

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوالکترونیک

شناسایی جنس، بافت و شکستگی های داخلی پل خواجه با استفاده از روش GPR

نگارنده: زهرا امیدی

اساتید راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر علیرضا عربامیری

استاد مشاور:

فریبا سعیدی انارکی

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۲۹۹۷/۳.۴۴
تاریخ: ۹۷/۷/۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم زهرا امیدی با شماره دانشجویی ۹۴۰۲۸۰۴ رشته ژئوفیزیک گرایش ژئوالکترونیک تحت عنوان شناسایی جنس، بافت و شکستگی های داخلی پل خواجه با استفاده از روش GPR که در تاریخ ۹۷/۰۶/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی)..... <input checked="" type="checkbox"/>	مردود <input type="checkbox"/>
نوع تحقیق: نظری <input type="checkbox"/>	عملی <input checked="" type="checkbox"/>

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر علیرضا عرب امیری	دانشیار	
۳- استاد مشاور	دکتر فریبا سعیدی انارکی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر احمد واعظیان	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حمید آقاچانی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محمد رداد	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تیسره در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیر به

خدای متعال، که هر چه داریم از اوست

به امید آنکه توفیق یابیم جز خدمت به خلق او نگوشیم.

پدر، مادر و همسر مهربانم

فرشته‌هایی که از خواسته‌هایشان گذشتند و سختی‌ها را به جان خریدند تا من

به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسیم.

تقدیر و تشکر

از اساتید گرامی جناب آقایان دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علیرضا عرب امیری بسیار سپاسگذارم چرا که با راهنمایی‌ها و کمک‌هایشان همیشه مرا همراهی نمودند و قطعاً بدون زحمات ایشان تدوین این پایان نامه ممکن نبود. همچنین از همسر عزیزم، مهندس ایمان صمدی صمیمانه متشکرم که بدون کمک‌های فراوان، تشویق و حمایتش کاری از پیش نمی‌رفت. از سازمان میراث فرهنگی استان اصفهان برای همکاری آنها در پیشبرد اهداف این پایان‌نامه ممنونم. از شرکت پیشگام تجهیز بنیان برای در اختیار قرار دادن دستگاه GPR و به ویژه سرکار خانم ریحانه فائقی برای همراهی و مساعدت بسیار ایشان در برداشت داده‌ها، صمیمانه تشکر می‌کنم. از جناب دکتر محمدی ویژه و همچنین مهندس مجتبی محمدی به دلیل یاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشمداشت ایشان که حل بسیاری از مسائل را برایم آسانتر نمودند، سپاسگزارم. از مهندس مهدی زارعی و همچنین مهندس قرائی که در برداشت داده‌ها به بنده کمک زیادی نمودند کمال تشکر را دارم. باشد که این خردترین بتواند بخشی از زحمات تمامی آنان را سپاس گوید.

تعهدنامه

اینجانب زهرا امیددی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک – گرایش ژئوالکتریک دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " شناسایی جنس، بافت و شکستگی های داخلی پل خواجه با استفاده از روش GPR " تحت راهنمایی آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علیرضا عربامیری متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در میان روش‌های ژئوفیزیکی مختلف، روش رادار نفوذی به زمین (GPR) می‌تواند انواع ناهمگنی‌های زیرسطحی در عمق کم را با قابلیت تفکیک بالاتر به صورت بهتری آشکارسازی کند. اهداف زیرسطحی در صورتی با روش GPR قابل کشف یا آشکارسازی هستند، که دارای تباین خوبی در مشخصه‌های الکترومغناطیس با محیط‌های اطراف خود باشند.

امروزه روش GPR در باستان‌شناسی به وفور استفاده می‌گردد، که یکی از دلایل آن غیرمخرب بودن این روش است که باعث می‌شود تا خطری متوجه بناهای باستانی نگردد. در همین راستا با هدف شناسایی شکستگی‌های داخلی و همچنین روند و گسترش آنها، و بررسی بافت و جنس مواد به کار رفته در ساخت پل خواجه به وسیله‌ی روش GPR، کارایی این روش در کاربرد مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این پایان‌نامه، هندسه و ساختار پل خواجه مورد بررسی قرار گرفته است. با برداشت پروفیل‌های GPR با طول‌های مختلف و پردازش و تفسیر داده‌های GPR برداشت شده در این بررسی، سعی بر این بوده که به اهداف مورد نظر دست یافته شود.

هندسه و ساختار پل به‌خوبی و با دقت تقریباً بالایی در مقاطع GPR قابل شناسایی بوده است. همچنین وجود ساختارهای داخلی گنبدی شکلی در سقف ساختمان شاه‌نشین مشخص شده، که با چشم قابل رؤیت نبوده‌اند. دیده شدن اثر پایه‌ها در تمامی مقاطع GPR حاصل از پروفیل‌های برداشت شده بر روی کف پل خواجه، این فرضیه را نیز به‌وجود آورد که ابتدا پایه‌های پل به صورت تیغه‌ای شکل ساخته شده و پس از آن سایر قسمت‌ها و اجزاء پل بر روی این پایه‌ها سوار شده‌اند. تعیین جنس مواد به کار رفته در ساخت پل با کمک روش برازش هذلولی نیز تا حدود زیادی صحیح بوده و دارای دقت بالایی می‌باشد. ساختار داخلی پل از لحاظ بافت آن نیز مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده که در بخش‌هایی از مقاطع که بازتاب‌ها

قوی‌تر بوده‌اند، احتمالاً بافت نیز دارای تراکم بیشتری است. از مقایسه‌ی شکستگی‌هایی دارای رخنمون بر روی پل با مقاطع حاصل از برداشت به روش GPR، این نتیجه گرفته شده که شکستگی‌ها در این مقاطع، خود را با تغییر در دامنه‌ی موج GPR نشان می‌دهند. از این موضوع برای شناسایی شکستگی‌های احتمالی داخلی پل و روند و گسترش آنها استفاده شده است. همچنین میزان احتمالی گسترش عمقی شکستگی‌های رخنمون داشته بر روی سطح نیز بررسی گردیده است. البته به علت پیچیدگی مواد به کار رفته در ساختار پل و همچنین وجود نوفه‌های محیطی، شناسایی و تفکیک شکستگی‌ها از سایر اجزاء داخلی پل بسیار دشوار است و با قطعیت همراه نیست. به‌طور کلی با بررسی مقاطع مختلف پروفیل‌های GPR در محل پل خواجو، این نتیجه حاصل شد که روش GPR می‌تواند برای بررسی اهداف اشاره شده در بالا به کار گرفته شده و پاسخ مناسبی در رسیدن به این اهداف دارد.

واژگان کلیدی: رادار نفوذی به زمین (GPR)، پل خواجو، جنس، بافت، هندسه، شکستگی

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۱-۲- سابقه‌ی مطالعات انجام شده ۳
- ۱-۳- ضرورت و اهداف انجام تحقیق ۸
- ۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۸

فصل دوم: اصول، برداشت و پردازش داده‌ها در روش GPR

- ۲-۱- مقدمه ۱۰
- ۲-۲- دستگاه‌های GPR ۱۱
- ۲-۳- انواع روش‌های برداشت GPR ۱۳
- ۲-۳-۱- روش پروفیل‌زنی بازتابی ۱۴
- ۲-۳-۲- روش CMP/WARR ۱۴
- ۲-۴- مبانی نظری روش GPR ۱۶
- ۲-۴-۱- خواص مواد ۱۶
- ۲-۴-۲- معادلات ماکسول ۱۸
- ۲-۴-۳- معادلات ساختاری ۱۹
- ۲-۴-۴- انتشار، سرعت و اتلاف موج GPR در محیط ۲۰

۲۳	..... ۲-۴-۵- بازتاب و عبور امواج GPR در مرز دو محیط
۲۵	..... ۲-۴-۶- قدرت تفکیک
۲۷	..... ۲-۴-۷- عمق نفوذ در امواج GPR
۲۸	..... ۲-۵-۵- پردازش داده‌های GPR
۲۸	..... ۲-۵-۱- فیلتر Dewow
۳۱	..... ۲-۵-۲- تصحیح استاتیک
۳۲	..... ۲-۵-۳- بهره‌ها
۳۴	..... ۲-۵-۴- فیلتر میانگین
۳۴	..... ۲-۵-۵- فیلتر حذف زمینه
۳۵	..... ۲-۵-۶- فیلتر میانگین متحرک

۳- فصل سوم: برداشت داده‌های GPR بر روی پل خواجه

۳۸	..... ۳-۱- مقدمه
۳۹	..... ۳-۲- موقعیت جغرافیایی پل خواجه
۳۹	..... ۳-۳- تاریخچه و ساختار پل خواجه
۴۲	..... ۳-۴- برداشت داده‌های GPR بر روی پل خواجه

فصل چهارم: پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های GPR پل خواجه

۴۶ ۴-۱- مقدمه
----	------------------

- ۴-۲- پردازش مقاطع GPR پل خواجه ۴۷
- ۴-۳- تعیین سرعت و عمق مقاطع GPR پل خواجه ۵۰
- ۴-۴- هندسه و ساختار پل خواجه ۵۳
- ۴-۵- جنس و بافت مصالح به کار رفته در ساخت پل خواجه ۶۷
- ۴-۶- شکستگی‌های موجود در پل خواجه ۶۹

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۶
- ۵-۲- پیشنهادها ۸۹
- منابع فارسی ۸۸
- منابع انگلیسی ۸۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: نحوه‌ی سیر امواج ارسال شده توسط دستگاه GPR در زیر زمین (سمت چپ) و همچنین چگونگی نمایش آنومالی‌ها بر روی مقطع بدست آمده از برداشت به وسیله‌ی این دستگاه (سمت راست). ۱۳
- شکل ۲-۲: نحوه‌ی برداشت به روش پروفیل‌زنی بازتابی ۱۴
- شکل ۳-۲: نحوه‌ی برداشت به روش نقطه‌ی میانی مشترک ۱۵
- شکل ۴-۲: شکل موجک قبل (سمت چپ) و بعد (سمت راست) از بازتاب از فصل مشترک بین دو محیط ۲۱
- شکل ۵-۲: تغییر قطبیت موجک در برخورد با فصل مشترک لایه‌هایی با گذردهی الکتریکی متفاوت ۲۵
- شکل ۶-۲: مقاطع زمانی GPR بدست آمده در برداشت با آنتن‌های ۱۰۰ مگاهرتز (a) و ۲۰۰ مگاهرتز (b) ۲۶
- شکل ۷-۲: شکل یک تریس خام (بالا) و همان تریس پس از اعمال فیلتر Dewow (پایین) ۳۰
- شکل ۸-۲: نمایش یک مقطع به همراه wow (سمت چپ) و همان مقطع پس از اعمال فیلتر Dewow (سمت راست) ۳۰
- شکل ۹-۲: تأثیر اعمال تصحیح صفر زمانی بر روی یک مقطع، قبل از تصحیح (سمت چپ) و بعد از آن (سمت راست) ۳۱
- شکل ۱۰-۲: نمایش نحوه عملکرد بهره AGC بر روی یک تریس GPR ۳۳
- شکل ۱۱-۲: نمایش نحوه عملکرد بهره SEC بر روی یک تریس GPR, Sensors and software, [2016] ۳۴
- شکل ۱۲-۲: تأثیر اعمال فیلتر حذف زمینه بر روی یک مقطع GPR ۳۵

- شکل ۳-۱: نمونه‌هایی از شکستگی‌ها بر دیواره‌ی ساختمان شاه‌نشین پل خواجه که با مستطیل‌های قرمز رنگ در تصویر مشخص شده‌اند. ۳۸
- شکل ۳-۲: تصویر هوایی از پل خواجه ۳۹
- شکل ۳-۳: تصویر ماکت پل خواجه از نمای شرقی ۴۰
- شکل ۳-۴: شکل شماتیک از برش عرضی پل خواجه و سه دسته از مواد مختلف به‌کار رفته در ساخت آن ۴۱
- شکل ۳-۵: برداشت داده‌های GPR در یکی از دالان‌های پل خواجه با دستگاه Utility Scan ساخت شرکت GSSI ۴۳
- شکل ۳-۶: شکل شماتیک از مکان و جهت پروفیل‌های طراحی و برداشت شده بر روی پل خواجه ۴۴
- شکل ۴-۱: طیف فرکانسی داده‌های GPR برداشت شده با آنتن دارای فرکانس مرکزی ۳۵۰ MHz ۴۷
- شکل ۴-۲: مقطع خام پروفیل شماره‌ی ۲۳ ۴۸
- شکل ۴-۳: مقطع پروفیل شماره‌ی ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow ۴۸
- شکل ۴-۴: مقطع پروفیل شماره‌ی ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow و تصحیح صفر زمانی ۴۹
- شکل ۴-۵: مقطع پروفیل شماره‌ی ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow، تصحیح صفر زمانی و فیلتر میانگین ۴۹
- شکل ۴-۶: مقطع پروفیل شماره‌ی ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow، تصحیح صفر زمانی، فیلتر میانگین و فیلتر حذف زمینه ۴۹
- شکل ۴-۷: مقطع پروفیل شماره‌ی ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow، تصحیح صفر زمانی، فیلتر میانگین، فیلتر حذف زمینه و فیلتر میانگین متحرک ۵۰

شکل ۴-۸: استفاده از برآزش هذلولی‌ها در مقطع پردازش شده‌ی پروفیل شماره‌ی ۳ به‌منظور تخمین

عمق ۵۰

شکل ۴-۹: شکل برش عرضی از پل خواجه، مربع‌های کوچک و سبز رنگ نشان‌دهنده‌ی محل پروفیل-

های عبوری از روی پل می‌باشد. مربع بنفش رنگ دالان زیرین پل را نشان می‌دهد؛ که تصویر آن در شکل

۴-۱۰ آمده است. اندازه‌ها در این تصویر برحسب متر است. ۵۲

شکل ۴-۱۰: تصویر دالان زیرین پل خواجه که محل آن در شکل ۴-۹ با مربع بنفش رنگ نشان داده

شده است. ۵۳

شکل ۴-۱۱: نمای شرقی پل خواجه به همراه نمایش محل و طول پروفیل‌های عبوری از بخش گذرگاه

پل. اعداد نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی پایه‌های پل می‌باشند. دو مربع آبی رنگ در ابتدا و انتهای پل دو حجره

موجود در دو سوی پل را نشان می‌دهند. اندازه‌ها در این شکل برحسب متر می‌باشد. ۵۴

شکل ۴-۱۲: مقطع پردازش شده از پروفیل ۷. اعداد نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی پایه‌های پل می‌باشد.

مستطیل آبی رنگ حجره‌ی موجود در ابتدای پل را نشان می‌دهد. ۵۵

شکل ۴-۱۳: مقطع پردازش شده از پروفیل ۵. اعداد نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی پایه‌های پل می‌باشد. ۵۶

شکل ۴-۱۴: مقطع پردازش شده از پروفیل ۳. اعداد نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی پایه‌های پل می‌باشد.

مستطیل آبی رنگ حجره‌ی موجود در انتهای پل را نشان می‌دهد. ۵۶

شکل ۴-۱۵: مقطع پردازش شده از پروفیل ۱۵. اعداد نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی پایه‌های پل می‌باشد.

..... ۵۷

شکل ۴-۱۶: تصویری از نمای غربی پل خواجه. مستطیل زرد رنگ نشان‌دهنده‌ی یکی از پایه‌های

بیرون زده‌ی پل می‌باشد. ۵۸

شکل ۴-۱۷: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۳، برداشت شده در دالان پل. پیکان در تصویر نشان

دهنده‌ی عمق شروع پایه‌های پل است. ۵۹

شکل ۴-۱۸: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۶. پیکان سیاه رنگ در این تصویر مرز تغییر جنس پایه‌ها

که در مقطع با هذلولی‌هایی مشخص شده را نشان می‌دهد. ۶۰

شکل ۴-۱۹: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲. پیکان سمت راست شکل نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های

پل است. ۶۱

شکل ۴-۲۰: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۵. پیکان سمت راست شکل نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های

پل است. ۶۲

شکل ۴-۲۱: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۸. پیکان سمت راست شکل نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های

پل است. ۶۲

شکل ۴-۲۲: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۱. پیکان سمت راست شکل نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های

پل است. ۶۳

شکل ۴-۲۳: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۴ که در یکی از دالان‌های پل برداشت شده. چراغ‌های

موجود در سطح پل در این مقطع با هذلولی نمایان شده‌اند؛ که محل تعدادی از آنها با بیضی‌های زرد رنگ

نشان داده شده است. ۶۴

شکل ۴-۲۴: تصویری از ساختمان شاه‌نشین پل خواجه و سه گنبد بزرگ موجود در آن ۶۵

شکل ۴-۲۵: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۷. اعداد نشان دهنده‌ی هذلولی‌های است که بر اثر وجود

گنبد‌های موجود در زیر این پروفیل به وجود آمده. پیکان سمت راست مقطع، عمق این هذلولی‌ها را نشان

می‌دهد. ۶۵

شکل ۴-۲۶: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۳. این مقطع گنبد شماره‌ی ۲ را با یک هذلولی نشان

داده است. پیکان سمت راست مقطع، عمق این هذلولی را نشان می‌دهد. ۶۶

شکل ۴-۲۷: برآزش هذلولی به سه دسته هذلولی در اعماق مختلف از مقطع شماره‌ی ۹..... ۶۸

شکل ۴-۲۸: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۵. مستطیل‌های سیاه رنگ ستون‌هایی از پل که احتمالاً

متراکم‌تر از سایرین هستند را نشان می‌دهند..... ۶۹

شکل ۴-۲۹: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل

شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل-

های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح

پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان

می‌دهند. ۷۱

شکل ۴-۳۰: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل

شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل-

های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح

پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان

می‌دهند. ۷۱

شکل ۴-۳۱: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۳. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل

شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل-

های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح

پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان

می‌دهند. ۷۲

شکل ۴-۳۲: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۴. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی-

هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز

رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ... ۷۲ شکل ۴-۳۳: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۵. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۳

شکل ۴-۳۴: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۶. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۳

شکل ۴-۳۵: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۷. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۴

شکل ۴-۳۶: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۸. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح

پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۴

شکل ۴-۳۷: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۹. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۵

شکل ۴-۳۸: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۰. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۵

شکل ۴-۳۹: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۱. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۶

شکل ۴-۴۰: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۲. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح

پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۶.....

شکل ۴-۴۱: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۳. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۷.....

شکل ۴-۴۲: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۴. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۷.....

شکل ۴-۴۳: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۵. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۸.....

شکل ۴-۴۴: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۶. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح

پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۸.....

شکل ۴-۴۵: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۷. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۷۹.....

شکل ۴-۴۶: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۸. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۸۰.....

شکل ۴-۴۷: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۹. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۸۰.....

شکل ۴-۴۸: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۰. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح

پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۸۱

شکل ۴-۴۹: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۱. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل - های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۸۱

شکل ۴-۵۰: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۲. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل - های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می - دهند. ۸۲

شکل ۴-۵۱: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۳. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل - های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند. ۸۲

فهرست جداول

جدول ۱-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد مختلف ۲۳

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

رادار نفوذی به زمین یا به اختصار GPR^1 یکی از روش‌های ژئوفیزیکی است که به دلیل داشتن عمق نفوذ کم، قدرت تفکیک بالا و همچنین سرعت زیاد در برداشت‌های صحرائی، به سرعت جای خود را در کارهای مهندسی و باستان‌شناسی باز کرده است (احمدی و فتحیان‌پور، ۱۳۹۵). این روش بر اساس انتشار امواج الکترومغناطیس (EM) با پالس‌های خیلی کوتاه (۱-۲۰ ns) در باند فرکانسی بالا (از ۱۰ MHz تا ۱ GHz) که با آنتن فرستنده تولید و به درون زمین پراکنده می‌شوند، استوار است [Lubowiecka et al., 2011]. این امواج به تغییرات خواص الکترومغناطیسی مواد در اعماق کم پاسخ می‌دهند. روش GPR شباهت‌های زیادی به روش لرزه‌نگاری بازتابی (انعکاسی) دارد. به این صورت که فرستنده دستگاه GPR امواج الکترومغناطیسی تولید و به داخل زمین ارسال می‌کند. سپس این امواج به مواد و فصل مشترک لایه‌های زیرسطحی برخورد کرده و بر اساس این مسأله که گذردهی الکتریکی نسبی مواد با هم متفاوت است، از فصل مشترک بین این مواد و لایه‌های زیرسطحی بازتاب نموده و با توجه به شدت و نحوه بازتاب‌ها، باعث شناسایی هدف می‌شود. سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس، که عامل اصلی کنترل‌کننده‌ی گسترش بازتاب‌هاست، به وسیله‌ی تباین^۳ گذردهی نسبی بین مواد پس‌زمینه و هدف (یا تباین بین لایه‌ها) تعیین می‌شود [Baker and Jol, 2007]. این روش برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به کاربردهای آن در زمینه‌ی زمین‌شناسی، معدن، کشاورزی، اکتشاف منابع زیرزمینی، تعیین ضخامت یخچال‌ها، مهندسی، باستان‌شناسی و... اشاره کرد [Denis, 2009]. در سه دهه اخیر این روش به شکل وسیعی در اکتشافات و بررسی‌های باستان‌شناسی نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

^۱ Ground Penetrating RADAR

^۲ Pulse

^۳ Contrast

۱-۲- سابقه‌ی مطالعات انجام شده

تاکنون مقالات زیادی در مورد استفاده از GPR در کاوش‌های باستان‌شناسی و همچنین بررسی

شکستگی‌ها در منابع و مجلات مختلف به چاپ رسیده؛ که در ادامه برخی از آنها آمده است:

یکی از اولین کاربردهای GPR در باستان‌شناسی، به‌وسیله‌ی ویکرز^۱ در سال ۱۹۷۶ در سایت چاکو

کانیون^۲ در نیومکزیکو^۳ آمریکا انجام شد [Vickers et al., 1976]. با این مطالعه محل دیوارهای احتمالی

که در اعماق کمتر از یک متری زیر زمین واقع شده بود، تعیین شد. همچنین در سال ۱۹۹۲ در هالا سلطان

تکه^۴ واقع در قبرس [Fisher et al., 1992] و سایت باستانی سرن^۵ کشور السالوادور^۶ [Sheets et al., 1985]

از GPR به‌منظور کاوش‌های باستان‌شناسی استفاده شد.

در ایتالیا پیپان^۷ و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از روش GPR به بررسی مرز زمین‌شناسی کرتاسه-

ترشیاری پرداختند و در نتیجه‌ی این تحقیق شکستگی، لایه‌بندی و حفره‌های کارستی آن را به صورت

سه‌بعدی مدل کردند [Pipan et al., 2000]. در اثر انفجار در معادن، شکستگی‌هایی در سنگ‌های دیواره‌ی

تونل‌ها ایجاد می‌شود؛ که باعث ناپایداری تونل و در نتیجه افزایش خسارات مالی و جانی می‌گردد، از این رو

گروندر^۸ در آفریقای جنوبی مطالعه‌ای بر روی اثرات انفجار بر سنگ‌های معدن و شکستگی‌های آنان نمود و

توانست با کمک GPR میزان افزایش عمق و تعداد شکستگی‌ها را پس از هر بار انفجار نشان دهد [Grodner,

^۱ Vikcers

^۲ Chaco Canyon

^۳ New Mexico

^۴ Hala Sultan Tekke

^۵ Ceren

^۶ El Salvador

^۷ Pipan

^۸ Grodner

[2001]. گرگوایر^۱ و هالوکس^۲ (۲۰۰۲) با به‌کارگیری روش GPR شکستگی‌های چند معدن نظیر آهک و نمک را پیدا کردند [Gregoire and Halleux, 2002]. در لچه^۳ ایتالیا، لوچی^۴ و نگری^۵ (۲۰۰۵) با مطالعه بر روی یک سایت باستانی به نام کاوالینو^۶ توانستند ساختارهایی با شکل‌های منظم را پیدا کنند که بعداً به‌وسیله‌ی حفاری در منطقه مشخص شد که علت آن وجود دیوارهای قدیمی در زیر زمین بوده است [Leucci and Negri, 2005]. پرسانی^۷ و همکاران با مطالعه بر روی یک قطعه‌ی بزرگ از سنگ گرانیت در جنوب برزیل در سال ۲۰۰۶ شکستگی‌های موجود در آن را مدل کردند [Porsani et al., 2006]. در سال ۱۹۰۳ یک سنگ لغزش عظیم در کوه ترتل^۸ کانادا رخ داد و اثرات بسیار بدی را به همراه داشت؛ بر این اساس تیون^۹ و همکاران (۲۰۰۶) برای جلوگیری از خطرات احتمالی موفق شدند تا با پیدا کردن ابعاد، جهت و عمق نفوذ شکستگی‌های موجود در این کوه با استفاده از روش GPR به تجزیه و تحلیل پایداری شیب آن پردازند [Theune et al., 2006]. در آفریقای جنوبی دنیس^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۹) به مطالعه بر روی اثر هنری سنگی^{۱۱} از جنس ماسه‌سنگ پرداختند. آنها در این تحقیق از آنتن با فرکانس مرکزی ۱/۵ GHz استفاده کرده و توانستند شکستگی‌های دارای بازشدگی زیاد را تا حدودی شناسایی کنند [Denis et al., 2009]. همچنین در اکتشافات باستان‌شناسی می‌توان به مقاله‌ای که توسط کانیرز^{۱۲} در سال ۲۰۰۹ بر روی

^۱ Gregoire

^۲ Halleux

^۳ Lecce

^۴ Leucci

^۵ Negri

^۶ Cavallino

^۷ Porsani

^۸ Turtle

^۹ Theune

^{۱۰} Denis

^{۱۱} Art rock

^{۱۲} Conyers

بقایای مدفون در یک دره در یوتای جنوبی^۱ در آمریکا انجام شد، اشاره کرد [Conyers, 2009]. در همین سال، اورلاندو^۲ و همکارانش یک بلوک بتنی را در آزمایشگاه تحت فشار قرار داده و تلاش کردند تا از این طریق، تغییر شکل سازه را پس از فشار وارده بر آن با استفاده از دستگاه GPR فرکانس بالا بررسی نمایند. هرچند به دلیل استفاده از میل‌گردهای زیاد در بلوک بتنی به نظر می‌رسید که سیگنال‌های دریافتی از تغییر شکل و یا شکستگی‌ها، با سیگنال‌های قوی منعکس شده از میل‌گردها پوشانده شده باشند. مسأله‌ی دیگری که ممکن است منجر به دیده نشدن شکستگی‌ها شده باشد، این است که تنها شکستگی‌های بسیار ریزی^۳ پس از فشار وارده بر بلوک بتنی به‌وجود آمده بودند [Orlando et al., 2009].

ماسینی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۰، به بررسی سه کلیسای قدیمی در ایتالیا به کمک روش GPR پرداخته و جنس ستون‌ها، کف و نیز محل شکستگی‌های داخلی در این ستون‌ها را تعیین نمودند [Masini et al., 2010]. در کشور روسیه، کووین^۵ (۲۰۱۱) توانست با استفاده از روش GPR شکستگی‌های موجود در دیواره‌ی یک معدن نمک را تعیین کند [Kovin et al., 2011]. کانیرز در سال ۲۰۱۱ دیواره‌های مدفون یک بنای باستانی در آریزونا^۶ جنوبی در آمریکا را با استفاده از روش GPR مطالعه نموده و بافت و جنس مواد به‌کار رفته در این دیواره‌ها را شناسایی کرد [Conyers, 2011]. در همین سال، لوبوویکا^۷ و همکارانش در اسپانیا به بررسی یک پل تاریخی به کمک چندین روش که یکی از آنها GPR بود؛ پرداختند [Lubowiecka et al., 2011]. آنها در نتیجه‌ی این کار موفق شدند قسمت‌های همگن و ناهمگن پل از لحاظ مواد به‌کار رفته در ساخت آن را تشخیص دهند. لوچی و همکاران (۲۰۱۱) با ترکیب دو روش GPR

^۱ Southern Utah

^۲ Orlando

^۳ Micro-fractures

^۴ Masini

^۵ Kovin

^۶ South Arizona

^۷ Lubowiecka

و توموگرافی صوتی روی سه ستون از کلیسای تریکاریکو^۱ که در طی زمان آسیب‌های جدی به آنها وارد شده بود، میزان خردشدگی و آسیب‌های وارده به هر یک از ستون‌ها را بررسی و با یکدیگر مقایسه کردند [Leucci et al., 2011]. سولا^۲ و همکاران (۲۰۱۱) بر روی چندین پل تاریخی در منطقه‌ی گالیسین^۳ در اسپانیا مطالعات GPR انجام دادند؛ که نتیجه‌ی آن پیدا کردن چندین حفره در پل‌ها، گنبد‌های داخلی و آثار مرمت‌های قبلی بود [Solla et al., 2011]. سرن^۴ و آچیکگوز^۵ (۲۰۱۲) در آنکارای ترکیه با استفاده از روش GPR، گسترش شکستگی‌ها و همچنین بلوک‌های بزرگ و بدون شکستگی را در یک سایت معدنی از جنس مرمر مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. با این کار ایشان توانستند باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ی بهره‌برداری از این معدن شوند [Seren and Acikgoz, 2012]. در سال ۲۰۱۳ در کشور هند، مطالعه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی از جمله GPR روی زمینی از جنس گرانیت توسط سونکمبل^۶ و همکارانش انجام شد و با شناسایی شکستگی‌ها، مناطق دارای پتانسیل وجود آب زیرزمینی کشف شد [Sonkamble et al., 2013]. اونیشی^۷ و همکاران (۲۰۱۴) با ترکیب دو روش GPR و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی به شناسایی میزان آسیب‌دیدگی داخلی در یک مجسمه‌ی سنگی بزرگ در کلمبیا پرداختند [Onishi et al., 2014]. گودمن^۸ نیز در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش GPR ساختارهای داخلی از جمله ستون‌ها را در یک سایت باستانی در رم ایتالیا و همچنین در یک کلیسای قدیمی در پورتوریکو^۹ شناسایی کرد [Goodman, 2014]. در اسپانیا سولا و همکاران (۲۰۱۴) بر روی یک پل تاریخی بررسی‌هایی را انجام

^۱ Tricarico

^۲ Solla

^۳ Galician

^۴ Seren

^۵ Acikgoz

^۶ Sonkamble

^۷ Onishi

^۸ Goodman

^۹ Puerto Rico

دادند. آنها ابتدا با استفاده از روش لیزر اسکنر زمینی (TLS)^۱ هندسه‌ی دقیق پل را بدست آوردند، سپس برداشت داده‌های GPR با دو آنتن با فرکانس‌های مرکزی متفاوت را روی این پل انجام دادند. مقاطع حاصل از برداشت GPR، نتایج بدست آمده از روش TLS را به‌طور کامل تأیید می‌کرد. همچنین بررسی این مقاطع منجر به تشخیص ساختارهای هذلولی شکلی در داخل پل شد؛ که با چشم قابل رؤیت نبودند [Solla et al., 2014].

الکرموتی^۲ و همکاران (۲۰۱۷) دو مطالعه‌ی موردی بر روی دو تخته‌سنگ مجزا از یک معدن انجام دادند و برای هر کدام از آنتن‌هایی با فرکانس مرکزی متفاوت (یکی فرکانس پایین و دیگری فرکانس بالا) استفاده کردند. آنها با شناسایی تراکم و عمق شکستگی‌ها، این سنگ‌ها را از لحاظ باصرفه بودن برای بهره‌برداری اقتصادی مورد بررسی قرار دارند [Elkarmoty et al., 2017]. پرز^۳ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش‌های TLS و GPR به مطالعه بر روی یک پل سنگی باستانی در اسپانیا پرداختند و آن را از نظر درجه‌ی امنیت برای ادامه‌ی استفاده، مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین بخش‌هایی از پل که نیاز به تعمیر و نگهداری بیشتر داشت را شناسایی نمودند [Pérez et al., 2018].

از تحقیقاتی که در ایران بر روی موضوع مشابه کار شده است، می‌توان به مقاله‌ی احمدی و فتحیان‌پور (۱۳۹۵) اشاره کرد. آن‌ها با استفاده از روش GPR به شناسایی وضعیت مصالح بکار رفته و ناپیوستگی‌های ساختاری سی‌وسه‌پل اصفهان پرداختند و محل آن‌ها را بر روی پل مذکور تعیین کردند (احمدی و فتحیان-پور، ۱۳۹۵).

^۱ Terrestrial laser scanner

^۲ Elkarmoty

^۳ Pérez

۱-۳- ضرورت و اهداف انجام تحقیق

مصالح تشکیل دهنده ی پل خواجو به گونه ای است که جریان آب نه تنها به آنها آسیبی وارد نمی کند، بلکه باعث استحکام پل می شود؛ همان گونه که در طی سالیان با عبور آب این پل همچنان پابرجا بوده است. البته در طی سال های اخیر به علت باز و بسته شدن مداوم آب رودخانه، از استحکام پل کاسته شده و اهمیت مراقبت و تلاش برای حفظ این اثر ارزشمند بیش از پیش خودنمایی می کند. هدف از این تحقیق این است که با استفاده از روش غیر مخرب GPR شناسایی شکستگی ها، عمق و گسترش آنها و همچنین شناخت جنس و بافت مواد تشکیل دهنده ی پل انجام شود و بدین ترتیب گامی هرچند کوچک در حفظ این اثر ملی برداشته شود. غیر مخرب بودن، سرعت بالا و هزینه ی پایین اجرای این روش اهمیت مسأله را روشن می سازد به ویژه آن که روش بررسی دیگری برای این منظور که ویژگی ها و نتایج مشابه را داشته باشد، وجود ندارد.

۱-۴- ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر مشتمل بر پنج فصل می باشد. در فصل اول مقدمه ای در خصوص پایان نامه و اهداف و ضرورت انجام تحقیق آمده است و سابقه موضوع تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم به مبانی فیزیکی و نظری روش GPR و تئوری انتشار امواج الکترومغناطیسی پرداخته شده است. فصل سوم به توضیح نحوه ی برداشت داده های GPR و چگونگی طراحی پروفیل ها بر روی پل خواجو می پردازد. در فصل چهارم داده های برداشت شده با استفاده از نرم افزار ReflexW پردازش و سپس مقاطع حاصل از پردازش از جنبه های مختلف تفسیر شده و مورد بررسی قرار گرفته اند. در فصل پنجم، نتایج حاصل از این پایان نامه جمع بندی و به صورت خلاصه ارائه شده است و پیشنهادهایی برای ادامه و بهبود کار ارائه گردیده است.

فصل دوم

اصول، برداشت و پردازش داده‌ها

در روش GPR

۲-۱- مقدمه

اولین بار در سال ۱۹۲۰ میلادی از روش‌های اکتشافی الکتریکی توسط برادران شلومبرژه در فرانسه، برای اکتشاف ساختارهای زیرسطحی استفاده شد [Awangku and Halim, 2009]. همچنین هولسمیر^۱ اولین کسی بود که ایده‌ی استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا برای بررسی‌های زیرسطحی را در سال ۱۹۰۴ ارائه داد. توسعه این ابزارها از حدود سال ۱۹۵۶ آغاز شد و از سال ۱۹۷۰ به بعد توسعه آن سرعت قابل توجهی یافت؛ که علت این امر را می‌توان پیشرفت فوق‌العاده در تکنولوژی و کامپیوتر بعد از سال ۱۹۶۰ دانست [Parasnis, 1997]. در این دوران انواع مختلفی از این سیستم ساخته شد و برای کاربردهای گوناگون مورد استفاده قرار گرفت. برای مثال کشور بریتانیا از این سیستم در دوران جنگ جهانی دوم استفاده می‌کرد. گذشته از کاربردهای چشم‌گیر آن در فعالیت‌های نظامی و غیرنظامی هم‌اکنون رادار یک ابزار قدرتمند در بررسی‌های زیرسطحی است.

GPR با نام‌های دیگری همچون رادار جستجوی زمینی^۲، رادار نفوذی به زیر سطح^۳، ژئورادار^۴، رادار پالسی^۵، بازتاب الکترومغناطیسی (EMR)^۶ و رادار مرزی زیرسطحی (SIR)^۷ شناخته می‌شود [حسینی، ۱۳۸۸]. روش GPR برای به تصویر درآوردن ساختارها و ویژگی‌های اشیاء مدفون در زیر زمین و به نقشه درآوردن جزئیات زیرسطحی بدون نیاز به مغزه‌گیری و ایجاد تغییر در محیط استفاده می‌شود [Annan, 2001]. قبل از کاربرد GPR، معمول‌ترین روش‌ها در بررسی‌های کم‌عمق و سطحی، لرزه‌نگاری بازتابی و

^۱ Hulsmeyer

^۲ Ground-probing radar

^۳ Subsurface Penetration Radar

^۴ Georadar

^۵ Impulse Radar

^۶ Electro Magnetic Reflection

^۷ Subsurface Interface Radar

انکساری بوده‌اند؛ اما نیاز به تفکیک بالاتر مواد یا ساختارها در برخی موارد، توجه به دیگر روش‌های ژئوفیزیکی که دارای قدرت تفکیک بالاتری نسبت به روش‌های لرزه‌ای باشند را افزایش داد. یکی از روش‌های موفق در این زمینه، GPR بود. علی‌رغم قابلیت‌های بالای این روش، می‌توان به معایبی همچون عمق نفوذ محدود آن اشاره کرد. به همین جهت از GPR در بررسی‌های نزدیک سطح (عموماً کمتر از ۵۰ متر) استفاده می‌شود. در این رابطه گزارش‌های حاصل از تحقیقات رسوب‌شناسی نشان می‌دهد که عمق نفوذ برای فرکانس ۴۰ تا ۵۰ مگاهرتز ۳۰ تا ۴۰ متر، فرکانس ۱۰۰ مگاهرتزی ۱۰ تا ۲۵ متر، فرکانس ۲۰۰ مگاهرتزی ۵ تا ۱۵ متر و برای فرکانس ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتزی فقط چند متر است. در تحقیقات به‌عمل آمده، بیشترین عمق نفوذ بدست آمده با امواج GPR در سنگ‌های خشک و شن و ماسه‌های خشک و خالص بوده است [Smith and Jol, 1995; Baker et al., 2007; Jol and Bristow, 2003]. در صورت بالا بودن رسانندگی الکتریکی لایه سطحی، این عمق به‌شدت کاهش یافته و به کمتر از ۱۰ متر می‌رسد. برای مثال، با استفاده از یک آنتن GPR ۱۰۰ مگاهرتزی در رسوبات رسی، عمق نفوذ چند متر و در رسوباتی که منافذ آنها با آب شور پر شده است، عمق نفوذ به تنها چند سانتی‌متر کاهش می‌یابد [Neal, 2004]. در این فصل سعی شده تا به‌طور مختصر به مبانی نظری و فیزیکی روش GPR پرداخته شود.

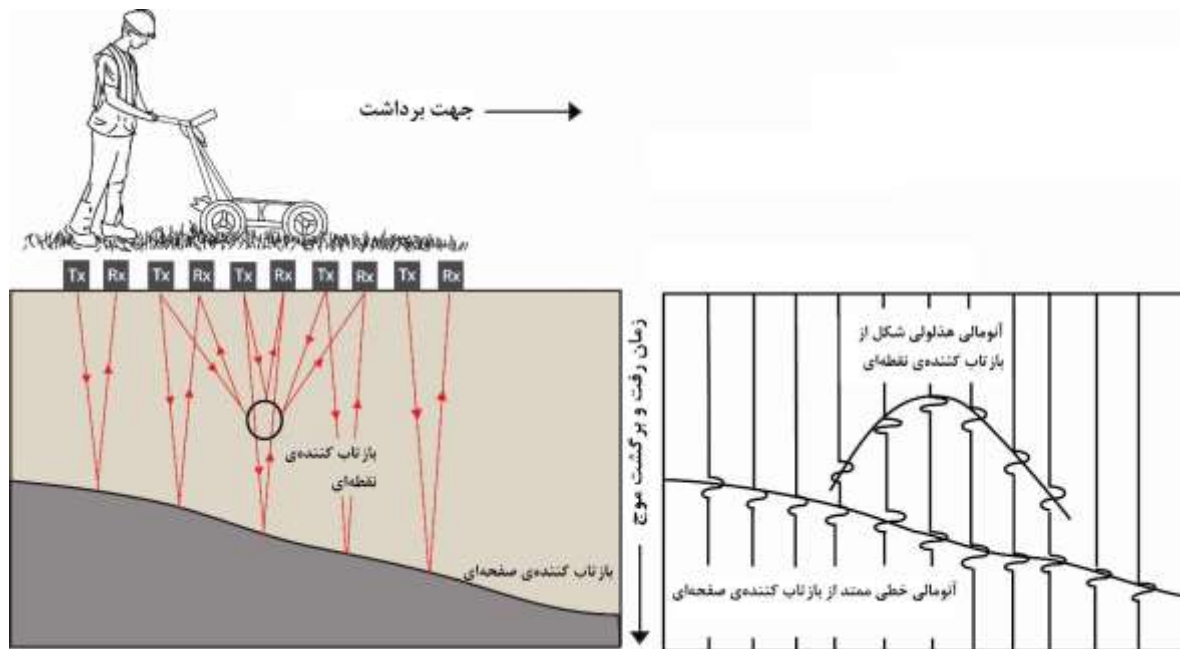
۲-۲- دستگاه‌های GPR

دستگاه‌های مختلف پالس‌رآدار (رآدار با امواج پالسی شکل) که برای بررسی‌های زیرسطحی به کار می‌روند، مجموعاً تحت عنوان دستگاه‌های GPR، نام‌گذاری شده‌اند [Parasnis, 1997]. دستگاه‌های GPR از دهه ۱۹۸۰ به‌صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفته و کاربرد آن از اواسط دهه ۱۹۹۰ به‌شدت افزایش یافته است [Neal, 2004].

یک دستگاه GPR دارای یک فرستنده و یک گیرنده می‌باشد. امواج الکترومغناطیسی با فرستنده به

داخل زمین فرستاده می‌شوند. این امواج با سرعت زیادی در زمین منتقل می‌شوند و هنگامی که به یک شیء و یا سطح برخورد کنند، بر اثر تغییر امپدانس الکترومغناطیسی در این محل‌ها، قسمتی از امواج از سطح عبور می‌کند و قسمتی دیگر بازتاب خواهد شد. همچنین بخشی از انرژی در لایه‌ها و یا اشیاء مدفون نفوذ می‌کند (شکل ۱-۲). مقدار انرژی بازتابی و عبوری و همچنین مقدار انرژی اتلافی بستگی به خواص الکتریکی مواد در دو طرف فصل مشترک دارد. اگر زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیس که از آنتن فرستنده ساطع و بعد از بازتاب از اهداف زیرسطحی به آنتن گیرنده باز می‌گردد، اندازه‌گیری شود، می‌توان عمق هدف موردنظر را تعیین نمود. این امر در صورتی امکان‌پذیر است که سرعت پالس (موج الکترومغناطیس) در محیط مشخص باشد. زمان رفت و برگشت موج از چند ده تا چندین هزار نانوثانیه متغیر است [Knodel et al., 2007]. 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 محور قائم، فاصله زمانی ارسال موج از فرستنده و دریافت با گیرنده (TWT^1) را نشان می‌دهد. در شکل ۱-۲ چگونگی آشکارسازی اهداف GPR نشان داده شده است. برای تعیین مکان دقیق آنومالی‌ها، باید محور عمودی که همان محور زمان است؛ به عمق تبدیل شود. برای این منظور لازم است تا سرعت سیر موج در ساختارهای مختلف زیرسطحی در منطقه مورد بررسی تعیین شود.

¹ Two way time



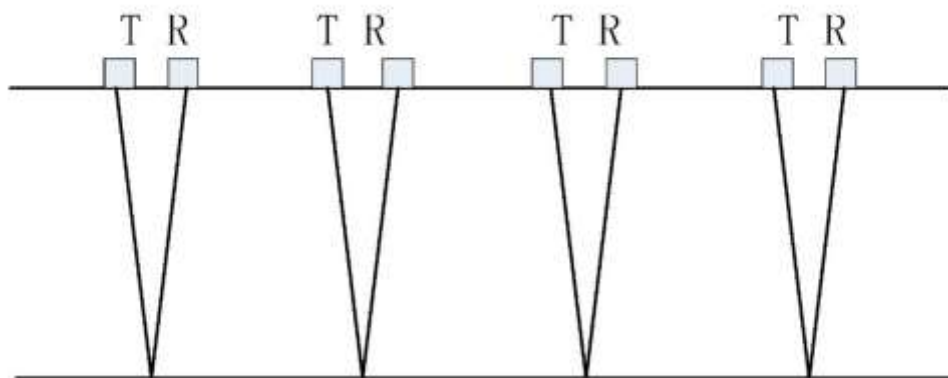
شکل ۱-۲: نحوه‌ی سیر امواج ارسال شده توسط دستگاه GPR در زیر زمین (سمت چپ) و همچنین چگونگی نمایش آنومالی‌ها بر روی مقطع بدست آمده از برداشت به وسیله‌ی این دستگاه (سمت راست) [After Kiadong, 2018]

۳-۲- انواع روش‌های برداشت GPR

در برداشت‌های GPR، شدت مؤلفه میدان الکتریکی‌ای که اندازه‌گیری می‌شود، به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و در مقابل زمان ثبت می‌شود [Annan, 2003]. بین زمان انتشار سیگنال از چشمه و زمانی که بازتاب به آشکارساز می‌رسد، یک تأخیر انتشار وجود دارد. پایه و اساس GPR اندازه‌گیری این تأخیر زمانی است. با فرض این که شرایط سرعتی یکنواخت باشد، تأخیر زمانی طولانی‌تر به معنی بیش‌تر بودن فاصله تا هدف است [Annan, 2011]. از روش‌های گوناگون برداشت به روش GPR، در ادامه به دو مورد از پرکاربردترین آنها اشاره می‌شود:

۲-۳-۱- روش پروفیل‌زنی بازتابی^۱

این روش دورافت مشترک^۲ نیز نامیده می‌شود و نحوه‌ی برداشت در آن به این صورت است که آنتن‌ها با فاصله‌ی یکسان از هم بر روی سطح زمین حرکت داده می‌شوند (شکل ۲-۲). این روش پروفیل‌زنی که معمول‌ترین روش برداشت داده‌ها است، می‌تواند هم به صورت پروفیل‌زنی پیوسته و هم گسسته انجام شود. در روش پروفیل‌زنی گسسته، آنتن‌ها در موقعیت ثابت بر روی زمین قرار گرفته و بعد از اتمام برداشت در آن نقطه، به ایستگاه بعدی منتقل می‌شوند. در این حالت چون فاصله‌ی بین آنتن‌ها ثابت بوده و جفت‌شدگی^۳ بین آنتن‌ها و زمین کمتر است، بازتاب‌ها به صورت واضح و با دامنه بیشتری دیده می‌شوند [Neal, 2004].



شکل ۲-۲: نحوه‌ی برداشت به روش پروفیل‌زنی بازتابی [Lu et al., 2017]

۲-۳-۲- روش CMP/WARR

در روش CMP یا نقطه‌ی میانی مشترک^۴، فاصله بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده مرتباً تغییر می‌کند، به گونه‌ای که نقطه‌ی میانی بین آنتن‌ها ثابت خواهد بود. برداشت با این روش یا آرایش به صورت شماتیک

^۱ Reflection profiling

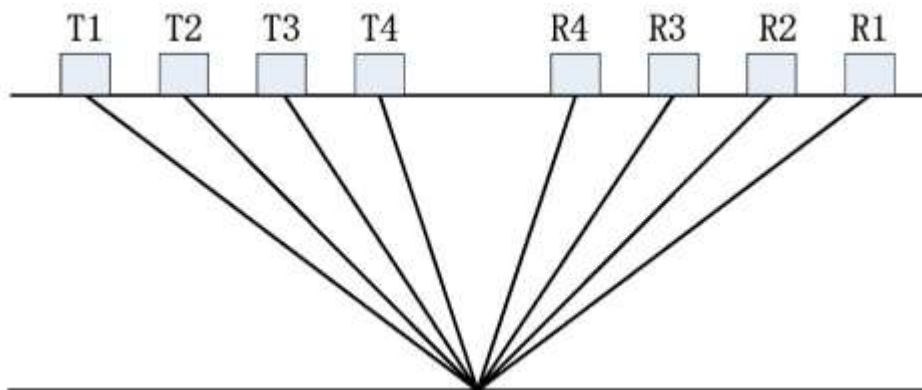
^۲ Common offset

^۳ Coupling

^۴ Common mid-point (CMP)

در شکل ۲-۳ نشان داده شده است و استفاده از آن برای بدست آوردن تخمینی از تغییرات سرعت امواج GPR نسبت به عمق به کار می‌رود [Reynolds, 1997]. در روش یا آرایش WARR که به نام روش بازتاب و شکست زاویه‌ی باز^۱ نیز گفته می‌شود، فرستنده در موقعیت ثابتی قرار گرفته و گیرنده در طول پروفیل جابه‌جا می‌شود. این شیوه از برداشت باید در منطقه‌ای انجام شود که بازتاب‌کننده‌های اصلی در آن منطقه، صفحه‌ای و افقی باشند و یا این که شیب آنها بسیار کم باشد. همچنین در استفاده از این روش فرض بر این است که مشخصات بازتاب‌کننده‌های زیرسطحی در تمام منطقه برداشت تغییر نمی‌کند. واضح است که چنین فرضی همیشه درست نمی‌باشد.

در دستگاه‌های اولیه GPR که از کابل‌های فلزی برای اتصالات استفاده می‌شد، از آرایش WARR استفاده می‌کردند. هرچند با استفاده از سیستم‌های مدرن، از جمله دستگاه‌هایی که از کابل‌های فیبر نوری استفاده می‌کنند، آرایش CMP، به دلیل مزایای ذکر شده نسبت به آرایش WARR، روش استاندارد برداشت داده‌ها برای بدست آوردن سرعت در ساختارهای زیرسطحی می‌باشد [Annan, 2001].



شکل ۲-۳: نحوه‌ی برداشت به روش نقطه‌ی میانی مشترک [Lu et al., 2017]

^۱ Wide angle reflection and refraction

۲-۴- مبانی نظری روش GPR

اساس روش GPR بر پایه‌ی پاسخ محیط انتشار موج یا میدان الکترومغناطیسی تولید شده به وسیله‌ی آنتن فرستنده، به خصوصیات الکترومغناطیسی محیط که شامل گذردهی دی‌الکتریک^۱ (ϵ)، رسانندگی الکتریکی^۲ (σ) و تراوایی مغناطیسی^۳ (μ) می‌باشد؛ استوار است [Jol, 2009]. در بین این خصوصیات، گذردهی الکتریکی مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده امواج الکترومغناطیس در محیط انتشار آنهاست. در ادامه تأثیر هر یک از پارامترهای ذکر شده توضیح داده خواهد شد.

۲-۴-۱- خواص مواد

الف) گذردهی دی‌الکتریک

گذردهی الکتریکی، قابلیت مواد در قطبیده شدن، حفظ قطبیدگی و ذخیره انرژی الکتریکی در پاسخ به اعمال میدان الکتریکی خارجی (متغیر با زمان) است [Olhoeft, 1998]. این عامل مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده امواج الکترومغناطیس در ساختارهای مورد بررسی است. در صورت اعمال میدان الکتریکی متغیر با زمان بر روی یک ماده عایق یا با رسانایی خیلی کم، بارهای الکتریکی موجود در آن به آرامی و به طوری که اثر میدان خارجی را خنثی کنند؛ جابه‌جا می‌شوند. جابجایی بارهای مثبت و منفی ماده، تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی، دوقطبی‌های الکتریکی را به وجود می‌آورد [Telford et al., 1990]. تعداد گشتاورهای دوقطبی القاء شده در واحد حجم ماده (D)، متناسب با میدان الکتریکی خارجی (E) است؛ که ثابت تناسب گذردهی دی‌الکتریک (در سیستم SI بر حسب فاراد بر متر) است (معادله ۲-۱۳) [Annan, 2001].

^۱ Dielectric permittivity

^۲ Electric resistivity

^۳ Magnetic permeability

گذردهی الکتریکی را می‌توان به صورت یک تابع مختلط نوشت:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (1-2)$$

در این صورت گذردهی الکتریکی شامل مؤلفه ذخیره انرژی و میزانی از قطبیدگی (مؤلفه حقیقی یا ε') و مؤلفه اتلاف انرژی (مؤلفه موهومی یا ε'') می‌باشد. این دو مؤلفه نسبت به یکدیگر ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند. بخش موهومی (ε'') با میزان افت انرژی که ناشی از رسانندگی و فرکانس است، مرتبط می‌باشد [Daniels, 2004]:

$$\varepsilon' = \varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad [F/m] \quad (2-2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad [F/m] \quad (3-2)$$

بنابراین رابطه گذردهی نسبی با مؤلفه‌های حقیقی و موهومی آن به صورت زیر است [Packard, 1992]:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0} - i \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_0} \right) \quad (4-2)$$

گذردهی نسبی، پارامتر اساسی در تعیین سرعت انتشار (V) و در نتیجه طول موج سیگنال (λ) است.

روابط بین آنها در روابط (۲-۵) و (۲-۶) نشان داده شده است:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (5-2)$$

$$\lambda = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} * \frac{1}{f} \quad [m] \quad (6-2)$$

ب) رسانندگی الکتریکی

رسانندگی الکتریکی پارامتری است که سهولت حرکت الکترون‌ها در یک ماده را که تحت تأثیر

میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است، بیان می‌کند [Saaranketo, 1998]. این ویژگی در تضعیف امواج الکترومغناطیسی پارامتر مهمی است. تأثیر رسانندگی در تضعیف امواج GPR با نسبت جریان رسانی (در نتیجه حرکت الکترون‌ها و یون‌ها در موادی با رسانندگی الکتریکی پایین تحت تأثیر میدان الکتریکی) به جریان جابجایی (و در نتیجه ذخیره انرژی الکتریکی در مواد) که به فاکتور افت (δ) یا فاکتور اتلاف موج GPR معروف است؛ به صورت زیر بیان می‌شود [Annan, 2001]:

$$\delta = \frac{\sigma}{\epsilon' \omega} \quad (7-2)$$

در این رابطه ω فرکانس زاویه‌ای موج الکترومغناطیسی است.

ج) تراوایی مغناطیسی

تراوایی مغناطیسی رفتار گشتاور مغناطیس ذاتی مولکول‌ها و اتم‌ها را در پاسخ به میدان مغناطیسی خارجی توصیف می‌کند. به عبارت دیگر، این پارامتر نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ای از انرژی الکتریکی یا الکترومغناطیسی ذخیره و پراکنده شده در ماده‌ای است که در معرض میدان خارجی قرار دارد [Powers, 1997]. مقدار تراوایی مغناطیسی برای بیشتر خاک‌ها، سنگ‌ها و رسوبات غیر مغناطیسی، کوچک و تقریباً برابر با تراوایی مغناطیسی خلأ در نظر گرفته می‌شود [Ulaby, 2001]. تراوایی مغناطیسی نسبی که به صورت نسبت تراوایی مغناطیسی مواد به تراوایی مغناطیسی خلأ تعریف می‌شود، بر انتشار امواج GPR تأثیرگذار است؛ البته برای بیش‌تر موادی که در قلمرو کاربردهای GPR هستند، این مقدار برابر واحد بوده و در کاربردهای GPR نقش چندانی ندارد [Mancilla and Trevifio, 1996].

۲-۴-۲- معادلات ماکسول

از آنجایی که امواج فرستاده شده به زمین در روش GPR از نوع امواج الکترومغناطیس هستند، بنابراین می‌توان گفت که الکترومغناطیس پایه و اساس GPR می‌باشد. معادلات ماکسول نیز پایه و اساس

الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند؛ به نحوی که تمام پدیده‌های الکترومغناطیس در مقیاس ماکروسکوپی با این معادلات قابل توصیف است [Giannopoulos, 2005]. ماکسول قوانین اساسی الکتریسیته و مغناطیس را با انجام برخی تصحیحات به صورت چند معادله اساسی خلاصه کرد [Daniels, 2004]. معادلات ماکسول اساس انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط را به صورت زیر توضیح می‌دهند [Jol, 2009]:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (۸-۲)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (۹-۲)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = q_v \quad (۱۰-۲)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (۱۱-۲)$$

در این معادلات \bar{E} بردار شدت میدان الکتریکی (ولت بر متر)، \bar{B} بردار چگالی شار مغناطیسی (تسلا)، \bar{J} بردار چگالی جریان الکتریکی (آمپر بر مترمربع)، \bar{D} بردار جابجایی الکتریکی یا چگالی بار الکتریکی (کولن بر مترمربع)، \bar{H} بردار شدت میدان مغناطیسی (آمپر بر متر)، و q_v چگالی حجمی بار الکتریکی (کولن بر مترمکعب) و t زمان بر حسب (ثانیه) است.

۲-۴-۳- معادلات ساختاری

این معادلات که رفتار الکترون‌ها، اتم‌ها و مولکول‌ها در پاسخ به میدان‌های الکترومغناطیسی را توصیف

می‌کنند، به صورت زیر بیان می‌شوند [Jol, 2009]:

$$\bar{J} = \tilde{\sigma} \bar{E} \quad (۱۲-۲)$$

$$\bar{D} = \tilde{\epsilon} \bar{E} \quad (۱۳-۲)$$

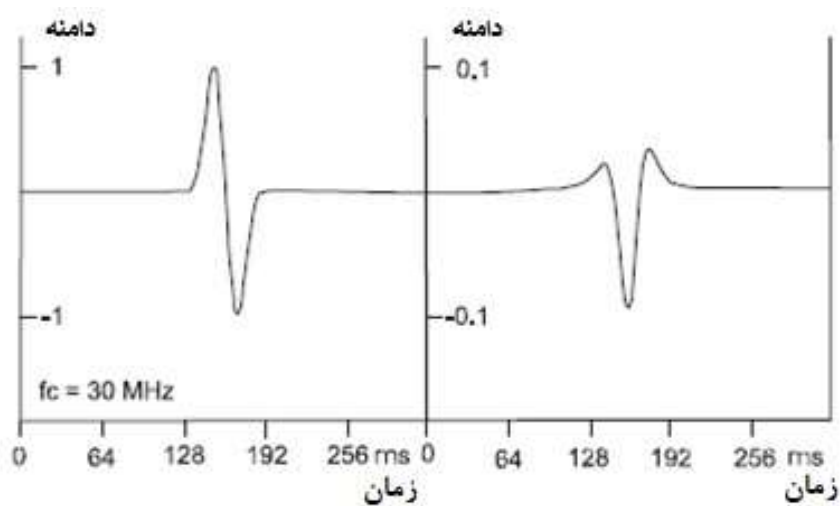
$$\bar{B} = \tilde{\mu} \bar{H} \quad (۱۴-۲)$$

در این معادلات $\tilde{\sigma}$ رسانندگی الکتریکی، $\tilde{\epsilon}$ گذردهی دی‌الکتریکی و $\tilde{\mu}$ تراوایی مغناطیسی هستند. این پارامترها ویژگی‌های فیزیکی مواد هستند؛ که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در محیط کنترل می‌کنند و معمولاً پارامترهای ساختاری اطلاق می‌شوند. به‌طور کلی این پارامترها می‌توانند به‌صورت تابعی از مکان، جهت، شدت میدان اعمال شده و زمان باشند [Giannopoulos, 2005]. $\tilde{\epsilon}$ ، $\tilde{\sigma}$ و $\tilde{\mu}$ کمیت‌های تانسوری هستند و می‌توانند به‌صورت غیرخطی باشند. در همه‌ی فعالیت‌های اجرایی GPR این مقادیر به‌صورت کمیت‌های اسکالر مستقل از میدان عمل می‌کنند؛ به بیان دیگر پاسخ به حضور میدان، یکسان و مستقل از شدت میدان است. اگرچه این فرضیات به‌ندرت معتبر می‌باشند؛ ولی در عمل توصیف چنین پیچیدگی‌هایی بسیار مشکل است. پاسخ مواد به زمان اعمال میدان نیز بستگی دارد. این مقادیر زمانی در صورتی که نرخ تغییرات میدان کم باشد، ثابت و زمانی که نرخ تغییرات میدان زیاد باشد، متغیر در نظر گرفته می‌شوند [Jol, 2009].

۲-۴-۴- انتشار، سرعت و اتلاف موج GPR در محیط

امواج الکترومغناطیس همانند امواج لرزه‌ای در محیط انتشار پیدا می‌کنند؛ اما چند اختلاف اساسی بین

رفتارهای این دو نوع موج وجود دارد، که توجه به آنها در حین انجام عملیات صحرائی و پردازش داده‌ها، بسیار حائز اهمیت است. انتشار امواج الکترومغناطیس نسبت به امواج صوتی وابستگی بیشتری به فرکانس موج ارسالی دارد. این وابستگی به فرکانس سبب تغییر در شکل پالس ارسالی در عبور، انعکاس و انکسار از فصل مشترک‌های مختلف می‌شود [Knodel et al., 2007]. شکل ۲-۴ تغییر به وجود آمده در موجک ارسالی به زمین، قبل و بعد از برخورد به یک فصل مشترک و بازتاب از آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: شکل موجک قبل (سمت چپ) و بعد (سمت راست) از بازتاب از فصل مشترک بین دو محیط
[After Knodel et al., 2007]

مؤلفه میدان الکتریکی یک موج تخت، که در جهت عمقی Z منتشر می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌شود [Hippel, 1954]:

$$E(t, z) = E_0 e^{i(\omega t - yz)} \quad [Vm^{-1}] \quad (15-2)$$

که در این رابطه، میدان الکتریکی E و فرکانس زاویه‌ای $\omega = 2\pi f$ [s⁻¹] می‌باشد.

مؤلفه میدان مغناطیسی امواج الکترومغناطیس عمود بر مؤلفه‌ی میدان الکتریکی بوده و مانند مؤلفه‌ی

میدان الکتریکی عمود بر جهت انتشار می باشد. موج الکترومغناطیس به صورت یک مخروط سه بعدی پیچیده به درون زمین منتشر می شود [Neal, 2004].

سرعت موج الکترومغناطیس منتشره در داخل زمین را می توان از رابطه زیر بدست آورد [Knodel et al., 2007]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\epsilon \omega})^2}}{2}}}} \quad (16-2)$$

در رابطه (۱۶-۲) C_0 سرعت موج الکترومغناطیس در خلأ، μ_r بخش حقیقی تراوایی مغناطیسی نسبی، ϵ_r بخش حقیقی ضریب دی الکتریک محیط نسبت به هوا و ω فرکانس زاویه ای موج GPR می باشند. در محیط های کم اتلاف عبارت $(\frac{\sigma}{\epsilon \omega})$ نزدیک به صفر است. همچنین μ_r در محیط های غیر مغناطیسی کوچک بوده و می توان آن را برابر با ۱ در نظر گرفت. به این ترتیب داریم [Parasnis, 1997; Reynolds, 1997; Van Overmeeren, 1994]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (17-2)$$

البته باید در نظر داشت که این رابطه برای مواد با رسانندگی بالا نظیر آب دریا و برخی از انواع رس ها و یا مواد مغناطیسی از قبیل مگنتیت و هماتیت درست نیست [Annan, 2001]. چند مثال از مشخصات الکترومغناطیس مواد مختلف شامل مقادیر گذردهی الکتریکی نسبی، رسانندگی، سرعت و اتلاف موج در محیط های مختلف در جدول ۱-۲ آمده است.

جدول ۱-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد مختلف [Warren, 2009; Maierhofer and Wostmann, 1998; Fernandes, 2006]

مواد معمول	گذردهی نسبی (ϵ_r)	رسانندگی (ms/m)	سرعت (m/ns)	اتلاف (dB/m)
هوا	۱	۰	۰/۳	۰
آب مقطر	۸۱	۰/۰۱	۰/۰۳	2×10^{-3}
آب شیرین	۸۱	۰/۵	۰/۰۳	۰/۱
آب دریا	۸۱	3×10^3	۰/۰۱	10^3
ماسه خشک	۳-۵	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱
ماسه اشباع	۲۰-۳۰	۰/۱-۱	۰/۰۶	$0.03-0.3$
سنگ آهک	۴-۸	۰/۵-۲	$0.11-0.15$	$0.01-1.0$
شیل	۵-۱۵	۱-۱۰۰	۰/۰۹	۱-۱۰۰
لایها	۵-۳۰	۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰
رس خشک	۲-۲۰	۱-۱۰۰	$0.07-0.21$	۱-۳۶
رس اشباع	۱۵-۴۰	$100-1000$	$0.05-0.08$	$42-252$
گرانیت	۵-۸	۰/۰۱-۱	$0.11-0.13$	$0.01-1$
آجر خشک	۴	۱-۵	۰/۱۵	$0.01-0.05$
یخ	۳-۴	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۱

۲-۴-۵- بازتاب و عبور امواج GPR در مرز دو محیط

هنگامی که امواج الکترومغناطیس با یک ناپیوستگی زیرسطحی یا یک فصل مشترک برخورد کنند، به طوری که پارامترهای گذردهی الکتریکی و رسانندگی الکتریکی در این نواحی تغییر کنند، انعکاس می‌یابند. در این حالت بخشی از انرژی موج، منعکس یا بازتاب شده و بخش دیگر، از فصل مشترک عبور می‌کند و در محیط دوم منتشر می‌شود (شکل ۱-۲). ضرایب بازتاب و عبور به ترتیب با R و T، با روابط آتی بیان می‌شوند [Goodman and Piro, 2013]:

$$R = \frac{Z_2 \cos \theta_1 - Z_1 \cos \theta_2}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2} \quad (18-2)$$

$$T = \frac{2Z_2 \cos \theta_1}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2} \quad (19-2)$$

در روابط بالا θ_1 زاویه تابش، θ_2 زاویه بازتاب و Z_1 و Z_2 امپدانس الکترومغناطیس محیط در دو طرف فصل مشترک می‌باشند. امپدانس الکترومغناطیس پارامتر کنترل کننده بازتاب و عبور امواج است. در دستگاه‌های GPR به دلیل نزدیکی فرستنده و گیرنده در اغلب برداشتها، امواج به صورت عمودی ارسال و دریافت می‌شوند. وقتی زاویه تابش امواج الکترومغناطیس بر فصل مشترک عمود باشد ($\theta_2 = 90^\circ$) در این صورت معادلات (۱۸-۲) و (۱۹-۲) به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (20-2)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (21-2)$$

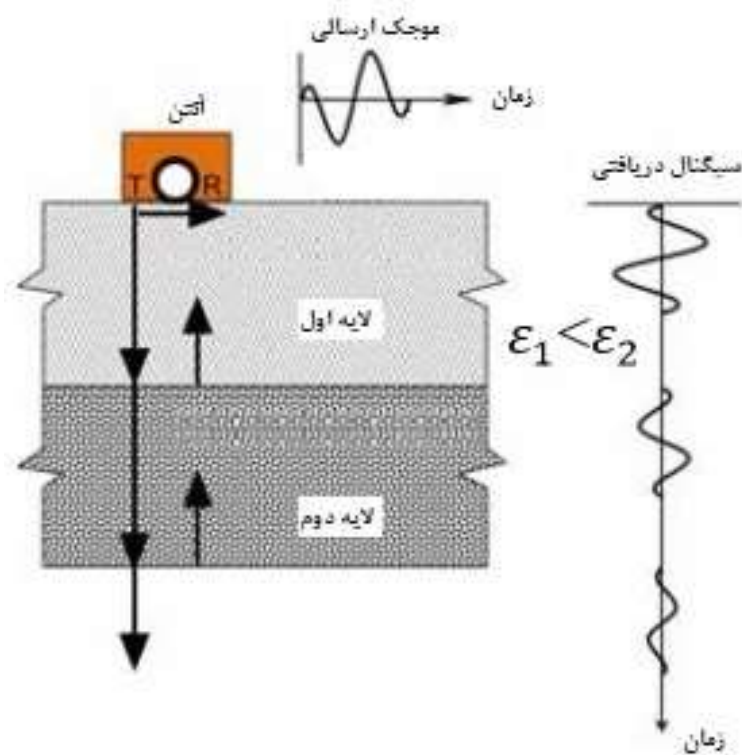
در صورتی که دو محیط غیر مغناطیسی و غیر رسانا باشند (محیط‌های کم اتلاف)؛ رابطه‌ی (۱۸-۲) به صورت رابطه‌ی زیر خلاصه می‌شود:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{2r}} - \sqrt{\epsilon_{1r}}}{\sqrt{\epsilon_{2r}} + \sqrt{\epsilon_{1r}}} \approx \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \quad (22-2)$$

که در آن ϵ_{1r} گذردهی نسبی الکتریکی محیط اول، ϵ_{2r} گذردهی نسبی الکتریکی محیط دوم و V_1 و V_2 سرعت امواج الکترومغناطیس در دو طرف فصل مشترک هستند.

اگر امپدانس در محیط دوم افزایش پیدا کند، فاز سیگنال بازتابیده شده مثبت و برعکس اگر امپدانس

در محیط دوم کاهش پیدا کند فاز موج بازگشتی منفی خواهد بود [Germann instruments, 2014]



شکل ۲-۵: تغییر قطبیت موجک در برخورد با فصل مشترک لایه‌هایی با گذردهی الکتریکی متفاوت
[After Germann instruments, 2014]

۲-۴-۶- قدرت تفکیک

توانایی تفکیک سیگنال‌ها از دو پدیده نزدیک به هم را قدرت تفکیک می‌گویند. در GPR تفکیک‌پذیری به فرکانس مرکزی و پهنای باند و همچنین پارامترهای الکتریکی از قبیل رسانندگی و ضریب دی‌الکتریک و نیز شکل هندسی هدف وابسته است. قدرت تفکیک قائم، با طول موج کنترل می‌شود [Kearey and Brooks, 1991]. بررسی تئوری تفکیک‌پذیری به منظور تخمین عملکرد GPR در تفکیک لایه‌ها بسیار مفید است. بهترین تفکیک‌پذیری عمودی در بررسی‌های GPR، $\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{2}$ طول موج غالب رادار است. هرچند به‌طور عملی و برای پرهیز از اشتباهات، مقدار بزرگ‌تر ($\frac{1}{2}$) را در نظر می‌گیرند. طول موج برابر است با نسبت سرعت به فرکانس غالب موج الکترومغناطیسی [Eder et al., 2008]:

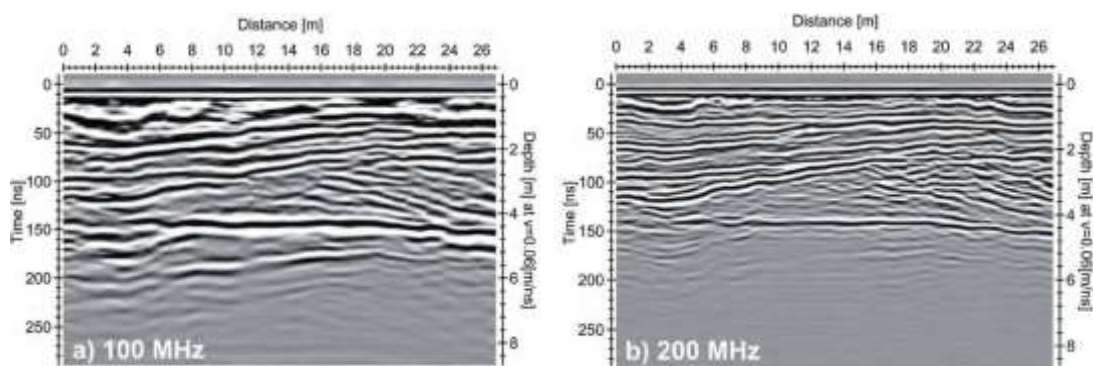
(۲۳-۲)

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

به عنوان مثال، اگر از آنتنی با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز در یک محیط با سرعت متوسط ۰/۱ متر بر ثانیه استفاده شود، $\lambda = 40\text{cm}$ خواهد بود. بنابراین در این حالت تفکیک پذیری عمودی ۰/۲ متر در نظر گرفته می شود. به این معنی که با استفاده از این آنتن فصل مشترک هایی که در فاصله ی ۲۰ سانتیمتری از یکدیگر قرار دارند؛ قابل تفکیک است.

از آنجا که طول موج تابعی از سرعت امواج در محیط است، قدرت تفکیک GPR در سنگ های مرطوب بیشتر از سنگ های خشک می باشد. این مطلب از سرعت فوق العاده پایین امواج در آب ناشی می شود [Knodel et al., 2007].

شکل ۲-۶ پروفیل های GPR را که با استفاده از دو آنتن ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاهرتز از یک دستگاه و در یک منطقه برداشت شده اند، نشان می دهد. در این شکل نیز می توان مشاهده نمود که تفکیک پذیری عمودی با فرکانس مرکزی آنتن ها رابطه مستقیم دارد و با افزایش فرکانس مرکزی آنتن، تفکیک پذیری عمودی افزایش می یابد [Moller, 2006].



شکل ۲-۶: مقاطع زمانی GPR بدست آمده در برداشت با آنتن های ۱۰۰ مگاهرتز (a) و ۲۰۰ مگاهرتز (b) [Moller, 2006]

تفکیک پذیری افقی، بیش از آن که تحت تأثیر طول موج باشد، به گسترش موج الکترومغناطیسی وابسته است. هرچه عمق قرارگیری هدف بیشتر باشد، تمرکز امواج GPR کاهش می‌یابد و در نتیجه تفکیک پذیری افقی کاهش می‌یابد [Neal, 2004].

۲-۴-۷- عمق نفوذ در امواج GPR

یکی از عوامل مهم در بررسی‌های GPR و همچنین طراحی برداشت داده‌های GPR، عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس در محیط است [Baker, 2007]. عمق نفوذ این امواج به شدت تحت تأثیر اتلاف سیگنال (به دلیل جذب انرژی توسط محیط انتقال‌دهنده موج) قرار می‌گیرد [Eder et al., 2008]. تضعیف موج الکترومغناطیس با دو پارامتر فرکانس و رسانندگی محیط انتقال‌دهنده‌ی موج کنترل می‌شود؛ به طوری که با افزایش فرکانس و رسانندگی، میزان تضعیف موج الکترومغناطیسی نیز بیشتر می‌شود [Kearey and Brooks, 1991].

در نهشته‌های کم اتلاف، آنتن‌های با فرکانس مرکزی پایین تا عمق نسبتاً زیادی نفوذ می‌کنند که این مسأله نشان دهنده‌ی وجود رابطه عکس بین عمق نفوذ و فرکانس مرکزی امواج GPR است. در محیط‌هایی که مواد تشکیل دهنده‌ی آنها مقاومت الکتریکی بالایی دارند، قدرت سیگنال امواج با سرعت کمتری تضعیف می‌شود. در صورتی که در مواد با رسانندگی بالا مانند خاک رس یا رسوبات اشباع شده از محلول آب شور، اتلاف خیلی سریع صورت می‌گیرد و عمق نفوذ به شدت کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، عمق نفوذ امواج با استفاده از آنتنی که فرکانس مرکزی آن ۱۰۰ مگاهرتز باشد، در رسوبات رسی تنها چند متر و در رسوباتی که منافذ آنها با آب شور پر شده است، به تنها چند سانتی‌متر کاهش می‌یابد [Baker et al., 2007; Jol and Bristow, 2003].

۲-۵- پردازش داده‌های GPR

هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیک، بهبود کیفیت داده‌های خام و در نتیجه ساده‌تر کردن تفسیر برای دستیابی به اطلاعات واقعی‌تر از اهداف زیرسطحی می‌باشد. در صورتی که پردازش بر روی داده‌ها به صورت صحیح و مناسبی اعمال شود، در نهایت منجر به تفسیر منطقی و مطمئن‌تری خواهد شد. در واقع بهترین شیوه‌ی پردازش، استفاده از آسان‌ترین روش‌ها و قطع عملیات در زمانی است که هیچ جواب بهتری وجود نداشته باشد؛ تا از پردازش بدست آید. بسته به هدف مورد مطالعه، تعداد و نحوه‌ی اعمال پردازش‌ها می‌تواند تغییر کند. در عمل این کار به معنی افزایش نسبت سیگنال به نوفه بوده و باید منجر به ارائه داده‌ها به نحوی باشد که شرایط زیرسطحی به‌طور دقیق نمایان شود. نوع و دامنه پردازش‌هایی که بر روی داده‌های GPR به‌کاربرده می‌شوند به عواملی مانند مشخصات منطقه مورد مطالعه، نوع دستگاه GPR استفاده شده در هنگام برداشت، نرم‌افزارهای به‌کار رفته در پردازش داده‌ها و همچنین اهداف کلی از برداشت وابسته است [Jol, 2009; Neal, 2004]. در ادامه برخی از تصحیحاتی که در روند پردازش داده‌ها در این پایان‌نامه استفاده شده‌اند، معرفی و توضیح داده خواهند شد.

۲-۵-۱- فیلتر Dewow

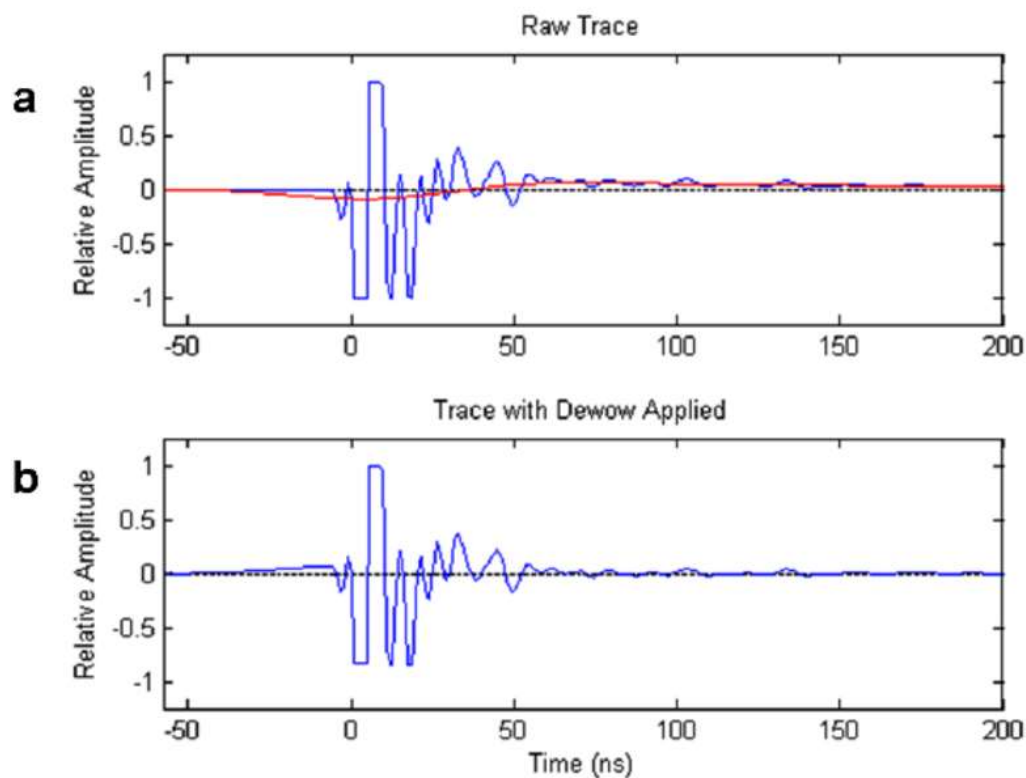
کوتاه بودن فواصل زمانی بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده و پالس‌هایی که به صورت مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و همچنین وجود بازتاب‌هایی از توده‌های کم‌عمق و یا اثرات جفت‌شدگی القایی، مواردی هستند که باعث می‌شوند گیرنده از سیگنال اشباع شود [Neal, 2004]. اشباع‌شدگی سبب ایجاد یک زوال آهسته فرکانس پایین (که به wow معروف است) بر روی تریس^۱ (رد) ها می‌گردد. wow بر روی فرکانس‌های بالاتر قرار گرفته و آنها را دچار اغتشاش می‌کند [Sensors and

^۱ Trace

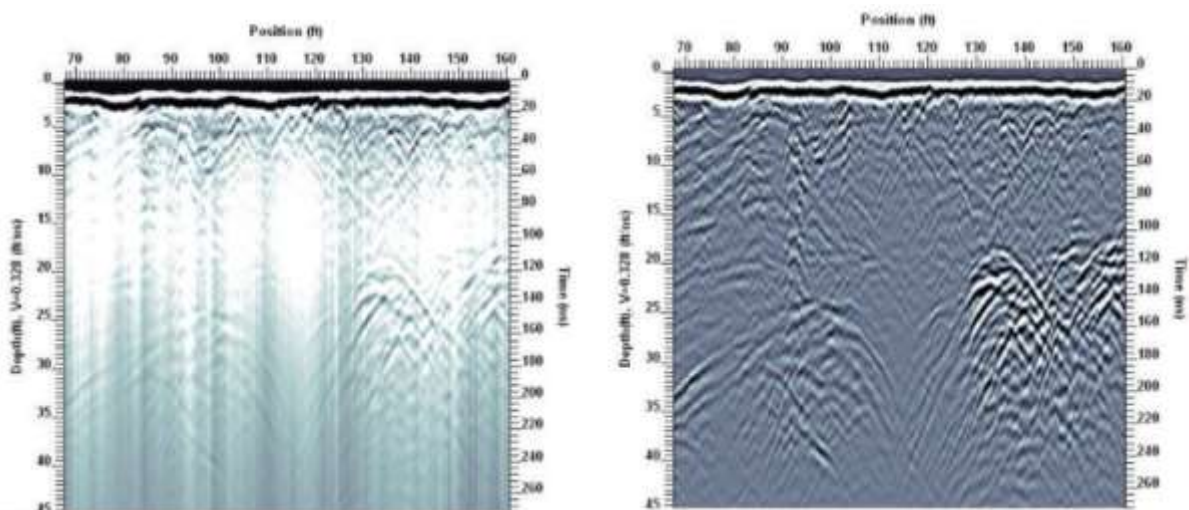
اولین مرحله‌ی پردازش معمولاً اعمال فیلتر Dewow برای از بین بردن wow از داده‌ها می‌باشد؛ که برای این کار از یک فیلتر بالاگذر یا میانی بهینه استفاده می‌شود. این یک مرحله اساسی در پردازش داده‌های GPR به شمار می‌آید. زیرا میانگین داده‌ها را صفر می‌کند و این امکان را فراهم می‌آورد تا در بخش‌های مثبت و منفی تریس‌های ثبت شده، از رنگ‌بندی‌های تیره و روشن در هنگام نمایش مقاطع GPR استفاده شود.

در شکل ۲-۷ فیلتر Dewow همراه با تصحیح شیفت جریان مستقیم^۱ صورت گرفته است. در تصحیح شیفت جریان مستقیم، داده‌ها به یک میانگین سطح صفر کاهش پیدا می‌کنند. باید توجه داشت که هنگام استفاده از داده‌هایی که فیلتر Dewow بر آنها اعمال شده، به دلیل امکان ایجاد پیک‌های کاذب بر روی موجک، باید دقت شود که سبب تفسیر اشتباه قطبیت تریس GPR نگردد (Lrvine-Fynn et al., 2005). همان‌طور که در شکل ۲-۸ مشاهده می‌شود بعد از اعمال این پردازش و حذف مؤلفه‌های فرکانس پایین، بازتاب‌کننده‌ها به خوبی قابل تشخیص می‌باشند [Dougherty et al., 1994; Gerlitze et al., 1993; Fisher et al., 1994].

^۱ DC shift



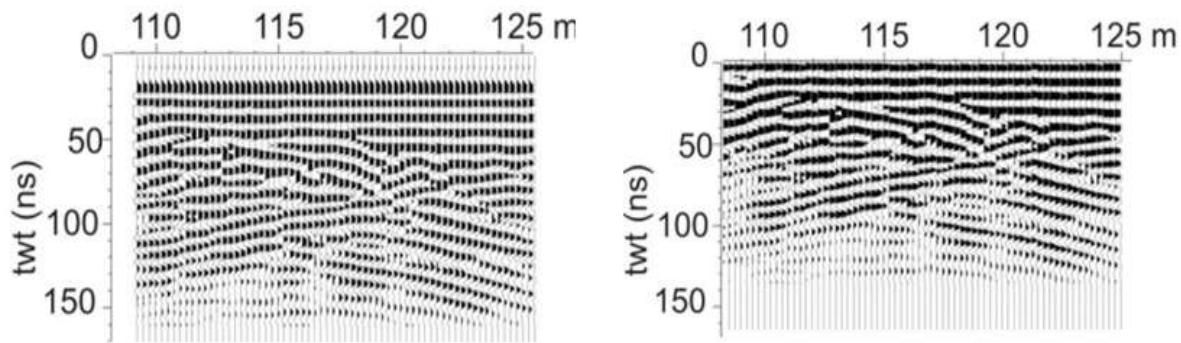
شکل ۲-۷: شکل یک تریس خام (بالا) و همان تریس پس از اعمال فیلتر Dewow (پایین) [Rowell, 2011]



شکل ۲-۸: نمایش یک مقطع به همراه wow (سمت چپ) و همان مقطع پس از اعمال فیلتر Dewow (سمت راست) [Ekko project user's guide, 2017]

۲-۵-۲- تصحیح استاتیک^۱

اختلاف دما بین وسایل الکتریکی و دمای هوا یا اتصالات کابل‌ها می‌توانند موجب پرش‌هایی در زمان اولین رسید موجک الکترومغناطیس دریافت شده توسط گیرنده شوند؛ که جابجایی صفر زمانی را سبب می‌شود. جابجایی صفر زمانی بر روی تمام تریس‌ها در طول پروفیل صورت می‌پذیرد. این فرایند روی موقعیت مرز هوا-زمین در مقطع و میزان توازن در عرض تریس‌ها تأثیر می‌گذارد. بنابراین قبل از اجرای سایر روش‌های پردازشی باید تریس‌ها با یک موقعیت زمان-صفر مشترک تعدیل شوند. این نتیجه معمولاً با استفاده از بعضی معیارهای مشخص (نظیر نقطه اولین شکست موج هوا یا اولین پیک منفی تریس) بدست می‌آید [Olhoeft, 2000; Nobes, 1999; Young et al., 1995]. در شکل ۲-۹ تأثیر اعمال تصحیح صفر زمانی بر روی یک مقطع نشان داده شده است.



شکل ۲-۹: تأثیر اعمال تصحیح صفر زمانی بر روی یک مقطع، قبل از تصحیح (سمت چپ) و بعد از آن (سمت راست) [Leopold et al., 2006]

^۱ Static correction

۲-۵-۳- بهره‌ها

توان سیگنال انتشاری در توده‌های زیرسطحی با افزایش زمان پیمایش سیگنال مربوطه به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد. از این رو پاسخ دریافتی از اعماق بیشتر، بسیار ضعیف‌تر است. برای تقویت این بازتاب‌ها با اعمال بهره بر روی داده‌ها می‌توان توان سیگنال در اعماق بیشتر را افزایش داد. چندین روش برای اعمال بهره‌ها نظیر بهره‌های خطی، جبران گسترش و نمایی (SEC)^۲ و کنترل بهره اتوماتیک (AGC)^۳ وجود دارد. نوع، عرض پنجره^۴ (برحسب نانو ثانیه) و حداکثر تقویت^۵ بهره به آسانی می‌توانند تغییر یابند [Jol, 2009; Neal, 2004].

بهره AGC از یک تابع تقویت پیوسته خودکار برای هر تریس استفاده می‌کند (شکل ۲-۱۰). این تابع برای نمایش رویدادهای ضعیف عمیق‌تر، مناسب است؛ اما نوفه را هم همانند سیگنال‌ها به نحوی اجتناب‌ناپذیر تقویت می‌کند. به‌طور کلی در این روش، تابع تقویت در سیگنال ضرب می‌شود و سیگنال و نوفه باهم تقویت می‌شوند [Horstmeyer, 1996]. در بررسی‌های رسوب‌شناسی، به تصویر درآوردن تمام فصل مشترک‌های رسوبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو در بیش‌تر مطالعات رسوب‌شناسی از بهره AGC استفاده می‌شود. از آنجایی که این بهره با شدت سیگنال رابطه عکس دارد، سیگنال‌های ضعیف بهره‌های بزرگی را ایجاد می‌کنند. بنابراین کاربر باید یک حد بالا برای بهره تعریف کند [Sensors and software, 2016]. کاربر باید بهره را به‌گونه‌ای تعریف کند که هدف اصلاح داده‌ها با حفظ سودمندی کامل آن، بدون ایجاد محصول‌های مصنوعی باشد.

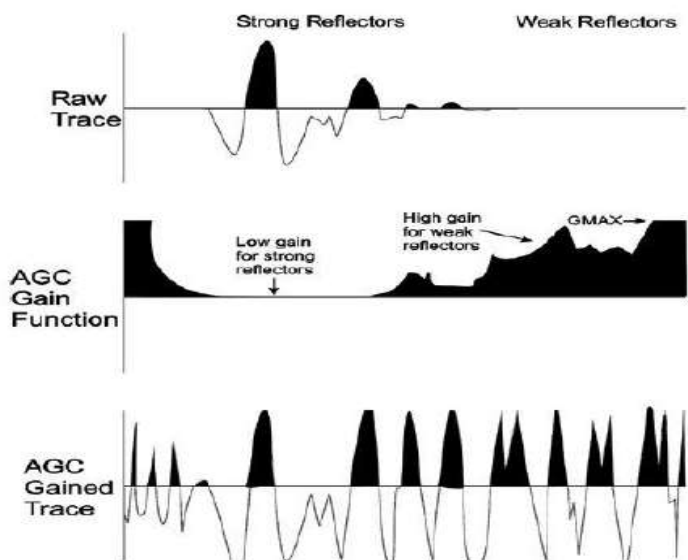
^۱ Gain

^۲ Spreading & exponential compensation

^۳ Automatic Gain Control

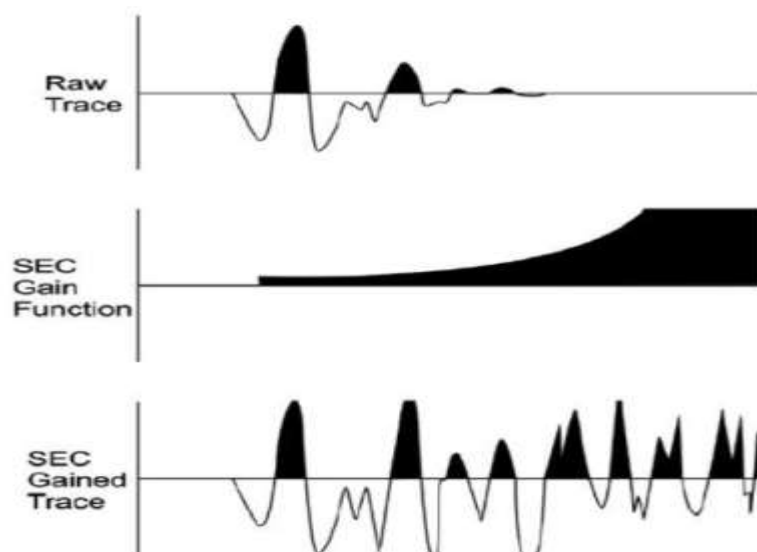
^۴ Window length

^۵ Max Gain



شکل ۱-۲ نمایش نحوه عملکرد بهره AGC بر روی یک تریس GPR [Sensors and software, 2001].

فصل مشترک‌های مختلف دارای توان‌های بازتاب مختلف بوده و هر یک مقداری از سیگنال ورودی را بازتاب می‌نمایند. با استفاده از بهره AGC اطلاعات بدست آمده از دامنه نسبی سیگنال‌ها از بین خواهند رفت. این اطلاعات در برخی از کاربردها بسیار ارزشمند بوده و برای حفظ آنها از انواع مختلف بهره‌ها نظیر بهره گسترش و جبران نمایی (SEC) استفاده می‌شود. این بهره ترکیبی از بهره‌ی خطی و نمایی است و با توجه به محدودیت‌هایی که کاربر تعریف می‌کند سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی دارد [Sensors and software, 2016]. در استفاده از این بهره پارامترهایی که کاربر برای استفاده از آن در نظر می‌گیرد، بسیار حائز اهمیت است. این پارامترها از جمله حداکثر مقدار بهره که روی داده‌ها اعمال شود و همچنین اتلاف امواج GPR در محیط، برای بازسازی شکل بازتاب‌ها بسیار با اهمیت می‌باشند.



شکل ۲-۱۱: نمایش نحوه عملکرد بهره SEC بر روی یک تریس GPR [Sensors and software, 2016].

۲-۵-۴- فیلتر میانگین^۱

فیلتر میانگین یک فیلتر زمانی است، به این معنی که بر روی هر تریس به صورت جداگانه اعمال می‌شود [Sensors and software, 2016]. این فیلتر میانگین داده‌ها را در یک پنجره زمانی معین حساب می‌کند و در نتیجه داده‌ها را هموار^۲ می‌کند. این فیلتر مشابه یک فیلتر پایین گذر عمل می‌کند؛ با این تفاوت که در حوضه‌ی زمان اعمال می‌شود [Sandmeier, 2016].

۲-۵-۵- فیلتر حذف زمینه^۳

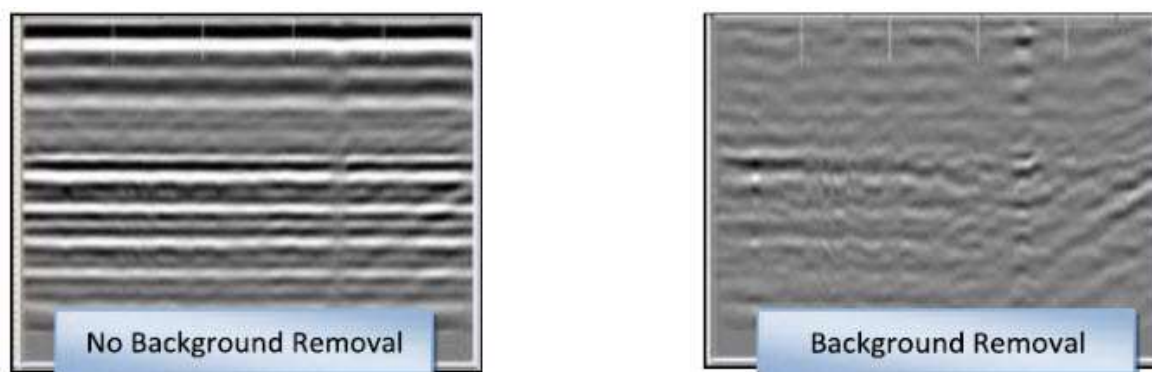
استفاده از فیلتر حذف زمینه یکی از رایج‌ترین مراحل پردازش داده‌های GPR است. این فیلتر اثرات

^۱ Mean filter

^۲ Smooth

^۳ Background removal

نوفه‌های محیطی را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود سیگنال‌های ضعیف‌تر در مقاطع تیزتر^۱ دیده شوند. به عبارتی می‌توان گفت این فیلتر باعث کاهش اثر زمینه که به دلیل پراکندگی بازتاب‌های ناشی از اهداف زیرسطحی اتفاق می‌افتد، می‌شود. فیلتر حذف زمینه سعی در افزایش اثر بازتاب‌های با شیب تند، و همچنین کاهش اثر بازتاب کننده‌های افقی و با شیب کم دارد [Sandmeier, 2016]. شکل ۲-۱۲ یک مقطع GPR را قبل و بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲: تأثیر اعمال فیلتر حذف زمینه بر روی یک مقطع GPR [GSSI user's guide, 2016]

۲-۵-۶- فیلتر میانگین متحرک^۲

فیلتر میانگین متحرک از جمله فیلترهای مکانی است که به صورت افقی بر روی تریس‌های هم‌جوار اعمال می‌شوند. این فیلتر با محاسبه میانگین تعدادی از تریس‌ها، داده‌ها را به صورت افقی صاف می‌کند [Sandmeier, 2016].

^۱ Sharp

^۲ Running average

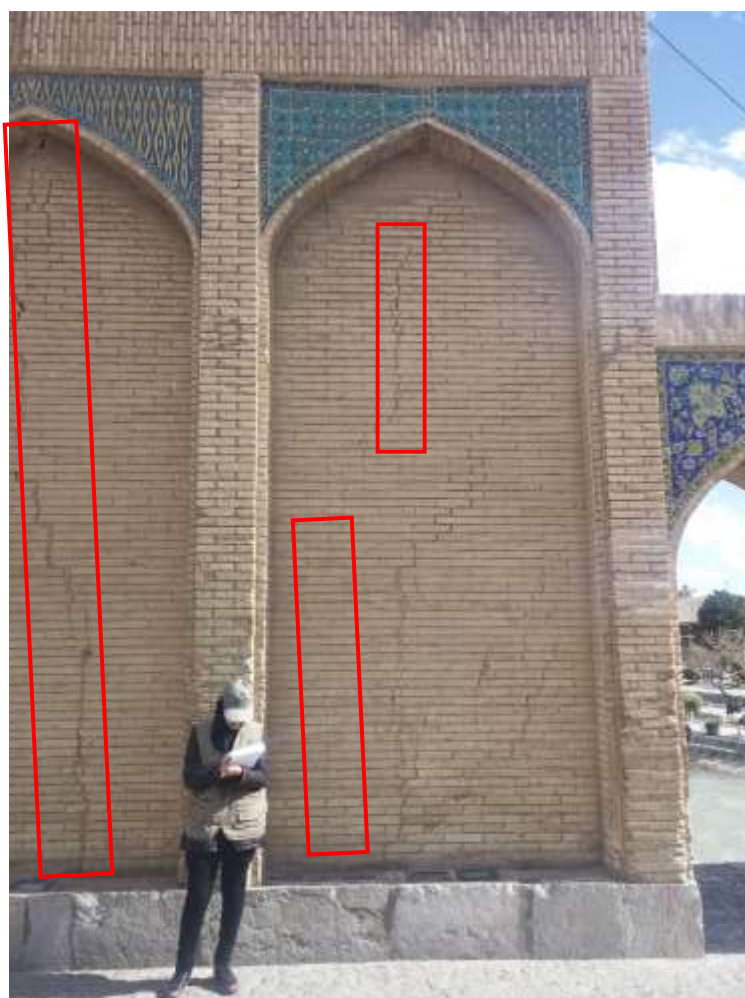
فصل سوم

برداشت داده‌های GPR بر روی

پل خواجه

۳-۱- مقدمه

پل خواجه از آثار تاریخی بسیار ارزشمند دوران صفوی است؛ که متأسفانه در طی سالیان متحمل آسیب‌های متعددی از جمله شکستگی‌های سطحی و عمقی شده (شکل ۳-۱). با توجه به تغییرات آب‌وهوایی و خشکسالی‌های چند سال اخیر موضوع شکستگی‌های پل بیش‌ازپیش خودنمایی می‌کند و نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد. در این فصل به معرفی پل پرداخته و نحوه‌ی طراحی و برداشت پروفیل‌ها بررسی می‌شود.



شکل ۳-۱: نمونه‌هایی از شکستگی‌ها بر دیواره‌ی ساختمان شاه‌نشین پل خواجه که با مستطیل‌های قرمز رنگ در تصویر مشخص شده‌اند.

۲-۳- موقعیت جغرافیایی پل خواجه

پل خواجه در شهر اصفهان، حدوداً به فاصله‌ی ۱۸۰۰ متری از سی‌وسه‌پل، در انتهای شرقی خیابان کمال‌الدین اسماعیل اصفهانی و در انتهای جنوبی چهارباغ خواجه به‌طرف گورستان تاریخی تخت پولاد اصفهان قرار گرفته است. شکل ۳-۳ تصویر هوایی پل خواجه و موقعیت جغرافیایی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲: تصویر هوایی از پل خواجه [http://earth.google.com]

۳-۳- تاریخچه و ساختار پل خواجه

پل خواجه از بناهای تاریخی مربوط به دوره شاه‌عباس دوم صفوی است؛ که در سال ۱۰۶۰ هجری قمری بنا شده است و به خاطر معماری بی‌نظیر و تزئینات کاشی‌کاری آن، از دیگر پل‌های زاینده‌رود مشهورتر است. طول پل ۱۳۲ متر، عرض آن ۱۲ متر و ارتفاع آن ۱۱ متر است و دارای ۲۱ دهانه می‌باشد. این پل در دوران صفوی یکی از زیباترین پل‌های جهان به شمار می‌رفت و کاربردهای متعددی داشته که یکی از آنها

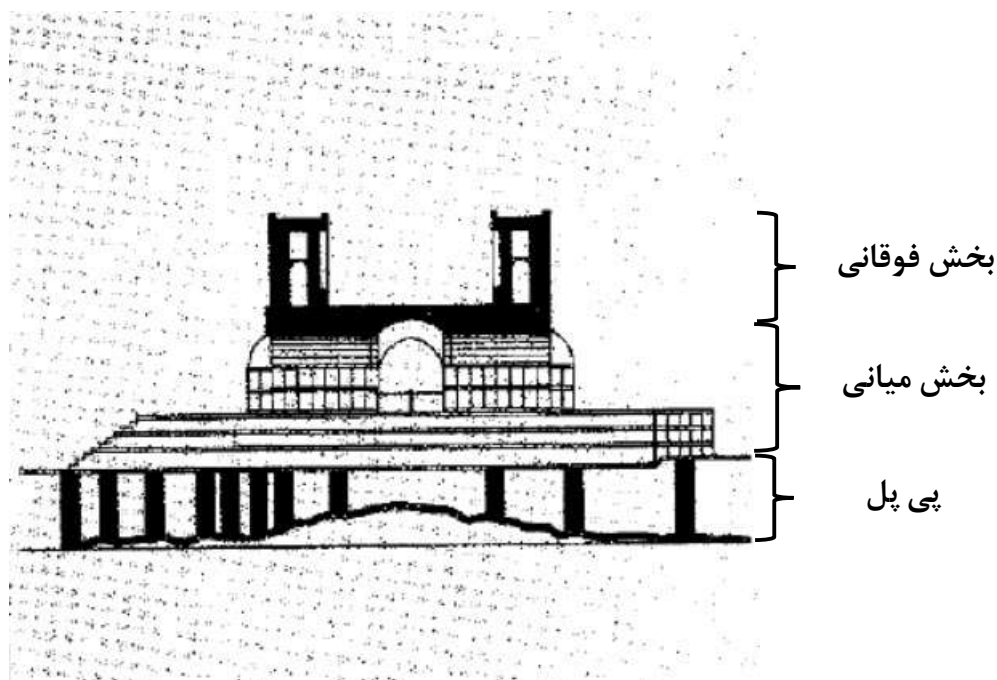
استفاده از بنا به عنوان سد است (حامی، ۱۳۷۲). به این صورت که دهانه‌های میانی پل با سدهای چوبی برای گرفتن جلوی رودخانه مسدود می‌شده است. این امر، چندین فایده برای شهر داشت که از آنها می‌توان به ایجاد دریاچه‌ای در سمت شرقی بنا و عملکردهای تفریحی آن، همچنین غنی ساختن سفره‌های آب زیرزمینی شهر، فراهم آوردن آب مادی‌های شهر (امیرشاه‌کرمی، ۱۳۸۵)، هدایت آب برای مصارف کشاورزی و چرخاندن دو آسیاب آبی در قسمت شرق بنا اشاره کرد (مروج تربتی و پورنادری، ۱۳۹۲).

در وسط پل و در طبقه‌ی فوقانی، ساختمان شاهی (کریاس) قرار دارد؛ که دارای تزئینات و نقاشی زیبایی است و محل تفریح شاه و خانواده‌ی سلطنتی بوده است. در سمت غربی شکل پایه‌ها به صورت آب‌شکن‌های زاویه‌دار است و در سمت شرق پایه‌ها شکل پلکانی دارند؛ که این ساختار آب را به دو طرف رانده و از فشار آن به پایه‌های پل جلوگیری می‌کند (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۳: تصویر ماکت پل خواجو از نمای شرقی

بررسی مصالح در برش عمودی پل (شکل ۳-۳) نشان می‌دهد که این مصالح در نهایت دقت و متناسب با کارکردهای توأم سازه‌ای و هیدرولیکی و معماری‌شان انتخاب شده و به کار رفته است: پی پل با شمع‌هایی با جدار سفالی و هسته‌ی سنگ و ساروج، که حجمی پیوسته و مقاوم می‌سازد، بخش میانی از سنگ و ملاط آهک که در محیط‌های مرطوب مقاومت خوبی دارد، و بخش فوقانی از آجر با ملاط گچ و خاک ساخته شده است (امیرشاه‌کرمی، ۱۳۸۵). ساروج یکی از ملاط‌های سنتی ایران است که در دسته‌ی ملاط‌های آبی قرار دارد. در نتیجه در محل‌هایی کاربرد داشته که با آب و رطوبت سر و کار دارند و بخاطر نفوذ ناپذیری بالای آن مورد توجه بسیار بوده است. پس از انجام تحقیقات آزمایشگاهی بر روی ساروج، مشخص شد که با وجود مقدار مناسب آهک، خاک رس و خاکستر بادی به مقاومت مشخصی میل می‌کند. بررسی بناهای بجا مانده از ساروج و عمر بناهای ساروجی نشان داده است که این مصالح با شرایط جوی ایران و حتی کل خاورمیانه سازگاری کامل دارد (فرازمان و عطارنژاد، ۱۳۸۵).



شکل ۳-۴: شکل شماتیک از برش عرضی پل خواجه و سه دسته از مواد مختلف به کار رفته در ساخت آن (امیرشاه‌کرمی، ۱۳۸۵)

۳-۴- برداشت داده‌های GPR بر روی پل خواجه

برداشت داده‌های GPR به منظور شناسایی جنس، بافت و شکستگی‌های داخلی، بر روی مناطق مختلف پل خواجه، نظیر گذرگاه، دالان‌های پل و همچنین سقف ساختمان شاه‌نشین غربی صورت گرفت. داده‌ها به وسیله‌ی دستگاه GPR مدل Utility Scan از شرکت آمریکایی GSSI برداشت شدند (شکل ۳-۴). این دستگاه دارای یک آنتن با فرکانس مرکزی ۳۵۰ MHz و از نوع حفاظدار یا پوششی^۱ و همچنین یک کیلومتر شمار همراه با دقت بسیار بالا می‌باشد. با حرکت دادن چرخ‌های دستگاه، کیلومتر شمار، دستگاه GPR را به کار انداخته و داده‌ها برداشت می‌شوند. از این رو سرعت برداشت داده‌های GPR بسیار بالا بوده و اندازه‌گیری هر پروفیل در کمتر از ۵ دقیقه صورت پذیرفت. داده‌های GPR برداشت شده در طول هر یک از پروفیل‌ها در حافظه نمایشگر دیجیتالی (DVL) دستگاه با فرمت DZT ذخیره شده و با نرم‌افزار ReflexW فراخوانی و پردازش شد.

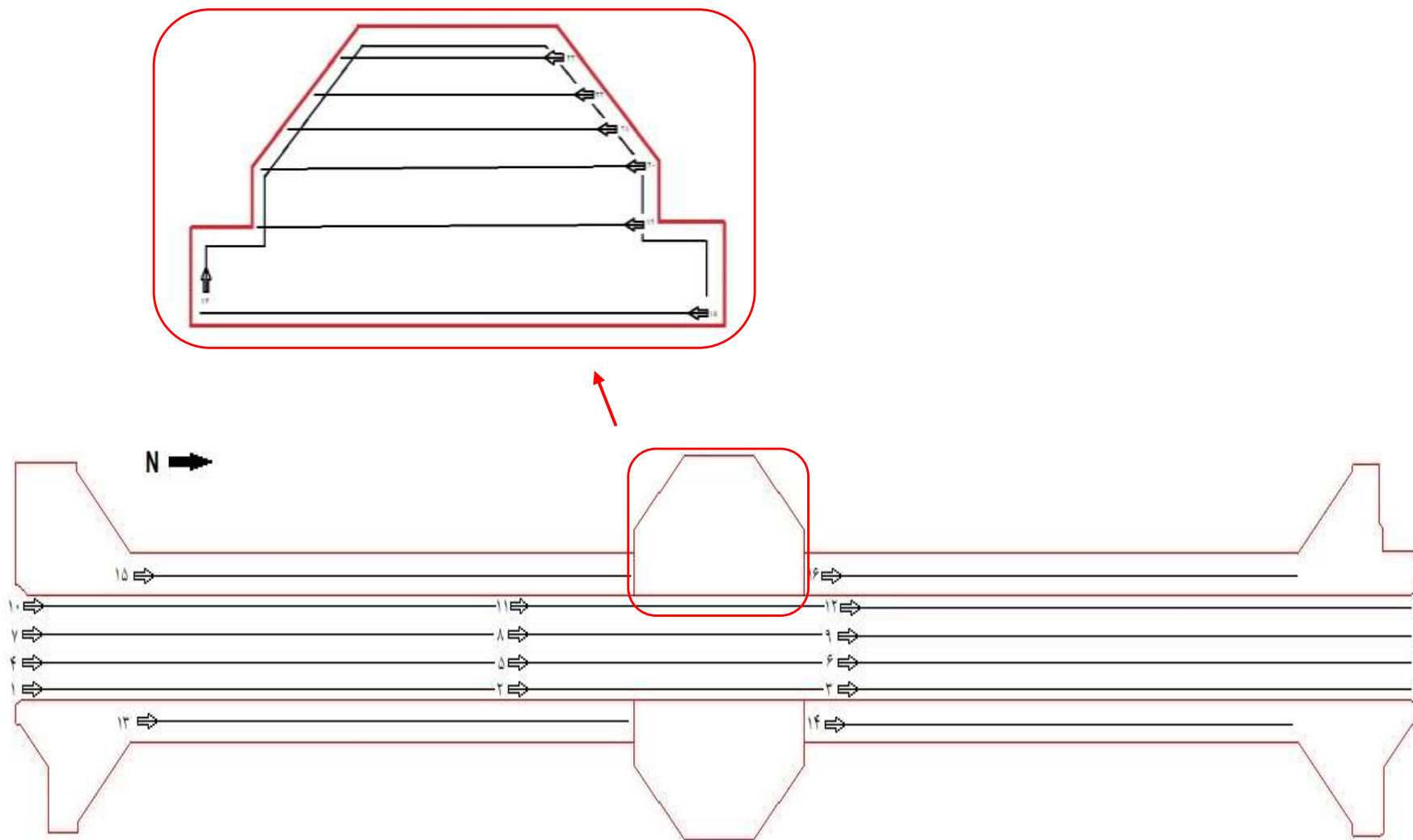
^۱ Shielded

^۲ Digital video logger



شکل ۳-۵: برداشت داده‌های GPR در یکی از دالان‌های پل خواجه با دستگاه Utility Scan ساخت شرکت GSSI

به‌طور کلی تعداد ۲۳ پروفیل با طول‌های مختلف و با مجموع طول ۸۱۰ متر بر روی پل خواجه طراحی و برداشت شد. این برداشت در اسفند ماه سال ۱۳۹۶ انجام گرفت. از بین ۲۳ پروفیل GPR، تعداد ۱۲ پروفیل (پروفیل‌های ۱ تا ۱۲) در محل گذرگاه پل، ۴ پروفیل (پروفیل‌های ۱۳ تا ۱۶) در دالان‌های پل و ۷ پروفیل (پروفیل‌های ۱۷ تا ۲۳) بر روی ساختمان شاه‌نشین غربی برداشت شده است. شکل ۳-۶ موقعیت و جهت برداشت این پروفیل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: شکل شماتیک از مکان و جهت پروفیل‌های طراحی و برداشت شده بر روی پل خواجو

فصل چهارم

پردازش، مدل‌سازی و تفسیر

داده‌های GPR پل خواجو

۴-۱- مقدمه

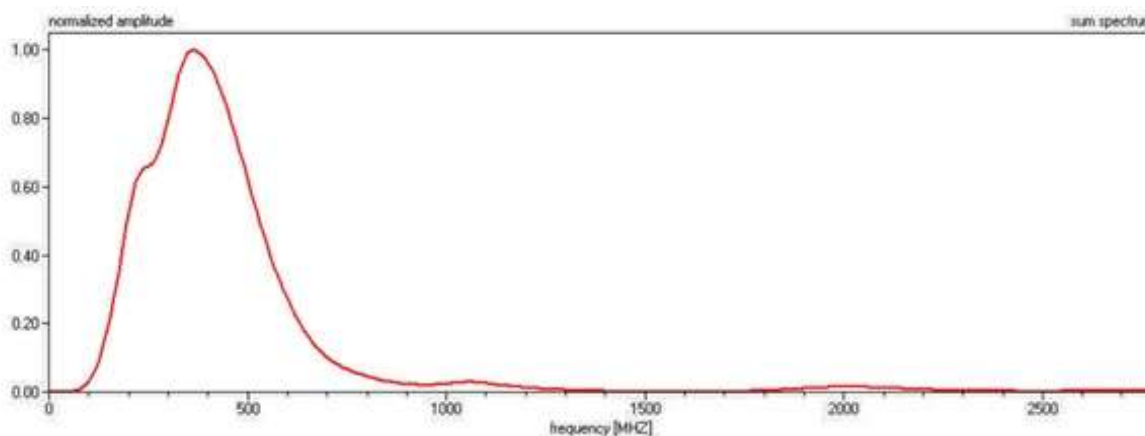
همان‌گونه که در فصل قبل اشاره شد، یکی از مواد به‌کار رفته در پایه‌های پل خواجه ساروج می‌باشد. یکی از خواص ساروج این است که در حضور آب مستحکم‌تر می‌شود و همین عامل باعث شده تا این پل تاریخی در گذشت زمان پایدار و استوار بماند. لیکن در چند سال اخیر ترک‌های بسیاری در قسمت‌های مختلف آن به‌وجود آمده است که به نظر می‌رسد این امر به علت کم‌آبی و باز و بسته شدن چندین باره‌ی آب در طول سال و خشک شدن ساروج به‌کار رفته در پی پل باشد. از آنجا که جنس مواد پرکننده‌ی ترک‌ها (هوا و یا بتن) با اطراف آن تفاوت دارد؛ ضریب دی‌الکتریک آنها نیز متفاوت است. این تباین در خصوصیات فیزیکی و همچنین غیر مخرب بودن روش GPR باعث شده تا این روش، برای تشخیص شکستگی‌ها مناسب باشد.

سرعت امواج GPR در قسمت‌های خردشده و دانه‌ریزتر نسبت به قسمت‌های یکپارچه و مستحکم‌تر پایین‌تر است؛ بنابراین عمق نفوذ در این قسمت‌ها کاهش پیدا می‌کند [Neal, 2004]. پس می‌توان گفت که اگر شکستگی با تشکیل مواد دانه‌ریز و رسی همراه نباشد و مواد متراکم باشند، هر جا که سرعت افزایش پیدا کرده و عمق نفوذ بیشتر شده، در آن قسمت، بافت متراکم‌تر است. لذا انتظار می‌رود که بتوان بافت و میزان خردشدگی احتمالی در قسمت‌های مختلف پل را تعیین نمود. همچنین با تعیین سرعت در بخش‌های مختلف پل (بر اساس جدول ۲-۱)، تا حدودی جنس مواد به‌کار رفته در ساخت پل خواجه تعیین گردد. در این فصل روند پردازشی مناسبی برای داده‌ها انتخاب شده و پس از پردازش مقاطع، تفسیر آنها خواهد آمد.

۲-۴- پردازش مقاطع GPR پل خواجه

با انتخاب متفاوت روند پردازش و پارامترهای مورد نیاز هر مرحله، ممکن است از یک سری داده اولیه پاسخهای مختلفی نتیجه شود. پردازش داده‌ها نباید به گونه‌ای باشد که منجر به تولید یک مقطع مصنوعی شود؛ بلکه باید با حفظ خواص مقطع، تنها کیفیت آن را بهبود بخشیده و تا حد امکان از میزان نوفه‌ها کاست. برای پردازش داده‌ها دامنه گسترده‌ای از انتخاب‌ها موجود است و توانایی و سلیقه‌ی پردازشگر با توجه به هدف‌های مورد مطالعه و تجربیات و توانایی‌هایش در این انتخاب‌ها مؤثر است.

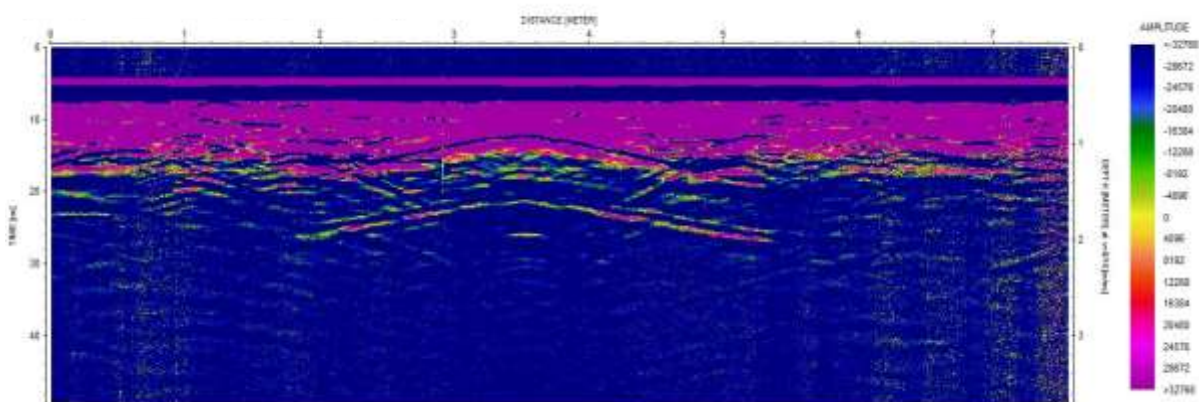
در شکل ۱-۴ طیف دامنه نرمالیزه شده داده‌های GPR برداشت شده بر روی پل خواجه قابل مشاهده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، فرکانس مرکزی داده‌ها در این طیف، ۳۵۰ مگاهرتز است.



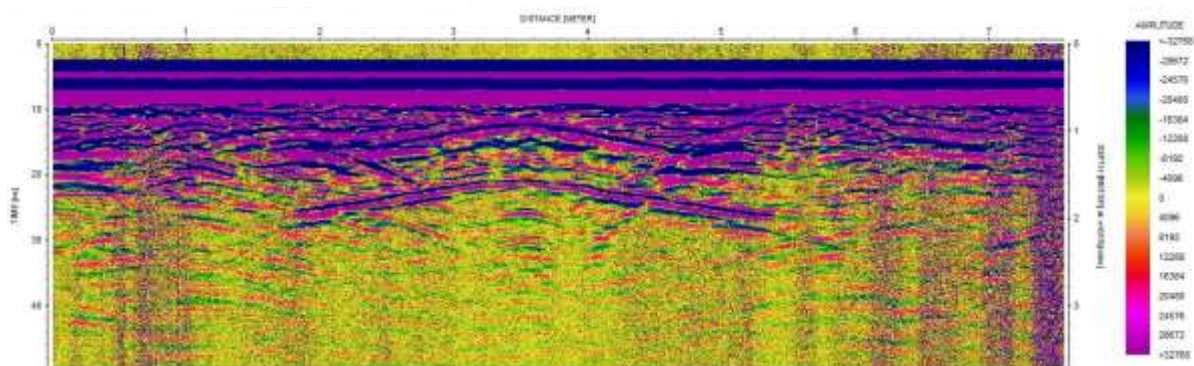
شکل ۱-۴: طیف فرکانسی داده‌های GPR برداشت شده با آنتن دارای فرکانس مرکزی ۳۵۰ MHz

برای نشان دادن روند پردازش مقاطع GPR بدست آمده از برداشت داده‌ها بر روی پل خواجه، مقطع خام از پروفیل شماره‌ی ۲۳ در شکل ۲-۴ آورده شده است. بر روی این مقطع، ابتدا فیلتر Dewow برای حذف نوفه‌های فرکانس پایین و متقارن نمودن هر یک از تریس‌ها اعمال شد (شکل ۳-۴). پس از آن، از تصحیح صفر زمانی برای حذف اثر لایه‌ی هوا و همچنین جابجایی صفر مقطع به مکان صحیح آن استفاده

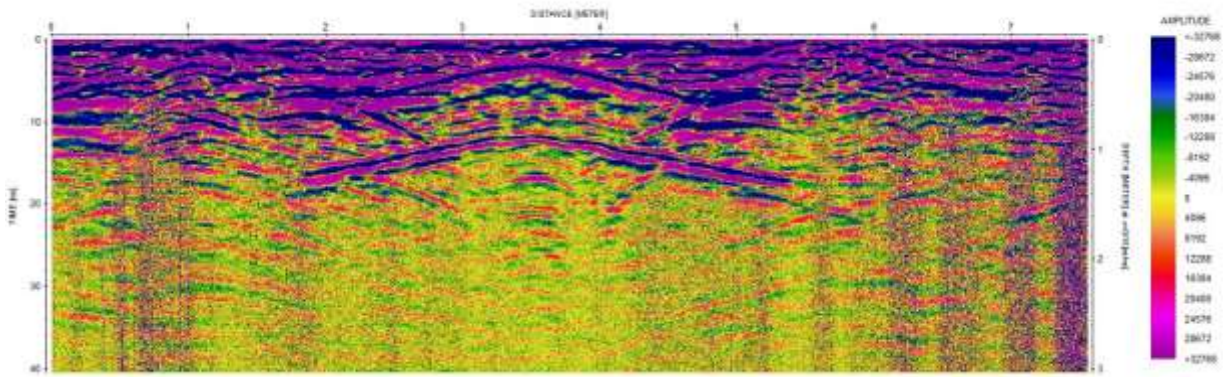
شد (۴-۴). فیلتر میانگین، مقداری داده‌ها را هموار نمود (شکل ۴-۵). برای حذف اثرات ناخواسته‌ی نوفه‌هایی که بیشتر خود را به صورت افقی نشان می‌دادند از فیلتر حذف زمینه کمک گرفته شد (شکل ۴-۶) و در آخر یک فیلتر میانگین متحرک با میانگین‌گیری از تریس‌ها در طول مقطع و از بین بردن بخش دیگری از نوفه‌ها، وضوح تصویر را بیشتر نمود (شکل ۴-۷).



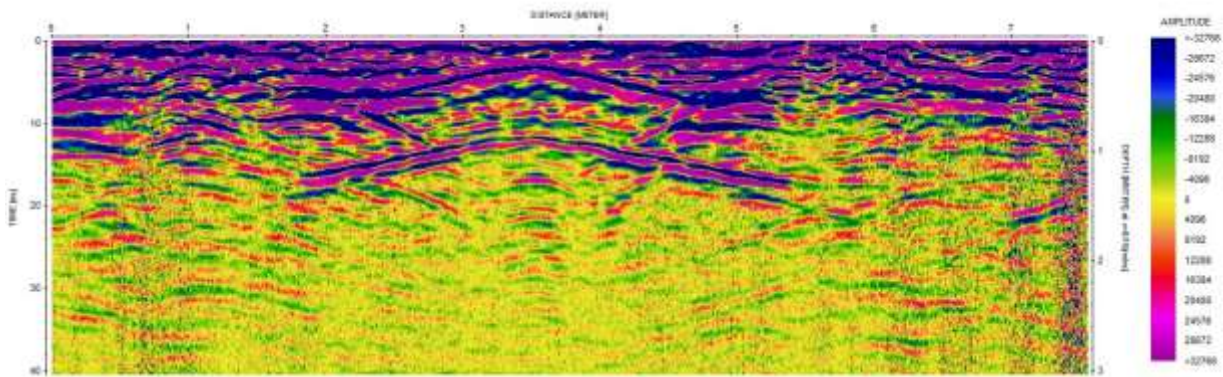
شکل ۴-۲: مقطع خام پروفیل شماره‌ی ۲۳



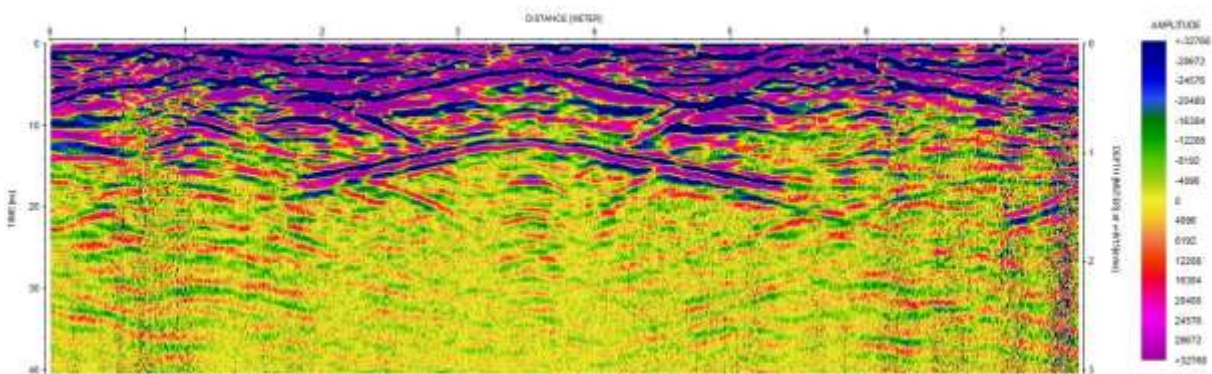
شکل ۴-۳: مقطع پروفیل شماره‌ی ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow



شکل ۴-۴: مقطع پروفیل شماره ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow و تصحیح صفر زمانی



شکل ۴-۵: مقطع پروفیل شماره ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow، تصحیح صفر زمانی و فیلتر میانگین

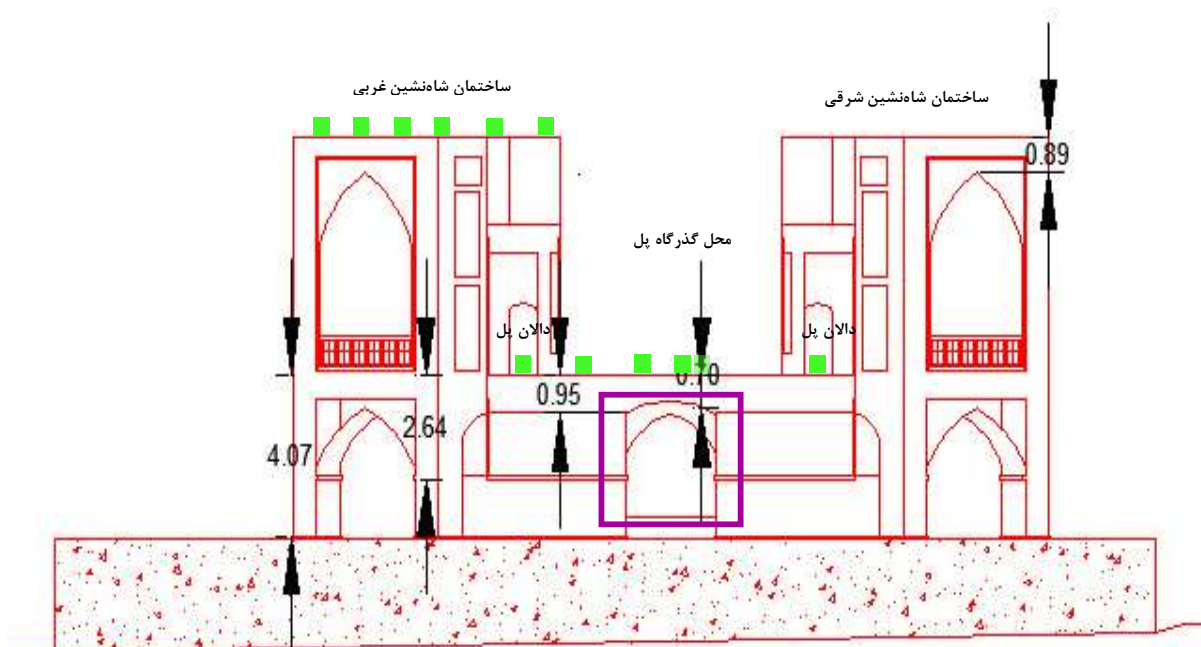


شکل ۴-۶: مقطع پروفیل شماره ۲۳ پس از اعمال فیلتر Dewow، تصحیح صفر زمانی، فیلتر میانگین و فیلتر حذف زمینه

همان گونه که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود، بیشتر سرعت‌های بدست آمده در مقطع ۰/۱۵ متر بر نانوئانیه می‌باشد. بر اساس جدول ۲-۱، سرعت آجر خشک ۰/۱۵ متر بر نانوئانیه است؛ که با مصالح به کار رفته در پل مطابقت دارد. بنابراین همین مقدار در قسمت سرعت، به نرم‌افزار وارد شد؛ که موجب بدست آمدن عمق ۶ متر در مقطع گردید. در ادامه و در مبحث هندسه‌ی پل خواهیم دید که انعکاس‌ها از ساختارهای مختلف پل در عمق صحیحی واقع شده؛ که این خود تأییدی بر صحت سرعت و تخمین عمق انجام شده است.

شکل ۴-۹ نشان دهنده‌ی برش عرضی از پل خواجو است که با نرم‌افزار AutoCAD رسم شده و فاصله‌ی قسمت‌های مختلف برحسب متر، روی آن نشان داده شده است.

همچنین مشاهده می‌شود که در قسمت‌های میانی مقطع شکل ۴-۸ و در عمق حدود ۲/۶۰ متر، برآزش هذلولی‌ها سرعت ۰/۱۳ متر بر نانوئانیه را نشان می‌دهد؛ که این مسأله نشان دهنده‌ی تغییر جنس مواد از عمق مذکور و پس از آن است. این تغییر جنس به خوبی در شکل ۴-۱۰ قابل رؤیت می‌باشد.



شکل ۴-۹: شکل برش عرضی از پل خواجو، مربع‌های کوچک و سبز رنگ نشان‌دهنده‌ی محل پروفیل‌های عبوری از روی پل می‌باشد. مربع بنفش رنگ دالان زیرین پل را نشان می‌دهد؛ که تصویر آن در شکل ۴-۱۰ آمده است. اندازه‌ها در این تصویر برحسب متر است.

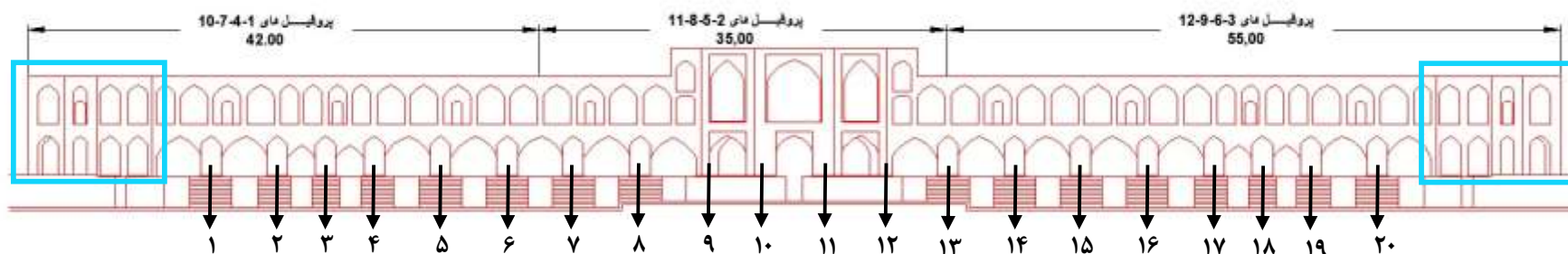


شکل ۴-۱۰: تصویر دالان زیرین پل خواجه که محل آن در شکل ۴-۹ با مربع بنفش رنگ نشان داده شده است.

۴-۴- هندسه و ساختار پل خواجه

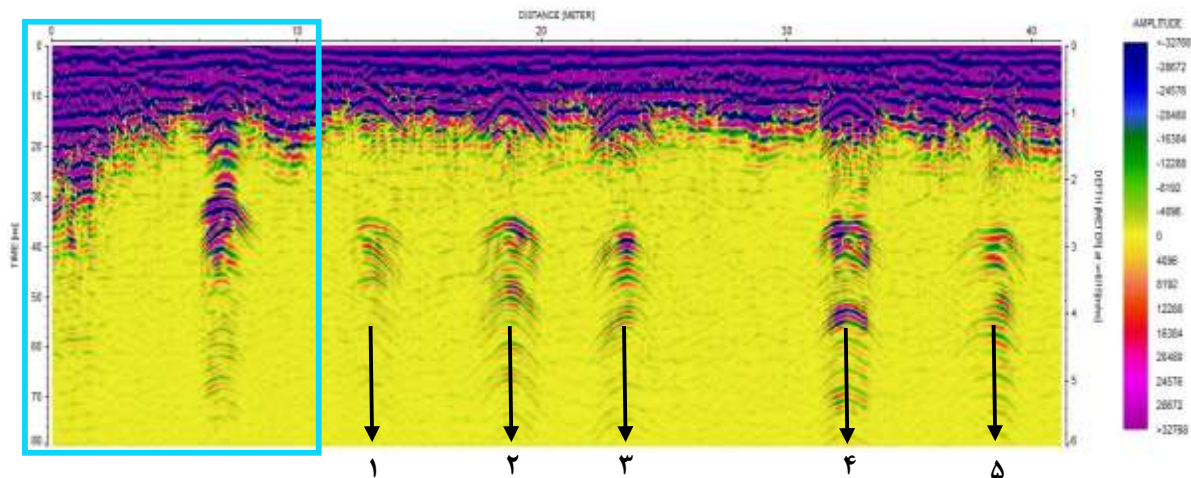
در این قسمت قرار است تا با مقایسه‌ی مقاطع GPR حاصل از برداشت و نقشه‌های پل، میزان انطباق این مقاطع با ساختار پل بررسی شود. به دلیل گستره بودن مطالب مورد بررسی و نیز تعداد زیاد مقاطع، امکان توضیح همه‌ی مسائل برای تمامی پروفیل‌ها نمی‌باشد؛ بنابراین به عنوان نمونه تعدادی از پروفیل‌هایی که نشان‌دهنده‌ی هندسه و ساختار پل هستند؛ در ادامه آمده و مورد بحث قرار خواهند گرفت.

شکل ۴-۱۱ نمای شرقی پل خواجه را نشان می‌دهد. محل و طول پروفیل‌های برداشت شده از گذرگاه پل در این تصویر مشخص شده است.



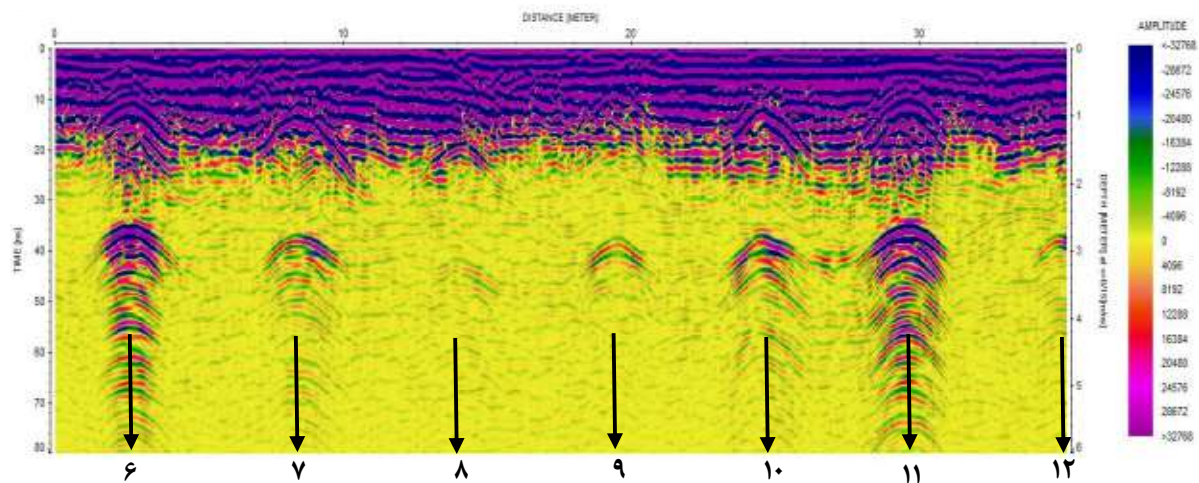
شکل ۴-۱۱: نمای شرقی پل خواجه به همراه نمایش محل و طول پروفیل‌های عبوری از بخش گذرگاه پل. اعداد نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی پایه‌های پل می‌باشند. دو مربع آبی رنگ در ابتدا و انتهای پل دو حجره موجود در دو سوی پل را نشان می‌دهند. اندازه‌ها در این شکل برحسب متر می‌باشد.

همین‌طور که در شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود، پروفیل‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ (به طول ۴۲ متر) از روی پایه‌های ۱ تا ۵ پل عبور کرده‌اند. در شکل ۴-۱۲ مقطع پردازش شده‌ی پروفیل شماره ۷ آمده است؛ که پنج پایه‌ی مذکور به‌خوبی در آن قابل تشخیص می‌باشند.



شکل ۴-۱۲: مقطع پردازش شده از پروفیل ۷. اعداد نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی پایه‌های پل می‌باشد. مستطیل آبی رنگ حجره‌ی موجود در ابتدای پل را نشان می‌دهد.

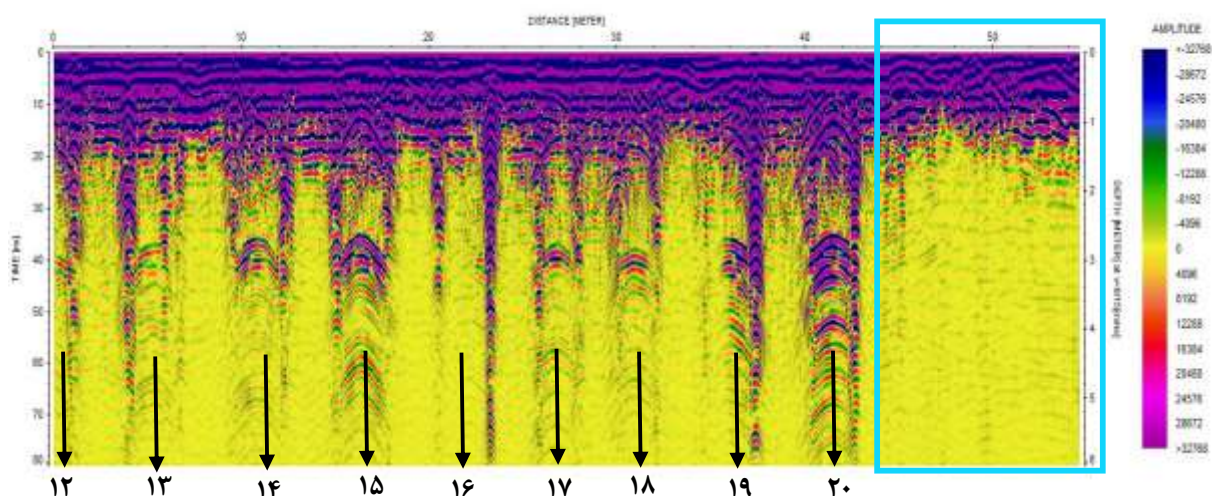
همچنین پروفیل‌های ۲، ۵، ۸ و ۱۱ (به طول ۳۵ متر) از روی پایه‌ی ۶ تا وسط پایه‌ی ۱۲ پل گذشته‌اند؛ که این هفت پایه را به طرز قابل قبولی در مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۵ (شکل ۴-۱۳) می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۴-۱۳: مقطع پردازش شده از پروفیل ۵. اعداد نشان دهنده شماره پایه‌های پل می‌باشد.

شکل ۴-۱۴: مقطع پردازش شده از پروفیل ۳ می‌باشد. ۹ پایه‌ی پل (نیمی از پایه‌ی ۱۲ تا پایه‌ی ۲۰)

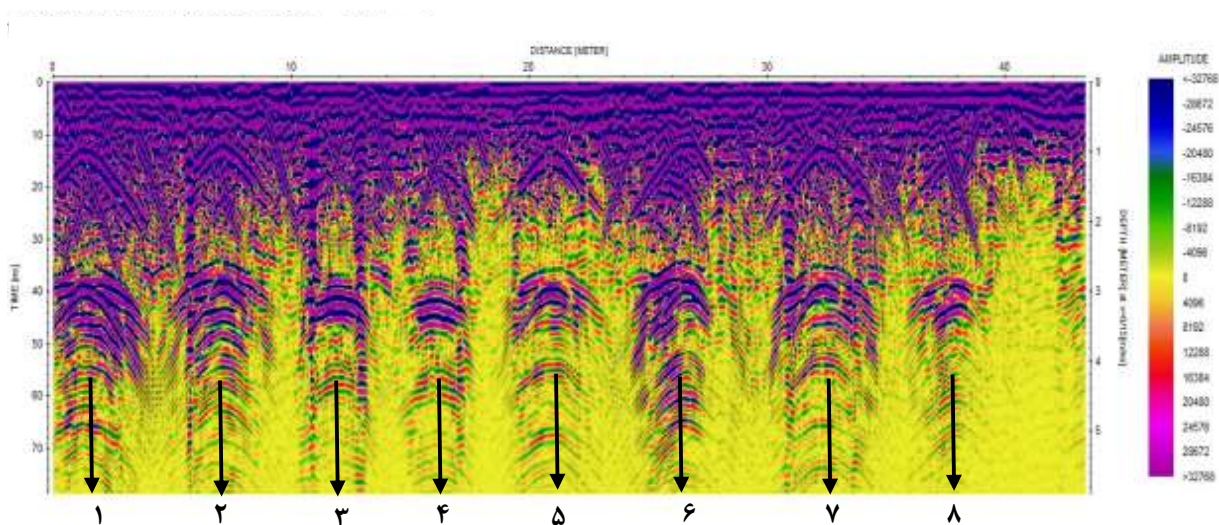
که پروفیل‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ از روی آنها عبور داده شده است؛ در مقطع GPR به خوبی مشخص شده‌اند. محل این پایه‌ها در شکل با پیکان‌هایی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۴: مقطع پردازش شده از پروفیل ۳. اعداد نشان دهنده شماره پایه‌های پل می‌باشد. مستطیل آبی رنگ حجره‌ی موجود در انتهای پل را نشان می‌دهد.

در دالان‌ها نیز پایه‌ها قابل تشخیص‌اند. برای بررسی این موضوع یکی از پروفیل‌هایی که در دالان برداشت شده؛ نیز به عنوان نمونه آمده است.

شکل ۴-۱۵ مقطع پردازش شده‌ی پروفیل شماره‌ی ۱۵ را نشان می‌دهد؛ که در یکی از دالان‌های پل برداشت شده است. این پروفیل از روی پایه‌های ۱ تا ۸ پل عبور کرده است. این پایه‌ها بر روی مقطع در این شکل با پیکان‌هایی مشخص شده‌اند.



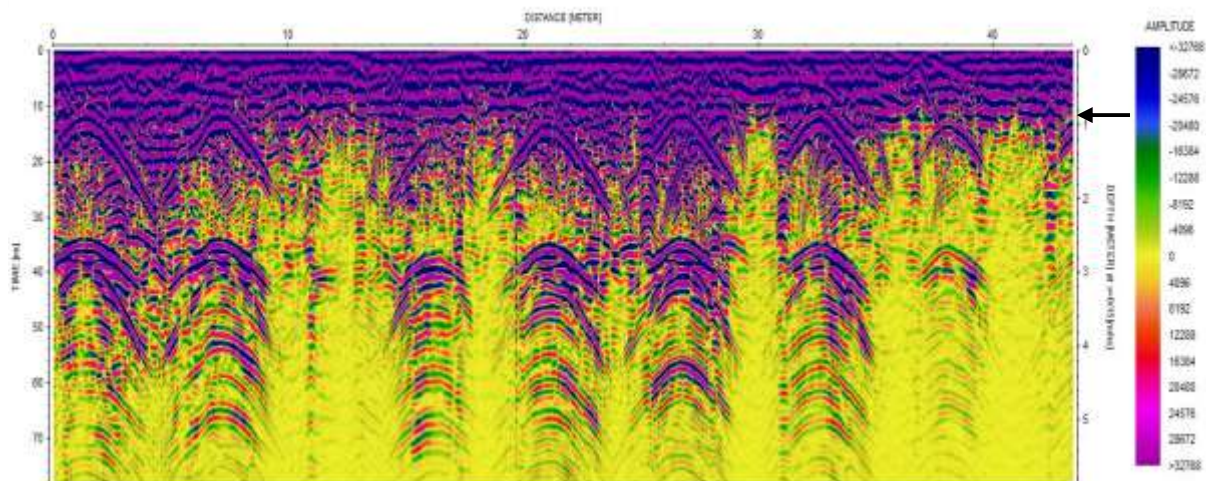
شکل ۴-۱۵: مقطع پردازش شده از پروفیل ۱۵. اعداد نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی پایه‌های پل می‌باشد.

در تصویر ۴-۱۶ که نمایی از غرب پل خواجه را نشان می‌دهد؛ می‌توان پایه‌های پل را که به صورت برجسته از دیواره بیرون زده‌اند؛ مشاهده کرد. یکی از این پایه‌ها با مستطیل زرد رنگ در شکل مذکور نشان داده شده است. در مقاطع GPR نیز می‌توان حضور این پایه‌ها را به‌خوبی تشخیص داد. در این مقاطع شروع هریک از پایه‌ها اغلب با یک هذلولی مشخص شده است. این موضوع در یکی از مقاطع به عنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴-۱۶: تصویری از نمای غربی پل خواجه. مستطیل زرد رنگ نشان دهنده‌ی یکی از پایه‌های بیرون زده‌ی پل می‌باشد.

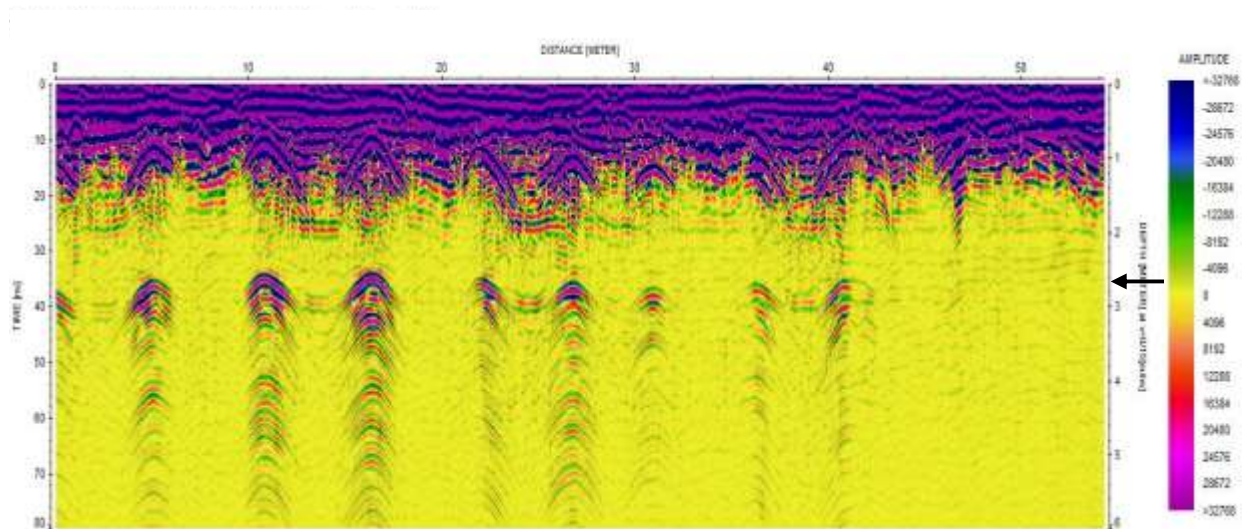
مقطع پردازش شده‌ی پروفیل شماره‌ی ۱۳ که در یکی از دالان‌های پل برداشت شده، در شکل ۴-۱۷ آمده است. در این شکل پیکان سیاه رنگ نشان دهنده‌ی شروع پایه‌هاست. همچنین در شکل ۴-۹ فاصله‌ی کف گذرگاه پل تا شروع ستون‌ها ۰/۹۵ متر نشان داده شده است؛ که تطابق خوبی با مقاطع دارد و می‌توان مشاهده نمود که پیکان رسم شده در شکل ۴-۱۷ نیز عمق حدود ۰/۹ متری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۳، برداشت شده در دالان پل. پیکان در تصویر نشان دهنده‌ی عمق شروع پایه‌های پل است.

همان‌طور که در شکل ۴-۱۰ می‌توان دید، جنس مواد به‌کار رفته در ساختار پل از بالا به پایین از آجر با ملاط گچ، به سنگ با ملاط آهک تغییر می‌کند. مرز این تغییر جنس، در عمق ۲/۶۴ متری قرار دارد (شکل ۴-۹). تغییر جنس مذکور در پایه‌های پل سبب ایجاد بازتاب‌هایی در مقاطع GPR شده و خود را به شکل هذلولی نشان می‌دهند.

شکل ۴-۱۸ مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۶ را نشان می‌دهد. شروع این هذلولی‌ها که از عمق حدود ۲/۶۵ متری می‌باشد، با یک پیکان در این مقطع مشخص شده است. بنابراین می‌توان گفت که انطباق خوبی بین مقاطع و هندسه‌ی پل قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۸: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۶. پیکان سیاه رنگ در این تصویر مرز تغییر جنس پایه‌ها که در مقطع با هذلولی‌هایی مشخص شده را نشان می‌دهد.

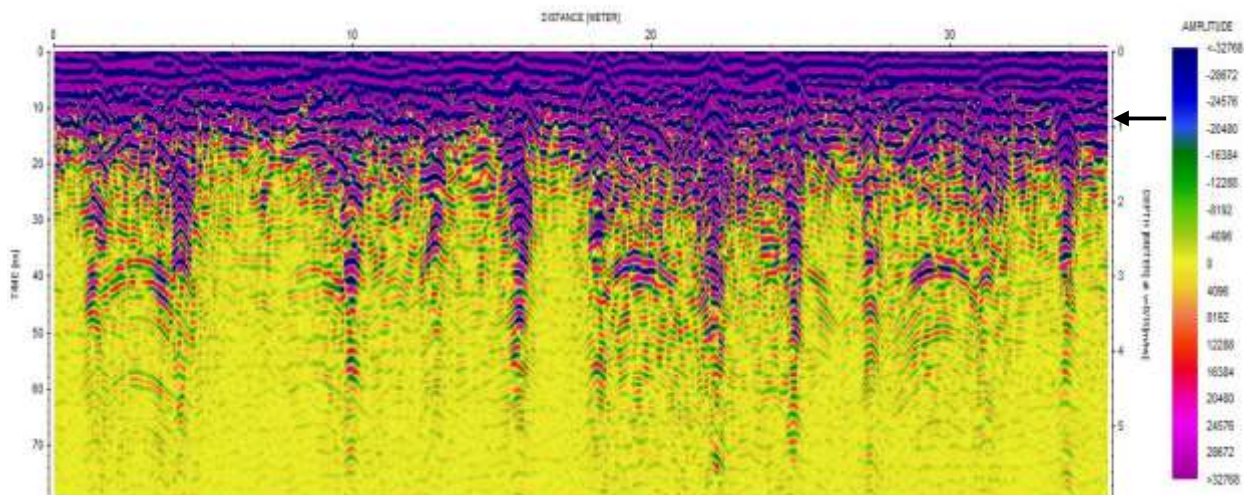
طراحی پل به‌گونه‌ای است که برای سبک‌تر شدن و کاستن از وزن سازه، در زیر پل ساختارهای گنبدی شکلی تعبیه شده است تا هر چه بیشتر از فشار بر روی پایه‌ها کم کرده و استحکام آن تضمین شود. این گنبدها را در شکل ۴-۱۰ که نمای زیرین پل خواجو را نشان می‌دهد؛ می‌توان دید.

در مقاطع GPR بدست آمده از پروفیل‌های عبوری از گذرگاه پل (مقاطع ۱ تا ۱۲)؛ به‌خوبی می‌توان به وجود گنبد‌های مذکور پی برد. در ادامه ۴ مقطعی که محل آنها در کنار یکدیگر قرار دارد؛ به عنوان نمونه آمده تا تأثیر گنبد‌های موجود در دالان زیرین پل بر روی آنها بررسی شود.

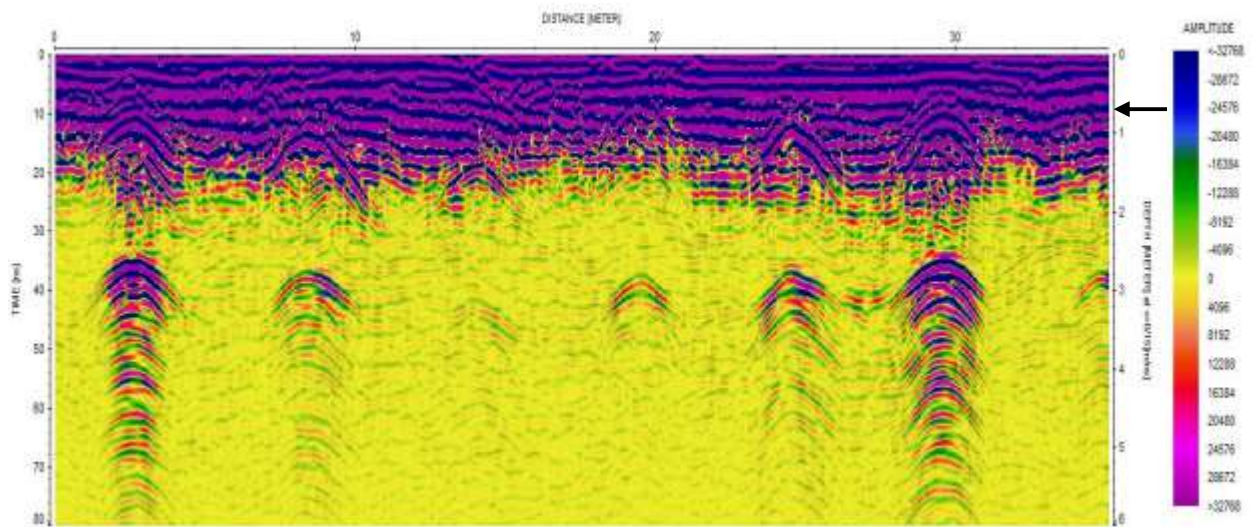
شکل‌های ۴-۱۹ تا ۴-۲۲ به ترتیب مقاطع GPR پردازش شده‌ی پروفیل‌های ۲، ۵، ۸ و ۱۱ را نشان می‌دهند. این مقاطع بر روی گذرگاه پل به صورت عرضی و در کنار یکدیگر قرار دارند (شکل ۳-۶). مقاطع ۲ (شکل ۴-۱۹) و ۱۱ (شکل ۴-۲۲) نشان دهنده‌ی پروفیل‌هایی هستند که در کناره‌های پل و نزدیک به دیوارها قرار دارند و مقاطع ۵ (شکل ۴-۲۰) و ۸ (شکل ۴-۲۱) پروفیل‌هایی را نشان می‌دهند که در وسط

گذرگاه پل واقع شده‌اند. با بررسی این مقاطع مشاهده می‌شود که هذلولی‌هایی که نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های پل هستند، در دو مقطع ۲ و ۱۱ (شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۲)، از عمق حدود ۰/۹ متری شروع شده‌اند؛ اما در مقاطع ۵ و ۸ از عمق حدود ۰/۶۵ متر شروع می‌شوند (شکل‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۱). این موضوع نشان دهنده‌ی این است که ضخامت پل در بخش میانی عرض گذرگاه کاسته شده، که علت آن وجود گنبد‌های مذکور می‌باشد.

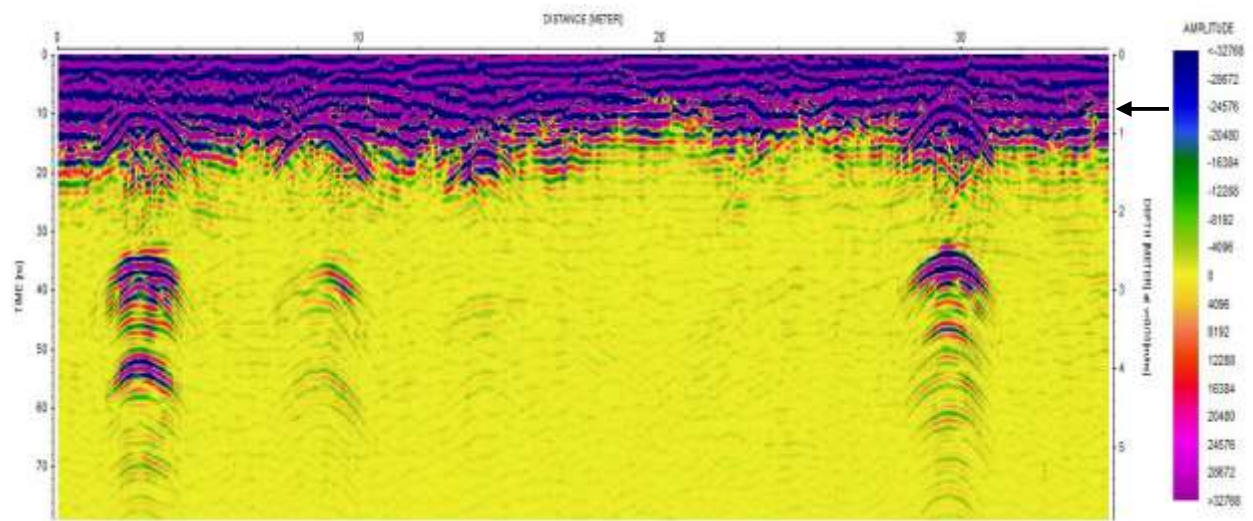
همچنین با مقایسه‌ی عمق گنبد‌ها در شکل ۴-۹ و این مقاطع، مشاهده می‌شود که عمق‌های بدست آمده تا حد زیادی صحیح است. در شکل ۴-۹ برای پروفیل‌های ۲ و ۱۱ که در کناره‌ها قرار دارند، عمق ۰/۹۵ متر نشان داده شده است؛ که این مقدار در مقاطع GPR، ۰/۹ متر دیده می‌شود. همچنین عمق گنبد‌ها برای پروفیل‌های ۵ و ۸ در شکل ۴-۹، ۰/۷ متر نشان داده شده است؛ که در مقاطع مقدار ۰/۶۵ متر مشاهده می‌شود. این مسأله نیز نشان‌دهنده‌ی تطابق بالای مقاطع با ساختار پل می‌باشد.



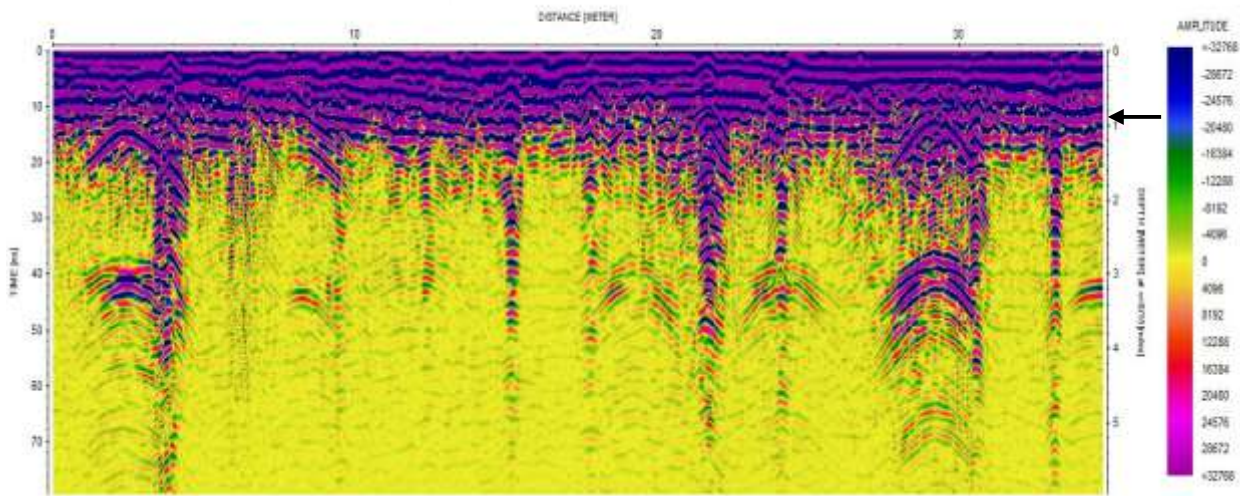
شکل ۴-۱۹: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲. پیکان سمت راست شکل نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های پل است.



شکل ۴-۲۰: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۵. پیکان سمت راست شکل نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های پل است.

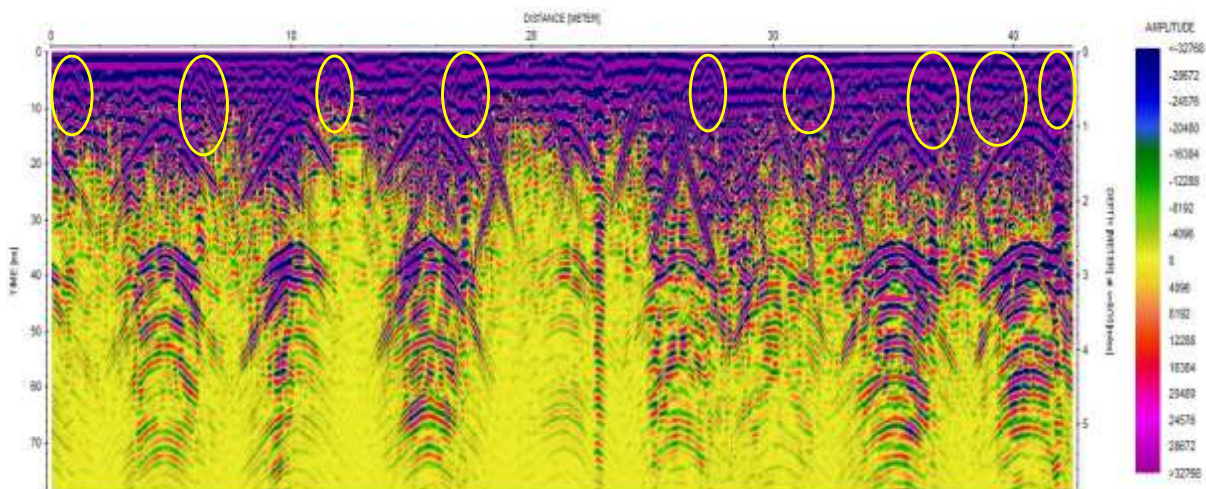


شکل ۴-۲۱: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۸. پیکان سمت راست شکل نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های پل است.



شکل ۴-۲۲: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۱. پیکان سمت راست شکل نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های پل است.

در پروفیل‌هایی که در دالان‌های پل برداشت شده (پروفیل‌های شماره‌ی ۱۳ تا ۱۶) تعداد زیادی هذلولی نزدیک به سطح دیده می‌شود. این هذلولی‌ها ناشی از چراغ‌های نصب شده در کف دالان می‌باشد؛ که در یک راستا و به فاصله‌ی تقریباً ۳ متر از یکدیگر واقع شده‌اند. تعدادی از این هذلولی‌ها در شکل ۴-۲۳ با بیضوی‌های زرد رنگ مشخص شده‌اند.



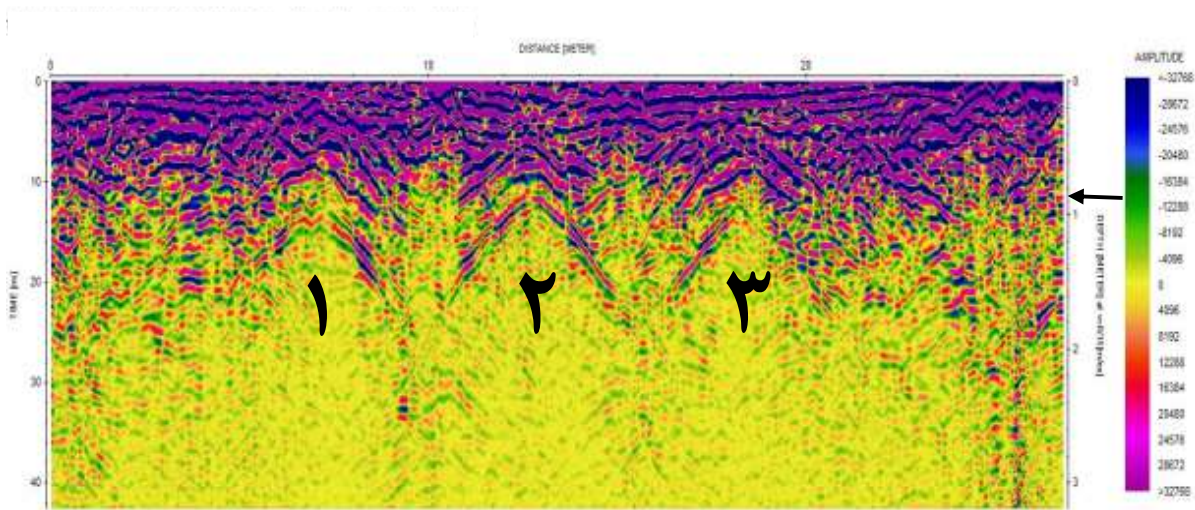
شکل ۴-۲۳: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۴ که در یکی از دالان‌های پل برداشت شده. چراغ‌های موجود در سطح پل در این مقطع با هذلولی نمایان شده‌اند؛ که محل تعدادی از آنها با بیضی‌های زرد رنگ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۳-۶ نیز نشان داده شده، محل پروفیل شماره‌ی ۱۷، روی سقف ساختمان شاه‌نشین غربی قرار دارد و به‌صورت یک نیم‌دور بر روی آن برداشت شده است. با نگاهی به ساختمان شاه‌نشین مشاهده می‌شود که سه گنبد بزرگ در وسط این بنا وجود دارد؛ که در شکل ۴-۲۴ با اعداد ۱ تا ۳ مشخص شده‌اند. این سه گنبد بر روی مقطع حاصل از پروفیل ۱۷ که از روی آنها عبور داده شده، خود را با هذلولی‌هایی نشان داده‌اند. شکل ۴-۲۵ مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۷ را نشان می‌دهد. هذلولی‌های ایجاد شده بر اثر وجود گنبدهای مذکور بر روی این مقطع با اعداد ۱ تا ۳ مشخص شده‌اند.

همچنین فاصله‌ی این گنبدها تا سقف ساختمان ۰/۸۹ متر می‌باشد (شکل ۴-۹). این فاصله در مقطع نیز در عمق ۰/۹ متری است؛ که محل آن در شکل ۴-۲۵ با پیکان نشان داده شده است.

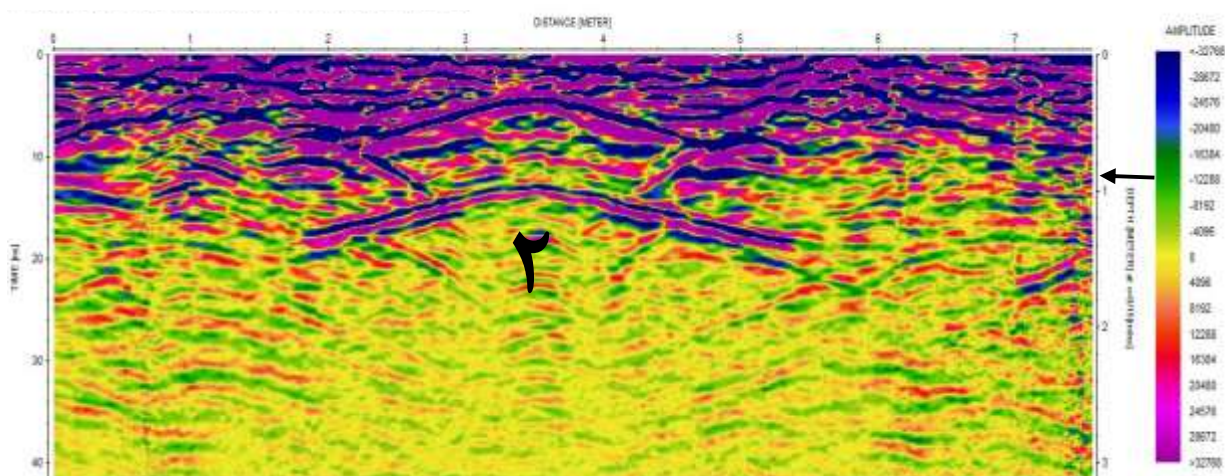


شکل ۴-۲۴: تصویری از ساختمان شاه‌نشین پل خواجه و سه گنبد بزرگ موجود در آن



شکل ۴-۲۵: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۷. اعداد نشان دهنده‌ی هذلولی‌های است که بر اثر وجود گنبد‌های موجود در زیر این پروفیل به وجود آمده. پیکان سمت راست مقطع، عمق این هذلولی‌ها را نشان می‌دهد.

پروفیل ۲۳ نیز، همان‌طور که در شکل ۳-۶ نشان داده شده، در بخش انتهایی سقف ساختمان شاه‌نشین غربی واقع شده است. این پروفیل تنها از روی یکی از گنبدهای این ساختمان (گنبد شماره ۲) عبور کرده است. با نگاهی به مقطع حاصل از این پروفیل (شکل ۴-۲۶) می‌توان هذلولی به‌وجود آمده بر اثر گنبد شماره ۲ را ملاحظه نمود. محل این هذلولی نیز همانند مقطع حاصل از پروفیل ۱۷ در عمق حدود ۰/۹ متری قرار دارد؛ که تطابق خوبی با ساختار پل در این بخش دارد.



شکل ۴-۲۶: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۳. این مقطع گنبد شماره ۲ را با یک هذلولی نشان داده است. پیکان سمت راست مقطع، عمق این هذلولی را نشان می‌دهد.

در هر دو شکل ۴-۲۵ و ۴-۲۶ یک هذلولی دیگر در بالای هر یک از هذلولی‌های نشان دهنده‌ی گنبدها مشاهده می‌شود؛ که در عمق حدود ۰/۴ متری در مقطع قرار دارند. این هذلولی‌ها احتمالاً می‌توانند ناشی از گنبدهایی در ساختار داخلی پل باشند؛ که در حین ساخت پل پوشانده شده و دیده نمی‌شوند. احتمال می‌رود که این ساختارهای گنبدی شکل نخست برای شکل دادن به گنبدها ساخته شده و پس از قرار دادن گنبدها در جای خود، ساختارهای مذکور با مصالح پوشانده شده باشند.

در اینجا ذکر این نکته ضروری می‌باشد که دستگاه Utility Scan که برای برداشت داده‌ها استفاده

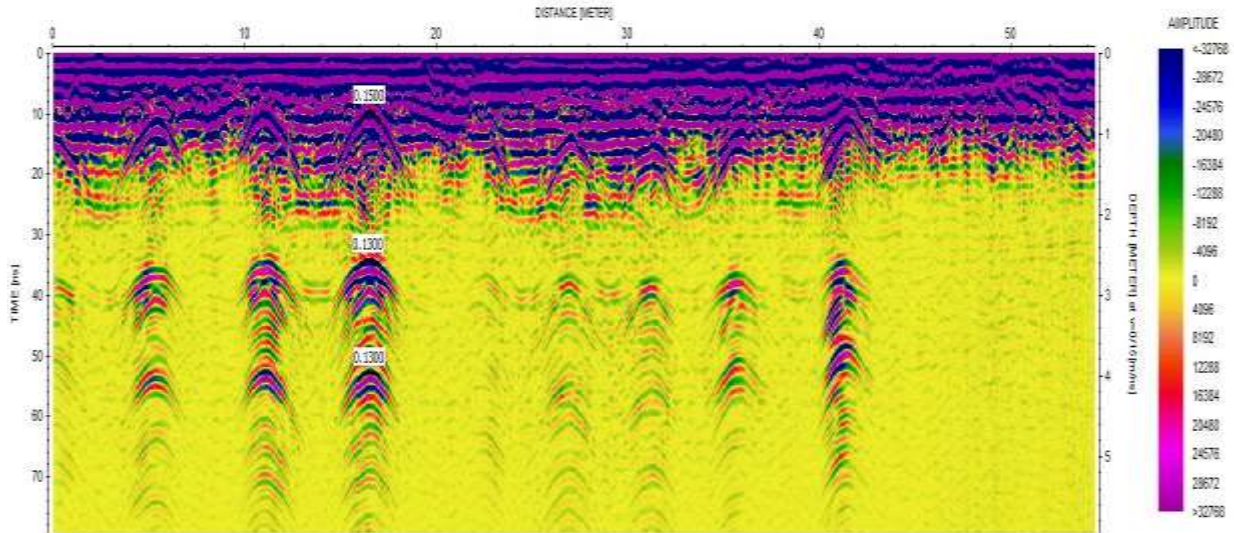
شده است، قابلیت تنظیم حداکثر عمق برداشت داده‌ها را دارا می‌باشد. در حین برداشت، این دستگاه برای پروفیل‌های ۱ تا ۱۶، بر روی حداکثر عمق برداشت ۶ متر تنظیم شد، بنابراین مقاطع حاصل نیز تا عمق حدود ۶ متر را نشان می‌دهند. اما در پروفیل‌های ۱۷ تا ۲۳ که بر روی سقف ساختمان شاه‌نشین برداشت شد، این تنظیم عمق بر روی ۳ متر قرار گرفت؛ به همین علت مقاطع حاصل از این پروفیل‌ها عمق حدود ۳ متر را نشان می‌دهند.

۴-۵- جنس و بافت مصالح به کار رفته در ساخت پل خواجه

تعیین سرعت در مقاطع علاوه بر تعیین عمق واقعی مقطع، کمک می‌کند تا با استفاده از جدول ۲-۱ جنس مواد به کار رفته در ساخت پل خواجه تعیین شود. در ادامه قسمت‌های مختلف یکی از مقاطع به عنوان نمونه، به روش برازش هذلولی‌ها تعیین سرعت می‌شود. پس از آن سعی بر آن است تا با استفاده از سرعت‌های بدست آمده تا حدودی جنس مصالح استفاده شده در ساخت پل تعیین شود.

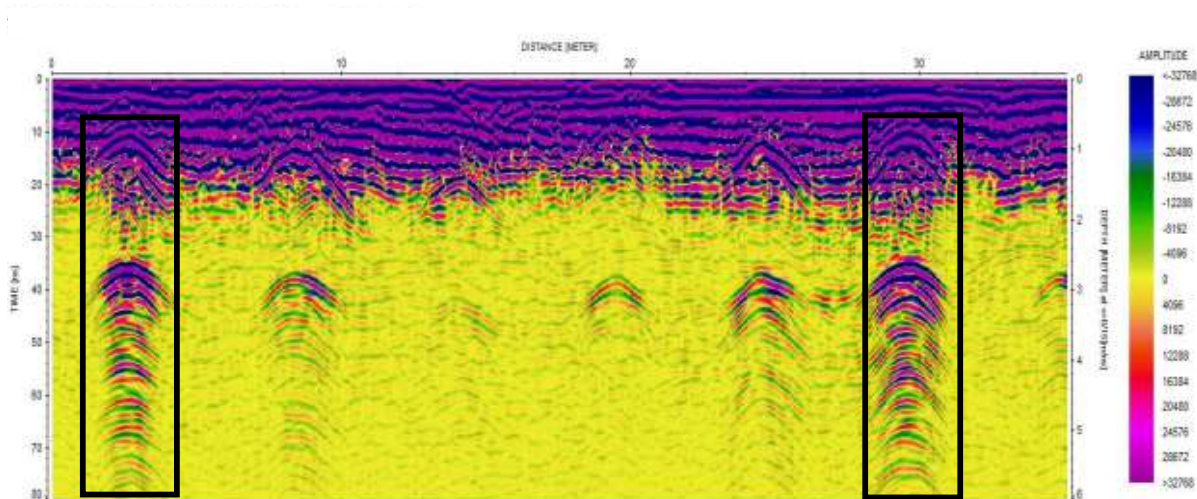
شکل ۴-۲۷ تعیین سرعت در سه عمق مختلف از یک مقطع به روش برازش هذلولی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در عمق تقریبی یک متری که بخش فوقانی پل را شامل می‌شود، سرعت ۰/۱۵ متر بر ثانیه برازش شده است. با توجه به جدول ۲-۱ این سرعت مربوط به آجر خشک است؛ که با مصالح به کار رفته در پل مطابقت دارد. در بخش میانی و حدود ۲/۶ متری، سرعت ۰/۱۳ متر بر ثانیه برازش شده، که این سرعت را در جدول ۲-۱ می‌توان به سنگ‌آهک نسبت داد. سومین هذلولی که در عمق حدود ۴ متری قرار دارد، نیز سرعت ۰/۱۳ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی دو شکل ۴-۹ و ۴-۱۶ نتیجه می‌شود که این هذلولی می‌تواند ناشی از کف پل (جایی که پله‌ها شروع می‌شوند) باشد. همچنین جنس این قسمت با جنس بخش میانی (عمق ۲/۶ تا ۴ متری) یکسان است و این مسأله می‌تواند یکسان بودن سرعت این دو قسمت (۰/۱۳ متر بر ثانیه) را توجیه کند. در بررسی‌های بعدی پل خواجه جنس

آهکی دو بخش اخیر تأیید شد.



شکل ۴-۲۷: برازش هذلولی به سه دسته هذلولی در اعماق مختلف از مقطع شماره ۹.

در مورد بافت مواد نیز می‌توان گفت که اگر شکستگی به همراه تشکیل مواد دانه‌ریز و رسی رخ نداده باشد و مواد متراکم باشند، هر جا که سرعت افزایش یابد و عمق نفوذ بیشتر شود؛ در آن قسمت بافت متراکم‌تر است. به عنوان مثال در مقطع نشان داده شده در شکل ۴-۲۸، ستون‌هایی از پل که بازتاب‌های قوی‌تری داشته‌اند، احتمالاً بافت نیز تراکم بیشتری داشته است. این ستون‌ها در شکل ۴-۲۸ با مستطیل‌های سیاه رنگ مشخص شده‌اند.



شکل ۴-۲۸: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۵. مستطیل‌های سیاه رنگ ستون‌هایی از پل که احتمالاً متراکم‌تر از سایرین هستند را نشان می‌دهند.

۴-۶- شکستگی‌های موجود در پل خواجه

شکستگی‌ها بسته به شکل، جهت و گسترش آنها، خود را در مقاطع GPR به شکل‌های مختلفی نشان می‌دهند. در طی برداشت داده‌ها مترآژ شکستگی‌هایی که بر روی زمین قابل رؤیت بود، یادداشت شد؛ تا با مقایسه‌ی آنها با مقاطع GPR، بتوان تا حدودی به نحوه‌ی کلی نمایش شکستگی در مقطع پی برد. با بررسی شکستگی‌هایی که بر روی پل رخنمون داشتند، مشخص شد که بیشتر ترک‌های پل خواجه به صورت عمود بر طول آن ایجاد شده‌اند. این موضوع نشان دهنده‌ی نشست پل به علت خشک و آبدار شدن متوالی کف رودخانه می‌باشد.

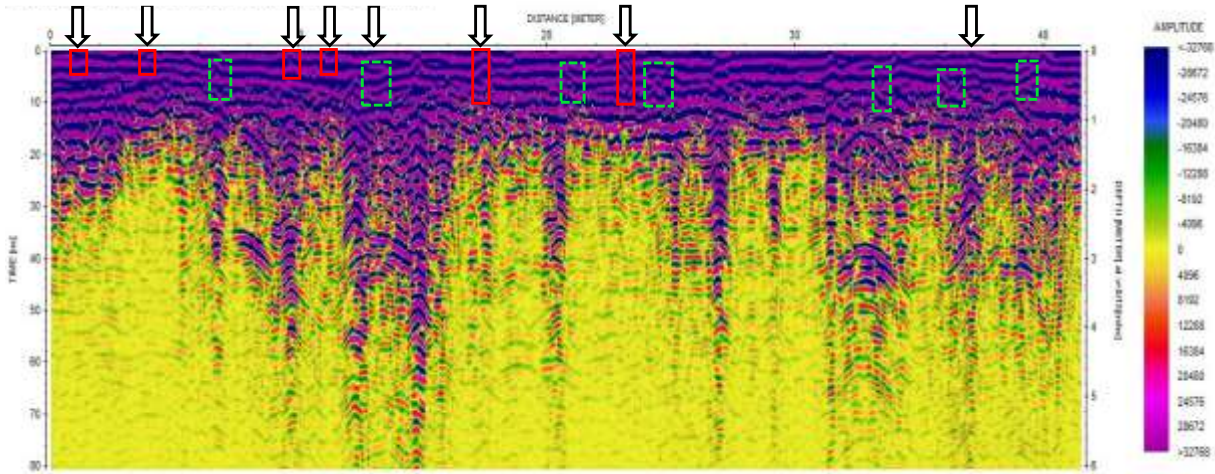
در این قسمت بررسی شکستگی‌ها بر روی تمامی ۲۳ مقطع حاصل از برداشت بر روی پل خواجه بررسی خواهد شد. شکل‌های ۴-۲۹ تا ۴-۵۱ مقاطع پردازش شده‌ی پروفیل‌های ۱ تا ۲۳ را نشان می‌دهند؛ که در بخش‌های مختلف پل خواجه قرار دارند. پیکان‌های توخالی که در بالای مقاطع مذکور قرار داده شده‌اند،

محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل دیده شده است. مستطیل - های رسم شده با خط پر قرمز رنگ در این مقاطع، نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقاطع هستند که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارند.

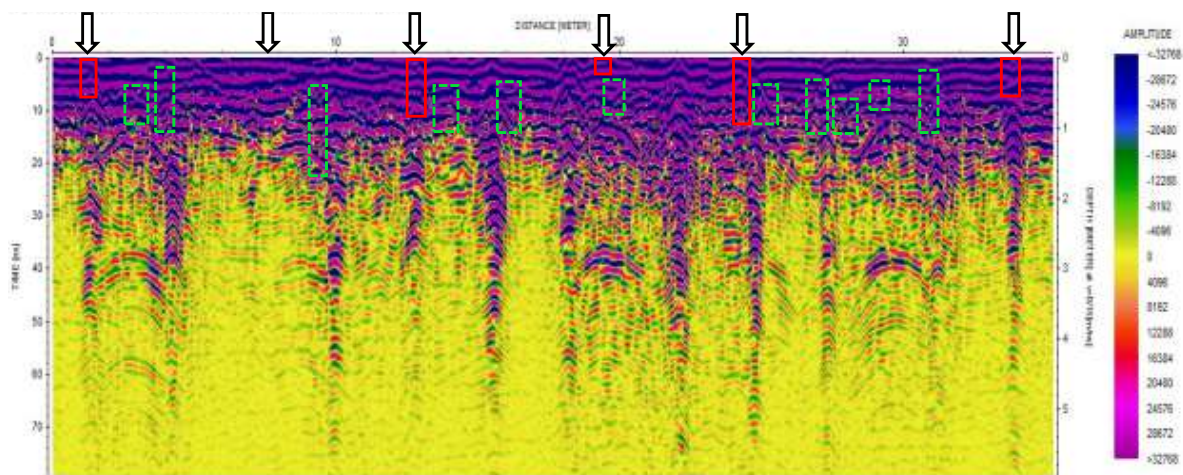
از آنجایی که شکستگی‌های سطحی پل کوچک بوده و بازشدگی زیادی نداشته‌اند، اثر آنها در مقاطع GPR خیلی واضح نیست و تنها با اندکی تغییر در بازتاب موج GPR مشخص شده‌اند. با تشخیص شکستگی - های سطحی بر روی مقطع و پیگیری آنها در عمق، می‌توان تا حدود زیادی روند و عمق نفوذ آنها را تشخیص داد.

پس از مشخص نمودن این دسته از شکستگی‌ها و مقایسه‌ی آنها با یکدیگر نتیجه می‌شود که هرچند شکستگی‌ها خود را به شکل‌های مختلفی در مقطع نشان داده‌اند؛ ولی بیشتر ترک‌های پل در مقطع، خود را با تغییر در قطبیت موج GPR نشان می‌دهند. به این صورت که عمده شکستگی‌ها در جاهایی که قطبش دامنه‌ی موج تغییر کرده است (رنگ آبی و بنفش در راستای افقی به یکدیگر تبدیل شده‌اند) خود را نشان می‌دهند. به عبارتی، در بیشتر بخش‌هایی که یک خط ممتد افقی در مقطع (مثلاً یک لایه‌ی آبی رنگ) قطع شده و یا به صورت ناگهانی شیب‌دار شده است، احتمالاً به دلیل وجود شکستگی بوده است. البته این در صورتی است که شیب‌دار شدن بر اثر وجود یک هذلولی نباشد. با استفاده از این مسأله، می‌توان به محل احتمالی شکستگی‌های داخلی پل پی برد. این دسته از شکستگی‌ها در مقاطع با مستطیل‌های رسم شده با خط منقطع و سبز رنگ نمایش داده شده‌اند.

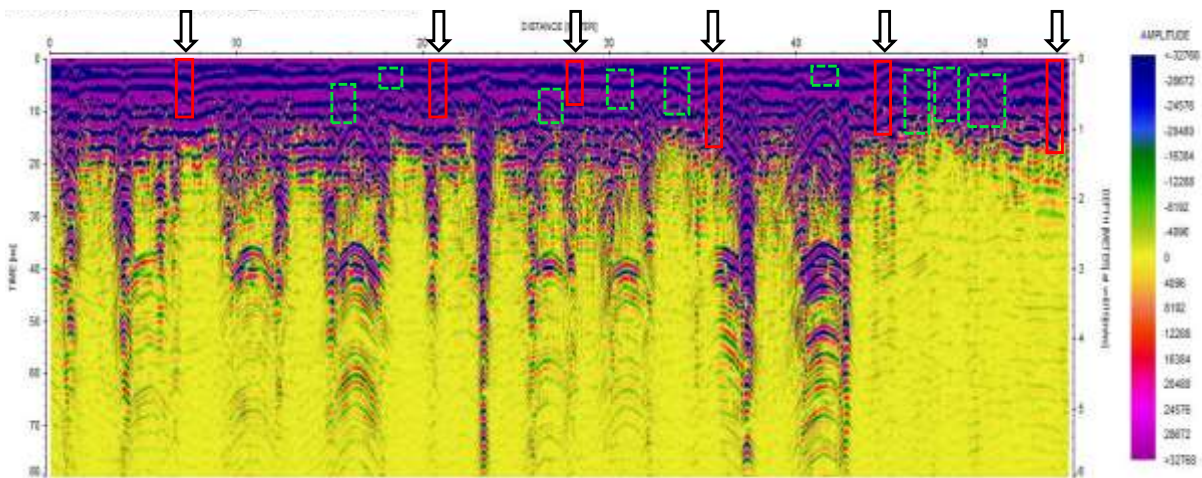
در اینجا ذکر این نکته الزامی است که به علت ناهمگنی بسیار زیاد ساختار و مواد به کار رفته در ساخت پل و همچنین وجود انواع نوفه‌ها، تفکیک شکستگی‌ها از اجزاء پیچیده و متنوع داخلی پل بسیار دشوار است. بنابراین شناسایی هرگونه شکستگی داخلی که روی سطح پل رخنمون ندارد؛ احتمالی است.



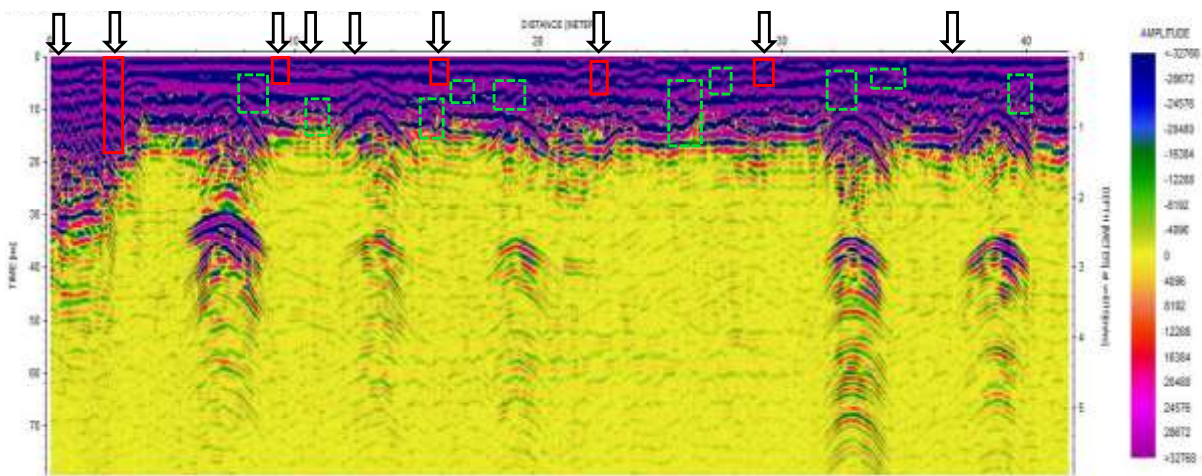
شکل ۴-۲۹: مقطع پردازش شده پروفیل ۱. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



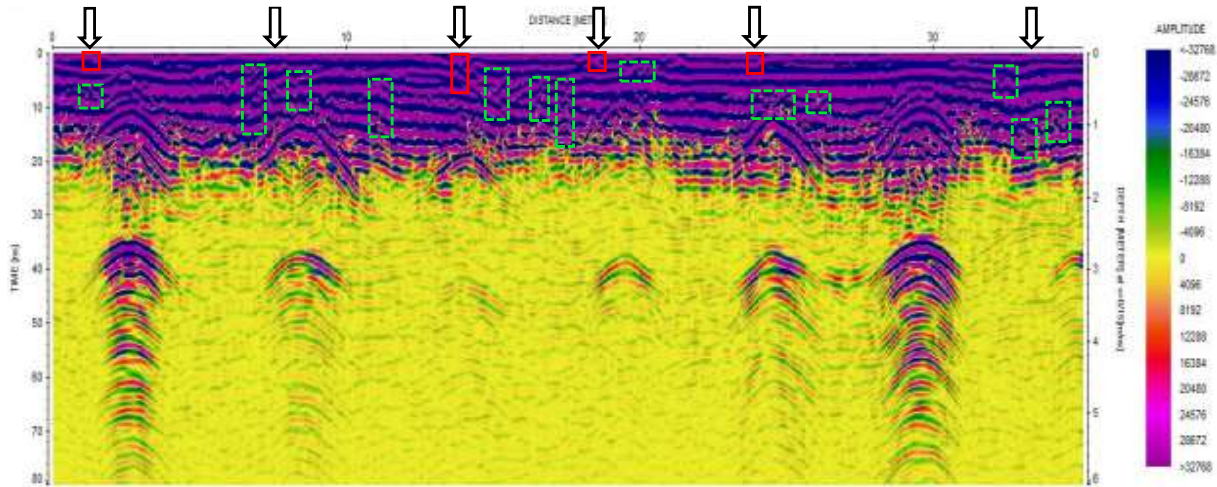
شکل ۴-۳۰: مقطع پردازش شده پروفیل ۲. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



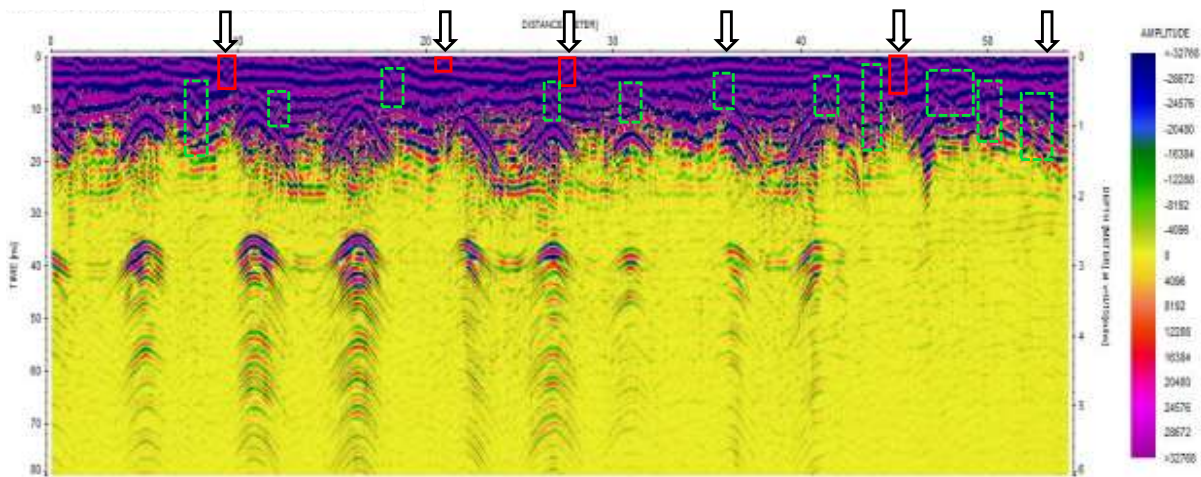
شکل ۴-۳۱: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۳. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی-هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



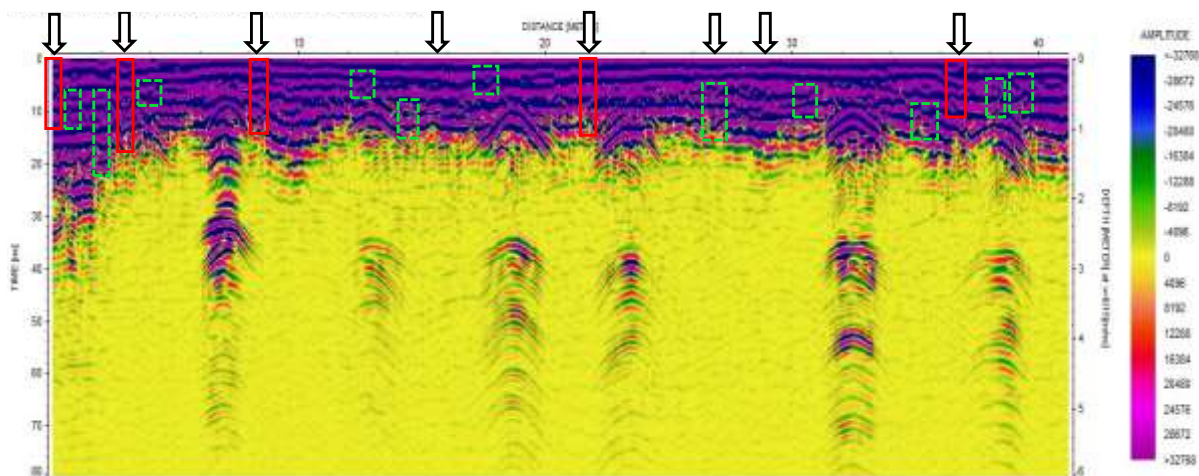
شکل ۴-۳۲: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۴. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی-هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



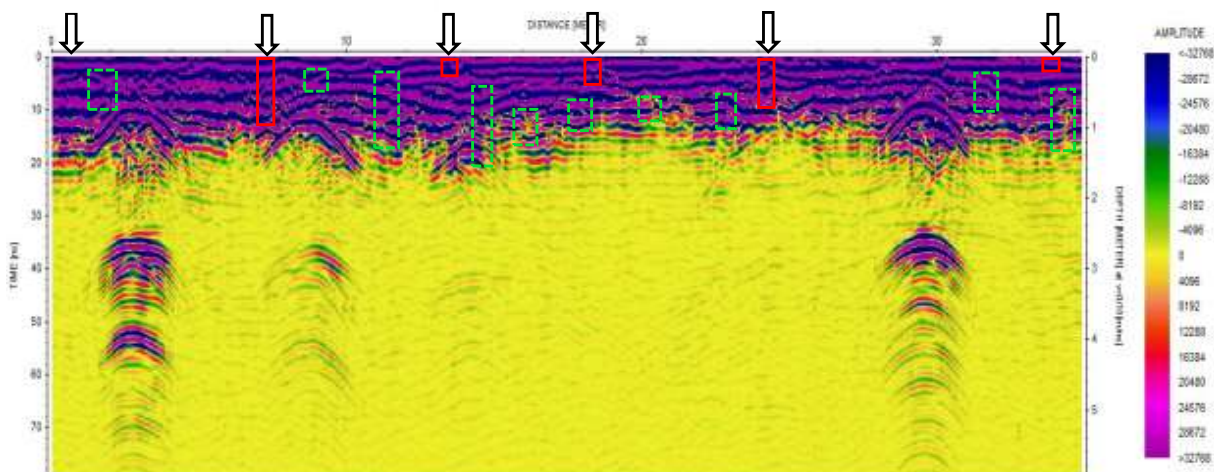
شکل ۴-۳: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۵. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



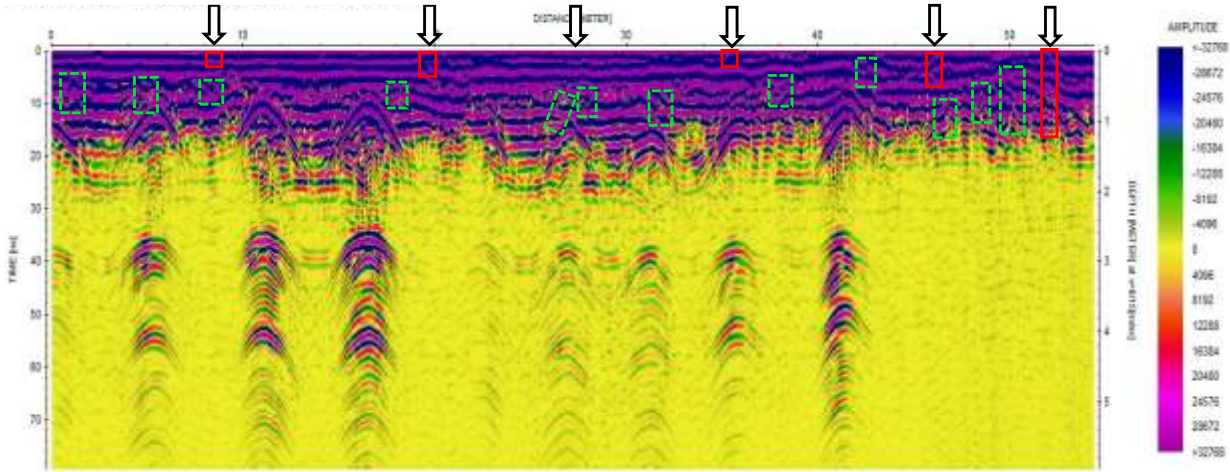
شکل ۴-۴: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۶. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



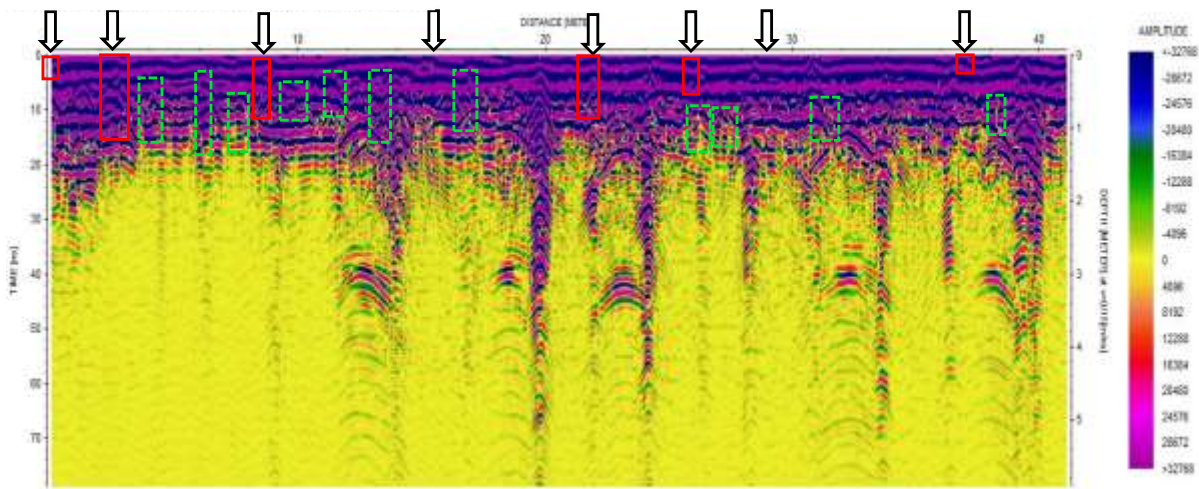
شکل ۴-۳۵: مقطع پردازش شدهی پروفیل ۷. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهندهی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



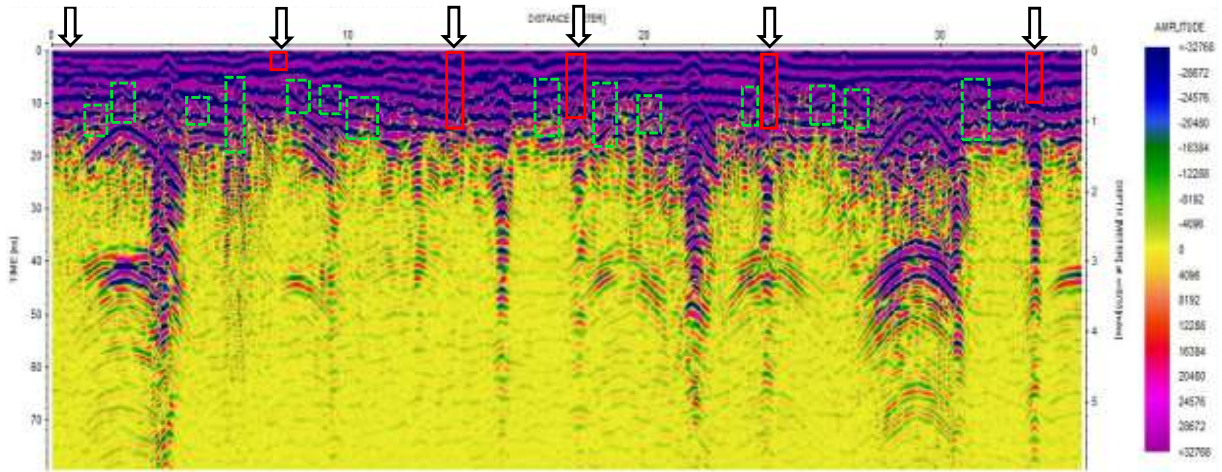
شکل ۴-۳۶: مقطع پردازش شدهی پروفیل ۸. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهندهی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



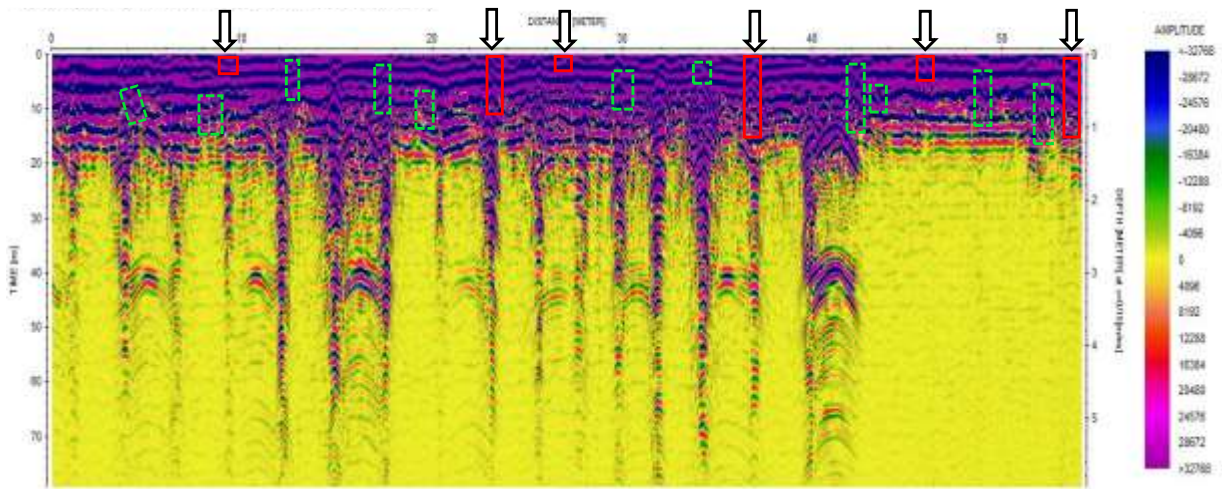
شکل ۴-۳۷: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۹. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



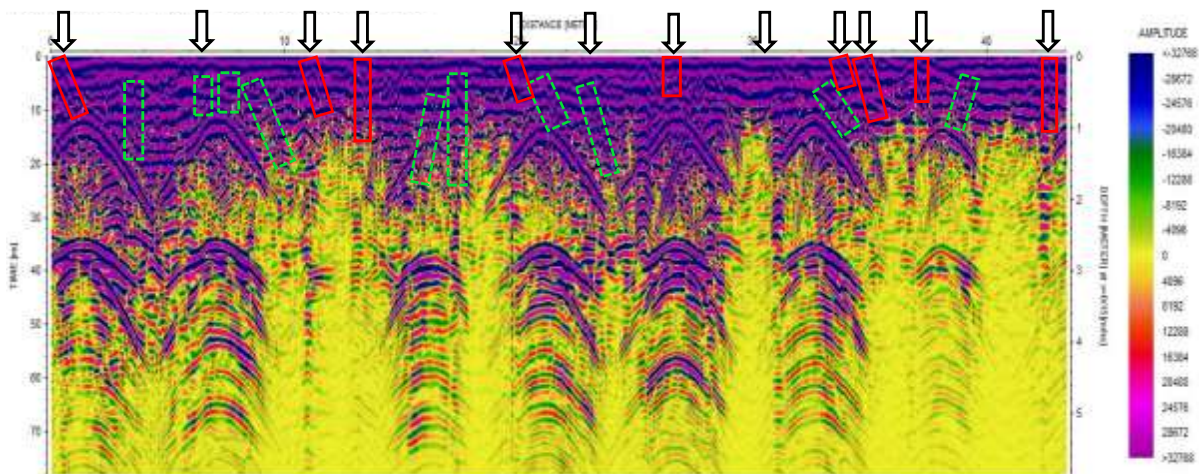
شکل ۴-۳۸: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۰. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



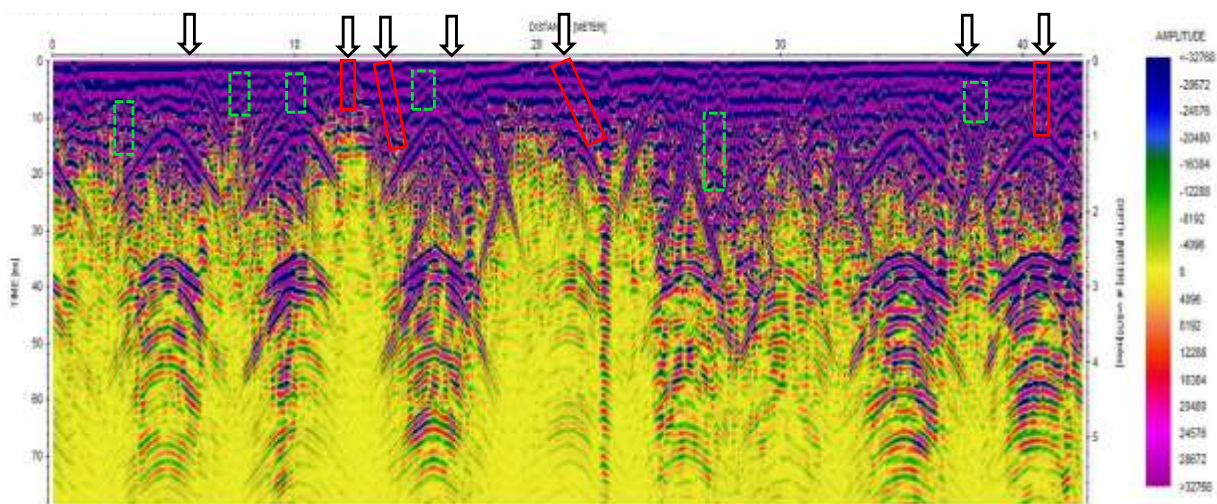
شکل ۴-۳۹: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۱. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



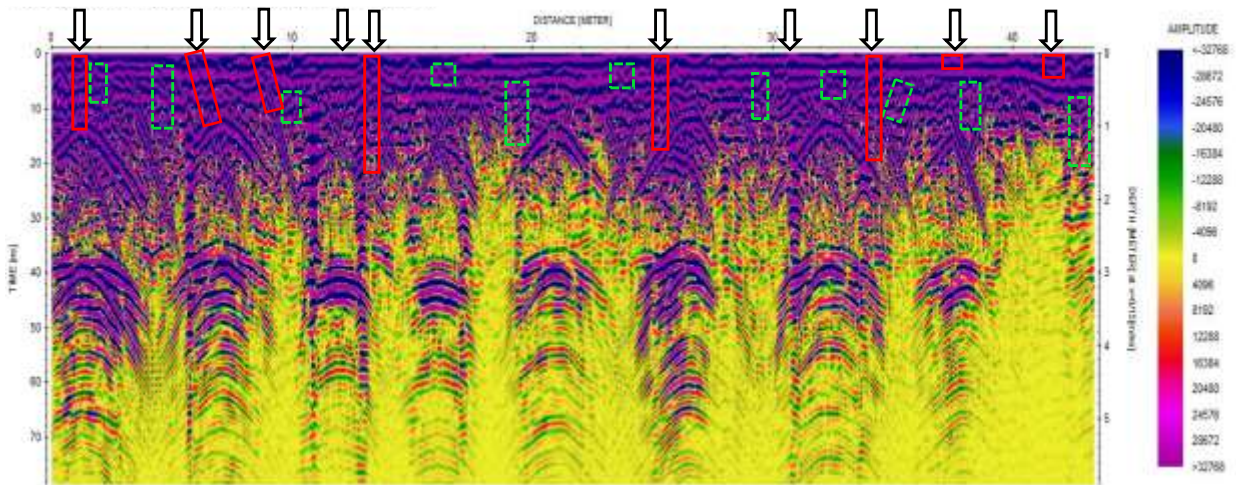
شکل ۴-۴۰: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۲. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



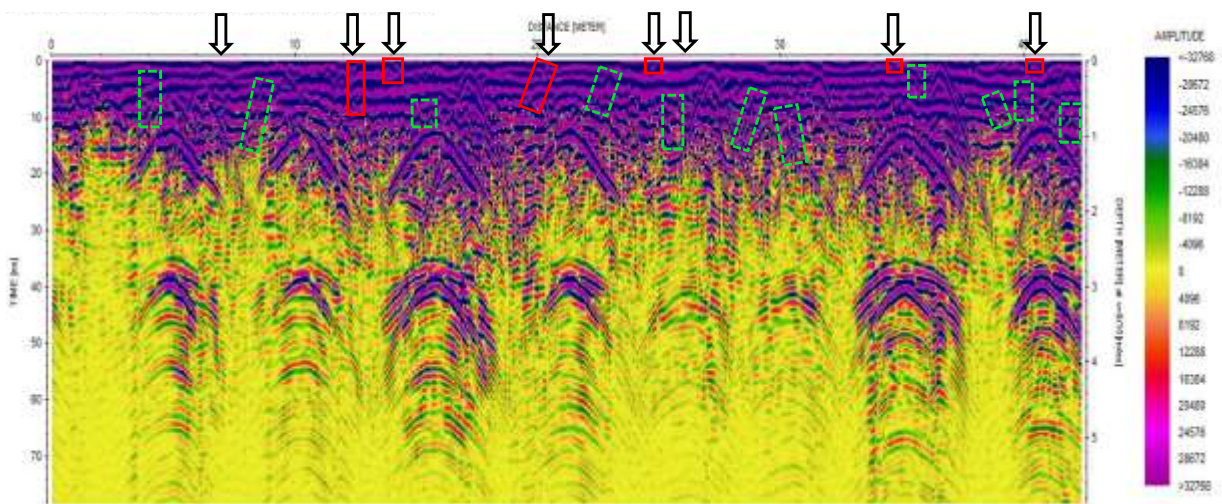
شکل ۴-۴۱: مقطع پردازش شدهی پروفیل ۱۳. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهندهی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۴۲: مقطع پردازش شدهی پروفیل ۱۴. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهندهی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.

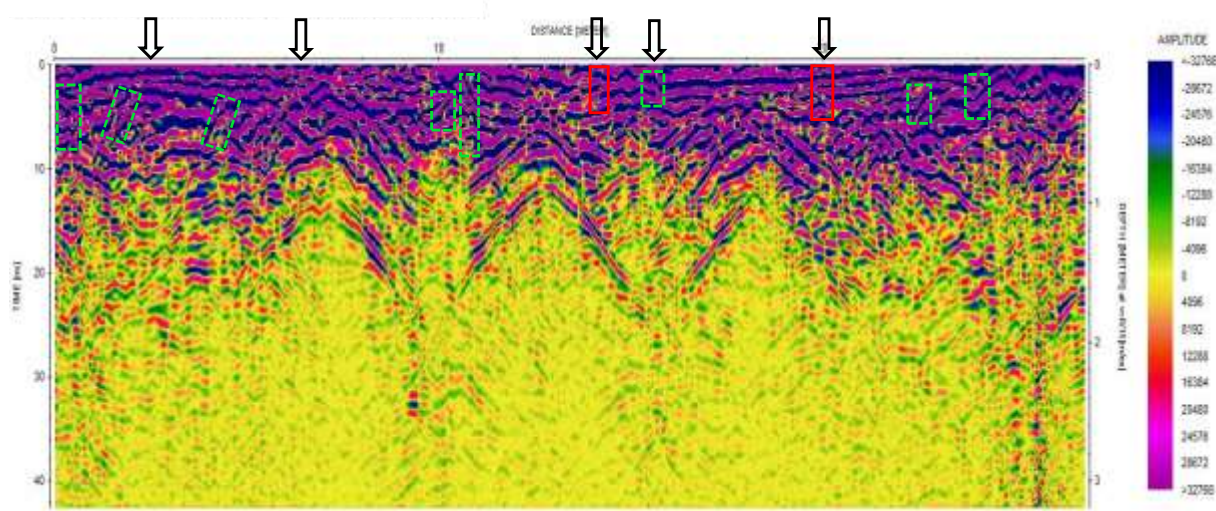


شکل ۴-۴۳: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۵. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.

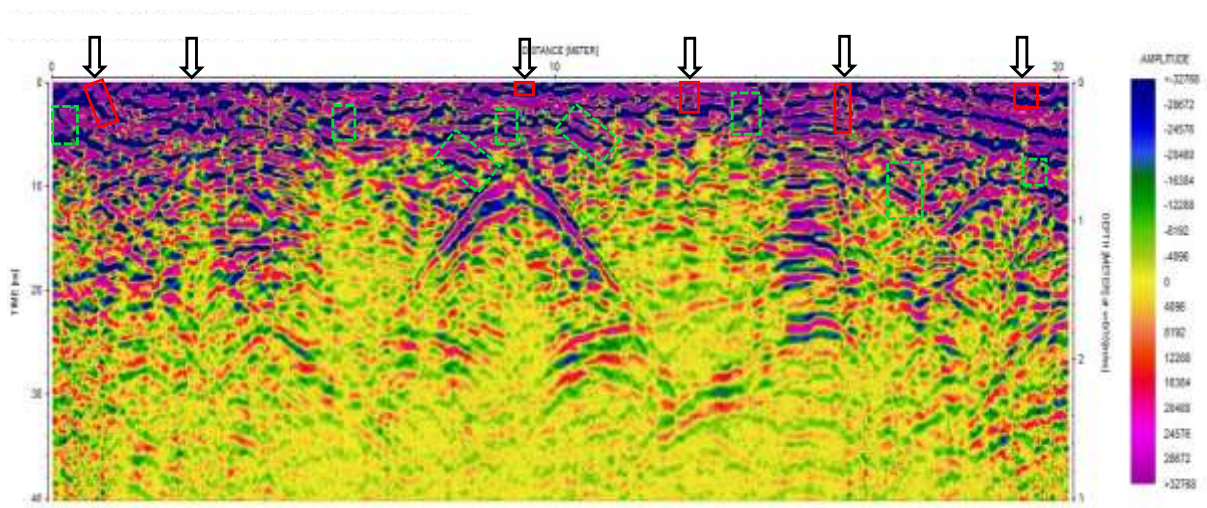


شکل ۴-۴۴: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۶. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.

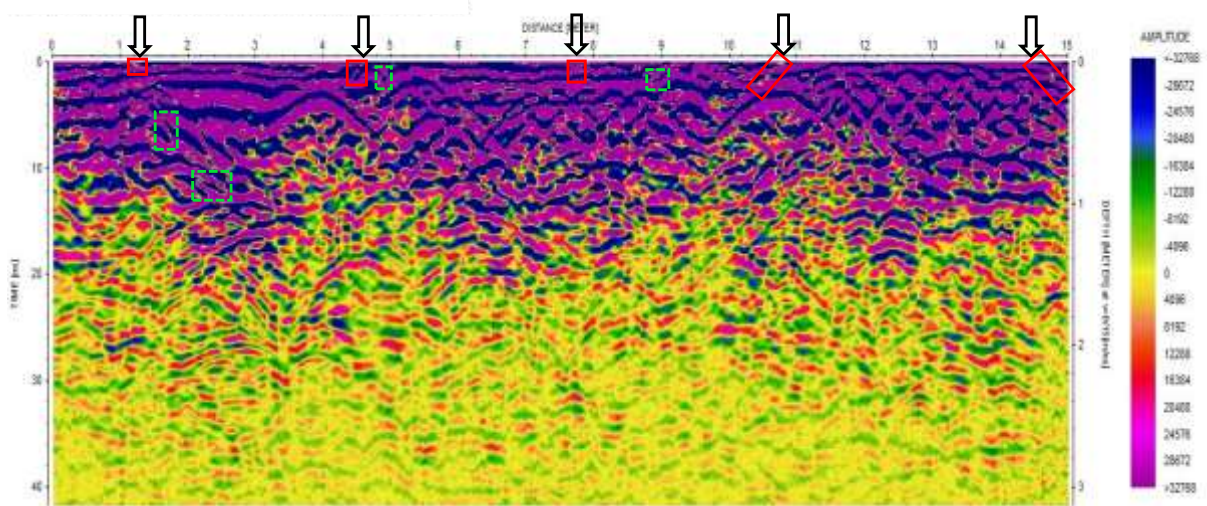
شرایط نامناسب برداشت بر روی سقف ساختمان شاه‌نشین، نظیر باد شدید و کج شدن دستگاه به دلیل ناهموار بودن و یا همسطح نبودن سقف، باعث شد تا مقاطع حاصل از پروفیل‌های ۱۷ تا ۲۳ (شکل‌های ۴-۴ تا ۴-۵) با نوفه‌های فراوان و تقریباً غیر قابل حذفی همراه باشند؛ که این مسأله نیز بر دشواری تشخیص شکستگی‌ها در مقاطع مذکور افزوده است.



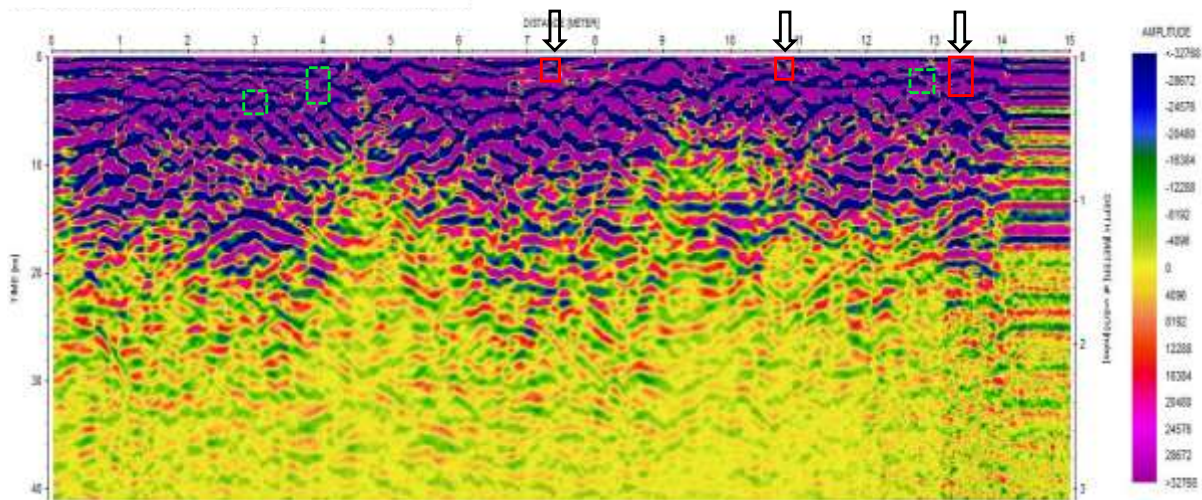
شکل ۴-۴: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۷. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجه دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



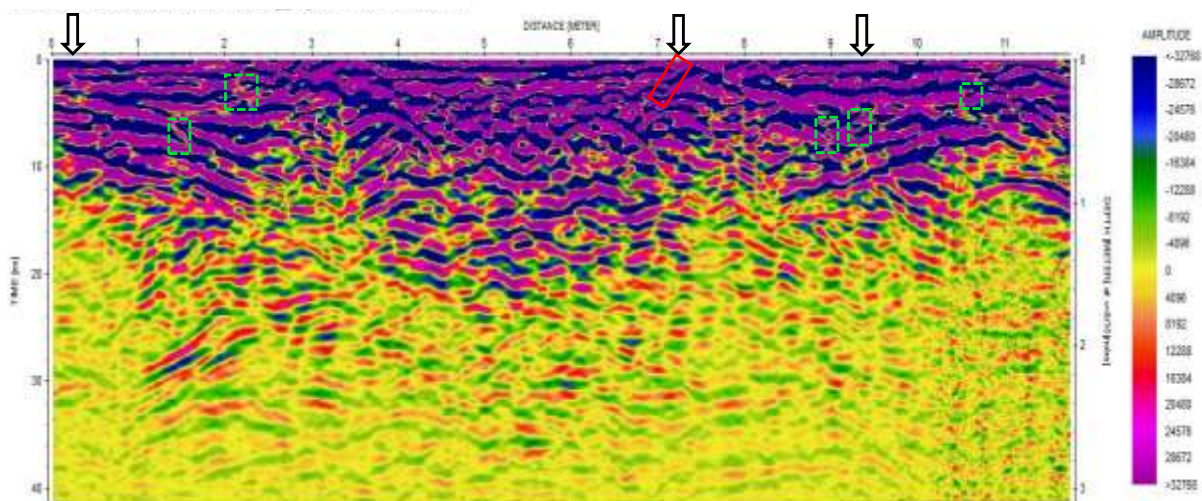
شکل ۴-۴۶: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۸. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی-هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



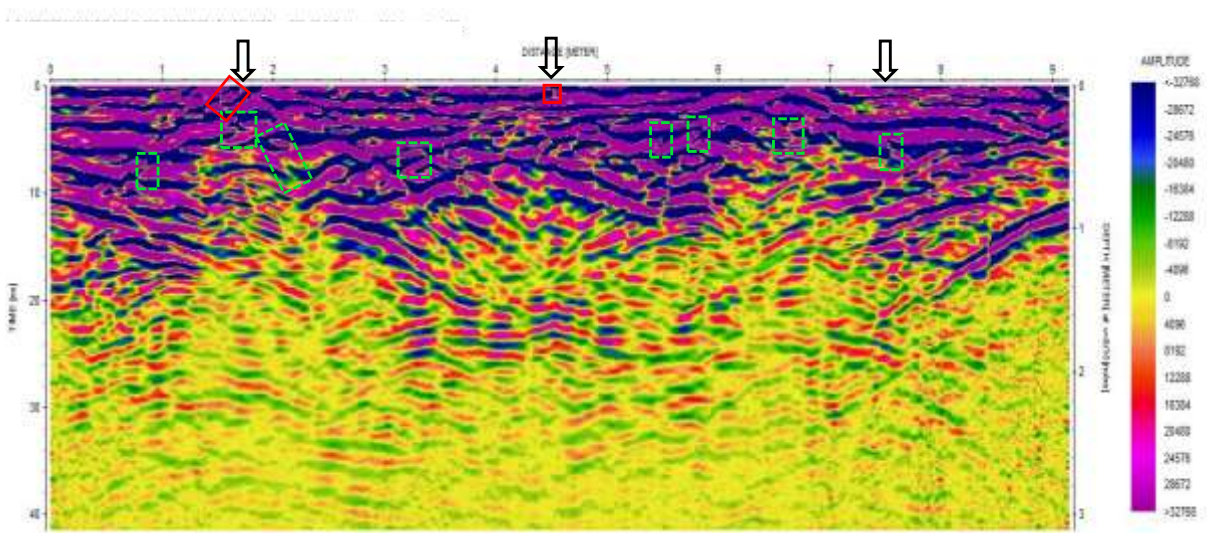
شکل ۴-۴۷: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۱۹. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی-هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



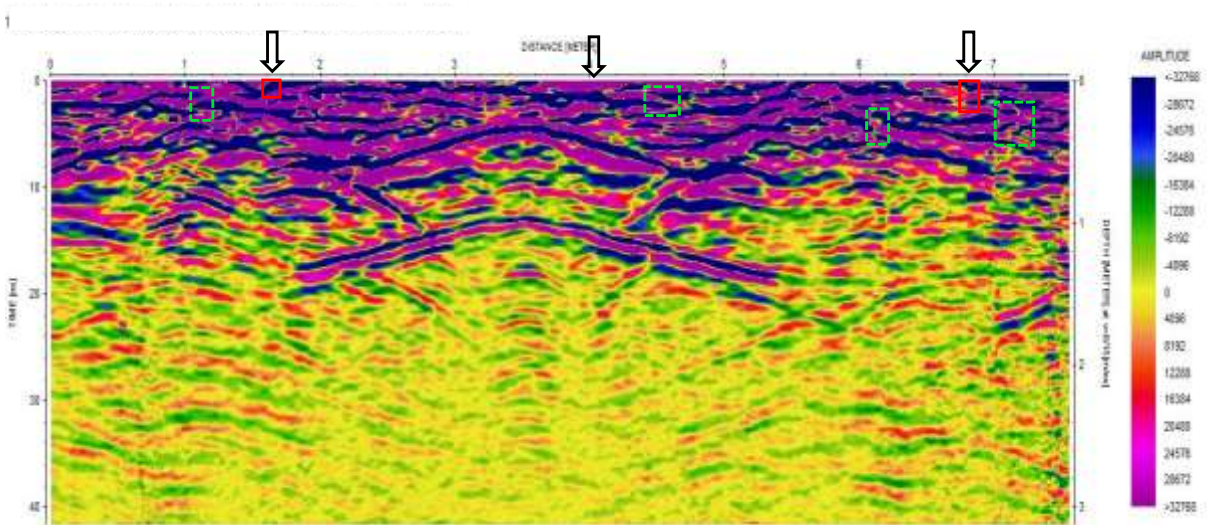
شکل ۴-۴۸: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۰. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۴۹: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۱. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی‌هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۵۰: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۲. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی-هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۵۱: مقطع پردازش شده‌ی پروفیل ۲۳. پیکان‌هایی که در بالای مقطع قرار دارند، محل شکستگی-هایی را مشخص می‌کنند که در هنگام برداشت بر روی سطح پل خواجو دیده شده‌اند. مستطیل‌های قرمز رنگ نشان دهنده‌ی شکستگی‌هایی در مقطع است که با شکستگی‌های دیده شده بر روی سطح پل مطابقت دارد و مستطیل‌های با خط منقطع رنگ سبز محل احتمالی شکستگی‌های داخلی را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در مقاطع فوق مشاهده شد، بیشتر شکستگی‌های احتمالی که بر روی سطح زمین دیده نمی‌شوند در مقاطع نیز از اعماق پایین‌تری شروع شده‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد که پس از به‌وجود آمدن این ترک‌ها در سطح پل، در مرمت‌های بعدی، روی آن‌ها با ترکیبی از سنگ و بتن پوشانده شده باشد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

مهم ترین نتایج بدست آمده از این پایان نامه را می توان به شرح زیر بیان کرد:

✓ روش برازش هذلولی ها روش بسیار کارآمدی برای تعیین سرعت امواج GPR و در نتیجه تعیین عمق و جنس مواد در مقاطع GPR می باشد. در این پایان نامه با استفاده از این روش، سرعت غالب مقاطع GPR ۰/۱۵ متر بر نانو ثانیه در نظر گرفته شده؛ که باعث شد تا بازتاب ها از ساختارهای مختلف پل در عمق صحیحی واقع شوند. همچنین با تعیین سرعت در عمق های مختلفی از مقطع، تغییر جنس مواد در آن قسمت ها مشخص شد. علاوه بر آن با مشخص بودن مقدار سرعت بدست آمده با کمک روش برازش هذلولی ها، تا حدودی نوع مصالح به کار رفته در ساخت پل خواجو مشخص شد.

✓ تعداد ۲۰ پایه ی پل در مقطعی که از کف گذرگاه عبور می کنند؛ با پایه های نشان داده شده در مقطع کاملاً مطابقت دارند. همچنین مقاطع حاصل از پروفیل های برداشت شده در دالان ها نیز به خوبی تعداد ۸ پایه ای که از روی آنها عبور داده شده را نشان می دهد.

✓ مشاهده ی پایه هایی که از دو طرف عرض پل به صورت برجسته بیرون زده اند، در تمامی مقطعی که از گذرگاه و دالان ها عبور می کردند، نشان دهنده ی این است که این پایه ها در سرتاسر عرض پل وجود دارند. در اینجا این فرضیه به وجود می آید که ابتدا پایه های پل به طور کامل و به شکل تیغه ای ساخته شده اند و سپس سایر اجزاء پل روی این پایه ها سوار شده است.

✓ در مقطع GPR حاصل، شروع پایه های پل که در عمق ۰/۹۵ متری از کف پل قرار داشتند، با هذلولی هایی در مقطع مشخص شده که در عمق حدود ۰/۹ متری قرار گرفته اند؛ این موضوع تطابق خوبی بین مقاطع و ساختار پل نشان می دهد.

✓ مرز تغییر جنس پل، که از بالا به پایین از آجر با ملاط گچ، به سنگ با ملاط آهک تغییر می‌کند، با بازتاب‌هایی در مقاطع GPR خود را نشان می‌دهد؛ که در عمق حدود ۲/۶ متری از مقطع قرار دارند. این عمق، با عمق واقعی آن در پل که ۲/۶۴ متری می‌باشد؛ تطابق خوبی دارد.

✓ گنبدهای زیرین پل خواجه با تفاوت در عمق مقاطع عبوری از روی آنها خود را نشان می‌دهند. به این صورت که هذلولی‌هایی که نشان دهنده‌ی شروع پایه‌های پل هستند، در دو مقطع کناری، از عمق حدود ۰/۹ متری شروع شده‌اند؛ اما در دو مقطع میانی، از عمق حدود ۰/۶۵ متری شروع می‌شوند. این موضوع نشانگر این است که ضخامت پل در بخش میانی عرض گذرگاه کم شده است. عمق‌های ذکر شده نیز تا حدود زیادی به عمق گنبدهای زیرین پل نزدیک می‌باشند؛ لذا انطباق خوبی بین مقاطع و هندسه‌ی پل مشاهده می‌شود.

✓ چراغ‌هایی در کف دالان‌ها به فاصله‌ی تقریباً ۳ متر از یکدیگر نصب شده‌اند، که وجود آنها با عبور پروفیل GPR از روی آنها، با هذلولی‌هایی نزدیک به سطح قابل شناسایی است.

✓ در بخش ساختمان شاه‌نشین غربی پل خواجه گنبدهایی وجود دارد که شکل و محل آنها در مقاطع حاصل از پروفیل‌های عبور داده شده از بالای آنها به خوبی و در مکان صحیح خود قابل مشاهده است.

✓ در بالای هر یک از گنبدهای ساختمان شاه‌نشین غربی، در مقاطع GPR حاصله، ساختارهای گنبدی شکلی دیده می‌شوند؛ که با فاصله‌ی یکسانی از گنبدهای اصلی قرار دارند. این مسأله فرضیه‌ای را به وجود می‌آورد که ساختارهای گنبدی شکل مذکور می‌توانند ناشی از گنبدهای احتمالی در ساختار داخلی پل باشند؛ که در حین ساخت پل پوشانده شده و در حال حاضر

قابل رؤیت نیستند. احتمال می‌رود که این ساختارهای گنبدی شکل نخست برای شکل دادن به گنبدها ساخته شده و پس از قرار دادن گنبدهای اصلی در جای خود، با مصالح پوشانده شده و غیر قابل رؤیت شده‌اند.

✓ در بررسی بافت پل نتیجه این بود که ستون‌هایی از پل که بازتاب قوی‌تری داشته‌اند، احتمالاً بافت متراکم‌تری نیز دارند.

✓ با بررسی شکستگی‌هایی که بر روی پل خواجه رخنمون داشتند، مشخص شد که بیشتر ترک‌های پل خواجه به صورت عرضی و عمود بر طول آن ایجاد شده است. این موضوع نشان دهنده‌ی نشست پل به علت باز و بسته شدن آب رودخانه‌ی زاینده‌رود و در پی آن تر و خشک شدن متوالی کف رودخانه می‌باشد.

✓ شکستگی‌ها در مقاطع GPR، بسته به شکل، میزان بازشدگی، جهت و گسترش آنها، خود را به شکل‌های مختلفی نشان می‌دهند. چون شکستگی‌هایی که بر روی سطح پل دیده می‌شوند؛ بازشدگی زیادی ندارند، لذا تغییرات زیادی ناشی از وجود این شکستگی‌ها در مقاطع GPR دیده نمی‌شود و تنها با اندکی تغییر در بازتاب موج GPR خود را نشان می‌دهند.

✓ با تشخیص شکستگی‌های سطحی بر روی مقاطع GPR و دنبال کردن آنها در عمق، می‌توان تا حدود زیادی روند و عمق نفوذ این دسته از شکستگی‌ها را تشخیص داد.

✓ با توجه به این که بیشتر ترک‌های پل با تغییر در دامنه‌ی موج GPR در مقطع خود را نشان می‌دهند، و تعمیم این مسأله به سایر قسمت‌های مقطع، می‌توان به محل احتمالی و همچنین عمق و گسترش شکستگی‌های داخلی پل پی برد.

✓ به علت وجود نوفه‌های گوناگون و ناهمگنی بسیار زیاد ساختار و مواد به کار رفته در ساخت

پل، تفکیک شکستگی‌ها از دیگر اجزاء پل بسیار دشوار است و شناسایی هر کدام از شکستگی‌های داخلی، احتمالی است.

✓ دیده نشدن تعداد زیادی از شکستگی‌های داخلی بر روی سطح پل نشان می‌دهد که این شکستگی‌ها در سطح پل در هر بار مرمت، با مصالح پوشانده شده‌اند.

۵-۲- پیشنهادها

با توجه به نتایج حاصل از این پایان‌نامه، می‌توان پیشنهادات زیر را برای ادامه‌ی کار توصیه نمود:

✓ پیش از شروع مطالعات بعدی بر روی پل خواجو، از روش لیزر اسکنر زمینی یا TLS برای بدست آوردن یک نقشه‌ی سه‌بعدی کامل و دقیق از پل استفاده شود.

✓ از دستگاه GPR دارای آنتن با فرکانس مرکزی بالاتر برای دستیابی به وضوح بیشتر تصویر و تعیین اهداف مورد نظر در عمق کم استفاده شود.

✓ از دو یا سه آنتن با فرکانس‌های مرکزی متفاوت استفاده شود و نتایج بدست آمده برای حصول اطمینان، با یکدیگر مقایسه گردد.

✓ داده‌های GPR در پروفیل‌های بیشتر و با فواصل کمتر برای ثبت تمامی بی‌هنجاری‌های موجود در پل خواجو برداشت شوند.

✓ در صورت امکان، داده‌ها بر روی یک شبکه‌ی منظم به روش سه‌بعدی برداشت شوند و یک مدل شبکه‌ی شکستگی سه‌بعدی از پل خواجو ایجاد شود.

منابع فارسی

احمدی ر، فتحیان پور ن، (۱۳۹۵)، "به کارگیری روش رادار نفوذی به زمین جهت مطالعات ژئوتکنیکی بنای تاریخی سی‌وسه پل اصفهان"، *مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران*، جلد نهم، شماره ۱ و ۲، ص ۸۵-۱۰۲.

امیرشاه کرمی ع، (۱۳۸۵)، "بازخوانی مهندسی پل خواجه"، *فصل‌نامه‌ی گلستان هنر*، شماره ۲، دوره ۶، ص ۸۱-۹۴.

حامی ا، (۱۳۷۲)، "آبیایی و آبرسانی"، *مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن*، تهران.

حسینی م، (۱۳۸۸)، پایان‌نامه ارشد: "برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با نتایج ژئومغناطیس در منطقه مزبور"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

فرازمان س، عطارنژاد ر، (۱۳۸۵)، "معرفی ساروج و بررسی آن به عنوان ملات سازگار با محیط زیست"، *اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست*، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست. مروج تربتی خ، پورنادری ح، (۱۳۹۲)، "بررسی تداوم سنت‌های مؤثر در شکل‌گیری پل خواجه بر اساس مطالعه‌ی تطبیقی پل‌های تاریخی شهر اصفهان"، *باغ نظر*، شماره ۲۷، سال دهم، ص ۶۱-۷۰.

منابع انگلیسی

Annan A. P. (2001), "Ground penetrating radar workshop notes", Sensors and software Inc, Mississauga, ON, Canada.

Annan A. P. (2003), "GPR for infrastructure imaging", International Symposium (NDT-CE2003), Non-Deestructive Testing in Civil Engineering.

Annan A. P. (2011), “**Topographic Correction of GPR Data**”, sensors & software, Canada.

Awangku L.A.S. and Halim S. (2009) “Ground Penetrating Radar (GPR) for Subsurfacemapping: Preliminary result” **J .of Geoinformation Science.**, **9**, pp **45-62**.

Baker G. S., Jordan T. E. and Pardy J. (2007) “An introduction to ground penetrating radar (GPR).” **The geological society of America special papers**, **432**, pp **1-18**.

Baker G. S. and Jol H. M. (2007), “**Stratigraphic Analyses Using GPR**”, The Geological Society of America, Special Paper 432.

Conyers L.B. (2009) “**Ground-penetrating radar for landscape archaeology: Method and applications**” Department of Anthropology, University of Denver, Colorado, USA, pp **245-255**.

Conyers L.B. (2011), “**Ground-penetrating Radar Mapping of Non-reflective Archaeological Features**”, Department of Anthropology, University of Denver, Colorado, USA, pp **177-179**.

Daniels D. J. (2004), “**Ground penetrating radar**”, The Institution of Electrical Engineers, Londo, United Kingdom, pp **75-84**, and **455-460**.

Denis A., Huneau F., Hoerlé S. and Salomon A. (2009) “GPR data processing for fractures and flakes detection in sandstone” **J. of applied Geophysics**, **68**, pp **282–288**.

Dougherty M.E., Micheals P., Pelton J.R. and Liberty L.M. (1994) “Enhancement of ground penetrating radar data through signal processing” **J. of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP ‘94)**, Boston, USA, pp **1021–1028**.

Eder K., Reidler C., Mayer C.Leopold M. (2008) “Crevasse detection in Alpien areas using ground penetrating radar as a component for a mountain gulde system, The International Archives of the Photogrammetry” **Remote Sensing and Spatial Inf. Sci.**, **37**, pp **838-839**.

Elkarmoty M. Colla C., Gabrielli E., Kasmaeeyazdi S., Tinti F., Bonduà S. and Bruno

(2017) “Mapping and modelling fractures using ground penetrating radar for ornamental stone assessment and recovery optimization: Two case studies” **The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin**, **550**, **8**, **552**, **1**.

Fernandes F. M. C. P., (2006), PhD. thesis, “Evaluation of two novel NDT techniques: Microdrilling of clay bricks and Ground Penetrating Radar in masonry”, School of Engineering, University of Minho.

Fisher E., MCMechan G.A., Annan A.P. and Coswey S.W. (1992) “Examples of reverse-time migration of single-channel, ground penetrating radar profiles” **J. of Geophysics**, **57**, pp **577-586**.

Fisher C.S., Stewart R.R. and Jol, H.M. (1994) “Processing ground penetrating radar data.” **The 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR’94)**, Canada, pp **661-675**.

Gerlitz K., Knoll M.D., Cross G.M., Luzitano R.D. and Knight, R. (1993) “Processing ground penetrating radar data to improve resolution of near-surface targets” **J. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP’93)**, San Diego, USA. pp. **561-575**.

Giannopoulos A. (2005) “Modeling ground penetrating radar by GPRMax” **Construction and Building Materials**, **19**, pp. **775-762**.

Goodman D. (2014), “**GPR Methods for Archaeology**”, Geophysical Archaeometry Laboratory.

Goodman D. and Piro S. (2013) “GPR remote sensing in archaeology” **Springer Science & Business Media**, pp. **15-17**.

Grodner M. (2001) “Delineation of rockburst fractures with ground penetrating radar in the Witwatersrand Basin, South Africa” **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, **38**, pp. **885-891**.

Horstmeyer H., Gurtner M., Bucker F. and Green, A., (1996) “Processing 2-D and 3-D georadar data: Some special requirements”. **The Second Meeting of the Environmental**

and Engineering Geophysical Society, European section, Nantes, France.

<http://earth.google.com>

Jol H. M. (2009), “**Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**”, Oxford: Elsevier Science, pp **508**.

Jol H. M. and Bristow C. S. (2003) “GPR in sediments: Advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide in Ground penetrating radar in sediments” Bristow CS and Jol HM (Eds). Geological Society: London, **Special Publication 211**, pp **9-28**.

Kaidong A., (2018), Master thesis, “Ice Basement Mapping of Eisriesenwelt Cave with Ground Penetrating Radar” Technische Universitat Dresden, Faculty of Environmental Sciences, Institute for Cartography.

Kearey P. and Brooks M. (1991), “**An Introduction to Geophysical Exploration**”, Second edition, Blackwell science.

Knödel K., Lange G. and Voigt H.J. (2007), “**Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies**”, In. Blindow N., Eisenburger D., Illich B., Petzold H. and Richter, T. (Aut), Book part 4, Ground Penetrating Radar, pp **283-284**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kovin O. (2011) “Mapping of evaporite deformation in a potash mine using ground penetrating radar: Upper Kama deposit, Russia” **J. of applied Geophysics**, **74**, pp **131-141**.

Leopold M., Volkel J. and Heine K. (2006) “A ground-penetrating radar survey of late Holocene fluvial sediments in NW Namibian river valleys: characterization and comparison” **J. of Geological society**, **163**, pp **923-936**.

Leucci G. and Negri S. (2005) “High Resolution Ground Penetrating Radar Investigations in the Archeological Site of Cavallino (Lecce, Italy)” **Proceedings of 18th Annual Meeting “SAGEEP 2005”** Atlanta, Georgia., University of Lecce, Lecce, Italy.

Leucci G., Masini N., Persico R. and Soldovieri F. (2011) “GPR and sonic tomography for structural restoration: the case of the cathedral of Tricarico” **Journal of Geophysics and**

Engineering, 8, S76–S92.

Lrvine-Fynn T. D. L., Moorman B. J., Williams J. L. M., Walter F. S. A. (2006) “Seasonal changes in Ground penetrating radar signature observed at a polythermal glacier, Bylot Island, Canada” **Earth Surface processes and Landforms.**, **31, 7**, pp **892-909**.

Lu Y., Song W., Lu J., Wang X. and Tan Y. (2017) “An Examination of Soil Moisture Estimation Using Ground Penetrating Radar in Desert Steppe” **MDPI, Water**, **9, 7**, **521**.

Lubowiecka I., Arias A., Riveiro B. and Solla M. (2011) “Multidisciplinary approach to the assessment of historic structures based on the case of a masonry bridge in Galicia (Spain)” **Computers and Structures**, **89, J. of applied Geophysics**, pp **1615–1627**.

Maierhofer Ch. and Wostmann J. (1998) “Investigation of dielectric properties of brick materials as a function of moisture and salt content using a microwave impulse technique at very high frequencies” **NDT&E International**, **31, 4**, pp **259-263**.

Mancilla O. L. and Trevifio E. G. (1996) “Synthetic radargrams from electrical conductivity and magnetic permeability variations” **J. of Applied Geophysics.**, **34**, pp **283-290**.

Masini N. Persico, R. and Rizzo E. (2010) “Some examples of GPR prospecting for monitoring of the monumental heritage” **Journal of Geophysics and Engineering**, pp **190-199**.

Neal A. (2004) “Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: principles, problems and progress” **Earth-science reviews**, **66**, pp **261-330**.

NDT Systems, (2014), “**Germann Instruments: Test smart-Build right**”, Catalog NDT 2014, Bridging NDT Theory and Practice.

Nobes D.C. (1999) “Geophysical surveys of burial sites: A case study of the Oaro urupa” **J.of Geophysics**, Vol. **64**, No. **2**, pp **357–367**.

Olhoeft G. R. (1998) “Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance: proceedings of GPR” **98, seventh international conference on Ground Penitrating Radar**, University of Kansas, pp **177-182**.

Olhoeft, G. R. (2000) “Maximizing the information return from ground penetrating radar” **J. of applied Geophysics**, Vol. **43**, pp **175–187**.

Onishi K., Tokunaga T., Sugimoto Y., Yamada N., Metwaly M., Mogi K., Shimoda I. and Iwasaki Y. (2014) “Identifying damaged areas inside a masonry monument using a combined interpretation of resistivity and ground-penetrating radar data”, **Exploration Geophysics**, **45**, pp **177–188**.

Orlando L., Pezone A. and Colucci A. (2009) “Modeling and testing of high frequency GPR data for evaluation of structural deformation” **NDT&E International**, **43**, pp **216–230**.

Packard H. (1992), “**Basic of mesuring the dielectric properties of materials**”, Application note **1217-1**.

Parasnis D. S. (1997), “**Principles of applied geophysics**”, 5th edition, Chapman and Hall.

Pérez J. P. C., Blasco J. J. S., Atkinson A. D. J. and Pérez L. M. R. (2018) “Assessment of the Structural Integrity of the Roman Bridge of Alcántara (Spain) Using TLS and GPR” **J. of Remote Sens.**, **10**, **387**.

Pipan M., Baradello L., Forte E. and Prizzon A. (2000) “GPR Study of Bedding Planes, Fractures and Cavities in Limestone” **In Eighth intl. Conference an Ground Penetrating Radar**, University of Trieste, Department of Geological, Environmental and Marine Sciences via Weiss **1**, **34127** Trieste, Italy.

Porsani J. L., Sauck W. A. and Ju´nior A. O. S. (2006) “GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil” **J. of applied Geophysics**, **58**, pp **177– 187**.

Powers M.H. (1997) “Modeling frequency-dependent GPR”, **The Leading Edge (Tulsa OK)**, **16**, no.11, pp **1657-1662**.

Reynolds J. M. (1997), “**An introduction to applied end environmental geophysics**”, John Wiley & Sons Ltd, pp **710**.

Rowell C., (2011), B.S. thesis, “Geophysical Analysis of Structures and Flow Geometry

of the Blue Dragon Lava Flow, Idaho, USA”, Department of Geoscience Calgary, Alberta.

Saaranketo T. (1998) “electrical peroperties of water in caly and silty soils” **J. of applied Geophysics**, v. **40**, pp **73-78**.

Sandmeier K. J., (2016), “**ReflexW manual**”, Sandmeier Scientific Software.

Sandmeier K. J., (2017), “**Sandmeier Geophysical Research**”.

Sensors and software, (2001), “**Win_EKKO User’s Guide**”, Version 1.0.

Sensors and software, (2016), “**Noggin user’s guide**”.

Sensors and software (2017), “**EKKO-project user’s guide**”, Processing Module.

Seren A. and Acikgoz A. D. (2012) “Imaging fractures in a massive limestone with ground penetrating radar, Hayamana, Turkey” **Karadeniz Technical University**, Department of Geophysics, 61080 Trabzon, Turkey.

Sheets P. D., Loker W. M., Spetzler H. A. W. and Ware R. W., (1985) “Geophysical Exploration for Ancient Maya Housing at Ceren, El Salvador.” National geographic research reports **20**, pp **645-656**.

Solla M., Lorenzo H., Rial F.I. and Novo A. (2011) “Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools” **Construction and Building Materials**, **29**, Department of Natural Resources & Environmental Engineering, University of Vigo, A Xunqueira, 36005 Pontevedra, Spain, pp. **458–465**.

Solla M., Riveiro B., Lorenzo H. and Armesto J. (2014) “Ancient Stone Bridge Surveying by Ground-Penetrating Radar and Numerical Modeling Methods” **J. Bridge Eng.**, **19**, pp **110-119**.

Sonkamble S., Satishkumar V. and Amarender B. (2013) “Combined ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity applications exploring groundwater potential zones in granitic terrain” **Arab J Geosci**, Saudi Society for Geosciences.

Telford W. M., Geldart L.P. and Sheriff. R. E. (1990), “**Applied Geophysics**”, Cambridge university press, pp. **284-286**.

Ulaby F.T. (2001), “**Fundamentals of applied electromagnetics**”, Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall.

GSSI. (2016), “**Utility Scan User's Guide**”, The Utility Scan 350HS is a GPR concrete scanner User Manual Survey System.

V. HIPPEL A. R. (1954), “**Dielectrics and waves. M. I. T. Press**”, Cambridge, Massachusetts.

Van Overmeeren R. A. (1994), “**Georadar for hydrogeology**”, first break, **8**, PP **401-408**.

Vickers R. S., Dolphin L. T. and Johnson D., (1976) “Archaeological investigations at Chaco Canyon using subsurface radar. In remote sensing experiments in cultural resource studies” **University of New Mexico**, pp **81-101**.

Warren C., (2009), PhD. Thesis, “Numerical Modelling of high-frequency ground penetrating radar antennas”, Doctor of Philosophy the University of Edinburgh.

Young R.A., Deng Z. and Sun J. (1995) “Interactive processing of GPR data” **The Leading Edge**, pp **275–280**.

Abstract

Among various geophysical methods, the GPR method by having higher resolution can better reveal a variety of subsurface anomalies at shallow depths. These subsurface targets are detectable by GPR method, subject to having a good contrast in electromagnetic characteristics with their surrounding medium. In this regard, the GPR method was used to investigate the internal fractures of Khaju Bridge in Isfahan, as well as determination of its composition and texture. Another reason of using this method is its non-destructive nature, which makes it harmless to this precious monument.

The main goals of this thesis are to identify internal fractures as well as their trends and extensions, and to investigate the texture and materials used in the construction of the Khaju Bridge using the GPR method. Moreover in this thesis, geometry and structure of the Khaju Bridge have been studied. By achieving different lengths of GPR profiles and processing and interpretation of the GPR data in this study, we have been trying to achieve all those goals.

The geometry and structure of the bridge were clearly and accurately detected by the GPR sections. There were also internal hyperbolic shapes into the ceiling of the Shahneshtin building, which were not visible. The observation of all the pillars affects all the GPR sections passing the floor of the Khaju Bridge, has also led to the hypothesis that the bridge pillars have been first built in a blade shape and then, the other Parts of the bridge have been built on those pillars. The kinds of the materials used in the construction of the bridge using the method of hyperbola fitting was determined which were proved to be correct with good accuracy. The internal texture of the bridge was examined and it was found that in parts of the sections where the reflections were stronger, the texture was probably more compact.

By comparison the fractures outcropped on the bridge with the GPR sections obtained, it is concluded that the fractures in these sections show themselves with a change in the GPR wave amplitude. This was used to identify the probable internal fractures of the bridge and their trends and extensions. The probable spreading of the outcropped fractures was also investigated. Indeed, due to the complexity of the materials used in the bridge structure and the existence of noise, it is difficult to identify and segregate fractures from other internal components of the bridge.

In general, by examining the different sections of GPR profiles in the Khaju Bridge, it is concluded that the GPR method can be used to achieve the goals mentioned above and has an appropriate response to these goals.

Keywords: Ground penetrating radar (GPR), Khaju Bridge, Composition, Texture, Geometry, Fracture



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Geoelectrics

Recognition of the composition, texture and internal fractures of Khaju Bridge
using GPR method

By: Zahra Omid

Supervisors:

Dr. Abolghasem Kamkar Rouhani

Dr. Alireza Arab Amiri

Advisor:

Dr. Fariba Saeedi Anaraki

September 2018