

## بکارگیری روش رادار نفوذی به زمین جهت مطالعات ژئوتکنیکی بنای تاریخی سی و سه پل اصفهان

رضا احمدی<sup>۱\*</sup>، نادر فتحیانپور<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۹۵/۰۷/۱۱

دریافت مقاله: ۹۴/۰۲/۲۷

### چکیده

در پژوهش حاضر از روش غیرمخرب رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی وضعیت مصالح بکاررفته و ناپیوستگی‌های ساختاری بنای تاریخی سی و سه پل اصفهان استفاده شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از یک الگوریتم تفاضل محدود دوبعدی بهبود یافته، پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی متناظر با ساختارهای ژئوتکنیکی متداول همانند زمین لایه‌ای، استوانه افقی و منشور دوبعدی شبیه‌سازی شد. سپس با استفاده از یک سیستم GPR مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۵۰۰ مگاهرتز، تعداد ۴۶ پروفیل GPR شامل ۳۶ پروفیل عرضی در راستای شرقی-غربی عمود بر امتداد پل، ۷ پروفیل طولی در عرشه پل در راستای شمالی-جنوبی به موازات امتداد پل و ۳ پروفیل عرضی از پایه‌های پل برداشت شد. پردازش و تفسیر نگاشت‌های راداری نشان می‌دهد که در مقاطع طولی و عرضی، اشیاء و مصالح مختلف عمدتاً شامل تیرآهن و میلگرد تقویتی، بلوک‌های سنگی، الوارهای چوبی و نیز ناپیوستگی و نشست، در جای‌جای پل قابل مشاهده است که اسلب‌های بتنی تقویت شده با تیرآهن و میلگرد، عمدتاً مربوط به مرمت‌های جدید پل بوده و بخش‌های تقویت شده با بلوک‌های سنگی و الوارهای چوبی، اکثراً قدیمی است که متحمل نشست و شکستگی‌های متعددی گردیده‌اند.

کلید واژه‌ها: رادار نفوذی به زمین (GPR)، مدل‌سازی عددی، اهداف ژئوتکنیکی، سی و سه پل اصفهان، ناپیوستگی، پروفیل GPR

۱. استادیار مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک R\_ahmadi@arakut.ac.ir

۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

از جمله اهداف و مسائل زمین شناسی مهندسی، ارزیابی های غیرمخرب (NDE: Non-Destructive Evaluating) ساختارها همانند ساختگاه سازه های بزرگ، به منظور رفع نواقص و استحکام بخشی آنها و نیز انجام مطالعات دوره ای بناها، اماکن تاریخی و آثار باستانی، به منظور مرمت، بازسازی و نگهداری آنهاست. بدیهی است که این ارزیابی ها بایستی بر پایه یک معیار مهندسی قابل قبول، استوار باشند. بکارگیری هر یک از سیستم های بازرسی، متحمل مقداری هزینه است اما یکی از فواید بدیهی و روشن بکارگیری صحیح آزمون های غیرمخرب، شناسایی نواقصی است که اگر در محیط، ناشناخته باقی بمانند، موجب بروز حوادث و در نتیجه وارد آمدن خسارت های مالی و جانی فراوان خواهند شد.

در عمل آزمون های غیرمخرب بسته به هدف و نوع کاربرد، به روش های مختلفی انجام می شوند. روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR: Ground-Penetrating Radar) که قابلیت ارائه تصاویر زیرسطحی با تفکیک پذیری بالا از محیط های دی الکتریک کم اتلاف را دارد، دارای طیف وسیعی از کاربردها در بسیاری از زمینه های مهندسی از جمله در زمینه های معدن کاری، ژئوتکنیک و شناسایی ساختار، تصویر کردن آب های زیرزمینی، باستان شناسی، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی، برف و یخ و یخبندان شناسی، تاسیسات و مسائل زیست محیطی می باشد. GPR یک روش جدید، مفید و بسیار قدرتمند برای آزمون غیرمخرب پل ها، زیرسازی ها، کف پوش ها، جاده ها، خطوط راه آهن، بزرگراه ها، دیوارهای حائل و ساختمان ها، تونل ها و مصنوعات دست ساز بشر همانند بتن، آسفالت، میلگرد، خشت، آجر و غیره است. این روش قادر به شناسایی و به نقشه درآوردن جزئیات زیرسطحی، بدون نیاز به مغزه گیری یا ایجاد تخریب و تغییر در محیط بوده و نتایج برداشت، به آسانی به صورت تصاویر دوبعدی و سه بعدی ارائه می شوند. امروزه روش GPR به علت سرعت عمل بالا، هزینه نسبتاً پایین و نتایج مطلوب، به-

عنوان یک روش آزمون غیرمخرب، از قابلیت اعتماد و کارایی بالایی برخوردار است.

مدت زمانی است که GPR به عنوان یک روش ارزیابی و نظارتی مدنظر قرار گرفته: (Clemena, 1991; Bungey et al., 1991; Giannopoulos, 2005; Lai and Tsang, 2006; Xingxin et al., 2010; احمدی و همکاران، ۱۳۹۱) و در طی سال ها برای مطالعه ساختمان ها و پل ها (Heiler et al., 1995; Lorenzo et al., 2000; Annan et al., 2002; Ranalli et al., 2004; Lorenzo et al., 2010; Solla et al., 2011; Zhang et al., 2012; احمدی و همکاران، ۱۳۹۳).

جاده ها و بزرگراه ها (Davis et al., 1994; Jack and Jackson, 2000; Benedetto and Saarenketo and Scullion, 1999; Benedetto, 2001, 2002; Loken, 2005) راه آهن، خطوط لوله و خطوط تونل (Gobel et al. 1994; Huston et al., 2000; Manacorda et al., 2002; Geraads et al., 2002; Karlovsek et al., 2012; احمدی و همکاران، ۱۳۹۳) و ساختارهای گوناگون دیگر همانند لوله های فاضلاب و انواع لوله های تاسیساتی دیگر (احمدی و همکاران، ۱۳۹۱)، مورد استفاده قرار گرفته است.

یکی از جذاب ترین کاربردهای GPR، مطالعات میراث فرهنگی و بناهای تاریخی به منظور انجام مرمت ها و بازسازی های دوره ای مورد نیاز و نگهداری آنها می باشد. معمولاً بناهای تاریخی مطابق شکل ۱، ترکیب نسبتاً پیچیده ای از انواع مصالح مختلف شامل سنگ ها، خشت ها، آجرها و نیز سازه های چوبی و فلزی عمده تاً واقع در درون پی ها، دیوارها، ستون ها و فضاهای خالی، به عنوان رابط می باشند. شناخت نوع مصالح و جزئیات درونی بناهای تاریخی، نوع فونداسیون، تعیین ضخامت کف پوش ها و پی ها، شناسایی موقعیت گسیختگی ها و شکستگی ها، وضعیت نشست ها و بهم ریختگی ها، اطلاعات بسیار سودمندی برای استحکام بخشیدن به بنا و کلید بازسازی و نگهداری آنهاست. بنابراین هدف از مطالعه حاضر شناسایی وضعیت مصالح بکاررفته و تعیین محل ناهمگنی ها و ناپوستگی های ساختاری (نواحی دارای شکستگی و گسیختگی)، منافذ و فضاهای خالی احتمالی و تعیین وضعیت نشست در سازه تاریخی سی و سه پل

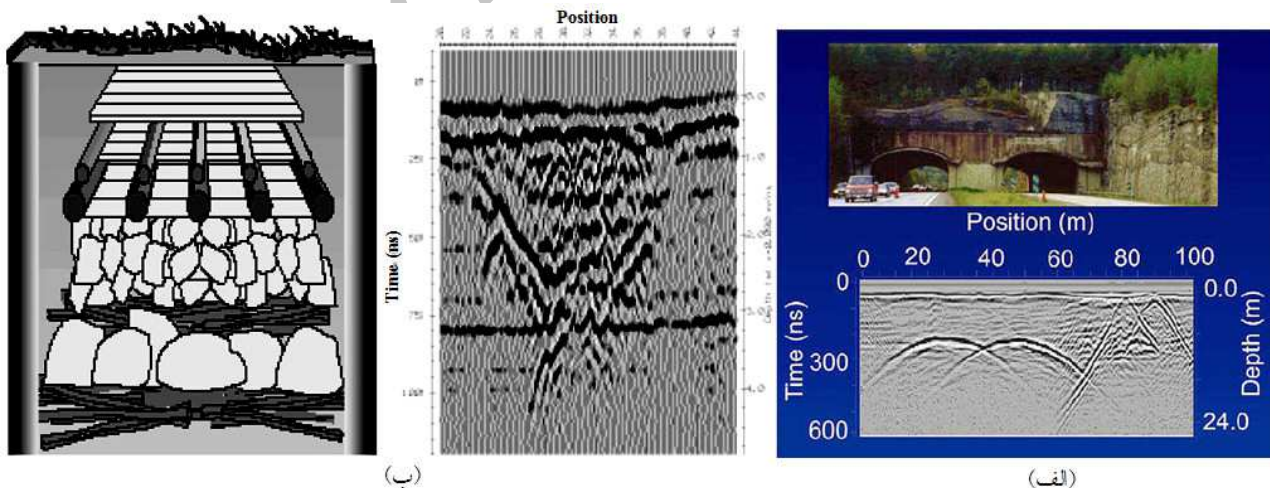
پروفیلی داده‌های GPR، مجموعه‌ای از تریس‌ها در کنار یکدیگر بوده که نگاشت راداری (Radargram) نام دارد (شکل ۲). در روش GPR نتایج برداشت، به آسانی به صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند و رخداد حاصل در تصویر دوبعدی نیز برای اغلب اهداف مدفون، به صورت هذلولی است (شکل ۲). جهت آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی، بزرگ-تر از سیگنال‌های زمینه می‌باشند. پلاریته سیگنال GPR نیز که براساس علامت ولتاژ نیم سیکل اول تعریف می‌شود، با طبیعت تغییر در ویژگی‌های الکتریکی (به‌ویژه  $\epsilon$ )، کنترل شده و در تفسیر داده‌ها بسیار مفید است (Ahmadi et al., 2015).

میزان فرکانس مرکزی سیستم رادار، تاثیر مهمی روی میزان عمق نفوذ آن دارد. هرچه میزان فرکانس مرکزی کاهش یابد، تضعیف سیگنال در محیط، کم شده و در نتیجه عمق نفوذ سیستم، افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش فرکانس مرکزی، میزان تفکیک‌پذیری (Resolution) رادار، افزایش می‌یابد. بنابراین انتخاب فرکانس مرکزی سیستم رادار، همواره بر اساس ایجاد تعادل بین میزان عمق نفوذ سیستم و میزان تفکیک‌پذیری صورت می‌گیرد.

اصفهان با استفاده از روش GPR بر پایه مدل‌سازی پیشرو داده‌ها با روش تفاضل محدود حوزه زمان دو بعدی بهبود یافته در حوزه فرکانس می‌باشد.

## ۲. مبانی فیزیکی و نظری روش GPR

یک سیستم GPR سیگنال‌های الکترومغناطیسی (EM: Electromagnetic) در محدوده فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز را از طریق فرستنده ارسال کرده و نحوه رفتار میدان EM با محیط پیرامون را از طریق گیرنده، آشکار می‌کند. شکل ۲ مفهوم عمومی چگونگی انجام این آشکارسازی را نشان می‌دهد. ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی EM را در یک محیط، هدایت می‌کنند، شامل گذردهی دی‌الکتریک ( $\epsilon$  Dielectric permittivity)، نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$  Magnetic permeability) و هدایت الکتریکی ( $\sigma$  Electrical conductivity) می‌باشند. معمولاً تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی سنگ‌ها ضعیف بوده و بنابراین در روش GPR، در بیشتر مواقع،  $\epsilon$  و  $\sigma$  مهم‌ترین پارامترها می‌باشند. متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنه سیگنال امواج EM بازتابی، در مقابل زمان تاخیر است که تریس Trace نامیده می‌شود. دستاورد یک برداشت

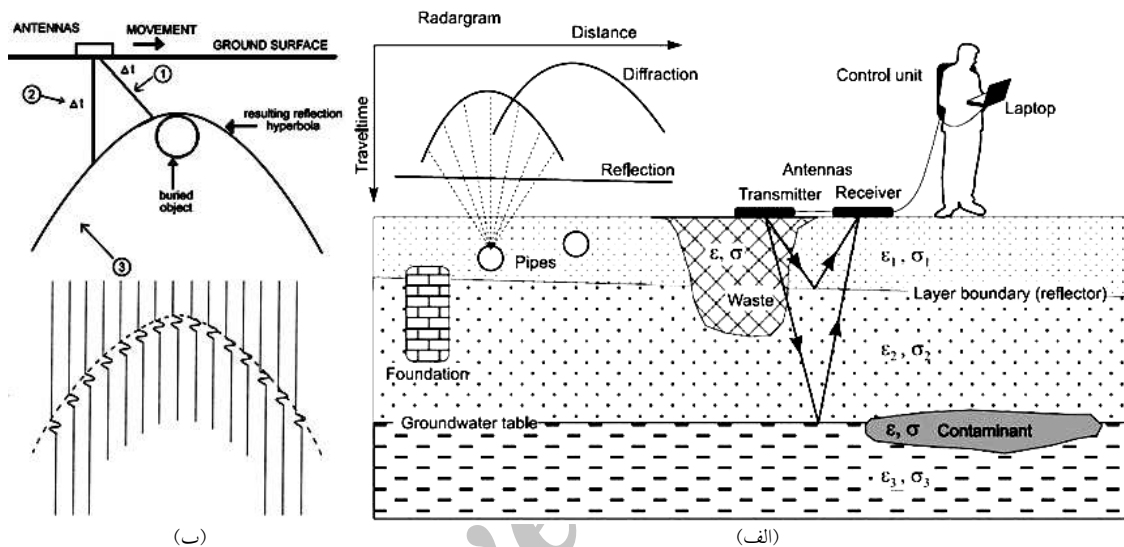


شکل ۱. شکل طرح‌وار از ساختار پل‌ها همراه با پاسخ سامانه GPR مربوطه. الف- پاسخ سامانه GPR پل در زیر شکل (Jol, 2009)؛ ب- پاسخ سامانه GPR زیرسازی پل در سمت راست آن (Annan, 2001).

### ۳. مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR به روش تفاضل محدود

پاسخ سیستم GPR برای مدل‌های مصنوعی فرضی مختلف متناظر با اهداف و ساختارهای ژئوتکنیکی واقعی باید توسط یکی از روش‌های مدل‌سازی عددی تولید شود تا این هسته مدل‌سازی پیشرو منجر به شناسایی رفتار مدل‌های مختلف در

پاسخ‌ها شده و عملیات مدل‌سازی وارون داده‌های GPR در کاربردهای عملی را فراهم نماید. برای دستیابی به این هدف می‌توان از روش‌های عددی مختلفی استفاده نمود که در همه آنها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، براساس رفتار امواج EM و برهمکنش آنها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود.



شکل ۲. الف- اصول روش GPR با نمایش بعضی از کاربردهای آن؛ ب- برداشت داده‌های GPR روی یک هدف مدفون (نیمه بالای شکل) و پاسخ هذلولی شکل آن در نیمه پایینی شکل (خط چین در نگاشت راداری).

قرار گرفته و جهت مدل‌سازی پیشرو اشیاء مصنوعی فرضی متناظر با اهداف متداول در بررسی‌های ژئوتکنیکی، بهبود یافته است. تئوری پایه کدهای مدل‌سازی پیشرو GPR، معادلات کرل ماکسول (قانون القای فاراده و تعمیم قانون مداری آمپر) می‌باشند. از آنجایی که مطابق شکل ۲(الف) سیگنال تریس‌های پاسخ GPR در محدوده ناهمگنی‌های زیرسطحی یک جابجایی زمانی دارند، این ویژگی اجازه بکارگیری 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 (احمدی و همکاران، ۱۳۹۳).

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، در میان روش‌های عددی مختلف، مورد توجه بیشتری قرار گرفته و کاربرد بیشتری دارد (Sadiku, 2001). 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 دوبعدی حوزه زمان با فرمول‌بندی روش میدان مغناطیسی عرضی (Transverse Magnetic Field) یا مدل TM شبیه‌سازی شده است. برای این منظور روش تفاضل محدود دوبعدی ارائه شده توسط ایروینگ و نایت (Irving and Knight, 2006) مورد استفاده

لایه‌ای) و ترکیب زمین لایه‌ای و منشور (معرف کنتاکت قائم به منظور شناسایی موقعیت پایه‌ها و ستون‌های واقع در درون و پی ساختارها) شبیه‌سازی شد تا از نتایج آنها برای تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی استفاده شود.

به منظور انطباق بیشتر نتایج شبیه‌سازی با عمل، تا حد امکان متداول‌ترین مقادیر برای ویژگی‌های الکتریکی محیط‌های میزبان و اهداف واقعی، انتخاب شد. در جدول ۱ برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه در پژوهش حاضر از جمله گذردهی دی‌الکتریک نسبی، هدایت الکتریکی و سرعت سیر امواج (نوعاً در محدوده فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز) آورده شده است.

#### ۴-۱. شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای

در عمل شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای دارای کاربردهای زیادی می‌باشد. از جمله این کاربردها تعیین ضخامت اسلب‌های بتنی، آسفالت جاده‌ها و لایه‌های سطحی برای مقاصد زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، آشکارسازی عمق سطح سفره‌های آب زیرزمینی و تعیین ضخامت لایه‌های آبدار (حای آب شیرین) و آشکارسازی چینه‌های زمین‌شناسی است. بنابراین در زیربخش‌های بعدی تاثیر مهم‌ترین عوامل موثر بر روی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱-۱. بررسی تاثیر ضخامت لایه‌های مدل زمین لایه‌ای

در ردیف پایین شکل ۳ مدل‌های هندسی و فیزیکی و در ردیف بالای این شکل، پاسخ GPR سه مدل زمین سه لایه‌ای نشان داده شده است. میزان فرکانس مرکزی موج EM ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز بوده و هدف، کنترل صحت پاسخ GPR برای تعیین کف و ضخامت لایه‌های یک زمین سه لایه‌ای است که در آن لایه رویی از جنس بتن، لایه میانی از جنس خاک ماسه‌ای مرطوب و لایه زیرین از جنس خاک ماسه‌ای اشباع از آب می‌باشد. ابعاد مدل ۶×۴ متر بوده و ضخامت لایه بتنی در هر سه مورد برابر با یک متر است.

$$f(t - t_0) \stackrel{\mathcal{F}}{\Leftrightarrow} e^{-i\omega t_0} F(\omega) \quad (1)$$

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

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 ۲ به صورت هذلولی است، بنابراین برای درون‌یابی بین دو تریس مجاور، به منظور حفظ شکل منحنی‌وار، از درون‌یابی یک بعدی مکعبی (Cubic) استفاده شده است. این محاسبات در مدت زمان بسیار کوتاهی انجام شده و نتیجه آن بهبود کیفی و بصری پیوستگی تریس‌ها در پاسخ نهایی مقطع GPR و تولید پاسخ با تفکیک‌پذیری بالا می‌باشد.

#### ۴. مدل‌سازی پاسخ GPR اشیای مصنوعی

هدف از پژوهش حاضر مطالعات ژئوتکنیکی بنای تاریخی و ارزشمند سی و سه پل اصفهان با روش GPR می‌باشد. برای این منظور با استفاده از برنامه مدل‌سازی عددی پیشرو بهبود یافته در محیط نرم‌افزار MATLAB، پاسخ GPR با تفکیک‌پذیری زیاد برای مدل‌های مصنوعی فرضی متناظر با اهداف ژئوتکنیکی متداول در بررسی‌های NDE، همانند استوانه افقی (معرف انواع میله‌ها، مفتول‌ها و میلگردهای فولادی جاسازی شده درون بتن، انواع لوله‌ها با جنس‌های مختلف و ساختارهای استوانه‌ای شکل)، منشور (Prism) دوبعدی (معرف انواع فضاهای خالی به شکل منشور در مقطع دوبعدی)، زمین لایه‌ای (معرف اسلب بتنی، آسفالت و لایه‌های خاک، سنگ و انواع مصالح ساختمانی به صورت

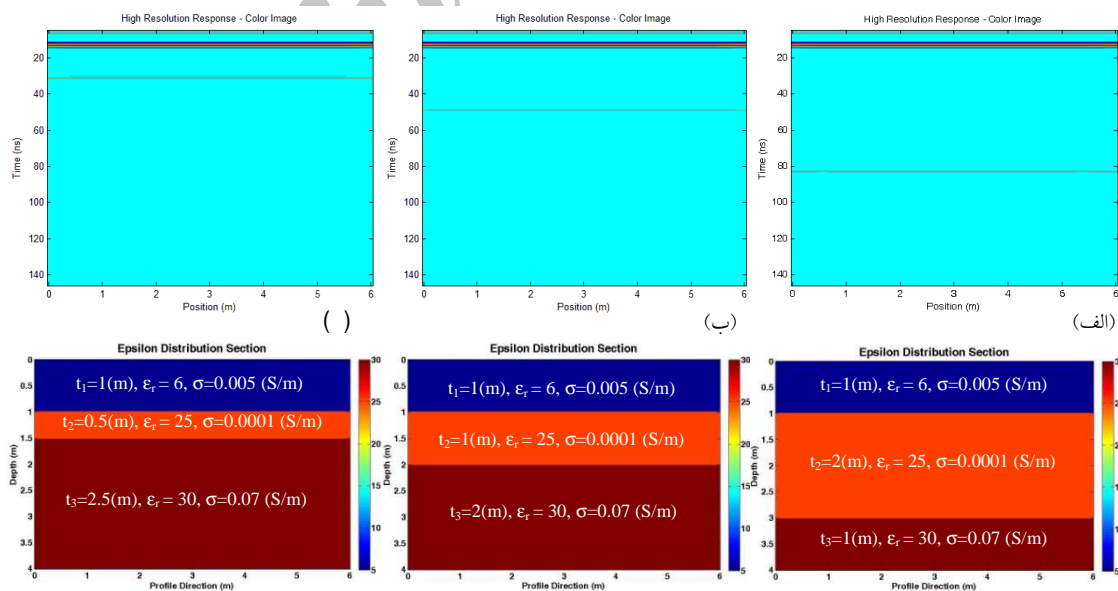
ضخامت لایه‌های دوم و سوم نیز متناسب با ضخامت آنها در مدل‌های هندسی و فیزیکی می‌باشند. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در عمل برای تعیین کف و ضخامت لایه‌های بتن، آسفالت و غیره با استفاده از سیستم‌های GPR مفید خواهد بود.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پاسخ شبیه‌سازی GPR مرزهای مشترک افقی لایه‌ها، مطابق انتظار به صورت رخدادهای خطی افقی است (به‌طورکلی پاسخ GPR هر ناهمگنی افقی به صورت یک رخداد خطی افقی است) و ضخامت لایه رویی (بتن) در هر سه پاسخ، برابر بوده و

### جدول ۱. برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه

(Davis and Annan, 1989; Zeng and McMechan, 1997; Ahmadi et al., 2015).

سرعت موج الکترومغناطیسی (متر بر نانوثانیه)	هدایت الکتریکی (میلی زیمنس بر متر)	گذردهی دی الکتریک نسبی	ماده (محیط)
۰/۳	۰	۱	هوا
۰/۱۲-۰/۱۷	۰/۰۱	۳-۶	آسفالت
۰/۰۸۷-۰/۱	۵	۶-۱۲	بتن
۰/۰۱۷	۱۰ <sup>۴</sup> -۱۰ <sup>۷</sup>	۱۰۰-۳۰۰	فلز
۰/۱۲	۶/۶۷	۶	خاک رس سیلتی
۰/۰۷	۱۰	۱۹	خاک رس مرطوب
۰/۱۲	۰/۵-۲	۴-۸	سنگ آهک
۰/۱۵	۰/۰۱	۳-۵	ماسه خشک
۰/۰۶	۰/۱-۱	۲۰-۳۰	ماسه اشباع شده
۰/۰۳۳	۰/۵	۸۰	آب شیرین



شکل ۳. تاثیر ضخامت لایه‌ها بر پاسخ GPR مدل زمین سه‌لایه‌ای با ثابت ماندن دیگر شرایط. الف -  $t_1=1, t_2=0.5, t_3=2.5$

ب -  $t_1=1, t_2=1, t_3=2$  ج -  $t_1=1, t_2=2, t_3=1$  (t ضخامت لایه بر حسب متر می‌باشد).

۴-۱-۲. بررسی تاثیر تغییرات توام گذردهی دی الکتریک و هدایت الکتریکی مدل زمین لایه‌ای

برای این منظور پاسخ GPR برای دو مدل زمین سه‌لایه‌ای شبیه‌سازی شد. ویژگی‌های فیزیکی و هندسی مدل‌ها در ردیف پایین شکل ۴ نشان داده شده است. در مدل (الف) میزان گذردهی دی الکتریک لایه دوم، دو برابر مقدار لایه اول و میزان هدایت الکتریکی لایه دوم، نصف مقدار لایه اول می‌باشد و در مدل (ب) این نسبت‌ها عکس شده است. به بیان ریاضی برای مدل (الف):  $\epsilon_2 = 2\epsilon_1, \sigma_2 = 0.5\sigma_1$  و برای مدل (ب):  $\epsilon_2 = 0.5\epsilon_1, \sigma_2 = 2\sigma_1$  تمامی شرایط دیگر برای هر دو مدل، یکسان بوده و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی تمام لایه‌ها در هر دو مدل، برابر با مقدار نفوذپذیری فضای آزاد است. پاسخ‌های GPR حاصل از دو مدل زمین سه‌لایه‌ای در ردیف بالای شکل ۴ مشاهده می‌شود. این پاسخ‌ها مرزهای لایه‌های افقی را به صورت رخدادهای خطی افقی نشان می‌دهند. موقعیت رخداد خطی افقی اول (مربوط به مرز مشترک لایه‌های اول و دوم) در پاسخ مدل (ب) نسبت به مدل (الف) جابجا شده است که دلیل آن کمتر بودن مقدار نسبت گذردهی دی الکتریک لایه دوم به لایه اول در مدل (ب)، نسبت به مدل (الف) می‌باشد. به همین دلیل پلاریته سیگنال بازتابی در مورد رخداد خطی افقی اول در مدل (ب) نسبت به مدل (الف)، معکوس شده است. معکوس شدن پلاریته، با معکوس شدن ترتیب رنگی پاسخ مرز افقی اول در دو مدل، قابل مشاهده است (برای جزئیات بیشتر در مورد پلاریته به مرجع (Ahmadi et al., 2015) رجوع شود.

شدت بازتاب‌های رخداد خطی افقی دوم (مربوط به مرز مشترک لایه‌های دوم و سوم) در مدل (الف) نسبت به مدل (ب)، ضعیف‌تر است که دلیل آن کمتر بودن اختلاف گذردهی دی الکتریک لایه‌های دوم و سوم، در مدل (الف) نسبت به مدل (ب) می‌باشد.

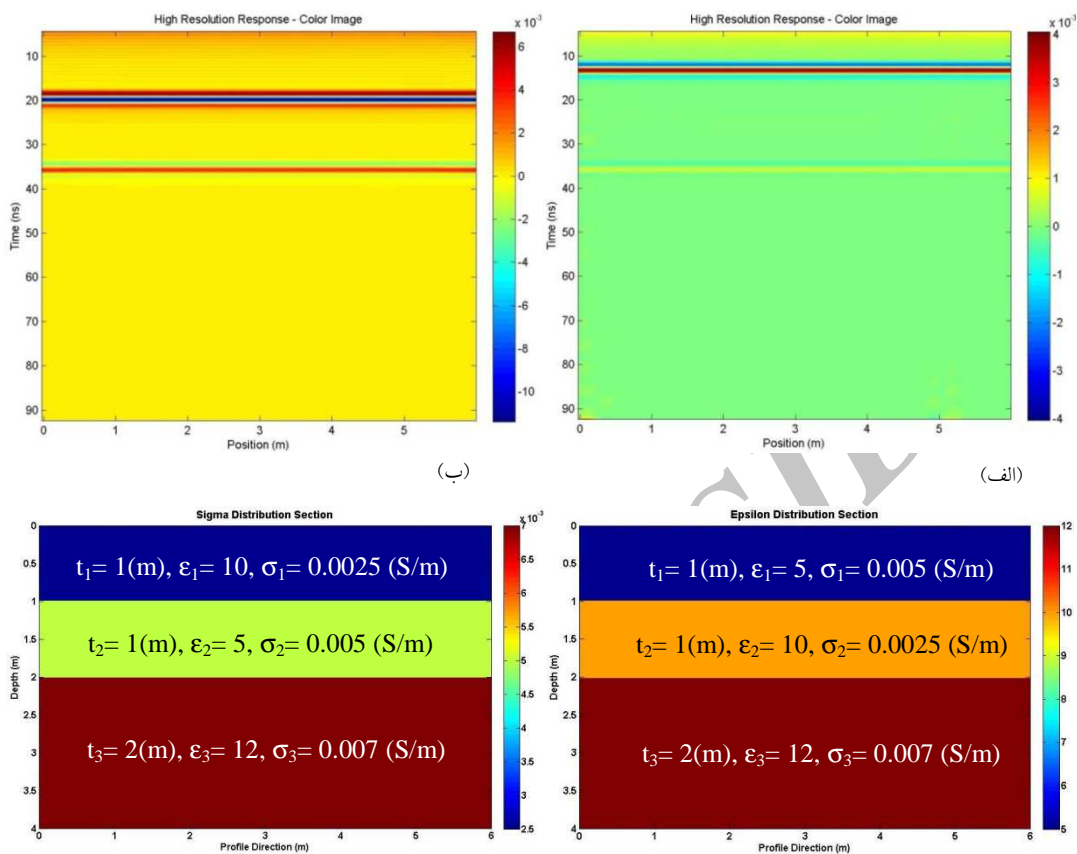
۴-۲. شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل حاوی اشکال هندسی مختلف

یکی از اهداف اصلی بررسی‌های ژئوتکنیکی غیرمخرب اغلب ساختارها به ویژه از نوع بتنی با استفاده از روش GPR، آشکارسازی حفرات و فضاهای خالی موجود در ساختار و شناسایی میله‌ها و میلگردهای فولادی جاسازی شده درون بتن است. به همین خاطر بایستی پاسخ این اهداف از طریق شبیه‌سازی مدل‌های مصنوعی، تولید شود تا نتایج آن در مسائل عملی مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که فضاهای خالی ممکن است به شکل‌های مختلفی در ساختار، حضور داشته باشند، بنابراین در مدل‌سازی پیشرو، شبیه‌سازی پاسخ GPR برای مدل‌های فضای خالی با مقطع دایره‌ای به شکل دایره، مربع و مثلث (که معرف شکل فضای خالی به طور عام می‌باشند) انجام شده است. شکل ۵ (الف) مدل هندسی به ابعاد  $2/4 \times 0/75$  متر متشکل از دو محیط بتن و ماسه مرطوب را نشان می‌دهد که یک سری میلگردهای فولادی (به قطر ۴۰ میلی‌متر) درون بتن رویی (به ضخامت ۰/۱۵ متر)، جاسازی شده و فضاهای خالی با اشکال هندسی مختلف، درون ماسه مرطوب (به ضخامت ۰/۶ متر) و در زیر بتن حضور دارند. مقدار نفوذپذیری مغناطیسی محیط میزبان و اهداف، برابر با نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد منظور شده و گسترش طولی اهداف دایره‌ای، بسیار زیاد (بی‌نهایت) در نظر گرفته شده است. میزان فرکانس مرکزی موج EM ارسالی نیز ۵۰۰ مگاهرتز انتخاب شده و پیمایش GPR در راستای عمود بر امتداد محور اهداف مدفون، صورت گرفته است.

شکل ۵ (ب) نیز پاسخ GPR این مدل را نشان می‌دهد. رخداد افقی در قسمت بالای شکل (ب)، پاسخ امواج مستقیم هوا و زمین می‌باشد. همان‌گونه که از شکل (ب) مشاهده می‌شود، پاسخ GPR تمامی مدل‌ها در این مورد به صورت شبه‌هذلولی است. البته بایستی توجه نمود که شدت بازتاب و پلاریته پاسخ‌های هذلولی شکل مربوط به مدل‌های با جنس‌ها، اندازه‌ها و اشکال مختلف، با یکدیگر متفاوت می‌باشند. به‌طورکلی شدت بازتاب پاسخ GPR میلگردهای فولادی از پاسخ فضاهای خالی، بیش‌تر بوده و پلاریته پاسخ GPR

میلگردهای فولادی نسبت به پلاریته پاسخ GPR فضاها

خالی، معکوس شده است.

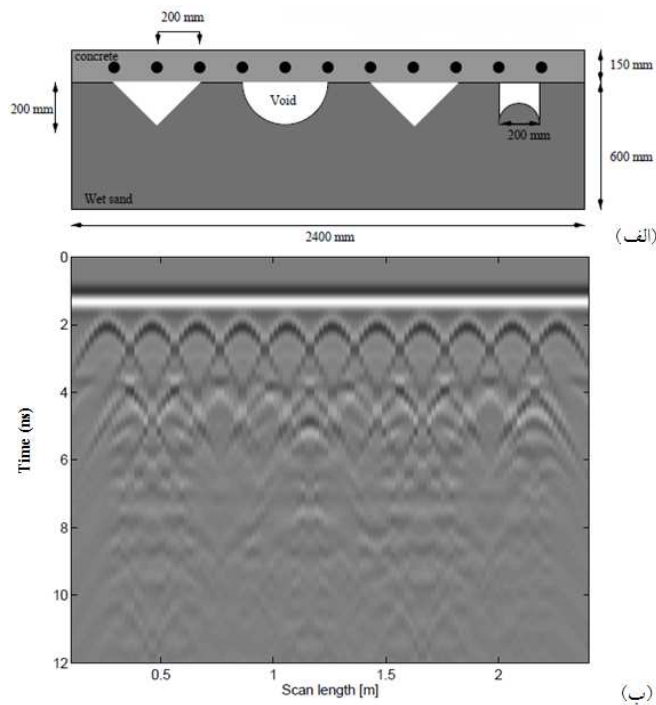


شکل ۴. تاثیر تغییرات توام گذردهی دی الکتریک و هدایت الکتریکی بر پاسخ GPR. برای دو مدل زمین سه لایه‌ای. مدل الف -  $\epsilon_2 = 2\epsilon_1, \sigma_2 = 0.5\sigma_1$ ؛ مدل ب -  $\epsilon_2 = 0.5\epsilon_1, \sigma_2 = 2\sigma_1$  (هدایت الکتریکی برحسب زمینس بر متر می باشد).

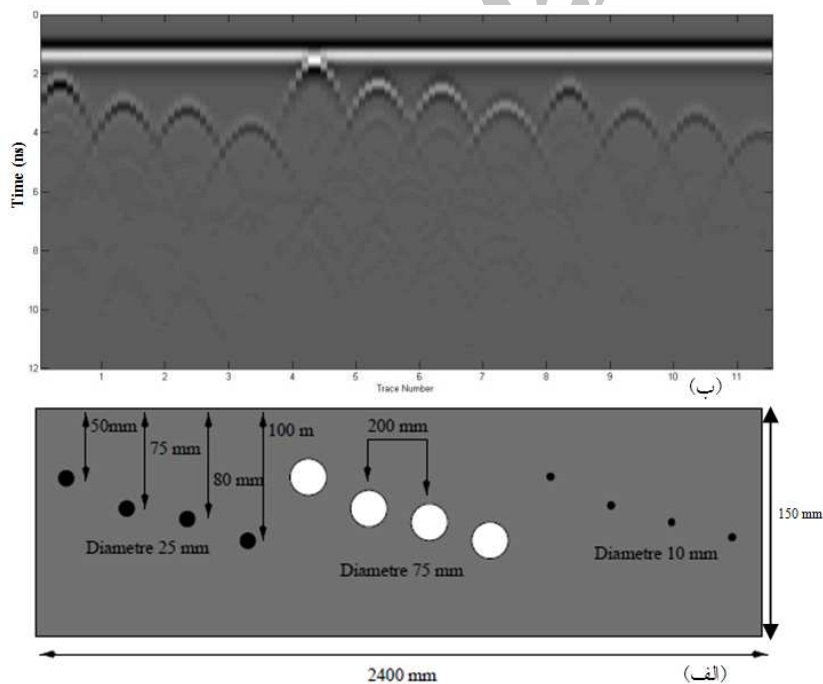
پاسخ GPR تمام اهداف استوانه‌ای به صورت شبه‌هذلولی است اما این شبه‌هذلولی‌ها نیز با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند؛ به عبارت دیگر مشخصات شبه‌هذلولی پاسخ، به جنس هدف، اندازه و عمق دفن آن بستگی دارد (Ahmadi et al., 2015). به‌طور کلی ویژگی‌های شبه‌هذلولی‌های پاسخ ۴ استوانه توخالی (به قطر ۷/۵ سانتی‌متر) از نظر شدت بازتاب و پلاریته، با پاسخ GPR مربوط به میلگردهای فلزی (به قطرهای ۲/۵ و ۱ سانتی‌متر)، متفاوت است و این علامت مشخصه تشخیص استوانه‌های فلزی (مانند میلگردها) از سایر استوانه‌های با جنس‌های مختلف دیگر می‌باشد.

شکل ۶ الف) مدل هندسی اسلب بتنی به ابعاد ۲/۴×۰/۱۵ متر شامل اهداف استوانه‌ای افقی با اندازه‌ها، جنس‌ها و موقعیت‌های مختلف و شکل ۶ ب) نیز پاسخ GPR شبه‌سازی شده این مدل را نشان می‌دهد. مدل مزبور به منظور بررسی و مقایسه پاسخ GPR استوانه‌های افقی فلزی توپر (میلگردهای فلزی جاسازی شده درون بتن) و استوانه‌های افقی توخالی، نشان داده شده است. مقدار فرکانس مرکزی موج ارسالی ۹۰۰ مگاهرتز انتخاب شده و راستای پیمایش GPR عمود بر امتداد محور استوانه‌ها می‌باشد. در قسمت بالای شکل ۶ ب) رخداد افقی، پاسخ امواج مستقیم هوا و زمین بوده و پاسخ GPR تمامی اهداف در این مورد نیز به صورت شبه‌هذلولی است. با مشاهده شکل ۶ ب) ملاحظه می‌شود که اگرچه





شکل ۵. الف- مدل هندسی شامل یک سری میلگردهای فولادی درون بتن و حضور فضاهای خالی با اشکال هندسی مختلف درون ماسه مرطوب در زیر بتن؛ ب- پاسخ GPR مدل.



شکل ۶. الف- مدل هندسی اسلب بتنی شامل استوانه‌های افقی فلزی توپر (میلگردهای فولادی) با اندازه‌های مختلف همراه با استوانه‌های افقی توخالی؛ ب- پاسخ GPR مدل.

سی‌وسه‌پل که یکی از شاهکارهای معماری و پل‌سازی ایران و جهان محسوب می‌شود، در سال ۱۰۱۱ هجری قمری در دوران صفویه در دوره پادشاهی شاه عباس اول، بر روی

۵. ارزیابی ساختار سی‌وسه‌پل اصفهان  
۱-۵. موقعیت جغرافیایی، تاریخچه و معماری سی‌وسه‌پل

در آن، مرتبط ساختن و یکپارچه کردن دو نیم جرز پل به یکدیگر و نیز تقویت پی آن، انجام تعمیرات کلی عرشه و بدنه پل، آهن کشی نعل درگاه راه پله در سکوی بستر رودخانه با تیر آهن شماره ۱۸ و تقویت سطح اتکای آن به وسیله ناودانی شماره ۱۶ با دو رشته در فاصله ۴۰ سانتی متری، قرار دادن تیر آهن های دوبله شماره ۱۶ به طور عمودی و مخفی در زیر سر تیر آهن های نعل درگاه در طرفین راه پله، آرماتوربندی و بتن ریزی کف تیر آهن های عمودی حائل نعلی ها، تنگ گذاری دهانه مجاور راه پله قسمت غربی وسط پل، خالی کردن پشت لنگه طاق تا عمق راه پله و بازسازی مجدد آن به وسیله آجر و سیمان، تعویض سنگ خاقانی کمرکش قوس دهانه، تعمیرات آجرکاری های متلاشی شده در گوشه های اطراف پایه مذکور، تعمیر دهانه کوچک تعبیه شده روی پایه مجاور حوض که در نمای شرقی پل نمایان می باشد و تعمیرات آجرکاری سه جرز اصلی که در اثر فشار و سرایت رطوبت ناشی از سیل به صورت طبله درآمده، از جمله مهم ترین تعمیرات انجام شده در پل می باشند. به هر جهت در حال حاضر وضعیت ظاهری این پل با شکل قدیمی اش تفاوت چندانی نکرده است. به منظور حفظ این بنای باستانی بارزش در حال حاضر فقط عابرین پیاده می توانند جهت تردد از این پل استفاده نمایند.

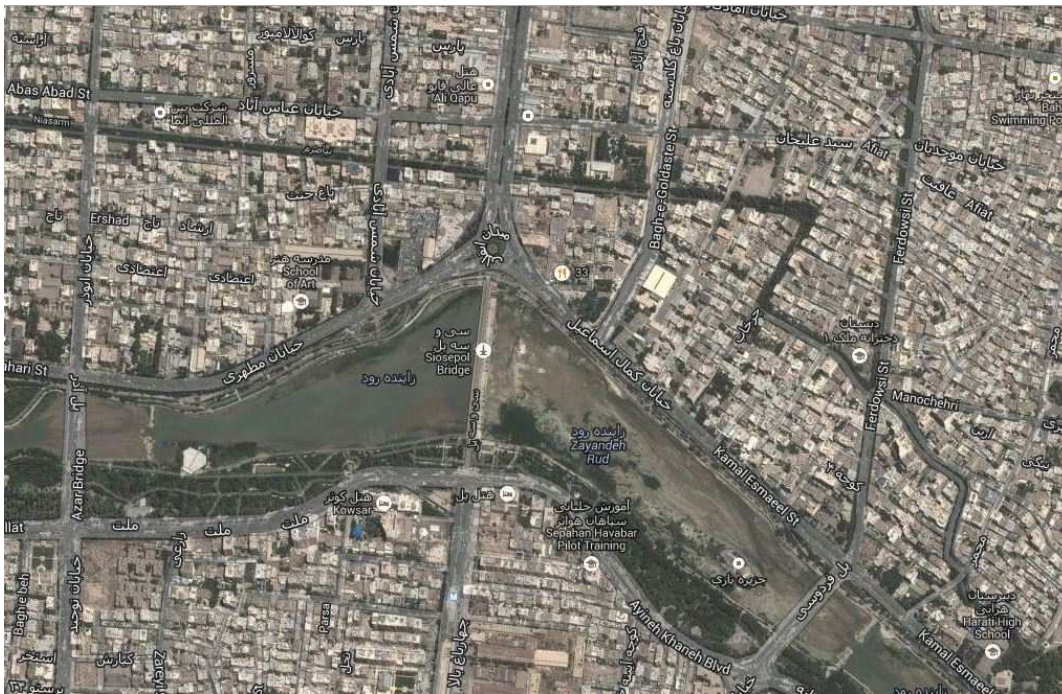
#### ۲-۵. روش شناسی جهت بررسی های ژئوفیزیکی

به منظور تهیه طرح بهسازی، مرمت و تعمیرات لازم پل، مطالعات ژئوفیزیکی این بنا انجام شد. تا زمان انجام پژوهش حاضر بررسی های عمقی ژئوفیزیکی و یا ژئوتکنیکی (گمانه های اکتشافی) در محدوده مورد مطالعه صورت نگرفته و در نتیجه اطلاعات پایه چندانی درباره مقاطع عرضی و طولی پل وجود ندارد. به منظور بررسی وضعیت مصالح بکار رفته، گسیختگی، شکستگی و نشست در بخش های مختلف پل، روش ژئوفیزیکی غیرمخرب GPR به عنوان مناسب ترین روش تشخیص داده شد.

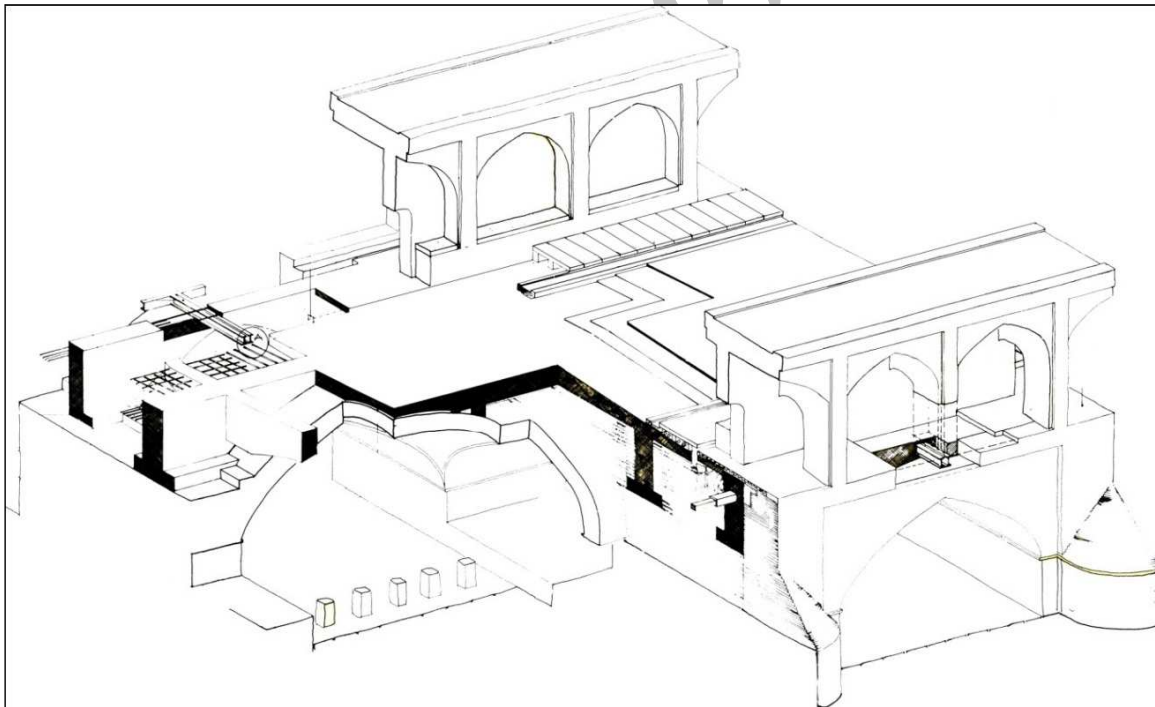
رودخانه زاینده رود در مرکز شهر اصفهان ساخته شد. شکل ۷ تصویر ماهواره ای بخشی از شهر اصفهان و موقعیت جغرافیایی بنای تاریخی سی و سه پل را نشان می دهد.

این پل به نام های پل شاه عباسی، پل الله وردی خان، پل جلفا، پل چهل چشمه و پل سی و سه چشمه نیز معروف است. گفتنی است که سی و سه پل در ابتدا دارای ۴۰ دهانه (چشمه) بوده که ۷ دهانه آن بسته شده و در حال حاضر دارای سی و سه دهانه می باشد. این پل با ۲۹۵ متر طول و ۱۳/۵ متر عرض، طولی ترین پل زاینده رود بوده و چهارباغ عباسی را به چهارباغ بالا وصل می کند؛ یعنی در واقع شمال و جنوب شهر اصفهان را از طریق محور چهارباغ به هم متصل می کند. شالوده این بنای تاریخی غالباً تا ارتفاع پای طاق ها، با سنگ لاشه و آهک (ملات ساروج) ریخته شده و با آجر و گچ، بالا رفته است. به طور ساده استخوان بندی اصلی دو طبقه پل را ترکیبی نسبتاً حجیم و پیوسته در پایین، شامل سی و سه چشمه و طاق های طرفین آن، استوار بر پایه های بزرگ به ابعاد ۱۳/۵×۱۳/۵ متر (عرض پل) تشکیل می دهد. در وسط هر یک از پایه ها دهانه ای به عرض سه متر باز شده و موج شکنی در طرف غرب، آن را پشتیبانی می کند. بر روی هر یک از دهانه های بزرگ زیرین، دو دهانه کوچک در بالا قرار دارد، به گونه ای که بر تیزه هر یک از قوس های زیرین، جرز در بالا سنگینی می کند. حساس ترین بخش ساختمانی پل، طاق های شرقی و غربی گنبد مرکزی هر یک از چشمه ها و مطمئن ترین قسمت پل، پایه ها و پی های زیرین آن هستند. در شکل ۸ طرحی از معماری این اثر باستانی نشان داده شده است.

سی و سه پل در چندین مرحله و در دوره های زمانی مختلف (از جمله فروردین لغایت اسفندماه سال ۱۳۴۹، فروردین لغایت اسفندماه سال ۱۳۵۴، فروردین لغایت اسفندماه سال ۱۳۵۶ و سال های ۱۳۵۷ تا ۱۳۸۵) تحت مرمت و تعمیرات استحکامی متعددی قرار گرفته که منجر به تعمیرات کلی و اساسی عرشه، بدنه و پایه پل گردیده است. تقویت قسمت های باربر طرفین پل از طریق تعبیه ستون های فلزی



شکل ۷. تصویر ماهواره‌ای بخشی از شهر اصفهان و موقعیت جغرافیایی بنای تاریخی سی و سه پل.



شکل ۸. طرحی از معماری سازه سی و سه پل.

میزان گسترش جانبی و عمقی آنها تا عمق پی سنگ سازه سی و سه پل (حداکثر ۸ متر) و براساس برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته در سطح محدوده مورد مطالعه، تعداد ۳۶

۱-۲-۵. سیستم برداشت و نحوه جمع‌آوری داده‌های GPR برای بررسی وضعیت استحکام و نشست در بخش‌های مختلف پل، شناسایی انواع ناپیوستگی‌های احتمالی و تعیین

(اکتشاف) حدود ۵ متر و میزان تفکیک پذیری حدود ۳۰ سانتی متر می باشد (Annan, 2001).

#### ۵-۲-۲. پردازش و تفسیر داده‌های GPR

به منظور پردازش، تحلیل و تفسیر داده‌ها، از نرم‌افزارهای Ground Vision و Radexplorer استفاده شد. نرم‌افزار اول برای نمایش نگاشت‌های راداری و نرم‌افزار دوم برای انجام تصحیحات و پردازش‌های مورد نیاز بکار می‌رود. مهم‌ترین عملیات‌های پیش‌پردازش و پردازشی اعمال شده بر روی داده‌ها جهت ارائه مقاطع نهایی، شامل تصحیح زمان صفر (Time zero correction)، فیلترینگ دی واو (Dewow) یا حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده‌ها، حذف شیف‌ت جریان مستقیم (DC shift removal)، فیلترهای میان‌گذر (Band pass) از جمله باتروث (Butterworth)، حذف متوسط (Subtract mean)، حذف زمینه (Background removal) و انواع تقویت (Gain) دامنه امواج بازتابی با عمق می‌باشد.

تفسیر نتایج پردازش داده‌ها به ترتیب برای مقاطع منطبق بر پروفیل‌های عرضی برداشت شده در دهانه‌های مختلف، پروفیل‌های طولی عرشه پل و پروفیل‌های عرضی از پایه‌های پل، ارائه شده است. در کلیه مقاطع بیضی‌های مشکی رنگ، موقعیت مکانی ناهمگنی‌های زیرسطحی را نشان می‌دهند. در تفسیرهای ارائه شده برای پروفیل‌ها، عوامل با اهمیت (در صورت وجود) به ترتیب شامل موقعیت میلگردها و تیرآهن‌ها در مقطع، موقعیت بخش‌های دارای شکستگی و گسیختگی، موقعیت حفرات و فضاهای خالی، موقعیت نشست‌های احتمالی و موقعیت انحنای طاق‌های گنبدی شکل می‌باشد.

شکل ۹ موقعیت انواع ابزارهای استحکامی شامل تیرآهن‌ها، میلگردهای مشبک فولادی، الوارهای چوبی، بلوک‌های بزرگ سنگی و انواع ناپیوستگی‌ها را در مقاطع عرضی GPR در عرشه سی‌وسه‌پل نشان می‌دهد. در این شکل به منظور مشاهده بخش‌های مهم‌تر و جزئیات بیشتر، فقط بخشی از مقاطع GPR منطبق بر پروفیل‌های مختلف، نشان داده شده است. مطابق شکل ۹ از فاصله حدود پنج متری ابتدای پروفیل‌ها، بخش آسفالت ماشین رو عرشه پل، شروع شده که تا عمق ۲۵ سانتی متری شامل زیرسازی کمپکت (Compact)

پروفیل عرضی در عرشه پل در امتداد شرقی- غربی در راستای عمود بر امتداد پل، ۷ پروفیل طولی در عرشه پل در راستای شمالی- جنوبی به موازات امتداد پل و ۳ پروفیل عرضی از پایه‌های پل، یعنی در مجموع تعداد ۴۶ پروفیل با طول کمینه و بیشینه به ترتیب برابر با ۷ و ۲۹۶ متر، طراحی و برداشت شد. میزان سرعت سیر امواج EM در محیط نیز براساس جنس کلی مصالح تشکیل دهنده پل به طور متوسط  $0.1 \text{ m/ns}$  منظور گردید.

هدف از برداشت پروفیل‌های عرضی در عرشه پل، بررسی وضعیت هر دهانه پل به طور مجزا بوده است. مقصود از برداشت پروفیل‌های طولی در عرشه پل، شناسایی ناهمگنی‌های سطحی (شکستگی‌ها، گسیختگی‌ها، نشست‌ها و حفرات) در فواصل مابین دهانه‌های پل بوده که قبلاً توسط پروفیل‌های عرضی برداشت شده‌اند و پروفیل‌های عرضی از پایه‌های پل، جهت ارزیابی ضخامت پی‌سنگ زیر پل، برداشت شدند.

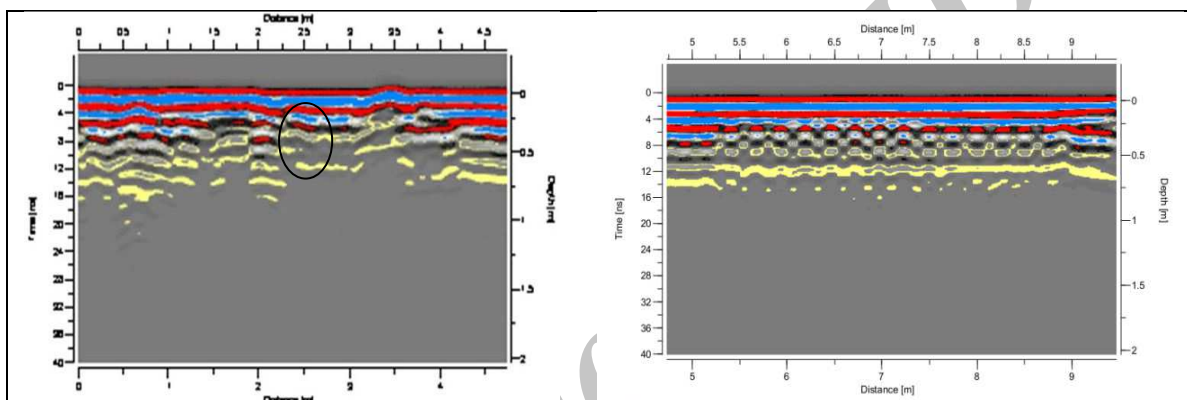
دست‌کم یک پروفیل عرضی منطبق بر هر دهانه عرشه پل برداشت شد به گونه‌ای که دو پروفیل نخست منطبق بر دهانه اول یعنی شمالی‌ترین دهانه پل (سمت میدان انقلاب) بوده و به همین ترتیب از هر دهانه پل یک پروفیل برداشت گردید تا در نهایت پروفیل ۳۶ از دهانه ۳۶ یعنی جنوبی‌ترین دهانه پل (سمت خیابان چهارباغ بالا) برداشت شد. گفتنی است که از دهانه شماره ۱۷ به دلیل کور بودن دیواره شرقی، هیچ برداشتی صورت نگرفت. طول پروفیل‌های عرضی برداشت شده به طور متوسط حدود ۱۴ متر است به گونه‌ای که سعی شده در دهانه‌های باز پل، تا منتهی‌الیه شرقی- غربی گسترش یابند و فواصل بین آنها نیز حدود ۹ متر می‌باشد.

عملیات برداشت GPR در محدوده مورد مطالعه، با استفاده از یک سیستم GPR مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار (Shielded) با فرکانس مرکزی ۵۰۰ مگاهرتز، به روش پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت تک‌حالتی انجام شد. در حالت ایده‌آل سیستم GPR مجهز به آنتن با فرکانس مرکزی ۵۰۰ مگاهرتز، دارای تفکیک‌پذیری حدود ۱۰ سانتی متر و بیش‌ترین میزان عمق نفوذ حدود ۱۰ متر است (www.Malags.com) و در مورد محیط‌های زمین‌شناسی متداول، دارای بیش‌ترین عمق تجسس

می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در مقاطع عرضی، اشیاء و مفتول‌های متنوعی در جای‌جای پل تعبیه شده است که اسلب‌های بتنی تقویت شده با تیرآهن و میلگرد، عمدتاً مربوط به مرمت‌های جدید پل توسط سازمان میراث فرهنگی بوده و بخش‌های تقویت شده با بلوک‌های سنگی و الوارهای چوبی، اکثراً قدیمی بوده و متحمل نشست و شکستگی‌های متعددی گردیده‌اند.

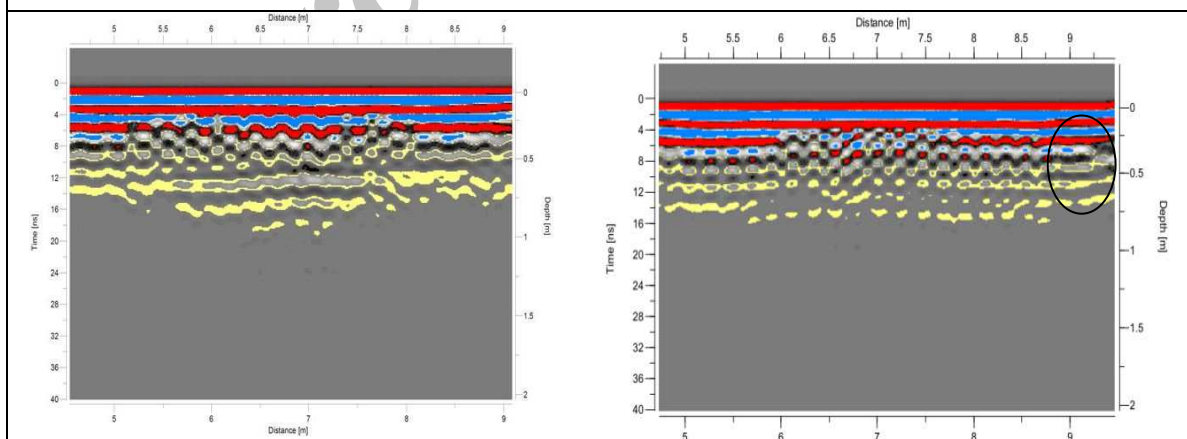
شده با روکش آسفالت بوده و در زیر آن تا عمق حدود نیم‌متری، اسلب‌های بتنی توسط تیرآهن‌ها و میلگردهای مشبک نصب شده، تقویت گردیده است. همان‌گونه که از مقاطع این شکل مشاهده می‌شود، ضخامت کل عرشه پل، حداکثر ۷۵ سانتی‌متر برآورد می‌گردد که در بخش‌های زیرین نیز آثار احتمالاً بلوک‌بندی (سنگ‌چینی و یا داربست چوبی)، قابل مشاهده است.

با بررسی و تفسیر نگاشت‌های راداری پروفیل‌های عرضی برداشت شده در عرشه سازه سی‌وسه‌پل (شکل ۹ الف تا ن)،



(الف) - بخشی از مقطع عرضی منطبق بر دهانه ۱ به طول ۱۴ متر که از شرق به غرب برداشت شده است. بیش‌ترین ضخامت عرشه در بخش شرقی، نیم متر است که در فاصله ۲/۵ متری دارای یک شکستگی باز می‌باشد.

(ب) - ادامه مقطع عرضی منطبق بر دهانه ۱. از فاصله حدود ۵ متری ابتدای پروفیل بخش آسفالت ماشین‌رو عرشه پل شروع شده که تا عمق ۲۵ سانتی متری شامل زیرسازی کمپکت شده با روکش آسفالت بوده و در زیر آن تا عمق حدود نیم متری توسط میلگردهای فولادی و تیرآهن‌هایی که احتمالاً شبکه‌ای نصب گردیده‌اند، تقویت شده است.

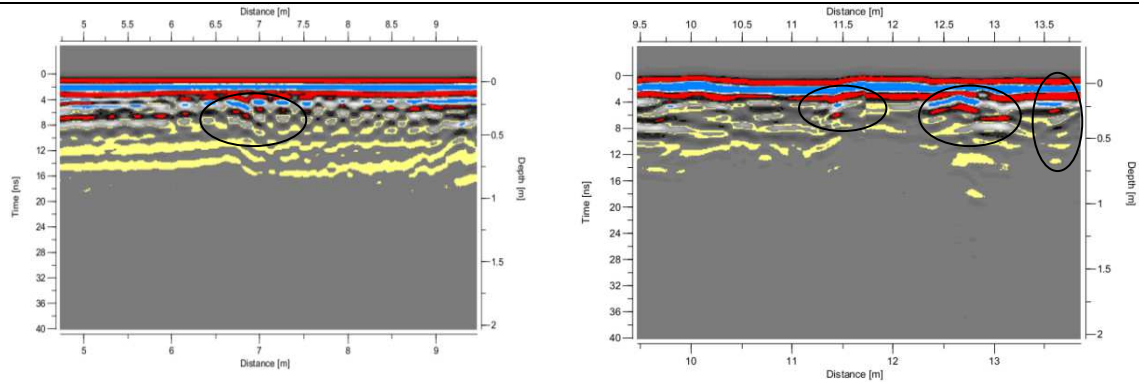


(ج) - بخشی از مقطع عرضی منطبق بر دهانه ۲ به طول ۱۴ متر که از غرب به شرق برداشت شده است. بخش آهن‌کشی شده و تقویت شده با میلگرد محدودده آسفالت راه اصلی در حد فاصل ۵ تا ۸ متری یعنی در طول سه متر و تا عمق بیشینه نیم متری مشهود است.

(چ) - بخشی از مقطع عرضی منطبق بر دهانه ۳ به طول ۱۴ متر که از شرق به غرب برداشت شده است. در این مقطع شبکه تقویت شده با تیرآهن به‌طور منظم در چند ردیف در مرکز پروفیل مشاهده می‌شود که لایه استحکامی در عمق نیم متری دارای گستردگی از ۵ تا ۹ متر و در بخش -

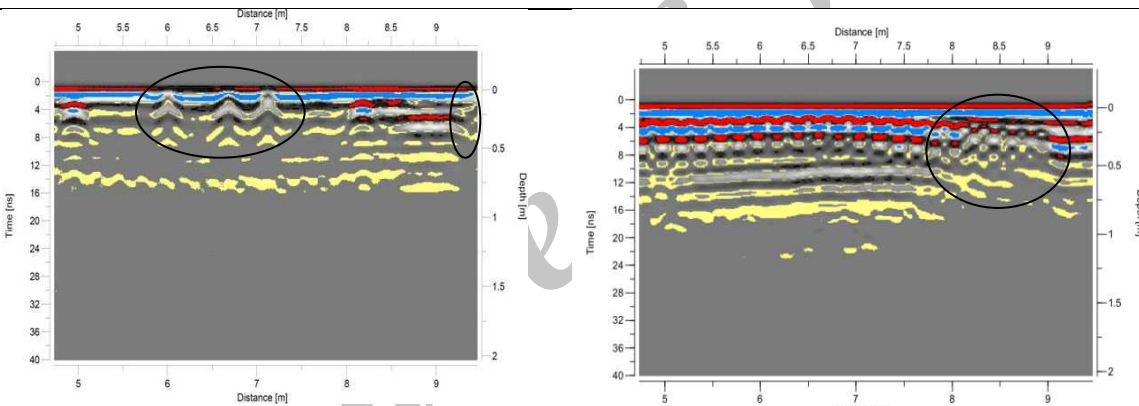


های فوقانی به محدوده ۶ تا ۸ متری ختم می شود. ناپیوستگی های مشاهده شده در انتهای پروفیل ناشی از بهم ریختگی در بلوک های سنگی تشکیل دهنده بدنه پل و از عمق ۲۵ سانتی متری شروع شده است.



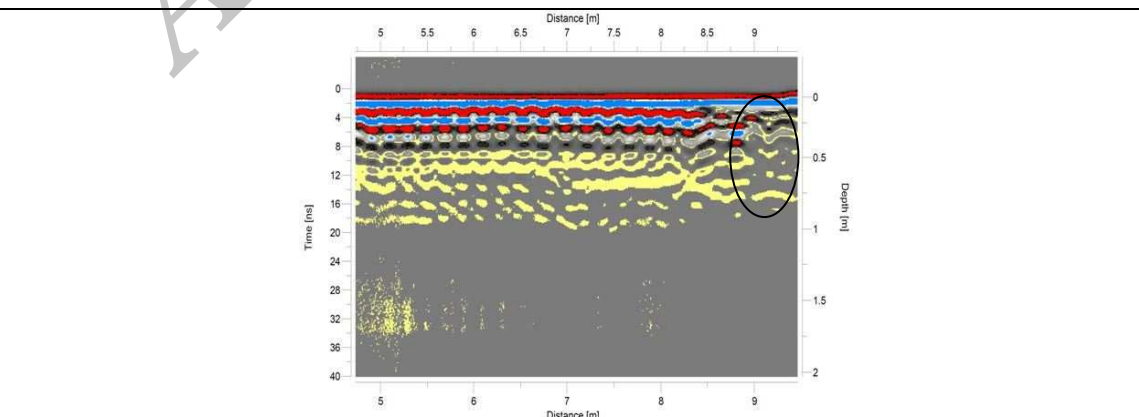
(ج) - بخشی از مقطع عرضی منطبق بر دهانه ۱۴ به طول ۱۴ متر که از غرب به شرق برداشت شده است. نشست و ناپیوستگی در بخش مرکزی عرشه پل قابل مشاهده است.

(خ) - ادامه مقطع عرضی منطبق بر دهانه ۱۴. ناپیوستگی و گسیختگی عرشه پل در مرکز و شرق پروفیل و نیز یک شکستگی در انتهای پروفیل در فاصله حدود ۱۳/۵ متری طول پروفیل، که با نشست جزئی همراه شده، قابل مشاهده است.



(ل) - بخشی از مقطع عرضی منطبق بر دهانه ۱۵ به طول ۱۴ متر که از شرق به غرب برداشت شده است. تنها تعداد محدودی شیء استحکامی (که در بخش مرکزی، غیرفلزی می باشند) همراه با شکستگی و نشست، در انتهای پروفیل مشاهده می گردند. در ابتدا و انتهای جاده آسفالت نیز تقویت کننده های احتمالاً تیرآهنی در فواصل ۵ و ۸/۵ متری مشاهده می شوند.

(م) - بخشی از نگاشت راداری عرضی منطبق بر دهانه ۳۰ به طول ۱۴ متر که از غرب به شرق برداشت شده است. شبکه منظم تیرآهنی در غرب و مرکز پروفیل و نشست الوارهای چوبی در فاصله ۸ تا ۹ متری طول پروفیل قابل مشاهده است.

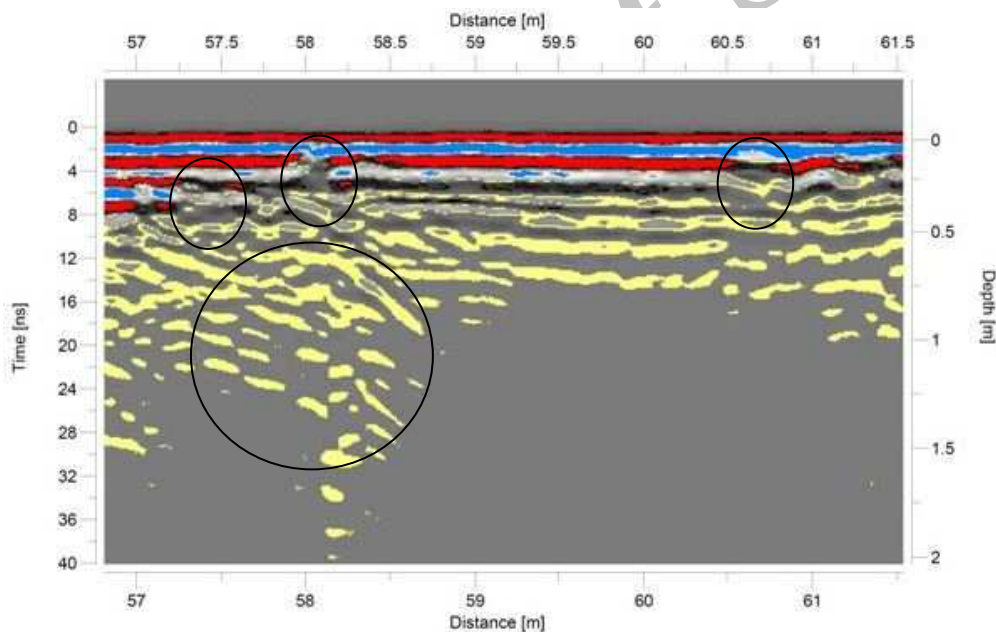


(ن) - بخشی از مقطع عرضی منطبق بر دهانه ۳۵ به طول ۱۴ متر که از شرق به غرب برداشت شده است. موقعیت میلگردهای فولادی به طور منظم در طول مقطع در عمق حدود ۳۰ سانتی متری و موقعیت تیرهای چوبی در بخش غربی مقطع (انتهای پروفیل) مشاهده می شوند.

شکل ۹. شناسایی موقعیت انواع اشیاء استحکامی و ناپیوستگی ها در مقاطع عرضی GPR در عرشه سی و سه پل.

در شکل ۱۱ نیز بخشی از نگاشت راداری منطبق بر پروفیل عرضی برداشت شده از یک پایه پل در بخش شرقی پی سنگ شمالی پل (سمت میدان انقلاب) در امتداد عمود بر محور پل و به طول ۱۲ متر، نشان داده شده است. تفکیک پذیری عمقی این پروفیل تا ۵ متر بوده به گونه‌ای که بتوان عمق کف پی سنگ پل را شناسایی نمود. همان‌گونه که از این مقطع مشاهده می‌شود، بیش‌ترین ضخامت پی سنگ پل در این بخش، حدود دو متر برآورد می‌گردد. در این پروفیل از متر ۴ متری نقطه شروع پروفیل، قطعات بلوک‌های ضخیم سنگی مجزا، که از عمق حدود ۲۵ سانتی‌متری، شروع و تا بیشینه عمق یک متری ادامه دارند، قابل مشاهده است.

شکل ۱۰ بخشی از نگاشت راداری منطبق بر پروفیل طولی غربی پل را نشان می‌دهد. طول این پروفیل ۲۲۶/۵ متر بوده که از اولین دهانه تا آخرین دهانه و در نوار غربی بیرونی پل، برداشت شده است. ضخامت عرشه پل به طور متوسط نیم متر و ناپیوستگی‌های مشاهده شده در طول این پروفیل، مربوط به محل اتصال پایه‌ها به عرشه پل و تقویت کننده‌های تیرآهنی و در بعضی موارد گسیختگی و نشست می‌باشند. در این شکل موقعیت انحنای طاق گنبدی شکل در بین ستون‌ها (در ۵۸ متری طول پروفیل)، گسیختگی‌ها، نشست‌ها و محدوده‌های (فضاهای) خالی در فواصل ۵۷/۵، ۵۸ و ۶۰/۵ متری طول پروفیل در عمق حدود ۲۰ سانتی‌متری قابل مشاهده است.



شکل ۱۰. بخشی از نگاشت راداری منطبق بر پروفیل طولی غربی پل.

آسیب دیدگی شده و مصالح استفاده شده در ساختار آن با چشم قابل مشاهده بود، نیز برداشت‌هایی انجام شد و نتایج آنها با دقت مورد مطالعه قرار گرفت تا در تفسیر برداشت‌های پل استفاده شود. به طور کلی روش اصولی برای کنترل و اعتبارسنجی نتایج برداشت GPR و تفسیرهای آنها، انجام عملیات حفاری ترانشه یا چاهک یا گمانه است. اما از آنجایی که پیاده‌سازی چنین عملیاتی در مورد سازه‌ها و ساختارهای

افزودنی است که تفسیرهای انجام شده در پژوهش حاضر براساس نتایج شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیشرو مدل‌های مصنوعی ایجاد شده در این مقاله و نیز آشنایی و شناخت مولفین از پاسخ GPR اهداف مختلف براساس تجربیات علمی و عملی آنها، انجام گرفته است. همچنین قبل از عملیات برداشت کامل سی‌وسه‌پل، به منظور دست‌یابی به نتایج معقول و ارائه تفسیرهای صحیح، در بخش‌هایی از پل که دچار

شامل تیر آهن و میلگرد تقویتی، بلوک‌های سنگی و الوارهای چوبی می‌باشند و نیز ناپیوستگی‌ها (شکستگی) و نشست، در جای‌جای پل قابل مشاهده هستند و لازم است در خصوص هر یک و با تعیین دقیق محل مورد نظر، مقطع مربوطه مورد بازمینی ذره‌بینی قرار گیرد. در مجموع می‌توان چنین اظهار نظر نمود که ضخامت عرشه پل در بخش آسفالت مرکزی و به ویژه در چهار متر وسط آن، مورد تقویت تیر آهنی قرار گرفته اما در پهلوهای غربی و شرقی پل، ترک‌ها و شکستگی‌هایی مشاهده می‌شود که به خصوص در نزدیکی محل پایه‌ها و همچنین دیوار کنارگذر پل، از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد. بنابراین می‌توان در هر مورد دلخواه به این مقاطع مراجعه و وضعیت ناهمگنی‌های محلی را به طور ویژه ارزیابی نمود.

بررسی منابع موجود در خصوص بکارگیری تکنیک GPR در مطالعات با اهداف مهندسی متعدد و استفاده از آن در مطالعه عملی پژوهش حاضر، حاکی از توانایی و کارایی این روش الکترومغناطیسی غیرمخرب در بازرسی ساختارها و بناهای تاریخی و باستانی با ارزش همانند سی‌وسه‌پل اصفهان می‌باشد. GPR برای این مقاصد یک روش سریع، دقیق و کم‌هزینه است. به هر جهت تجربه کاربر این روش، در پردازش داده‌ها و داشتن فهم درستی از محدودیت‌های این روش، نقش مهمی در تفسیر نتایج و اهداف پروژه خواهد داشت.

تاریخی و باستانی همانند سی‌وسه‌پل، منطقی و معقول نمی‌باشد، بنابراین به منظور کنترل اعتبار تفسیرها، بایستی نتایج با واقعیت‌های معماری مستند پل، تطبیق داده شوند.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی پیشرو به روش تفاضل محدود دوبعدی بهبود یافته در حوزه فرکانس، پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی فرضی متناظر با ساختارهای ژئوتکنیکی متداول همانند زمین لایه‌ای، استوانه افقی و منشور دوبعدی، شبیه‌سازی گردید. سپس مطالعات ژئوفیزیکی سازه سی‌وسه‌پل با روش غیرمخرب GPR و به کمک نتایج مدل‌سازی پیشرو انجام شد. نتایج شبیه‌سازی به منظور شناسایی نوع هدف زیرسطحی (مصالح بکار رفته) و نیز تعیین ضخامت و کف ساختارهای ژئوتکنیکی اسلب مانند همانند آسفالت، بتن و غیره مورد استفاده قرار گرفت.

بر اساس نتایج و اطلاعات به دست آمده از مدل‌سازی پیشرو مدل‌های مصنوعی و طراحی و برداشت تعداد ۴۶ پروفیل GPR واقعی در بخش‌های مختلف پل، ناهمگنی‌های متعددی در مقاطع طولی و عرضی پل مشاهده شد که بایستی با واقعیت‌های معماری مستند پل، تطبیق داده شوند. با توجه به تفسیرهای ارائه شده در خصوص پروفیل‌های برداشت شده براساس نتایج مدل‌سازی پیشرو و تجربیات مولفین، می‌توان چنین استنباط نمود که اشیاء و مصالح مختلفی که عمدتاً

## منابع

- احمدی، ر.، فتحیان‌پور، ن.، نوروزی، غ.ج.، ۱۳۹۱. آشکارسازی خطوط انتقال آب و فاضلاب مدفون و شناسایی برخی مشخصات آنها با استفاده از شبیه‌سازی پاسخ داده‌های GPR. همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی کرمان.
- احمدی، ر.، فتحیان‌پور، ن.، نوروزی، غ.ج.، ۱۳۹۱. کاربردهای ژئوتکنیکی روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در شناسایی پارامترهای فیزیکی و هندسی ناهمگنی‌های زیرسطحی. اولین کنفرانس مهندسی الکترومغناطیس ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- احمدی، ر.، فتحیان‌پور، ن.، نوروزی، غ.ج.، ۱۳۹۳. شناسایی نقاط ضعف پی‌سنگ صحن بنای فرهنگی - تاریخی مسجد امام اصفهان با استفاده از روش رادار نفوذی زمین. اولین همایش ملی رادار نفوذی به زمین، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- احمدی، ر.، فتحیان‌پور، ن.، نوروزی، غ.ج.، ۱۳۹۳. کاربردهای ژئوتکنیکی رادار نفوذی به زمین در شناسایی ناهمگنی‌های زیرسطحی مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی اصفهان. اولین همایش ملی رادار نفوذی به زمین، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.



- احمدی، ر.، ۱۳۹۳. 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، تهران.
- Ahmadi, R., Fathianpour, N., Norouzi, G.H., 2015. Detecting physical and geometrical parameters of some common geotechnical targets through their effects on GPR responses. *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 4843-4854.
- Annan, A.P., 2001. Ground-penetrating radar workshop notes. Sensors and Software Inc. Mississauga, ON, Canada.
- Annan, A.P., Cosway, S.W., De Souza, T., 2002. Applications of GPR to Map Concrete to Delineate Embedded Structural Elements & Defects. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Koppenjan, S.K., Lee, H. (eds.), *Proceeding of SPIE*, Vo. 4758, 359-364.
- Benedetto, A., Benedetto, F., 2001. About the possibility to automate the GPR signal processing for road pavement monitoring. *Proc. SIIV Conference*, Verona, Italy.
- Benedetto, A., Benedetto, F., 2002. GPR Experimental Evaluation of Subgrade Soil Characteristics for Rehabilitation of Roads. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Koppenjan, S.K., Lee, H. (eds.), *Proceeding of SPIE*, Vo. 4758, 708-714.
- Bungey, J.H., Millard, S.G., Shaw, M.R., 1991. The use of sub-surface radar for structural assessment of insitu concrete. *A.C.I., SP128/31*, Vol. 2, 497-514.
- Clemena, G.G., 1991. Short pulse radar methods. Chapter 11 in *Handbook on Non-Destructive Testing of Concrete*, Malhotra, V.M. and Carino, N.J. (eds.), CRC Press, Boston, 253-274.
- Davis, J.L., Rossiter, J.R., Mesher, D.E., Dawley, C.B., 1994. Quantitative measurement of pavement structures using radar. *Proceedings of fifth International Conferences on GPR*, Kitchener, Ontario, Canada.
- Geraads, S., Charachon, B., Loeffler, O., Omnes, G., 2002. Applying a wavenumber notch filter to remove interferences caused by railway sleepers from a GPR section. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Koppenjan, S.K., Lee, H. (eds.), *Proceedings of SPIE*, Vol. 4758, 715-718.
- Giannopoulos, A., 2005. Modelling ground penetrating radar by GprMax. *Construction and Building Materials*, 19: 775-762.
- Gobel, C., Hellmann, R., Petzhold, H., 1994. Georadar model and in-situ investigations for inspection of railways tracks. *Proceedings of Ground Penetrating Radar Conference*, Kitchener, Canada, June 12-16.
- Heiler, M., McNeil, S., Garret, J., 1995. Ground Penetration Radar for Highway and Bridge Deck Condition Assessment and Inventory, *SPIE*, Vol. 2456/195.
- Huston, D., Pelczarski, N., Esser, B., 2000. Damage detection in roadways with Ground Penetrating Radar. *Proc. Eighth International Conference on GPR*, Gold Coasts, Australia.
- Irving, J., Knight, R., 2006. Numerical modelling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB. *Computers & Geosciences*, 3: 1247-1258.
- Jack, R., Jackson, P., 1999. Imaging attributes of railway track formation and ballast using ground probing radar. *NDT&E International* 32: 457-462.
- Jol, H.M., 2009. *Ground-Penetrating Radar theory and applications*. First edition, Elsevier Science, 543p.
- Karlovsek, J., Scheuermann, A., Williams, D.J., 2012. Investigation of voids and cavities in bored tunnels using GPR. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), proceedings. Shanghai, China., 496-501.
- Knödel, K., Lange, G., Voigt, H.J., 2007. *Environmental geology: handbook of field methods and case studies*. Google Books Result, Chapter 4, Geophysics, 1357 p.
- Lai, W.L., Tsang, W.F., 2006. Characterization of pore systems of air/water-cured concrete using ground penetrating radar (GPR) through continuous water injection. *Construction and Building Materials*, 22: 250-256.
- Loken, M., 2005. *Current State of the Art and Practice of Using GPR for Minnesota Roadway Applications*. Minnesota Local Road Research Board Office of Research Services.
- Lorenzo, H., Hernandez, M.C., Cuellar, V., 2000. In Situ Radar Remote Sensing Applied to the Detection of Degradation in a concrete floor. *Eight International Conference on Ground Penetrating Radar*, Noon, D.A., Stickley, G.F., Longstaff, D. (eds.), *SPIE*, Vol. 4084.

- Lorenzo, H., Rial, F.I., Novo, A.N., 2010. Evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain). *NDT&E International*, 44 (1): 8-12.
- Manacorda, G., Morandi, D., Sarri, A., 2002. A customized GPR system for railroad tracks verification. *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Koppenjan, S.K., Lee, H. (eds.), *Proceedings of SPIE*, Vol. 4758, 719-722.
- Ranalli, D., Scozzafava, M., Tallini, M., 2004. Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy), *Journal of Cultural Heritage*, 5: 91-99.
- Saarenketo, T., Scullion, T., 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43: 119-138.
- Sadiku, M.N.O., 2001. *Numerical techniques in electromagnetics*, second edition, Boca Raton London New York Washington, D.C. CRC press.
- Solla, M., Lorenzo, H., Novo, A., Riveiro B., 2011. Evaluation of ancient structures by GPR (ground penetrating radar): The arch bridges of Galicia (Spain). *Scientific Research and Essays*. 6(8): 1877-1884.
- Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F.I., Novo, A., 2012. Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools. *Construction and Building Materials*. 29: 458-465. [WWW.Malags.com](http://WWW.Malags.com)
- Xingxin, X., Qiaosong, Z., Dong, L., Jin, W., Xiangan, W., Jinyin, S., 2010. GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams. *Engineering Geology*, 111: 31-42.
- Zhang, C., Song, M., Wang, L., 2012. Application of GPR in Hole Survey of the Subway Project in Beijing, China. *Energy Procedia*, 16: 702 - 706.

Archive of SID