



مقاله مروری

مروری بر استفاده از تحلیل و پردازش امواج آکوستیک در عملیات حفاری سنگ

مجتبی یاری^{۱*}، راحب باقرپور^۲، مهرداد خشوعی^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، همدان، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت: فروردین ۱۴۰۱، پذیرش: آبان ۱۴۰۱)

چکیده

امروزه با پیشرفت فناوری و توسعه شهرنشینی نیاز به مواد معدنی فلزی و غیرفلزی و سنگ‌های ساختمانی به‌طور روزافزون رو به افزایش است. از طرفی یکی از اصلی‌ترین عملیات در چرخه تولید مواد معدنی، حفاری سنگ‌ها است، بنابراین استفاده از فناوری‌های نوین در این عملیات به منظور بهینه‌سازی عملیات، افزایش تولید و کاهش هزینه‌های عملیات امری بسیار ضروری است. یکی از این فناوری‌های نوین، استفاده از امواج آکوستیک است که کاربرد این روش‌ها افزایش چشمگیری در پروژه‌های حفاری داشته است. در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در زمینه تحلیل و پردازش امواج آکوستیک در حفاری سنگ‌ها انجام شده است که می‌توان این مطالعات را به دو بخش مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی و مقیاس صحرایی و واقعی دسته‌بندی نمود. همچنین از این امواج برای اهدافی همچون پیش‌بینی و محاسبه مواردی مانند خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، رفتار سنجی عملیات مانند رفتار سنجی میزان سایش و تشخیص مانند تشخیص زمان شکستن سرشته‌های حفاری استفاده شده است. در این مقاله مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد پردازش امواج آکوستیک در عملیات حفاری در دو مقیاس آزمایشگاهی و صحرایی انجام شده است و در نهایت مزایا و چالش‌ها و کاربرد تحلیل و پردازش این امواج در عملیات حفاری و مهندسی معدن مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است. از بررسی‌های انجام شده می‌توان به این نتیجه رسید که از پردازش امواج آکوستیک در حین عملیات حفاری به‌عنوان یک روش دقیق، غیر مخرب، ارزان و با قابلیت اطمینان بالا برای اهداف مختلفی همچون کاهش هزینه‌های حفاری، بهینه‌سازی عملیات و انتخاب پارامترهای عملیاتی بهینه متناسب با سنگ تحت حفاری بهره برد.

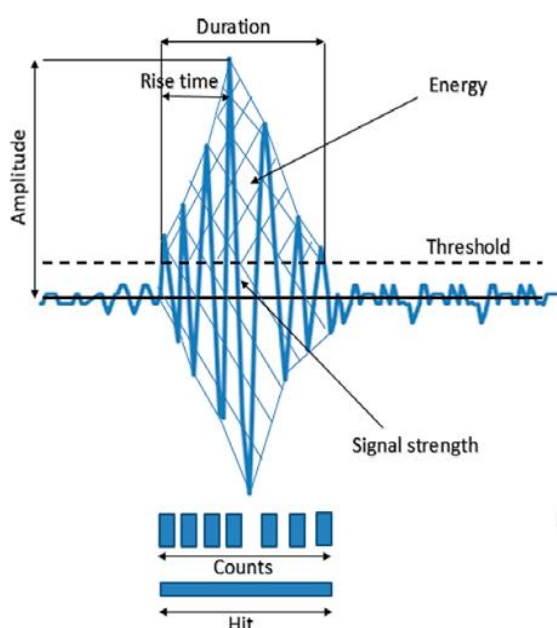
کلمات کلیدی

حفاری سنگ، امواج آکوستیک، پردازش سیگنال، مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها.

*عهده‌دار مکاتبات: m.yari.academic@gmail.com

۱- مقدمه

تحلیل امواج صوتی به‌عنوان یک روش که اکثراً برای تشخیص، پیش‌بینی و یا رفتار سنجی فرایندها و یا پدیده فیزیکی به‌کاربرده می‌شود. انتشار آکوستیک توسط جامعه فنی به‌عنوان ابزاری مفید و آزمایشی غیر مخرب پذیرفته‌شده است که می‌توان در کنار عملیات اصلی بسیار کارآمد باشد. استخراج ویژگی‌ها و خصوصیات سیگنال‌های آکوستیک تولیدشده در فرایندهای مختلف یکی از چالش‌های پیش رو در پردازش سیگنال‌های آکوستیک است. برای این موضوع نیاز به پردازش و تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرهای مختلف، ابزارهای سنجش مانند صداسنج^۲ و یا میکروفون‌های مخصوص مثل میکروفون‌های کانونی است. استفاده از روش‌های مبتنی بر پارامتر ازجمله روش‌های مفید برای استخراج اطلاعات از موج آکوستیک تولیدشده از منبع صوتی است. تشخیص و به کار بردن صحیح پارامترهای امواج آکوستیک ازجمله مهم‌ترین مراحل پردازش سیگنال‌های آکوستیک است. پارامترهای متداولی که از یک موج آکوستیک استخراج می‌شود در شکل ۱ نشان داده‌شده است. همچنین خلاصه‌ای از پارامترهای امواج آکوستیک در جدول ۱ معرفی و توصیف شده است.



شکل ۱: نمونه‌ای از پارامترهای رایج که از یک موج صوتی می‌توان استخراج نمود [۴].

عملیات حفاری سنگ یک فرایند پایه در استخراج سنگ و مهندسی معدن و یک بخش کلیدی برای تکمیل چرخه‌ی معدن کاری به شمار می‌آید. بررسی و پیش‌بینی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های موردنظر مهندسين و متخصصين در زمینه‌های مختلف مهندسی معدن به‌خصوص عملیات حفاری است. همچنین پیش‌بینی موارد مختلفی همچون میزان سایش سر مته [۱]، پیش‌بینی نرخ نفوذ در حفاری سنگ‌ها [۲]، انتخاب صحیح مواد آتشباری متناسب با سنگ و غیره برای پیش‌بینی عملکرد تجهیزات موردنیاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عملیات و فرایندهای مهندسی در علوم زمین و معدن کاری یک یا چندین خروجی به‌عنوان محصول تولیدی در حالات مختلف دارند که برخی از این خروجی‌ها موردتوجه و قابل‌اندازه‌گیری و برخی دیگر از نتایج جانبی و گاهی بدون کاربرد هستند. ازجمله نتایج یا محصولات جانبی که اکثر فرایندها و یا ابزارها به همراه دارند، امواج صوتی هستند. استفاده از امواج آکوستیک یا صوتی در سال‌های اخیر به‌صورت برداشت، ثبت و تحلیل برای کاربردهای مختلف، با به کار بردن تکنیک‌های مختلف بسیار موردتوجه قرار گرفته است. تکنیک‌های انتشار آکوستیک ازجمله آزمایش‌های دقیق است که می‌تواند به‌منظور رفتار سنجی، پیش‌بینی خواص مواد یا شرایط تجهیزات مانند پیش‌بینی نرخ نفوذ، انتخاب ابزار برش و حفاری مناسب و یا تشخیص یک پدیده به کار آید. در این مقاله مروری بر مطالعات صورت گرفته در کاربرد انتشار آکوستیک و پردازش سیگنال‌های صوتی حاصل از عملیات و فرایندهای مورداستفاده مهندسی معدن و حفاری سنگ‌ها انجام شده است.

۲- انتشار امواج صوتی^۱

امواج آکوستیک یا صوتی به‌طور کلی به‌عنوان امواج استرس یا فشاری تولیدشده در مواد توسط انرژی آزادشده حاصل از تغییر شکل و یا شکست تعریف شده است. امواج فشاری از طریق مواد با سرعت صوت عبور می‌کنند و می‌توانند با حسگرهای صدای حساس شناسایی و سپس تجزیه و تحلیل شوند [۳].

جدول ۱: پارامترهای مرسوم مستخرج از یک موج صوتی

حوزه	پارامتر	توصیف
حوزه زمان	Hit	بازه تشخیص سیگنال
	رویداد ^۳	تعداد تحریکات صوتی که توسط حسگر دریافت می‌شود.
	دامنه ^۴	بالاترین مقداری که از سیگنال برداشت می‌شود.
	دوره زمانی ^۵	زمان بین شروع و پایان سیگنال.
	آستانه ^۶	سطحی از دامنه سیگنال که مقادیر بالاتر از آن برای یافتن تحریکات در نظر گرفته می‌شود.
حوزه فرکانس	شمارش ^۷	تعداد دفعاتی که سیگنال موردنظر از حد آستانه عبور می‌کند.
	طیف فرکانس	طبیعت فرکانسی منبع موج
حوزه زمان-فرکانس	طیف‌نما	توزیع انرژی منبع موج صوتی در طول زمان

پارامترهای نامبرده ساده‌ترین و معمول‌ترین پارامترهایی هستند که می‌توان از آن‌ها استفاده نمود. در سال‌های اخیر روش‌های پردازشی پیچیده و پیشرفته‌ای ارائه شده است که جزئیات دقیق هر طیف سیگنال را با دقت بسیار بالا رصد نموده و باعث شناسایی و تفکیک هرچه بهتر سیگنال‌ها می‌شود.

تبدیل سیگنال‌ها به حوزه فرکانس معمولاً در پردازش سیگنال برای تجزیه و تحلیل و نظارت بر فرآیندها انجام می‌شود. این تجزیه و تحلیل در مقایسه با تجزیه و تحلیل حوزه زمان، نمایش مؤثرتری از سیگنال‌ها و همچنین پردازش کارآمدتری را فراهم می‌کند. تبدیل فوری یکی از پرکاربردترین روش‌های تحلیل سیگنال‌ها است که دارای انواعی مانند تبدیل فوری گسسته، تبدیل فوری سریع که متناسب با نوع سیگنال استفاده می‌شوند. در این تحقیق مبنای پردازش سیگنال‌ها، تبدیل فوری سریع یا FFT^۸ است. به‌طور کلی FFT بر اساس نوع تفکیک به دودسته تفکیک در زمان و تفکیک در فرکانس تقسیم‌بندی می‌شود. در ادامه به توصیف FFT تفکیک در فرکانس پرداخته شده است [۵]. محاسبه FFT با معادله تبدیل فوری گسسته (رابطه ۱) آغاز می‌شود:

$$x(K) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) W_N^{kn}; \quad (1)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

که در این رابطه: $x(nT)$: سیگنال زمان نمونه‌برداری شده و nT : زمان گسسته (زمان نمونه‌برداری شده) است. جمع طوری نصف می‌شود که:

$$x(K) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x(nT) W_N^{kn} + \sum_{n=N/2}^{N-1} x(nT) W_N^{kn}; \quad (2)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

همچنین جمع دوم به‌صورت رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$\sum_{n=N/2}^{N-1} x(nT) W_N^{kn} = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[n + N/2] W_N^{k([n + N/2])} = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[n + N/2] W_N^{kn} W_N^{kN/2} \quad (3)$$

به‌طوری‌که:

$$\sum_{n=N/2}^{N-1} x(nT) W_N^{kn} = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[n + N/2] W_N^{k([n + N/2])} = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[n + N/2] W_N^{kn} W_N^{kN/2} \quad (4)$$

حال مطابق با رابطه ۴ می‌توان نوشت:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} \left[x[n] + (-1)^k x[n + N/2] \right] W_N^{kn} \quad (5)$$

که به دو مجموعه (روابط ۶ و ۷) تفکیک شده است [۵]:

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} \left[x[n] + x\left[n + \frac{N}{2}\right] \right] W_N^{2kn}; \quad (6)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

$$X(2k+1) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} \left[x[n] - x\left[n + \frac{N}{2}\right] \right] W_N^{(2k+1)n}; \quad (7)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

تبدیل فوری (FT) رابطه‌ای برای نشان دادن مدل ریاضی سیگنال‌ها در حوزه فرکانس است؛ که برای ساده کردن تحلیل ریاضی سیگنال‌ها و برای بیان ریاضی پدیده‌های فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طیف‌های انتشار آکوستیک معمولاً حاوی طیف فرکانس‌های مختلف است. طیف انتشار آکوستیک معمولاً دارای فرکانس‌های بالاتر در

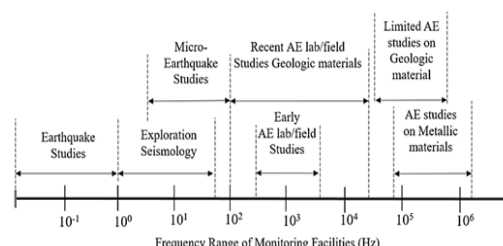
هسته‌زایی ترک و تغییر شکل پلاستیک است. طول موج یک موج آکوستیک تابعی از سرعت و فرکانس آن است. سرعت موج برای هر ماده مقدار مشخصی است [۳، ۸]. در عملیات حفاری نیز امواج آکوستیک ناشی از تنش ایجادشده از نیروی برشی سرشته حفاری بر روی سنگ است. اغلب اوقات، سیگنال‌های ناخواسته (نویز) با سیگنال‌های آکوستیک همراه می‌شوند، این نویز باید با استفاده از فیلترهای دیجیتال از داده‌های ثبت‌شده شناسایی و حذف شود. این سیگنال‌های ناخواسته در عملیات معدنی و به‌خصوص در مقیاس صحرایی بسیار زیاد است. به‌عنوان مثال در یک پروژه حفاری اکتشافی منابع ایجاد نویز شامل مواردی همچون صدای موتور دستگاه حفاری، صدای اپراتور دستگاه یا سایر افراد، صدای باد، سروصداها و اضافی ناشی از مستهلک بودن دستگاه و ... است.

در فرایند حفاری سنگ، سیگنال‌های آکوستیک تولیدشده در هر لحظه از منبع یا ترکیبی از منابع تولید می‌شوند. برخی از منابع ایجاد امواج آکوستیک در عملیات حفاری شامل موارد زیر است:

- (۱) اصطکاک بین ابزار حفاری و سنگ
- (۲) اندرکنش سنگ و خرده‌های حفاری
- (۳) شکست سنگ
- (۴) ایجاد تراشه و شکست ابزار
- (۵) تغییر شکل برشی و الاستیک سنگ
- (۶) برخورد بین سطح سنگ و سرشته
- (۷) گیر افتادن خرده‌های حفاری درون چال حفاری

امواج صوتی ناشی از هر یک از موارد ذکرشده در محیط که شامل خود سنگ و محیط پیرامونی فرایند حفاری منتشرشده و توسط تجهیزات برداشت سیگنال صوتی ثبت می‌شوند [۹]. اغلب موارد به دلیل این‌که سیگنال برداشتی حاصل ترکیب منابع صوتی زیادی است، تفکیک و تجزیه سیگنال در این مرحله از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۰، ۱۱]. با شناسایی صحیح منابع امواج صوتی و به‌کارگیری و تحلیل آن‌ها با روش‌های پردازشی مناسب می‌توان به‌درستی از این امواج بهره برد. شکل ۳ نمونه‌هایی از کاربرد تحلیل امواج صوتی که از بخش‌های مختلف عملیات حفاری منتشر می‌شود را نشان می‌دهد.

منبع انتشاری نسبت به فاصله‌ای از منبع است. دلیل این موضوع این است که امواج آکوستیک از طریق ماده منتشر می‌شوند و در حین انتشار موج درصدی از انرژی آن در محیط کاسته می‌شود. بر اساس مطالعات انتشار آکوستیک که در ژئوتکنیک انجام‌شده همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده‌شده است، فرکانس امواج آکوستیک در محدوده فرکانس ۲۵ Hz (کم شنوایی) تا ۵۰ kHz (اولتراسونیک) تغییر می‌کند. در مطالعه‌ای که توسط زبروجان^۹ انجام گرفت، اثبات شد که اثر آکوستیک ناشی از حفاری سنگ‌ها و مواد معدنی بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ هرتز است که این بازه فرکانسی در تناسب با نمودار شکل ۲ است [۶، ۷]. این بازه فرکانسی مربوط به مشخصات ذاتی خود سنگ مانند مشخصات فیزیکی، مکانیکی و پارامترهای ساختاری مانند درزه و ترک‌هاست و به‌راحتی می‌توان با استفاده از روش‌های پردازشی مناسب مشخصات این بازه فرکانسی را از سایر منابع تولید امواج آکوستیک مانند دستگاه حفاری و یا سایر صوت‌های محیط حفاری تفکیک نمود.



شکل ۲: محدوده فرکانسی امواج آکوستیک حوزه‌های مختلف - برگرفته از: [۸].

۲-۱- منابع امواج آکوستیک

انتشار امواج آکوستیک زمانی ایجاد می‌شود که ماده به‌اندازه کافی توسط یک نیروی خارجی تحت فشار قرار گیرند. بسته به جهت نیرو، تنش تولیدشده ممکن است کششی، فشاری، برشی یا پیچشی باشد. به‌طور معمول، تنش تولیدشده در یک ماده ترکیبی از این تنش‌ها است. در نتیجه این تنش، ماده به‌صورت ارتجاعی تغییر شکل می‌دهد و اگر تنش به‌اندازه کافی زیاد باشد، از نظر پلاستیک نیز تغییر شکل می‌دهد. امواج آکوستیک را می‌توان به‌عنوان پالس کوتاه انرژی الاستیک و جنبشی مشاهده کرد که در یک ماده منتشر می‌شود. مقدار انرژی آزادشده و دامنه موج آکوستیک به‌اندازه منبع و سرعت توسعه منبع بستگی دارد. منابع آکوستیک معمولی شامل نشت، مالش، ضربه، تبدیل فاز،

بود. نتایج تحلیل‌های آماری نشان دادند که ۹۱ درصد از انفجارهایی که انجام می‌شود ناشی از فعالیت‌های آتشفباری است و تنها ۳ درصد مستقل و جدای از آتشفباری است. تحلیل‌های سری‌های زمانی که از روابط مدل به دست می‌آیند ممکن است برای پیش‌بینی فعالیت لرزه‌ای روزانه مورد استفاده قرار گیرد [۱۴]. مک نالی^{۱۳} در سال ۱۹۹۰ ارتباطی نمایی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و لاگینگ صوتی بعد از مطالعه نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌های مغزه از حوضه Basin Bowen ارائه کرد. این ارتباط به‌طور گسترده به‌عنوان روشی به نام روش مک نالی در معدنکاری زغال‌سنگ استرالیا برای تخمین مقاومت از لاگ‌های صوتی پذیرفته شد. روش مک نالی نخستین تخمین مقاومت سنگ با استفاده از نمودارهای صوتی است [۱۵]. پس از روش مک نالی در نظر گرفتن مشخصات محلی نیز در برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری از لاگینگ صوتی مورد نیاز بود. به همین منظور برای معادن آلمان و یونان در لایه‌های قوی و ضعیف فرمول‌هایی توسط وارد^{۱۴} در سال ۱۹۹۸ ارائه شد به‌منظور محاسبه مقاومت سنگ‌ها ارائه شد [۱۶].

از سال ۲۰۰۰ به بعد مطالعات آکوستیک در سنگ‌ها وارد فاز جدیدی شد. در این مطالعات مبنای تحقیقات صدایی بود که هم‌زمان با حفاری تولید می‌شود. محققین تلاش می‌کردند تا ارتباطی منطقی بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها با صدای ناشی از آن برقرار نمایند. آزمایش‌های سختی اکوتیپ^{۱۵}، آزمون‌های تراکم و اندازه‌گیری‌های موج الاستیک انجام شده با استفاده از نمونه‌های مغزه گیری شده از تعدادی سنگ که از چند منطقه در ژاپن جمع‌آوری شد، توسط کاوازاکی^{۱۶} و همکارانش در سال ۲۰۰۲ انجام شد [۱۷]. هاترلی^{۱۷} روشی جایگزین برای تخمین UCS از سنگ‌ها با استفاده از لاگ چال‌های ژئوفیزیکی ارائه داد. در این تحقیق مشخصات لاگ‌های صوتی با ترکیب سنگ‌ها و UCS سنگ‌ها ارتباط داده شد [۱۸].

کومار^{۱۸} و همکاران در سال ۲۰۱۰ به پیش‌بینی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها در مقیاس مطالعات صحرایی پرداختند و سعی کردند که با رفتار سنجی سطح صدا به این ویژگی‌ها دست پیدا کنند [۱۹]. در ادامه‌ی این تحقیقات با استفاده از روش رگرسیون به پیش‌بینی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های دگرگون پرداخته شد. محققان در این



شکل ۳: کاربردهای تحلیل امواج صوتی در فرایند حفاری سنگ

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، از امواج صوتی تولید شده در حین عملیات حفاری می‌توان برای مواردی مانند رفتار سنجی موتور و قطعات دستگاه حفاری، پیش‌بینی عملکرد دستگاه، پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری، پیش‌بینی مشخصات فیزیکی و مکانیکی و نرخ سایش و یا حتی انتخاب درست سرمته متناسب با نوع سنگ استفاده نمود [۱۲، ۱۳]. در بخش‌های بعد مروری اجمالی و ارزیابی بر روی مطالعات و تحقیقات انجام گرفته در زمینه تحلیل و کاربرد امواج آکوستیک در حفاری سنگ در دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی انجام گرفته است.

۳- استفاده و تحلیل امواج آکوستیک در مطالعات صحرایی

بررسی و پیش‌بینی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و یا به‌طور کلی مواد معدنی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های مورد نظر مهندسين در زمینه‌های مختلف مهندسی معدن مانند مراحل مختلف اکتشاف معدن، عملیات واحد معدن کاری و استخراج معدن، طراحی سازه‌های سنگی و فراوری مواد معدنی، در عملیات است. مطالعات انتشار آکوستیک در سنگ‌ها توسط اوبرت^{۱۰} و دوال^{۱۱} در سال ۱۹۴۱ برای پیش‌بینی انفجار سنگ^{۱۲} در معادن آغاز شد. در این مطالعات آزمون‌های صوتی بر روی سنگ‌های داخل معدن انجام شد. داده‌های ریز لرزه‌ای با دستگاهی شامل ژئوفون، آمپلی‌فایر و دستگاه سنجش انفجار سنگ (RBM) برای مدت ۱۰۹۷ روز از ۱۰۱ انفجار برداشت شد. تحلیل‌های آماری که در این تحقیق انجام شد جهت تعیین مواردی همچون ارتباط انفجار سنگ در برابر آتشفباری، بزرگی انفجار سنگ در برابر آسیب به وجود آمده، وقوع انفجار سنگ در مقیاس متوسط، نرخ لرزه‌خیزی و وقوع انفجار سنگ در مقابل هندسه محلی معدن

حین فعالیت تجهیزات با هزینه‌ای بسیار کمتر از زمان خرابی، سایش و یا شکست قطعات صورت می‌گیرد. تکنیک‌های مختلفی برای رفتار سنجی وضعیت وجود دارد که شامل مواردی همچون بازدید چشمی، تحلیل‌های مبتنی بر لرزش و ارتعاشات، تحلیل‌های مبتنی بر انتشار آکوستیک، تحلیل عملکرد و ترموگرافی است.

در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ دانشمندی همچون هاردی^{۲۰} در سال ۱۹۷۲، مچی^{۲۱} در سال ۱۹۷۳، هاردی در سال ۱۹۷۷، بیرلی^{۲۲} در سال ۱۹۷۸، نیل^{۲۳} و همکاران در سال ۱۹۸۱ بر روی تغییرات در دامنه طیف امواج آکوستیک در یک باند کلی رفتار سنجی فرکانس‌ها با افزایش تنش‌های کاربردی فعالیت نمودند. [۲۴-۲۶]. در سال ۱۹۹۷ هسو^{۲۴} به بررسی شناسایی سازندهای تحت فشار با استفاده از ابزار صوتی در حین حفاری پرداخت. سان^{۲۵} در سال ۱۹۹۹ مطالعه‌ای بر روی استفاده از امواج آوایی حین چالزنی به‌منظور تعیین فرسودگی سرسته انجام داد. آزمایش چالزنی به‌صورت برجا بر روی دو نوع سنگ شامل ماسه‌سنگ و شیل انجام شد و برداشت داده‌ها از مبدل امواج صوتی پشت سرسته و یک چال کنترلی در فاصله‌ی ۱۰ فوت از چال صورت گرفت. نتایج به دست آمده از چال کنترل اطلاعات مناسبی را به دست نداد اما نتایج به‌دست آمده از پشت سر مته نشان داد که سطح امواج آوایی در سرسته نو پایین‌تر از حالت فرسوده است. همچنین فرکانس امواج آوایی در ماسه‌سنگ بالاتر از شیل است. این محقق بیان نمود که استفاده از روش‌های شناسایی الگوها می‌تواند در تحلیل نتایج امواج آوایی تولیدی بسیار مؤثر باشند [۲۷].

فوتو^{۲۶} و همکاران در سال ۲۰۰۳ امکان حفاری بهینه سنگ‌ها را از طریق سیگنال‌های آکوستیک تحقیق نمودند. در این تحقیق مواردی همچون فرایند خرد شدن سنگ مورد حفاری، فشار بر روی ابزار حفاری، سرعت حفاری و قدرت خرد شدن، رفتار سنجی شد. محققان سیستمی را برای رفتار سنجی صدا در حین فرایند خرد شدن سنگ طراحی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که سطح معادل برای فرکانس نماینده، وابسته به انواع سنگ است و بنابراین سطح‌های معادل می‌تواند برای شناسایی نوع سنگ استفاده شود [۲۷، ۲۸]. علاوه بر استفاده از سطح صدای معادل از رفتار طیف‌های فرکانسی که در حفاری هر سنگ ایجاد می‌شود نیز نوع سنگ‌های تحت حفاری را می‌توان تشخیص داد. به‌عنوان مثال شکل ۴ طیف فرکانسی حفاری سه نمونه سنگ

مطالعه سعی داشته‌اند روابط ریاضی منطقی بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مختلف و متغیرهای قطر سرسته، نرخ نفوذ، سرعت دوران سرسته و سطح صدای معادل برقرار کنند [۲۰]. این محققان با ادامه‌ی تحقیقات خود در سال ۲۰۱۱ سعی کرده‌اند تا مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی و درصد تخلخل را با استفاده از رگرسیون چند متغیره به سطح صدای معادل، قطر سر مته، سرعت دوران سر مته و نرخ نفوذ مرتبط سازند. این مطالعه بر روی سنگ‌های رسوبی انجام گرفته است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که این روش یک تخمین سریع و آسان برای مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی و تخلخل در سنگ‌های رسوبی است و پیشنهاد شده است که مسیر مطالعات آینده به این سمت حرکت کند [۲۱].

در سال ۲۰۱۲، گرادال^{۱۹} و همکارانش به اندازه‌گیری نویزهای حاصل از حفاری با استفاده از یک میکروفون و یک ژئوفون و ارزیابی و تحلیل رابطه بین طراحی سرسته و خصوصیات لرزه‌ای و آکوستیک سرسته پرداختند. با استفاده از تجزیه و تحلیل فرکانس‌ها می‌توان نشان داد که سرسته‌های مختلف صداهای متفاوت و آثار لرزشی منحصربه‌فردی را منتشر می‌کنند. همچنین صدای تولید شده در حین حفاری می‌تواند با لرزش همبستگی داشته باشد. کاربرد این تحقیق شناسایی و تشخیص مشکلات سرسته در زمان واقعی با استفاده از داده‌های صوتی جمع‌آوری شده با میکروفون است [۲۲]. اعمال و توسعه این کاربرد بر روی دستگاه‌های حفاری می‌تواند به اپراتور دستگاه حفاری از جهت شناخت صحیح وضعیت سرسته کمک‌کننده باشد [۲۳]. با شناخت صحیح از وضعیت سایشی سرسته می‌توان سایر پارامترهای عملیاتی مانند بار پشت سرسته و یا سرعت حفاری را به‌درستی تنظیم کرد تا در هر مرحله از حفاری به حداکثر نرخ نفوذ ممکن رسید.

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در عملیات مختلف رفتار سنجی ماشین‌آلات و تجهیزات موجود در فرایندهاست که از رفتار سنجی و پایش آن‌ها می‌توان به نتایجی مفید دست‌یافت که منجر به تشخیص بهتر و تصمیم‌گیری صحیح می‌شود. رفتار سنجی و پایش وضعیت شامل ارزیابی مستمر یا دوره‌ای از وضعیت بخشی از ماشین‌آلات است. استفاده از رفتار سنجی اجازه می‌دهد تا تعمیر و نگهداری مؤثرتری انجام شود، یا اقدامات دیگری که منجر به افزایش ایمنی در سیستم می‌شود، انجام گیرد. انجام عملیات رفتار سنجی در

تحقیق نتایج رضایت‌بخشی را برای دسته‌بندی کردن نوع سنگ‌ها به دست داده است [۴].

همان‌طور که بیان شد، از امواج آکوستیک می‌تواند برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار گیرند. در پیش‌بینی خواص سنگ در پروژه‌های مختلف می‌توان از طرفی به صورت هم‌زمان با عملیات اصلی و به صورت لحظه‌ای خواص سنگ‌ها را محاسبه و پیش‌بینی نمود که این عامل باعث کارکرد بهینه دستگاه حفاری می‌شود و از طرف دیگر وابستگی به فعالیت‌هایی از جمله جمع‌آوری نمونه و آماده‌سازی و انجام آزمون‌های مختلف در آزمایشگاه کاهش می‌یابد که این موضوع باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های پروژه از طریق حذف آزمایش‌ها تعیین خواص سنگ می‌شود.

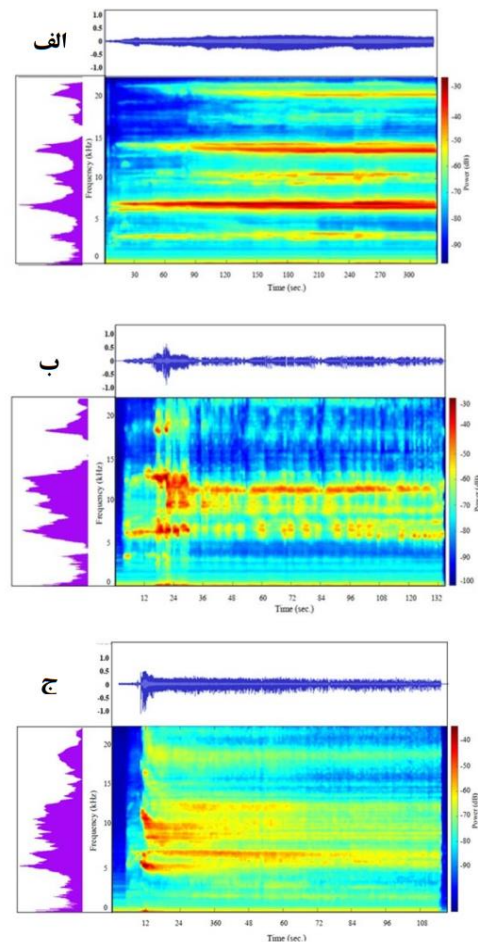
در زمینه تشخیص پدیده‌هایی مثل زمان تعویض سرمته و یا موارد مربوط به سنگ مانند کارسرها که باعث هدر رفت گل حفاری می‌شود که این موضوع در حفاری نفت از اهمیت بالایی برخوردار است، نیز می‌توان از امواج آکوستیک بهره گرفت.

۴- کاربرد تحلیل امواج آکوستیک در مطالعات آزمایشگاهی

کاربرد پردازش امواج آکوستیک همان‌طور که مطالعات صحرایی مورد استفاده قرار گرفته است، در عملیات آزمایشگاهی نیز می‌تواند بسیار مفید باشد. از گذشته تاکنون استفاده از این امواج مورد توجه محققان مختلفی قرار داشته است.

نیل و همکاران در سال ۱۹۶۸ بر روی سیستم‌های آزمایشگاهی برای آشکارسازی، ثبت و تحلیل این امواج، تفسیر ثبت‌شده‌های صوتی و کاربرد عملی تکنیک‌های صوتی در مکانیک سنگ متمرکز شدند. برای این منظور یک سیستم آکوستیک آزمایشی در آزمایشگاه و به صورت برج‌ها بر روی دستگاه‌های بارگذاری سنگ‌ها، طراحی شد. پارامترهای آکوستیک مختلفی همچون نرخ پالس، محتوای انرژی سیگنال و توزیع دامنه، توصیف شد و تغییرات هر یک از این پارامترها در حین بارگذاری تک‌محوری تمامی نمونه‌های سنگی برداشت گردید. نتایج نشان دادند که استفاده از تکنیک انتشار آکوستیک مانند روش‌های ژئوفیزیکی دارای محدودیت‌هایی است به‌طوری‌که اگر به‌تنهایی استفاده شوند ممکن است منجر به اشتباه در تفسیر داده‌ها شود اما این

آذرین، دگرگونی و رسوبی را نشان می‌دهد که می‌توان با رفتار نگاری هر یک از این طیف‌ها نوع سنگ را تشخیص داده و حتی لایه‌بندی مختلف سنگ‌ها را نیز تفکیک نمود [۲۹].



شکل ۴: طیف فرکانسی سه نمونه سنگ در حین حفاری، (الف) سنگ آذرین، (ب) سنگ دگرگونی و (ج) سنگ رسوبی (بر اساس [۲۹]).

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است هر نوع سنگ طیف فرکانسی منحصر به فردی را دارد که از این موضوع می‌توان برای ارزیابی‌های بلادرنگ حین حفاری استفاده نمود. این امر به خصوص در حفاری‌های عمیق از اهمیت بالایی برخوردار است.

زبروجان و همکارانش اثرات آکوستیک سنگ‌ها را در طی عملیات حفاری مورد بحث قرار دادند. در این مطالعه به این نتیجه دست‌یافته شد که سیگنال آکوستیک آنالیز شده که طی حفاری دورانی به دست می‌آید، می‌تواند برای کنترل پروسه‌ی حفاری استفاده شود. نرم‌افزار ارائه شده در این

روش یک ابزار مفید در مطالعه رفتار مواد است و در بسیاری از تحقیقات می‌تواند به کار آید [۳۰].

در حین فرایند حفاری دورانی، صدا از منابعی مانند تماس بین سرمته و سنگ، موتور وسیله حفاری و همچنین از آب‌خنک کننده تولید می‌شود [۳۱]. جانگ^{۳۷} و همکاران در سال ۱۹۹۴ به پیش‌بینی سختی سنگ‌ها و قابلیت حفاری با استفاده از مشخصات انتشار امواج صوتی پرداختند. با تحلیل نتایج حاصل آزمایش‌های حفاری سنگ مشخص شد که ارتباط نزدیکی بین سختی سنگ و پارامترهای آکوستیک که در این مطالعه بررسی شد، وجود دارد. در میان پارامترهای بررسی‌شده، میانگین مجذور مربعات بالاترین همبستگی را با سختی سنگ دارد. همچنین می‌توان به این نتیجه رسید که جهت مقایسه نتایج، آزمایش‌ها باید در شرایط مشابه و ثابتی انجام بگیرند [۳۲].

میکلوسو^{۳۸} و همکارانش در سال ۲۰۰۶ دستگاهی آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی خرد شدن سنگ با حفاری دورانی در آزمایشگاه ارائه دادند. این دستگاه امکان حفاری دورانی سنگ را با ابزارهای حفاری با قطر کوچک فراهم می‌کند. در این پژوهش محققان به این نتیجه رسیدند که سیگنال آکوستیک آنالیز شده که طی حفاری دورانی به دست می‌آید، با استفاده از تبدیل سریع فوریه (FFT) می‌تواند برای کنترل پروسه حفاری استفاده شود [۳۳]. لسو^{۳۹} و همکاران در سال ۲۰۰۷ به اندازه‌گیری سیگنال صوتی-لرزه‌ای به‌عنوان منبع یکپارچه داده پرداختند. در آزمایش‌های حفاری که بر روی سنگ‌ها انجام شد اثبات شد که سیگنال صوتی که منتشر می‌شود وابستگی زیادی به خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها دارد [۳۴].

مارینسکو^{۴۰} و همکاران در سال ۲۰۰۹ تحقیقی بر روی تحلیل طیف سیگنال‌های زمان-فرکانس باهدف ارزیابی و رفتار سنجی جهت تعیین سطح سرمته انجام دادند. در این مقاله برای اولین بار نشان داده شده است که ارزیابی شرایط مختلف سرمته به‌وسیله سیگنال‌های صوتی (سیگنال‌های زمان-فرکانس) امکان‌پذیر است. در این مطالعه تعیین ناهنجاری‌های سطحی به‌راحتی می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد. این تحقیق، یک مدل ریاضی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عمق نفوذ را ارائه داد [۳۵].

در سال ۲۰۱۳ کومار و همکاران با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوری، فشار هوا و نیروی فشاری پشت سر مته که در دستگاه حفاری اعمال شده است به پیش‌بینی سطح

صدا و نرخ نفوذ دستگاه حفاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداخته‌اند [۳۶]. وارهان^{۴۱} و همکاران در سال ۲۰۱۳ مجدداً تحقیقات خود را بر روی سطح صدای معادل ناشی از حفاری توسعه دادند. در این مطالعه به پیش‌بینی ویژگی‌های سنگ با استفاده از روش‌های محاسبه ساده مانند رگرسیون چند متغیره و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (MLP و RBF)، با در نظر گرفتن سرعت سرمته، نرخ نفوذ، قطر سرمته و سطح صدای معادل در طی حفاری به‌عنوان پارامترهای ورودی پرداخته شده است. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که رگرسیون و روش‌های شبکه عصبی نتایج مشابهی را به دست می‌آورند و به‌طور کلی روش شبکه عصبی در پیش‌بینی خواص سنگ از سطح صدا تولیدشده در حین حفاری کارایی مطلوبی دارد. این مطالعه می‌تواند با توجه به تأثیر درزه‌های موجود در سنگ بر سطح صدا تولیدشده در طول حفاری گسترش یابد. برای این منظور می‌توان از درزه‌های غیرطبیعی با برش مصنوعی سنگ‌ها استفاده شود [۳۷]. قهرمان و همکاران در سال ۲۰۱۳ به پیش‌بینی ساینده‌های سنگ‌ها با استفاده از سطح صوت تولیدشده پرداختند. در این مطالعه آزمایش‌های سایش لس‌آنجلس، اندازه‌گیری سطح صوت، چگالی و تخلخل بر روی ۲۷ نمونه مختلف سنگی از جمله سنگ‌های آذرین، دگرگون و رسوبی انجام گرفت. نتایج با استفاده از رگرسیون ساده و چندگانه مورد ارزیابی قرار گرفت و ارتباط قابل قبولی بین سایش لس‌آنجلس و سطح صوت یافت شد. نتایج تحلیل‌ها نشان دادند که ضرایب همبستگی رگرسیون چندمتغیره بیشتر از رگرسیون ساده است. به‌عنوان نتیجه‌گیری می‌توان بیان نمود که سایش لس‌آنجلس نمونه‌های سنگی می‌تواند با اندازه‌گیری سطح صوت تخمین زده شوند [۳۸].

در سال ۲۰۱۴ کاراکوش^{۴۲} و همکاران به آنالیز طیف سیگنال‌های صوتی ناشی از برخورد سرمته و سنگ حین فرایند مغزه‌گیری پرداختند. در این تحقیق از یک دستگاه مغزه‌گیر در مقیاس آزمایشگاهی و سنسورهای آکوستیک جهت ثبت سیگنال‌های صوتی طی فرایند حفاری استفاده شده است. در طی آزمایش یکسری روابط خطی به‌دست آمده که برای تخمین عمق برش، وزن روی سرمته^{۴۳} (WOB) و گشتاور سرمته^{۴۴} (TOB) با استفاده از طیف زمانی زمانی سیگنال آکوستیک میسر شد. با این روش تغییرات شرایط حفاری به‌وسیله آنالیز طیف سیگنال به‌راحتی تحت کنترل خواهد بود. نتایج این تحقیق این موضوع را نشان

در این مقاله بر اساس داده‌های موجود از عمق نفوذ و سایر پارامترها به پیش‌بینی سایش سر مته پرداخته شده است چراکه فرایند پیوسته سایش سر مته طی فرایند حفاری دورانی باعث کاهش ظرفیت حفاری می‌شود. همچنین روش‌های مستقیم اندازه‌گیری سایش غیرممکن است بنابراین برای این منظور از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود [۲].

در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ یاری و همکاران تحقیقاتی را در زمینه کاربرد پردازش سیگنال‌های آکوستیک در فرایند حفاری دورانی سنگ‌ها انجام دادند. هدف این تحقیقات بررسی ارتباط بین فرکانس‌های غالب سیگنال‌های صوتی تولیدشده در حین حفاری و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ بود که برای آزمایش از نمونه سنگ‌های آذرین، دگرگونی، رسوبی و کربناته استفاده شد. در این تحقیقات سعی بر آن بود که از آنالیز فرکانس‌های صوتی ناشی از فرآیند حفاری دورانی در راستای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها در کوتاه‌ترین زمان ممکن و اقتصادی‌ترین حالت استفاده گردد. پس از انجام آزمایش‌های حفاری و آنالیز سیگنال‌های صوتی مربوطه به پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مقاومت کششی (TS)، سرعت موج P و تخلخل پرداخته شد. نتایج نشان داد که ارتباط قابل قبولی بین ویژگی‌های سنگ و فرکانس‌های غالب سیگنال‌ها وجود دارد [۴۴-۴۶]. لیو^{۳۸} و همکارانش در سال ۲۰۱۹ پیش‌بینی سایش ابزار در دستگاه CNC را با استفاده از تحلیل امواج صوتی مورد ارزیابی قراردادند. در این تحقیق یک میکروفن کانونی در نزدیکی محل سر ابزار برش قرار داده شد. سیگنال‌های صوتی از زمان شروع حرکت ابزار تا اتمام عملیات برش توسط میکروفن دریافت شده ثبت گردید و پس از هر آزمایش توسط میکروسکوپ، سایش آن مورد ارزیابی قرار گرفت. عملیات برش در سرعت‌های مختلف انجام گردید و اطلاعات صوتی و سایش جمع‌آوری شد. این محققین از ویژگی فرکانس- زمان امواج به روش تجزیه‌ی بسته موجک برای تحلیل سیگنال‌ها بهره بردند و ضرایب تولیدی در این روش را به‌منظور پیش‌بینی سایش سر مته استفاده کردند. روش‌های رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌منظور توسعه مدل‌های پیش‌بینی سایش ابزار مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد را در پیش‌بینی سایش ابزار نشان داد، هرچند بهترین عملکرد مربوط به مدل

می‌دهد که تکنیک‌های نظارت بر AE یک گزینه مناسب برای بهینه‌سازی عملکرد حفاری مغزه‌گیری الماسه است. تغییرات در شرایط حفاری و تأثیر پارامترهای حفاری می‌تواند با تجزیه و تحلیل AE به‌درستی نشان داده شود [۳۹].

فلینر^{۳۵} و همکاران در سال ۲۰۱۴ به اندازه‌گیری و پردازش سیگنال صوتی- لرزه‌ای در فرایند حفاری سنگ توسط حفاری دورانی پرداختند. در حوزه زمانی مهم‌ترین نتایج در هیستوگرام سیگنال‌های مربوط به طبقه‌بندی سنگ‌ها و روش حفاری مناسب به‌دست آمده است. در حوزه فرکانس امکان استفاده از طیف‌های سیگنال صوتی- لرزه‌ای به‌منظور به دست آوردن خواص دینامیک فرایند حفاری بررسی شده است. همچنین این تحقیق بر ارائه روشی پیشرفته برای پردازش سیگنال‌های صوتی- لرزه‌ای در آینده متمرکز شده است [۴۰].

ازجمله موضوعاتی که در زمینه تشخیص از تکنیک‌های انتشار آکوستیک استفاده شده است، مطالعات سنگ‌شناسی در حوزه نفت است. تشخیص سنگ‌شناسی در حوزه حفاری نفت امری بسیار حیاتی است. در سال ۲۰۱۸ کین^{۳۶} و همکاران سیگنال‌های آکوستیک و لرزشی در حفاری سنگ‌ها را برای تعیین نوع سنگ‌ها به کار بردند. برای بررسی رابطه بین خواص سنگ و ویژگی‌های سیگنال آکوستیک و لرزشی تولیدشده در حفاری، یک سیستم سنجش ارتعاش حفاری سنگ ساخته شده است و آزمایش‌های حفاری انجام گرفت. این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از حسگر ارتعاش و حسگر صوتی برای تشخیص ویژگی‌های زمانی که از طریق حفاری در انواع مختلف سنگ ایجاد می‌شود امکان‌پذیر است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو ویژگی طیفی ارتعاش و ویژگی‌های طیفی آکوستیک از ۴ نوع سنگ به‌طور قابل توجهی متفاوت هستند که ممکن است برای تشخیص سنگ‌شناسی امیدوارکننده باشد. با این حال، روش حسگر صوتی، نسبت سیگنال به نویز بهتری را در برابر روش حسگر ارتعاش ارائه می‌کند که برای تجزیه و تحلیل تفاوت‌های ویژگی‌های طیفی مفیدتر است [۴۱]. از دیگر کاربردهای تکنیک انتشار آکوستیک در معادن زغال‌سنگ و برای تشخیص رفتار متان موجود در لایه‌های زغال‌سنگ است [۴۲، ۴۳].

کروپ^{۳۷} و همکاران به اندازه‌گیری، مدل‌سازی و پیش‌بینی عمق نفوذ در حفاری دورانی سنگ‌ها پرداختند.

عملیات حفاری یکی از اصلی‌ترین مراحل تولید و استخراج مواد معدنی در معادن روباز، زیرزمینی و معادن سنگ‌های ساختمانی است و یک فرایند کلیدی برای تکمیل چرخه‌ی معدن کاری به شمار می‌آید. به‌طور کلی، فرایند حفاری همیشه صدا را به‌عنوان محصول فرعی تولید می‌کند. این صدا از برخورد سرمته و سنگ، بدون در نظر گرفتن نوع سرمته یا موادی که سرمته در آن حفاری می‌کند، ایجاد می‌شود. در حین فرایند حفاری، معلوم بودن نوع سنگ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عملکرد حفاری رابطه مستقیم و نزدیکی با ماده سنگ دارد و تحت تأثیر مشخصات ژئومکانیکی ماده سنگ قرار می‌گیرد. یک‌راه ممکن برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ، آنالیز صدای تولیدشده در حین حفاری توسط شناسایی اثر آکوستیک ویژه فرکانس‌های منتشرشده در برخورد با هر سنگ حفاری‌شده است.

ارزیابی امواج آوایی در علوم مهندسی تاکنون با افزایش چشمگیری همراه بوده است. در مهندسی معدن استفاده از این امواج از دهه ۱۹۵۰ در معادن زیرزمینی آغاز شده و به تدریج با اهداف مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. تاکنون روش‌ها و معیارهای متعددی در زمینه پیش‌بینی و ارزیابی عملکرد حفاری توسعه داده شده است که این روش‌ها هر کدام از دقت و قابلیت اطمینان خاصی برخوردار بوده و اکثراً با پیچیدگی‌هایی همراه است و به دست آوردن آن‌ها مستلزم محاسبه و تعیین پارامترهای مختلفی است. اخیراً با توجه به معایب روش‌های قبل از جمله پرهزینه بودن، زمان‌بر بودن و تعدد پارامترها و وابستگی آن‌ها، استقبال از روش‌های کم‌هزینه، سریع و غیر مخرب بیشتر شده است. روش‌های انتشار آوایی از جمله روش‌های غیر مخرب است که می‌توان آن را در حین عملیات اصلی و بدون توقف آن به کار برد و در کمترین زمان نتایج مورد انتظار با دقت بالایی را به دست آورد.

استفاده از تکنیک‌های انتشار آکوستیک نسبت به سایر روش‌ها مزایایی به شرح زیر دارند:

- روش انتشار آکوستیک یک روش تشخیص دینامیک است و می‌تواند بلافاصله تغییرات در موج صوتی را تشخیص دهد.
- نمونه‌های مورد نظر به راحتی از راه دور مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

شبکه عصبی با خطای ۸ درصد برای داده‌های جدید بود [۴۷]. در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ خشوعی و همکاران مطالعاتی آزمایشگاهی در زمینه پیش‌بینی و محاسبه خواص سنگ‌های سخت (گرانیتی) از جمله خاصیت ساینده‌گی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی سنگ و همچنین تفکیک و تشخیص نوع سنگ‌های تحت حفاری در حین عملیات حفاری در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند. نتایج، نشان‌دهنده توانایی بالای روش سیگنال‌های آکوستیک در تعیین مشخصات سنگ‌ها بوده است [۴۸، ۲۹].

همان‌طور که در بررسی مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در زمینه کاربرد پردازش سیگنال‌های آکوستیک در عملیات حفاری نشان داده شد می‌توان بیان کرد که این روش از جمله روش‌های نوینی است که در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت تکنولوژی در زمینه پردازش سیگنال، در کنار عملیات اصلی می‌توانند در بهینه‌سازی عملیات، افزایش ایمنی و کاهش هزینه‌ها بسیار کارآمد باشند. پیش‌بینی با دقت بالای مشخصات سنگ و یا پارامترهای عملیاتی می‌تواند نیاز به مجموعه‌ای از عملیات همچون جمع‌آوری نمونه سنگی، آماده‌سازی آن‌ها با توجه به استاندارد آزمایش و انجام آزمایش‌های تعیین خصوصیات سنگ را برطرف نماید و حین فرایند حفاری با استفاده از این تکنولوژی می‌توان به صورت لحظه‌ای مشخصات سنگ تحت حفاری را شناسایی نمود. با تشخیص بلادرنگ مشخصات سنگ پارامترهای عملیاتی همچون بار پشت سرمته، سرعت دوران سرمته و ... را نیز می‌توان متناسب با سنگ تنظیم نمود و در هر مرحله از حفاری به بهینه‌ترین حالت حفاری دست‌یافت.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

امروزه با گسترش پروژه‌های معدنی و عمرانی و کاربرد ابزارها و تجهیزات مختلف، فرایندهایی مانند پیش‌بینی و محاسبه خواص مواد، رفتار سنجی و تعیین وضعیت با پیچیدگی‌هایی همراه است؛ بنابراین استفاده از روشی که بتوان با دقت، قابلیت اطمینان و سریع و با حداقل هزینه و به‌طور هم‌زمان با عملیات اصلی به این موارد دست‌یافت از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. عملیات و فرایندها در معادن دارای یک یا چند خروجی به‌عنوان محصول نهایی در حالت‌های متفاوت هستند که برخی از این خروجی‌ها مورد استفاده و برخی دیگر از نتایج از جمله صوت، لرزش و حرارت جانبی بوده و گاها بدون استفاده هستند.

پردازش داده است که از این طریق کاربرد این تکنیک‌ها بهبود یافته و می‌تواند در آینده جایگزین بسیاری از روش‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری و بازرسی بشوند.

بر اساس بررسی مطالعات انجام گرفته در زمینه کاربرد تکنیک‌های انتشار آکوستیک می‌توان دریافت که روش‌ها و تکنیک‌های متنوعی برای پردازش سیگنال‌های آکوستیک وجود دارد که هر یک از این روش‌ها را می‌توان برای استخراج ویژگی‌هایی از طیف زمانی و یا فرکانسی سیگنال‌های آکوستیک و یا برقراری ارتباط میان این ویژگی‌ها با خواص مختلف مانند خواص ژئومکانیکی مواد و یا پایش و رفتار سنجی تجهیزات به کار برد. به کارگیری روش‌های نوین در پردازش سیگنال‌های آکوستیک می‌تواند کمک بزرگی به آینده آزمایش‌ها و عملیات در علوم زمین و ژئوتکنیک در بخش‌های مختلف همچون اکتشاف و پی‌جویی، مهندسی حفاری، فراوری مواد، آزمایش‌ها مکانیک سنگی و ... بکند و بتواند در آینده به یکی از کارآمدترین روش‌های آزمایش، پایش وضعیت و تشخیص به‌عنوان یک ابزار در کنار عملیات حفاری تبدیل شود. هرچند که استفاده از این روش (پردازش سیگنال‌های صوتی حین حفاری) با روش‌های معمول و غیر پیچیده مانند روش‌های مبتنی بر تبدیل فوری نیز نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. استفاده از این تکنولوژی علاوه بر شناسایی دقیق‌تر نوع و مشخصات سنگ یا مواد تحت حفاری و سایر عوارض ساختاری همچون درزه و گسل‌ها و یا کارست‌ها و حفرات سنگ، می‌توان به بهینه‌سازی عملیات حفاری نیز از طریق تنظیم پارامترهای عملیاتی حفاری همچون بار پشت سرشته و سرعت دوران سرشته حفاری منجر شود. از این طریق می‌توان هزینه‌های فرایندهای حفاری که از جمله مهم‌ترین بخش‌های عملیات مختلف معدنی است تا حد زیادی کاهش داد.

مراجع

- [1] Rivero, A.d., L.L. de Lacalle, and M.L. Penalva, Tool wear detection in dry high-speed milling based upon the analysis of machine internal signals. *Mechatronics*, 2008. 18(10): p. 627-633.
- [2] Krúpa, V., et al., Measurement, modeling and prediction of penetration depth in rotary drilling of rocks. *Measurement*, 2018. 117: p. 165-175.
- [3] Liptai, R., D. Harris, and C. Tatro, An introduction to acoustic emission, in *Acoustic Emission*. 1972, ASTM International.

- این روش را می‌توان بدون توقف در فرایند اصلی اجرا نمود.
- نسبت هزینه به کارایی در این روش پایین است.
- این روش حساسیت و دقت بسیار بالایی دارد.
- آزمایش‌ها در این روش غیر مخرب است.
- سرعت انجام آزمایش‌ها بسیار زیاد است.
- با رفتار سنجی جامع از فرایندهای اصلی نیاز به حسگرها و تجهیزات کمی است. امواج آکوستیک به‌صورت کروی در تمام جهات منتشر می‌شوند و به راحتی قابل برداشت هستند.
- از طرفی دیگر استفاده از این امواج چالش‌ها و معایبی را هم به همراه دارد که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
 - گاهی اوقات نرخ سیگنال به نویز پایینی اندازه‌گیری می‌شود. در این موارد استفاده از فیلترهای فرکانسی می‌تواند به این موضوع کمک کند.
 - پدیده‌های غیرقابل برگشت در فاز پلاستیک رخ می‌دهد که می‌تواند حاوی اطلاعات مفیدی باشد اما روش‌های انتشار آکوستیک در فاز برگشت‌پذیر اطلاعات به دست می‌آورد.
 - تکرارپذیری برای این روش‌ها به دلیل طبیعت تصادفی این روش‌ها مناسب نیست. امواج آکوستیک در هر منبع یا فرایند منحصر به فرد است.
 - امواج آکوستیک به برخورد و اندرکنش با سطوح بسیار حساس است به همین دلیل انعکاس و شکست امواج می‌تواند بر روی موج دریافتی اثرگذار باشد.
 - تفسیر و تحلیل داده‌های آکوستیک نیاز به دانش فنی دارد.
 - حجم زیادی از داده‌ها نیاز به ثبت و پردازش دارند. به‌طور کلی مطالعات انجام گرفته بر روی کاربردهای انتشار آکوستیک بیشتر آزمایشگاهی بوده است. برای کاربرد وسیع تکنیک‌های انتشار آکوستیک در صنعت لازم است که آزمایش‌های برجا بیشتر انجام بگیرد و از تکنولوژی پردازش سیگنال‌های آکوستیک در عملیات صحرایی بیشتر استفاده شود. با این حال تاکنون کاربرد تکنیک‌های انتشار آکوستیک در زمینه‌های مختلف در علوم زمین و مهندسی معدن به‌طور گسترده‌ای رو به افزایش بوده است. از ملزومات کاربرد تکنیک‌های انتشار آکوستیک استفاده از روش‌های به‌روز

- [18] Hatherly, P., Rock strength assessment from geophysical logging. 2002.
- [19] Kumar, B.R., H. Vardhan, and M. Govindaraj, Estimating rock properties using sound level during drilling: field investigation. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2010. 2(3): p. 169-184.
- [20] Kumar, B.R., H. Vardhan, and M. Govindaraj, Sound level produced during rock drilling vis-à-vis rock properties. *Engineering geology*, 2011. 123(4): p. 333-337.
- [21] Kumar, B.R., H. Vardhan, and M. Govindaraj, Prediction of uniaxial compressive strength, tensile strength and porosity of sedimentary rocks using sound level produced during rotary drilling. *Rock mechanics & rock engineering*, 2011. 44(5): p. 613-620.
- [22] Gradl, C., A.W. Eustes, and G. Thonhauser, An analysis of noise characteristics of drill bits. *Journal of energy resources technology*, 2012. 134(1): p. 013103.
- [23] Hasheminasab Zavare, F., Bagherpour, R. Baghbanan, A. and Monjezi, M. First-Order-Second-Moment Analysis of Reliability in Predicting the Rate of Penetration. *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 2018. 7(14): p. 13-21.
- [24] Byerlee, J., A review of rock mechanics studies in the United States pertinent to earthquake prediction, in *Rock Friction and Earthquake Prediction*. 1978, Springer. p. 586-602.
- [25] Hardy, H.R., Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research, in *Acoustic Emission*. 1972, ASTM International.
- [26] Marceau, J. and Y. Moji, Application of fracture mechanics testing to process control for adhesive bonding. Document D6-41145, Boeing Commercial Airplane Company, 1973.
- [27] Futó, J. and E. IVANIČOVÁ. L.: Optimization of rock disintegration using the acoustic signal. in *Proceedings of International Carpathian Control Conference 2003*. 2003. Citeseer.
- [28] Tripathi, R., et al., Monitoring of acoustic emission during the disintegration of rock. *Procedia Engineering*, 2016. 149: p. 481-488.
- [29] Khoshouei, M., R. Bagherpour, and M.H. Jalalian, Rock Type Identification Using Analysis of the Acoustic Signal Frequency Contents Propagated While Drilling Operation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021: p. 1-14.
- [30] Knill, J., J. Franklin, and A. Malone. A study of acoustic emission from stressed rock. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1968. Elsevier.
- [31] Schön, J.H., Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics. Vol. 65. 2015: Elsevier.
- [32] Jung, S., K. Prisdrey, and G. Wu, Prediction of rock hardness and drillability using acoustic emission
- [4] Adebayo, B. and J. Akande, Analysis of button bit wear and performance of down-the-hole hammer drill. *Ghana Mining Journal*, 2015. 15(2): p. 36-41.
- [5] Phillips, C.L., J.M. Parr, and E.A. Riskin, Signals, systems, and transforms. 2003: Prentice Hall Upper Saddle River.
- [6] Zborovjan, M., Identification of Minerals from Sound During Drilling. *Semestrat Project*. TU-Kosice, 2002. 6.
- [7] Zborovjan, M., I. Lesso, and L. Dorcak, Acoustic identification of rocks during drilling process. *Journal of Acta Montanistica Slovaca*, 2003. 8(4): p. 91-93.
- [8] Lak, M., Fatehi Marji, M., Yarahmadi Bafghi, A. , Abdollahipour, A. and pourghasemi sagand, M. , Analytical solution of the explosion-induced wave propagation in rock using elastodynamic theory. *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 2023. 13(34): p. 57-65.
- [9] Dini, A., Ahmadi, M. and Gastasbi, K. Investigating changes in thermal and mechanical stresses of rock caused by laser drilling in high finite pressure with finite element method. *Analytical and numerical methods in mining engineering*, 2016. 6(12): p. 47-55.
- [10] Sheng, M., et al., Frequency analysis of multi-sources acoustic emission from high-velocity waterjet rock drilling and its indicator to drilling efficiency. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019. 115: p. 137-144.
- [11] Mohseni, M., Atai, M. and Khalo Kakai, R. Effects of blast vibration on unplanned dilution in an underground metal mine. *Analytical and numerical methods in mining engineering*, 2019. 8(17): p. 77-90.
- [12] Khoshouei, M. and R. Bagherpour, Application of Acoustic Emission (AE) in mining and earth sciences: a review. *RGN zbornik*, 2019. 47.
- [13] Mokhtarian, M., Eftekhari, M. and Baghbanan, A. The application of principal component analysis in predicting the penetration coefficient of TBM using artificial neural networks. *Analytical and numerical methods in mining engineering*, 2013. 3(6): p. 33-43.
- [14] Obert, L. and W. Duvall, Use of subaudible noises for prediction of rockbursts II—report of investigation. *S Bureau of Mines, Denve*, 1941.
- [15] McNally, G., The prediction of geotechnical rock properties from sonic and neutron logs. *Exploration Geophysics*, 1990. 21(2): p. 65-71.
- [16] Ward, B., German Creek Mines Rock strength from velocity logs. *Unpublished report for Capricorn Coal Management Pty Ltd*, 1998.
- [17] Kawasaki, S., et al., An attempt to estimate mechanical properties of rocks using the Equotip hardness tester. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 2002. 43(4): p. 244-248.

- [41] Qin, M., et al., Analysis of signal characteristics from rock drilling based on vibration and acoustic sensor approaches. *Applied Acoustics*, 2018. 140: p. 275-282.
- [42] Kong, X., et al., Critical slowing down on acoustic emission characteristics of coal containing methane. *Journal of Natural Gas Science Engineering*, 2015. 24: p. 156-165.
- [43] Du, F., et al., Investigation on acoustic emission characteristics during deformation and failure of gas-bearing coal-rock combined bodies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018.
- [44] Yari, M. and R. Bagherpour, Implementing Acoustic Frequency Analysis for Development the Novel Model of Determining Geomechanical Features of Igneous Rocks Using Rotary Drilling Device. *Geotechnical Geological Engineering*, 2018. 36(3): p. 1805-1816.
- [45] Yari, M. and R. Bagherpour, Investigating an innovative model for dimensional sedimentary rock characterization using acoustic frequency analysis during drilling. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 2018. 33(2): p. 17-25.
- [46] Yari, M., R. Bagherpour, and M. Khoshouei, Developing a novel model for predicting geomechanical features of carbonate rocks based on acoustic frequency processing during drilling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019. 78(3): p. 1747-1759.
- [47] Liu, M.-K., Y.-H. Tseng, and M.-Q. Tran, Tool wear monitoring and prediction based on sound signal. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. 103(9): p. 3361-3373.
- [48] Khoshouei, M., et al., A New Look at Hard Rock Abrasivity Evaluation Using Acoustic Emission Technique (AET). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022. 55(4): p. 2425-2443.
- signatures during indentation. *International Journal of rock mechanics*, 1994. 31.
- [33] Miklusova, V., et al., Acoustic signal–new feature in monitoring of rock disintegration process. *Contributions to geophysics geodesy*, 2006. 36: p. 125-133.
- [34] Leššo, I., et al., New principles of process control in geotechnics by acoustic methods. *Metalurgija*, 2007. 46(3): p. 165-168.
- [35] Marinescu, I. and D. Axinte, A time–frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multiple teeth cutting simultaneously. *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 2009. 49(1): p. 53-65.
- [36] Kumar, B.R., et al., Artificial neural network model for prediction of rock properties from sound level produced during drilling. *Geomechanics Geoengineering*, 2013. 8(1): p. 53-61.
- [37] Kumar, B.R., et al., Regression analysis and ANN models to predict rock properties from sound levels produced during drilling. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 2013. 58: p. 61-72.
- [38] Kahraman, S., M. Delibalta, and R. Comakli, Noise level measurement test to predict the abrasion resistance of rock aggregates. *Fluctuation Noise Letters* 2013 p. 1350021.
- [39] Karakus, M. and S. Perez, Acoustic emission analysis for rock–bit interactions in impregnated diamond core drilling. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 2014. 68: p. 36-43.
- [40] Flegner, P., et al., Measurement and processing of vibro-acoustic signal from the process of rock disintegration by rotary drilling. *Measurement*, 2014. 56: p. 178-193.

20 Hardy

21 Moji

22 Byerlee

23 Knill

24 Hsu

25 Sun

26 Futo

27 Jung

28 Miklusova

29 Leššo

30 Marinescu

31 Vardhan

32 Karakus

33 Weights on Bit

34 Torque on Bit

35 Flegner

36 Qin

37 Krúpa

38 Liu

1 Acoustic waves

2 Sound level meter

3 Event

4 Amplitude

5 Duration

6 Threshold

7 Counts

8 Fast Fourier Transform

9 Zborovjan

10 Obert

11 Duvall

12 rock burst

13 McNally

14 Ward

15 Equotip

16 Kawasaki

17 Hatherly

18 Kumar

19 Gradl