

بررسی ارتباط بین فرکانس‌های بنیادی تولیدی حاصل از حفاری دورانی با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های کربناته

مجتبی یاری ملک‌آباد^۱، راحب باقرپور^{۲*}، مهرداد خسوعی اصفهانی^۳، محمدحسین جلالیان^۴

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر

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

۳- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۱

چکیده

حفاری در معادن همواره به‌عنوان یکی از آحاد عملیاتی اصلی در شاخه‌های مختلف مهندسی معدن مطرح بوده است. حفاری در تمام سطوح آن و بدون توجه به کاربرد آن دارای محصول جنبی سیگنال‌های صوتی می‌باشد. از طرف دیگر شناخت نوع سنگ و ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ یکی از مسائل بسیار مهم در مهندسی معدن همچنین اساس و پایه‌ی اکثر طراحی‌ها در مهندسی معدن می‌باشد. تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ، هم از لحاظ میزان زمانی که برای این فرایند صرف می‌شود و هم از جنبه‌ی اقتصادی دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این تحقیق سعی بر آن خواهد بود که از آنالیز فرکانس‌های صوت ناشی از فرآیند حفاری در راستای تعیین ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی سنگ در کوتاه‌ترین زمان ممکن و اقتصادی‌ترین حالت استفاده گردد. برای این منظور نمونه‌های سنگ‌های کربناته در بازه‌ی قابل قبولی از ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی تهیه‌شده و پس از انجام آزمایشات حفاری و آنالیز سیگنال‌های صوتی مربوطه به‌پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، سرعت موج P پرداخته‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که ارتباط قابل قبولی مابین ویژگی‌های فوق و فرکانس‌های غالب وجود دارد.

واژگان کلیدی

آنالیز سیگنال صوتی، حفاری دورانی، خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، سنگ‌های کربناته.

۱- مقدمه

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 [۱]. تعیین مشخصات فیزیکی - مکانیکی سنگ‌ها از بزرگ‌ترین

عملیات حفاری یک فرایند بنیادی در استخراج سنگ و ژئوتکنیک است و یک فرایند کلیدی برای تکمیل چرخه‌ی معدن کاری به شمار می‌آید. به‌طورکلی، فرایند حفاری همیشه صدا را به‌عنوان محصول فرعی تولید می‌کند. این صدا از برخورد سرتمه و سنگ، بدون در نظر گرفتن نوع سرتمه یا موادی که سرتمه در آن حفاری می‌کند، ایجاد می‌شود. در حین فرایند حفاری، معلوم بودن نوع سنگ و

لس آنجلس، اندازه‌گیری سطح نويز، 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 لس آنجلس و سطح نويز یافت شد. نتایج تحلیل رگرسیون نشان دادند که ضرایب همبستگی رگرسیون چندمتغیره بیشتر از رگرسیون ساده است. به‌عنوان نتیجه‌گیری می‌توان بیان نمود که سایش لس آنجلس نمونه‌های سنگی می‌تواند با اندازه‌گیری سطح نويز تخمین زده شوند.

در سال ۲۰۱۴ Karakus و همکاران به تحلیل طیف سیگنال‌های صوتی ناشی از برخورد سرتمه و سنگ حین فرایند مغزه‌گیری پرداختند. در این مقاله از یک دستگاه مغزه‌گیر در مقیاس آزمایشگاهی و حس‌گرهای آکوستیک جهت ثبت سیگنال‌های صوتی طی فرایند حفاری استفاده شده است. در طی آزمایش روابط خطی به‌دست‌آمده که برای تخمین عمق برش، وزن روی سرتمه (WOB) و گشتاور سرتمه (TOB) با استفاده از طیف زمانی سیگنال آکوستیک میسر شد [۱۳].

Buj-Corral و همکاران در سال ۲۰۱۸ به پردازش طیف سیگنال فرایند برش با استفاده از روش‌های FFT و HHT پرداختند. برای این منظور پارامترهای آکوستیک با استفاده از طیف فرکانسی استخراج شد و با استفاده از روش انتشار آکوستیک رفتار سنجی دستگاه برش بدون توقف دستگاه انجام گرفت. نتایج این آزمایش به این صورت است که با توجه به مشخصات سیگنال‌های موجود می‌توان به شرایط بهینه عملکرد فرایند برش دست‌یافت [۱۴].

از جمله موضوعاتی که در زمینه تشخیص از تکنیک‌های انتشار آکوستیک استفاده شده است، مطالعات سنگ‌شناسی در حوزه نفت است [۱۵]. تشخیص سنگ‌شناسی در حوزه حفاری نفت امری بسیار حیاتی است. در سال ۲۰۱۸ توسط Qin و همکاران با به‌کاربردن سیگنال‌های آکوستیک لرزشی در حفاری سنگ‌ها به تشخیص نوع سنگ مورد حفاری پرداخته شد. برای بررسی رابطه بین خواص سنگ و ویژگی‌های سیگنال آکوستیک و

دغدغه‌های مهندسی معدن در عملیات مختلف معدنکاری است و زیربنای اکثر طراحی‌های مربوط به مهندسی معدن را تشکیل می‌دهد. هدف این مقاله پیش‌بینی خواص مختلف نمونه‌های سنگی با استفاده از روش انتشار آکوستیک در حین عملیات حفاری است.

انتشار آکوستیک در سال ۲۰۰۱، از طریق شناسایی سنگ‌ها در حین حفاری با استفاده از سیگنال‌های صوتی توسط M. Zborovjan بررسی شد [۲]. Hatherly در سال ۲۰۰۲ روشی جایگزین برای تخمین UCS از سنگ‌های الاستیک از لاگ‌های چال‌های ژئوفیزیکی ارائه داد [۳]. Zborovjan و همکارانش در سال ۲۰۰۳ مجدداً اثرات آکوستیک سنگ‌ها را در طی عملیات حفاری مورد بحث قرار دادند. در این پژوهش محققان به این نتیجه رسیده‌اند که سیگنال آکوستیک آنالیز شده که طی حفاری دورانی به دست می‌آید، می‌تواند برای کنترل پروسه‌ی حفاری استفاده شود [۴]. Futo و همکارانش در سال ۲۰۰۳ امکان حفاری بهینه سنگ از طریق پایش سیگنال‌های آکوستیک را مورد بحث قرارداد [۵]. Williams و Hagan در سال ۲۰۰۶، تغییر شرایط برش سنگ را با تغییر سیگنال‌های آکوستیک تولیدشده در برش سنگ بررسی کردند [۶]. در سال ۲۰۰۶، Miklusova و همکارانش دستگاهی آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی حفاری دورانی با ابزارهای حفاری با قطر کوچک در آزمایشگاه توسعه دادند [۷]. در سال ۲۰۰۷ امکان استخراج ویژگی‌های سرتمه با استفاده از داده‌های آکوستیک توسط Roy and Adhikari مورد بحث واقع شد [۸]. Gradl و همکارانش در سال ۲۰۰۸ ادعا کردند که خصوصیات سرتمه می‌تواند تنها با استفاده از داده‌های آکوستیک، همانند صدای سرتمه تعیین شود [۹]. در سال ۲۰۱۲، Gradl و همکارانش به اندازه‌گیری نویزهای حاصل از حفاری با استفاده از یک میکروفون و یک ژئوفون و آنالیز رابطه بین طراحی سرتمه و خصوصیات لرزه‌ای و آکوستیک سرتمه پرداختند [۱۰]. Kumar و همکارانش در سال ۲۰۱۳ به پیش‌بینی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با توجه به سطح صدای تولیدی پرداختند [۱۱].

قهرمان و همکاران در سال ۲۰۱۳ به پیش‌بینی مقاومت سایشی سنگ‌ها با استفاده از سطح نويز تولیدشده پرداختند [۱۲]. در این مطالعه آزمایش‌های سایش

1 Weight On Bit

2 Torque Of Bit

حفاری قرار می‌گیرند و ویژگی‌های فرکانسی سیگنال صوتی حاصل از حفاری آن‌ها که همان فرکانس‌های بنیادی به‌دست‌آمده از سیگنال‌های آکوستیک است، بررسی گردد.

۲- نمونه‌های سنگی مورد آزمایش و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها

برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها در مراحل نخست به جمع‌آوری این نوع سنگ‌ها در بازه‌ی وسیعی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی پرداخته شده است. هدف نهایی از این تحقیق تعیین ویژگی‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، سرعت موج P سنگ‌های کربناته با استفاده از آنالیز فرکانس‌های صوتی می‌باشد. در مجموع تعداد ۸ نوع سنگ کربناته به شرح جدول ۱ گردآوری شده است.

جدول ۱- نمونه‌های مورد آزمایش و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها

Code	UCS (MPa)	TS (MPa)	V_p (m/s)
C1	63.80	07.93	6226
C2	55.25	07.02	6240
C3	140.0	13.97	5896
C4	107.4	11.12	6145
C5	87.25	08.84	5392
C6	115	11.44	5847.16
C7	13.3	3.48	5662.5
C8	56.4	7.29	6080.54

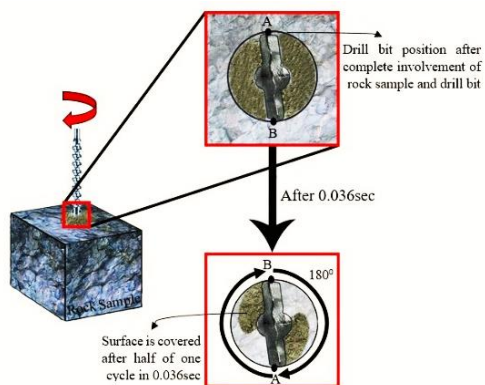
برای آزمایش حفاری در هرکدام از نمونه‌های سنگی یک نمونه‌ی استاندارد مکعب با ابعاد $9 \times 9 \times 9 \text{ cm}^3$ تهیه شد. نمونه‌ای از این سنگ‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

لرزشی تولیدشده در حفاری، یک سیستم سنجش ارتعاش حفاری سنگ ساخته شده است و آزمایش حفاری انجام گرفت. این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از حس‌گر ارتعاش و حس‌گر آکوستیک برای تشخیص ویژگی‌های زمانی که از طریق حفاری در انواع مختلف سنگ ایجاد می‌شود امکان‌پذیر است [۱۶].

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 با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ بود که برای آزمایش از نمونه سنگ‌های آذرین، دگرگونی، رسوبی و کربناته در بازه‌ای گسترده از مشخصات فیزیکی و مکانیکی 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. پس از آزمایش‌های حفاری و آنالیز سیگنال‌های صوتی مربوطه به پیش‌بینی پارامترهایی همچون مقاومت فشاری تک‌محوره (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 [۱، ۱۷، ۱۸].

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که به‌طور کلی روابطی منطقی بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مختلف و پارامترهای عملیاتی با سطح صدای آن‌ها وجود دارد. همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره شده است، برای اظهار نظر قطعی در مورد ارتباط نوع سنگ‌ها و صدای حفاری تولیدشده از آن‌ها نیاز است که ابزارهای آنالیز مانند تبدیل سریع فوریه (FFT) به‌منظور انتقال داده‌ها به دامنه‌ی فرکانس و پالایه کردن نویزهای موجود برای شناسایی فرکانس‌های غالب (که موجب شناسایی سنگ‌ها خواهد شد) استفاده گردد [۱۹]. در این مطالعه به‌صورت مبسوط این موضوع مورد بحث و آزمایش قرار گرفته است. در این تحقیق سعی بر این بوده است که وجود ارتباط منطقی و ریاضی بین ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی سنگ‌هایی که مورد

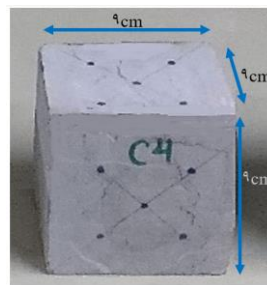
در حین حفاری (صدای ناشی از لرزش احتمالی دستگاه، ریزش آب، صدای محیط و غیره) تأثیری در فرکانس‌های اصلی دریافتی از فرآیند حفاری نخواهند داشت. پس‌ازاینکه میزان برخورد سرتمه و سنگ به آستانه درگیری سرتمه و سنگ رسید، ضبط صدای حفاری آغاز می‌شود. ضبط صدا به مدت ۲۰ ثانیه برای هرکدام از نمونه‌های سنگی و سه بار برای هرکدام از نمونه‌های سنگی ادامه پیدا می‌کند (یافته‌های سابق ثابت کرده است که ضبط صدا بیش از ۲۵ ثانیه کمکی به بهبود فرکانس‌های دریافتی نمی‌کند [۴]). از کل ۲۰ ثانیه صدای ضبط‌شده نمونه‌ای به طول ۰/۳۶ ثانیه (نصف زمان لازم برای یک دور دوران کامل سرتمه (شکل ۲)) گرفته‌شده و مورد مطالعات مربوط به آنالیز فرکانس قرار می‌گیرد.



شکل ۲- موقعیت قرارگیری سرتمه پس از نیم دور گردش جهت ثبت صدا

۴- پردازش سیگنال‌های صوتی فرآیند حفاری و آنالیز آماری

در مرحله‌ی اجرای آزمایشات و در حین حفاری‌های انجام‌شده در مجموع ۸ نوع سنگ کربناته، صدای ناشی از فرآیند حفاری به مدت ۲۰ ثانیه ضبط گردید. از صدای ضبط‌شده به‌اندازه‌ی زمان نصف دوران کامل سرتمه (۰/۶۶ ثانیه) نمونه‌گیری انجام می‌شود؛ زیرا در این مدت‌زمان کل سطح سرتمه با کل سنگ درگیر شده است (شکل ۲). الگوریتم‌های اسپکتوگرام مربوط به نمونه‌های سنگ کربناته که تحت آزمایش حفاری قرار گرفته‌اند در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱- نمونه‌ای از سنگ‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

برای تعیین مشخصات سنگ‌ها از روش‌های استاندارد مکانیک سنگی و تجهیزات جدول ۲ استفاده شده است:

جدول ۲- آزمایش‌های انجام‌شده را به همراه استاندارد

مورد استفاده		
نماد	مفهوم	شرح استاندارد آزمایش
UCS	مقاومت فشاری تک‌محوری	مطابق با استاندارد ASTM C170
BTS	مقاومت کششی (آزمون برزیلی)	مطابق با استاندارد ASTM-C496-71
Vp	سرعت موج طولی	مطابق با استاندارد ISRM (1981)

۳- مراحل انجام کار

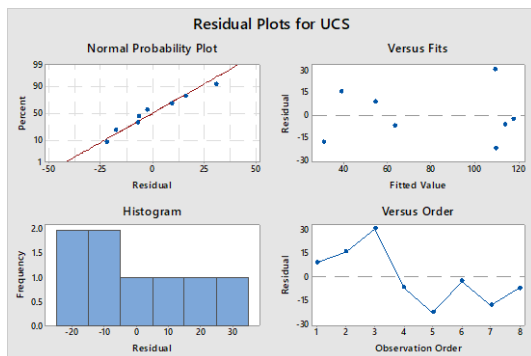
برای انجام آزمایشات حفاری، از نمونه‌هایی که از قبل در ابعاد $9 \times 9 \times 9 \text{ cm}^3$ آماده‌سازی شده‌اند، استفاده شده است [20, 21]. ابتدا این نمونه‌ها بر روی گیره مخصوص نگه‌داری سنگ بسته می‌شود و مته توسط پایه دریل و اهرم آن بر روی نقطه‌ای از سنگ که از پیش تعیین شده است قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی دوم و پیش از شروع حفاری سرعت اولیه‌ی دوران سرتمه با استفاده از تسمه‌های تعبیه‌شده در بالای دستگاه تعیین می‌شود. سرعت دوران حفاری در تمام آزمایشات بر روی 830 RPM تثبیت شده است. در حین آزمایشات حفاری، نیروی فشاری پشت سرتمه برای نمونه‌های سنگی مختلف ثابت و برابر 400 N در نظر گرفته شده است. در مرحله‌ی بعد میکروفون کانونی را می‌بایست در نقطه‌ای قرارداد که محل برخورد سرتمه با سنگ به‌طور مستقیم در امتداد طول میکروفون قرار گیرد. در این شرایط میکروفون بیشترین گیرایی صدا را از برخورد سرتمه و سنگ خواهد داشت و صداهای تولیدشده‌ی اضافی

۴-۱- مقاومت فشاری تک‌محوری

ارتباط آماری بین فرکانس‌های غالب و مقاومت فشاری تک‌محوری به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

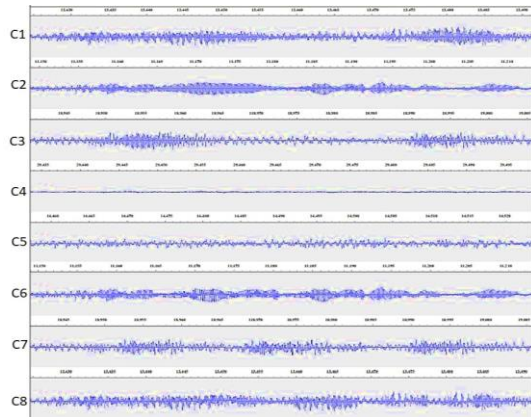
پس از بررسی ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و هرکدام از فرکانس‌های اصلی مشخص شد که همبستگی بالایی بین فرکانس‌های غالب و مقاومت فشاری تک‌محوری دارد، همچنین مدل انتخابی به‌منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها، مدلی است که ۵ فرکانس غالب را در نظر می‌گیرد. این مدل بیشترین میزان همبستگی و کمترین میزان خطا را در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری دارد و مطابق رابطه (۱) می‌تواند برای پیش‌بینی این پارامتر مقاومتی استفاده گردد.

$$UCS = 676 + 0/0334 F1 - 0/054 F2 - 0/020 F3 + 0/0187 F4 - 0/0708 F5 \quad (1)$$



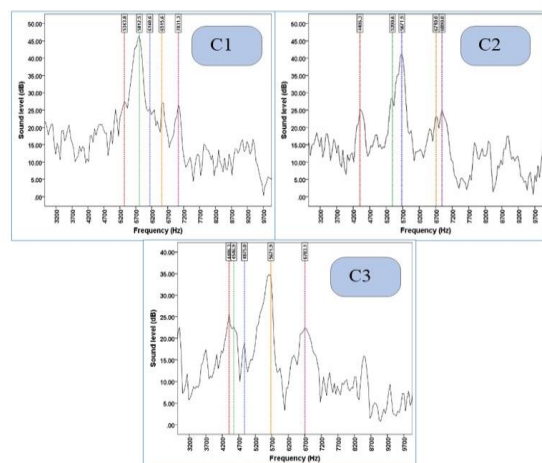
شکل ۵- نتایج ارزیابی مدل ارائه شده پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری

خلاصه‌ی نتایج بررسی‌های آماری برای این رابطه در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- اسپکتروگرام سیگنال آکوستیک حاصل از حفاری سنگ‌ها

پس از ترسیم الگوریتم‌های اسپکتروم‌ها، ۵ فرکانس غالب که دارای بالاترین میزان شدت صوت هستند از هر یک از طیف‌ها استخراج شد (شکل ۴). این ۵ فرکانس، فرکانس‌های پایه‌ای هستند که هرگاه این نمونه‌ها تحت شرایط رژیم حفاری ثابت (سرعت دوران سرمته، نیروی فشاری پشت سرمته، جنس سرمته، قطر سرمته، دبی آب) قرار گیرند، تولید خواهند شد. با توجه به آنچه از آزمایشات فیزیکی و مکانیکی و فرکانس‌های غالب تولید شده در آزمایشات حفاری به‌دست آمده است، ارتباط ریاضی مابین هر یک از فرکانس‌های غالب اصلی و هرکدام از ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج زیر برای پیش‌بینی هرکدام از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی حاصل شده است.



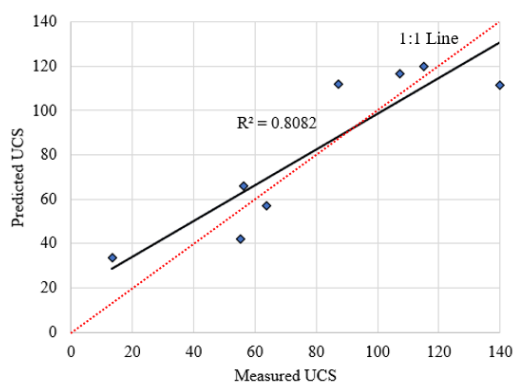
شکل ۴- پنج فرکانس غالب در سه نمونه سنگ مورد آزمایش

به‌دست‌آمده از مدل پیش‌بینی کننده را نشان می‌دهد، همچنین نحوه‌ی توزیع نقاط نسبت به مدل خطی ارائه‌شده در شکل ۶ نشان داده‌شده است.

جدول ۵- مقادیر UCS اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با

استفاده از تحلیل سیگنال‌های آکوستیک

Code	Measured UCS	Predicted UCS
C1	۶۳/۸	57.019
C2	۵۵/۲۵	۴۱/۸۲۲
C3	۱۴۰	۱۱۱/۶۱۶
C4	۱۰۷/۴	۱۱۶/۵۶۵
C5	۸۷/۲۵	۱۱۱/۹۳۹
C6	۱۱۵	۱۲۰/۰۶۹
C7	13.3	33.651
C8	56.4	66.088



شکل ۶- میزان انحراف مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از فرکانس‌های غالب در مدل خطی ارائه‌شده از مقادیر واقعی.

۴-۲- مقاومت کششی برزیلی

ارتباط آماری بین فرکانس‌های غالب و مقاومت کششی به‌طور جامع موردبررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول ۶ نشان داده‌شده است.

جدول ۳- نتایج ارتباط بین فرکانس‌های غالب و مقاومت

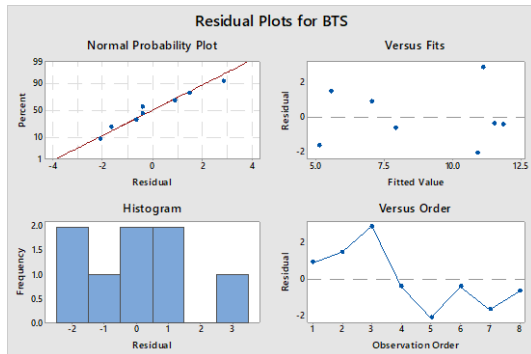
فشاری تک‌محوری

مدل انتخابی	شماره فرکانس غالب	مدل متغیر	تعداد مقدار R^2	شماره
	F5 F4 F3 F2 F1			
X			۰,۵۹۷	۱
	X		۰,۱۶۷	۲
		X	۰,۱۰۸	۳
			۰,۰۵۱	۴
	X		۰,۰۴۷	۵
X		X	۰,۷۵۶	۶
X	X		۰,۷۵۵	۷
X		X	۰,۶۸۴	۸
X	X		۰,۶۰۱	۹
	X	X	۰,۲۸	۱۰
X		X	۰,۷۸۳	۱۱
X	X	X	۰,۷۷۲	۱۲
X		X	۰,۷۶	۱۳
X	X		۰,۷۵۷	۱۴
X		X	۰,۷۵۵	۱۵
X	X	X	۰,۸۰۶	۱۶
X	X	X	۰,۷۹۱	۱۷
X		X	۰,۷۸۵	۱۸
X	X	X	۰,۷۷۲	۱۹
	X	X	۰,۴۲۶	۲۰
X	X	X	۰,۸۰۸	۲۱

جدول ۴- ضرایب مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی UCS

متغیر	ضریب	T-Value	P-Value	VIF
Constant	۶۷۶	۱,۹۸	۰,۱۸۶	
F1	۰,۰۳۳۴	۰,۶۱	۰,۶۰۴	۹,۳۹
F2	-۰,۰۵۴	-۰,۴۳	۰,۷۱۲	۳۴,۴۸
F3	-۰,۰۲۰	-۰,۱۶	۰,۸۹۰	۲۰,۹۱
F4	۰,۰۱۸۷	۰,۴۹	۰,۶۷۲	۲,۲۶
F5	-۰,۰۷۰۸	-۲	۰,۱۸۴	۱,۵۸

پس از تعیین مدل پیش‌بینی با استفاده از رگرسیون خطی، به مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده پرداخته‌شده است. جدول ۵ مقادیر واقعی و مقادیر



شکل ۷- نتایج ارزیابی مدل ارائه شده پیش‌بینی مقاومت کششی

خلاصه‌ی نتایج بررسی‌های آماری برای این رابطه در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- ضرایب مدل ارائه شده برای پیش‌بینی TS

متغیر	ضریب	T-Value	P-Value	VIF
Constant	۵۶.۱	۱.۷۸	۰.۲۱۷	
F1	۰.۰۰۲۵۷	۰.۵۱	۰.۶۶۲	۹.۳۹
F2	-۰.۰۰۳۱	-۰.۲۶	۰.۸۲	۳۴.۴۸
F3	-۰.۰۰۳	-۰.۲۵	۰.۸۲۷	۲۰.۹۱
F4	۰.۰۰۱۷۷	۰.۵	۰.۶۶۵	۲.۲۶
F5	-۰.۰۰۵۶۸	-۱.۷۳	۰.۲۲۶	۱.۵۸

پس از تعیین مدل پیش‌بینی با استفاده از رگرسیون خطی، به مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده پرداخته شده است. جدول ۸ مقادیر واقعی و مقادیر به دست آمده از مدل پیش‌بینی کننده را نشان می‌دهد، همچنین نحوه‌ی توزیع نقاط نسبت به مدل خطی ارائه شده در شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- مقایسه مقادیر BTS اندازه‌گیری شده و

پیش‌بینی	Code	Measured BTS	Predicted BTS
C1		۷/۹۳	6.507
C2		۷/۰۲	۴/۹۸۸
C3		۱۳/۹۷	۱۰/۶۶۹
C4		۱۱/۱۲	۱۰/۹۸۴
C5		۸/۸۴	۱۰/۴۸۹
C6		۱۱/۴۴	۱۱/۳۱۸
C7		3.48	4.609
C8		7.29	7.376

جدول ۶- نتایج ارتباط بین فرکانس‌های غالب و مقاومت

شماره مدل	تعداد متغیر مدل	مقدار R^2	شماره فرکانس غالب				
			F5	F4	F3	F2	F1
۱	۱	۰.۵۵۶	X				
۲	۱	۰.۱۳۲				X	
۳	۱	۰.۰۸۸			X		
۴	۱	۰.۰۳۹				X	
۵	۱	۰.۰۳۵					X
۶	۲	۰.۶۸۸	X	X			
۷	۲	۰.۶۸۸	X			X	
۸	۲	۰.۶۸۱	X				X
۹	۲	۰.۵۵۹	X	X			
۱۰	۲	۰.۲۴۴			X	X	
۱۱	۳	۰.۷۱	X		X	X	
۱۲	۳	۰.۷۰۵	X	X	X		
۱۳	۳	۰.۶۹۱	X		X	X	
۱۴	۳	۰.۶۸۹	X	X	X		
۱۵	۳	۰.۶۸۳	X	X		X	
۱۶	۴	۰.۷۳۵	X	X	X	X	
۱۷	۴	۰.۷۳۴	X	X	X		X
۱۸	۴	۰.۷۱۰	X		X	X	X
۱۹	۴	۰.۷۱۰	X	X	X	X	
۲۰	۴	۰.۳۵۸		X	X	X	X
۲۱	۵	۰.۷۴۳	X	X	X	X	X

پس از بررسی ارتباط بین مقاومت فشاری کششی و هرکدام از فرکانس‌های اصلی مشخص شد که فرکانس‌های غالب نیز همبستگی بالایی با مقاومت کششی دارد، همچنین مدل انتخابی به منظور پیش‌بینی مقاومت کششی سنگ‌ها، مدلی است که ۵ فرکانس غالب را در نظر می‌گیرد و مطابق رابطه (۲) می‌تواند برای پیش‌بینی این پارامتر مقاومتی استفاده گردد.

$$BTS = 56/1 + 0/00257 F1 - 0/0031 F2 - 0/0030 F3 + 0/00177 F4 - 0/00568 F5 \quad (2)$$

جدول ۹- نتایج ارتباط بین فرکانس‌های غالب و مقاومت

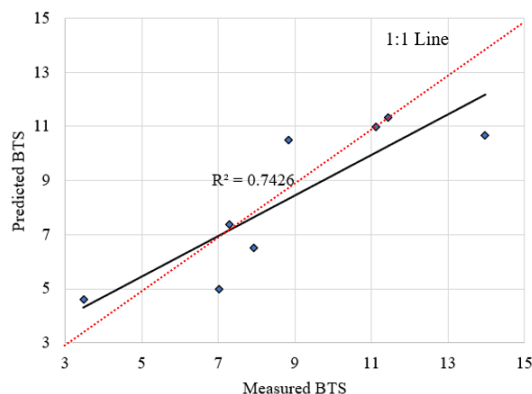
فشاری تک‌محوری								
مدل	شماره فرکانس غالب					تعداد	R^2 مقدار	شماره
انتخابی	F5	F4	F3	F2	F1	مدل	متغیر	مدل
			X				۱	۱
				X			۱	۲
					X		۱	۳
	X						۱	۴
	X						۱	۵
	X		X				۲	۶
				X	X		۲	۷
			X	X			۲	۸
	X		X				۲	۹
	X		X	X			۲	۱۰
	X	X		X			۳	۱۱
	X	X	X				۳	۱۲
	X		X		X		۳	۱۳
	X		X	X			۳	۱۴
			X	X	X		۳	۱۵
	X	X		X	X		۴	۱۶
	X	X	X	X			۴	۱۷
	X	X	X	X			۴	۱۸
	X		X	X	X		۴	۱۹
	X	X	X		X		۴	۲۰
	X	X	X	X	X		۵	۲۱

خلاصه‌ی نتایج بررسی‌های آماری برای این رابطه در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰- ضرایب مدل ارائه شده برای پیش‌بینی V_p

متغیر	ضریب	T-Value	P-Value	VIF
Constant	۴۱۱۷	۱,۱	۰,۲۸۵	
F1	-۰,۱۵۵	-۰,۲۶	۰,۸۲۰	۹,۳۹
F2	۰,۰۶۲	۰,۴۴	۰,۷۰۱	۲۴,۴۸
F3	-۰,۰۱۵	-۰,۱۱	۰,۹۲۴	۲۰,۹۱
F4	۰,۰۱۳	۰,۳۱	۰,۷۸۴	۲,۲۶
F5	-۰,۰۹۹	-۰,۲۵	۰,۸۲۳	۱,۵۸

پس از تعیین مدل پیش‌بینی با استفاده از رگرسیون خطی، به مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده



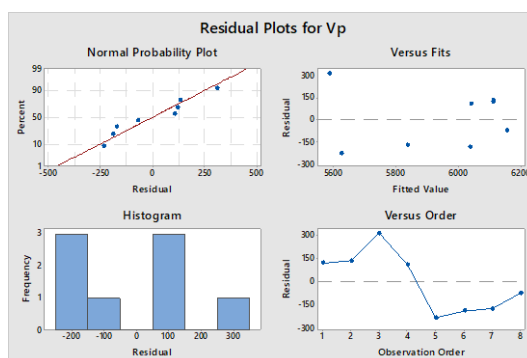
شکل ۸- میزان انحراف مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت کششی با استفاده از فرکانس‌های غالب در مدل خطی ارائه شده از مقادیر واقعی.

۴-۳- سرعت موج P

ارتباط آماری بین فرکانس‌های غالب و سرعت موج کششی به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول ۹ نشان داده شده است.

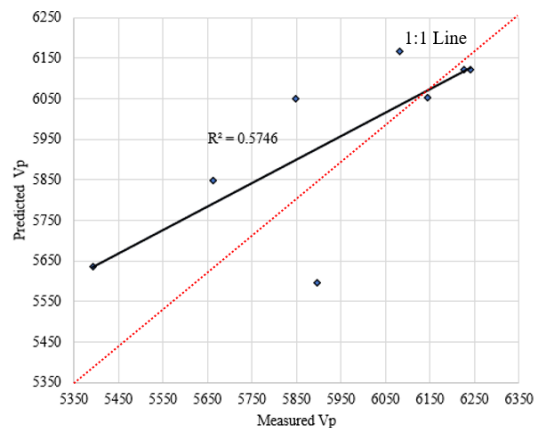
پس از بررسی ارتباط بین سرعت موج P و هرکدام از فرکانس‌های اصلی مشخص شد که فرکانس‌های اصلی همبستگی بالایی با سرعت موج P دارد، همچنین مدل انتخابی به‌منظور پیش‌بینی سرعت موج P سنگ‌ها، مدلی است که ۵ فرکانس غالب را در نظر می‌گیرد و مطابق رابطه (۳) می‌تواند برای پیش‌بینی این پارامتر استفاده گردد.

$$V_p = 4117 - 0/155 F1 + 0/62 F2 - 0/15 F3 + 0/130 F4 - 0/099 F5 \quad (3)$$



شکل ۹- نتایج ارزیابی مدل ارائه شده پیش‌بینی سرعت عبور امواج طولی

پرداخته شده است. جدول ۱۱ مقادیر واقعی و مقادیر به دست آمده از مدل پیش‌بینی کننده را نشان می‌دهد، همچنین نحوه توزیع نقاط نسبت به مدل خطی ارائه شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- میزان انحراف مقادیر پیش‌بینی شده سرعت موج طولی با استفاده از فرکانس‌های غالب در مدل خطی ارائه شده از مقادیر واقعی.

که برای تعیین کردن آن‌ها صرف می‌شود و هم از جنبه‌ی اقتصادی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در این تحقیق سعی بر آن بود که از آنالیز فرکانس‌های صوت ناشی از فرآیند حفاری دورانی در راستای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های کربناته در کوتاه‌ترین زمان ممکن و اقتصادی‌ترین حالت استفاده گردد. برای این منظور نمونه‌های سنگ‌های کربناته در بازه‌ی قابل قبولی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تهیه شد و پس از انجام آزمایشات حفاری و آنالیز سیگنال‌های صوتی مربوطه به پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، کششی (TS)، سرعت موج P پرداخته شد. نتایج نشان داد که ارتباط قابل قبولی بین ویژگی‌های فوق و فرکانس‌های غالب وجود دارد، به طوری که می‌توان بدون صرف زمان و هزینه‌های ناشی از آزمایش‌های آزمایشگاهی و بر جا که برای تعیین مشخصات سنگ‌ها انجام می‌شود به نتایج مطلوب و قابل قبولی رسید و به این ترتیب از بسیاری از هزینه‌های اولیه کاست.

۶- منابع‌ها

- [۱] M. Yari 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*, vol. 36, no. 3, pp. 1805-18, ۲۰۱۸, doi: <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0433-3>.
- [۲] M. Zborovjan, "Identification of minerals during drilling process using acoustic signal-measurement of selected technological magnitudes based on previous signal analysis," *Metallurgy and Foundry Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 367-374, 2000.
- [۳] P. Hatherly, "Rock strength assessment from geophysical logging," 2002.
- [۴] M. Zborovjan, I. Lesso, and L. Dorcak, "Acoustic identification of rocks during drilling process," *Journal of Acta Montanistica Slovaca*, vol. 8, no. 4, pp. 91-93, 2003.
- [۵] J. Futó and E. IVANIČOVÁ, "L.: Optimization of rock disintegration using the acoustic signal," in *Proceedings of International Carpathian Control Conference 2003*, 2003: Citeseer, pp. 26-29 .

جدول ۶- مقایسه مقادیر BTS اندازه‌گیری شده و

Code	پیش‌بینی	
	Measured Vp	Predicted Vp
C1	6226	۶۱۲۱/۰۸
C2	6240	۶۱۲۲/۶۰۱
C3	5896	۵۵۹۵/۷۲۳
C4	6145	۶۰۵۳/۳۴۴
C5	5392	۵۶۳۵/۶۹۸
C6	5847.16	۶۰۴۹/۷۲۱
C7	5662.5	۵۸۴۸/۲۱
C8	6080.54	۶۱۶۶/۶۰۰

۵- نتیجه‌گیری

عملیات حفاری در معادن همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عملیات اصلی در شاخه‌های مهندسی معدن مطرح است. از طرف دیگر شناخت نوع سنگ و ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ یکی از مسائل بسیار مهم در مهندسی معدن همچنین اساس و پایه‌ی اکثر طراحی‌ها می‌باشد. تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، هم از لحاظ میزان زمانی

- Analysis of the Acoustic Signal Frequency Contents Propagated While Drilling Operation," *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 1-14, 2021.
- [۱۶] M. Qin, K. Wang, K. Pan, T. Sun, and Z. Liu, "Analysis of signal characteristics from rock drilling based on vibration and acoustic sensor approaches," *Applied Acoustics*, vol. 140, pp. 275-282, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.003>.
- [۱۷] M. Yari, 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*, vol. 78, no. 3, pp. 1747-1759, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1197-y>.
- [۱۸] M. Yari and R. Bagherpour, "Investigating an innovative model for dimensional sedimentary rock characterization using acoustic frequency analysis during drilling," *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, vol. 33, no. 2, pp. 17-25, 2018, doi: <https://doi.org/10.17794/rgn%20zbornik.v33i2.5646>.
- [۱۹] B. R. Kumar, H. Vardhan, M. Govindaraj, and S. P. Saraswathi, "Artificial neural network model for prediction of rock properties from sound level produced during drilling," *Geomechanics Geoengineering*, vol. 8, no. 1, pp. 53-61, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/17486025.2012.661469>.
- [۲۰] M. Yari and R. Bagherpour, "Investigating an innovative model for dimensional sedimentary rock characterization using acoustic frequency analysis during drilling," *Rudarsko-geolosko-Naftni Zbornik*, vol. 33, no. 2, pp. 17-25, 2018.
- [۲۱] M. Yari, 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 the Environment*, vol. 78, no. 3, pp. 1747-1759, 2019.
- [۲] E. Williams and P. Hagan, "Observations on the variation in acoustic emissions with changes in rock cutting conditions," presented at the Coal Operators' Conference, 2006.
- [۷] V. Miklusova, L. Usalova, L. Ivanicova, and F. Krepelka, "Acoustic signal—new feature in monitoring of rock disintegration process," *Contributions to geophysics geodesy*, vol. 36, pp. 125-133, 2006.
- [۸] S. Roy and G. Adhikari, "Worker noise exposures from diesel and electric surface coal mining machinery," *Noise control engineering journal*, vol. 55, no. 5, pp. 434-437, 2007.
- [۹] C. G. A. W. E. a. G. Thonhauser, "An analysis of noise characteristics of drill bits," presented at the ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2008.
- [۱۰] C. Gradl, A. W. Eustes, and G. Thonhauser, "An analysis of noise characteristics of drill bits," *Journal of energy resources technology*, vol. 134, no. 1, p. 013103, 2012.
- [۱۱] B. R. Kumar, H. Vardhan, M. Govindaraj, and G. Vijay, "Regression analysis and ANN models to predict rock properties from sound levels produced during drilling," *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, vol. 58, pp. 61-72, 2013.
- [۱۲] S. Kahraman, M. Delibalta, and R. Comakli, "Noise level measurement test to predict the abrasion resistance of rock aggregates," *Fluctuation Noise Letters* vol. 12, no. 04, p. 1350021, 2013, doi: <https://doi.org/10.1142/S0219477513500211>.
- [۱۳] M. Karakus and S. Perez, "Acoustic emission analysis for rock-bit interactions in impregnated diamond core drilling," *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, vol. 68, pp. 36-43, 2014.
- [۱۴] I. Buj-Corral, J. Álvarez-Flórez, and A. Domínguez-Fernández, "Acoustic emission analysis for the detection of appropriate cutting operations in honing processes ", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 99, pp. 873-885, 2018.
- [۱۵] M. Khoshouei, R. Bagherpour, and M. H. Jalalian, "Rock Type Identification Using

