

پردازش سیگنال‌های آوایی حین حفاری و تحلیل نرخ نفوذ به منظور ارائه مدل تجربی برای پیش‌بینی مشخصات مکانیکی سنگ‌های سخت

مهرداد خشوعی اصفهانی^۱؛ راحب باقرپور*^۲؛ محمدحسین جلالیان^۳؛ روزبه نیک‌بین^۳

۱- دکترای مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۳- دانشجوی دکترای مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰

(نویسنده مسئول: bagherpour@iut.ac.ir)

چکیده

مشخصات مکانیکی سنگ‌ها به‌طور مستقیم بر روی مصرف ابزارهای حفاری، نرخ پیشروی و به‌طور کلی هزینه‌های پروژه اثرگذار است. تاکنون روش‌ها و استانداردهای متعددی برای ارزیابی مشخصات سنگ‌ها توسعه داده شده است. در سال‌های اخیر استفاده از سیگنال‌های آوایی در علوم مهندسی به‌خصوص مهندسی معدن با افزایش چشمگیری همراه بوده است. هدف این مقاله بررسی ارتباط بین پارامترهای سیگنال‌های آوایی و لرزشی تولیدشده در حین حفاری و نرخ نفوذ با مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی در سنگ‌هاست. برای این منظور از ۱۰ نمونه سنگ آذرین (نمونه‌های گرانیتی) استفاده شد. در حین حفاری هر یک از نمونه‌های سنگی سیگنال‌های آوایی و لرزشی تولیدشده و نیز نرخ نفوذ برداشت و ثبت شد. با بررسی‌های آماری (رگرسیون خطی چند متغیره) بین مشخصات سیگنال‌ها و نرخ نفوذ با مشخصات سنگ‌ها مشخص شد که می‌توان مقادیر مشخصات مکانیکی سنگ‌ها را با دقت قابل قبولی تخمین زد و پیش‌بینی نمود. از مزایایی که این روش دارد این است که می‌توان تخمین اولیه‌ای از خصوصیات سنگ‌ها در هر حفاری به‌طور بلادرنگ با دقت بالا داشت. این موضوع از برتری‌های این روش نسبت به سایر روش‌هاست نیاز به نمونه‌برداری از سنگ و آزمایش‌ها تعیین مشخصات سنگ را کاهش می‌دهد.

حفاری، مشخصات مکانیکی سنگ، سیگنال‌های آوایی، لرزش حفاری، نرخ نفوذ، پردازش سیگنال.

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

است. عملیات و فرایندهای مهندسی در علوم زمین و ژئوتکنیک دارای یک یا چند خروجی به‌عنوان محصول نهایی در حالت‌ها و شکل‌های مختلف هستند که برخی از این خروجی‌ها مورد توجه و قابل اندازه‌گیری و برخی دیگر از جمله صوت جانبی بوده و معمولاً بدون کاربرد هستند. استفاده از امواج آوایی در سال‌های اخیر به‌صورت برداشت، ثبت، پردازش و تحلیل برای کاربردهای مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته

امروزه با گسترش و توسعه پروژه‌های معدنی و عمرانی فرایندهایی مانند پیش‌بینی و محاسبه خواص مواد با چالش‌ها و پیچیدگی‌هایی همراه است؛ بنابراین استفاده از روشی که بتوان با دقت، قابلیت اطمینان و سرعت بالا و با حداقل هزینه و به‌طور هم‌زمان با عملیات اصلی مشخصات سنگ‌ها را پیش‌بینی و محاسبه نمود از اهمیت بسیار زیادی برخوردار

پیش‌بینی و تخمین ساینده‌گی سنگ‌ها با استفاده از سطح صوت پرداختند. در این مطالعه آزمایش سایش لس‌آنجلس، اندازه‌گیری سطح صوت، چگالی و تخلخل بر روی ۲۷ نمونه مختلف سنگی انجام شد [۱۱].

در سال ۲۰۱۴ کاراکوش^۴ و همکاران به تحلیل طیف سیگنال‌های صوتی تولیدی از برخورد سرتمه و سنگ حین فرایند مغزه‌گیری پرداختند. در این مقاله از یک دستگاه مغزه‌گیر در مقیاس آزمایشگاهی و حس‌گرهای آوایی جهت ثبت سیگنال‌های صوتی طی فرایند حفاری استفاده شده است. در طی آزمایش روابط خطی به‌دست آمده که برای تخمین عمق برش، وزن روی سرتمه (*WOB*) و گشتاور سرتمه (*TOB*) با استفاده از طیف زمانی سیگنال آوایی میسر شد [۱۲]. در سال ۲۰۱۸ کین^۵ و همکاران با استفاده از سیگنال‌های آوایی و لرزشی در حفاری سنگ‌ها به تشخیص نوع سنگ تحت حفاری پرداختند. این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از حسگر ارتعاش و حسگر آوایی برای تشخیص ویژگی‌های زمانی که از طریق حفاری در انواع مختلف سنگ ایجاد می‌شود مفید و کارآمد است [۱۳].

در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ یاری و همکاران تحقیقاتی را در زمینه کاربرد پردازش سیگنال‌های آوایی در فرایند حفاری دورانی سنگ‌ها انجام دادند. هدف این تحقیقات بررسی ارتباط بین فرکانس‌های غالب سیگنال‌های صوتی تولیدشده در حین حفاری با 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 صوت ناشی از فرآیند حفاری دورانی در راستای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های ذکرشده در کوتاه‌ترین زمان ممکن و اقتصادی‌ترین حالت استفاده شود. پس‌ازانجام آزمایش‌های حفاری و آنالیز سیگنال‌های صوتی مربوطه به پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری (*UCS*)، مقاومت کششی (*BTS*)، سرعت موج *P* و تخلخل پرداخته شد. نتایج نشان داد که ارتباط قابل قبولی بین ویژگی‌های سنگ و فرکانس‌های غالب سیگنال‌های آوایی وجود دارد [۱۴-۱۶].

است [۳-۱]. در این مقاله با توجه به اهمیت بالای تعیین مشخصات سنگ‌ها با هدف پیش‌بینی این ویژگی‌ها، به بررسی ارتباط میان امواج آوایی و لرزشی تولیدشده طی فرایند حفاری دورانی و همچنین نرخ نفوذ با مشخصات مکانیکی سنگ‌ها پرداخته شده است.

ارزیابی و استفاده از امواج آوایی در علوم مهندسی تاکنون گسترش چشمگیری داشته است. در معادن استفاده از این امواج از دهه ۱۹۵۰ در معادن زیرزمینی شروع شده و به تدریج با اهداف گوناگونی همچون پیش‌بینی و تخمین موارد مختلف از جمله خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، رفتارسنجی مانند پایش شرایط عملیاتی دستگاه‌ها، تشخیص مواد در جریان‌های سیال و دیگر زمینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه برخی از مطالعات انجام‌شده در زمینه کاربرد پردازش سیگنال‌های آوایی در حفاری سنگ‌ها ارائه شده است [۴-۶]. بونس^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۱ به ارزیابی خاصیت ساینده‌گی با استفاده از امواج آوایی پرداختند. نتایج نشان داد که ماهیت وابسته به زمان سیگنال‌های صوتی قادر به تشخیص حضور افزودنی‌هایی که باعث کاهش ساینده‌گی می‌شود، است [۷]. واردهان^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی ارتباط بین سطح صدا و خصوصیات سنگ مانند مقاومت فشاری با استفاده از چکش حفاری در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند. داده‌های این مطالعه نشان می‌دهند که می‌توان با استفاده از سطح صدای تولیدشده در فرایند حفاری، مقاومت سنگ‌ها را پیش‌بینی نمود [۸].

کومار^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۰ به پیش‌بینی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها در مقیاس صحرایی پرداختند و سعی نمودند که با رفتارسنجی سطح صدای تولیدشده به این مشخصات دست پیدا کنند [۹، ۱۰]. در ادامه‌ی این تحقیقات با استفاده از روش رگرسیون به پیش‌بینی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های دگرگونی پرداخته شد. محققان در این مطالعه سعی داشته‌اند روابط ریاضی منطقی بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مختلف و متغیرهایی مانند قطر سرتمه، نرخ نفوذ، سرعت دوران سرتمه و سطح صدای معادل برقرار نمایند [۱۰]. قهرمان و همکاران در سال ۲۰۱۳ به

⁴ Karakus

⁵ Qin

¹ Boness

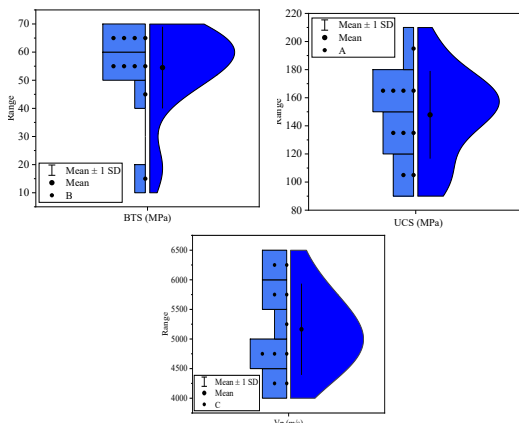
² Vardhan

³ Kumar

جدول ۱: آزمایش‌های انجام شده را به همراه استاندارد

مورد استفاده		
شرح استاندارد مورد نظر	مفهوم	نماد
مطابق با استاندارد ASTM C170	مقاومت فشاری تک‌محوری	UCS
مطابق با استاندارد ASTM-C496-71	مقاومت کششی (آزمون برزیلی)	BTS

نتایج تعیین مشخصات مکانیکی نمونه‌های سنگی در شکل ۲ به‌طور خلاصه ارائه شده است. در این شکل توزیع آماری پارامترها به همراه خلاصه ای از پارامترهای آماری هر یک از مشخصات مورد بررسی در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۲: نتایج تعیین مشخصات مکانیکی نمونه‌های سنگی مورد آزمایش

۲-۲-۲- اجرای آزمایش‌های حفاری و ثبت سیگنال‌ها

آزمایش‌های حفاری در این تحقیق با استفاده از دستگاه حفاری آزمایشگاهی کوچک مقیاس انجام شد. دستگاه حفاری مورد استفاده از نوع دورانی بوده و از سر مته‌های مخصوص سنگ‌های سخت با قطر ۸ میلی‌متر استفاده شد. برای انجام آزمایشات حفاری، از نمونه‌هایی که از قبل در ابعاد cm^3 $10 \times 10 \times 10$ آماده سازی شده‌اند، استفاده شده است. ابتدا این نمونه‌ها بر روی گیره مخصوص نگهداری سنگ بسته میشود و مته توسط پایه دریل و اهرم آن بر روی نقطه ای از سنگ که از پیش تعیین شده است قرار می‌گیرد. در مرحله ی دوم و پیش از شروع حفاری سرعت اولیه دوران سر مته با استفاده از تسمه‌های تعبیه شده در بالای دستگاه تعیین می‌شود. سرعت دوران حفاری در تمام آزمایشات بر روی 860 دور بر دقیقه تثبیت شده است. در حین آزمایشات حفاری،

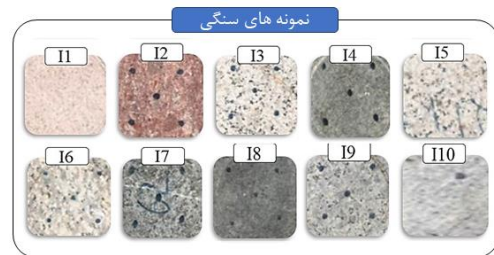
خشوعی و همکاران به بررسی ارتباط بین پارامترهای زمانی و فرکانسی سیگنال‌های صوتی و لرزشی حفاری با مقادیر ساینده‌گی شیمازک سنگ‌ها پرداختند. در این مقاله به این نتیجه رسیدند که مقادیر ساینده‌گی شیمازک سنگ‌ها با دقت بالایی با پارامترهای سیگنالی قابل پیش‌بینی و تخمین است [۱۹-۱۷].

با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که به‌کارگیری روش‌های نوین در پردازش سیگنال‌های آوایی می‌تواند کمک بزرگی به آینده آزمایش‌ها و عملیات در علوم زمین و ژئوتکنیک در بخش‌های مختلف همچون اکتشاف و پی‌جویی، مهندسی حفاری، فرآوری مواد معدنی، آزمایش‌های مکانیک سنگی و ... کند. در این مقاله نیز به بررسی ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی سنگ‌های آذرین با مشخصات سیگنال‌های آوایی، لرزشی و نرخ نفوذ حفاری پرداخته شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی و اجرای تحقیق

۲-۱- نمونه‌های سنگی مورد آزمایش

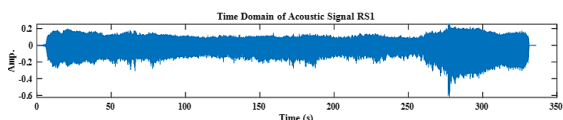
در این مقاله برای بررسی ارتباط بین مشخصات سنگ‌ها با پارامترهای آوایی-لرزشی، از ۱۰ نمونه سنگ آذرین با مشخصات مختلف استفاده شد که این سنگ‌ها از جمله سنگ‌های سخت و ساینده هستند. شکل ۱ نمونه سنگ‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمونه سنگ‌های مورد آزمایش

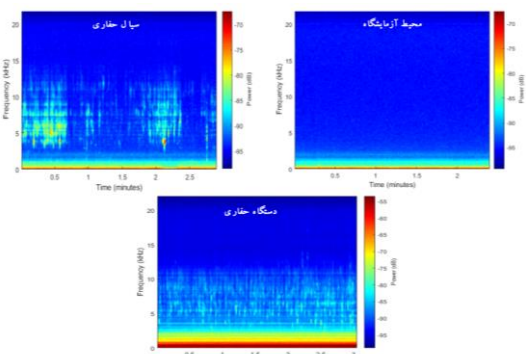
پس از جمع‌آوری نمونه‌های سنگی از معادن مختلف به آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش حفاری و آزمایش‌های تعیین مشخصات سنگ پرداخته شد. پارامترهای مکانیکی مورد بررسی در این مقاله شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی است که برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها از روش‌های استاندارد مکانیک سنگی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است.

فرکانسی آن‌ها از روش تبدیل فوریه استفاده شد [۱۹]. شکل ۴ نمونه‌ای از سیگنال‌های آوایی برداشت شده از عملیات حفاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمونه‌ای از سیگنال‌های آوایی برداشت شده از عملیات حفاری

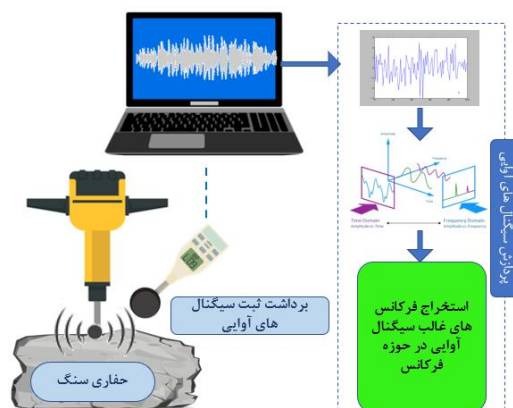
اولین مرحله از تحلیل‌ها، پردازش سیگنال‌های صوتی حالت مختلف به منظور شناسایی و تشخیص فرکانسی منابع تولید صوت است. بدین منظور پیش از انجام آزمایش‌های اصلی سیگنال‌های مربوط به صداهای موجود در محیط آزمایشگاه، صدای سیال حفاری در زمانی که حفاری انجام نمی‌شود و صدای موتور زمانی که حفاری انجام نمی‌شود ثبت و طیف نگار زمان-فرکانس این سیگنال‌ها مشخص شد. در شکل ۵ طیف فرکانس-زمان شرایط محیط آزمایشگاه، سیال حفاری و دستگاه حفاری به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است و از این طیف‌ها برای شناسایی و تشخیص و تفکیک از فرکانس‌های اصلی استفاده شده است.



شکل ۵: طیف زمان-فرکانس داده‌های پیش از آزمایش به تفکیک

همانطور که طیف‌های شکل ۵ نشان می‌دهند، بازه فرکانسی مربوط به محیط آزمایش و دستگاه حفاری صفر تا ۲۰۰۰ هرتز است. این موضوع توسط سایر محققین نیز مورد تأیید قرار گرفته است و به عنوان نویز پس زمینه شناخته می‌شود [۲۰، ۲۱]. این بازه فرکانسی همانطور که در شکل نشان داده شده است کاملاً از سایر باندهای فرکانسی جدا بوده و

نیروی فشاری پشت سرتمه برای نمونه‌های سنگی مختلف ثابت و برابر ۴۰۰ نیوتن در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد میکروفون کانونی را می‌بایست در نقطه‌ای قرارداد که محل برخورد سرتمه با سنگ به طور مستقیم در امتداد طول حسگر صوتی قرار گیرد. در این شرایط حسگر بیشترین گیرایی صدا را از برخورد سرتمه و سنگ خواهد داشت و صداهای تولید شده اضافی در حین حفاری (صدای ناشی از لرزش احتمالی دستگاه، ریزش آب، صدای محیط و غیره) تأثیری در فرکانس‌های اصلی دریافتی از فرآیند حفاری نخواهند داشت. هم‌زمان با شروع حفاری، سیگنال آوایی و لرزشی تولید شده نیز با استفاده از حسگرهای نصب شده بر روی دستگاه حفاری برداشت و ثبت شد. جهت حذف پارامترهای مؤثر بر سیگنال‌ها تمامی آزمایش‌ها تحت شرایط عملیاتی ثابت انجام شد. برای هر نمونه سنگ، سیگنال آوایی به مدت ۳۰۰ ثانیه برداشت و برای پردازش سیگنال آماده‌سازی شد. شکل ۳ روند اجرای آزمایش‌ها حفاری را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

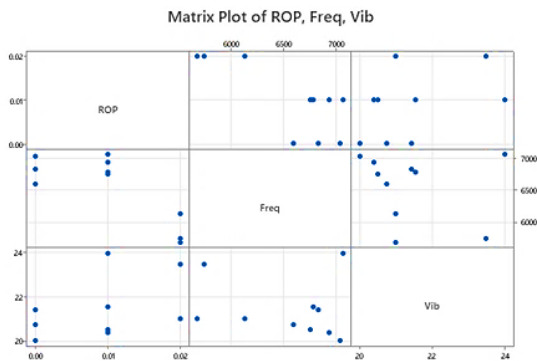


شکل ۳: روند اجرای آزمایش‌ها حفاری و پردازش سیگنال‌های آوایی

۳- نتایج پردازش سیگنال‌ها و ارزیابی‌های آماری

آماري

پس از اجرای آزمایش‌ها حفاری و ثبت سیگنال‌های آوایی و لرزشی تولید شده در حفاری هر یک از نمونه‌های سنگی به پردازش سیگنال‌ها پرداخته شد. سیگنال‌های آوایی حفاری در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور تبدیل سیگنال‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس و استخراج محتوای



شکل ۶: ماتریس ارتباط بین پارامترهای پیش‌بینی کننده مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

با بررسی ارتباط بین هر یک از پارامترهای ورودی با یکدیگر می‌توان بیان نمود که پارامترها از همدیگر مستقل بوده و ارتباط و یا روند خاصی با یکدیگر ندارند. پس از این که مشخص شد مقادیر پارامترها از یکدیگر مستقل هستند، به بررسی آماری ارتباط بین پارامترهای صوتی، لرزشی و عملیاتی حفاری با مشخصات مکانیکی نمونه سنگ‌های مورد آزمایش پرداخته شد. برای این منظور از مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شد. روابط ۱ و ۲ ارتباط بین پارامترهای ورودی و مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی را نشان می‌دهد.

$$UCS = -88 - 2193 ROP + 0.0288 Freq + 3.19 Vib \quad R^2=0.84 \quad (1)$$

$$BTS = 6.2 - 243 ROP + 0.00187 Freq - 0.105 Vib \quad R^2=0.89 \quad (2)$$

که در این روابط ROP معرف نرخ نفوذ حفاری، $Freq$ معرف فرکانس غالب سیگنال آوایی و Vib نیز حداکثر لرزش حفاری در هر آزمایش را نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی مدل‌های توسعه داده شده به بررسی $ANOVA$ یا $analysis of variance$ مدل‌های توسعه داده شده پرداخته شد و نتایج $ANOVA$ مدل‌های ارائه داده شده جهت پیش‌بینی مشخصات سنگ‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

همواره در سطح فرکانسی پایین تری نسبت به صوت حاصل از حفاری سنگ قرار دارد. به همین دلیل در مراحل بعدی پردازش از بررسی این بازه فرکانسی به دلیل این که در تمامی حالت ثابت است صرفه نظر می‌شود.

پس از پردازش سیگنال از هر یک از سیگنال‌های مورد بررسی، فرکانس غالب مربوط به برخورد سرمته و سنگ برداشت شد. همچنین علاوه بر فرکانس به استخراج و بررسی لرزش حفاری و نرخ نفوذ حفاری در هر آزمایش حفاری پرداخته شد [۲۰، ۲۲]. نتایج پارامترهای ورودی به دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای ورودی (مقادیر به ترتیب بر حسب Hz، m/s^2 و mm/s هستند)

ردی ف	سیگنال ال	فرکانس غالب سیگنال آوایی	حداکثر لرزش حفاری	نرخ نفوذ حفاری
۱	RS1	۵۶۸۲	۲۰/۹۹	۰/۰۲۳۶
۲	RS2	۶۱۳۲	۲۰/۹۹	۰/۰۲۱۶
۳	RS3	۷۰۵۸	۲۳/۹۹	۰/۰۱۰۷
۴	RS4	۶۷۴۷	۲۰/۵۰	۰/۰۰۵۱
۵	RS5	۶۵۹۴	۲۰/۷۵	۰/۰۰۴۸
۶	RS6	۶۷۷۷	۲۳/۵۳	۰/۰۰۸۳
۷	RS7	۷۰۳۱	۲۰/۰۱	۰/۰۰۴۲
۸	RS8	۵۷۴۹	۲۳/۴۹	۰/۰۲۱۱
۹	RS9	۶۸۳۰	۲۱/۴۳	۰/۰۰۴
۱۰	RS10	۶۹۳۱	۲۰/۴۰	۰/۰۰۵۱

پس از استخراج مشخصات سیگنال‌ها و پارامتر نرخ نفوذ به بررسی ارتباط بین مشخصات مکانیکی سنگ‌های مورد آزمایش با پارامترهای ورودی پرداخته شد. ابتدا به بررسی ارتباط بین ورودی پرداخته شد. برای این منظور از ماتریس همبستگی استفاده شد. شکل ۶ نتیجه ماتریس همبستگی پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج ANOVA مدل‌های پیش‌بینی کننده

مشخصات مکانیکی سنگ‌ها						
Target	P-Value	F-Value	Adj MS	Adj SS	DF	Source
UCS	۰/۰۰۰۹	۱۰/۳۰	۲۸۱۵/۵	۸۶۴۶/۶	۳	Regression
	۰/۳۴۴	۱/۶۷	۴۵۵/۶	۴۵۵/۶	۱	ROP
	۰/۲۹۶	۱/۳۱	۳۸۵/۳	۳۸۵/۳	۱	Freq
	۰/۵۳۳	۰/۴۴	۱۱۹/۵	۱۱۹/۵	۱	Vib
BTS	۰/۰۰۲	۱۶/۸۸	۲/۱۳۲۲	۷/۳۴۶۷	۳	Regression
	۰/۱	۳/۷۶	۵/۶۰۴۷	۵/۶۰۴۷	۱	ROP
	۰/۳۵۳	۱/۰۱	۱/۵۰۸۷	۱/۵۰۸۷	۱	Freq
	۰/۷۷۷	۰/۰۹	۰/۱۳۰۵	۰/۱۳۰۵	۱	Vib

تعیین مشخصات سنگ‌ها از جمله مقاومت فشاری سنگ‌ها با دقت نسبتاً قابل قبولی پیش‌بینی نمود. پیشنهاد می‌شود در آینده از خواص دیگر سنگ‌ها شامل محتوای کوارتز سنگ‌ها نیز در بررسی‌ها استفاده شود تا امکان پیش‌بینی این خواص نیز با استفاده از سیگنال‌های آوایی حین حفاری ارزیابی شود. با استفاده از این روش علاوه بر کم‌هزینه بودن و سریع بودن می‌توان به صورت بلادرنگ در هر مرحله از حفاری، مشخصات سنگ را به دست آورد تا با استفاده از آن پارامترهای عملیاتی حفاری را کنترل نمود. این مقاله به‌رغم دستاوردهای ارزشمند خود با محدودیت‌هایی مواجه است که می‌تواند به‌عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد. یکی از محدودیت‌های اصلی، اندازه محدود تعداد نمونه سنگی با ۱۰ سنگ آذرین است که تعمیم‌پذیری نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده تعداد نمونه‌ها افزایش یابد و سایر انواع سنگ‌ها مانند رسوبی و دگرگونی نیز بررسی شوند. همچنین، این پژوهش تنها به تحلیل آزمایشگاهی پرداخته و نتایج آن در محیط‌های عملیاتی و صنعتی اعتبارسنجی نشده‌اند؛ بنابراین، اجرای آزمایش‌ها در شرایط واقعی برای سنجش دقت و کارایی روش پیشنهاد می‌شود. به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین به‌جای روش‌های آماری خطی می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند. همچنین، بررسی ویژگی‌های صوتی و لرزشی بیشتر و ترکیب آن‌ها می‌تواند مدل‌های پیش‌بینی قوی‌تر و جامع‌تری ارائه دهد. این پژوهش می‌تواند با توسعه این مسیرهای تحقیقاتی به پیشرفت روش‌های پیش‌بینی خواص مکانیکی سنگ‌ها در پروژه‌های معدنی و عمرانی کمک شایانی کند.

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

امروزه با گسترش پروژه‌های معدنی و عمرانی و استفاده از ابزارها و تجهیزات مختلف، فرایندهایی همچون پیش‌بینی و تخمین خواص و مشخصات مواد، رفتارسنجی و تشخیص وضعیت با مشکلاتی همراه است؛ بنابراین استفاده از روشی که بتوان دقیق، سریع، با حداقل هزینه و صرف کمترین زمان و به‌طور هم‌زمان با اجرای عملیات اصلی به اهداف موردنظر دست‌یافت از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. عملیات و فرایندها دارای یک یا چند خروجی به‌عنوان محصول نهایی هستند که برخی از این محصولات مورد استفاده و برخی دیگر از نتایج از جمله لرزش جانبی بوده و اغلب بدون استفاده

تحلیل‌های انجام شده در جدول ۳ به بررسی تأثیر و معناداری متغیرهای مستقل شامل نرخ نفوذ (ROP)، فرکانس (Freq) و لرزش (Vib) در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مقاومت کششی برزیلی (BTS) پرداخت. مقادیر *F-Value* و *P-Value* نشان‌دهنده میزان تأثیر هر متغیر بر مدل هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در پیش‌بینی UCS متغیر نرخ نفوذ (ROP) تأثیر قابل‌توجهی داشته و مقدار *P-Value* برابر ۰/۰۰۰۹ بیانگر معناداری این متغیر است. در مقابل، لرزش تأثیر کمتری داشته و مقادیر *P-Value* بالاتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده معناداری کمتر آماری آن‌ها به‌صورت مستقل است.

در پیش‌بینی BTS نیز متغیر نرخ نفوذ با مقدار *P-Value* برابر ۰/۱ تأثیر بیشتری نسبت به سایر متغیرها نشان داده است. تحلیل نتایج بیان می‌کند که اگرچه برخی متغیرها به‌صورت انفرادی همبستگی قوی با پاسخ‌ها ندارند، اما ترکیب آن‌ها در مدل‌های چندمتغیره منجر به بهبود دقت پیش‌بینی می‌شود. با توجه به این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های توسعه‌یافته قادر به پیش‌بینی مشخصات مکانیکی سنگ‌ها با دقت قابل‌قبولی هستند، هرچند افزایش تعداد داده‌ها و بررسی ترکیبات پیچیده‌تر متغیرها می‌تواند دقت این مدل‌ها را بیش‌ازپیش بهبود بخشد.

بر اساس نتایج ارائه‌شده می‌توان دریافت که با استفاده از فرکانس غالب آکوستیک، لرزش حفاری و نرخ نفوذ حفاری می‌توان مقادیر مشخصات مکانیکی سنگ‌ها را با دقت قابل‌قبولی تخمین زد. از نتایج برداشت شده از بررسی ارتباط بین مشخصات مکانیکی سنگ‌ها با مشخصات سیگنال‌های آکوستیک و لرزشی تولیدشده در حین حفاری می‌توان بیان نمود که با استفاده از این روش که از جمله روش‌های غیر مخرب است می‌توان بدون این‌که نیاز به انجام آزمایش‌های

مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ‌ها پرداخته شد و نتایج نشان داد که پارامترهای به‌دست‌آمده از سیگنال‌های آکوستیک و لرزشی و نرخ نفوذ حفاری با دقت نسبتاً قابل قبولی (ضرایب همبستگی به دست آمده به ترتیب ۰/۸۴، ۰/۸۹ و ۰/۷۴ بود) با مشخصات مکانیکی سنگ‌ها ارتباط دارد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در این مقاله و نتایجی که از ارزیابی‌ها به دست آمد می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که با استفاده از پردازش سیگنال‌های آوایی تولید شده در حفاری می‌توان به پیش‌بینی مشخصات سنگ‌ها پرداخت که این روش از جمله روش‌های دقیق و به‌روز است که می‌توان نتایج را با کمترین هزینه و زمان به دست آورد و این روش به واسطه ویژگی‌های منحصر به فرد مانند سادگی، سرعت و دقت بالا و به‌روز بودن، می‌تواند جایگزینی مناسب برای روش‌های گذشته به حساب آید.

هستند. در سال‌های اخیر استفاده از امواج آوایی برای اهداف مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تکنیک‌های انتشار آوایی از جمله روش‌های غیر مخرب است که می‌تواند بسیار مفید و کارآمد باشد. در این مقاله با توجه به اهمیت فرایند حفاری به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین عملیات در معادن به بررسی ارتباط میان لرزش حفاری، مشخصات امواج آوایی و لرزشی تولیدشده در حین فرایند حفاری با مشخصات مکانیکی سنگ‌ها پرداخته شد. در ارزیابی‌های انجام شده در این مقاله امکان ایجاد ارتباط بین مشخصات مکانیک چند نمونه سنگ گرانیتی با پارامترهای مختلف سیگنال‌های صوتی منتشر شده در سنگ مورد بررسی قرار گرفت. پس از آماده‌سازی نمونه‌های سنگی، به انجام آزمایش‌های تعیین مشخصات سنگ‌ها پرداخته شد. همچنین نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های حفاری نیز آماده‌سازی شده و آزمایش‌های حفاری هم‌زمان با برداشت و ثبت داده‌ها بر روی هر یک از سنگ‌ها انجام شد. با استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغیره به بررسی ارتباط پارامترهای ورودی با مشخصات

۵- منابع

- [1] Flegner, P., et al., *Processing a measured vibroacoustic signal for rock type recognition in rotary drilling technology*. Measurement, (2019). **134**: p. 451-467.
- [2] Sheng, M., et al., *Frequency analysis of multi-sources acoustic emission from high-velocity waterjet rock drilling and its indicator to drilling efficiency*. (2019). **115**: p. 137-144.
- [3] Shi, X., et al., *A brittleness index evaluation method for weak-brittle rock by acoustic emission technique*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, (2021). **95**: p. 104160.
- [4] Khoshouei, M. and R. Bagherpour, *Application of Acoustic Emission (AE) in mining and earth sciences: a review*. RGN zbornik, (2019). **47**.
- [5] Obert, L. and W. Duvall, *Use of subaudible noises for prediction of rockbursts II—report of investigation*. S Bureau of Mines, Denve, (1941).
- [6] 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.
- [7] Boness, R. and S. McBride, *Adhesive and abrasive wear studies using acoustic emission techniques*. Wear, (1991). **149**(1-2): p. 41-53.
- [8] Vardhan, H., G. Adhikari, and M.G. Raj, *Estimating rock properties using sound levels produced during drilling*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, (2009). **46**(3): p. 604-612.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Kahraman, S., M. Delibalta, and R. Comakli, *Noise level measurement test to predict the abrasion resistance of rock aggregates*. Fluctuation Noise Letters (2013). **12**(04): p. 1350021.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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 and Geological Engineering, (2018). **36**(3): p. 1805-1816.
- [16] 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.
- [17] Khoshouei, M. and R. Bagherpour, *Predicting the Geomechanical Properties of Hard Rocks Using Analysis of the Acoustic and Vibration Signals During the Drilling Operation*. Geotechnical and Geological Engineering, (2020): p. 1-13.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Khoshouei, M., R. Bagherpour, and M. Yari, *A smart look at monitoring while drilling (MWD) and optimizing using acoustic emission technique (AET)*. Scientific Reports, (2024). **14**(1): p. 19766.
- [22] Zborovjan, M., *Identification of Minerals from Sound During Drilling*. Semestral Project. TU-Kosice, (2002). **6**.
- [23] Allen, R.L. and D. Mills, *Signal analysis: time, frequency, scale, and structure*. 2004: John Wiley & Sons.



Acoustic Signal Processing During Drilling and Penetration Rate Analysis for Developing an Empirical Model to Predict the Mechanical Properties of Hard Rocks

Mehrbod Khoshouei¹; Raheb Bagherpour^{1*}; Mohammad Hossein Jalalian¹; Rouzbeh Nikbin¹

1- Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111, Iran.

Received: 21. December. 2023 Accepted: 05. March. 2024
(Corresponding Author: bagherpour@iut.ac.ir)

Keywords

Drilling
Rock Mechanical Properties
Acoustic Signals
Drilling Vibration
Penetration Rate
Signal Processing

Final English Extended Abstract

Summary

This study investigates the relationship between the acoustic and vibration signals generated during drilling and the mechanical properties of rocks. The research aims to evaluate the feasibility of using these signals for real-time prediction of rock properties, such as uniaxial compressive strength (UCS) and tensile strength. 10 igneous rock samples were drilled, and their acoustic and vibration signals, as well as penetration rates, were recorded. Statistical analysis using multivariate linear regression revealed significant correlations between signal parameters and rock properties, enabling accurate prediction with

acceptable precision. This method reduces the need for conventional sampling and laboratory testing, providing a fast, cost-effective, and non-invasive solution for estimating rock properties during drilling operations.

Introduction

Rock mechanical properties influence drilling efficiency, tool wear, and project costs. Traditional methods for assessing these properties are time-consuming and expensive. This study explores the application of acoustic signals to predict rock properties during drilling. The aim is to provide a practical, fast, and precise method to replace conventional approaches, particularly for mining and construction projects.

Methodology and Approaches

Ten igneous rock samples were drilled while recording acoustic and vibration signals alongside penetration rates. Mechanical properties of the rocks were measured through standard laboratory tests. The data were analyzed using multivariate regression to establish relationships between signal parameters and rock properties. The statistical accuracy of the model was validated through correlation coefficients.

Results and Conclusions

The analysis showed strong correlations between signal parameters and rock properties, with correlation coefficients of 0.84 and 0.89 for UCS and tensile strength, respectively. These results demonstrate the potential of using signal analysis for real-time prediction of rock properties. This method eliminates the need for extensive sampling and testing, offering a fast, cost-efficient, and accurate solution. It is a modern, non-invasive approach that can revolutionize drilling operations by improving decision-making and reducing operational costs.