دوره ، شماره ، ، صفحه –

نشریه روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: http://anm.yazd.ac.ir/

مقاله پژوهشی

توسعه مدل‌های پیش‌بینی انرژی ویژه حفاری: تحلیل هم‌افزای پارامترهای عملیاتی و سختی پوشش سرمته بر کارایی حفاری سنگ

فرشاد کولیوند[1*]، مصطفی پیری[2]، سید شهاب الماسی[1]

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- شرکت آریاگچ پلدختر، لرستان، ایران

(دریافت: ۰۶ تیر ۱۴۰۴، بازنگری: ۱۴ تیر ۱۴۰۵، پذیرش: ۱۳ مهر ۱۴۰۵)

چکیده

انرژی ویژه حفاری (DSE)[1] به عنوان معیاری کلیدی برای بهینه‌سازی کارایی حفاری سنگ در صنایع مختلف، تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های سرمته قرار دارد. این مطالعه با هدف پر کردن شکاف‌های تحقیقاتی موجود، تأثیر هم‌زمان پارامترهای عملیاتی نرخ نفوذ (PR)[2]، سرعت چرخش سرمته (SR)[3]، بار پشت سرمته (WOB)[4]، گشتاور اعمالی به سرمته (Torque) و سختی پوشش سرمته (H)[5] بر DSE را بررسی می‌کند. آزمون‌های حفاری در مقیاس آزمایشگاهی بر روی ۹ نوع از انواع سنگ (گرانیت، تراورتن، مرمریت) با استفاده از سه پوشش سرمته (WC، DLC، TiSiCN) انجام شد. داده‌ها با شش مدل رگرسیون خطی و غیرخطی (M1 تا M6) تحلیل شدند. مدل رگرسیون پلی‌نومیال درجه دوم (M5) بالاترین دقت (R^2=0.945) را داشت، اما مدل خطی ساده‌تر (M3) با R^2= ۰/۹۲۷ برای کاربردهای عملی توصیه می‌شود زیرا این مدل با تعداد متغیر کمتر(۴ متغیر معنی‌دار) تعادل مناسبی بین دقت و سادگی برقرار می‌کند و خطر بیش‌برازش را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که نرخ نفوذ و گشتاور اعمالی به سرمته، قوی‌ترین تأثیر را بر DSE دارند؛ افزایش PR (از ۱۲ به ۳۶ میلی‌متر بر دقیقه، مقدار DSE را تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد، در حالی که افزایش گشتاور موجب افزایش DSE می‌شود. سرمته TiSiCN (با سختی ۳۸۶۰ ویکرز) کارآمدترین عملکرد را با کمترین DSE نشان داد. این یافته‌ها راهکارهایی برای بهینه‌سازی عملیات حفاری ارائه می‌دهند و بر ضرورت تنظیم دقیق PR و استفاده از سرمته‌های سخت‌تر برای کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی حفاری تأکید می‌کنند.

کلمات کلیدی

انرژی ویژه حفاری؛ پارامترهای عملیاتی حفاری؛ سختی پوشش سرمته؛ مدل‌های پیش بینی؛ رگرسیون چندمتغیره

* عهددار مکاتبات: kolivand.f@lu.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2026.23851.1704

۱- مقدمه

فرآیند حفاری سنگ‌ها در صنایع مختلف، به دلیل هزینه‌های بالا و پیچیدگی‌های فنی، نیازمند بهینه‌سازی مداوم است تا کارایی آن افزایش یابد. یکی از معیارهای کلیدی بهبود کارایی حفاری سنگ، کاهش انرژی ویژه حفاری (DSE) است. مفهوم DSE در حفاری سنگ ابتدا توسط تیل (۱۹۶۵) به صورت مقدار انرژی مورد نیاز برای استخراج یک واحد حجم سنگ تعریف شد [۱]. کاهش DSE موجب بهبود بهره‌وری، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌های حفاری می‌شود. عوامل مختلفی شامل مشخصات ژئومکانیکی سنگ، پارامترهای عملیاتی و ابزار حفاری بر فرآیند پیچیده حفاری اثرگذار هستند [۲]. در سالهای اخیر تحقیقات متعددی به مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف حفاری بر DSE پرداخته‌اند.

تیل (۱۹۶۵) در آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگ در محیط کنترل‌شده در انگلستان، با استفاده از روش اندازه‌گیری انرژی مکانیکی ورودی و حجم سنگ حذف‌شده، مفهوم انرژی ویژه را معرفی کرد و نشان داد که حداقل مقدار آن با مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (UCS) همبستگی تقریبی دارد؛ این مطالعه با روش‌های ساده‌تر نسبت به مدل‌های قبلی مانند مدل‌های مبتنی بر نیروی برشی، بهبود قابل توجهی در شاخص کارایی حفاری ارائه داد، اما به دلیل محدودیت فناوری، داده‌های تجربی محدودی ارائه کرد و تعاملات پارامترهای عملیاتی مانند نرخ نفوذ (PR) و گشتاور را بررسی نکرد [۱]. بیلجین و همکاران (۲۰۱۵) در آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی سنگ‌های رسوبی در ترکیه، با روش آزمون برش خطی و اندازه‌گیری انرژی ویژه، همبستگی قوی UCS و DSE را تأیید کردند و نشان دادند که انرژی ویژه می‌تواند به عنوان شاخص پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده شود؛ این نتایج نسبت به مطالعات قبلی مانند تیل (۱۹۶۵) با داده‌های بیشتر بهبود یافته بود، اما مطالعه آن‌ها به سنگ‌های رسوبی محدود بود و اثرات پارامترهای عملیاتی مانند سرعت چرخش را نادیده گرفت [۲]. چن و همکاران (۲۰۱۶) در شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های میدانی در میدان‌های نفتی چین، با استفاده از مدل‌های مکانیکی و اندازه‌گیری MSE، مدل انرژی ویژه مکانیکی را ارائه کرده و نشان دادند که بار پشت سرمته (WOB) بهینه در حفاری چرخشی کمتر از حفاری معمولی است و DSE را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد؛ این دستاورد نسبت به مدل‌های خطی قبلی مانند تیل (۱۹۶۵) دقیق‌تر بود، اما به اثرات اصطکاک و حرارت کمتر پرداخت [۳]. ژو و همکاران (۲۰۱۷) در آزمایش‌های آزمایشگاهی بر سنگ‌های نرم و سخت در چین، با روش آزمون برش و اندازه‌گیری عمق برش، دریافتند افزایش عمق برش در سنگ‌های نرم، DSE را کاهش می‌دهد (تا ۱۵ درصد)، اما این اثر در سنگ‌های سخت کمتر است؛ این نتایج با مطالعات چن (۲۰۱۶) مقایسه شد و بهبود در مدل‌های غیرخطی را نشان داد، اما محدود به شرایط آزمایشگاهی بود [۴]. لیو و همکاران (۲۰۱۸) در آزمایش‌های میدانی در میدان‌های نفتی چین، با توسعه مدل‌های عددی حفاری جهت‌دار و چرخشی، نشان دادند که WOB، سرعت چرخش (SR) و گشتاور سرمته نقش کلیدی در کاهش DSE دارند و ترکیب بهینه آن‌ها کارایی را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد؛ این مدل نسبت به مدل‌های ژو (۲۰۱۷) جامع‌تر بود، اما نیاز به داده‌های بیشتر برای اعتبارسنجی داشت [۵]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) در آزمایش‌های میدانی در میدان‌های زمین‌گرمایی چین، با اندازه‌گیری نفوذپذیری و شرایط حرارتی، تأثیر غیرمستقیم مقاومت سنگ و حرارت بر انرژی ویژه را تأیید و نشان دادند افزایش حرارت DSE را کاهش می‌دهد؛ این دستاورد نسبت به مطالعات لیو (۲۰۱۸) با گنجاندن عوامل حرارتی بهبود یافت، اما محدود به محیط‌های حرارتی بود [۶]. ویرینگ و همکاران (۲۰۱۹) در آزمایش‌های آزمایشگاهی روی سنگ دگرگونی در آلمان، با روش آزمون نفوذ و اندازه‌گیری شاخص، شاخص مقاومت دگرگونی اصلاح‌شده را معرفی کردند که همبستگی بهتری (R^2=۰/۸۵) با نرخ نفوذ دارد؛ این شاخص نسبت به شاخص‌های قبلی مانند UCS بهبود یافته بود، اما به پارامترهای عملیاتی کمتر توجه داشت [۷]. هانگشنگ و همکاران (۲۰۱۹) در آزمایش‌های آزمایشگاهی در چین، با آزمون‌های تجربی، نیروی پیشروی، سرعت چرخش و نوع سرمته، تأثیر این پارامترها را بر سرعت حفاری و انرژی ویژه، پیشنهاد کردند افزایش سرعت چرخش DSE را تا ۱۸ درصد کاهش می‌دهد؛ این نتایج با مطالعات ویرینگ (۲۰۱۹) مقایسه شد و بهبود در کاربرد عملی ارائه داد، اما محدود به انواع خاص سرمته بود [۸]. تانهاوزر و همکاران (۲۰۱۹) در شبیه‌سازی عددی، با اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی و UCS، پارامتر توان عملیاتی را تعریف کردند که با UCS همبستگی قوی (R^2=۰/۹) دارد؛ این پارامتر نسبت

به مدل‌های هانگشنگ (۲۰۱۹) دقیق‌تر بود، اما نیاز به داده‌های میدانی داشت [۹]. یانگ و همکاران (۲۰۲۰) در آزمایش‌های آزمایشگاهی در چین، با مدل پیش‌بینی و اندازه‌گیری گشتاور سرمته، همبستگی گشتاور با UCS را تأیید کردند و آن را به‌عنوان شاخص پیش‌بینی مقاومت پیشنهاد کردند (دقت ۸۵ درصد)؛ این مدل نسبت به مدل‌های تانهاوزر (۲۰۱۹) عملی‌تر بود، اما به سنگ‌های خاص محدود بود [۱۰]. تئودوریو و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه مروری بر داده‌های جهانی، پتانسیل بهینه‌سازی DSE برای کاهش هزینه‌های حفاری را مطرح و نشان دادند تنظیم پارامترها هزینه را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد؛ این مطالعه نسبت به مطالعات قبلی مانند یانگ (۲۰۲۰) جامعتر بود، اما داده تجربی جدیدی ارائه نکرد [۱۱]. وزیرزینسکی و همکاران (۲۰۲۱) در آزمایش‌های آزمایشگاهی در لهستان، با تنظیم پارامترهای عملیاتی در دستگاه‌های کم‌مصرف، امکان کاهش مصرف انرژی تا ۱۵ درصد را نشان دادند؛ این نتایج با تئودوریو (۲۰۲۱) مقایسه شد و بهبود در کاربردهای فضایی ارائه داد، اما محدود به محیط‌های کم‌انرژی بود [۱۲]. ژائو و همکاران (۲۰۲۱) در آزمایش‌های آزمایشگاهی در چین، رابطه‌ای بین UCS و پارامترهای حفاری مغزه برقرار کردند که پیش‌بینی نسبتا خوبی از مقاومت سنگ ارائه می‌دهد؛ این روش نسبت به روش‌های وزیرزینسکی (۲۰۲۱) دقیق‌تر بود، اما نیاز به اعتبارسنجی گسترده‌تر دارد [۱۳]. یو و همکاران (۲۰۲۱) در آزمایش‌های میدانی در چین، با بررسی درصد کوارتز (Qs) در سنگ‌های رسوبی، نشان دادند که محتوای کوارتز بالا DSE را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد؛ این دستاورد نسبت به مطالعات ژائو (۲۰۲۱) با گنجاندن عوامل کانی شناسی بهبود یافت، اما محدود به سنگ‌های رسوبی بود [۱۴]. هاشیبا و همکاران (۲۰۲۲) در آزمایش‌های آزمایشگاهی در ژاپن، دریافتند که DSE برای برآورد UCS در سنگ‌های بسیار سخت (بیش از ۵۰۰ مگاپاسکال) قابل استفاده است؛ مقایسه این نتایج با یو (۲۰۲۱) بهبود در سنگ‌های سخت را نشان داد [۱۵]. تانگ و همکاران (۲۰۲۲) در شبیه‌سازی عددی در چین، با مدل‌سازی تنش‌های محدودکننده، WOB و SR، با بررسی تأثیر این عوامل بر DSE پیشنهاد کردند که افزایش تنش محدودکننده، DSE را کاهش می‌دهد؛ این مدل نسبت به هاشیبا (۲۰۲۲) جامع‌تر بود [۱۶]. اوپارین و همکاران (۲۰۲۲) در آزمایش‌های میدانی در روسیه، شاخص انرژی بدون بعد را برای بهینه‌سازی حفاری در سنگ‌های با تنش بالا معرفی کردند که کارایی را تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد؛ این شاخص نسبت به مدل‌های تانگ (۲۰۲۲) عملی‌تر بود [۱۷]. خلیلی درمندی و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه مروری بر داده‌هایی از سراسر جهان، نیاز به گنجاندن پارامترهای ژئومکانیکی بیشتر در مدل‌های پیش‌بینی DSE را مطرح کردند و نشان دادند که این کار دقت را تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد؛ این مطالعه مروری نسبت به مطالعه اوپارین (۲۰۲۲) جامع بود [۱۸]. خشوئی و همکاران (۲۰۲۳) در آزمایش‌های آزمایشگاهی در ایران، با تحلیل رگرسیون، همبستگی بالای UCS، مقاومت کششی برزیلی (BTS)، خلأ، سختی و ساینده‌گی را با DSE تأیید کردند (R^2=۰/۹)؛ این نتایج با خلیلی درمندی (۲۰۲۲) مقایسه شد و بهبود در مدل‌های رگرسیونی ارائه داد [۱۹]. یو و همکاران (۲۰۲۳) در آزمایش‌های میدانی در چین، UCS را مهم‌ترین پارامتر مکانیکی مؤثر بر پارامترهای حفاری معرفی کردند که DSE را تا ۳۰ درصد تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۰]. انتولیجک و همکاران (۲۰۲۳) در آزمایش‌های آزمایشگاهی در اروپا، همبستگی خطی قوی بین انرژی برش سنگ و DSE را تأیید کردند و UCS را عامل اصلی دانستند؛ این نتایج با یو (۲۰۲۳) بهبود یافت [۲۱]. محمودی و همکاران (۲۰۲۳) در شبیه‌سازی در ایران، با استفاده از تبدیل موجک و الگوریتم ANFIS-PSO، ویژگی‌های ژئومکانیکی را از داده‌های DSE برآورد کردند، اما پیش‌بینی برای نسبت پواسون و زاویه اصطکاک داخلی ضعیف بود؛ این مدل نسبت به انتولیجک (۲۰۲۳) پیشرفته‌تر بود [۲۲]. گوش و همکاران (۲۰۲۴) در آزمایش‌های میدانی در هند، شاخص قابلیت حفاری توده سنگ را برای تخمین نرخ حفاری در معادن روباز معرفی کردند، اما مطالعه آن‌ها به سنگ‌آهک محدود بود؛ این شاخص نسبت به محمودی (۲۰۲۳) عملی‌تر بود [۲۳]. ژائو و همکاران (۲۰۲۴) در آزمایش‌های میدانی در چین، با ارائه مدل مبتنی بر داده‌های حسگر، تأثیر WOB و SR را بر مصرف انرژی تأیید کردند و کاهش مصرف تا ۲۰ درصد را نشان دادند؛ این مدل نسبت به گوش (۲۰۲۴) دقیق‌تر بود [۲۴]. یو و همکاران (۲۰۲۴) در شبیه‌سازی در چین، دریافتند که DSE به‌صورت غیرخطی با WOB تغییر می‌کند و تنظیم دقیق آن کارایی را تا ۲۵ درصد بهبود می‌بخشد [۲۵]. کولیدیس و همکاران (۲۰۲۴) در آزمایش میدانی، با استفاده از هوش مصنوعی و داده‌های حسگر

درون‌مته، کارایی حفاری را تا ۳۰ درصد بهبود بخشیدند؛ این روش نسبت به یو (۲۰۲۴) پیشرفته‌تر بود [۲۶]. سانگ و همکاران (۲۰۲۴) در شبیه‌سازی در چین، مدل بهبودیافته‌ای از DSE سنگ ارائه کردند که دقت محاسبات را تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد [۲۷]. وانگ و همکاران (۲۰۲۵) در آزمایش آزمایشگاهی در چین، با سیستم آزمون حفاری دیجیتال، پیش‌بینی نسبتا دقیق مقاومت سنگ را نشان دادند؛ این سیستم نسبت به سانگ (۲۰۲۴) عملی‌تر بود [۲۸]. ککیفان (۲۰۲۵) در مطالعه مروری بر داده‌های جهانی، اهمیت نیروی برش، WOB، ضریب اصطکاک و عمق برش را برای درک DSE تأیید و پیشنهاد کرد تنظیم این عوامل DSE را کاهش می‌دهد؛ مطالعه ایشان نسبت به وانگ (۲۰۲۵) جامعتر بود [۲۹]. کومادجا و همکاران (۲۰۲۵) در شبیه‌سازی در آفریقا، با رویکرد یادگیری ماشینی، مقاومت توده سنگ را با دقت ۹۰ درصد پیش‌بینی کردند[۳۰]. ژی و همکاران (۲۰۲۵) در آزمایش‌های میدانی در چین، با استفاده از شبکه‌های عصبی و جنگل تصادفی، UCS را با دقت بالا (۹۵ درصد) پیش‌بینی کردند که نسبت به نتایج کومادجا (۲۰۲۵) بهبود یافت [۳۰].

پیشینه مطالعات نشان‌دهنده تاثیرگذاری عوامل متنوع بر DSE است. با این وجود، تعاملات پیچیده بین آنها و تأثیرشان بر DSE به طور کامل شناخته نشده است. با وجود مطالعات متنوع، شکاف‌های تحقیقاتی مانند عدم بررسی همزمان پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های سختی سرمته‌ها مشهود است. عمده مطالعات پیشین اغلب به یک یا چند پارامتر پرداخته و تعامل بین تمام عوامل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این محدودیت و عدم قطعیت باعث عدم دقت کافی مدل‌های پیش‌بینی DSE، انتخاب نادرست تجهیزات، افزایش هزینه‌ها و کاهش کارایی حفاری منجر شود. هدف این مطالعه، توسعه و ارزیابی مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی (M1 تا M6) برای پیش‌بینی DSE در عملیات حفاری سنگ با استفاده از داده‌های آزمون آزمایشگاهی با استفاده از سرمته‌های با پوشش WC، DLC و TiSiCN است. این مدل‌ها با تمرکز بر بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی PR، SR، WOB، Torque و سختی پوشش سرمته طراحی شده‌اند تا کاهش DSE را ممکن کند و از طریق تنظیم پارامترهای عملیاتی و انتخاب سرمته‌های مناسب، سعی در کاهش هزینه‌ها و افزایش راندمان حفاری سنگها دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۱- ۲-۱- کلیات

مسئله تاثیر همزمان پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های سختی پوشش سرمته‌ها بر انرژی ویژه حفاری از آن جهت اهمیت دارد که درک دقیق آن می‌تواند به بهینه‌سازی عملیات حفاری، کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی منجر شود. این مطالعه با استفاده از داده‌ها و آزمون‌های آزمایشگاهی، به دنبال ارائه مدل‌هایی برای پیش‌بینی DSE است. DSE تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله پارامترهای عملیاتی (نرخ نفوذ، سرعت چرخش سرمته، بار پشت سرمته و گشتاور سرمته) و ویژگی‌های سختی پوشش سرمته‌ها است. در این مقاله با آزمون‌های حفاری آزمایشگاهی بر روی ۹ نوع سنگ و با استفاده از سه نوع پوشش سرمته، ابتدا تأثیر هر یک از پارامترهای PR، SR، WOB و Torque بر DSE بررسی شد. سپس به تحلیل تعامل بین این پارامترها و مقایسه تأثیر هر یک از آن‌ها بر DSE پرداخته شد. در نهایت بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی DSE براساس پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های سختی سرمته تمرکز شده است.

آزمون‌های حفاری با دستگاه حفاری آزمایشگاهی بر روی ۹ نوع سنگ شامل سه سنگ گرانیتی، سه سنگ تراورتن و سه نوع سنگ مرمریت انجام شد. همچنین از سه نوع سرمته با پوشش کاربید تنگستن (WC) ، کربن شبه‌الماس (DLC) و کربونیترید تیتانیوم-سیلیسیوم (TiSiCN) استفاده شد. روند پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.

یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر، عدم ورود مستقیم پارامترهای مقاومتی توده سنگ (مانند مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، مقاومت کششی و سختی) در معادلات است. با این وجود، تنوع سنگ‌های مورد آزمون (گرانیت، تراورتن و مرمریت) به‌طور غیرمستقیم گستره متنوعی از خواص مقاومتی را پوشش داده است.

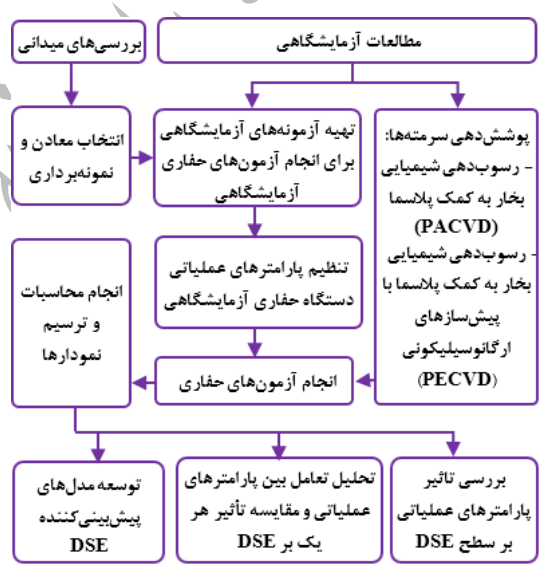
۱-۲- ۲-۲- نمونه‌برداری از معادن

پس از بررسی‌های میدانی از ۹ معدن در سراسر ایران نمونه‌های سنگ مناسب از نظر یکپارچگی و عدم وجود عیوب ساختاری انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس برای انجام آزمون‌های حفاری، آزمونه‌های بلوکی مستطیلی با ابعاد مشخص برش داده شده و آماده‌سازی شدند. قسمتی از

فرآیند نمونه برداری از معادن، برش دادن، اماده سازی و آزمون حفاری در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱ : نمونه های برداشت شده از معادن مختلف

نوع سنگ	اختصار	معدن
گرانیت	G1	همدان
	G2	نطنز
	G3	گل پنبه درود
تراورتن	T1	دره بخاری
	T2	حاجی آباد
	T3	آذرشهر
مرمریت	M1	صلصالی
	M2	هرسین
	M3	نورآباد



شکل ۱: فلوچارت فرایند انجام پژوهش

۱-۳- ۲-۳- آزمون‌های آزمایشگاهی

۲-۳-۱- پوشش‌دهی سرمته‌ها

به‌منظور افزایش سختی، طول عمر و دوام سرمته‌های حفاری می‌توان سرمته‌ها را با پوشش‌های مواد مقاوم در برابر سایش پوشش‌دهی کرد. پوشش‌دهی سرمته‌ها به‌منظور افزایش سختی، پایداری شیمیایی و مقاومت سایشی بالا در صنایع مختلف، با استفاده از روش‌های رسوب شیمیایی بخار (CVD)و رسوب فیزیکی بخار (PVD) کاربرد گسترده‌ای دارد [۳۲]. در این پژوهش، سرمته‌های فولادی HSS با قطر ۱۰ میلی‌متر با سه پوشش کاربید تنگستن (WC)، کربن شبه‌الماس (DLC) و کربونیترید تیتانیوم-سیلیسیوم (TiSiCN)پوشش‌دهی شدند. سپس ضخامت، سختی و مقاومت سایشی پوشش‌ها اندازه‌گیری شد.

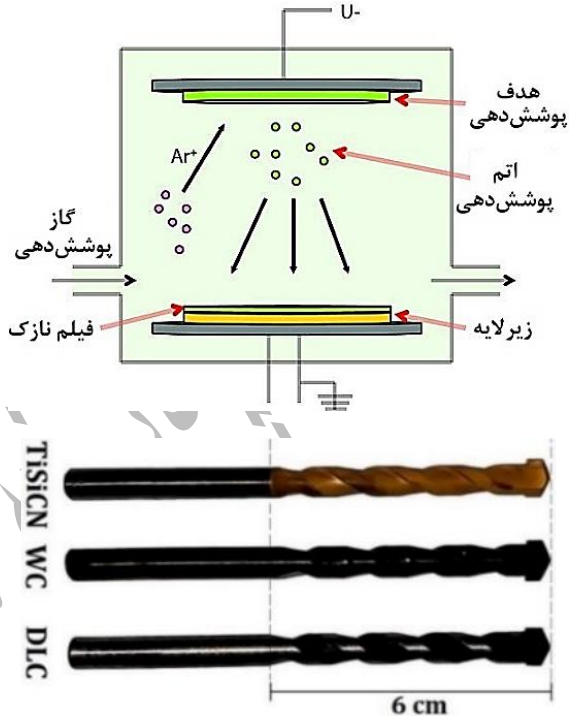
پوشش WC به دلیل مقاومت بالا در برابر سایش و شکست، با مهار رشد دندریت‌ها، سختی و مقاومت سایشی را افزایش می‌دهد [۳۳]. لایه نازکی از نیترید تیتانیوم (TiN) با رسوب فیزیکی بخار بر سطح سرمته طی مراحل تبخیر، انتقال، واکنش و رسوب‌دهی اعمال شد؛ که سختی ۱۵۷۰ ویکرز برای آن گزارش شده است [۳۴]. پوشش DLC با فناوری رسوب‌دهی شیمیایی بخار به کمک پلاسما (PACVD) در دمای ۱۵۰۰ °C و طی ۱۲۰ دقیقه با استفاده از گازهای آرگون، متان و هیدروژن ایجاد شد که سختی ۳۱۰۰ ویکرز دارد [۳۵].



شکل ۲: موقعیت معادن، مراحل نمونه برداری، آماده سازی نمونه ها برای آزمون

پوشش نانوکامپوزیتی TiSiCN با روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار به کمک پلاسما با پیش‌سازهای مایع

ارگانوسیلیکونی (PECVD) در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و طی ۳۰۰ تا ۳۶۰ دقیقه اعمال شد. این پوشش با ضخامت حدود ۶ میکرومتر، سختی ۳۸۶۰ ویکرز، مقاومت حرارتی تا ۸۰۰ درجه سلسیوس و اصطکاک پایین، مقاومت فرسایشی بالایی دارد. انتخاب پوشش و روش رسوب‌دهی، عملکرد حفاری را بهبود و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد [۳۶].



شکل ۳: شماتیک فرایند PDV و سرمته‌های پوشش داده شده

۲-۳-۲- آزمون‌های حفاری

آزمون‌های آزمایشگاهی حفاری با استفاده از یک دستگاه حفاری در مقیاس آزمایشگاهی با قابلیت ثبت داده در شرایط عملیاتی مختلف استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها متناسب با پارامترهای عملیاتی PR، SR، WOB و Torque، در سه سرعت چرخش ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. آزمون‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی در سه نرخ نفوذ ۱۲، ۲۴ و ۳۶ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای مثال در آزمون حفاری بر روی سنگ M1، آزمون در سه سرعت چرخش ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و با نرخ نفوذ ۱۲، ۲۴ و ۳۶ میلی‌متر بر دقیقه (یعنی ۹ مرتبه انجام آزمون حفاری) با استفاده از سرمته دارای پوشش WC انجام شد. سپس همین فرآیند با استفاده از سرمته‌های با پوشش DLC و TiSiCN نیز برای سنگ M1 انجام شد.

۳- نتایج و تحلیل یافته‌ها

۳-۱- سطح انرژی ویژه حفاری

تیل (۱۹۶۵) DSE را به صورت مقدار انرژی مورد نیاز برای استخراج واحد حجم واحد سنگ تعریف کرد که مرتبط با پارامترهای عملیاتی حفاری است [۱]. DSE به عنوان یک متغیر وابسته به تمام پارامترهای مستقل عملیات حفاری شامل PR، SR، WOB و T بستگی دارد. ایشان معادله (۱) را برای DSE ارائه کرد[۱].

$$(DSE) = \frac{WOB}{A} + 2\frac{\pi * SR * T}{A * PR} \qquad (۱)$$

که در آن: WOB بار پشت سرمته بر حسب نیوتن SR سرعت چرخش بر حسب دور در دقیقه، A سطح مقطع چال بر حسب مترمربع، PR نرخ نفوذ حفاری بر حسب متر بر دقیقه و T گشتاور بر حسب نیوتن.متر است.

داده‌های خام نتایج آزمون DSE در آزمون‌های حفاری بر روی ۹ سنگ و با استفاده از سه نوع سرمته WC، DLC و TiSiCN اندازه‌گیری شده و برای همه سنگ‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. هر داده خام از میانگین نتایج اندازه‌گیری سه آزمون برای هر ترکیب نرخ نفوذ، سرعت چرخش و نوع سرمته برای هر سنگ بدست امده است. برای مثال برای ترکیب نرخ نفوذ ۰٫۰۱۲ m/min با سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور در دقیقه با استفاده از سرمته WC در سنگ M3، سه آزمون انجام شده که نتایج آن به ترتیب برابر ۱۶٫۲۹، ۱۷ و ۱۷٫۲ شده است که میانگین انها ۱۶٫۸۳ است. در جدول ۲ برای اجتناب از تکرار و خلاصه‌سازی نتایج خام فقط برای سرمته WC ارائه شده است. برای سایر سرمته‌ها صرفا میانگین سه مقدار DSE برای هر ترکیب نرخ نفوذ، سرعت چرخش و نوع سنگ محاسبه و ارائه شده است (اعداد هایلایت شده).

۳-۲- تحلیل آماری پارامترهای عملیاتی

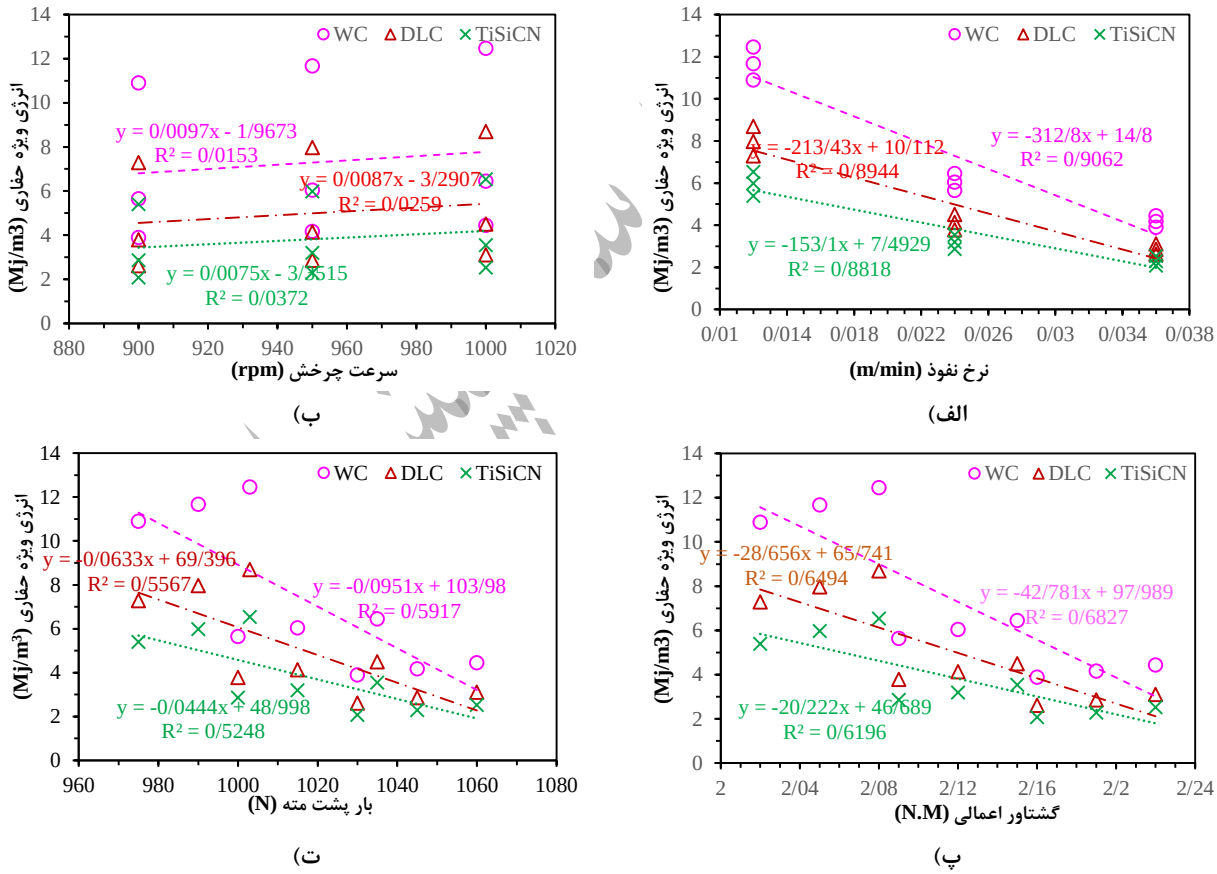
برای بررسی ارتباط میان پارامترهای عملیاتی حفاری، سختی پوشش سه نوع سرمته WC، DLC و TiSiCN با میزان DSE، مطالعات آماری روی داده خام نتایج آزمون‌ها با نرم‌افزار SPSS و الگوریتم stepwise برای انتخاب متغیرها انجام شد، جاییکه متغیرها بر اساس p-value<۰٫۰۵ انتخاب شدند. تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS و الگوریتم stepwise regressionانجام شد.

جدول ۲ : سطح DSE برای هر سه نوع سرمته در همه انواع سنگ‌ها

نرخ نفوذ (m/min)	سرعت چرخش (rpm)	M3	M2	M1	T3	T2 (Mj/m^3)	T1	G3	G2	G1	سرمته
۰٫۰۱۲	۱۰۰۰	۱۶٫۲۹	۱۲٫۰۹	۱۶٫۱۳	۴٫۲۵	۶٫۲۶	۵٫۶۱	۱۲٫۰	۱۰٫۵۴	۱۰٫۸	WC
۰٫۰۱۲	۱۰۰۰	۱۴٫۰	۱۳٫۰۸	۱۴٫۳۲	۴٫۳۵	۶٫۶	۶٫۲۲	۸۷۱۰	۱۱٫۴۹	۱۱٫۱۷	
۰٫۰۱۲	۱۰۰۰	۱۷٫۲	۱۲٫۲۱	۱۶٫۴۴	۳٫۷۹	۷٫۰۹	۵٫۲۴	۱۰٫۳۷	۱۱٫۷۶	۱۲٫۵۴	
۰٫۰۱۲	۱۰۰۰	۱۶٫۸۳	۱۲٫۴۶	۱۵٫۶۳	۴٫۱۳	۶٫۶۵	۵٫۶۹	۱۱٫۰۸	۱۱٫۲۶	۱۱٫۵۰	
۰٫۰۱۲	۹۵۰	۱۴٫۰۵	۱۲٫۱	۱۴٫۹۴	۳٫۶	۵٫۷۲	۵٫۱۳	۹٫۴۴	۱۰٫۸۵	۹٫۳۵	
۰٫۰۱۲	۹۵۰	۱۵٫۶	۱۱٫۴۷	۱۴٫۷۳	۳٫۷۷	۶٫۲۲	۵٫۰۷	۹٫۶۶	۹٫۲۷	۱۰٫۶۶	
۰٫۰۱۲	۹۵۰	۱۶٫۲۷	۱۱٫۴۴	۱۴٫۲۲	۴٫۰۶	۶٫۶۶	۵٫۶۷	۱۰٫۲۷	۹٫۵۸	۱۰٫۳۸	
۰٫۰۱۲	۹۵۰	۱۵٫۳۱	۱۱٫۶۷	۱۴٫۶۳	۳٫۸۱	۶٫۲۰	۵٫۲۹	۹٫۷۹	۹٫۹۰	۱۰٫۱۳	
۰٫۰۱۲	۹۰۰	۱۴٫۶۸	۱۱٫۱۱	۱۳٫۱۹	۳٫۵۳	۵٫۸۵	۴٫۸۹	۹٫۱۹	۹٫۴۶	۹٫۲۹	
۰٫۰۱۲	۹۰۰	۱۳٫۶۱	۱۰٫۸۱	۱۴٫۱۲	۳٫۲۴	۵٫۶۸	۴٫۷۴	۹٫۱	۹٫۲۲	۹٫۵۱	
۰٫۰۱۲	۹۰۰	۱۳٫۲۹	۱۰٫۷۵	۱۳٫۶۱	۷٫۷۳	۵٫۷۹	۵٫۱۱	۸٫۲۴	۸٫۱۷	۸٫۷۱	
۰٫۰۱۲	۹۰۰	۱۳٫۸۶	۱۰٫۸۹	۱۳٫۶۴	۳٫۵۰	۵٫۷۷	۴٫۹۱	۸٫۸۴	۸٫۹۵	۹٫۱۷	
۰٫۰۲۴	۱۰۰۰	۸٫۱۷	۶٫۷۷	۸٫۲۶	۲٫۲۴	۳٫۲۹	۳٫۱۲	۵٫۸۷	۵٫۸۱	۵٫۹۵	
۰٫۰۲۴	۱۰۰۰	۸٫۶۴	۶٫۷۳	۸٫۰۵	۲٫۱۹	۳٫۴۶	۲٫۸۹	۵٫۳۵	۶٫۳۷	۵٫۸۳	
۰٫۰۲۴	۱۰۰۰	۹٫۲۱	۵٫۸۵	۷٫۹۶	۱٫۹۶	۳٫۶	۲٫۹۱	۵٫۹۸	۵٫۲۸	۶٫۰۴	
۰٫۰۲۴	۱۰۰۰	۸٫۶۷	۶٫۴۵	۸٫۰۹	۲٫۱۳	۳٫۴۵	۲٫۹۷	۵٫۷۳	۵٫۸۲	۵٫۹۴	
۰٫۰۲۴	۹۵۰	۷٫۸۸	۵٫۹۴	۷٫۵۶	۲٫۱۶	۳٫۴۲	۲٫۹۸	۵٫۴۷	۵٫۳۴	۵٫۴۷	
۰٫۰۲۴	۹۵۰	۷٫۹۶	۶٫۲۵	۷٫۲۸	۱٫۹۸	۳٫۰۷	۲٫۷۶	۴٫۹۷	۴٫۶۷	۴٫۸۳	
۰٫۰۲۴	۹۵۰	۷٫۶۵	۵٫۹۳	۷٫۸۹	۱٫۷۷	۳٫۱۷	۲٫۵۴	۴٫۵۹	۵٫۲۹	۵٫۳۲	
۰٫۰۲۴	۹۵۰	۷٫۸۳	۶٫۰۴	۷٫۵۸	۱٫۹۷	۳٫۲۲	۲٫۷۶	۵٫۰۱	۵٫۱۰	۵٫۲۱	
۰٫۰۲۴	۹۰۰	۷٫۰۹	۶٫۰۶	۶٫۸۶	۱٫۸	۲٫۷۹	۲٫۷۸	۴٫۴۴	۴٫۲۲	۴٫۸۲	
۰٫۰۲۴	۹۰۰	۷٫۶۶	۵٫۰۸	۷٫۱	۱٫۶۷	۳٫۰۱	۲٫۴۹	۴٫۲۶	۴٫۴۸	۴٫۹۴	
۰٫۰۲۴	۹۰۰	۶٫۷۹	۵٫۷۸	۷٫۲۵	۱٫۹۶	۳٫۲	۲٫۴۱	۴٫۹۷	۴٫۹۵	۴٫۵	
۰٫۰۲۴	۹۰۰	۷٫۱۸	۵٫۶۴	۷٫۰۷	۱٫۸۱	۳٫۰۰	۲٫۵۶	۴٫۵۶	۴٫۶۷	۴٫۷۵	
۰٫۰۳۶	۱۰۰۰	۵٫۷۳	۴٫۴۳	۵٫۷۶	۱٫۳۴	۲٫۲۹	۱٫۹۳	۴٫۱۸	۴٫۱	۴٫۴۲	
۰٫۰۳۶	۱۰۰۰	۶٫۲۷	۴٫۰	۵٫۶۷	۱٫۵	۲٫۲۷	۲٫۱۹	۳٫۹۵	۳٫۸	۳٫۸۱	
۰٫۰۳۶	۱۰۰۰	۵٫۷	۴٫۸۸	۵٫۳	۵۴۱	۲٫۵۸	۲٫۰۶	۳٫۸۷	۴٫۲۸	۴٫۱۹	
۰٫۰۳۶	۱۰۰۰	۵٫۹۰	۴٫۴۴	۵٫۵۸	۱٫۴۶	۲٫۳۸	۲٫۰۶	۴٫۰۰	۴٫۰۶	۴٫۱۴	
۰٫۰۳۶	۹۵۰	۵٫۶۵	۳٫۸۴	۵٫۱۱	۱٫۲۶	۲٫۳۲	۱٫۸	۳٫۳۱	۳٫۹	۳٫۹۹	
۰٫۰۳۶	۹۵۰	۵٫۲۳	۴٫۱۴	۵٫۵۴	۱٫۳۷	۲٫۳۳	۱٫۹۵	۳٫۴۲	۳٫۳۴	۳٫۳۳	
۰٫۰۳۶	۹۵۰	۵٫۳۲	۴٫۵	۵٫۰۴	۱٫۴۲	۲٫۰۳	۲٫۰۱	۳٫۸۹	۳٫۵۳	۳٫۶۹	
۰٫۰۳۶	۹۵۰	۵٫۴۰	۴٫۱۶	۵٫۲۳	۱٫۳۵	۲٫۲۲	۱٫۹۲	۳٫۵۴	۳٫۵۹	۳٫۶۷	
۰٫۰۳۶	۹۰۰	۵٫۲۶	۳٫۶۳	۵٫۰۴	۱٫۲۴	۲٫۱۷	۱٫۹۳	۳٫۱۳	۳٫۴۸	۳٫۵۶	
۰٫۰۳۶	۹۰۰	۴٫۹۷	۴٫۰۳	۵٫۰	۱٫۲۹	۱٫۹۷	۱٫۶۷	۳٫۲۲	۳٫۱۸	۳٫۱۶	
۰٫۰۳۶	۹۰۰	۴٫۵۳	۴٫۰۱	۴٫۶	۱٫۲	۲٫۰۷	۱٫۷۴	۳٫۲۲	۳٫۰۷	۳٫۲۴	
۰٫۰۳۶	۹۰۰	۴٫۹۲	۳٫۸۹	۴٫۸۸	۱٫۲۴	۲٫۰۷	۱٫۷۸	۳٫۱۹	۳٫۲۴	۳٫۳۲	
۰٫۰۱۲	۱۰۰۰	۷٫۴۳	۷٫۱۳	۷٫۰۷	۳٫۷۱	۴٫۳۱	۲٫۷۰	۱۰٫۴۸	۸٫۶۹	۱۱٫۱۴	DLC
۰٫۰۱۲	۹۵۰	۶٫۶۶	۶٫۳۷	۶٫۳۲	۳٫۳۶	۳٫۹۳	۲٫۴۵	۹٫۶۸	۷٫۹۷	۱۰٫۳۶	
۰٫۰۱۲	۹۰۰	۵٫۸۲	۵٫۵۵	۵٫۵۰	۳٫۰۲	۳٫۵۶	۲٫۲۱	۸٫۹۰	۷٫۲۸	۹٫۳۳	
۰٫۰۲۴	۱۰۰۰	۳٫۹۳	۳٫۷۸	۳٫۷۵	۱٫۹۸	۲٫۲۸	۱٫۴۴	۵٫۴۰	۴٫۵۰	۵٫۷۹	
۰٫۰۲۴	۹۵۰	۳٫۵۰	۳٫۳۶	۳٫۳۳	۱٫۷۹	۲٫۰۵	۱٫۳۱	۴٫۹۹	۴٫۱۳	۵٫۳۶	
۰٫۰۲۴	۹۰۰	۳٫۰۸	۲٫۹۴	۲٫۹۲	۱٫۶۲	۱٫۸۶	۱٫۱۹	۴٫۵۹	۳٫۷۸	۴٫۸۹	
۰٫۰۳۶	۱۰۰۰	۲٫۹۴	۲٫۸۴	۲٫۸۲	۱٫۴۰	۱٫۶۰	۱٫۰۴	۳٫۷۰	۳٫۱۰	۴٫۰۸	
۰٫۰۳۶	۹۵۰	۲٫۴۵	۲٫۳۶	۲٫۳۴	۱٫۲۷	۱٫۴۴	۰٫۹۳	۳٫۴۲	۲٫۸۵	۳٫۷۳	
۰٫۰۳۶	۹۰۰	۲٫۱۸	۲٫۰۹	۲٫۰۷	۱٫۱۵	۱٫۳۰	۰٫۸۳	۳٫۱۵	۲٫۶۱	۳٫۴۲	
۰٫۰۱۲	۱۰۰۰	۶٫۲۹	۶٫۱۱	۵٫۹۹	۲٫۹۴	۳٫۴۷	۲٫۱۶	۸٫۲۱	۶٫۵۳	۱۰٫۶۰	TiSiCN
۰٫۰۱۲	۹۵۰	۵٫۶۹	۵٫۵۲	۵٫۴۱	۲٫۶۸	۳٫۱۹	۱٫۹۴	۷٫۳۴	۵٫۹۸	۹٫۶۸	
۰٫۰۱۲	۹۰۰	۵٫۱۲	۴٫۹۶	۴٫۸۵	۲٫۴۳	۲٫۸۶	۱٫۷۳	۶٫۷۶	۵٫۳۹	۸٫۷۴	
۰٫۰۲۴	۱۰۰۰	۳٫۳۶	۳٫۱۵	۳٫۱۲	۱٫۵۶	۱٫۸۳	۱٫۱۷	۴٫۲۶	۳٫۵۴	۵٫۵۲	
۰٫۰۲۴	۹۵۰	۳٫۰۵	۲٫۸۵	۲٫۸۲	۱٫۴۲	۱٫۶۸	۱٫۰۵	۳٫۹۳	۳٫۱۹	۵٫۲۱	
۰٫۰۲۴	۹۰۰	۲٫۷۵	۲٫۵۷	۲٫۵۷	۱٫۳۰	۱٫۵۴	۰٫۹۴	۳٫۵۹	۲٫۸۶	۴٫۸۰	
۰٫۰۳۶	۱۰۰۰	۲٫۳۸	۲٫۱۸	۲٫۱۶	۱٫۱۲	۱٫۳۰	۰٫۸۴	۳٫۰۰	۲٫۵۲	۳٫۹۰	
۰٫۰۳۶	۹۵۰	۲٫۱۷	۱٫۹۸	۱٫۹۶	۱٫۰۳	۱٫۲۰	۰٫۷۶	۲٫۷۲	۲٫۲۸	۳٫۵۹	
۰٫۰۳۶	۹۰۰	۱٫۹۸	۱٫۷۹	۱٫۷۷	۰٫۹۴	۱٫۱۰	۰٫۶۸	۲٫۵۲	۲٫۰۷	۳٫۳۳	

برای حذف نویز، داده‌ها پیش‌پردازش شدند (VIF< 5). انتخاب متغیرها بر اساس p-value<۰/۰۵ بود و مدل با (F= ۳۰۵/۲ و p<۰/۰۰۱) و t-test اعتبارسنجی شد. باقی‌مانده‌ها با آزمون Kolmogorov-Smirnov نرمال تشخیص داده شدند (p = ۰/۰۷).

نمودارهای PR، SR، WOB و Torque به ازای سطح DSE در سنگ G1 (گرانیت همدان) به‌عنوان نماینده گرانیت‌ها، در شکل ۴ ارائه شده است. در شکل ۴-الف مشاهده میشود DSE در سرمته WC بیشتر از سرمته‌های DLC و TiSiCN است. سرمته TiSiCN بهترین عملکرد را نسبت به سایر سرمته ها دارد زیرا کمترین DSE با این سرمته به‌دست آمده است. همچنین با افزایش PR از ۱۲ تا ۳۶ میلی‌متر در دقیقه، DSE کاهش یافته است. این کاهش در DSE با سرمته‌های WC حدود ۶۹ درصد در سرمته DLC حدود ۷۰ درصد و در سرمته TiSiCN حدود ۶۸ درصد است. بنابراین کاهش DSE به ازای افزایش PR در حفاری با سرمته های WC اثرگذاری بیشتر دارد، هرچند تفاوت زیادی با سایر سرمته‌ها ندارد. شکل ۴-ب نشان می‌دهد افزایش سرعت چرخش سرمته (از ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه) موجب افزایش DSE شده است، اما نمودارها شیب تقریباً یکسانی را برای سه نوع سرمته (WC، DLC و TiSiCN) نشان می‌دهند. این امر به دلیل دامنه محدود تغییرات SR است که تأثیر قابل‌توجهی بر DSE ندارد. این محدوده به دلیل محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی و تمرکز مطالعه بر مقایسه پوشش‌ها انتخاب شد، اما برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیر SR، در مطالعات آینده دامنه وسیع‌تر (مثلاً ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ دور در دقیقه) پیشنهاد می‌شود.

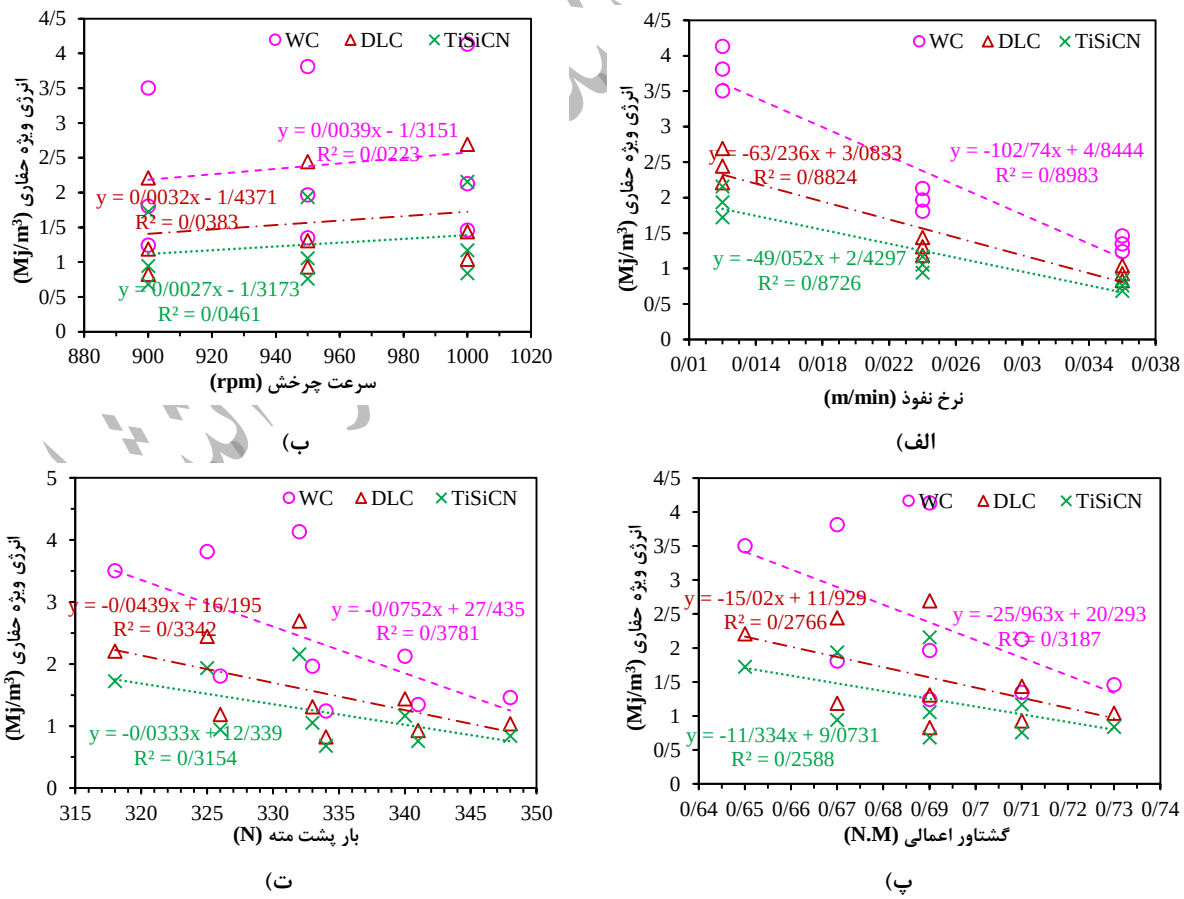


شکل ۴: نمودارهای DSE به ازای پارامترهای عملیاتی برای سنگ G1 (نماینده گرانیت‌ها) در آزمون‌ها با سه نوع سرمته؛ الف) نرخ نفوذ؛ ب) سرعت چرخش ؛ پ) گشتاور اعمالی؛ ت) بار پشت سرمته

افزایش SR به‌طور میانگین حدود ۱۷ درصد افزایش DSE را به دنبال داشته است. تغییرات گشتاور در حین چرخش به ازای DSE در شکل ۴-پ نشان می‌دهد با افزایش میزان گشتاور اعمالی روند کاهش DSE در هر سه نوع سرمته ادامه پیدا کرده است. نمودار تغییرات بار پشت سرمته به ازای DSE در شکل ۴-ت نیز نشان دهنده کاهش DSE نسبت به افزایش بار پشت سرمته است.

در شکل ۵ نمودارهای PR، SR، Torque و WOB به ازای سطح DSE در سنگ T1 (تراورتن دره بخاری) به‌عنوان نماینده تراورتن‌ها ارائه شده است. مشاهده می‌شود DSE در سرمته WC بیشتر از سرمته‌های DLC و TiSiCN است. در سنگ T1 نیز سرمته TiSiCN بهترین عملکرد را در بین سایر سرمته‌ها دارد زیرا کمترین DSE با این سرمته به‌دست آمده است. همانند نتایج به‌دست آمده برای حفاری در سنگ G1، در سنگ T1 نیز با افزایش نرخ نفوذ از ۱۲ تا ۳۶ میلی-متر در دقیقه، DSE کاهش یافته است. این کاهش در حفاری با سرمته WC حدود ۷۰ درصد، در سرمته DLC حدود ۶۹ درصد و در سرمته TiSiCN حدود ۶۸ درصد است. بنابراین کاهش DSE به ازای افزایش PR در حفاری با سرمته WC تاثیر بیشتری داشته است، هرچند تفاوت قابل توجهی با سایر سرمته‌ها ندارد. در مورد نمودارهای سرعت چرخش (شکل ۵-ب)، Torque (شکل ۵-پ) و WOB (شکل ۵-ت) به ازای DSE مشهود است که روندهای اشاره شده برای سنگ G1، هنگام حفاری در سنگ T1 نیز با تغییرات بسیار کمی اتفاق افتاده است. بدین معنی که با افزایش SR از ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه، میانگین DSE در هر سه نوع سرمته حدود ۲۱ درصد افزایش یافته است. به ازای افزایش Torque و افزایش WOB نیز، کاهش DSE در هر سه نوع سرمته WC، DLC و TiSiCN مشاهده می-شود.

نمودارهای PR، SR، Torque و WOB به ازای سطح DSE در سنگ M1 (مرمریت صلصالی) به‌عنوان نماینده مرمریت‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در حفاری این نوع سنگ نیز، افزایش نرخ نفوذ از ۱۲ تا ۳۶ میلیمتر بر دقیقه، افزایش گشتاور اعمالی و افزایش بار پشت سرمته، کاهش DSE تا حدود ۷۰ درصد در هر سه نوع سرمته WC، DLC و TiSiCN را در پی دارد. همچنین افزایش سرعت چرخش سرمته از ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه موجب می‌شود DSE به‌طور میانگین در سرمته WC حدود ۲۷ درصد ، در سرمته DLC حدود ۲۸/۵ درصد و در سرمته TiSiCN حدود ۲۶ درصد افزایش داشته باشد.



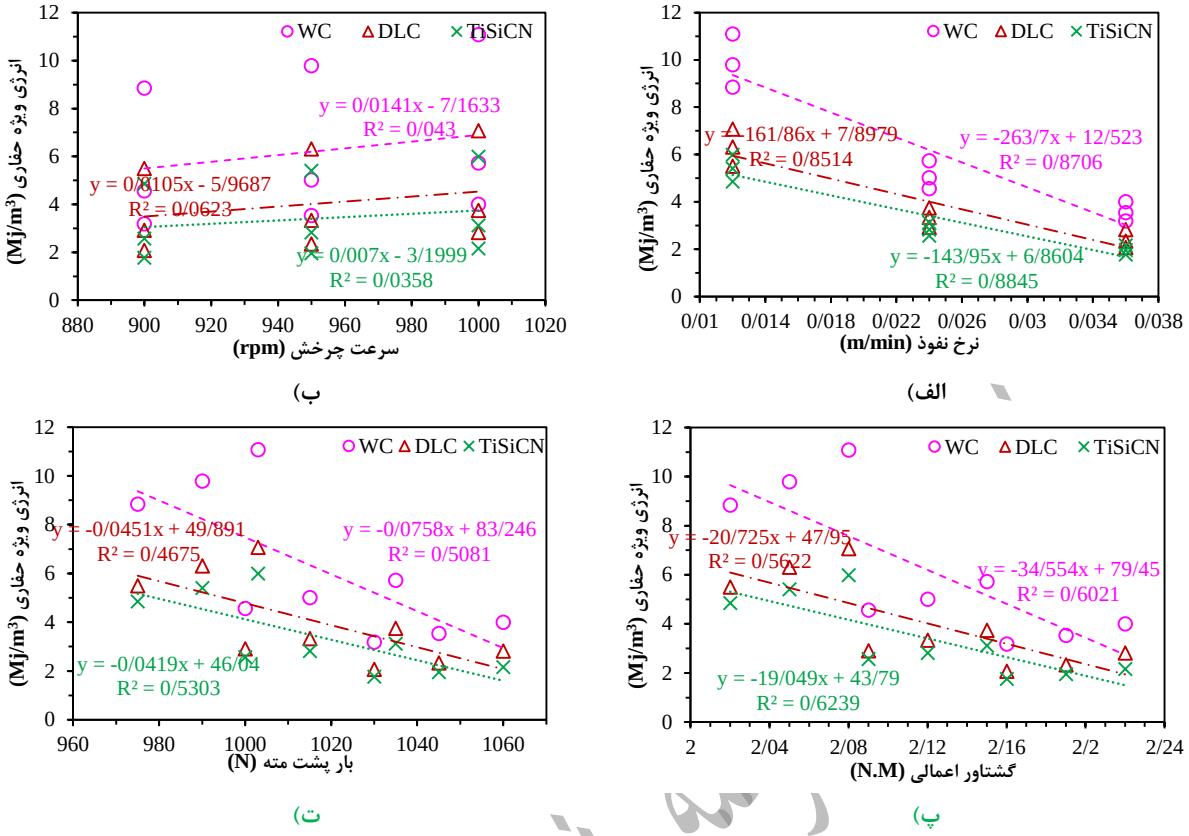
الف)

ب)

پ)

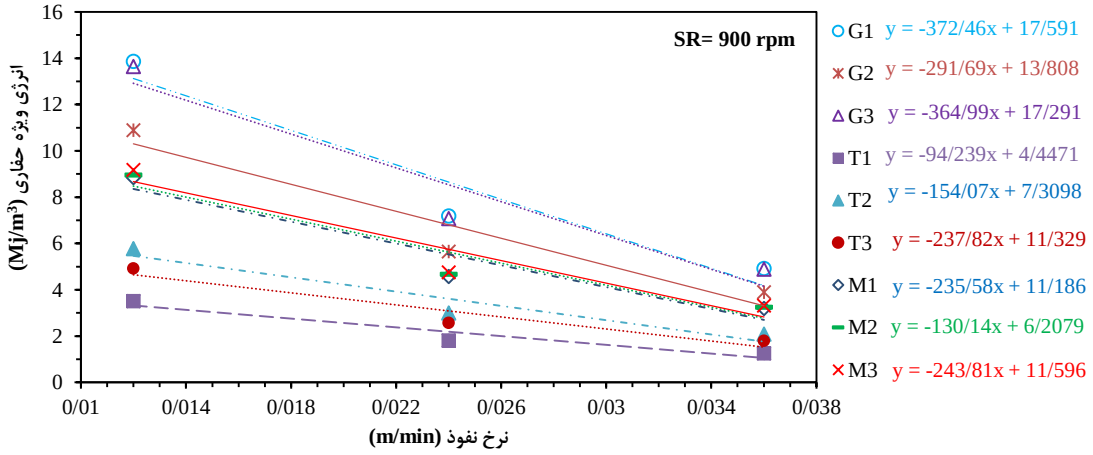
ت)

شکل ۵: نمودارهای DSE به ازای پارامترهای عملیاتی حفاری برای سنگ T1 (نماینده تراورتن‌ها) در آزمون‌ها با سه نوع سرمته؛ الف) نرخ نفوذ؛ ب) سرعت چرخش ؛ پ) گشتاور اعمالی؛ ت) بار پشت سرمته



شکل ۶: نمودارهای DSE به ازای پارامترهای عملیاتی حفاری برای سنگ M1 (نماینده مرمریت‌ها) در آزمون‌ها با سه نوع سرمته؛ الف) نرخ نفوذ؛ ب) سرعت چرخش ؛ پ) گشتاور اعمالی؛ ت) بار پشت سرمته

در شکل‌های ۴ تا ۶، روند تقریباً مشابهی برای نرخ نفوذ، گشتاور اعمالی و بار پشت سرمته به ازای سطح DSE در سنگ‌های مختلف مشاهده می‌شود. با افزایش این پارامترها، مقدار DSE کاهش می‌یابد؛ در مقابل، افزایش سرعت چرخش سرمته باعث افزایش DSE با هر سه نوع سرمته WC، DLC وTiSiCN می‌شود. این افزایش در سنگ‌های ضعیف بیشتر از سنگ‌های مقاوم است. بنابراین روندهای مشاهده شده در سنگ‌های گرانیتی و تراورتن، در سنگ مرمریتی نیز دیده می‌شود. این موضوع می‌تواند دلیل خوبی بر تقویت روند نتایج به دست آمده برای تعمیم به سایر انواع سنگ‌ها باشد.نمودارهای نرخ نفوذ به ازای DSE برای هر ۹ سنگ در سرعت چرخشهای مختلف ترسیم شد. با توجه به مشابهت بالای روند تغییرات در سرعت‌های مختلف چرخش سرمته، فقط تغییرات DSE در سرعت چرخش ۹۰۰ دور در دقیقه به‌عنوان نماینده در شکل ۷ ارائه شده است و سایر نمودارها به‌منظور جلوگیری از تکرار غیرضروری حذف شدند.



شکل ۷: نمودار DSE به ازای نرخ نفوذهای مختلف برای انواع سنگ‌ها با سرمته نوع WC

نمودار نشان می‌دهد که افزایش نرخ نفوذ موجب کاهش DSE شده است. شیب مشابه نمودارها به دلیل گستره کم تغییرات سرعت چرخش در نظر گرفته شده در آزمونها است که تغییرات ۱۰۰ دور در دقیقه کافی نیست و تأثیر آن را محدود می‌کند. نمودارهای شکل ۷ نشان می‌دهند که افزایش نرخ نفوذ (از ۱۲ تا ۳۶ میلی‌متر در دقیقه) در هر سه سرعت چرخش ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه، موجب کاهش DSE در ۹ سنگ شده است. این کاهش با توجه به ویژگی‌های سنگ متفاوت است:

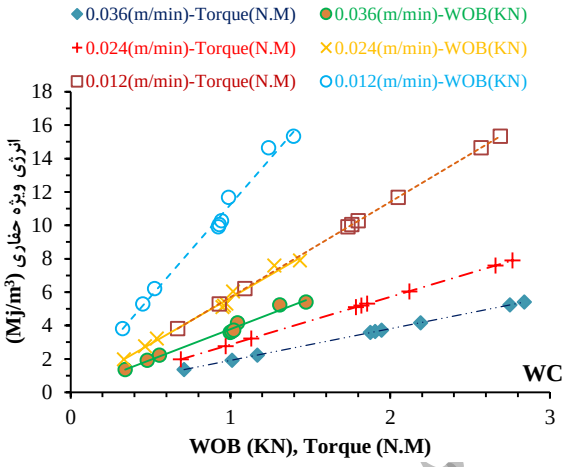
در سنگ‌های گرانیتی مانند G1 و G3 با سختی بالا، (UCS در حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال)، بیشترین شیب کاهش DSE مشاهده می‌شود که به دلیل مقاومت مکانیکی بالا و ساختار متراکم آنها است. در تراورتن‌ها مانند T1 با بافت متخلخل (با UCS حدود ۵۰ تا ۸۰ مگاپاسکال)، کمترین شیب کاهش DSE رخ می‌دهد، که به دلیل نفوذپذیری بالاتر و کاهش اصطکاک ناشی از بافت سنگ است. مرمریت‌ها با سختی متوسط (در حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال) و ساخت یکنواخت، شیبی بینابینی دارند.

این موضوع نشان می‌دهد افزایش نرخ نفوذ در سنگ‌های سخت مانند گرانیت، کاهش DSE بالاتری را نسبت به سنگ‌های نرمتر و مقاومت پایین تر مانند سنگهای تراورتن و مرمریت به دنبال دارد که نشان‌دهنده تاثیر در خواص ژئومکانیکی سنگها در کاهش DSE است.

سنگ‌های مرمریتی به لحاظ کاهش DSE به ازای افزایش نرخ نفوذ در هر سرعت چرخش سرمته، در میانه بین سنگ‌های گرانیتی و سنگ‌های تراورتن قرار دارند. کاهش DSE به ازای افزایش نرخ نفوذ، در سنگ‌های تراورتن که عمدتا در دسته سنگ‌های با استحکام کمتر قرار می‌گیرند، کمترین مقدار بین همه سنگ‌ها را در پی داشته است. در واقع در سنگ‌های مستحکم‌تر و دارای مقاومت فشاری بالاتر، کاهش DSE به ازای افزایش نرخ نفوذ بالاتری نسبت به سنگ‌های ضعیف‌تر دیده می‌شود. روند کاهش سطح DSE به ازای افزایش نرخ نفوذ در همه سنگ‌های مورد آزمون مشاهده می‌شود که به نتایج روند به‌دست آمده اعتبار بیشتری می‌دهد.به منظور تحلیل آماری و به‌ویژه برازش مدل‌های رگرسیونی، داده‌ها پیش از پردازش نرمال‌سازی شدند. بدین منظور از روش استانداردسازی Z-Score استفاده شد. در این روش میانگین متغیرها صفر و انحراف معیار برابر یک می‌شود. این کار موجب مقایسه‌پذیری بهتر متغیرها و افزایش دقت تحلیل‌های آماری شد. برای تحلیل تعامل بین پارامترهای عملیاتی و مقایسه تأثیر آن‌ها بر سطح DSE، می‌توان نمودار نرمالایز شده بار پشت سرمته و گشتاور اعمالی به سرمته به ازای DSE را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. نمودار نرمالایز شده بار پشت سرمته و گشتاور اعمالی حفاری به ازای DSE در نرخ نفوذ ۱۲ میلی‌متر در دقیقه برای سرمته WC در شکل ۸ ارائه شد است.

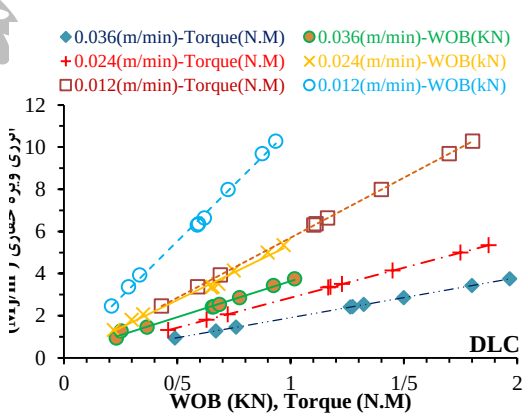
تحلیل نمودار نشان می‌دهد که بار پشت مته با شیب منفی بیشتر (۰,۴۵- تا ۰,۵۵-) نسبت به گشتاور اعمالی با شیب (۰,۲۵- تا ۰,۳۵-) تأثیر بیشتری بر کاهش DSE دارد، که در نرخ‌های نفوذ مختلف ۱۲، ۲۴ و ۳۶ میلی‌متر در دقیقه و برای سرمته‌های WC، DLC و TiSiCN تأیید شده است. این امر به دلیل تأثیر مستقیم WOB بر نیروی برشی و شکست سنگ است، در حالی که گشتاور اعمالی بیشتر به چرخش و اصطکاک ثانویه مرتبط است. بنابراین، WOB اثرگذاری بیشتری بر کاهش DSE دارد، که این موضوع با مطالعات چن و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. بر اساس معادله DSE ارائه شده توسط تیل (۱۹۶۵)، WOB بدلیل اثر مستقیم بر نیروی فشاری و افزایش حجم سنگ حذف‌شده، انرژی را کارآمدتر توزیع کرده و DSE را کاهش می‌دهد، در حالی که گشتاور اعمالی، به مقاومت چرخشی و اصطکاک مربوط است و افزایش آن اغلب DSE را افزایش می‌دهد. داده‌ها نشان میدهد که در سنگ G1، افزایش WOBاز ۵۰۰ نیوتن به ۱۵۰۰ نیوتن، DSE را ۲۵ درصد کاهش داده، اما گشتاور اعمالی ۱۵ درصد کاهش DSE را در پی داشته است. نتایج رگرسیون (ضریب ۰٫۳۱ = WOB و۱٫۸۲= Torque در مدل M3) این موضوع را تأیید می‌کند.

این روند در همه نرخ نفوذها مشاهده می‌شود. همچنین روند افزایش DSE به ازای افزایش بار پشت سرمته، در نرخ نفوذ ۱۲ میلی‌متر در دقیقه بیشتر از نرخ نفوذ ۲۴ میلیمتر در دقیقه و آن هم بیشتر از نرخ نفوذ ۳۶ میلی متر در دقیقه است. بدین معنی که با افزایش نرخ نفوذ سرمته، شیب نمودار تغییرات DSE به ازای بار پشت سرمته کمتر می‌شود. این موضوع در مورد گشتاور اعمالی نیز صدق می‌کند.

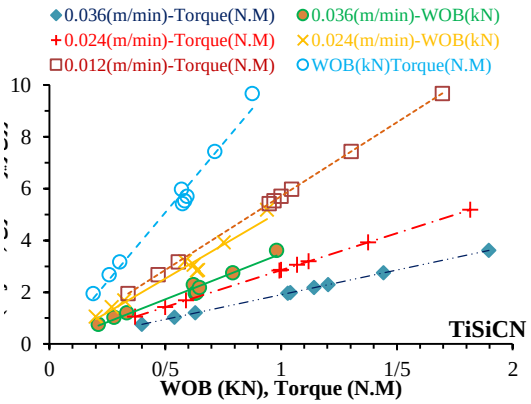


شکل ۸: نمودار نرمالایز شده WOB و Torque به ازای DSE با نرخ نفوذهای متفاوت برای سرمته WC

نمودارهای نرمالایز شده بار پشت سرمته و گشتاور اعمالی حفاری به ازای DSE با نرخ نفوذهای متفاوت برای سرمته‌های با پوشش‌های DLC و TiSiCN در شکل ۹ نیز روند تقریبا مشابه با نمودارها برای سرمته WC دارند.این موضوع موجب اعتباربخشی بیشتر به نتایج به‌دست آمده و تقویت اعتماد به صحت نتایج به‌دست آمده را موجی می‌شود.



الف) سرمته با پوشش *DLC*

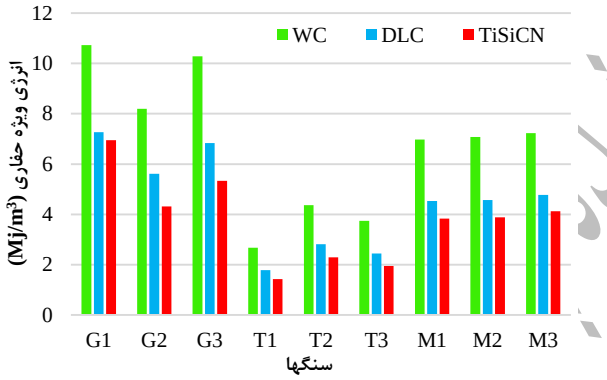


ب) سرمته با پوشش *TiSiCN*

شکل ۹: نمودار نرمالایز شده WOB و Torque به ازای DSE با نرخ نفوذهای متفاوت برای سرمته‌های DLC و TiSiCN

مقادیر میانگین DSE برای سنگهای مختلف در نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد مقادیر DSE برای سرمته WC در حفاری همه انواع سنگ‌ها بیشتر از سرمته‌های با پوشش DLC و TiSiCN است. DSE هنگام حفاری با سرمته‌های DLC در رده دوم قرار دارند. پایین ترین DSE هنگام حفاری در همه سنگ‌ها با سرمته‌های با پوشش TiSiCN حاصل می‌شود. این موضوع می‌تواند ناشی از سختی ویکرز بالای سرمته TiSiCN (حدود ۳۸۶۰) باشد که بالاتر از سرمته DLC با سختی ویکرز ۳۱۰۰ و همچنین سرمته WC با سختی ویکرز ۱۵۷۰ باشد.

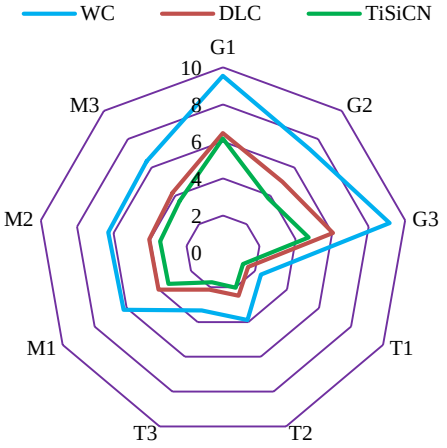
همچنین DSE در سنگ‌های تراورتن پایین‌ترین مقدار نسبت به سنگ‌های گرانیتی و مرمریتی را دارد که این را می‌توان ناشی از استحکام و مقاومت فشاری کمتر این سنگ-ها نسبت به سایر سنگ‌ها دانست. سنگ‌های مرمریتی نیز از نقطه نظر DSE در میانه سنگ‌های تراورتن و سنگ‌های گرانیتی قرار دارند.



شکل ۱۰: نمودار DSE برای انواع سنگ‌ها با سه نوع سرمته WC، DLC و TiSiCN

نمودار میانگین DSE برای انواع سنگ‌ها در حفاری با سه نوع سرمته در شکل ۱۱ نشان می‌دهد مساحت ناحیه مربوط به سرمته WC بیشتر از سرمته DLC و TISiCN است. مساحت ناحیه مربوط به سرمته TiSiCN کمترین مقدار نسبت به دو سرمته دیگر است. این موضوع را نیز می-توان به تاثیر سختی پوشش سرمته بر کاهش DSE هنگام حفاری نسبت داد. زیرا هنگام حفاری برای داشتن یک نرخ نفوذ ثابت، سرمته دارای سختی بالاتر مانند TiSiCN نیاز به گشتاور و بار پشت سرمته کمتری نسبت به سرمته دارای سختی کمتر مانند WC دارد و این موجب کاهش DSE و افزایش بهره‌وری و راندمان عملیات حفاری می‌شود. در این بین سرمته DLC به لحاظ اثرگذاری بر کاهش DSE، بین

دو سرمته WC و TiSiCN قرار دارد که البته عملکرد آن به سرمته TISiCN نزدیک تر است. این موضوع نشان می‌دهد پوشش‌های مقاوم در برابر سایش مانند DLC و TiSiCN تاثیر قابل توجهی برای نیاز به بار پشت سرمته و گشتاور اعمالی و در نتیجه کاهش DSE دارند که افزایش کارایی و راندمان عملیات حفاری را به دنبال خواهند داشت.



شکل ۱۱: نمودار میانگین DSE برای انواع سنگ‌ها در حفاری با هر سه نوع سرمته

۳-۳- تحلیل رگرسیون

۳-۳-۱- کلیات

در این بخش، رابطه بین DSE با پارامترهای عملیاتی حفاری و سختی پوشش سرمته با استفاده از تحلیل‌های رگرسیون بررسی شد. ابتدا داده‌های DSE در آزمون‌های حفاری با سه مدل رگرسیون خطی (M1، M2 و M3) تحلیل شدند. در مدل‌های خطی از رگرسیون چندمتغیره خطی با الگوریتم Stepwise (p-value < 0.05 برای ورود و p>۰/۱۰ برای حذف) استفاده شد. مدل M1 از رگرسیون خطی کامل با تمام متغیرهای مستقل استفاده کرد، مدل M2 با متغیرهای استانداردشده (برای یکسان‌سازی مقیاس) طراحی شد، و مدل M3 با انتخاب متغیرهای معنی‌دار (p<۰/۰۵) بهینه‌سازی شد. اگرچه مقادیر R^2 (برای M1 حدود ۰/۹۲ برای M2 حدود ۰/۹۳ و برای M3 حدود ۰/۹۲۷) نشان‌دهنده شباهت نسبی آنها است، اما مدل M3 به دلیل حذف متغیرهای بی‌معنی (مانند SR) و کاهش بیش‌برازش برای کاربردهای عملی مناسب‌تر است. در مدلM3، پارامتر SR به دلیل p-value>۰/۰۵ حذف گردید.

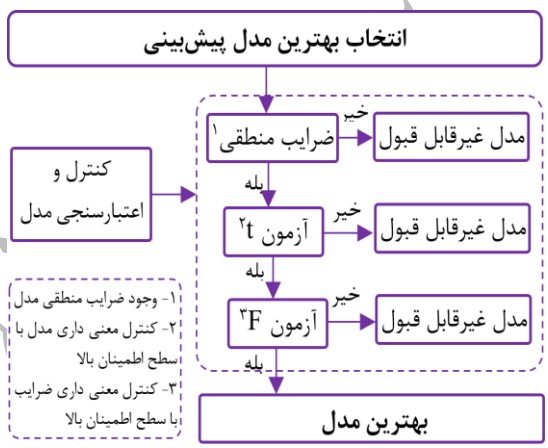
برای اعتبارسنجی مدل‌های به‌دست‌آمده از آزمون‌های t و F استفاده شد. در این پژوهش، اصطلاح «معنی‌داری» صرفاً به مفهوم آماری آن اشاره دارد. به‌طور مشخص، معنی‌داری متغیرها و مدل‌ها با استفاده از آزمون‌های t و F در سطح اطمینان ۹۵ درصد (α =۰/۰۵) سنجیده شد. بنابراین هرجا در متن به «اثر معنی‌دار» یا «عدم معنی‌داری» اشاره شده، منظور نتایج این آزمون‌های آماری بوده است. روند نمای ارائه شده در شکل ۱۲ مراحل کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. برای مدل‌های غیرخطی (M4، M5 و M6)، به ترتیب توابع نمایی، پلی‌نومیال درجه دوم و لگاریتمی با الگوریتم حداقل مربعات و بهینه‌سازی Levenberg-Marquardt برازش شدند. پارامترهای PR، SR، WOB، Torque و H براساس پیشینه تحقیقات انتخاب و با روش Z-Score نرمال‌سازی شدند.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، برای بررسی اهمیت مدل از آزمون F و برای بررسی اهمیت هر متغیر مستقل آزمون t استفاده شد. نتایج آزمون‌های F و t برای مدل‌های رگرسیون چندمتغیره خطی در ادامه ارائه شده است. مدل‌های آماری زیر ارتباط میان DSE با پارامترهای عملیاتی حفاری و سختی سرمته‌ها را نشان می‌دهد.

برای بررسی معنی‌داری مدل‌ها و ضرایب از آزمون‌های آماری F و t استفاده شد. آزمون F به‌منظور ارزیابی معنی‌داری کلی مدل‌های رگرسیون بکار رفت. در این آزمون، فرض صفر (H_0) بر نبود رابطه خطی میان متغیر وابسته (DSE) و متغیرهای مستقل استوار است. اگر مقدار آماره F محاسبه‌شده بزرگ‌تر از مقدار بحرانی F در سطح اطمینان ۹۵ درصد باشد (p<۰/۰۵)، فرض صفر رد شده و مدل از نظر کلی معنی‌دار تلقی می‌شود. به بیان دیگر، آزمون F مشخص می‌کند که آیا مجموعه متغیرهای مستقل توانسته‌اند به طور معنادار تغییرات DSE را تبیین کنند یا خیر.

برای ارزیابی نقش هر متغیر مستقل، از آزمون t استفاده شد. در این آزمون، فرض صفر (H0) بیانگر صفر بودن ضریب متغیر مستقل در معادله رگرسیون است. چنانچه t به‌دست آمده از مقدار بحرانی t در سطح اطمینان ۹۵ درصد بیشتر باشد (p<۰/۰۵)، ضریب مربوطه معنی‌دار است و نشان‌دهنده آن است که متغیر مذکور به صورت مستقل بر تغییرات DSE اثرگذار است. در غیر این صورت، متغیر فاقد تأثیر آماری معنادار تلقی شده و می‌توان آن را از مدل حذف کرد.

آزمون F برای بررسی کلیت مدل و آزمون t برای تحلیل نقش نسبی هر یک از پارامترها مورد استفاده قرار گرفت تا مشخص شود کدام‌یک از متغیرهای عملیاتی و ویژگی‌های سختی سرمته بیشترین سهم را در تغییرات انرژی ویژه حفاری دارند. کارایی مدل‌ها با اعتبارسنجی آماری تأیید شد. در آزمون F-test ($p < ۰/۰۰۱$ و $F = ۳۰۵/۲$) و آزمون t-test برای متغیرها، نرمال بودن باقی‌مانده‌ها با آزمون ($p=۰/۰۷$) Kolmogorov-Smirnov، و مقایسه پیش‌بینی با داده‌های واقعی نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول آنها است.



شکل ۱۲: کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیون

۳-۳-۲- مدل‌ها و ضرایب

رگرسیون خطی کامل با تمام متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی DSE (مدل M1) و ضرایب آن در جدول ۳ ارائه شده است. در معادلات رگرسیون DSE، PR نرخ نفوذ، SR سرعت چرخش سرمته، WOB بار پشت سرمته، Torque گشتاور اعمالی به سرمته و H سختی پوشش سرمته است. در تمام مدل‌ها، DSE متغیر وابسته و سختی پوشش سرمته و پارامترهای عملیاتی متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. این مدل با استفاده از الگوریتم Stepwise در نرم‌افزار SPSS و با معیارهای آماری ($t > ۱/۹۶$ برای معنی‌داری و $VIF<۵$ برای بررسی هم‌خطی) توسعه یافته است. برای اعتبارسنجی پیش‌بینی، مقادیر پیش‌بینی‌شده با معادله M1 با مقادیر واقعی DSE از آزمون‌های حفاری مقایسه شده و یک مورد آن بعنوان مثال در جدول ۴ ارائه شده است. خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) برای سرمته WC با نرخ نفوذ ۰/۰۱۲ m/min و رعت چرخش ۱۰۰۰ دور در دقیقه $RMSE \approx ۴/۲$ و MAE حدود ۳/۰۱ بدست آمده که خطای نسبتا قابل قبولی است.

جدول ۳ : ضرایب رگرسیون چندمتغیره خطی کامل با تمام متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی DSE (مدل M1)

متغیر	ضریب	p-value	t-value	معنی‌دار (t > 1.96)
H	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۵	۲/۴۴	بله
PR	-۱۲۷/۳	< ۰/۰۰۱	۱۵/۸	بله
SR	۰/۰۰۱۲	۰/۱۴۲	۱/۴۷	خیر
WOB	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۴	۲/۸۵	بله
Torque	۱/۳۹	< ۰/۰۰۱	۱۰/۳	بله

$DSE_1 = 2.84 - 0.0009H - 127.3PR + 0.0012SR + 0.0025WOB + 1.39Torque$
R-squared: 0.928
Adjusted R-squared: 0.926
F-statistic: 305.2 (p-value < 0.001)
F-critical: 2.21
t-critical: 1.96

جدول ۴ : مقادیر DSE واقعی و پیش‌بینی‌شده براساس مدل M1

سنگ سرمته		SR (rpm)	PR (m/min)	DES واقعی	DSE M1	RMSE	MAE
G1	WC	۱۰۰۰	۰/۰۱۲	۱۶/۸۳	۸/۶۵	۴/۲۰	۳/۰۱
G1	WC	۹۵۰	۰/۰۱۲	۱۵/۳۱	۸/۲۷	۶/۴۵	۵/۵
G1	WC	۹۰۰	۰/۰۱۲	۱۳/۸۶	۷/۸۸	۴/۱۹	۳/۰۰
G1	WC	۱۰۰۰	۰/۰۲۴	۸/۶۷	۷/۳۴	۶/۱۱	۴/۸۳
G1	WC	۹۵۰	۰/۰۲۴	۷/۸۳	۶/۹۰	۱۱/۶۳	۱۰/۶۱
G1	WC	۹۰۰	۰/۰۲۴	۷/۱۸	۶/۶۰	۶/۵۵	۵/۷۳

معادله رگرسیون M1 نشان می‌دهد نرخ نفوذ (PR) و گشتاور اعمالی به سرمته (Torque) بالاترین تاثیر را بر DSE دارند. پس از اینها، بار پشت سرمته (WOB) و سختی پوشش سرمته‌ها (H) نیز اثر نسبی دارند. سرعت چرخش سرمته (SR) تاثیر قابل توجهی بر DSE ندارد.

معادله رگرسیون چندمتغیره خطی با متغیرهای استانداردشده برای پیش‌بینی DSE (مدل M2) و ضرایب آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ : ضرایب رگرسیون چندمتغیره خطی با متغیرهای استانداردشده برای پیش‌بینی DSE (مدل M2)

متغیر	ضریب	p-value	t-value	معنی‌دار (t > 1.96)
Z_H	۰/۱۸	۰/۰۱۳	۲/۴۹	بله
Z_{PR}	-۰/۷۲	< ۰/۰۰۱	۱۶/۱	بله
Z_{SR}	۰/۰۵	۰/۱۵۱	۱/۴۳	خیر
Z_{WOB}	۰/۲۲	۰/۰۰۳	۲/۹۳	بله
Z_{Torque}	۰/۶۵	< ۰/۰۰۱	۱۰/۶	بله

$DSE_2 = 0 + 0.18Z_H - 0.72Z_{PR} + 0.05Z_{SR} + 0.22Z_{WOB} + 0.65Z_{Torque}$
R-squared: 0.928
Adjusted R-squared: 0.926
F-statistic: 302.9 (p-value < 0.001)
F-critical: 2.21
t-critical: 1.96

ندیس Z بیانگر مقادیر استانداردشده متغیر براساس روش Z-score است. این روش برای یکسان‌سازی مقیاس متغیرهای مستقل و مقایسه بهتر اثر نسبی آنها بر انرژی ویژه حفاری به کار رفته است.

ضرایب معادله رگرسیون M2 تقریبا مشابه معادله M1 بوده و نشان می‌دهد نرخ نفوذ و گشتاور اعمالی به سرمته بالاترین تاثیر را بر DSE دارند. بار پشت سرمته و سختی پوشش سرمته‌ها نیز تاثیر نسبی دارند. همچنین سرعت چرخش سرمته تاثیر قابل توجهی بر DSE ندارد. با توجه به اینکه در هر دو معادله رگرسیون M1 و M2، سرعت چرخش سرمته تاثیر قابل توجهی در DSE نشان نداد، در معادله رگرسیون چندمتغیره خطی با انتخاب متغیرهای معنی‌دار (M3) این پارامتر حذف شد و ضرایب آن در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶ : نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره خطی با انتخاب متغیرهای معنی‌دار برای پیش‌بینی DSE (مدل M3)

متغیر	ضریب	p-value	t-value	معنی‌دار (t > 1.96)
H	-۰٫۰۰۰۹	۰٫۰۱۴	۲٫۴۶	بله
PR	-۱۲۸٫۵	< ۰٫۰۰۱	۱۶٫۰	بله
WOB	۰٫۰۰۲۶	۰٫۰۰۳	۲٫۹۵	بله
Torque	۱٫۳۷	< ۰٫۰۰۱	۱۰٫۴	بله

DSE_3=3.95−0.0009H−128.5PR+0.0026WOB+1.37Torque
R-squared: 0.927
Adjusted R-squared: 0.925
F-statistic: 380.4 (p-value < 0.001)
F-critical: 2.39 (df1=4 ،df2=238)
t-critical: 1.96

معادله مدل M3 نشان می‌دهد حذف پارامتر سرعت چرخش سرمته تاثیر چندانی بر دقت مدل نداشت، هرچند موجب شدمدل ساده‌تر شود.

از آنجا که آماره F به‌دست‌آمده از جدول توزیع در سطح اطمینان ۹۹ درصد بزرگ‌تر از آماره F به‌دست‌آمده از تمام مدل‌ها بود، فرض صفر مبنی بر نبود رابطه خطی بین متغیر وابسته (DSE) و متغیرهای مستقل (سختی پوشش سرمته و پارامترهای عملیاتی) رد شد، به این معنا که حداقل یکی از ضرایب رگرسیون صفر نیست. پس از بررسی اهمیت کلی مدل با آزمون F، آزمون t برای بررسی اهمیت متغیرهای مستقل استفاده شد. با استفاده از این آزمون، می‌توان بررسی کرد که آیا ضریب رگرسیون یک متغیر مستقل صفر است یا خیر. نتایج نشان داد که برای هر مدل، آماره t به‌دست‌آمده از جدول توزیع مربوطه در سطح اطمینان ۹۰ درصد کوچک‌تر از آماره t به‌دست‌آمده از متغیرهای مستقل بود. بنابراین، فرض صفر مبنی بر صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل رد شد. در بررسی‌ها مشخص شد که ضرایب تمام مدل‌ها با منطق علمی موضوع سازگار هستند.

در ادامه سه مدل رگرسیون چندمتغیره غیرخطی تحلیل شد. در مدل M4 از رگرسیون غیرخطی نمایی، در مدل M5 از رگرسیون غیرخطی پلی‌نومیال درجه دوم و برای مدل M6 از رگرسیون غیرخطی لگاریتمی استفاده شد. در مورد مدل-های رگرسیون چندمتغیره غیرخطی نیز برای کنترل معنی‌داری مدل از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شده است.

جدول ۷ : نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره غیرخطی نمایی برای پیش‌بینی DSE (مدل M4)

متغیر	ضریب	p-value	t-value	معنی‌دار (t > 1.96)
H	-۰٫۰۰۰۳	۰٫۰۲۵	۲٫۲۵	بله
PR	-۱۰٫۸	< ۰٫۰۰۱	۱۲٫۹	بله
SR	۰٫۰۰۰۲	۰٫۱۸۷	۱٫۳۲	خیر
WOB	۰٫۰۰۰۴	۰٫۰۱۲	۲٫۵۲	بله
Torque	۰٫۲۰	< ۰٫۰۰۱	۸٫۷	بله

$Ln\ (DSE)_4$=0.98−0.0003H−10.8PR+0.0002SR+0.0004WOB+0.20Torque
R-squared: 0.885
Adjusted R-squared: 0.882
F-statistic: 184.7 (p-value < 0.001)
F-critical: 2.21
t-critical: 1.96

مدل M5 دارای بالاترین ضریب همبستگی نسبت به سایر مدل‌ها را داراست، اما با توجه به تعداد زیاد ضرایب ممکن است خطر بیش‌برازش داشته باشد. با توجه به اینکه مدل M5 دارای ۲۰ ترم (خطی، درجه دوم و تعاملی) بوده و بسیاری از آنها معنی‌دار نیستند برای خلاصه‌سازی، فقط ضرایب برای ترم‌های خطی در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸ : نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره غیرخطی پلی‌نومیال درجه دوم برای پیش‌بینی DSE (مدل M5)

متغیر	ضریب	p-value	t-value	معنی‌دار (t > 1.97)
H	-۰٫۰۰۱۰	۰٫۰۱۱	۲٫۵۵	بله
PR	-۱۳۰٫۱	< ۰٫۰۰۱	۱۷٫۲	بله
SR	۰٫۰۰۱۰	۰٫۱۷۸	۱٫۳۵	خیر
WOB	۰٫۰۰۲۸	۰٫۰۰۲	۳٫۰۵	بله
Torque	۱٫۴۵	< ۰٫۰۰۱	۱۱٫۱	بله

DSE = 5.12 - 0.0010 H - 130.1 PR + 0.0010 SR +0.0028 WOB + 1.45 Torque + 0.0000004 H2 + 8.2 PR2 - 0.0000005 SR2 + 0.0000007 WOB2 + 0.09 Torque2 - 0.0002 H×PR + 0.0000003 H×SR + 0.0000009 H×WOB + 0.0004 H×Torque + 0.10 PR×SR + 0.08 PR×WOB - 10.2 PR×Torque + 0.000001 SR×WOB + 0.0009 SR×Torque - 0.0006 WOB×Torque
R-squared: 0.945
Adjusted R-squared: 0.936
F-statistic: 160.3 (p-value < 0.001)
F-critical: 1.59 (df1=20 ،df2=222)
t-critical: 1.97

معادله رگرسیون چندمتغیره غیرخطی لگاریتمی (M6) در زیر و ضرایب آن در جدول ۹ ارائه شده است. مدل M6 دقت کمتری نسبت به مدل‌های خطی دارد، اما برای روابط غیرخطی مناسب است.

جدول ۹ : نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره غیرخطی لگاریتمی برای پیش‌بینی DSE (مدل M6)

متغیر	ضریب	p-value	t-value	معنی‌دار (t > 1.96)
ln H	-۰٫۲۴	۰٫۰۱۹	۲٫۳۵	بله
ln PR	-۲٫۱	< ۰٫۰۰۱	۱۳٫۳	بله
ln SR	۰٫۱۲	۰٫۱۶۵	۱٫۳۹	خیر
ln WOB	۰٫۳۱	۰٫۰۰۸	۲٫۶۵	بله
ln Torque	۱٫۸۲	< ۰٫۰۰۱	۹٫۲	بله

$DSE_6 = 3.72 - 0.24 \ln H - 2.1 \ln PR + 0.12 \ln SR + 0.31 \ln WOB + 1.82 \ln Torque$
R-squared: 0.891
Adjusted R-squared: 0.888
F-statistic: 192.6 (p-value < 0.001)
F-critical: 2.21
t-critical: 1.96

۱-۳-۲- مقایسه مدل‌ها و تحلیل اثرات پارامترها

به منظور اعتبارسنجی پیش‌بینی، مقادیر پیش‌بینی‌شده با معادلات رگرسیون M1 تا M6 با مقادیر واقعی DSE از آزمون‌های حفاری مقایسه شده و در جدول ۱۰ مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) ارائه شده‌اند.

جدول ۱۰ : مقادیر DSE واقعی و پیش‌بینی‌شده براساس مدلهای M1 تا M6

مدل	MAE	RMSE	MAE نسبی (درصد)	مقایسه مدلها
M1	۳٫۰۱	۴٫۲۰	۲۵٫۹	خطای قابل‌توجه، SR غیرمعنی‌دار
M2	۳٫۰۰	۴٫۱۹	۲۵٫۸	مشابه مدل M1، مقیاس تعدیل‌شده
M3	۳٫۰۰	۴٫۱۹	۲۵٫۸	بهترین مدل خطی، بدون SR
M4	۴٫۸۳	۶٫۱۱	۴۱٫۶	دقت پایین، لگاریتم نامناسب
M5	۱۰٫۶۱	۱۱٫۶۳	۹۱٫۴	پراکندگی شدید، غیرقابل‌قبول
M6	۵٫۷۳	۶٫۵۵	۴۹٫۴	بهتر از مدل M4، اما همچنان ضعیف

مقادیر F-statistic، Adjusted R-squared و R-squared برای مدل‌های M1 تا M6 نیز در جدول ۱۱ ارائه شده است. دقت مدل‌ها با R^2 و Adjusted R^2 ارزیابی شد. آزمون‌های F ($p<۰٫۰۰۱$) و t ($p<۰٫۰۵$) معنی‌داری مدل‌ها و ضرایب را تأیید کردند. باقی‌مانده‌ها با آزمون‌های Kolmogorov-Smirnov و Breusch-Pagan نرمال و دارای واریانس ثابت بودند.

جدول ۱۱ : عملکرد مدل‌های رگرسیون برای پیش‌بینی DSE

مدل	R-squared	Adjusted R-squared	F-statistic	p-value	F-critical
M1	۰٫۹۲۸	۰٫۹۲۶	۳۰۵٫۲	< ۰٫۰۰۱	۲٫۲۱
M2	۰٫۹۲۸	۰٫۹۲۶	۳۰۲٫۹	< ۰٫۰۰۱	۲٫۲۱
M3	۰٫۹۲۷	۰٫۹۲۵	۳۸۰٫۴	< ۰٫۰۰۱	۲٫۳۹
M4	۰٫۸۸۵	۰٫۸۸۲	۱۸۴٫۷	< ۰٫۰۰۱	۲٫۲۱
M5	۰٫۹۴۵	۰٫۹۳۶	۱۶۰٫۳	< ۰٫۰۰۱	۱٫۵۹
M6	۰٫۸۹۱	۰٫۸۸۸	۱۹۲٫۶	< ۰٫۰۰۱	۲٫۲۱

بهترین مدل از نظر برازش داده‌ها مدل M5 با ضریب همبستگی ۰٫۹۴۵ است، اما با داشتن ضریب همبستگی تعدیل شده ۰٫۹۳۶ و تعداد زیاد ترم‌ها، احتمال بیش‌برازش در مدل وجود دارد. این مدل برای کاربردهای عملی مناسب نیست و توصیه نمی‌شود. بهترین مدل از نظر تعادل دقت و سادگی مدل M3 با ضریب همبستگی ۰٫۹۲۷ و ضریب همبستگی تعدیل شده ۰٫۹۲۵ است، زیرا با داشتن ۴ متغیر معنی‌دار، ساده و دقیق است. مدل‌های M1 و M2 دقت مشابهی دارند اما دربرگیرنده پارامتر غیرمعنی‌دار بوده و مدل را پیچیده می‌کند. مدلهای M4 و M6 برای داده‌های غیرخطی مناسب‌اند، اما دقت کمتری دارند و برای داده‌هایی با روابط غیرخطی پیچیده‌تر مفید هستند، اما در مورد مسئله مورد مطالعه عملکرد ضعیف‌تری دارند.

ضرایب مربوط به سختی سرمته (H) در همه مدل‌ها منفی است (بین ۰٫۰۰۰۹- تا ۰٫۲۴-) که نشان می‌دهد سختی سرمته‌ها موجب کاهش DSE می‌شود. سرمته‌های با پوشش سخت‌تر مانند TiSiCN با (H=۳۸۶۰) مقدار DSE را کاهش می‌دهند و در نتیجه کارایی حفاری را بهبود می‌بخشند. سرمته‌های TiSiCN نسبت به سرمته‌های DLC و WC عملکرد بهتری دارد. تاثیر سختی سرمته در مدل‌های خطی (M1، M2، M3) قوی‌تر و قابل‌تفسیرتر است.

ضرایب نرخ نفوذ (PR) در همه مدل‌ها منفی و قوی است (۱۲۷- تا ۱۳۰- در مدل‌های خطی و ۱۰٫۸- تا ۲٫۱- در مدل‌های غیرخطی) که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه DSE به ازای افزایش نرخ نفوذ در سنگ است. این موضوع حفاری کارآمدتر را نشان می‌دهد که در همه مدل‌ها غالب است. پارامتر نرخ نفوذ قوی‌ترین تاثیر را در مدل M3 و سپس به دلیل داشتن ترم‌های تعاملی و درجه دوم در M5 دارد. در مدل‌های M4 و M6، تاثیر نرخ نفوذ کمی کاهش می یابد.

پارامتر سرعت چرخش (SR) با داشتن p-value>۰٫۰۵ تأثیر ضعیف و غیرمعنی‌داری در همه مدل‌ها نشان می‌دهد.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

تغییر سرعت چرخش سرمته از ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه تأثیر اندکی بر DSE دارد، که ممکن است به دلیل محدوده کم تغییرات این پارامتر باشد. تاثیر سرعت چرخش در مدل M5 به دلیل جمله‌های تعاملی کمی قوی‌تر است، اما همچنان غیرمعنی‌دار است.

عامل بار پشت سرمته (WOB) نشان‌دهنده اثر مثبت معنی‌دار است (ضرایب بین ۰/۰۰۲۵ تا ۰/۳۱). بدین معنی که افزایش بار پشت سرمته انرژی بیشتری مصرف می‌کند، اما اثر آن کمتر از نرخ نفوذ و گشتاور اعمالی به سرمته است. تاثیر بار پشت سرمته در مدل‌های M3 و M5 برجسته‌تر است.

گشتاور اعمالی با داشتن ضرایب ۱/۳۷ تا ۱/۸۲ اثر مثبت و قوی بر افزایش DSE دارد. افزایش گشتاور اعمالی به دلیل مقاومت سنگ یا شرایط حفاری، مقدار DSE را افزایش می‌دهد. تاثیر گشتاور اعمالی در همه مدل‌ها به‌ویژه مدل‌های M3 و M5 قوی است. خلاصه معنی‌داری پارامترهای عملیاتی حفاری و سختی سرمته بر DSE در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲ : معنی‌داری پارامترهای عملیاتی حفاری و سختی سرمته بر DSE

متغیر	M1	M2	M3	M4	M5	M6
H	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PR	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SR	✗	✗	-	✗	✗	✗
WOB	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Torque	✓	✓	✓	✓	✓	✓

پارامتر های نرخ نفوذ و گشتاور اعمالی غالب‌ترین عوامل هستند. با افزایش نرخ نفوذ از ۱۲ تا ۳۶ میلی‌متر در دقیقه، DSE به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. گشاور اعمالی نشان‌دهنده مقاومت حفاری است و افزایش آن، مقدار DSE را افزایش می‌دهد. بهبود کارایی سرمته‌های دارای سختی بالاتر (مانند TiSiCN)، DSE را کاهش داده و موجب افزایش راندمان حفاری می‌شود. بار پشت سرمته اثر مثبت اما ضعیف‌تری نسبت به دو پارامتر قبلی دارد و نشان‌دهنده مصرف انرژی بیشتر به ازای افزایش بار پشت سرمته است. سرعت چرخش سرمته تأثیر ناچیزی بر راندمان حفاری از حد نشان داد. نتایج نشان می‌دهد سرمته دارای پوشش TiSiCN کارآمدترین سرمته با کمترین مقدار DSE در همه سنگ‌ها است. بعد از آن سرمته با پوشش DLC عملکرد متوسطی دارو و برای سنگ‌های نرم‌تر (مانند تراورتن‌ها) مناسب است. سرمته WC دارای کمترین کارایی و بالاترین میزان DSE هستند که این موضوع به‌ویژه در سنگ‌های سخت (مانند گرانیت‌ها) بیشتر نمود دارد.

نکته اینکه به‌منظور بالابردن کارایی عملیات حفاری و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی توصیه می‌شود حفاری‌ها به‌ویژه در سنگ‌های نرم‌تر (مانند تراورتن‌ها) با نرخ نفوذ بالاتر (۳۶ میلیمتر در دقیقه) انجام شود تا DSE کمتری برای حفاری نیاز باشد. همچنین برای سنگ‌های سخت‌تر (مانند گرانیت‌ها) استفاده از سرمته دارای پوشش سخت تر مانند TiSiCN توصیه می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

انرژی ویژه حفاری (DSE) به عنوان معیار کلیدی برای ارزیابی کارایی حفاری سنگ، به پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های سرمته بستگی دارد. این مطالعه به منظور ارائه درک عمیق‌تری از عوامل مؤثر بر DSE، تأثیر ترکیبی پارامترهای عملیاتی (نرخ نفوذ، سرعت چرخش سرمته، بار پشت سرمته، گشتاور سرمته) و سختی پوشش سرمته، بر DSE را مورد بررسی قرار داده است. آزمون‌های حفاری در مقیاس آزمایشگاهی بر روی ۹ نوع سنگ (سه گرانیت: G1، G2، G3؛ سه تراورتن: T1، T2، T3؛ سه مرمریت: M1، M2، M3) با استفاده از سه پوشش سرمته (WC، DLC، TiSiCN) با سختی‌های ۱۵۷۰، ۳۱۰۰، و ۳۸۶۰ ویکرز انجام گرفت. با توسعه مدل‌های آماری، از شش مدل رگرسیون شامل مدل‌های خطی (M1، M2، M3) و غیرخطی (M4، M5، M6) برای برای بهینه‌سازی عملیات حفاری استفاده شد تا به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی در صنایع مرتبط منجر شود.

یافته‌های تحلیل‌های آماری در این مطالعه موردی نشان داد، افزایش PR از ۱۲ تا ۳۶ میلیمتر بر دقیقه، در سنگ‌های مورد مطالعه (گرانیت، تراورتن و مرمریت) موجب کاهش DSE (تا ۷۰ درصد در تراورتن‌ها و مرمریت‌ها) شده است که نشان‌دهنده بهبود کارایی حفاری به‌ویژه در سنگ‌های نرم‌تر مانند تراورتن‌ها است. این کاهش در گرانیت‌ها نسبت به تراورتن‌ها شیب بیشتری را نشان می‌دهد. افزایش SR از ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه تاثیر نسبتا کمی بر افزایش DSE دارد، با این وجود، افزایش SR در حفاری سنگ‌های ضعیف نسبت به سنگ‌های با مقاومت بالاتر، افزایش DSE بیشتری را موجب می‌شود. افزایش گشتاور (Torque) و

WOB نیز موجب کاهش DSE شدند با تاکید بر این‌که WOB تاثیر قویتری بر کاهش DSE نسبت به گشتاور اعمالی نشان داد (شکل ۸). سختی سرمته اثر معنی‌داری در کاهش DSE نشان داد به‌گونه‌ای که سرمته TiSiCN با سختی ۳۸۶۰ ویکرز، کمترین DSE را در همه سنگ‌ها نشان داد، که برتری آن را نسبت به سرمته‌های DLC و WC تأیید می‌کند.

مدل‌های رگرسیون چندمتغیره خطی و غیرخطی نشان داد PR و Torque غالب‌ترین عوامل تأثیرگذار بر DSE هستند. در همه مدل‌های رگرسیون WOB اثر مثبت و معنی‌داری بر DSE نشان داد، اما تأثیر آن کمتر از PR و Torque بود. پارامتر SR در هیچ‌یک از مدل‌ها تأثیر معنی‌داری نشان نداد که ممکن است به دلیل گستره تغییرات کم آن (۹۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه) بوده است. از میان مدل‌های پیش‌بینی‌کننده DSE، مدل رگرسیون پلی‌نومیال درجه دوم (M5) با $R^2 = ۰/۹۴۵$ بالاترین دقت را داشت، اما به دلیل تعداد زیاد ترم‌های آن (۲۰)، خطر بیش‌برازش وجود دارد. مدل خطی M3 با $R^2 = ۰/۹۲۷$ و فقط با ۴ متغیر معنی‌دار (H، PR، WOB، Torque) به دلیل تعادل بین دقت و سادگی برای کاربردهای عملی توصیه می‌شود. مقایسه DSE واقعی و پیش‌بینی‌شده MAE (مدل M3=۰/۱۲) هم‌خوانی خوب را نشان داد (برای مثال: DSE واقعی در سنگ G1 برابر ۱۵/۲ MJ/m³ و DSE پیش‌بینی شده برابر ۱۴/۹ MJ/m³ است).

این مطالعه موردی تأثیر هم‌افزای پارامترهای عملیاتی و سختی سرمته را بررسی کرده و مدل‌هایی برای پیش‌بینی DSE ارائه کرده است. این مطالعه سعی دارد درک عمیق‌تری از تعاملات غیرخطی (مانند PR×Torque) فراهم کند و بر اهمیت سختی سرمته در کاهش انرژی تأکید دارد. با کاهش DSE از طریق تنظیم دقیق پارامترهای عملیاتی و انتخاب سرمته‌های مناسب، صنایع حفاری مرتبط می‌توانند به بهره‌وری بالاتر، کاهش هزینه‌ها، و پایداری زیست‌محیطی دست یابند، که تأثیر ماندگاری بر پیشرفت فناوری حفاری خواهد داشت.

با وجود این پیشرفت‌ها، محدودیت‌های مطالعه شامل گستره کم SR است که ممکن است اثر آن را غیرقابل تشخیص کرده باشد. خطر بیش‌برازش در مدل M5 و پراکندگی داده‌ها در برخی سنگ‌ها (مثلاً G1) نیز از دیگر محدودیت‌ها هستند. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بررسی شوند، SR در گستره‌های بازتر (۵۰۰ تا ۱۵۰۰ دور در دقیقه) آزمون شود و مدل‌های یادگیری ماشین برای تحلیل تعاملات پیچیده‌تر استفاده شوند. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها به‌صورت صریح در مدل‌های ریاضی وارد شوند تا جامعیت مدل‌ها افزایش یابد و قابلیت تعمیم آنها به شرایط مختلف سنگی تقویت شود.

مراجع

[1] Teale, R., (1965). The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics* Abstracts, 2(1), 57–73.

[2] Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C., (2015). Effect of replacing disc cutters with chisel tools on performance of a TBM in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 245-252.

[3] Xuyue Chen, Deli Gao, Boyun Guo, Yongcun Feng, (2016), Real-time optimization of drilling parameters based on mechanical specific energy for rotating drilling with positive displacement motor in the hard formation, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Volume 35, Part A, Pages 686-694.

[4] Yaneng Zhou, Wu Zhang, Isaac Gamwo, Jeen-Shang Lin., (2017). Mechanical specific energy versus depth of cut in rock cutting and drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 87, 1–12.

[5] Liu, Z., Wang, H., & Zhang, G. (2018). Drilling performance optimization based on mechanical specific energy technologies. *In Drilling Technology*. IntechOpen.

[6] Yuliang Zhang, Gao-Feng Zhao, (2019). A global review of deep geothermal energy exploration: From analogy to the US resource to development of an enhanced geothermal system. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 5(4), 361–388.

[7] L.D. Wyering, M.C. Villeneuve, B.M. Kennedy, D.M. Gravley, P.A. Siratovich, (2019). Using drilling and geological parameters to estimate rock strength in hydrothermally altered rock. *Geothermics*, 79, 1–12.

[8] Hongsheng Li, Songyong Liu, Huanhuan Chang., (2019). Experimental research on the influence of working parameters on drilling efficiency. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, 174–183.

[9] Lamik-Thonhauser, Bouchra , Schoen, Juergen H., Koller, Christian S., and Arghad M. Arnaout., (2019), "Correlation Between Drilling Parameters and Geomechanical Properties - The Hidden Geomechanical Information." Paper presented at the Abu *Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, UAE.

[10] Lu Yang, Yinan Guo, Cancan Liu., (2020). A Comprehensive Prediction Model of Rock Strength and Its Application on Classifying the Rock During the Drilling. *Advances in Applied Sciences*, 5(3), 82-87.

of energy consumption of rig-operator system based on digital drilling technology, *Measurement*, Volume 239.

[25] Wendal Victor Yue, Zhongwen Yue, Wei Wu, Sichen Long, Yafei Qiao, Manchao He, Hehua Zhu., (2024). Accurate determination of drilling parameters in time series for rock strengths. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(4), 123–134.

[26] Koulidis, A., Ooi, G. & Ahmed, S., (2024). Application of artificial intelligence to predict rock strength and drilling efficiency using in-cutter sensing data and vibration modes. J *Petrol Explor Prod Technol* 14, 2257–2272.

[27] Weiqiang Song, Huidong Mu, Wenjuan Ji, Zhiqiang Zhao, Xu Han, Lulin Kong, Zhiwei Sun, (2024). Evaluation and optimization of drilling efficiency while drilling with an improved rock-breaking specific energy model. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 10(1), 1–15.

[28] Qi Wang, Fenglin Ma, Hongke Gao, Bei Jiang, Zhenguo Bia, (2025). Drilling-based measuring method of rock strength through the IDE intelligent system. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(3), 123–134.

[29] Keqi Fan, (2025). Advancements in digital drilling technology for deep engineering: A review. *Frontiers in Earth Science*.

[30] Komadja, G.C., Westman, E., Rana, A., (2025). Predicting rock mass strength from drilling data using synergistic unsupervised and supervised machine learning approaches. *Earth Sci Inform* 18, 325.

[31] Xie, Y., Li, X. & Min, Z., (2025). Comparison of machine learning models for rock UCS prediction using measurement while drilling data. *Sci Rep* 15.

[32] Malisz K, Świeczko-Żurek B, Sionkowska A., (2023). Preparation and characterization of diamond-like carbon coatings for biomedical applications—*a review*. *Materials.*

[33] Cao S., Liang, J., Zhou, J., Wang, L.,, (2020). Microstructure evolution and wear resistance of in-situ nanoparticles reinforcing Fe-based amorphous composite coatings. *Surf Interfaces*.

[34] Gill, S.S, Singh, J., Singh, H., Singh, R., (2011), Investigation on wear behaviour of cryogenically treated TiAlN coated tungsten carbide inserts in turning. *Int J Mach Tools Manuf* 25–33.

[35] Al-Tameemi H, Long H, Dwyer-Joyce R, (2019). Damage characterisation of white etching cracks in a black oxide coated wind turbine gearbox bearing. *Wear*.

Ma, Y., Yang, J., Tian, X., Gong, C., Zheng, W., He, Y., Li, H., Gao, Z., Zhang, K., Wei, L., Chu, P.K., (2020). Enhanced discharge and surface properties of TiSiCN coatings deposited by pulse-enhanced vacuum arc evaporation. *Surf Coat Technol*.

[11] Teodoriu, C., & Bello, O., (2021). An Outlook of Drilling Technologies and Innovations: Present Status and Future Trends. *Energies*, 14(15), 4499.

[12] Zwierzyński, A. J., Teper, W., Wiśniowski, R., Gonet, A., Buratowski, T., Uhl, T., & Seweryn, K., (2021). Feasibility Study of Low Mass and Low Energy Consumption Drilling Devices for Future Space (Mining Surveying) Missions. *Energies*, 14(16).

[13] Gao, H., Wang, Q., Jiang, B. , Zhang, P., Jiang, Z., Wang, Y., (2021). Relationship between rock uniaxial compressive strength and digital core drilling parameters and its forecast method. *Int J Coal Sci Technol* 8, 605–613.

[14] B. Yu, K. Zhang and G. Niu, (2021). "Rock Strength Determination Based on Rock Drillability Index and Drilling Specific Energy: Numerical Simulation Using Discrete Element Method," *IEEE Access*, vol. 9.

[15] K. Hashiba, K. Fukui, (2022). Rock drilling test with a rotary hammer: Estimating UCS for very hard rocks. *Geotechnical Testing Journal*, 45(6).

[16] Hua Tang, Dong-Cai Liang, Zhen-Jun Wu, Xu Cheng (2022). Energy analysis of intact granite based on test while drilling. *Frontiers in Earth Science*, 10.

[17] V.N. Oparin, V.N. Karpov, V.V. Timonin, A.I. Konurin, (2022), Evaluation of the energy efficiency of rotary percussive drilling using dimensionless energy index, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 14, Issue 5, Pages 1486-1500.

[18] Mitra Khalilidermani, Dariusz Knez, (2022). A survey of application of mechanical specific energy in petroleum and space drilling. *Energies*, 15(9).

[19] Mehrbod Khoshouei, Raheb Bagherpour., (2023). Measurement, prediction, and modeling of the drilling specific energy by soft rock properties. *Measurement*, 210.

[20] Xiaolei Yue, Zhongwen Yue, Yifei Yan, Dan Gao, Yang Li., (2023). Sensitivity analysis and rock strength prediction study of rotary drilling based on drilling parameters. *Geoenergy Science and Engineering*, 230.

[21] Davor Antoljak, Dalibor Kuhinek, Tomislav Korman, Trpimir Kujundžić, (2023). Research on interdependence between specific rock cutting energy and specific drilling energy. *Applied Sciences*, 13(4), 2280.

[22] Mohammadi Behboud, et al., (2023). Estimation of geomechanical rock characteristics from specific energy data using combination of wavelet transform with ANFIS-PSO algorithm. *J Petrol Explor Prod Technol* 13, 1715–1740.

[23] Ghosh, S., Behera, C., & Mishra, M. K., (2024). Rock mass classification for estimating the drilling rate in a surface mine using rock mass drillability index. *Petroleum Science and Technology*, 42(5), 567–578.

[24] Kangping Gao, Qian Zhang, Shengjie Jiao, Long Wang, Chengqi Liu, (2024), Measurement and prediction

[1] Drilling Specific Energy (DSE)
[2] Penetration Rate (PR)
[3] Speed of Rotation (SR)
[4] Weight on Bit (WOB)
[5] Hardness (H)