کنترل کیفیت بلوک‌های سنگ ساختمانی با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR)

رضا احمدی؛ دانشگاه صنعتی اراک، دانشکدهٔ مهندسی معدن

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۵/۱۵ **پذیرش** ۹۵/۱۲/۲۱

چکیده

سنگ‌های ساختمانی ذخایر معدنی با ارزش هستند و صنعت سنگ‌ساختمانی نیز به‌عنوان صنعت اقتصادی مهم به‌شمار می‌رود. این صنعت به‌صورت یک زنجیره است و کنترل کیفیت، حلقهٔ گم شده این زنجیره در ایران است که موجب کاهش بهره‌وری این صنعت شده است. کیفیت سنگ ساختمانی تابع عوامل مختلفی است و وجود ناپیوستگی‌ها، حفره‌ها، فضاهای خالی و لایه‌بندی‌های ظریف روی کیفیت سنگ تأثیر منفی دارند. در پژوهش حاضر از روش ژئوفیزیکی غیرمخرب رادار نفوذی به زمین (GPR) برای ارزیابی و کنترل کیفیت بلوک‌های استخراجی تراورتن مجتمع معدنی حاجی‌آباد محلات در استان مرکزی، قبل از عملیات فرآوری، استفاده شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از برنامه مدل‌سازی عددی پیش‌رو، به‌روش تفاضل محدود دوبعدی بهبود یافته در حوزهٔ فرکانس در محیط نرم‌افزار MATLAB، پاسخ GPR دوبعدی مدل‌های مصنوعی فرضی به‌شکل مکعب مستطیل (معرف کوپ‌های سنگی) شامل لایه‌بندی‌های ظریف و ناپیوستگی در جهت‌های مختلف، شبیه‌سازی شد تا از نتایج آن‌ها برای تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی استفاده شود. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که پاسخ GPR مرزهای مشترک لایه‌ها (ناشی از وجود لایه‌بندی‌های ظریف) و ناپیوستگی‌های برجسته درون بلوک سنگ، در نگاشت‌های راداری به‌وضوح قابل تشخیص هستند. بررسی نتایج حاصل از تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی، پس از اعمال فیلترهای مختلف نیز حاکی از قابلیت بالای روش GPR در شناسایی لایه‌بندی‌های ظریف و ناپیوستگی‌های درون بلوک‌های سنگی و در نتیجه تعیین کیفیت آن‌ها در محدودهٔ بررسی شده است. در هر صورت در مورد داده‌های واقعی به‌دلیل ناهمگنی لایه‌های ظریف، وجود انواع مختلف نوفه‌ها و بازتاب‌های چندگانه، پاسخ ناپیوستگی‌های ساختاری کوچک واقع در زیر ناپیوستگی‌های برجستهٔ کم عمق، با پاسخ‌های دیگر پوشش داده شده و قابل شناسایی نیستند.

واژه‌های کلیدی: بلوک سنگ ساختمانی (کوپ)، زنجیرهٔ تولید سنگ، رادار نفوذی به زمین (GPR)، مدل‌سازی عددی پیش‌رو، کنترل کیفیت، مجتمع معدنی حاجی آباد محلات

*نویسنده مسئول rezahmadi@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

مقدمه

سنگ‌های ساختمانی از جمله ذخایر معدنی با ارزش هستند که به‌کارگیری آن‌ها در فضاهای داخلی و نمای بیرونی ساختمان‌ها، مراکز تجاری، معابر و میادین شهرها، جلوه و شکوه کاملاً استثنایی دارد. به‌طورکلی سنگ‌های ساختمانی براساس شکل هندسی و ابعاد حاصل از استخراج به دو گروه سنگ‌های تزئینی و نما و سنگ لاشه تقسیم‌بندی می‌شوند. به آن دسته از سنگ‌های ساختمانی که دارای رنگ و ظاهر زیبا هستند و بتوان از آن‌ها کوپ[1] (بلوک‌های سنگی بزرگ مکعبی شکل به‌وزن چند تن)، قواره (قطعات سنگی مکعبی شکل که از کوپ به‌دست می‌آید) و پلاک[2] (صفحات سنگی که از کوپ و قواره به‌دست می‌آید) تهیه کرد، سنگ تزئینی و نما گفته می‌شود. عموم سنگ‌های ساختمانی که به‌صورت مالن[3] (سنگ تراشیده و چکش خورده) یا اشکال غیرمنظم برای پی ساختمان، دیوار و پایه پل به‌کار می‌روند، در ردهٔ سنگ‌های لاشه قرار دارند [۱]. انواع مختلف سنگ که خصوصیات کیفی لازم را دارند را می‌توان به‌عنوان سنگ ساختمانی استفاده کرد.

صنعت سنگ ساختمانی صنعتی شدیداً پویاست که علیرغم وجود مسائل و مشکلات ایمنی و زیست محیطی، به‌عنوان صنعت اقتصادی مهم در دنیا به‌سرعت در حال رشد و توسعه است. سنگ‌های تزئینی و نما علاوه بر تأمین نیازهای داخلی کشور در امر صادرات و سودآوری ارز نیز نقش به‌سزایی دارند. براساس آمارهای بین‌المللی، ایران از نظر تعدد، تنوع و غنای ذخایر سنگ ساختمانی در ردیف ۱۰ کشور عمده دارای ذخایر سرشار سنگ‌های تزئینی و نمای جهان است. در ایران ٤٠ نوع سنگ ساختمانی شناسایی شده و انواع معادن سنگ‌های تزئینی و نما شامل تراورتن، مرمریت، سنگ چینی، گرانیت و مرمر با ذخایر سرشار و تنوع رنگی زیاد وجود دارد که از این حیث پس از کشورهای چین و هند دارای رتبه سوم جهان است [۲]، [۳]، [٤]، [٥]. براساس گزارش نمایشگاه بین‌المللی سنگ و ماشین کارارای[4] ایتالیا، ایران با تولید سالانه حدود ۱۳ میلیون تن سنگ ساختمانی، چهارمین تولیدکنندهٔ عمده سنگ‌های

1. Cube
2. Slab
3. Mullion
4. Carrara

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

تزئینی و نما در جهان، محسوب می‌شود [٦]، [٧]، [٨] ولی کنترل کیفیت و درنتیجه بهره‌وری فرآیند این صنعت در ایران بسیار اندک است.

سنگ‌شناسی به تنهایی تعیین‌کنندهٔ کیفیت سنگ در صنعت سنگ نیست و علاوه بر ویژگی‌های سنگ و ترکیب شیمیایی (نوع سنگ و رنگ سنگ)، عواملی مانند یک‌نواختی (درجهٔ همگنی)، درزه و شکاف‌ها، شکستگی‌ها، اثرات هوازدگی، حفره‌ها و فضاهای خالی، وجود لایه‌بندی‌های ظریف، نحوهٔ استخراج، چگونگی برش، ساب و صیقل نیز در کیفیت سنگ‌های تزئینی و نما تأثیرگذارند [٨]. این امر باعث می‌شود قسمتی از یک معدن که از نظر نحوه و زمان تشکیل، جنس سنگ و ترکیب شیمیایی هیچ تفاوتی با بخش دیگر معدن ندارد، به‌دلیل وجود همین عوامل، غیرقابل استفاده باشد.

کیفیت سنگ رابطهٔ مستقیم با قیمت آن دارد و قیمت سنگ نیز می‌تواند روش استخراج را تحت تأثیر قرار دهد؛ بدین‌صورت که هرچه قیمت سنگ بیش‌تر باشد کیفیت در استخراج نیز به تناسب قیمت، بیش‌تر می‌شود و بهره‌بردار سعی می‌کند تا میزان استخراج را افزایش و میزان باطله را کاهش دهد [٨]. بنابراین قبل از هر چیز لازم است علاوه بر شناخت نوع سنگ ساختمانی، کیفیت و مرغوبیت سنگ از لحاظ میزان شفافیت و نبود ترک‌ها، درزه و شکاف‌ها و ناخالصی‌های موجود در آن با نمونه‌برداری و آزمایش‌های محوری متعدد (اعم از فشاری یا کششی) و نیز تهیه مقاطع میکروسکوپی، به‌طور دقیق مشخص شود.

تمام روش‌های ارزیابی مذکور از نوع مخرب هستند. علاوه براین امکان نمونه‌گیری و آزمایش‌های متعدد روی تمام بخش‌های یک معدن یا بر روی تمام بلوک‌های سنگی استخراج شده وجود ندارد. بنابراین به‌کارگیری روشی سریع، کم‌هزینه، دقیق و غیرمخرب مانند روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین[1] (GPR) برای این منظور ضروری است. هدف از این پژوهش، کنترل کیفیت بلوک‌های استخراجی سنگ قبل از عملیات فرآوری (برش، ساب و صیقل)، با روش GPR است. در این صورت انجام کارهایی که زمانی غیرممکن بود امروزه ممکن است و انجام هرگونه عملیات بهینه‌سازی در طی زنجیره تولید سنگ به‌ویژه قبل از مرحله فرآوری، منجر به افزایش بازدهی و راندمان کار خواهد شد.

1. Ground-Penetrating Radar

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

تاکنون در زمینهٔ پژوهش حاضر در ایران هیچ‌گونه پژوهشی انجام نشده و در دنیا نیز فعالیت‌های معدودی به‌صورت موردی انجام گرفته است که به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. پرسانی[1] و همکاران (۲۰۰٦) به‌منظور بهینه‌سازی هزینه‌های استخراجی معدن گرانیت در ناحیهٔ کاپائو بونیتو[2] در ایالت سائوپائولو[3] واقع در جنوب شرق برزیل از روش GPR با آنتن‌های با فرکانس‌های مرکزی ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ مگاهرتز استفاده کردند [۹]. لودس[4] (۲۰۰۸) از سیستم GPR با آنتن ۲۰۰ مگاهرتزی برای تعیین کیفیت سنگ‌های ساختمانی از نوع گرانیت پورفیری و سنگ‌های صابونی[5] توده‌ای دارای ساخت خطی و شیستوزیته در فنلاند استفاده کرد [۱۰]. کدیگلو[6] (۲۰۰۸) از روش GPR برای شناسایی ناپیوستگی‌ها و فضاهای خالی یک معدن سنگ مرمر در ناحیهٔ Ankara City Polatli Town واقع در ترکیه استفاده کرد [۱۱]. او از برداشت پروفیل‌های دوبعدی GPR و نمایش سه‌بعدی برای تعیین ضخامت لایه‌ها و تشخیص ناپیوستگی‌ها کمک گرفت. آروسیو[7] و همکاران (۲۰۱۲) به‌منظور شناسایی نواقص موجود در بلوک‌های مرمر و سنگ‌های پورفیری دو معدن سنگ ساختمانی در ناحیهٔ برسیس[8] واقع در شمال ایتالیا، از یک سیستم GPR با فرکانس ۲ گیگاهرتز بهره بردند [۱۲]. ری[9] و همکاران (۲۰۱۵) از روش GPR برای شناسایی بافت و حضور ناپیوستگی‌ها در انواع مختلف سنگ‌های کربناته به‌عنوان سنگ تزئینی استفاده کردند [۱۳]. آن‌ها ابتدا از روش GPR در مورد یک معدن مرمر در Macael (Almeria اسپانیا) با لایه‌های متناوب مرمر و میکاشیست به‌منظور جداسازی واحدهای مرمر از واحدهای میکاشیست و در نتیجه برآورد میزان ذخیرهٔ مرمر و شناسایی ناپیوستگی‌های مختلف (حفره‌ها و شکستگی‌ها) در واحدهای مرمر بهره بردند. برای این اهداف از آنتن با فرکانس‌های مختلف (۱۰۰، ۲۵۰ و ۸۰۰ مگاهرتز) استفاده شده که آنتن با فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز مؤثرترین فرکانس برای دست‌یابی به تفکیک‌پذیری عمقی دقیق بوده

1. Porsani
2. Capao Bonito
3. Sao Pauolo
4. Luodes
5. Soapstone
6. Kadiglu
7. Arosio
8. Brescis
9. Rey

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

است. سپس بررسی با روش GPR در مورد سه نوع سنگ با نام تجاری مرمر Macael، تراورتن کرم و قرمز Marfil قبل از فرآیند برش بلوک انجام شده است. در این مورد آنتن ۸۰۰ مگاهرتزی برای تشخیص بافت‌ها و تعیین موقعیت ناهم‌سانگردی‌های مختلف در انواع سنگ‌ها استفاده شده است. نتایج نشان داده که GPR روش مؤثری برای ارزیابی کیفیت بلوک‌ها، بررسی نیاز داشتن یا نیاز نداشتن به تزریق چسب برای تحکیم بلوک و تخمین موقعیت برش سنگ است. آروسیو (۲۰۱٦) امکان‌سنجی تخمین ضخامت شکستگی‌ها و شناسایی مواد پرکننده آن‌ها در سنگ‌های ساختمانی را به‌وسیلهٔ روش GPR در حوزه فرکانس بررسی کرد [۱٤]. وی داده‌های GPR را برای بلوک‌های ماسه سنگ دارای شکستگی‌های با ضخامت معین، پر از هوا و آب شبیه سازی کرد. او از واهمامیخت قطعیت‌پذیر برای بازیابی بزرگی دامنه و فاز پاسخ لایه نازک در باند فرکانسی انتخاب شده استفاده کرد. بعد از به‌دست آمدن منحنی‌های واهمامیخت شده، ضخامت و مواد پرکننده شکستگی‌ها به‌وسیلهٔ فرآیند انطباق که نسبت به ضخامت شکستگی حساسیت بیش‌تری دارد، تخمین زده شدند.

زنجیرهٔ تولید سنگ مهندسی (استاندارد)

در واقع صنعت سنگ ساختمانی به‌صورت یک زنجیره است که حلقه‌های این زنجیره را مراحل اکتشاف، استخراج (بهره‌برداری) و فرآوری سنگ تشکیل می‌دهند. این حلقه‌ها به‌شدت به یک‌دیگر وابسته است و انجام هرگونه عملیات بهینه‌سازی در طی زنجیره تولید سنگ، منجر به افزایش بازدهی و راندمان کار خواهد شد.

شمایی از یک زنجیره تولید سنگ بهینه‌سازی نشده در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، از یک معدن سنگ آهکی، مقدار ۱۰۰۰ تن سنگ، استخراج می‌شود که از این مقدار، حدود ۷۸۰ تن در همان ابتدای کار در مرحلهٔ استخراج به‌عنوان باطله، غیرقابل‌استفاده است و دورریز می‌شود و تعداد ۱۵ بلوک (۲/۸×۱/٤×۱/۵ متر) جمعاً به وزن ۲۲۰ تن برای انجام عملیات بعدی، بهره‌برداری می‌شود. از ۱۵ بلوک مذکور تعداد ۵ بلوک به وزن ۷۵ تن به‌دلیل وجود ناپیوستگی (درزه و شکاف و شکستگی)، نامناسب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

است و قبل از مرحلهٔ برش، حذف می‌شوند (غیرقابل‌استفاده‌اند) به‌عبارت‌دیگر تعداد ۱۰ بلوک به وزن ۱٤٥ تن با اره‌های برش، بریده می‌شوند که با راندمان کار ۷۰ درصد در این مرحله، یک بلوک به وزن ۱۵ تن، به‌دلیل شکستگی‌های غیرقابل پیش‌بینی موجود در درون آن، شکسته شده و دورریز می‌شود. هم‌چنین در حین برش به میزان ۲٦ تن لاشه‌سنگ به‌عنوان باطله تولید می‌شود. محصول تولیدی این مرحله از فرآیند برش، حدود ۱۰۰ تن یا ۲۷۰۰ مترمربع صفحه سنگی (با ضخامت حدود ۱۵ میلی‌متر) است که با انجام عملیات تنظیم و کالیبراسیون، صیقل‌کاری و برش به اندازه‌های مورد نظر با راندمان کاری ۷۰ درصد، تعدادی از اسلب‌ها و پلاک‌ها به وزن حدود ۱۵ تن، شکسته شده و دورریز می‌شود. هم‌چنین حدود ۵ تن از اسلب‌ها یا پلاک‌های تولیدی، غیرقابل قبول هستند که آن‌ها نیز بدون استفاده هستند و همراه با ۱۰ تن لاشه‌سنگ تولید شده در حین این مرحله از فرآیند تولید، به‌عنوان باطله، دورریز می‌شوند [۱۵]. محصول تولیدی این مرحله از فرآیند، برای مصرف، وارد بازار می‌شود که در حین مصرف و نصب در نمای ساختمان‌ها حدود ۳ درصد از محصول، به‌دلیل نگه‌داری ضعیف از بین می‌رود.

در شکل ۲ نیز شمایی از زنجیره تولید سنگ قبلی همراه با انجام عملیات بهینه‌سازی، نشان داده شده است. در این مورد از یک معدن سنگ آهکی، مقدار ۱۰۰۰ تن سنگ، استخراج می‌شود و از این مقدار حدود ۷۸۰ تن در همان مرحله استخراج، باطله تولید می‌شود که البته با بهینه‌سازی کار، مجدداً بازیابی شده و در تهیه محصولات جانبی (عمدتاً به‌عنوان مصالح در کارهای ساختمانی) استفاده می‌شود. در این مرحله، تعداد ۱۵ بلوک (۲/۸×۱/٤×۱/۵ متر) جمعاً به وزن ۲۲۰ تن برای انجام عملیات بعدی، بهره‌برداری می‌شود. بعد از انجام عملیات بهینه‌سازی به‌وسیلهٔ سیستم تشخیص و آشکارسازی بر روی ۱۵ بلوک مذکور، تنها یکی از بلوک‌ها به وزن ۱۵ تن شکسته شده و غیرقابل استفاده است و تعداد ۱٤ بلوک به وزن ۲۰۵ تن با اره‌های برش، بریده می‌شوند که با راندمان کار ۹۰ درصد در این مرحله، مقدار ۲۰ تن لاشه‌سنگ در حین برش، تولید می‌شود و این بخش نیز همراه با باطله‌های مرحله بهره‌برداری، استفاده می‌شود. محصول تولیدی این مرحله از فرآیند برش، حدود ۱۸۵ تن یا ٤۵۰۰ مترمربع (با ضخامت حدود ۱۵ میلی‌متر) صفحه سنگی خواهد بود که با انجام عملیات

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

تنظیم و کالیبراسیون، صیقل‌کاری و برش به اندازه‌های مورد نظر با راندمان کاری ۹۰ درصد و تحکیم اسلب‌ها و پلاک‌های تولیدی، تعدادی از اسلب‌ها و پلاک‌ها به وزن حدود ۱۳ تن، شکسته شده، حدود ۳ تن، غیرقابل قبول است و همراه با ۱۰ تن لاشه‌سنگ تولید شده در حین این مرحله از فرآیند تولید به‌عنوان باطله، همراه با باطله‌های مراحل قبلی تولید، برای تولید محصولات جانبی، بازیابی می‌شوند. حال نوبت انتخاب و کاربرد این محصول تولیدی مجازی است که در حین مصرف و نصب در نمای ساختمان‌ها حدود ۱ درصد از محصول نیز، به‌دلیل نگه‌داری ضعیف از بین می‌رود [۱۵].

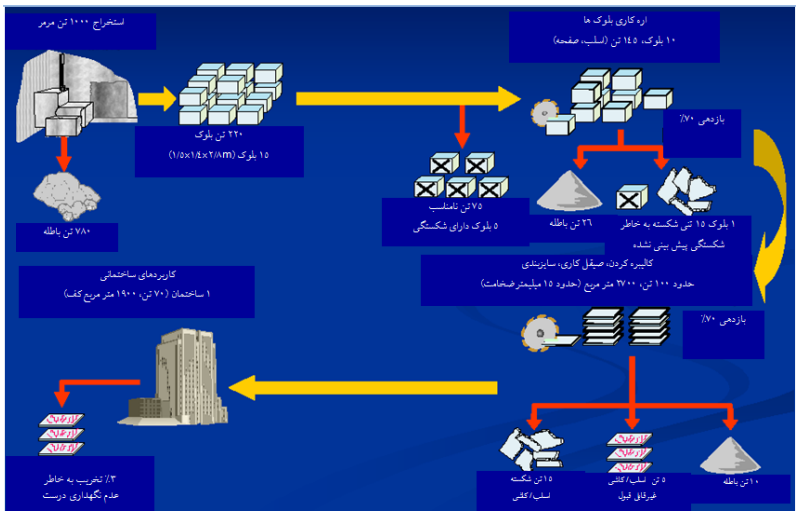
در حقیقت مهندسی مجدد زنجیره تولید سنگ، کنترل کیفیت این صنعت به‌منظور افزایش قابل ملاحظه تولید، کمینه کردن مقدار زیاد باطله‌ها و بالا بردن راندمان کار است. در این پژوهش هدف بهینه‌سازی بخشی از این زنجیره قبل از فرآیند فرآوری یعنی کنترل کیفیت بلوک‌های استخراجی با استفاده از روش بازرسی و ارزیابی غیرمخرب GPR است. حتی این نوع بهینه‌سازی می‌تواند قبل از استخراج بلوک سنگ نیز انجام شود (ارزیابی معدن سنگ) تا هزینه‌های استخراج هم کاهش یابد.

بلوک‌های استخراجی سنگ ساختمانی، شکل و ابعاد گوناگونی دارند ولی اغلب به‌صورت بلوک‌های مکعبی به‌طول ۱/۸ تا ۳ متر، عرض ۱/۵ تا ۲ متر و ارتفاع ۱ تا ۲ متر هستند. درصورتی که معدن سنگ ساختمانی دارای لایه‌بندی ظریف و یا ناپیوستگی باشد، در هنگام استخراج نمی‌توان بلوک‌های بزرگ از آن استخراج کرد و با تولید مقدار زیادی لاشه، همراه خواهد بود. به‌عنوان مثال در شکل ۳ مراحل استخراج یک بلوک سنگ، شکسته شدن آن به قطعات کوچک‌تر و تولید لاشه در اثر وجود لایه‌بندی‌های ظریف در یکی از معادن تراورتن مجتمع معدنی حاجی‌آباد محلات واقع در استان مرکزی نشان داده شده است. اگر بلوک‌های سنگی در سطح جانبی خود دارای شکاف‌های عمیق و مرئی باشند، حتی اگر در مرحله استخراج هم متلاشی نشوند در همان ابتدای کار کنار گذاشته می‌شوند.

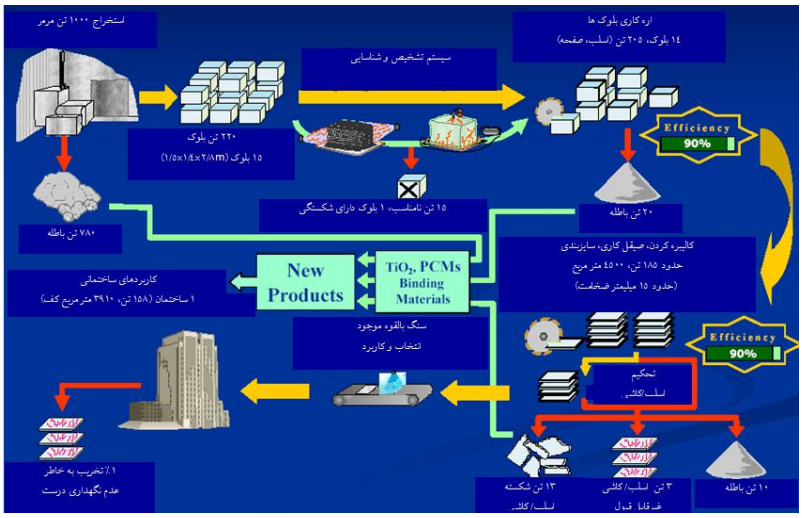
درصورتی‌که بلوک سنگ استخراجی دارای لایه‌بندی ظریف، تکتونیزه و یا حتی میکروتکتونیزه باشد، وجود درزه و شکاف‌ها در متن سنگ چه به‌صورت درزه‌های نسبتاً بزرگ و چه به شکل درزه‌های کوچک، استحکام لازم را از سنگ می‌گیرد و در هنگام برش این بلوک‌های بزرگ زیر اره‌های برش، و یا صیقل دادن اسلب‌های بریده شده، اغلب سنگ متلاشی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

شده و با تولید مقدار زیادی لاشه همراه خواهد بود. بنابراین آگاهی از وجود یا وجود نداشتن لایه‌بندی‌های ظریف و تعیین نحوهٔ توزیع فضایی ناپیوستگی‌های ساختاری، درون بلوک‌های سنگ تزئینی و نما برای مهندسین معدن بسیار مهم است. اما چگونه می‌توان لایه‌بندی‌های ظریف و یا ناپیوستگی‌های درون بلوک سنگ را آشکار کرد؟



شکل ۱. شمایی از یک زنجیرهٔ تولید سنگ بهینه‌سازی نشده [۱۵]



شکل ۲. شمایی از یک زنجیره تولید سنگ بهینه‌سازی شده [۱۵]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

شکل ۳. مراحل استخراج یک بلوک سنگ (دارای لایه‌بندی ظریف) در یکی از معادن تراورتن مجتمع معدنی حاجی‌آباد محلات

ارزیابی و کنترل کیفیت بلوک‌های سنگی با روش GPR

۱. مبانی فیزیکی و نظری روش GPR

روش GPR با ارسال امواج الکترومغناطیسی[1] (EM) با فرکانس زیاد (عموماً در محدودهٔ فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز) به‌درون محیط و دریافت امواج بازتابی حاصل، قابلیت ارائه تصاویر با تفکیک‌پذیری[2] زیاد از محیط‌های دی‌الکتریک کم‌اتلاف را دارد. این روش دارای طیف وسیعی از کاربردها در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله معدن‌کاری، ژئوتکنیک و شناسایی ساختار، تصویر کردن آب‌های زیرزمینی، باستان‌شناسی، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی، برف و یخ و یخ‌بندان شناسی، تأسیسات و مسائل زیست‌محیطی است [۱۶]–[۲۰]. روش GPR قادر به شناسایی و به‌نقشه درآوردن جزئیات محیط‌ها، بدون نیاز به مغزه‌گیری یا ایجاد تخریب و تغییر در محیط بوده است و نتایج برداشت، به‌آسانی به‌صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند.

1. Electromagnetic
2. Resolution

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی EM را در محیط، کنترل می‌کنند شامل گذردهی دی‌الکتریک (ε)، نفوذپذیری مغناطیسی (μ) و هدایت الکتریکی (σ) هستند [۲۱]. تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی اغلب محیط‌ها همانند سنگ‌های ساختمانی معمولاً ضعیف است. بنابراین در کاربرد روش GPR برای شناسایی بلوک‌های سنگ ساختمانی، ε و σ مهم‌ترین پارامترها هستند.

متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنه سیگنال امواج EM بازتابی، در مقابل زمان تأخیر است که تریس نامیده می‌شود. به‌طورکلی نگاشت راداری[۲] یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مجموعه‌ای از تریس‌های بازتابی است و برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنهٔ سیگنال‌های بازتاب شده از ناهمگنی‌های زیرسطحی، بزرگ تر از سیگنال‌های زمینه است [۲۱]. در نگاشت‌های راداری، پاسخ GPR دوبعدی اهداف مدفون، به دوصورت خطی و هذلولی است. اهداف با ساختارهای خطی (مانند مرز لایه‌های زمین‌شناسی، سطح سفره‌های آب زیرزمینی، سطوح شکستگی درون سنگ‌ها و نظایر آن) دارای پاسخ خطی به صورت خطوط افقی یا مایل بوده و سایر اهداف، پاسخ هذلولی شکل ایجاد می‌کنند.

ازآن‌جاکه روش GPR اهداف را در فاصله معینی کشف و آشکار می‌کند، تفکیک‌پذیری نشان می‌دهد که چگونه موقعیت و ویژگی‌های هندسی هدف می‌تواند به‌طور دقیق تعیین شود [۲۲]. میان تفکیک‌پذیری، عمق نفوذ و فرکانس مرکزی پالس‌های GPR ارتباط وجود دارد به‌گونه‌ای‌که با افزایش فرکانس مرکزی، تفکیک‌پذیری افزایش و عمق نفوذ، کاهش می‌یابد و برعکس. کاهش فرکانس مرکزی سیستم رادار، تأثیر مهمی روی افزایش عمق نفوذ آن دارد. دلیل این امر آن است که هرچه فرکانس مرکزی کاهش یابد، تضعیف سیگنال در محیط کم می‌شود. انتخاب فرکانس عملکرد بهینه برای یک برداشت راداری بسیار مهم است. بدیهی است انتخاب فرکانس مرکزی سیستم GPR متناسب با نوع هدف صورت می‌گیرد و همواره باید توازنی بین عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری سیستم برقرار شود. در مورد تصویر کردن معادن سنگ ساختمانی، استفاده از فرکانس‌های کم (به‌دلیل عمق نفوذ زیاد) در حدود ۲۵ تا ۱۰۰ مگاهرتز و در ارزیابی و کنترل کیفیت بلوک‌های سنگی (کوپ‌های) استخراج شده با ابعاد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

متعارف، استفاده از فرکانس‌های متوسط (به‌دلیل نیاز به عمق نفوذ کم‌تر و تفکیک‌پذیری بیش‌تر) در حدود ۲۵۰ تا ۵۰۰ مگاهرتز مناسب است.

۲. مدل‌سازی عددی پیش‌رو داده‌های GPR

پاسخ سیستم GPR برای مدل‌های مصنوعی فرضی مختلف متناظر با اهداف و ساختارهای واقعی باید با یکی از روش‌های مدل‌سازی عددی تولید شود تا این هسته مدل‌سازی پیش‌رو منجر به شناسایی رفتار مدل‌های مختلف در پاسخ‌ها شده و عملیات تفسیر داده‌های GPR در کاربردهای عملی را فراهم کند. بنابراین هدف از مدل‌سازی داده‌های GPR آن است که معلوم شود تحت شرایط مختلف محیطی، چه اطلاعات معقولی از داده‌های واقعی میدانی به‌دست می‌آید. برای دست‌یابی به این هدف می‌توان از روش‌های عددی مختلفی استفاده کرد که در همهٔ آن‌ها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، براساس رفتار امواج EM و برهمکنش آن‌ها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود.

در بین روش‌های عددی مختلف، روش تفاضل محدود به‌دلیل دارا بودن مزیت‌هایی همانند درک نسبتاً ساده مفاهیم آن، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ‌های آن در موارد به‌کار رفته، مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته است [۲۳]. برای مدل‌سازی پیش‌رو دوبعدی داده‌های GPR در پژوهش حاضر بازتاب امواج GPR ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو روی سطح زمین قرار دارند)، به‌روش تفاضل محدود دوبعدی حوزهٔ زمان با فرمول‌بندی روش میدان مغناطیسی عرضی[1] (مد TM) شبیه‌سازی شده است. برای این منظور روش تفاضل محدود دوبعدی ارائه شدهٔ ایروینگ و نایت (۲۰۰۶) [۲٤] بهبود یافته در حوزه فرکانس [۲۵] به‌منظور مدل‌سازی پیش‌رو اشیاء مصنوعی فرضی متناظر با اهداف متداول در ارزیابی بلوک‌های سنگ ساختمانی با روش GPR استفاده شده است. خروجی برنامه مدل‌سازی پیش‌رو شامل دو پاسخ است: ۱. با تفکیک‌پذیری کم[2] و ۲. با تفکیک‌پذیری زیاد[3]. به‌منظور افزایش سرعت اجرای برنامه و تمرکز بیش‌تر بر پاسخ هدف، رخداد مربوط به موج مستقیم (هوا و زمین) که همواره به‌صورت رخداد خطی افقی است، از پاسخ با تفکیک‌پذیری زیاد حذف شده است.

1. Transverse Magnetic Field
2. Low-resolution response
3. High-resolution response

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

۳. مدل‌سازی پاسخ GPR اهداف مصنوعی

هدف از پژوهش حاضر تصویر کردن بلوک‌های سنگ ساختمانی با استفاده از روش GPR با هدف شناسایی لایه‌بندی‌های ظریف و ناپیوستگی‌های درون آن‌ها است. عمدهٔ سنگ‌های تزئینی و نما را سنگ‌های آهکی و دولومیتی (شامل تراورتن، سنگ چینی، مرمریت و مرمر) و گرانیت‌ها تشکیل می‌دهند. سنگ‌های آهکی به‌دلیل سختی مناسب، قابلیت برش، ساب و صیقل، تنوع رنگ‌ها، مقاومت خوب، قابلیت استخراج آسان، امکان نداشتن آلتره شدن و میزان ذخایر بزرگ، در بین سنگ‌های ساختمانی جای‌گاه خاصی دارند. گرانیت‌ها نیز ازجمله سنگ‌های ساختمانی هستند که به‌دلیل سختی زیاد، شفافیت، زیبایی خیره‌کننده، تنوع طرح‌ها و رنگ‌ها و تباین زیبای رنگ‌ها اهمیت خاصی دارند و دارای ارزش بالایی هستند. به‌همین دلیل در این پژوهش برای انجام مدل‌سازی، هر دو نوع سنگ ملاحظه شده‌اند.

برای این منظور با استفاده از برنامه مدل‌سازی عددی پیش‌رو بهبود یافته در حوزه فرکانس، در محیط نرم‌افزار MATLAB پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی فرضی به‌شکل مکعب مستطیل (معرف کوپ‌های سنگی) شامل لایه‌بندی‌های ظریف و ناپیوستگی در جهات مختلف، شبیه‌سازی شد تا از نتایج آن‌ها برای تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی استفاده شود. به‌منظور انطباق بیش‌تر نتایج شبیه‌سازی با واقعیت، مقادیر ویژگی‌های الکتریکی محیط‌ها واقعی انتخاب شده است. در جدول ۱ برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد (محیط‌های) بررسی شده در تحقیق حاضر شامل گذردهی دی‌الکتریک نسبی، هدایت الکتریکی و سرعت سیر امواج EM (نوعاً در محدوده فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز) آورده شده است.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد بررسی شده [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]

ماده (محیط)	گذردهی دی‌الکتریک نسبی	هدایت الکتریکی (mS/m)	سرعت موج EM (m/ns)
هوا	۱	۰	۰/۳
سنگ آهک نوع ۱	٤	۰/۵	۰/۱۲
سنگ آهک نوع ۲	٦	۱/۲۵	۰/۱۰
سنگ آهک نوع ۳	۸	۲	۰/۰۹
گرانیت	۵	۰/۰۵	۰/۱۳
مرمر	۸/۳	$۱۰^{-۵}$	۰/۱۱
تراورتن	۸–٦	$۱۰^{-۱۰}$–$۱۰^{-۱٤}$	۰/۱۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

۳-۱. مدل‌سازی پاسخ GPR زمین لایه‌ای

هدف از شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای[1] به‌منظور کاربرد در زمینه ارزیابی بلوک‌های سنگ ساختمانی، تعیین لایه‌بندی‌های ظریف و ضخامت آن‌ها درون بلوک‌های سنگی است.

شناسایی لایه‌بندی‌های ظریف و تعیین ضخامت آن‌ها

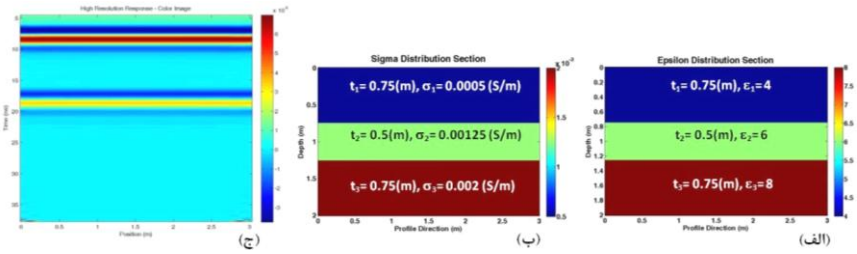
مدل‌های هندسی و فیزیکی (مقاطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی) به‌ترتیب در شکل ٤ الف و ب و پاسخ GPR یک مدل زمین سه‌لایه‌ای در شکل ٤ ج نشان داده شده است. در این مدل سه‌لایه‌ای در واقع هر سه لایه از جنس سنگ آهک است و تفاوت‌های جزئی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ باعث ایجاد لایه‌بندی‌های ظریف درون بلوک سنگ شده است. ابعاد مدل ۲×۳ متر، میزان فرکانس مرکزی موج EM ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی تمام لایه‌ها در مدل برابر با مقدار نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد است.

نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که پاسخ GPR مرزهای مشترک افقی لایه‌ها، مطابق انتظار به‌صورت رخدادهای خطی افقی است. موقعیت رخداد خطی افقی بالایی مربوط به مرز مشترک لایه‌های اول و دوم و رخداد خطی افقی پایینی مربوط به مرز مشترک لایه‌های دوم و سوم است. به‌عبارت دیگر در این مورد پاسخ مرز لایه‌بندی‌های ظریف درون بلوک سنگی به‌وضوح قابل شناسایی است. ضخامت هریک از لایه‌های ظریف نیز برابر با حاصل ضرب سرعت سیر موج EM درون لایه ظریف در مدت زمانی است که موج EM فاصلهٔ عمودی بین سقف و کف آن لایه ظریف را طی می‌کند.

در عمل معمولاً به‌دلیل ناهمگنی لایه‌های ظریف، وجود انواع مختلف نوفه‌ها به‌ویژه نوفه نوع حلقوی شدن[2] (که اغلب به‌صورت رخدادهای افقی و تناوبی همدوس[3] یا دارای پیوستگی ظاهر می‌شود [۲۹]) و بازتاب‌های چندگانه، علاوه بر پاسخ مرز لایه‌ها درون لایه‌های ظریف، یک سری پاسخ‌ها به‌صورت رخدادهای خطی افقی وجود دارند.

1. Layered earth
2. Ringing noise
3. Coherent

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]



شکل ٤. الف) مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک، ب) مقطع توزیع هدایت الکتریکی و ج) پاسخ GPR یک مدل زمین سه‌لایه‌ای که هر سه لایه، آهکی هستند (σ هدایت الکتریکی برحسب زیمنس بر متر و t ضخامت لایه بر حسب متر است).

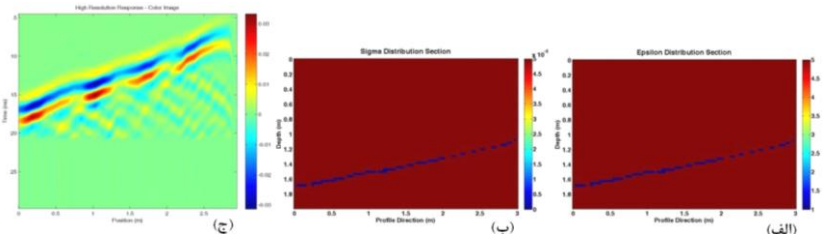
۳-۲. مدل‌سازی پاسخ GPR بلوک سنگی درزه‌دار

- مدل‌سازی پاسخ GPR کوپ گرانیتی

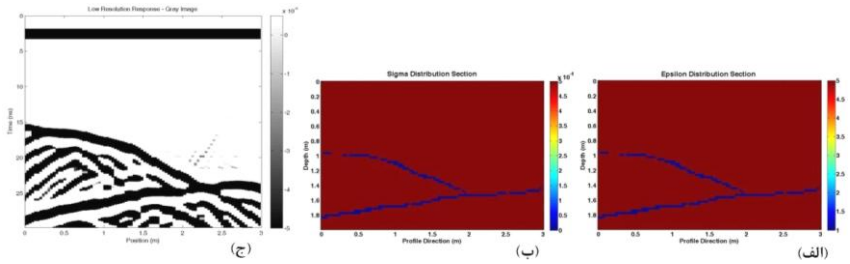
مدل‌های هندسی و فیزیکی (مقاطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی) به‌ترتیب در شکل ۵ الف و ب و پاسخ GPR یک منشور دوبعدی معرف مقطع دوبعدی یک کوپ سنگی در شکل ۵ ج نشان داده شده است که یک ناپیوستگی سرتاسری توخالی (به‌رنگ آبی) درون آن وجود دارد. ابعاد این مدل ۲×۳ متر، میزان فرکانس مرکزی موج EM ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز، محیط میزبان مدل از جنس گرانیت و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی محیط میزبان برابر با مقدار نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد است. در این شکل پاسخ GPR یک ناپیوستگی تقریباً خطی مایل به‌صورت رخداد خطی مایل، به‌وضوح قابل مشاهده است.

مدل‌های هندسی و فیزیکی (مقاطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی) به‌ترتیب در شکل ٦ الف و ب و پاسخ GPR منشور دوبعدی گرانیتی شامل دو ناپیوستگی متقاطع توخالی (به‌رنگ آبی) نشان داده شده است. در این شکل بازتاب‌های چندگانه زیادی در زیر پاسخ ناپیوستگی‌ها مشاهده می‌شود که شدت دامنه بازتاب آن‌ها به مراتب کم‌تر از شدت پاسخ ناپیوستگی‌ها است. لازم به ذکر است به‌دلیل اختلاف اندک ویژگی‌های الکتریکی محیط میزبان (گرانیت) با ناپیوستگی (هوا) و نمایش هرچه بهتر تمایز رنگی پاسخ، در شکل ٦ ج پاسخ مقیاس خاکستری GPR نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]



شکل ۵. الف) مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک، ب) مقطع توزیع هدایت الکتریکی و ج) پاسخ GPR مدل منشور دوبعدی گرانیتی شامل یک ناپیوستگی سرتاسری



شکل ٦. الف) مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک، ب) مقطع توزیع هدایت الکتریکی و ج) پاسخ GPR مدل منشور دوبعدی گرانیتی شامل دو ناپیوستگی متقاطع

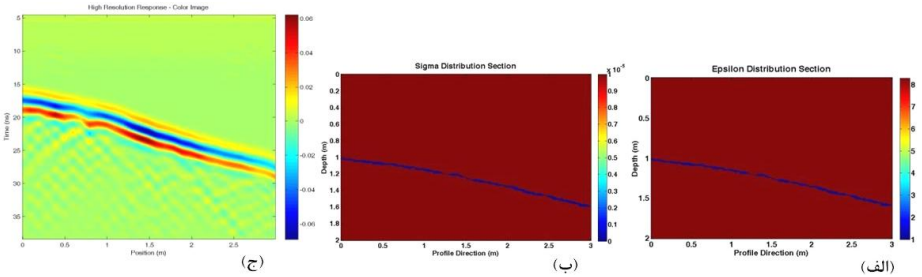
- مدل‌سازی پاسخ GPR بلوک مرمر

مدل‌های هندسی و فیزیکی (مقاطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی) به‌ترتیب در شکل ۷ الف و ب و پاسخ GPR یک منشور دوبعدی در شکل ۷ ج نشان داده شده است که یک ناپیوستگی سرتاسری توخالی (به‌رنگ آبی) درون آن وجود دارد. ابعاد این مدل ۲×۳ متر، میزان فرکانس مرکزی موج EM ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز، محیط میزبان مدل از جنس مرمر و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی محیط میزبان برابر با مقدار نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد است. در این شکل پاسخ GPR یک ناپیوستگی تقریباً خطی شیب‌دار، به‌صورت رخداد خطی مایل مشاهده می‌شود.

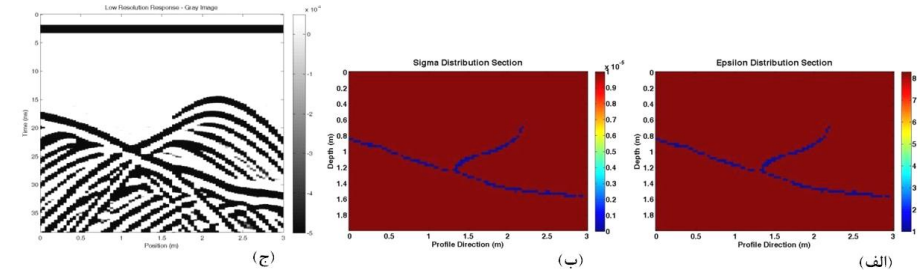
مدل‌های هندسی و فیزیکی (مقاطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی) به‌ترتیب در شکل ۸ الف و ب و پاسخ GPR در شکل ۸ ج به‌صورت یک منشور دوبعدی از جنس مرمر شامل دو ناپیوستگی متقاطع توخالی (به‌رنگ آبی) نشان داده شده است. در این شکل بازتاب‌های چندگانه زیادی در زیر پاسخ ناپیوستگی‌ها مشاهده می‌شود که شدت دامنه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

بازتاب آن‌ها به مراتب کم‌تر از پاسخ ناپیوستگی‌ها است. در این مورد نیز برای نمایش هرچه بهتر تمایز رنگی پاسخ، در شکل ۸ ج پاسخ مقیاس خاکستری GPR نشان داده شده است.



شکل ۷. الف) مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک، ب) مقطع توزیع هدایت الکتریکی و ج) پاسخ GPR مدل منشور دوبعدی از جنس مرمر شامل یک ناپیوستگی سرتاسری



شکل ۸. الف) مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک، ب) مقطع توزیع هدایت الکتریکی و ج) پاسخ GPR یک مدل منشور دوبعدی از جنس مرمر شامل دو ناپیوستگی متقاطع

۳-۳. عدم قطعیت‌های روش GPR

با وجود طیف وسیع کاربردهای روش GPR به‌ویژه در زمینهٔ ارزیابی و بازرسی‌های غیرمخرب، این روش نیز همانند سایر روش‌های ارزیابی، دارای محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌هایی در کاربرد است. مهم‌ترین محدودیت این روش عمق تجسس نسبتاً کم‌تر آن، در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی است و معمولاً برای ارزیابی معادن سنگ ساختمانی با ضخامت بیش‌تر از ۱۰ متر، تفکیک‌پذیری پاسخ به‌شدت پایین می‌آید. عمق نفوذ این روش برای ارزیابی لایه‌ها یا بلوک‌های سنگی دارای هدایت الکتریکی بالا مثلاً سازندهای مرطوب به‌ویژه در صورت وجود آب شور در سازند و نیز در صورت وجود سازنده‌های رسی یا سیلتی مرطوب و یا وجود ترکیبات آهن در سنگ، به‌شدت کاهش می‌یابد. هم‌چنین در صورت وجود

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

دسته درزه و شکاف‌های افقی به موازات یک‌دیگر و زیر هم، مدفون در درون سنگ، معمولاً اثر درزه و شکاف‌های رویی واقع در اعماق کم، موجب محو شدن پاسخ درزه و شکاف‌های موجود در اعماق بیش‌تر می‌شود و در این مورد درزه و شکاف‌های کوچک‌تر، کم‌تر در پاسخ GPR نمایان می‌شوند. از جمله قطعیت نداشتن‌های دیگر این روش، ناهمگنی زیاد سنگ‌ها، تغییرات زیاد و وجود پیچیدگی‌هایی در ویژگی‌های الکتریکی ترکیبات آن‌ها و ناتوانی روش و دستگاه‌ها به تشخیص تأثیر این فاکتورهاست.

به‌طورکلی محدودیت‌ها و قطعیت نداشتن‌های عملی روش GPR در خصوص ارزیابی معادن، بلوک‌ها و قواره‌های سنگ ساختمانی را می‌توان در سه بخش مدل‌سازی عددی داده‌ها، عملیات برداشت صحرایی و تفسیر نتایج خلاصه کرد. در زمینهٔ بررسی‌های سنگ ساختمانی از طریق مدل‌سازی عددی، نیاز به تولید پاسخ تعداد زیادی مدل مصنوعی در فرایند شبیه‌سازی است که این کار بعضاً وقت‌گیر و خارج از حوصله است. به‌دلیل اطلاع نداشتن از مقادیر دقیق ویژگی‌های الکتریکی ترکیبات سازنده و پیچیدگی زیاد سنگ‌های غیرهمگن، و نیز وجود محدودیت‌های گوناگون در تمامی الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی، اعمال تمامی شرایط واقعی زمین در مدل، امکان‌پذیر نیست. هم‌چنین فرآیند مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدل‌های مصنوعی متناظر با سنگ‌های مرطوب، بسیار زمان‌بر است. هم‌چنین انواع نوفه‌ها در مدل واقعی زمین وجود دارد که اعمال تمامی آن‌ها در مدل‌سازی مصنوعی ممکن نیست. در زمینه عملیات برداشت صحرایی داده‌های GPR با توجه به ارتباط بین میزان فرکانس مرکزی سیستم‌های اندازه‌گیری GPR، عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری، و با توجه به تنوع مسائل بررسی‌های سنگ‌های ساختمانی اعم از معادن، بلوک‌ها و قواره‌های سنگ با ابعاد، جنس و ترکیبات مختلف، نیاز به طیفی از تجهیزات با فرکانس‌های گوناگون است که معمولاً تمامی آن‌ها در اختیار نیستند. در ارتباط با تجزیه و تحلیل داده‌ها و تفسیر تصاویر GPR حاصل از برداشت سنگ‌های ساختمانی، معمولاً در مورد سنگ‌هایی مانند تراورتن که اغلب درجه تخلخل بالایی دارند، در صورت تأثیر هم‌زمان چند عامل همانند تخلخل بسیار زیاد، درزه و شکاف و شکستگی، رطوبت، تغییر دانه‌بندی و غیره، پاسخ قدری پیچیده شده و در نتیجه تشخیص نوع عامل تأثیرگذار و میزان تأثیرگذاری آن بر پاسخ، مشکل است. البته در مورد سنگ‌هایی همانند گرانیت، مرمریت و مرمر این موضوع کم‌تر نمود پیدا می‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

مطالعه موردی

در پژوهش حاضر کنترل کیفیت به‌روش GPR از طریق ارزیابی بلوک‌های استخراجی تراورتن مجتمع معدنی حاجی‌آباد محلات انجام شده است. سنگ‌های ساختمانی عمده محدودهٔ محلات را سنگ‌های آهکی تشکیل می‌دهند که در این محدوده، تراورتن‌ها به‌وفور یافت می‌شوند [۳۰].

مجتمع معدنی تراورتن حاجی‌آباد شامل ۱۳ کارگاه استخراجی بوده است که همگی در یک محل قرار دارد و از نظر نوع ماده معدنی و ویژگی‌های معدنی، شرایط تقریباً مشابهی دارند [۸]. بلوک‌های سنگی تراورتن اغلب غیرهمگن و لایه‌بندی ظریف دارند. به‌دلایل گوناگون از جمله شرایط، خصوصیات، نوع و جنس کانسار، به‌روز نبودن دستگاه‌ها و تکنولوژی استخراج، مقدار باطله سنگ‌ها در معادن تراورتن در مرحلهٔ استخراج، بین ۷۰ تا ۹۰ درصد است [۸]. علاوه براین تعدادی از بلوک‌های استخراج شده نیز در مرحلهٔ برش و تولید اسلب، زیر اره‌های برش متلاشی یا شکسته می‌شوند. بررسی معادن سنگ ساختمانی و واحدهای سنگ‌بری و فرآوری سنگ در استان مرکزی به‌عنوان یکی از پتانسیل‌های سنگ کشور نشان می‌دهد که علاوه بر آن که این صنعت در تمامی زمینه‌ها نیاز به بهینه‌سازی دارد [۸] در زنجیرهٔ تولید سنگ، حلقه کنترل کیفیت به‌ویژه در مرحلهٔ بهره‌برداری مفقود شده است.

شکل ۹ نمایی از بلوک‌های استخراجی مجتمع معدنی حاجی‌آباد و ارزیابی آن‌ها با روش GPR قبل از ورود به واحدهای سنگ‌بری و فرآوری سنگ ساختمانی را نشان می‌دهد. عملیات برداشت GPR در محدودهٔ بررسی شده، با استفاده از سیستم GPR ساخت شرکت مالا[1] مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار[2] با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز ([۳۱])، فاصله آنتنی ۰/۵ متر و فواصل بین تریسی ۲ سانتی‌متر، با روش پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت تک‌حالت انجام شد. پنجره زمانی (عمق تجسس) و فاصلهٔ نمونه‌برداری زمانی (فرکانس نمونه‌برداری) نیز با استفاده از امکانات دستگاه برداشت و براساس وضعیت بلوک‌های بررسی شده، به‌طور بهینه انتخاب و تنظیم شدند.

1. MALA
2. Shielded

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

شکل ۹. الف) نمایی از بلوک‌های استخراجی تراورتن مجتمع معدنی حاجی‌آباد محلات و ب) ارزیابی آن‌ها با روش GPR

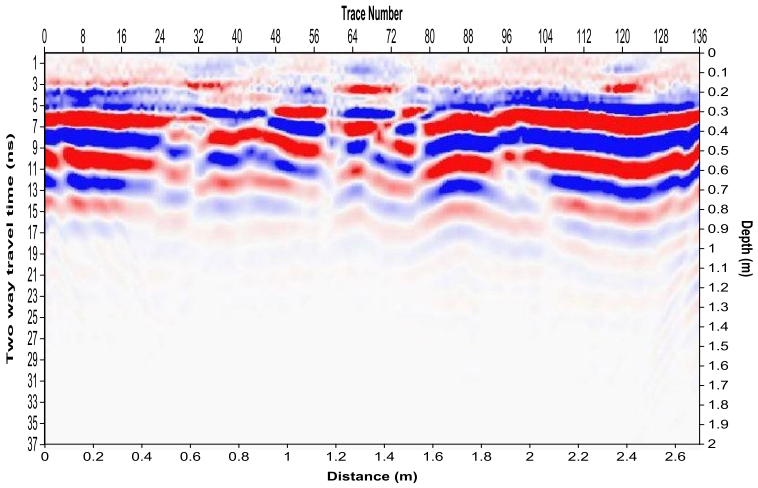
تعداد ۳۷ کوپ استخراجی با روش GPR ارزیابی شد. در مراحل برداشت میزان سرعت سیر امواج EM در محیط، براساس جنس مواد تشکیل‌دهنده به‌طور متوسط m/ns ۰/۱۱ درنظر گرفته شد. به‌منظور ارزیابی کامل بلوک سنگی، بهتر است که برداشت GPR دست‌کم در دو وجه آن صورت گیرد؛ در هر صورت با توجه به نوع سیستم GPR در دسترس، برداشت در یکی از وجوه کوپ‌ها و در دو راستای عمود برهم انجام شد که به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نگاشت راداری دو مورد شاخص از آن‌ها آورده شده است. به‌منظور پردازش، تحلیل و تفسیر داده‌ها، از نرم‌افزارهای Ground Vision و Radexplorer استفاده شد. نرم‌افزار اول برای نمایش نگاشت‌های راداری و نرم‌افزار دوم برای انجام تصحیحات و پردازش‌های مورد نیاز به‌کار می‌رود. مهم‌ترین عملیات‌های پیش‌پردازش و پردازشی اعمال شده بر داده‌ها برای ارائه مقاطع نهایی، شامل تصحیح زمان صفر[1]، فیلترسازی دی‌واو[2] (حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده‌ها)، حذف شیفت جریان مستقیم[3]، اعمال فیلترهای میان‌گذر[4] از جمله باترورث[5]، حذف متوسط[6]، حذف زمینه[7] و انواع تقویت دامنه امواج بازگشتی با عمق[8] است.

در شکل ۱۰ نگاشت راداری برداشت شده در طول یک بلوک تراورتن به طول ۲/۷ متر و به ضخامت ۲ متر مشاهده می‌شود. تغییر جنس لایه‌بندی (وجود لایه‌بندی ظریف) از عمق حدود ۰/۲ متر تا عمق حدود ۰/۹ متری در این شکل به‌وضوح قابل مشاهده است.

1. Time zero correction
2. Dewow
3. DC shift removal
4. Band pass
5. Butterworth
6. Subtract mean
7. Background removal
8. Gain

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

لایه‌بندی‌های موجود در این بلوک به تغییرات درجه دانه‌بندی، میزان تـراکم، میـزان رطوبـت و میزان ناخالصی (درجه ناهمگنی) سنگ مربوط می‌شود.

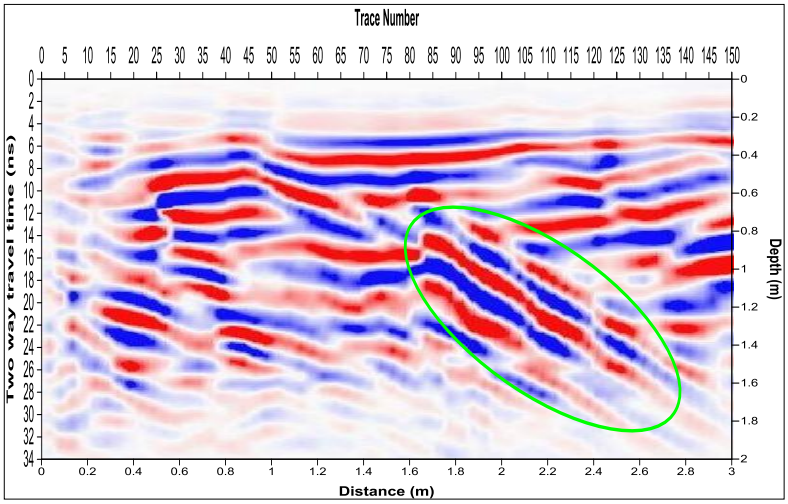


شکل ۱۰. نگاشت راداری برداشت شده در طول یک بلوک تراورتن با نمایش لایه‌بندی ظریف در آن

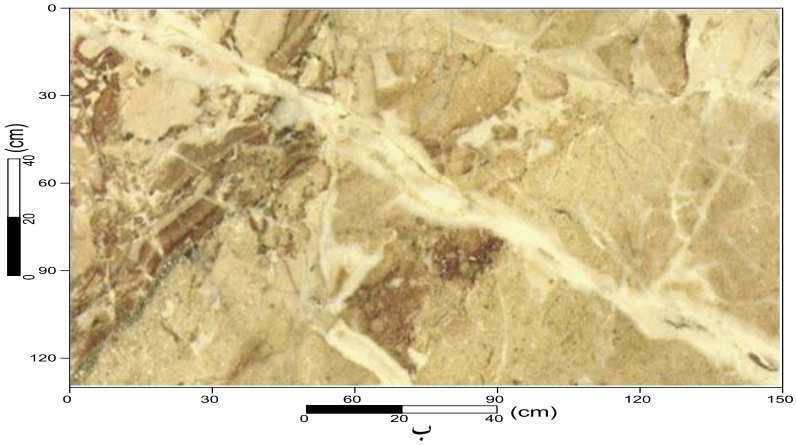
در شکل ۱۱ نیز نگاشت راداری برداشت شده در طول یک بلوک تراورتن ماسه‌ای به طول ۳ متر و به ضخامت ۲ متر مشاهده می‌شـود. در ایـن شـکل وجـود یـک ناپیوسـتگی مایـل بـا گسترش طولی نسبتاً زیاد در سمت راست تصویر (بیضی سبزرنگ) بـه‌وضـوح قابـل مشـاهده است.

افزودنی است که تفسیرهای انجام شده در پژوهش حاضر براساس نتایج شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیش‌رو مدل‌های مصنوعی ایجاد شده در این مقاله و نیز تجربیات علمی و عملی مولف در شناسایی پاسخ GPR اهداف مختلف، انجام گرفته است. به‌طورکلی روش اصولی کنترل و اعتبارسنجی نتایج برداشت GPR و تفسیرهای آن‌ها در مورد بلوک‌های سنگ ساختمانی، حفر چال در بلوک یا برش آن به‌وسیلهٔ اره‌های برش است. اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر در مورد یکی از قواره‌ها که درزه اریب بزرگی در آن پیش‌بینی شده بود، صورت گرفت و وجود درزه بزرگ در زیر اره برش در کارخانه سنگ‌بری، به اثبات رسید (شکل ۱۱ ب). در هر صورت روش GPR در شناسایی ناپیوستگی‌ها و درزه‌های درون بلوک‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]



الف



ب

شکل ۱۱. الف) نگاشت راداری برداشت شده در طول یک بلوک تراورتن ماسه‌ای شامل یک ناپیوستگی مایل (بیضی سبز رنگ)، ب) تصویر واقعی یکی از اسلب‌های بریده شده از قواره‌های این بلوک سنگی

سنگی بسیار متخلخل دارای حفرات بسیار زیاد هم‌اندازه و نزدیک به‌هم، به‌ویژه زمانی که بلوک سنگی، مرطوب و یا کاملاً اشباع از آب باشد، ناتوان است. به‌عبارت‌دیگر هرچه سنگ متراکم‌تر و خشک‌تر باشد، شناسایی ناپیوستگی‌های درون آن آسان‌تر است. زیرا امواج EM در حضور رطوبت و رس‌ها به‌سرعت تضعیف می‌شوند. هم‌چنین معمولاً وجود انواع مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

نوفه‌ها در برداشت‌های واقعی GPR موجب می‌شود که ناپیوستگی‌های ساختاری کوچک با ناپیوستگی‌های برجسته کم‌عمق و بازتاب‌های چندگانه، پوشش داده شده و قابل شناسایی نباشند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از روش GPR برای تصویر کردن بلوک‌های سنگ ساختمانی با هدف شناسایی لایه‌بندی‌های ظریف و ناپیوستگی‌های درون آن‌ها استفاده شد. برای این منظور ابتدا با استفاده از مدل‌سازی عددی پیش‌رو به روش تفاضل محدود دوبعدی بهبودیافته در حوزهٔ فرکانس، پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی فرضی به‌صورت منشور دوبعدی (معرف کوپ‌های سنگی) شامل لایه‌بندی‌های ظریف و ناپیوستگی در جهات مختلف، شبیه‌سازی شد تا نتایج آن‌ها برای ارزیابی بلوک‌های سنگ ساختمانی استخراجی قبل از مرحله فرآوری سنگ، استفاده شود.

نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند که در نگاشت‌های راداری شبیه‌سازی شده، پاسخ مرز لایه‌بندی‌های ظریف و ناپیوستگی‌های درون بلوک‌های سنگی به‌وضوح قابل شناسایی است. البته در این مورد بازتاب‌های چندگانه زیادی در زیر پاسخ ناپیوستگی‌ها مشاهده می‌شود که شدت دامنه بازتاب آن‌ها به مراتب کم‌تر از شدت پاسخ ناپیوستگی‌ها است.

از نتایج مدل‌سازی پیش‌رو به‌منظور ارزیابی و کنترل کیفیت بلوک‌های استخراجی تراورتن مجتمع معدنی حاجی‌آباد محلات به‌عنوان مطالعه موردی پژوهش حاضر به‌کمک روش GPR استفاده شد. به‌کارگیری روش GPR برای شناسایی لایه‌بندی‌های ظریف، تعیین ضخامت لایه‌ها و آشکارسازی انواع ناپیوستگی‌های درون ۳۷ بلوک سنگی تراورتن و در نتیجه تعیین کیفیت آن‌ها در این مطالعه موردی، نشان می‌دهد که روش GPR برای آشکارسازی لایه-بندی‌های ظریف و الگوهای ناپیوستگی‌های ساختاری برجسته، درون بلوک‌های سنگ ساختمانی، مناسب است. البته ناپیوستگی‌های ساختاری کوچک واقع در زیر ناپیوستگی‌های برجسته کم‌عمق، معمولاً با انواع مختلف نوفه‌ها و بازتاب‌های چندگانه پوشش داده شده و قابل شناسایی نمی‌باشند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

در عمل برداشت‌های GPR برای ارزیابی انواع معادن و بلوک‌های سنگ ساختمانی از نوع گرانیت‌ها و سنگ‌های آهکی و دولومیتی شامل انواع مرمرها، تراورتن‌ها، سنگ‌های چینی و مرمریت‌ها مفید است. مسائل بررسی شده در این پژوهش از جمله امور متداولی است که مهندسین زمین‌شناسی و معدن همواره با آن‌ها سروکار داشته و روش غیرمخرب GPR برای این مقاصد یک روش سریع، دقیق و کم هزینه است. امروزه روش GPR به‌دلیل سرعت عمل بالا، هزینه نسبتاً پایین و نتایج مطلوب، به‌عنوان یک روش آزمون غیرمخرب برای ارزیابی و کنترل کیفیت بلوک‌های سنگ ساختمانی، قابلیت اعتماد و کارآیی زیادی دارد. در هر صورت برای دست‌یابی به جزئیات بیش‌تر و واقع‌گرایانه‌تر نیاز به انجام مدل‌سازی پیش‌رو سه‌بعدی و برداشت‌های میدانی سه‌بعدی با شبکه‌های بسیار متراکم و آنتن‌های با فرکانس‌های بیش‌تر همانند ۳۰۰ تا ۵۰۰ مگاهرتز است.

منابع

۱. نبیان ا.، فرهادیان م.ب.، برادران م.، حمیدی انارکی غ.، "سنگ‌های تزئینی و نما»، وزارت معادن و فلزات- معاونت اکتشافی و معدنی" (۱۳۷۱).

۲. فتحی ی.، "شناسایی مزیت‌های نسبی و اولویت‌های بازارهای هدف صادرات سنگ‌های تزئینی ایران"، مؤسسهٔ مطالعات و پژوهش‌های بازرگانی (۱۳۷۸).

۳. فهیمی‌فر ج.، "تعیین بازارهای هدف سنگ‌های تزئینی"، مؤسسهٔ مطالعات و پژوهش‌های بازرگانی (۱۳۸۱).

٤. سایت اینترنتی WWW.Omranbamgostaran.com.

۵. احمدی ر.، "چشم انداز آینده صنعت سنگ ساختمانی ایران در مقایسه با کشورهای صاحب این صنعت مانند ایتالیا، چین، هند و ترکیه"، نشریهٔ سنگ، معدن و صنایع وابسته ایران، چهارمین نمایشگاه سنگ، معدن و صنایع وابسته ایران، نیمور محلات (۱۳۹۰).

٦. فهیمی‌فر ج.، "بازار جهانی سنگ‌های تزئینی و سهم صادراتی ایران"، انتشارات مؤسسهٔ مطالعات و پژوهش‌های بازرگانی (۱۳۷٦).

۷. وزارت صنایع و معادن، "سنگ»، فصلنامه سنگ‌های تزئینی ایران"، شمارهٔ ۲۲ (۱۳۷۹).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

۸. احمدی ر.، "راهکارهای بهبود تکنولوژی تولید سنگ به‌منظور افزایش سهم صادرات سنگ فرآوری شده در استان مرکزی"، تهران، معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۷).

9 Porsani J. L., Sauck W. A., Ju´nior A. O. S., "GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil", Journal of Applied Geophysics, 58, (2006) 177-187.

10 Luodes H., "Natural stone assessment with ground penetrating radar", Estonian Journal of Earth Sciences, 57(3) (2008) 149-155.

11 Kadiglu S., "Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization", Journal of Applied Geophysics, 64, (2008) 109-114.

12 Arosio D., Munda S., Zanzi L., "Quality control of stone blocks during quarrying activities", 14th International conference on Ground Penetrating Radar (GPR), June 4-8, Shanghai, China @ ISBN 978-1-4673-2663-6 (2012).

13 Rey J., Martínez J., Vera P., Ruiz N., Cañadas F., Montiel V., "Ground-penetrating radar method used for the characterisation of ornamental stone quarries", Construction and Building Materials, 77 (2015) 439-447.

14 Arosio D., "Rock fracture characterization with GPR by means of deterministic deconvolution", Journal of Applied Geophysics 126 (2016) 27-34

۱۵. احمدی ر.، غلامی ا.، "بهینه‌سازی در صنعت سنگ ساختمانی به‌منظور افزایش سهم صادرات با نگرشی بر وضعیت استان مرکزی"، سومین همایش سراسری سنگ‌های ساختمانی، ٦ خرداد، محلات، دانشگاه پیام نور محلات (۱۳۸۸) ١٤-۲.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

۱۶. احمدی ر.، فتحیان‌پور ن.، نوروزی غ.ح.، "کاربردهای ژئوتکنیکی روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در شناسایی پارامترهای فیزیکی و هندسی ناهمگنی‌های زیرسطحی"، اولین کنفرانس مهندسی الکترومغناطیس ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۹۱).

۱۷. احمدی ر.، فتحیان‌پور ن.، نوروزی غ.ح.، "تخمین مشخصات هندسی لوله‌های انتقال آب و فاضلاب مدفون با استفاده از مدل ریاضی و شبیه‌سازی پاسخ داده‌های رادار نفوذی زمین (GPR)"، همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی کرمان (۱۳۹۱).

۱۸. احمدی ر.، فتحیان‌پور ن.، نوروزی غ.ح.، "مطالعهٔ ژئوتکنیکی بنای تاریخی سی‌وسه‌پل اصفهان با استفاده از روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی زمین"، همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری، تبریز (۱۳۹۳).

۱۹. احمدی ر.، فتحیان‌پور ن.، نوروزی غ.ح.، "شناسایی نقاط ضعف پی سنگ صحن بنای فرهنگی-تاریخی مسجد امام اصفهان با استفاده از روش رادار نفوذی زمین"، اولین همایش ملی رادار نفوذی به زمین، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۹۳).

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

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

22 Jol H. M., "Ground-Penetrating Radar theory and applications", First edition, Elsevier Science, (2009) 543 Pages.

23 Sadiku M. N. O., "Numerical techniques in electromagnetic", second edition, Boca Raton London New York Washington, D.C. CRC press (2001).

24 Irving J., Knight R., "Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB", Computers & Geosciences, Vol 32, (2006) 1247-1258.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]

۲۵. احمدی ر.، فتحیان پور ن.، نوروزی غ.ح.، "بهبود مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به‌روش عددی تفاضل متناهی"، مجله ژئوفیزیک ایران، (۳) ۸، (۱۳۹۳) ۱۱٤-۱۳۰.

26 Davis J. L., Annan A. P., "Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy", Geophysical Prospecting, 37, (1989) 531-551.

۲۷. سایت اینترنتی http://gprrental.com/gpr-velocity-table-analysis.

28 Olhoeft G. R., "Tables of room temperature electrical properties for selected rocks and minerals with dielectric permittivity statistics", United states geological survey, Denver, Colorado 80225, (1979) 24 pages.

29 Kim J. H., Cho S. J., Yi M. J., "Removal of ringing noise in GPR data by signal processing", Geosciences Journal, Vol. 11, No. 1, (2007) 75-81. RADPRO/GPR V.3.0 User's Guide.

۳۰. احمدی ر.، "بررسی و مطالعه وضعیت معادن و پتانسیل‌های معدنی سنگ‌ساختمانی استان مرکزی"، تهران، معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۲).

۳۱. سایت اینترنتی WWW.Malags.com.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.2.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.1]