acquisition, Processing, Modeling and Display of Dispersive Ground Penetrating Radar Data*. version 2001.01.
- Parasnis, D. S. (1997). *Principles of applied geophysics*. 5th edition, Chapman and Hall, Springer Netherlands Science - 429 pages.
- Pauselli, C., Federico, C., Frigeri, A., Orosei, R., Barchi, M. R., & Basile, G. (2010). Ground penetrating radar investigations to study active faults in the Norcia Basin (central Italy). *Journal of applied geophysics*, 72(1), 39-45.
- Roberts, R. L., & Daniels, J. J. (1997). Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method. *Geophysics*, 62(4), 1114-1126.
- Radzevicius, S. J., Guy, E. D., & Daniels, J. J. (2000). Pitfalls in GPR data interpretation: differentiating stratigraphy and buried objects from periodic antenna and target effects. *Geophysical Research Letters*, 27(20), 3393-3396.
- Reynolds, J.M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley & Sons Ltd. UK.
- Hubbard, S. S., & Rubin, Y. (2005). Introduction to hydrogeophysics. In *Hydrogeophysics* (pp. 3-21). Springer Netherlands.
- Shafri, H. Z. M., Abdullah, R. R., Roslee, M., & Muniandy, R. (2008, July). Optimization of ground penetrating radar (GPR) mixture model in road pavement density data analysis. In *IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Vol. 3, pp. III-1326). IEEE.
- Sambuelli, L., Calzoni, C., Stocco, S., & Rege, R.

- (2009, November). Geophysical measurements on the occasion of the moving of an ancient Egyptian sculpture. In *Proceedings of the 28th GNGTS meeting, Trieste* (pp. 16-19).
- Singh, S. K., Rathore, B. P., Bahuguna, I. M., & Ramnathan, A. L. (2012). Estimation of glacier ice thickness using Ground Penetrating Radar in the Himalayan region. *Current Science(Bangalore)*, 103(1), 68-73.
- Solla, M., Lorenzo, H., & Riveiro, B. (2011). Evaluation of ancient structures by GPR: The arch bridges of Galicia (Spain). *Scientific Research and Essays*, 6(8), 1877-1884.
- Sheets, P. D., Loker, W. M., Spetzler, H. A., & Ware, R. W. (1985). Geophysical exploration for ancient Maya housing at Ceren, El Salvador. *National Geographic Research Reports*, 20, 645-656.
- Shyeh, S. K., Nordiana, M. M., Anuar, S., Saad, R., & Saidin, M. (2014). Archaeological Evidences Detection by using GPR Method: SB2K Site. *EJGE, Bund. Y*, 19: 8569-8578.
- Teixeira, F. L., Chew, W. C., Straka, M., Oristaglio, M. L., & Wang, T. (1998). Finite-difference time-domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous, and conductive soils. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 36(6), 1928-1937.
- Van Dam, R. L., & Schlager, W. (2000). Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses. *Sedimentology*, 47(2), 435-449.
- Vickers, R., Dolphin, L. T., & Johnson, D. (1976). Archaeological investigations at Chaco Canyon using a subsurface radar. *Remote Sensing Experiments in Cultural Resource Studies at Chaco Canyon. Albuquerque, New Mexico: USDI-NPS and the University of New Mexico*, 81-101.
- Weedon, W. H., & Rappaport, C. M. (1997). A general method for FDTD modeling of wave propagation in arbitrary frequency-dispersive media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45(3), 401-410.
- Yee, K. S. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propag*, 14(3), 302-307.
- Young, R. A., Deng, Z., & Sun, J. (1995). Interactive processing of GPR data. *The Leading Edge*, 14(4), 275-280.