

## مطالعات ژئوتکنیکی جهت شناسایی نقاط ضعف پی سنگ صحن مسجد امام اصفهان با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین

رضا احمدی\*<sup>۱</sup>، نادر فتحیانپور<sup>۲</sup> و ادیبه کریمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

<sup>۳</sup> دانش آموخته دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

(دریافت: ۹۴/۱۰/۲۹، پذیرش: ۹۷/۷/۷، نشر آنلاین: ۹۷/۷/۷)

### چکیده

روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR) از طریق ارسال امواج الکترومغناطیسی با فرکانس زیاد (عموماً در محدوده یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز) به درون زمین و ثبت امواج بازتابی عبوری از محیط‌های دی‌الکتریک کم‌اتلاف، تصاویر زیرسطحی با تفکیک‌پذیری بسیار بالا ارائه می‌کند. در پژوهش حاضر از این روش غیرمخرب به عنوان یک روش تصویربرداری مناسب، با هدف تعیین محل، میزان گسترش عرضی و عمقی پی سنگ‌های احتمالاً نواری دیوارها و ستون‌ها و شناسایی نقاط ضعف آنها در محدوده‌های صحن اصلی (ایوان جنوبی) و سه ایوان دیگر (شرقی، غربی و شمالی) مسجد امام اصفهان استفاده شده است. برای این منظور با استفاده از یک سیستم GPR مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، تعداد ۳۸ پروفیل بر روی شبکه‌های متعامد، طراحی و برداشت گردید. تفسیر نگاشت‌های راداری نشان داد که بیشترین حجم پی‌سنگ‌های به کار گرفته شده در صحن اصلی مسجد، از نوع نواری، دارای عرض کمتر از یک متر و واقع در عمق نیم متری و زیرسازی دیوارهای شرقی صحن اصلی، دارای پی‌های سنگی پهن به عرض ۵/۵ متر و از عمق ۳۰ سانتی‌متری تا عمق حدود ۱/۲ متری می‌باشند. نشست‌های متعدد مشاهده شده در ایوان‌های شرقی و غربی نیز به‌ندرت از ۲۰ سانتی‌متر تجاوز می‌کنند. نتایج این تحقیق به منظور تهیه طرح بازسازی، مرمت و نگهداری این بنای بسیار ارزشمند فرهنگی، تاریخی و باستانی توسط سازمان میراث فرهنگی به عنوان متولی امر مربوطه، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** رادار نفوذی به زمین (GPR)، مسجد امام اصفهان، روش غیرمخرب، پروفیل GPR، پی‌های نواری.

### ۱- مقدمه

خطرناک دارد. بنابراین یکی از معایب استفاده از پرتونگاری و فرآیندهای مربوطه آن است که قرار گرفتن انسان در معرض پرتو می‌تواند منجر به آسیب بافت بدن شود.

روش رادار نفوذی به زمین (GPR) که قابلیت ارائه تصاویر زیرسطحی با تفکیک‌پذیری بالا از محیط‌های دی‌الکتریک کم-اتلاف را دارد، یک روش جدید، مفید و بسیار قدرتمند برای آزمون غیرمخرب دیوارهای حائل و ساختمان‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، کف‌پوش‌ها، جاده‌ها، خطوط راه‌آهن، خطوط لوله، خطوط تونل، بزرگراه‌ها، زیرسازی‌ها، لوله‌های فاضلاب و انواع لوله‌های تأسیساتی دیگر و مصنوعات دست‌ساز بشر همانند بتن، آسفالت، میلگرد، آجر و غیره است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Heiler و همکاران، ۱۹۹۵؛ Huston و همکاران، ۲۰۰۰؛ Saarenketo و Scullion، ۲۰۰۰؛ Annan و همکاران، ۲۰۰۲؛ Benedetto و Benedetto، ۲۰۰۲).

بسیاری از تصمیم‌گیری‌های مهندسی باید براساس ارزیابی‌های غیرمخرب (NDE) صورت گیرند. به علاوه این ارزیابی‌ها نیز بایستی بر پایه یک معیار مهندسی قابل قبول، استوار باشند. به‌هر جهت به کارگیری هر یک از سیستم‌های بازرسی، متحمل مقداری هزینه است اما یکی از فواید بدیهی و روشن به کارگیری صحیح آزمون‌های غیرمخرب، شناسایی نواقصی است که اگر در محیط، ناشناخته باقی بمانند موجب رخ داد حوادث و در نتیجه بروز خسارت‌های مالی و جانی فراوان خواهند شد. در عمل آزمون‌های غیرمخرب بسته به هدف و نوع کاربرد، به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرند. در گذشته فناوری پرتونگاری اشعه ایکس یک تصویر فوتوگرافیک از درون ساختار ایجاد می‌کرد اما این روش نیاز به دسترسی به دو پهلوی ساختار و نیز استفاده از منابع اشعه X

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۸۶۳۳۶۷۵۶۰۴

که  $B$  پهنای باند و  $f_c$  فرکانس مرکزی آنتن می‌باشد. میان تفکیک-پذیری، عمق تجسس و فرکانس مرکزی پالس‌های GPR ارتباط وجود دارد، به گونه‌ای که با افزایش فرکانس مرکزی، تفکیک‌پذیری افزایش و عمق تجسس کاهش می‌یابد. کاهش فرکانس مرکزی سیستم رادار، تأثیر مهمی روی افزایش عمق نفوذ سیستم رادار دارد. دلیل این امر آن است که هرچه فرکانس مرکزی کاهش یابد تضعیف سیگنال در محیط کم می‌شود. از طرف دیگر با افزایش فرکانس مرکزی یا پهنای باند وسیع‌تر، تفکیک‌پذیری رادار افزایش می‌یابد. بنابراین هدف سیستم‌های GPR دست‌یابی به یک نسبت پهنای باند به فرکانس مرکزی (R) در حدود ۱ یا حداکثر میزان تفکیک‌پذیری می‌باشد. اصول روش GPR، امواج مختلف منتشره و پاسخ سیستم GPR به صورت یک نگاشت راداری دوبعدی برای یک بازتابنده افقی در شکل (۱-الف) و برای یک فونداسیون قدیمی در شکل (۱-ب) نشان داده شده است.

### ۳- مطالعه پی‌های سنگی در محدوده مسجد امام اصفهان

#### ۳-۱- موقعیت جغرافیایی، تاریخچه و معماری مسجد امام

مسجد امام اصفهان (یا شناخته شده با سایر نام‌های دیگر نظیر مسجد شاه، جامع عباسی، سلطانی جدید، مهدیه و المهدی) از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین ابنیه‌های مذهبی و تاریخی ایران است. این مسجد که شاهکاری هنری مربوط به دوره صفوی و قرن یازدهم هجری است با طول جغرافیایی  $51/678$  درجه شرقی و عرض جغرافیایی  $32/655$  درجه شمالی، در مرکز شهر اصفهان و در ضلع جنوبی میدان نقش جهان واقع شده است. شکل (۲) تصویر ماهواره‌ای میدان نقش جهان اصفهان و مسجد امام واقع در ضلع جنوبی آن را نشان می‌دهد.

مسجد امام و مجموعه‌های پیرامون آن، محدوده‌ای به ابعاد تقریبی  $140$  در  $110$  متر را در بر گرفته و جزء شاهکارهای هنر معماری و آثار باستانی ارزشمند کشور محسوب می‌شود. نکته جالب توجه در معماری این مسجد آن است که بخش‌های گوناگون آن در طول نزدیک به دو هزار سال، شکل گرفته‌اند و طی این سال‌ها همواره در حال مرمت و بازسازی بوده است. این مسجد دارای یک حیاط مرکزی، دو مدرسه به نام‌های ناصریه و سلیمانیه و چهار ایوان به نام‌های ایوان جنوبی (صحن اصلی)، ایوان شرقی، ایوان غربی و ایوان شمالی می‌باشد. شکل (۳) نقشه مسجد امام اصفهان همراه با نمایش بخش‌های مختلف آن می‌باشد.

#### ۳-۲- روش‌شناسی جهت بررسی‌های ژئوفیزیکی

پیرو درخواست سازمان میراث فرهنگی استان اصفهان در خصوص بررسی وضعیت پی‌سنگ صحن اصلی و ایوان‌های مسجد، به منظور تهیه طرح بهسازی، مرمت و تعمیرات لازم، طرح مطالعات ژئوفیزیکی سایت فوق مطرح گردید. به منظور حفظ این

Geraads و همکاران، ۲۰۰۲؛ Ranalli و همکاران، ۲۰۰۴؛ Lorenzo و همکاران، ۲۰۱۰؛ Solla و همکاران، ۲۰۱۲؛ Ahmadi و همکاران، ۲۰۱۵).

این روش غیرمخرب قادر به شناسایی و به‌نقشه درآوردن جزئیات زیرسطحی، بدون نیاز به مغزه‌گیری یا ایجاد شکستگی و تغییر در محیط بوده و نتایج برداشت، به آسانی به صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند. امروزه روش GPR به علت سرعت عمل بالا، هزینه نسبتاً پایین و نتایج مطلوب، به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب، از قابلیت اعتماد و کارایی بالایی برخوردار است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Bungey و همکاران، ۱۹۹۱؛ Lai و Tsang، ۲۰۰۶؛ Xingxin و همکاران، ۲۰۱۰).

یکی از جذاب‌ترین کاربردهای GPR مطالعات میراث فرهنگی و بناهای تاریخی به منظور حفاظت و نگهداری از آنها و انجام مرمت‌ها و بازسازی‌های دوره‌ای مورد نیاز می‌باشد. معمولاً بناهای تاریخی، ترکیب نسبتاً پیچیده‌ای از انواع مصالح مختلف شامل سنگ‌ها، خشت‌ها، آجرها و نیز سازه‌های چوبی و آهنی عمدتاً واقع در درون پی‌ها، دیوارها و فضاها خالی، به عنوان رابط می‌باشند. شناخت جزئیات درونی بناهای تاریخی، نوع فونداسیون، تعیین عمق پی‌ها و ضخامت دیوارها، شناسایی موقعیت گسیختگی‌ها، درزه و شکاف‌ها و شکستگی‌ها، وضعیت نشست‌ها و بهم‌ریختگی‌ها، اطلاعات بسیار سودمندی برای استحکام بخشیدن به بنا، و کلید بازسازی و نگهداری آنهاست. هدف از مطالعه حاضر تعیین محل، میزان گسترش جانبی و عمقی و شناسایی نقاط ضعف پی‌های احتمالاً نواری در محدوده‌های صحن اصلی و ایوان‌های بنای فرهنگی-تاریخی مسجد امام اصفهان با استفاده از روش GPR می‌باشد.

#### ۲- اصول و مبانی روش GPR

یک سیستم GPR سیگنال‌های الکترومغناطیسی (EM) با فرکانس بالا را از طریق فرستنده ارسال کرده و نحوه رفتار میدان الکترومغناطیسی با محیط پیرامون را از طریق گیرنده، آشکار می‌کند. پایه و اساس GPR اندازه‌گیری مدت زمانی است که سیگنال از فرستنده منتشر شده و بعد از بازتاب، به گیرنده باز می‌گردد (شکل (۱-الف)). متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنه سیگنال امواج الکترومغناطیسی بازتابی، در مقابل زمان تأخیر است که رد (تریس) نامیده می‌شود. دستاورد یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مجموعه‌ای از تریس‌ها در کنار یکدیگر بوده که یک تصویر دوبعدی است و به نام تصویر GPR یا نگاشت راداری نامیده می‌شود (شکل (۱)).

پالس‌های GPR مطابق رابطه (۱) با نسبت پهنای باند بر فرکانس مرکزی مشخص می‌شوند:

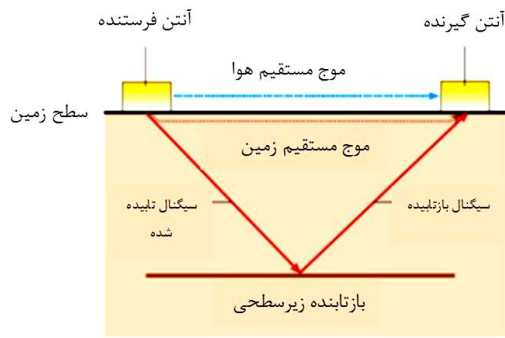
$$R = \frac{B}{f_c} \quad (1)$$

شرقی، ۴ پروفیل در ایوان غربی و ۱۱ پروفیل در ایوان شمالی و در مجموع تعداد ۳۸ پروفیل با طول حداقل و حداکثر به ترتیب برابر با ۶ و ۷۳/۵ متر، طراحی و برداشت گردید. میزان سرعت سیر امواج EM در محیط نیز براساس تخمین مشخصات فیزیکی خاک زیرسطحی نظیر دانه‌بندی، درصد رطوبت و میزان رس، به‌طور متوسط ۰/۱ m/ns منظور گردید.

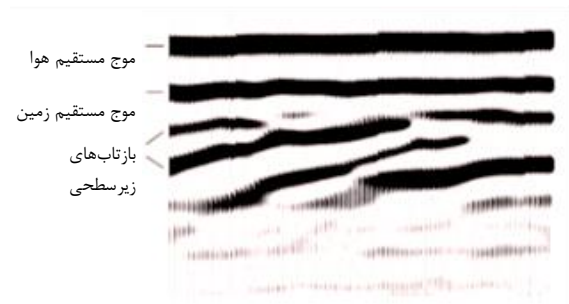
بنای فرهنگی- تاریخی، لازم است که نقشه توزیع مکانی پی- های احتمالاً نواری دیوارها و ستون‌های صحن اصلی و ایوان- های مسجد تهیه گردد. برای این منظور روش GPR مناسب‌ترین روش ژئوفیزیکی غیرمخرب شناخته شد.

۳-۲-۱- سیستم برداشت و نحوه جمع‌آوری داده‌های GPR

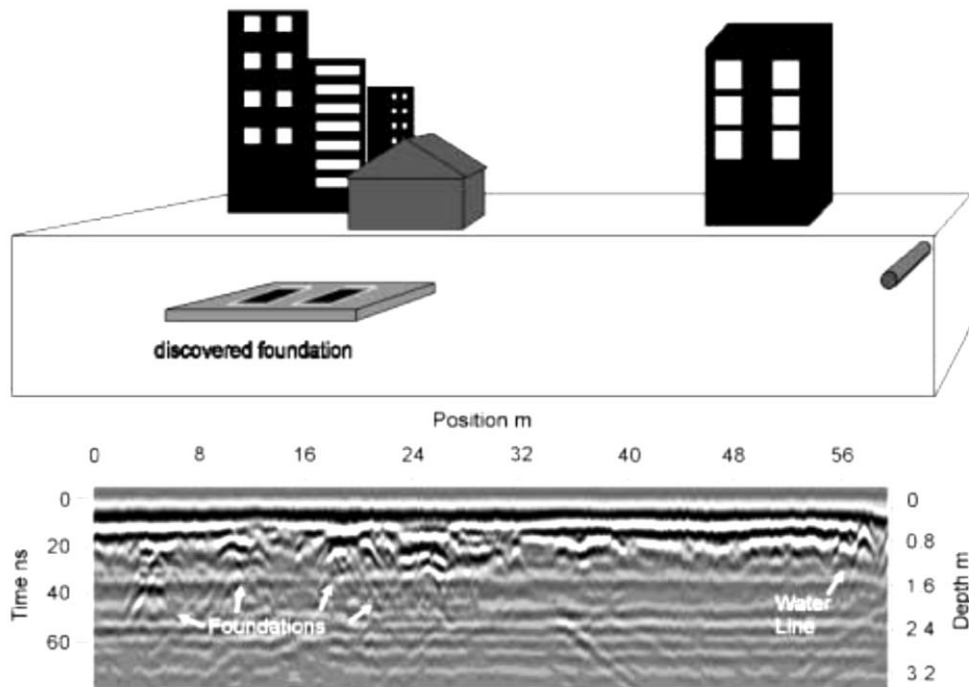
براساس برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته در سطح محدوده مورد مطالعه، تعداد ۱۶ پروفیل در ایوان جنوبی، ۷ پروفیل در ایوان



(ب)



(الف)

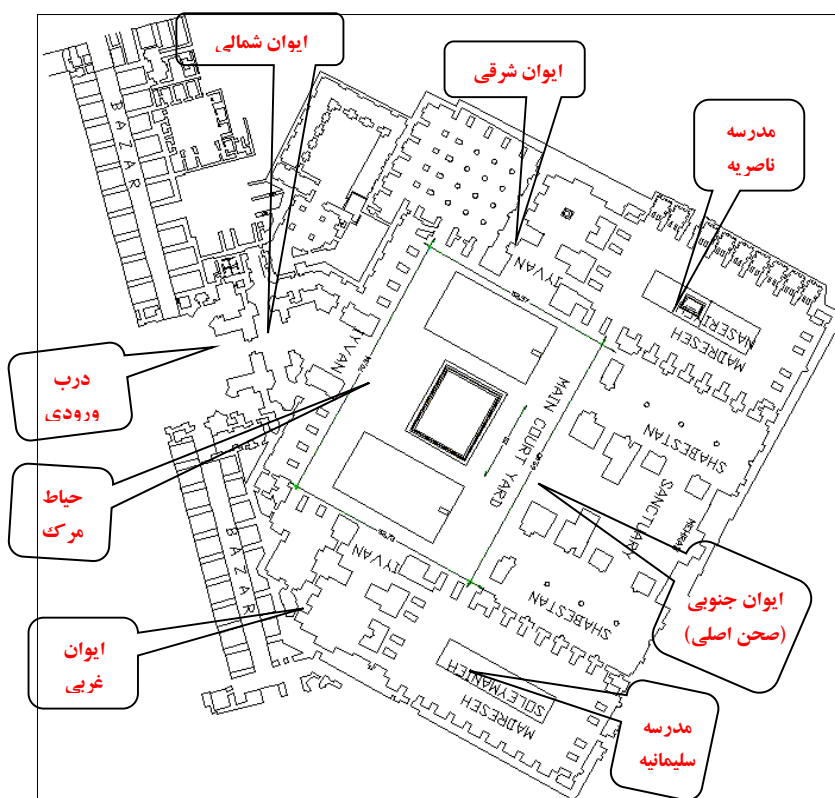


(ج)

شکل ۱- الف) اصول روش GPR و نمایش امواج مختلف منتشره (Bakker و همکاران، ۲۰۰۷)، ب) شکل طرح‌وار از فونداسیون یک بنای قدیمی و ج) پاسخ سیستم GPR مربوط به آن (Annan، ۲۰۰۱)



شکل ۲- تصویر ماهواره‌ای میدان نقش جهان اصفهان و مسجد امام واقع در ضلع جنوبی آن (دید به سمت شمال)



شکل ۳- نقشه مسجد امام اصفهان همراه با نمایش بخش‌های مختلف آن (ویرایش شده از نقشه‌های مسجد امام تهیه شده توسط سازمان میراث فرهنگی استان اصفهان)

رانه دستگاهی، ناپایداری الکترونیکی، کابل‌ها، عدم جفت-شدگی آنتن‌ها به زمین و تغییرات در شکاف هوایی می‌توانند موجب پرش‌هایی در زمان اولین رسید موجک هوا-زمین شوند که معمولاً به‌عنوان نقطه زمان-صفر شناخته می‌شود. قبل از اعمال مراحل پردازشی، باید ردها با یک موقعیت زمان-صفر مشترک تعدیل شوند.

واو به‌وسیله اشباع سیگنال ثبت شده با رسیدهای اولیه (مثلاً موج زمین-هوا) و یا اثرات جفت‌شدگی القایی ایجاد می‌شود و نحوه پردازش، حذف روند سیگنال بسامد خیلی پایین از داده-هاست که برای تصحیح مؤثر آن به یک فیلتر بالاگذر بهینه نیاز می‌باشد. مثلاً برای یک آنتن با بسامد مرکزی ۲۵۰ MHz حدود ۵ MHz یعنی حدود یک پنجاهم بسامد مرکزی است. این گام اغلب دی‌واو کردن داده‌ها نامیده می‌شود.

برای حذف انتقال جریان مستقیم یا مؤلفه DC، میانگین سیگنال باید به میانگین سطح صفر، کاهش پیدا کند. برای حذف لکه‌های موجود در نگاشت راداری، اعمال یک فیلتر میان‌گذر همانند باترورث با پهنای باند از ۰/۵ تا ۱/۵ برابر بسامد مرکزی، مناسب است. مثلاً برای پیک بسامد ۲۵۰ MHz محدوده ۴۰۰-۱۰۰ MHz انتخاب می‌شود.

فیلتر تفریق متوسط، میانگین تعدادی رد را از ردهای مجزا کم می‌کند. این فیلتر رخ داده‌های افقی را تضعیف و رخ داده‌های شیب‌دار را تقویت می‌نماید.

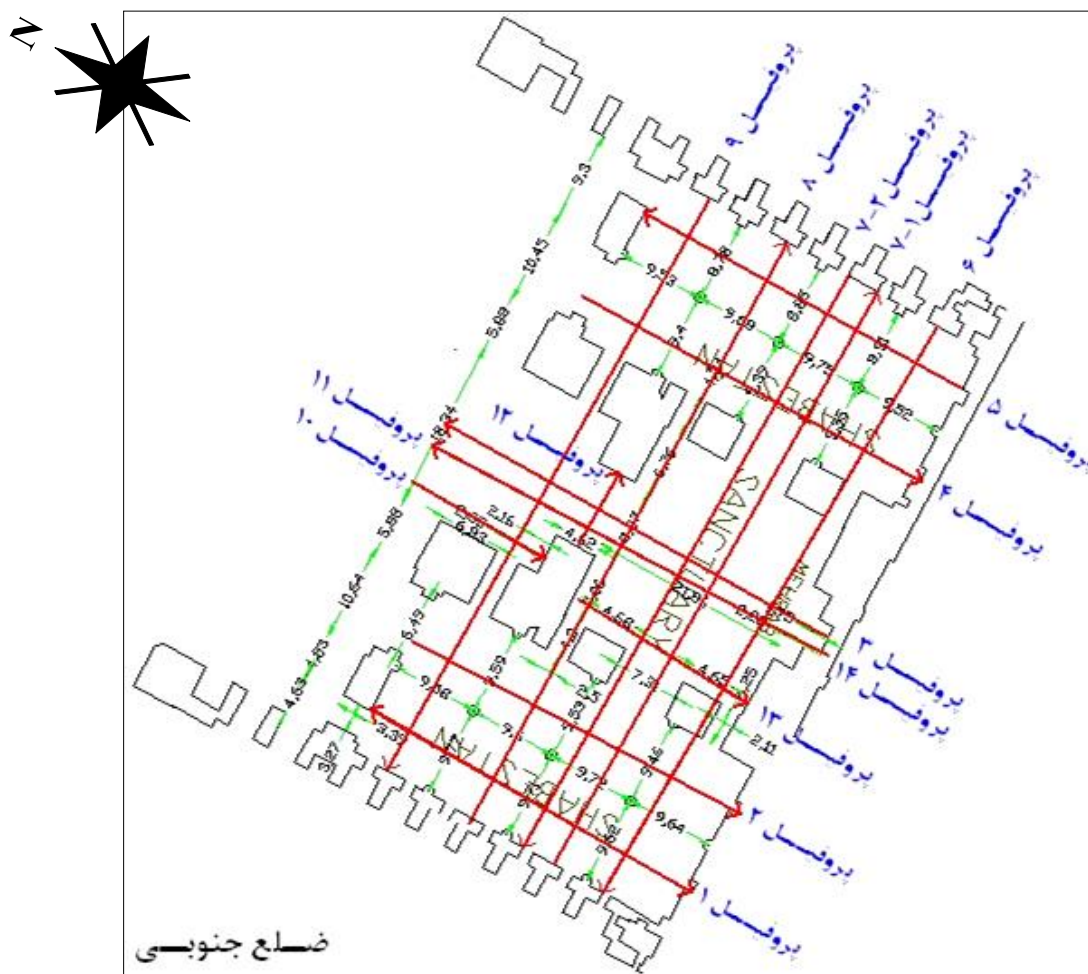
حذف زمینه نیز یکی از متداول‌ترین عملیات‌های پردازشی کاربردی ویژه داده‌های GPR است که پس از میانگین‌گیری تمام ردها یا تعداد مشخصی رد در یک مقطع، آن را از هر رد، کم می‌کند. فیلتر بسیار مفیدی برای مواد نسبتاً پراتلاف (خاک‌های مرطوب)، حذف نوفه زمینه و نوفه حلقوی شدن در داده‌ها بوده، اما می‌تواند بازتابنده‌های افقی سطح پیوسته را نیز حذف کند. گفتنی است که نوفه حلقوی شدن در GPR به‌صورت یک سری رخ داده‌های افقی دارای پیوستگی و تناوبی ظاهر می‌شود. پالس‌های GPR با انتشار به درون زمین به‌سرعت تضعیف می‌شوند. به علت تضعیف سیگنال و نیاز به افزایش حضور رسیدهای آخر، تقویت-های زمانی مورد نیازند. برای تقویت داده‌های راداری، انواع مختلفی از توابع تقویت، همانند تقویت خطی، نمایی و کروی (SEC) و خودکار (AGC) وجود دارد که ویژگی‌های هر یک با دیگری متفاوت است.

موقعیت و فواصل بین پروفیل‌های GPR براساس موقعیت احتمالی پی‌سنگ دیوارها و ستون‌ها در دو امتداد عمود بر هم (به موازات و عمود بر امتداد پی‌های نواری احتمالی)، طراحی و برداشت گردید. شکل‌های (۴) تا (۷) به ترتیب نقشه ایوان‌های جنوبی، شرقی، غربی و شمالی مسجد امام را همراه با موقعیت پروفیل‌های برداشت GPR بر روی آنها نشان می‌دهند.

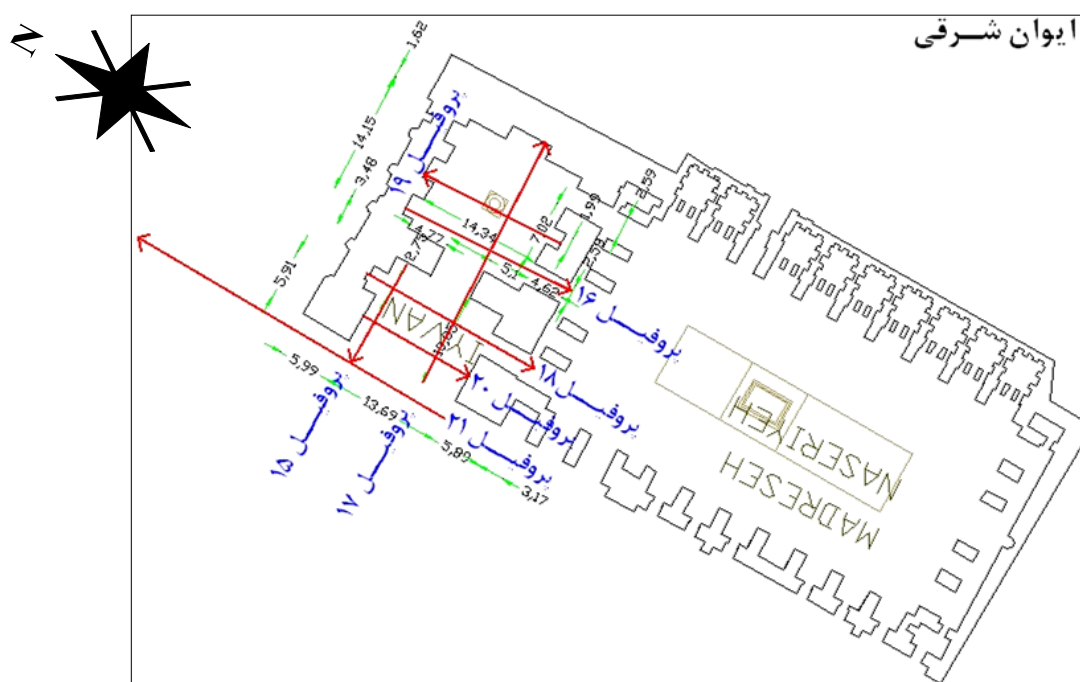
عملیات برداشت GPR در محدوده مورد مطالعه، با استفاده از یک سیستم GPR ساخت شرکت مالا مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، با روش پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت تک‌حالتی انجام شد. در حالت ایده‌آل (محیط زمین‌شناسی معمولی بدون حضور مواد هادی الکتریکی) سیستم GPR مجهز به آنتن با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، دارای تفکیک‌پذیری در حدود ۱۰ سانتی‌متر و حداکثر میزان عمق نفوذ در حدود ۱۰ متر است (www.malags.com) و در مورد محیط‌های زمین‌شناسی متداول، دارای حداکثر عمق تجسس (اکتشاف) در حدود ۸ متر و میزان تفکیک‌پذیری در حدود ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد (Annan, ۲۰۰۱).

### ۳-۲-۲- پردازش و تفسیر داده‌های GPR

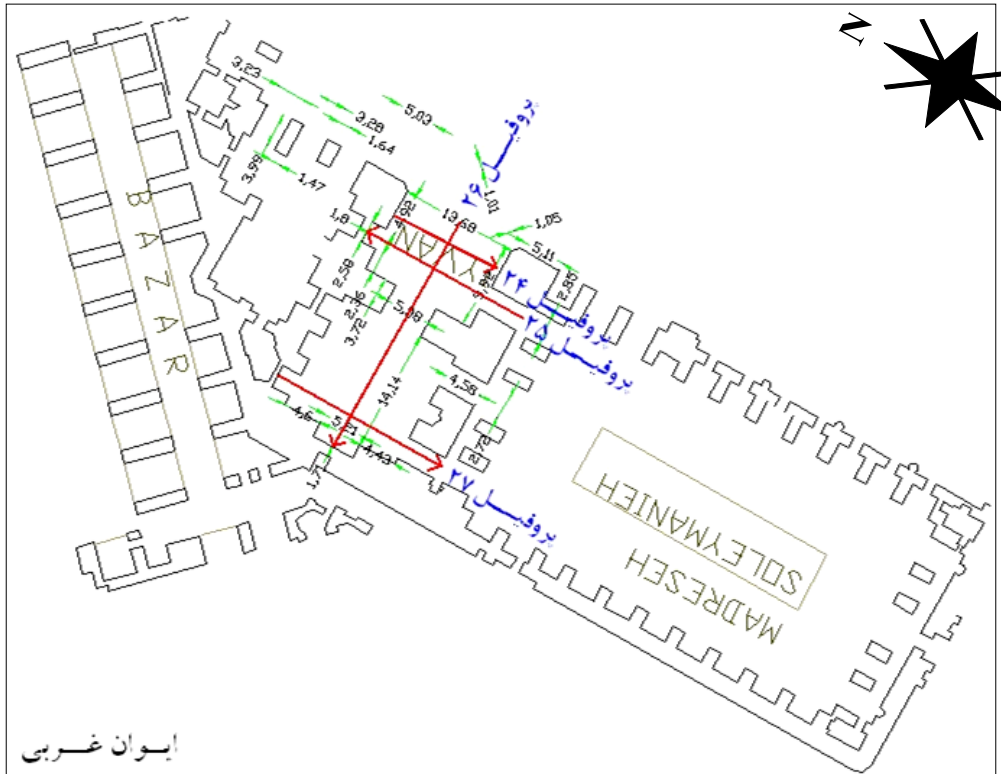
داده‌های خام GPR شامل تمام اطلاعات اولیه می‌باشند و هدف استخراج اطلاعات مطلوب پنهان در آنهاست. در عمل این کار به معنی افزایش نسبت سیگنال به نوفه و ارائه داده‌ها به‌صورتی است که بتوانند شرایط زیرسطحی را به طور دقیق نمایان کنند. برای بهبود کیفیت داده‌های خام و در نتیجه ساده‌تر کردن تفسیر، باید گام‌های پردازشی مناسب برداشته شوند. به منظور پردازش، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، از نرم‌افزارهای Ground Vision (نسخه ۱، ۴، ۶) و Radexplorer (نسخه ۱، ۴، ۱) استفاده شد. نرم‌افزار اول برای نمایش نگاشت‌های راداری و نرم‌افزار دوم برای انجام تصحیحات و پردازش‌های مورد نیاز به کار می‌رود. مهم‌ترین عملیات‌های پیش‌پردازش و پردازشی اعمال شده بر روی داده‌ها جهت ارائه مقاطع نهایی، شامل تصحیح زمان صفر، فیلتر دی‌واو (حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده‌ها)، حذف شیفت جریان مستقیم، اعمال فیلترهای میان‌گذر از جمله باترورث، حذف متوسط، حذف زمینه و انواع تقویت دامنه امواج بازگشتی با عمق می‌باشد.



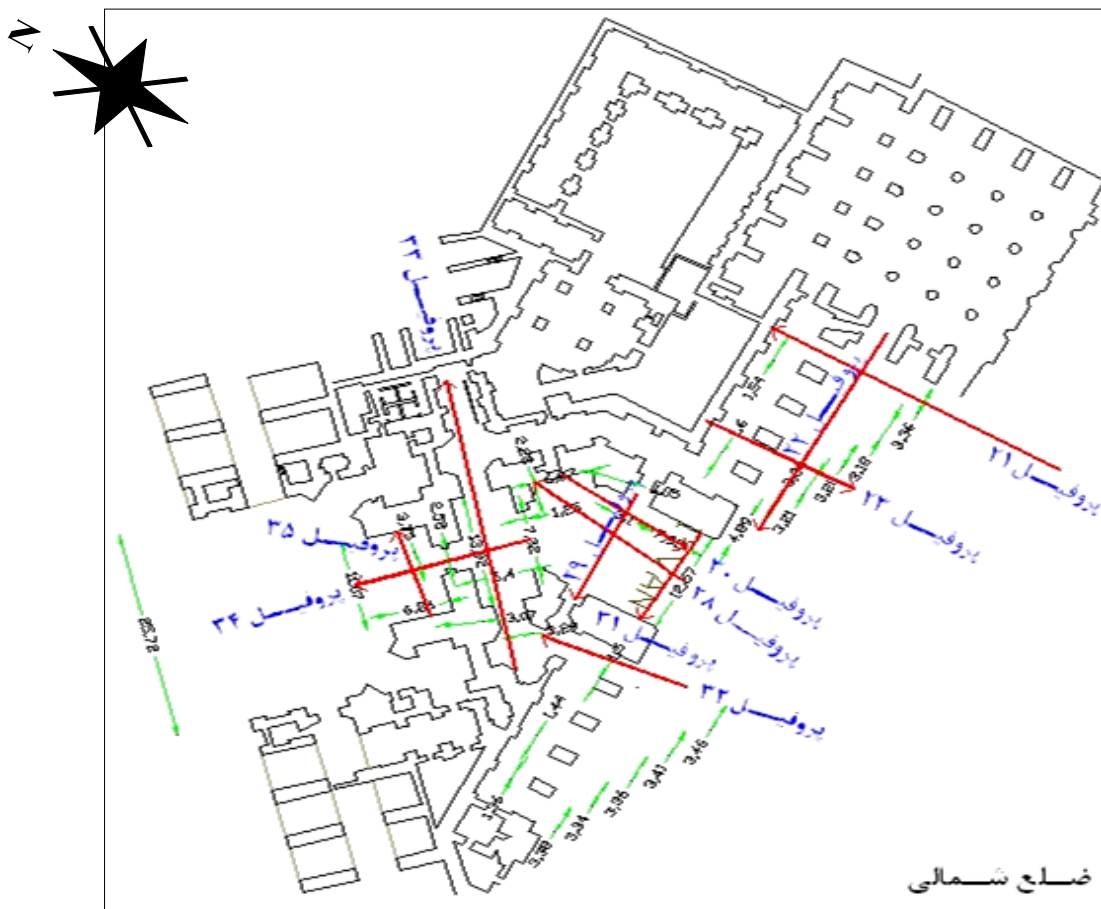
شکل ۴- نقشه ایوان جنوبی مسجد امام و موقعیت پروفیل‌های برداشت GPR (خطوط قرمز رنگ) بر روی آن



شکل ۵- نقشه ایوان شرقی مسجد امام، خطوط قرمز رنگ، موقعیت پروفیل‌های برداشت GPR می‌باشند



شکل ۶- نقشه ایوان غربی مسجد امام. خطوط قرمز رنگ، موقعیت پروفیل‌های برداشت GPR می‌باشند



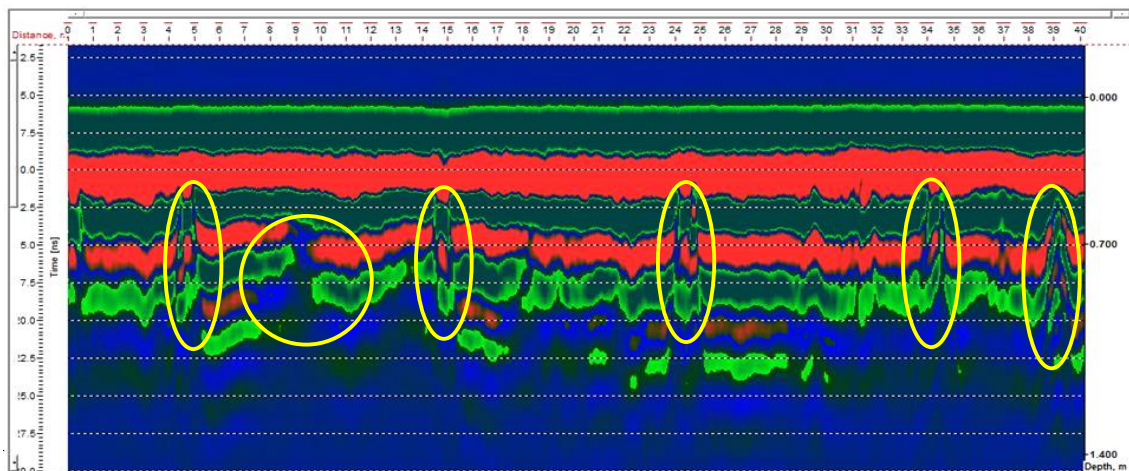
شکل ۷- نقشه ایوان شمالی مسجد امام. خطوط قرمز رنگ، موقعیت پروفیل‌های برداشت GPR می‌باشند

قابل توجهی در دامنه و فاز آن مشهود نیست و بازتاب غیرنرمالی وجود ندارد. در ۹ متری طول پروفیل، یک انفصال و گسیختگی فاحش در عمق ۷۰ سانتی متری مشهود است که حاکی از ناپایداری خاک می باشد.

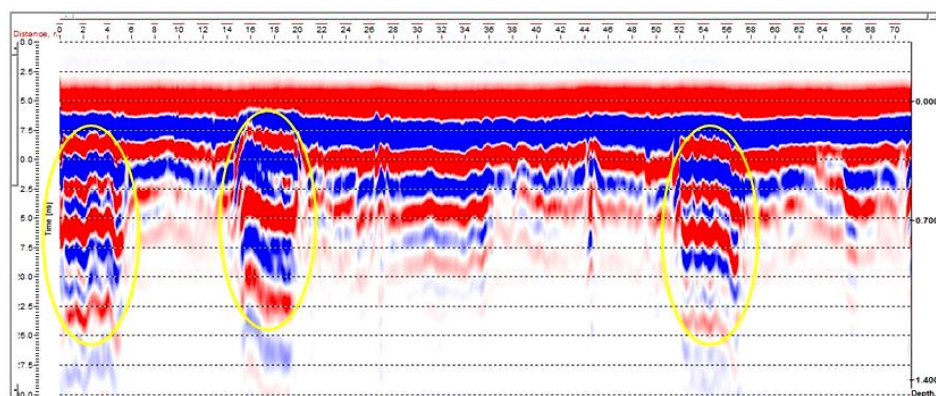
در شکل (۹) نگاشت راداری مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۹ به طول ۷۱/۵ متر، برداشت شده در ایوان جنوبی در راستای شرقی- غربی و به موازات امتداد پی های نواری احتمالی، نشان داده شده است. با بررسی این مقطع می توان موقعیت پی های نواری پهن در زیر و طرفین دیوارهای اصلی به عرض حدود ۵/۵ متر را شناسایی نمود. این پی ها از عمق حدود ۳۰ سانتی متری شروع شده و تا عمق حداکثر ۱/۲ متری ادامه دارند. در طول پروفیل در فاصله عمقی ۰/۵ متر تا ۷۰ سانتی متر، ضعیف شدن شدت دامنه بازتابها در فواصل بین پی های نواری پهن، به دلیل تغییرات دانه بندی خاک و درجه رطوبت می باشد.

در شکل (۱۰) نگاشت راداری مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۱۵ به طول ۱۵ متر، برداشت شده در راستای شرقی- غربی در ایوان شرقی نشان داده شده است. در این شکل موقعیت پی سنگ چین به هم ریخته در انتهای غربی مقطع، مشاهده می شود.

تفسیر نتایج پردازش داده ها به صورت مقاطع منطبق بر پروفیل های برداشت شده در ایوان های به ترتیب جنوبی، شرقی، غربی و شمالی ارائه شده است. در کلیه مقاطع، بیضی های زرد رنگ، موقعیت مکانی ناهمگنی های زیرسطحی را نشان می دهند. در تفسیرهای ارائه شده برای پروفیل ها، عوامل با اهمیت (در صورت وجود) به ترتیب شامل موقعیت پی های نواری در مقطع، موقعیت بخش های دارای شکستگی، درزه و شکاف و گسیختگی، موقعیت حفرات و فضا های خالی و موقعیت نشست های احتمالی می باشد. در شکل (۸) نگاشت راداری مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۱ به طول ۴۰ متر، برداشت شده در ایوان جنوبی در راستای شمال- جنوب و عمود بر امتداد پی های نواری احتمالی، نشان داده شده است. با بررسی این مقطع می توان موقعیت پی های نواری، با فواصل منظم (حدود ۱۰ متر) را شناسایی نمود. این پی ها که در عمق تقریبی نیم متری قرار دارند دارای عرض تقریبی ۸۰ سانتی متر بوده و متحمل اندکی نشست شده اند. لایه های رویی که دارای لایه بندی نسبتاً منظمی می باشند، به عنوان خاک با دانه بندی جور شده و همگن، تفسیر شده و پایدارند زیرا موج بازگشتی دارای پیوستگی بوده، تغییرات

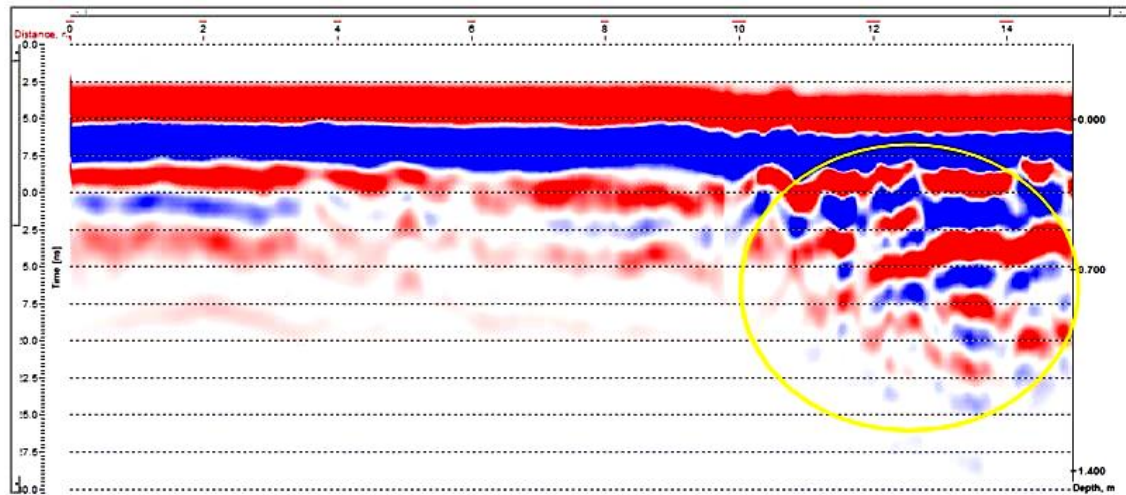


شکل ۸- نمایش موقعیت پی های نواری با فواصل منظم (حدود ۱۰ متر) در عمق حدود نیم متری و انفصال و نشست در پی خاکی در مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۱ ایوان جنوبی



شکل ۹- نمایش موقعیت پی های نواری پهن در زیر و طرفین دیوارهای اصلی به عرض حدود ۵/۵ متر با شروع از عمق حدود ۳۰ سانتی- متری تا عمق حداکثر ۱/۲ متری در مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۱۹ ایوان جنوبی





شکل ۱۰- نمایش موقعیت پی سنگ چین به هم ریخته در انتهای غربی مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۱۵ ایوان شرقی

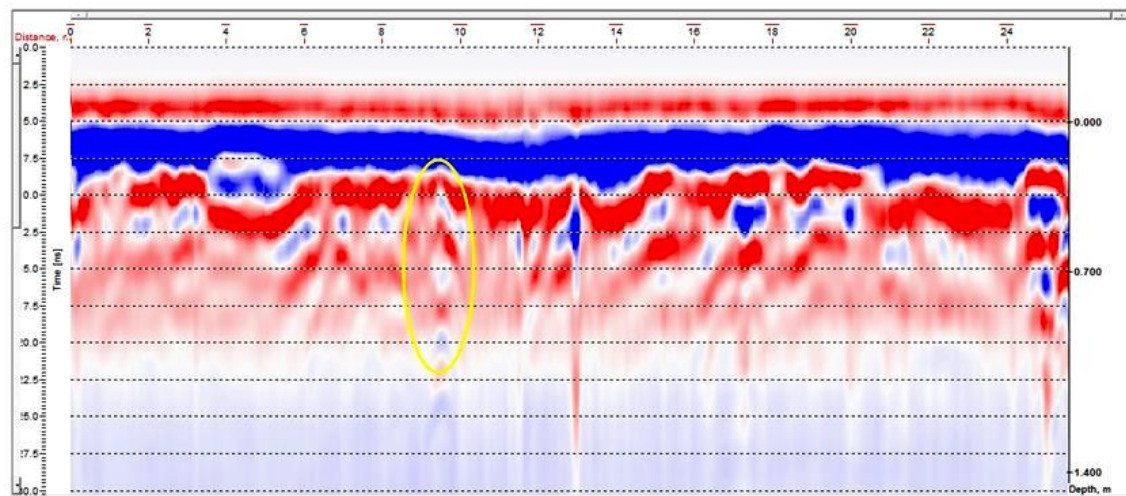
دارد. در انتهای پروفیل در عمق حدود ۳۰ سانتی متری، یک ساختار منشوری پر شده با تخته سنگ یا سنگ چینی سنتی، موجب ایجاد بی‌هنجاری در بازتاب‌های امواج گردیده است.

در شکل (۱۲) نگاشت راداری مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۳۲ به طول ۱۸ متر، برداشت شده در ایوان شمالی در راستای جنوب-شمال نشان داده شده است. در این شکل نیز به طور کلی به هم ریختگی در کل مقطع، مشاهده می‌شود که دلیل آن تغییرات جانبی (عمدتاً تغییرات دانه بندی) پی خاکی در اعماق بیش از ۳۰ سانتی متر بوده و لایه‌های خاک در اعماق بیشتر از این عمق، غیرهمگن اند، زیرا موج بازگشتی به شدت ناپیوسته است. در فاصله ۶/۵ متری طول پروفیل، پی نواری از عمق حدود ۳۰ سانتی-متری شروع شده و تا عمق ۷۰ سانتی متری ادامه دارد و عرض آن از یک متر کمتر است.

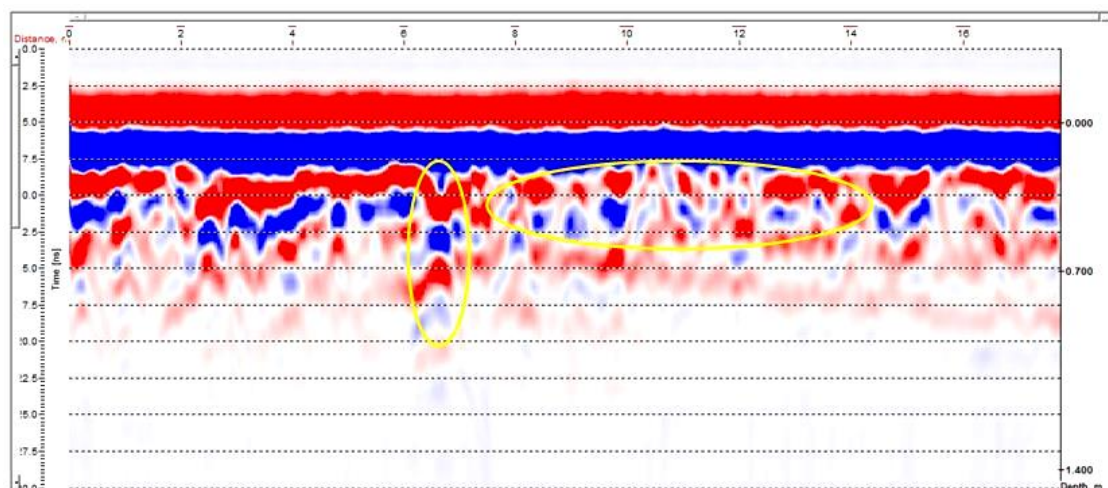
در فاصله ۵ تا ۷ متری طول پروفیل (به طول ۲ متر) در عمق حدود ۳۰ سانتی متر، ضعیف شدن شدت دامنه بازتاب‌ها به خاطر سستی خاک و یا تغییرات دانه بندی خاک و رطوبت می‌باشد.

شکل ۱۱ نگاشت راداری مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۲۷ به-طول ۲۶ متر، برداشت شده در ایوان غربی در راستای شمال-جنوب را نشان می‌دهد. در این شکل به طور کلی بهم ریختگی در کل مقطع، مشاهده می‌شود که دلیل آن تغییرات میزان رس موجود در خاک (تغییرات دانه بندی خاک) و میزان رطوبت در اعماق بیش از نیم متر می‌باشد.

در فاصله ۳/۵ تا ۶ متری طول پروفیل (به طول ۲/۵ متر) نشست خاک از عمق حدود ۴۰ سانتی متری و حداکثر به اندازه ۲۰ سانتی متر صورت گرفته است. در ۹/۵ متری طول پروفیل، احتمالاً یک حفره (فضای خالی کوچک) در عمق ۴۰ سانتی متری وجود



شکل ۱۱- نمایش تغییرات جانبی پی خاکی و ناهمگنی جانبی در اعماق بیش از نیم متر در مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۲۷ ایوان غربی



شکل ۱۲- نمایش پی نواری (بی‌هنجاری بیضی چپ) و تغییرات جانبی پی خاکی (بیضی راست) تا عمق بیش از یک متر در مقطع منطبق بر پروفیل شماره ۳۲ ایوان شمالی

#### ۴- بحث در نتایج و نتیجه‌گیری

با توجه به تفاسیر ارائه شده در خصوص پروفیل‌های برداشت شده، می‌توان چنین استنباط نمود که پی‌های مشاهده شده در ایوان جنوبی عمدتاً دارای نظم و ساختار مشخص نواری می‌باشند در صورتی که در سایر ایوان‌ها چنین نظمی مشاهده نمی‌شود. در مجموع نتایج تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود. ناهمگنی‌های متعددی در مقاطع برداشت شده در ایوان‌های جنوبی، شرقی، غربی و شمالی مشاهده می‌گردد که بایستی با واقعیت‌های معماری مستند مسجد، تطبیق داده شوند. بیشترین حجم پی‌سنگ‌های به کار گرفته شده در صحن اصلی مسجد، از نوع نواری بوده که از عمق نیم متری شروع شده و دارای عرضی کمتر از یک متر می‌باشند. زیرسازی دیوارهای شرقی صحن اصلی مسجد دارای پی‌های سنگی پهن به عرض ۵/۵ متر بوده و از عمق ۳۰ سانتی‌متری شروع شده و تا عمق حدود ۱/۲ متری ادامه دارند. نشست‌های متعددی در ایوان‌های شرقی و غربی مشاهده می‌شود که به بندرت از ۲۰ سانتی‌متر تجاوز می‌نمایند. ناهمگنی‌های جانبی متعددی در پی خاکی حیات مرکزی و ایوان‌های شرقی، غربی و شمالی مشاهده می‌شود که عمدتاً ناشی از تغییرات جانبی رطوبت، تغییرات درجه دانه‌بندی خاک، میزان رس پی خاکی و همچنین عدم زیرسازی مناسب، استفاده از سنگ‌چینی سنتی و به‌طور محلی در این بخش‌ها می‌باشد.

#### ۵- مراجع

- احمدی ر، فتحیان پور ن، نوروزی غ ح، "کاربردهای ژئوتکنیکی روش رادار نفوذی زمین (GPR) در شناسایی پارامترهای فیزیکی و هندسی ناهمگنی‌های زیر سطحی"، اولین کنفرانس مهندسی الکترومغناطیس ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۹۱.
- احمدی ر، فتحیان پور ن، نوروزی غ ح، "مطالعه ژئوتکنیکی بنای تاریخی سی و سه پل اصفهان با استفاده از روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی زمین"، همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری، تبریز، ۱۳۹۳.
- گزارش‌ها و نقشه‌های مسجد امام تهیه شده توسط سازمان میراث فرهنگی استان اصفهان.
- Ahmadi R, Fathianpour N, Norouzi GH, "Detecting physical and geometrical parameters of some common geotechnical targets through their effects on GPR responses", *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8, 4843-4854.
- Annan AP, "Ground-penetrating radar workshop notes", Sensors and Software Inc. Mississauga, ON, Canada, 2001, 1-192.
- Annan AP, Cosway SW, De-Souza T, "Applications of GPR to map concrete to delineate embedded structural elements & defects", *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Koppenjan SK, Lee H (eds.), *Proceeding of SPIE*, 2002, 4758, 359-364.
- Bakker MAJ, Maljers D, Weerts HJT, "Ground-penetrating radar profiling on embanked floodplains", *Netherlands Journal of Geosciences*, 2007, 86 (1), 55-61.
- Benedetto A, Benedetto F, "GPR Experimental Evaluation of subgrade soil characteristics for rehabilitation of roads", *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Koppenjan SK, Lee H (eds.), *Proceeding of SPIE*, 4758, 708-714, 2002.

احمدی ر، فتحیان پور ن، نوروزی غ ح، "کاربردهای ژئوتکنیکی رادار نفوذی زمین در شناسایی ناهمگنی‌های زیر سطحی مسیر حفر تونل انتقال تأسیسات برقی اصفهان"، اولین همایش ملی رادار نفوذی به زمین، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۳.

- Bungey JH, Millard SG, Shaw MR, "The use of sub-surface radar for structural assessment of insitu concrete", A.C.I., SP128/31, 2, 497-514, 1991.
- Geraads S, Charachon B, Loeffler O, Omnes G, "Applying a wave number notch filter to remove interferences caused by railway sleepers from a GPR section", Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Koppenjan SK, Lee H (eds.), Proceedings of SPIE, 2002, 4758, 715-718.
- Heiler M, McNiel S, Garret J, "Ground penetration radar for highway and bridge deck condition assessment and inventory", SPIE. 2456/195, 195-208, 1995.
- Huston D, Pelczarski N, Esser B, "Damage detection in roadways with Ground Penetrating Radar", Proceeding of Eighth International Conference on GPR, Gold Coasts, Australia, 91-95, 2000.
- Lai WL, Tsang WF, "Characterization of pore systems of air/water-cured concrete using ground penetrating radar (GPR) through continuous water injection", Construction and Building Materials, 2006, 22, 250-256.
- Lorenzo H, Rial FI, Novo AN, "Evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain)", NDT&E International, 2010, 44 (1), 8-12.
- Ranalli D, Scozzafava M, Tallini M, "Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy)", Journal of Cultural Heritage, 2004, 5, 91-99.
- Saarenketo T, Scullion T, "Road evaluation with ground penetrating radar", Journal of Applied Geophysics, 2000, 43, 119-138.
- Solla M, Lorenzo H, Rial FI, Novo A, "Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools", Construction and Building Materials, 2012, 29, 458-465.
- www.malags.com
- Xingxin Xu, Qiaosong Zeng, Dong Li, Jin Wu, Xiangnan Wu, Jinyin Shen, "GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams", Engineering Geology, 2010, 111, 31-42.

## EXTENDED ABSTRACT

# Geotechnical Investigations to Detect Basement Defects at Imam Mosque in Isfahan using Ground- Penetrating Radar

Reza Ahmadi<sup>a,\*</sup>, Nader Fathianpour<sup>b</sup>, Adibeh Karimi<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Mining Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran

<sup>b</sup> Mining Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

<sup>c</sup> Mining Engineering, Arak

Received: 19 January 2016; Accepted: 29 September 2018

### Keywords:

Ground-penetrating radar (GPR); Imam Mosque in Isfahan; Non-destructive method; GPR Profile; Banded basements.

## 1. Introduction

Many engineering decisions must be made on the basis of non-destructive evaluations (NDE). In addition, these assessments should be based on an acceptable engineering criterion. Although, the use of any inspection system is costly, but one of the obvious benefits of employing accurate non-destructive tests, is identification of deficiencies which leaving unidentified in the environment will cause events and as a result, a lot of financial and life losses. The geophysical method called Ground-penetrating radar (GPR) is a new, useful and very powerful method for non-destructive testing of retaining walls, buildings, bridges, tunnels, pavements, roads, railways, pipelines, tunnel lines, highways, substructures, sewage pipes, various types of other installation pipes and man-made artifacts such as concrete, asphalt, rebar, bricks and so on (Ahmadi et al., 2014; Annan et al., 2002).

This method produces very high-resolution subsurface images via sending high-frequency electromagnetic waves (usually in the range of 1 MHz to more than 1 GHz) into the earth and recording reflected waves transmitted through low-loss dielectric media (Annan, 2001).

## 2. Methodology

In order to prepare the reconstruction and repairs plan in the Imam Mosque of Isfahan, as one of the most important and oldest religious-historical institutions of Iran, GPR method was known as the most appropriate NDE method. Therefore in the present research, the GPR method has been used to locate, determine the lateral and deep extension of probable banded basements of the walls and pillars as well as detect their weaknesses in the main porch (southern Iyvan) and three other porches (eastern, western and northern Iyvans) of Imam mosque building for designing reinforcement of its basement structure planned by Cultural Heritage Organization.

To achieve the goal, by means of a MALA 250 MHz shielded GPR system ([www.malags.com](http://www.malags.com)) a number of 16, 7, 4 and 11 profiles were surveyed in the southern, eastern, western and northern Iyvans, respectively. In general, a number of 38 profiles with the minimum and maximum length of 6 and 73.5 meter respectively, were designed and scanned along the with orthogonal grids. In order to processing and interpretation of the acquisitioned data, Ground Vision and Radexplorer softwares were employed.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: rezahmadi@gmail.com (Reza Ahmadi), fathian@cc.iut.ac.ir (Nader Fathianpour), asr.karimi@yahoo.com (Adibeh Karimi).

### 3. Results and discussion

In the interpretation of the sections corresponding to the surveyed transects in the porches of the Mosque, important factors (if exist) include in turn, the position of the banded basements in the section, the position of the fractured parts and joints, position of pores and sinkholes and position of probable subsidences.

Interpretation of the radargrams showed that the main porch has hosted a large number of banded basements with less than 1 m width embedded in 0.5 m depth, whereas the basement of eastern walls of the main porch are wide with 5.5 m width starting from 30 cm to 1.2 m depth. Several subsidences with less than 20 cm were observed in the eastern and western Iyvans.

### 4. Conclusions

According to the interpretation of the traversed transects, it can be deduced that the observed basements in the southern Iyvan have mainly regularity and specific banded structure, while such arrangement is not observed in the other Iyvans. Several lateral heterogeneities are observed in the soil-basement of the central courtyard, the eastern, western and northern Iyvans which is mainly due to changes in moisture content, changes in soil grading degree, clay amount of soil-basement and also the lack of proper infrastructure and the use of traditional and locally revetment in these parts. The results of this research are used to prepare the plan of reconstruction, repair and maintenance of this valuable cultural, historical and ancient monument by the Cultural Heritage Organization as the relevant custodian.

### 5. References

- Ahmadi R, Fathianpour N, Norouzi, GH, "Detecting physical and geometrical parameters of some common geotechnical targets through their effects on GPR responses", *Arabian Journal of Geosciences*, DOI 10.1007/s12517-014-1517-5, 2014.
- Annan AP, "Ground-penetrating radar workshop notes", Sensors and Software Inc. Mississauga, ON, Canada, 2001, 192 pages.
- Annan AP, Cosway SW, De Souza T, "Applications of GPR to Map Concrete to delineate embedded structural elements & defects", *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Koppenjan, S.K., Lee, H. (eds.), *Proceeding of SPIE*, 2002, 4758, 359-364.  
www.malags.com