



تاثیر اندازه سرمته و خصوصیات ژئومکانیکی بر انرژی ویژه ذاتی در فرآیند حفاری دورانی سنگ‌های بلورین مرمریتی

محمدرضا رضائیان فروشانی^۱؛ علیرضا باغبانان^{۲*}؛ کیوان ابن علی حیدری^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

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

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷؛ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱

(*) نویسنده مسئول: bagh110@iut.ac.ir

چکیده

بهینه‌سازی مصرف انرژی در حفاری دورانی و کاهش هزینه‌های مرتبط، از جمله چالش‌های اصلی در مهندسی حفاری و مکانیک سنگ به شمار می‌رود. در این مطالعه، محققان با استفاده از یک مدل تحلیلی مبتنی بر تعادل حدی نیروها و با به کارگیری دستگاه حفاری مجهز به سامانه اندازه‌گیری و ثبت پارامترها، به بررسی انرژی ویژه ذاتی سنگ در فرآیند حفاری پرداخته‌اند. بر اساس مبانی نظری، دو کمیت انرژی ویژه حفاری (E) و مقاومت حفاری (K) به یکدیگر وابسته هستند و رابطه‌ای خطی بین آن‌ها وجود دارد. پس از ترسیم منحنی‌های وابسته به این پارامترها برای یک مته در دو حالت تیز و کند، نقطه‌ای شناسایی گردید که نشان‌دهنده آغاز برش در فرآیند حفاری است. این تحقیق همچنین اثرات قطر مته را روی انرژی ویژه ذاتی حفاری، با استفاده از سه نمونه سنگ مرمریت با دانه‌بندی‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج نشان می‌دهد که انرژی ویژه ذاتی تنها تابعی از خصوصیات داخلی سنگ نیست، بلکه به پارامترهای مرتبط با حفاری نیز وابسته است. به‌ویژه، با افزایش قطر مته، انرژی ویژه حفاری برای مرمریت مارون ۲۰ درصد، مرمریت باغات ۱۳/۶ درصد و مرمریت نیریز ۱۲/۵ درصد کاهش یافته است. این یافته‌ها ضرورت بازنگری در فرضیات مربوط به استقلال انرژی ویژه ذاتی از متغیرهای حفاری را نمایان می‌سازد و می‌تواند به توسعه روش‌های بهینه‌تر در فرآیند حفاری و صرفه‌جویی در مصرف انرژی کمک کند.

حفاری دورانی، انرژی ویژه ذاتی، قطر برش دهنده، اندازه دانه، سنگ مرمریت

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

است که به عنوان معیاری برای سنجش انرژی مصرفی در فرآیند برش واحد حجم سنگ تعریف می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که این پارامتر ارتباط تنگاتنگی با مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) سنگ دارد (Richard et al., 2012). با این حال، مقاومت فشاری به تنهایی قادر به توصیف کامل رفتار سنگ تحت بارگذاری نیست، چرا که سنگ‌ها با مقاومت مشابه ممکن است رفتارهای مکانیکی متفاوتی از خود نشان دهند. از طرفی نیز به سبب توسعه روز افزون ماشین‌های حفاری مکانیزه و نیاز به اکتشافات عمیق، بررسی پدیده اندرکنش ابزار حفاری در سنگ اهمیت زیادی یافته است. در یکی از پژوهش‌های بنیادین در زمینه حفاری، تیله در سال

حفاری سنگ یکی از مراحل مهم عملیات شناسایی خصوصیات زمین و انجام عملیات پیشروی و ژئوتکنولوژیکی در مهندسی معدن، نفت و گاز و پروژه‌های عمرانی است. از اینرو بهینه‌سازی فرآیند عملیات حفاری به‌طور مستقیم بر اقتصاد و بهره‌وری پروژه‌ها تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که اغلب سنگ‌ها حین حفاری رفتار شکننده از خود نشان می‌دهند، فرآیند حفاری را می‌توان به عنوان یک فرآیند خردایش در نظر گرفت. یکی دیگر از پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد حفاری، انرژی ویژه ذاتی (Intrinsic Specific Energy)

داشت، در حالی که سنگ‌های نرم‌تر مانند تراورتن کمترین مقدار انرژی ویژه را نشان دادند (Chakeri et al., 2025). در سال ۲۰۲۵ ابن علی و همکاران یک رویکرد نوآورانه را با استفاده از داده‌های عملیاتی حفاری برای برآورد پیوسته پارامترهای مقاومت سنگ بر اساس هر دو معیار گسیختگی موهر-کلمب و هوک-براون ارائه کردند. مدل ارائه شده در مقایسه با آزمایش‌های متداول آزمایشگاهی بر روی ده نوع مختلف سنگ، شامل سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین، اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان می‌دهند که این مدل‌ها می‌توانند ویژگی‌های مقاومتی را برای هر دو معیار گسیختگی به‌طور مؤثر برآورد کنند. یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، معرفی یک نسبت بدون بُعد بین قطر مته و اندازه دانه سنگ (D/d) است که مشخص شد عامل مهمی در تعیین دقت برآورد پارامترهای موهر-کلمب به شمار می‌رود؛ به‌طوری‌که با افزایش این نسبت، خطای برآورد به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۲۶ به بررسی ظرفیت حفاری پیوسته به‌عنوان یک روش نیمه‌مخرب برای ارزیابی خواص مکانیکی سنگ‌هایی که در معرض هوازگی و یا محلول‌های اسیدی دگرسان شده‌اند، پرداختند. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های سنگ آهک آسماری که در معرض محلول‌های اسیدی قرار داده شده و با استفاده از یک دستگاه حفاری قابل حمل سفارشی انجام شد. نتایج نشان داد که در نمونه‌های در معرض اسید قرار گرفته مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) تا ۴۵ درصد زایوه اصطکاک داخلی ۸ درجه و چسبندگی تا ۳۵ درصد دچار افت شد. همچنین، تخلخل با افزایش میزان تماس با اسید افزایش یافت، به‌طوری‌که از ۲۴.۳ درصد در بیرونی‌ترین لایه تا ۹.۳ درصد در لایه‌های عمیق‌تر متغیر بود. این یافته‌ها با پژوهش‌های پیشین درباره تخریب ناشی از اسید در سنگ‌های کربناته هم‌خوانی داده شد. (Heydari et al., 2026; Heydari et al., 2025) استفاده از انرژی ویژه حفاری به عنوان یک ابزار تشخیصی قدرتمند، امکان شناسایی برخط (Real-time) سازندها و ویژگی‌های لیتولوژیکی درگیر با مته را از طریق ثبت و پایش دقیق پارامترهای عملیاتی فراهم می‌آورد. تحلیل‌های آماری و رگرسیونی تأیید می‌کنند که همبستگی معناداری میان این شاخص و خواص بنیادین سنگ نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)،

۱۹۶۴ میلادی، مفهوم انرژی ویژه حفاری را بیان کرد. بر اساس تعریف ارائه شده از سوی تیلر برای این مفهوم، انرژی ویژه برابر انرژی لازم برای حفاری یا کندن حجم واحدی از سنگ است (Teale, 1965). انرژی ویژه حفاری می‌تواند به عنوان یک پارامتر بنیادین در سنجش فرآیند حفاری در سیستم‌های حفاری چرخشی و ضربه‌ای-چرخشی باشد. در سال ۲۰۰۳ زو و همکاران به بررسی انرژی ویژه حفاری حین حفاری سنگ با سیستم لیزری پرداختند. آنها نیز دریافتند که هر نوع سنگ مجموعه‌ای از پارامترها را برای تعیین میزان انرژی ویژه حفاری داراست و این ویژگی پارامتر وابسته به نوع سنگ و خواص آن می‌باشد (Xu et al., 2003). همچنین انرژی ویژه حفاری به عنوان یک معیار مهم برای شناسایی شرایط ناکارآمد در عملیات حفاری مطرح شده است. این شرایط ناکارآمد شامل گیر کردن مته یا میله حفاری به دیواره چاه می‌شود که انرژی ویژه حفاری می‌تواند به خوبی این موارد را نشان دهد. مطالعات نشان داده است که با به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی انرژی ویژه حفاری، می‌توان به طور قابل توجهی هزینه‌های حفاری را کاهش داد. این بهینه‌سازی از طریق پیش‌بینی نرخ نفوذ به صورت برخط صورت می‌گیرد که در نهایت راهکارهایی برای بهبود کارایی و کاهش مخارج ارائه می‌شود (Amadi & Iyalla, 2012; Armenta, 2017; Faghih et al., 2008). یکی دیگر از جنبه‌های حائز اهمیت در موضوع حفاری میزان مصرف ابزار و سایندهای ابزار برش در سازندهای مختلف است. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه صورت گرفته است. ملکی و همکاران ۲۰۲۵ بررسی تأثیر خواص مکانیکی سنگ بر سایش ابزار برش با استفاده از یک دستگاه برش خطی کوچک مقیاس پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار سایش دیسک‌های برش در تمامی انواع سنگ با افزایش عمق نفوذ بیشتر می‌شود و بیشترین میزان سایش در سنگ بازالت مشاهده شد. همچنین، مقاومت کششی برزلی بیشترین همبستگی را با پارامترهای سایش دیسک برش نشان داد (Maleki et al., 2025). همچنین در پژوهشی دیگر چاکری و همکاران ۲۰۲۵ به کمک یک دستگاه برش خطی کوچک مقیاس به بررسی و ارزیابی عملکرد برش و سایش ابزارهای برش در ماشین‌های حفاری تمام‌مقطع تونل (TBM) در ۹ نمونه سنگی پرداختند. نتایج نشان داد که سنگ بازالت، به دلیل تخلخل زیاد، به بیشترین انرژی ویژه نیاز

$$e_t = \frac{F}{A} \quad (5)$$

$$e_r = \frac{2\pi}{A} \times \frac{NT}{u} \quad (6)$$

انرژی ویژه حفاری از لحاظ ابعادی با فشار برابر است و قسمت e_t بسیار کوچکتر و قابل نظر کردن نسبت به قسمت e_r در انرژی ویژه است. همبستگی قابل ملاحظه‌ای بین انرژی ویژه حفاری و مقاومت خرد شدگی وجود دارد. نکته‌ی مهمی که باید به آن شاره شود، این است که مقاومت خرد شدگی به مفهوم بزرگای مقاومت فشاری سنگ نیست. بلکه بستگی به نحوه انجام آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری آن، شکل نمونه، سطوح بارگذاری و تعداد نمونه‌های مورد آزمایش دارد. حداقل مقدار انرژی ویژه می‌تواند نماد و برآوردی از مقاومت فشاری تک محوری سنگ باشد (Teale, 1965). مونز و همکاران دریافته‌اند که افزایش قطر مته ممکن است منجر به کاهش انرژی ویژه در برخی شرایط شود، زیرا سطح مقطع بزرگتر می‌تواند توزیع نیرو را بهبود بخشد. در این بین اثر نسبت ابزار برش (قطر سرمته) بر روی انرژی ویژه ذاتی حفاری تاکنون بررسی و یا گزارش نشده و هدف این پژوهش است. در این تحقیق، تاثیر استفاده از سه اندازه مته بر روی انرژی ویژه ذاتی حفاری برای سه نمونه سنگ بلورین از نوع مرمریت با دانه‌بندی‌های متفاوت بررسی و نتایج مقایسه شده است. در ادامه مهمترین تحقیقات انجام شده در این زمینه در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مهمترین مطالعات در مورد این موضوع

عنوان مطالعه	سال	نویسندگان
<i>The concept of specific energy in rock drilling</i>	۱۹۶۴	Teale, R
<i>A phenomenological model for the drilling action of drag bits</i>	۱۹۹۲	Detournay, E., & Defourny, P
<i>Influence of the cutter geometry in rock cutting: an experiment approach</i>	۲۰۰۱	Dagrain, F
<i>Estimating rock strength parameters using drilling data</i>	۲۰۱۸	Kalantari, S

۱۹۹۲، داگرین ۲۰۰۱ و ریچارد ۲۰۱۲ انرژی ویژه حفاری ε و مقاومت حفاری ζ مستقل از هم نبوده و یک رابطه خطی بین آنها برقرار است (Dagrain, 2001; Detournay &

مقاومت کششی برزیلی (BTS)، تخلخل، سختی و میزان سایش‌پذیری وجود دارد، که این امر امکان تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ را با دقت بالایی میسر می‌سازد. علاوه بر این، با به کارگیری الگوریتم‌های هوشمند و تحلیل پایگاه‌های داده تجربی، پیش‌بینی انرژی ویژه حفاری برای ارزیابی راندمان خردایش در حفاری‌های مکانیزه نظیر تونل‌سازی به سطح جدیدی ارتقا یافته است (Faghih et al., 2017; Oloruntobi & Butt, 2020; Zhou et al., 2025). مقدار انرژی ویژه حفاری در شرایط اتمسفر با مقاومت فشاری تک محوری سنگ می‌تواند برابر باشد. در فرآیند حفاری چرخشی یا دورانی، حفاری طی دو مرحله همزمان نفوذ و برش صورت می‌گیرد. که عمل نفوذ ابزار به داخل سنگ توسط نیروی پیشران و عمل برش سنگ توسط نیروی گشتاور صورت می‌پذیرد. اگر مقدار سرعت چرخش مته برابر N (دور بر دقیقه) و سطح چال برابر A (متر مربع) و نرخ نفوذ u (متر بر دقیقه) باشد، کل کار انجام شده برابر است با:

$$W = Fu + 2\pi N \times T \quad (1)$$

و حجم حفاری شده برابر است با:

$$V = Au \quad (2)$$

بنابراین انرژی ویژه حفاری برابر است با:

$$e = \frac{W}{V} \quad (3)$$

$$e = \frac{F}{A} + \frac{2\pi}{A} \times \frac{NT}{u} \quad (4)$$

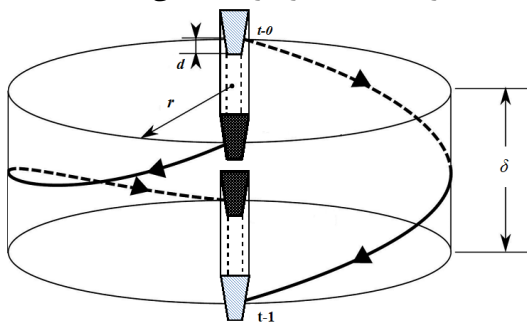
مطابق آنچه از **Error! Reference source not found.** ۴ مشخص است، انرژی ویژه حفاری شامل دو بخش انرژی ویژه بار پشت مته و انرژی ویژه چرخشی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تئوری مسئله

بر اساس تحقیقات انجام شده توسط دیتورنی و دیفورنی

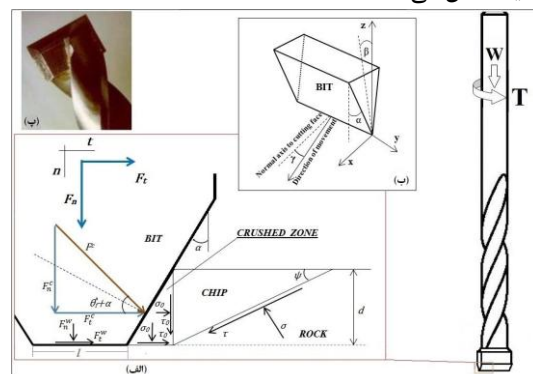
عمودی و افقی نیروی عمل کننده در صفحه برش مته و مؤلفه‌های عمودی و افقی نیروی اصطکاکی در سطح انتهایی مته میباشند. پارامترهای σ_0 , τ_0 , k , A , d , r و ترتیب شعاع مته، عمق برش، سطح مقطع مؤثر عمودی برش، تعداد ابزارهای برش، تنش برشی و تنش فشاری در زون خرد شده متراکم می‌باشد. برای یک مته اسکنه‌ای T شکل تعداد ابزارهای برشی برابر ۲ بوده که همان مقدار $k=2$ می‌باشد. برای مدل کردن شرایط حفاری پیوسته، لازم است پیوستگی فرآیند توجیه شود. برای یک چنین شرایطی در فرآیند حفاری با در نظر گرفتن تعادل حدی نیروها، فرضیه مسیر حرکت حلزونی شکل^۱ صادق می‌باشد. زیرا، وقتی مته یک دور کامل در صفحه افقی (عمود بر محور چرخش) حین فرآیند حفاری می‌چرخد. یک پیشروی ناپیوسته در راستای محور چرخش لازم است تا امکان نفوذ برای مته در افق دیگر فراهم شود. در غیر این صورت برای یک دور چرخش کامل مته، حفاری فقط توسط یک برش دهنده (یک لبه مته) انجام شده و برش دهنده دیگر فقط سایه دیگری را تعقیب می‌کند.



شکل ۲- طرح حرکت حلزونی شکل مته (Kalantari et al., 2019).

اگر مقدار نفوذ برای همه برش دهنده‌ها یکسان فرض شود و برابر باشد. در شرایط حفاری واقعی برای یک مقدار حرکت عمودی معین مته (δ) سه وضعیت وجود دارد. حالت اول زمانی که δ است هر برش دهنده کاهش عمق نفوذ خود را در مکانی که توسط برش دهنده دیگر اشغال شده بود، تجربه کند. این شرایط تنها زمانی اتفاق می‌افتد که بار عمودی پشت مته کمتر بوده و مته صرفاً بر روی سطح سنگ ساییده می‌شود و کارائی حفاری کاهش می‌یابد. برعکس زمانی که δ می‌باشد حجم معینی از سنگ توسط برش دهنده قبلی برداشت نشده است. بنابراین هر برش دهنده‌ای با مانع

بدلیل (Defourny, 1992; Richard et al., 2012). پیچیدگی‌های موجود در موضوع بررسی تحلیلی فرآیند حفاری و مکانیزم‌های رفتاری حاکم بر سنگ‌ها اعمال برخی شرایط و فرضیات ساده کننده جهت حل مسأله ضروری می‌باشد. هرچند که این فرضیات نباید اساس و ماهیت موضوع را تحت الشعاع قرار داده و یا شرایط دور از واقعیت ایجاد کنند. در مدل تحلیلی مورد استفاده شده مکانیزم شکست حاکم بر سنگ حفاری شده براساس معیار شکست مور-کولمب می‌باشد همچنین حفاری در شرایط فشار اتمسفر و در عمق محدود انجام می‌گیرد. از این رو از تنش‌های جانبی وارد به نمونه صرف نظر شده است. از دیگر فرضیات مطرح شده آن است که، در داخل زون خرد شده متراکم بین مته و سنگ در جلوی مته شرایط هیدرواستاتیک حاکم می‌باشد. و همچنین فرآیند حفاری در وضعیتی پایدار می‌باشد. در این پژوهش فرآیند حفاری چرخشی بصورت دومرحله که شامل نفوذ و برش است مورد بررسی قرار گرفته است. مته مورد استفاده در این پژوهش یک مته اسکنه ای T شکل تحت زاویه شیب $(+\alpha)$ با سطح مقطع انتهایی مستطیلی $(l \times D)$ که D قطر مته و l طول ساییدگی مته یا همان ضخامت سطح انتهایی مته می‌باشد. مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. بین مته تحت بار عمودی W نیوتن و گشتاور T نیوتن متر قرار دارد و با سرعت چرخش N دور در دقیقه و با سرعت حفاری v متر بر دقیقه عمل می‌کند.



شکل ۱- الف) طرح مدل تحلیلی و نیروهای عمل کننده

ب) هندسه مته (پ) نمایی از مته اسکنه‌ای

T شکل (Kalantari et al., 2019).

در این روابط F_n^w و F_t^w به ترتیب مؤلفه‌های

^۱ helicoidal trajectory

(عمودی) مته است ولی زاویه اصطکاک صفحه انتهایی مته ناشی از حرکت برشی (افقی) مته است. به بیان دیگر زاویه اصطکاک صفحه برش مته بیشتر مقاومت حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و زاویه اصطکاک انتهایی مته بیشتر بر روی انرژی ویژه حفاری اثر گذار است. عدم حضور زاویه اصطکاک انتهایی مته، در صورت استفاده از مته تیز، باعث می‌شود که انرژی ماشین حفاری بیشتر صرف برش سنگ شود و نقش اصطکاک کاهش یابد. در مته کند نیروی اصطکاک در مقابل نیروی برشی مته و نیروی عمودی مقاومت می‌کند. ولی در صورت استفاده از مته تیز، اصطکاک فقط در مقابل نیروی عمودی مته مقاومت می‌کند. وقتی حفاری با یک مته کند انجام شود در شرایطی که بار پشت مته کم است مته در سنگ نفوذ نمی‌کند و انرژی حفاری بیشتر بصورت اصطکاک بین سطح انتهایی مته و سنگ هدر می‌رود و نمودار تئوریک خطی انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری مشابه نمودار خط لغزش در شکل (۱) است. بر این اساس با افزایش بار پشت مته، نوک برش دهنده در سنگ نفوذ کرده و فرآیند برش در آن رخ می‌دهد. در این شرایط بخشی از انرژی حفاری صرف برش سنگ شده و بخشی از آن بصورت انرژی اصطکاکی تلف می‌شود و نمودار انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری مشابه نمودار خط اصطکاک در شکل (۱) می‌شود. که بخش بزرگ تلفات اصطکاکی در این حالت مربوط به اصطکاک انتهای مته و سنگ است. در حفاری با مته تیز، اصطکاک انتهایی مته ناچیز بوده و بخش عمده انرژی حفاری صرف برش سنگ می‌شود. در حفاری با مته تیز نیروی اصطکاک در خلاف جهت نیروی عمودی مته عمل می‌کند که ناشی از اصطکاک صفحه برش مته و زون خرد شده است. با توجه به نظر تیل، انرژی یا کار صرف شده توسط نیروی عمودی مته در مقایسه با انرژی یا کار صرف شده توسط نیروی برشی مته که ناشی از گشتاور چرخشی است، بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن است. بنابراین شیب نمودار انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری در مته تیز بایستی بیشتر از نمودار انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری در مته کند باشد. از لحاظ تئوریکی نمودارهای مته کند و تیز در نقطه ای تقاطع دارند که این نقطه توسط دتورنی و دفورنی، به اسم نقطه برش نامگذاری شده است. این نقطه محل شروع فرآیند برش در حفاری است. به بیان دیگر، در یک مقدار مقاومت حفاری

بیشتری از نفوذ خود مواجه است و این باعث افزایش نفوذ آن می‌شود. این شرایط تنها با افزایش نیروی عمودی پشت مته اتفاق می‌افتد که سرعت حفاری افزایش می‌یابد ولی لرزش‌های غیر معمول مته ناشی از رفتار چسبیدن-لغزش آن افزایش یافته و باعث تسریع در سایش مته و نوسان نیروی برشی می‌شود. در هردوی این موارد، برای حفاری ناپایدار محسوب می‌شود. بنابراین زمانی حفاری در وضعیت پایدار قرار دارد که $\delta = d$ است. عبارتی هر برش دهنده بطور مداوم با مانعی هم ارتفاع با نفوذ خود مواجه می‌شود. از اینرو لازم است پارامترهای عملیاتی حفاری همچون گشتاور و نیروی بار پشت مته در شرایطی که حفاری در یک وضعیت پایدار بوده و نوسانات این دو پارامتر در حداقل ممکن قرار دارد، ملاک عمل قرار گیرند. از این رو در هر مرحله از برش و پیشروی مته بایستی یک معادله تعادل حدی حل شود و نیروهای اعمالی از مقاومت سنگ تجاوز کند تا حفاری بطور پیوسته ادامه یابد. در ادامه نشان داده شد که، رابطه میان انرژی ویژه حفاری ε و مقاومت حفاری ζ همواره خطی بوده که در مته‌هایی با مقطع کند تنها یک مقدار عرض از مبدا به آن اضافه می‌شود.

$$\varepsilon = a\zeta + b \quad (7)$$

در حفاری با مته کند و تیز، اصطکاک نقش اساسی دارد، چنانچه زاویه اصطکاک در یک مته کند هم در صفحه برش مته و هم در صفحه انتهایی آن حضور دارد ولی در یک مته تیز اصطکاک تنها در صفحه برش مته ظاهر می‌شود. به کمک روابط بیان شده ضرایب a و b طبق روابط ۷ و ۸ برای حفاری در هر نمونه سنگی قابل محاسبه است. (Kalantari et al., 2019).

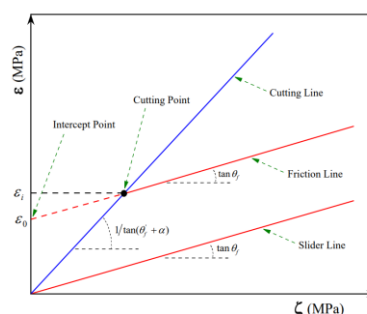
$$a = \tan \theta_f \quad (8)$$

$$b = \frac{2C [1 + \tan \phi' \tan \alpha]}{(1 + \tan \phi' \tan \phi)[1 + \tan(\phi' - \phi)]} \quad (9)$$

در روابط فوق (θ_f) زاویه اصطکاک بین مته و سنگ در انتهای سطح سایش مته، (C) چسبندگی ذاتی سنگ، (ϕ) زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر، (ϕ') زاویه اصطکاک بین سنگ بکر و زون خرد شده و (α) شیب مته است. زاویه اصطکاک در صفحه برش مته بیشتر ناشی از حرکت نفوذی

داده‌های حفاری است. سرحفار دستگاه با استفاده از دو موتور خودکنترل برای اعمال گشتاور و نیروی پیشران ماشین این قابلیت را دارد که در تمام طول عملیات حفاری مقدار نرخ نفوذ و سرعت چرخش دستگاه را بر اساس فرمان داده شده ثابت نگه دارد. قسمت کنترلر و ثبت داده‌ها نیز فرمان ورودی را از کاربر دریافت کرده و به سرحفار انتقال داده تا موتورهای خود کنترل دستگاه طبق فرمان ورودی مقادیر نیروی پیشران و گشتاور مورد نیاز برای تامین نرخ نفوذ و سرعت چرخش دستگاه در سنگ مورد حفاری را اعمال نمایند. مقدار نیروی پیشران و گشتاور اعمالی از سوی موتورهای خود کنترل دستگاه توسط قسمت ثبت داده‌ها بصورت برلحظه اندازه‌گیری و ثبت نموده و در یک فایل متنی ذخیره می‌نماید. بطور کلی دستگاه حفاری مذکور در دو حالت عمل می‌کند. حالت اول زمانی است که مقادیر نرخ نفوذ و سرعت چرخش بایستی ثابت (کنترل از لحاظ سینماتیک حفاری) نگه داشته شود و حالت دوم در زمانی است که بایستی دستگاه با گشتاور و نیروی پیشران حداکثر حفاری کند. پارامترهایی که دستگاه مذکور حین حفاری در سنگ اندازه‌گیری می‌نماید، شامل نیروی بار پشت مته، گشتاور، سرعت چرخش، نرخ نفوذ و عمق حفاری است. حداکثر نیروی بار پشت مته دستگاه ۱۳۰۰ نیوتن و حداکثر گشتاور دستگاه ۶ نیوتن متر است. سرعت چرخش مته بین صفر الی ۱۰۰۰ دور در دقیقه می‌تواند متغیر باشد و تغییرات نرخ نفوذ بین ۰/۱ تا ۵۰ میلیمتر در ثانیه متغیر است. پارامترهای نرخ نفوذ و عمق حفاری توسط حسگرهای فاصله سنج نصب شده داخل دستگاه با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. بر این اساس برای کالیبره کردن مقدار جابجایی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه از دو جابجایی سنج از نوع اندیکاتور دیجیتال با دقت ۱ میکرون به عنوان مرجع استفاده شد (شکل ۲) تا مقدار خطای جابجایی محاسبه شود. مطابق با نمودار شکل ۳ که از ترسیم مقادیر جابجایی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه در برابر مقادیر جابجایی اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای نصب شده بدست آمده است، خط برازش شده بر داده‌ها با شیب ۱ و عرض از مبدا ۰/۰۵۵ میلیمتر نشان‌دهنده دقت بالای مقادیر اندازه‌گیری شده جابجایی توسط دستگاه حفاری است. و عملاً نیازی به اعمال ضریب کالیبراسیون در داده‌های جابجایی نیست.

یکسان برای دو مته تیز و کند مقدار انرژی ویژه حفاری در مته کند و مته تیز برابر است و مد غالب گسیختگی از این نقطه به بعد برشی خواهد شد. مقدار انرژی ویژه حفاری در این نقطه به انرژی ویژه ذاتی سنگ نزدیک است و تقریباً معادل مقاومت فشاری تک محوری محسوب می‌شود. به همین دلیل می‌توان به این پارامتر به عنوان یک پارامتر ذاتی سنگ پرداخت. همچنین این پارامتر فارغ از مته حفار و نرخ حفاری است و با توجه به تعریف معادل انرژی مورد نیاز برای حفاری واحد سنگ است. در فرآیند حفاری با مته کند برش و اصطکاک همزمان هستند و وجود عرض از مبدا در نمودار خطی انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری نمادی از برش سنگ تحت نیروی عمودی صفر یا همان برش خالص است. در این حالت اثر زاویه اصطکاک سطح انتهایی مته ناچیز خواهد بود. اما عملیات حفاری در واقعیت، با نیروی پشت مته صفر غیرممکن است.



شکل ۳- نمودار تئوریک ϵ - ζ (Dagrain, 2001).

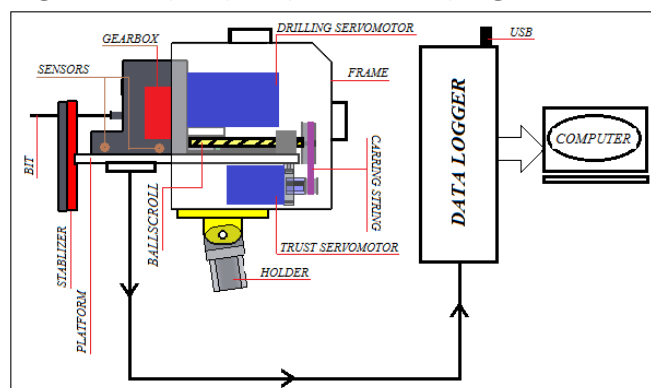
بمنظور بررسی تجربی روش ارائه شده، لازم است پارامترهای عملیاتی حفاری نظیر گشتاور، نیروی بار پشت مته، سرعت چرخش، نرخ نفوذ و عمق حفاری در شرایط کنترل شده، اعمال و اندازه‌گیری شوند. برای اندازه‌گیری کنترل و ثبت داده‌ها، استفاده از دستگاهی با این قابلیت‌ها ضروری است. بر این اساس دستگاه حفاری قابل حملی با قابلیت حفاری در سنگ‌های مختلف هم بصورت برجا و هم در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های سنگی و با قابلیت کنترل و ثبت داده‌های حفاری طراحی و ساخته شده است (Kalantari et al., 2018).

۲-۲- دستگاه حفاری

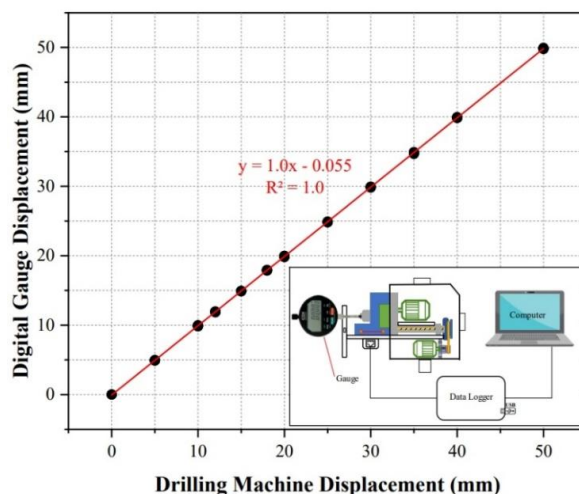
این دستگاه حفاری شامل دو بخش اصلی و مجزا است. یک بخش وظیفه انجام عملیات حفاری با پارامترهای اعمال شده به دستگاه را دارد و بخش دیگر نیز واحد کنترل و ثبت



شکل ۴- نصب حسگرهای جابجایی سنج با دقت ۱ میکرون بعنوان مرجع برای واسنجی جابجایی دستگاه.



شکل ۵- اجزای داخلی دستگاه حفاری و مکانیزم کار آن.



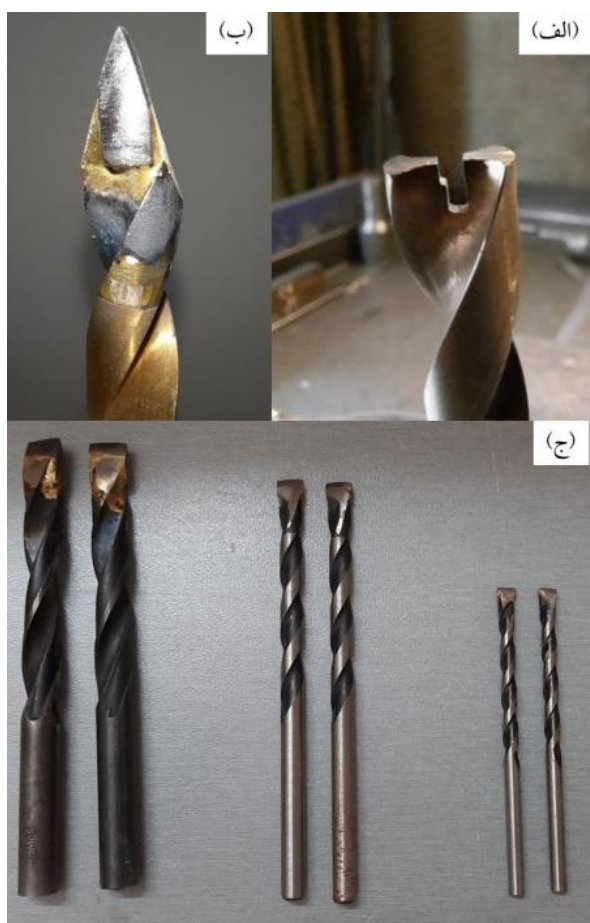
شکل ۶- نمودار مقادیر جابجایی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و حسگرهای مرجع.

مطابق شکل ۴ (الف)، نوک مته‌ها بریده شد و با ایجاد یک شیار در میان مته و قرار دادن تیغه‌ای از جنس الماس درون بدنه مته از جنس فولاد، ماشین کاری و سنگ زنی شد تا مته‌هایی با زاویه شیب ۲۰ درجه در دو نوع تیز و کند تهیه شود (شکل ۴(ب)). مته‌های تیز با ضخامت نوک کمتر ۱۰ میلیمتر

پارامترهای گشتاور و نیروی بار پشت مته نیز بدلیل وجود برخی واسطه‌ها مانند محورمارپیچی و جعبه دنده در انتقال آن‌ها به مته دارای افت بوده و انحراف آنها از مقداری واقعی تصحیح می‌گردد. در این پژوهش از مته‌های T شکل اسکنه ای دست ساز با زاویه شیب مته ۲۰ درجه استفاده شد.

سطح برش در جلو و پشت مته نیز به دلیل استفاده از سنگ زنی برای تیز کردن آن، مشابه سطح انتهایی مته است. هر دو سطح مته یعنی انتها و سطح جلویی آن با زون خرد شده در تماس بوده و یک لایه از خرده‌های حفاری بین مته و سنگ وجود دارد. برای کاهش میزان تماس بین بدنه مته و دیواره چال با هدف کاهش اصطکاک، زاویه گیر مته منفی ساخته شده است. بدنه مته‌ها از جنس فولاد سخت با شیارهای مارپیچی در سطح پیرامونی امکان خروج خرده‌های حفاری با کمترین مانع از داخل چال را فراهم می‌نماید.

تهیه شد. همچنین مته‌های کند با ضخامت انتهایی حدود ۵/۰ میلی‌متر ساخته شد. مته‌ها در سه قطر مختلف ۵، ۷ و ۱۰ میلی‌متر در دو نوع تیز و کند تهیه و ساخته شد. بمنظور ایجاد شرایط یکسان در سطح انتهایی و سطح جلویی مته (صفحه برش)، فرآیند تیز و کند کردن مته‌ها توسط دستگاه و ساینده یکسان انجام شده است. این عمل باعث می‌شود که تا جای ممکن شرایط اصطکاکی یکسانی در تماس تنگستن کاریبد مته با سنگ ایجاد شود و فرض یکسان شدن اصطکاک بین انتهای مته و سنگ بکر با اصطکاک بین سطح جلویی مته و زون خرد شده متراکم فراهم شود. از طرفی، نوع ساییدگی



شکل ۷- الف) ایجاد شیار در بدنه مته برای جایگذاری تیغه برش دهنده، ب) مته آماده سازی و سنگ زنی شده از نوع تیز و ج) تعدادی از مته‌های ساخته شده در قطرهای ۵، ۷ و ۱۰ میلی‌متر در دو نوع تیز و کند.

عمق حفاری بوده و مقادیر گشتاور و نیروی پیشران لازم برای حفاری را تحت شرایط کنترل شده از لحاظ سینماتیکی بصورت لحظه‌ای و متناظر با عمق حفاری اعمال و ثبت نموده

ورودی‌های دستگاه پارامترهای عملیاتی حفاری نظیر گشتاور، نیروی بار پشت مته، سرعت چرخش، نرخ نفوذ و

۳-۲- نمونه‌های سنگی مورد آزمایش

سنگ‌های مورد مطالعه شامل مرمیت باغات، مرمیت نیریز و مرمیت مارون است. در جداول ۱، ۲ و ۳ خواص فیزیکی و مکانیکی سه نوع سنگ مرمیت مورد مطالعه در این پژوهش آورده شده است.



شکل ۱۰- سه نمونه سنگ مرمیت مورد مطالعه در این پژوهش.

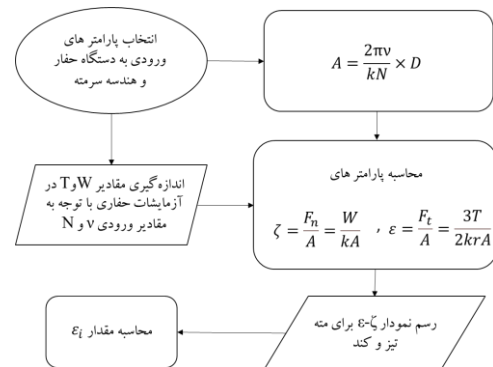
آزمایشات آزمایشگاهی متداول نظیر، چگالی، تخلخل، سرعت موج، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت فشاری سه محوری و مقاومت کششی برزیلی با تعداد تکرار مناسب برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی این ۳ نوع سنگ انجام شد. همچنین با تهیه مقاطع نازک برای مطالعات میکروسکوپی مقدار میانگین اندازه دانه برای سنجش اثر دانه بندی برای همه سنگ‌ها تعیین شد. در انتخاب سنگ‌ها به موضوع تغییرات در اندازه دانه نیز توجه شده است. بطوریکه بازه دانه‌بندی در سنگ‌های مورد مطالعه از ۰/۷۹۲ تا ۱/۴۹۳ میلیمتر متغیر است.

و در یک فایل متنی ذخیره می‌نماید. به کمک خروجی های دستگاه و با توجه به روابط ارائه شده توسط دیفورنی و دیتورنی ۱۹۹۲ می‌توان مقادیر انرژی ویژه حفاری و مقاومت حفاری را محاسبه نمود.

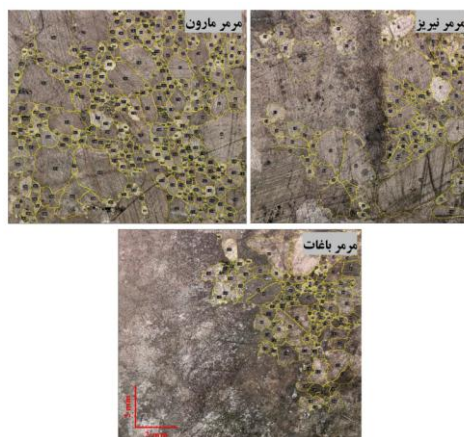
$$\varepsilon = \frac{F_t}{A} = \frac{3T}{2krA} \quad (10)$$

$$\zeta = \frac{F_n}{A} = \frac{W}{kA} \quad (11)$$

در روابط فوق (T) مقدار گشتاور (k) تعداد برش دهنده (r) شعاع مته (A) مساحت مؤثر عمودی برش و (W) میزان بار عمودی وارد به مته (N) سرعت چرخش، (v) سرعت حفاری و (D) قطر مته است. به این ترتیب روندنمای محاسبه پارامترهای حفاری با مته تیز و کند در (شکل ۵) قابل مشاهده است (Kalantari et al., 2019).



شکل ۸- روند نمای محاسبه مقدار انرژی ویژه ذاتی.



شکل ۹- مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از سنگ‌های مورد مطالعه.

۳- نتایج و بحث

آزمون‌های حفاری توسط دستگاه حفاری که در بخش قبل شرح داده شد، انجام پذیرفت. بر این اساس نمونه‌های سنگی بصورت مغزه‌های سنگی تهیه شدند. مغزه‌های استوانه‌ای توسط گیره‌های نگهدارنده در جلوی فک دستگاه تثبیت شده و مانع از ارتعاش یا ناپایداری نمونه‌ها حین حفاری می‌شود (شکل ۸). خروجی هر آزمایش حفاری بصورت نموداری از نیروی گشتاور دستگاه در برابر عمق حفاری و نیروی بار پشت مته در برابر عمق حفاری است. مطابق شکل ۹، نمودار حفاری حاصل از هر آزمایش حفاری از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول مربوط به قبل از رسیدن مته به سنگ و حالتی است که مته بصورت هرزگرد کار کرده است. قسمت دوم زمانی است که مته در لحظات ابتدایی تماس با سطح سنگ قرار گرفته و یک افزایش ناگهانی در مقادیر گشتاور و نیروی پیشران دستگاه رخ می‌دهد. قسمت سوم شامل زمانی است که مته حدود ۱ تا ۲ میلیمتر در سنگ نفوذ کرده و فرآیند برش سنگ به حالت پایدار و پیوسته رسیده است. قسمت پایدار نمودار حفاری برای اندازه‌گیری گشتاور و نیروی پیشران دستگاه انتخاب شد. سعی شد تا بین هر چال حفر شده با چال بعدی به اندازه کافی فاصله باشد تا از اثرات برهم کنش چال‌ها و ریزترک‌های احتمالی ایجاد شده حین فرآیند حفاری کاسته شود. آزمایش‌های حفاری با مته‌های به قطر ۵، ۷ و ۱۰ میلیمتر در دو نوع تیز و کند با زاویه شیب مته ۲۰ درجه، بر روی هر ۳ نمونه سنگ انجام شد.



شکل ۱۱- نمایی از چیدمان انجام آزمایش حفاری .

جدول ۲- مقادیر حاصل از آزمایش چگالی و تخلخل به روش اشباع و غوطه‌وری.

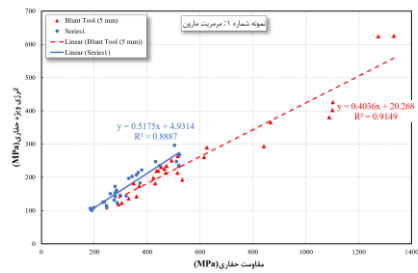
نوع سنگ	تخلخل n (%)	جرم مخصوص خشک ρ_d (gr/cm^3)	درصد جذب آب W (%)	چگالی اشباع G_s
مرمریت مارون	۲/۹۵	۲/۴۹	۰/۹۵	۲/۵۴
مرمریت نیریز	۴/۲۰	۲/۴۷	۱/۴۵	۲/۵۳
مرمریت باغات	۴/۷۶	۲/۴۸	۱/۶۶	۲/۵۲

جدول ۳- مقادیر متوسط اندازه دانه و پارامترهای آماری توابع توزیع برازش شده بر آن.

نوع سنگ	نوع توزیع	متوسط اندازه دانه (mm)	انحراف استاندارد (mm)
مرمریت مارون	لاگ نرمال	۰/۷۹۲	۰/۴۲۷
مرمریت نیریز	لاگ نرمال	۰/۶۳۷	۰/۴۱۳
مرمریت باغات	لاگ نرمال	۱/۴۹۳	۱/۰۰۹

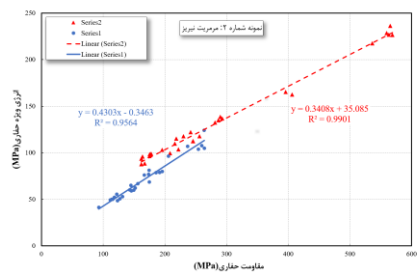
جدول ۴- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی دیسک برزیلی و مقاومت فشاری تک محوری.

نوع سنگ	مقاومت کششی غیر مستقیم f	مقاومت کششی مستقیم DTS (MPa)	مقاومت فشاری تک محوری UCS (MPa)
مرمریت مارون	۴/۵	۸۶/۴	۴/۵۷
مرمریت نیریز	۸/۱۱	۶۲/۱۰	۳۶/۷۷
مرمریت باغات	۶/۹	۶۴/۸	۴۳/۷۷

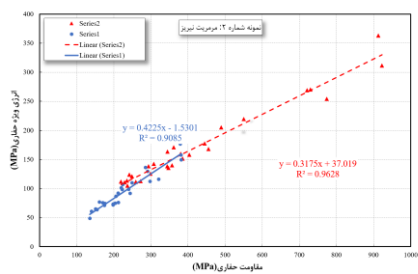


شکل ۱- انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری برای سنگ مرمریت مارون با مته (الف)، ۱۰، (ب) ۷ و (ج) ۵ میلی متر.

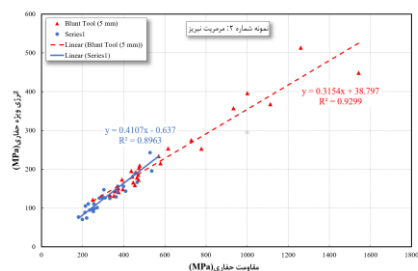
(الف)



(ب)

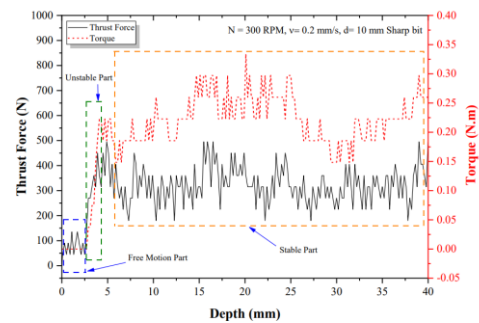


(ج)



شکل ۲- انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری برای سنگ مرمریت نیریز با مته (الف)، ۱۰، (ب) ۷ و (ج) ۵ میلی متر.

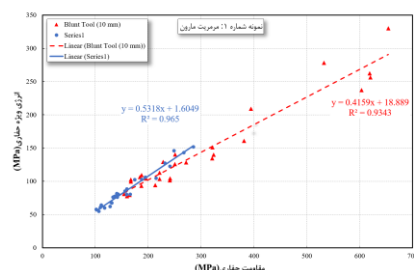
(الف)



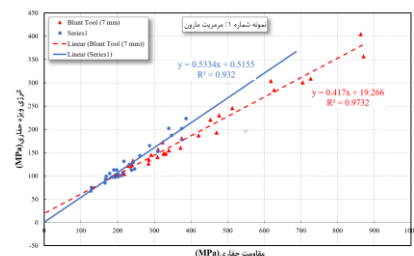
شکل ۱۲- قسمت های مختلف پروفیل حفاری بدست آمده.

نتایج حاصل از حفاری بصورت زوج داده های انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری برای دو نوع مته تیز و کند در سه قطر ۵، ۷ و ۱۰ میلیمتر رسم شد. بر زوج داده های انرژی ویژه و مقاومت حفاری با مته تیز و کند خط روندی خطی برازش شد. براین اساس نتایج حفاری با ۶ نوع مته مختلف بر روی هر سه نمونه سنگ مرمریت مارون شکل ۱۷، سنگ مرمریت نیریز شکل ۱۸، سنگ مرمریت باغات شکل ۱۹، ارائه شده است. به کمک این داده ها محل برخورد دو نمودار برای مته تیز و کند تعیین شده و مقدار انرژی ویژه آن محاسبه شده است. طبق تعریف این مقدار برابر با انرژی ویژه ذاتی سنگ می باشد.

(الف)

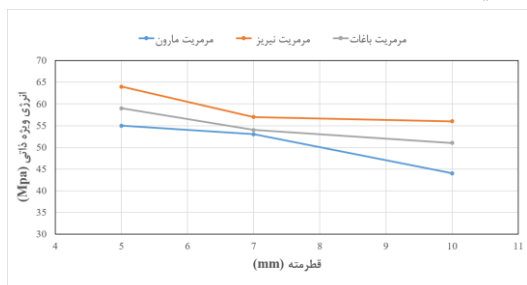


(ب)

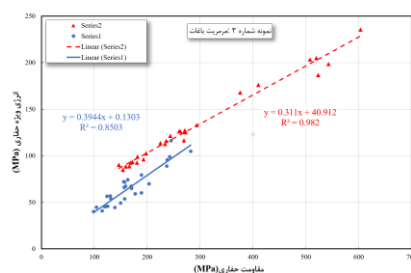


(ج)

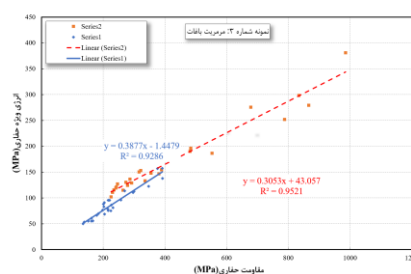
که سطح انتهایی ساییده شده است هر دو پارامتر اصطکاکی حضور دارند. در حفاری با مته کند به دلیل زیاده‌تر بودن نیروی عمودی مته نسبت به نیروی برشی، اثر اصطکاک در سطح انتهایی مته نسبت به سطح برش مته بیشتر است. از طرفی زاویه اصطکاک صفحه برش مته در جهت حرکت نفوذی مته و اصطکاک سطح انتهایی مته در جهت حرکت برشی مته ظاهر می‌شود. با افزایش مقدار کندی مته در سطح انتهایی، جهت حفظ عمق برش مقدار نیروی بار پشت مته بیشتری نیاز است. برای یک عمق برش ثابت، مقدار نیروی بار پشت مته متناسب با میزان کندی مته متغیر است. کند شدن مته سبب افزایش استهلاک انرژی در سطح انتهایی مته شده و مقدار نیروی بار پشت مته نیز برای عمق برش ثابت افزایش خواهد داشت. اما مقدار انرژی لازم برای یک عمق برش مشخص تغییر نمی‌کند. از این رو افزایش کندی مته تنها باعث افزایش استهلاک انرژی حفاری می‌شود. به بیان دیگر انرژی لازم برای برش خالص واحد حجم سنگ ثابت است اما برای برش واحد حجم سنگ که همراه با اصطکاک است، متفاوت است. انرژی لازم برای یک عمق برش ثابت از سنگ با مته کند و مته تیز برابر بوده و مقدار آن برابر انرژی ویژه ذاتی حفاری در محل تقاطع خط روندهای مته کند و مته تیز است. انرژی ویژه ذاتی محاسبه شده برای هر نمونه سنگی در سه اندازه مته ۵، ۷ و ۱۰ محاسبه شده است. شکل ۱۳، روند تغییرات میزان انرژی ویژه ذاتی در اندازه‌های مختلف مته را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود انرژی ویژه ذاتی با تغییرات اندازه مته تغییر کرده و مقادیر مختلفی را به خود اختصاص می‌دهد. این روند به صورت نزولی بوده و با افزایش اندازه مته میزان انرژی لازم برای حفاری یا کندن حجم واحدی از سنگ کاهش یافته و یک پارامتر مستقل از اندازه مته نیست.



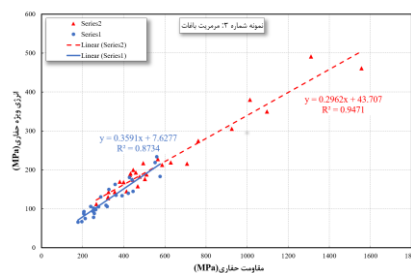
شکل ۳۶- روند تغییرات میزان انرژی ویژه ذاتی در اندازه‌های مختلف مته.



(ب)



(ج)



شکل ۱۵- انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری برای سنگ مرمریت باغات با مته (الف) ۱۰، (ب) ۷ و (ج) ۵ میلی متر. بنا بر آنچه مشاهده شد برای حفاری با دو نوع مته تیز و کند در سه قطر مته ۵، ۷ و ۱۰ میلیمتر در تمامی سنگ‌ها، خط‌های برازش شده بر زوج داده‌های انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت حفاری مربوط به مته‌های تیز با شیب بزرگتر از مته کند بوده و تقریباً عرض از مبدا آنها نزدیک به صفر یا ناچیز است. در این مته فرآیند غالب بصورت برشی است. خط‌های برازش شده برای مته‌های کند دارای شیب کمتر و دارای عرض از مبدا بزرگتری هستند. به بیان دیگر اصطکاک تماسی شامل اصطکاک تماسی صفحه برش مته و اصطکاک سطح انتهایی مته در هر دو مته تیز و کند وجود دارد. اما نکته قابل توجه آن است که در مته تیز به سبب ناچیز بودن مساحت سطح سایش انتهایی مته، اصطکاک تماسی در این ناحیه قابل صرف نظر کردن است و تنها عامل اصطکاک تماسی در صفحه برش مته نقش بازی می‌کند. در مته کند

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

مطالعات انجام شده در این پژوهش با هدف محاسبه انرژی ویژه ذاتی سنگ به کمک دستگاهی که برای برآورد پارامترهای حفاری حین حفاری ساخته شده و همچنین بررسی اثر قطر برش دهنده بر انرژی ویژه ذاتی انجام گرفته است. مطالعات بر روی سه نمونه سنگ مرمریت باغات، مرمریت نیریز و مرمریت مارون به کمک مته اسکنه ای (T شکل) در سه قطر ۵، ۷ و ۱۰ میلی متر در دو حالت تیز و کند انجام شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور محاسبه انرژی ویژه ذاتی سنگ نمونه‌های سنگی به کمک دستگاه حفاری مورد مطالعه قرار گرفتند. دستگاه حفاری توسعه داده شده پس از دریافت نرخ نفوذ مشخص و سرعت چرخش مشخص، میزان نیروی پیشران و گشتاور مورد نیاز را اعمال نموده و همواره به صورت پیوسته این داده‌ها را ثبت می‌نماید. خروجی‌های دستگاه حفاری به کمک روابط تحلیلی توسعه داده شده به مقادیر انرژی ویژه حفاری (ε) و مقاومت حفاری (ζ) تبدیل می‌شوند. با ترسیم نمودار انرژی ویژه حفاری در مقابل انرژی ویژه حفاری در هر دو حالت مته تیز و کند و سپس یافتن محل تقاطع این دو نمودار طبق مطالعات انجام شده، میزان انرژی ویژه ذاتی سنگ قابل دستیابی است. مقادیر انرژی ویژه ذاتی برآورد شده از حفاری بر روی هر نمونه سنگ با سه قطر برش دهنده با یکدیگر مقایسه شده‌اند نتایج نشان می‌دهد:

- نقطه تقاطع نمودارهای انرژی مته‌های تیز و کند به‌عنوان انرژی ویژه ذاتی و یک ویژگی منحصر به فرد سنگ شناخته می‌شود.

- نتایج بدست آمده می‌تواند گامی مؤثر در زمینه درک فرآیند حفاری و بهینه سازی آن داشته باشد که نشان می‌دهد، انرژی ویژه ذاتی تنها به خواص ذاتی سنگ وابسته نیست و پارامترهای عملیاتی نیز بر آن تأثیرگذارند از این رو در حفاری‌های بزرگ مقیاس می‌توان با مطالعه عوامل مؤثر بر فرآیند حفاری به بهینه‌سازی آن پرداخت.

- پیشتر با فرض عدم استقلال میزان انرژی ویژه حفاری از پارامترهای حفاری مطالعاتی توسط پژوهشگران همین تیم انجام شده است که به ارائه یک رویکرد نوآورانه را با استفاده از داده‌های عملیاتی حفاری برای برآورد پارامترهای مقاومت سنگ بر اساس هر دو معیار گسیختگی موهر-کلمب

و هوک-براون پرداخته است. (Heydari et al., 2025) نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش قطر مته میزان انرژی ویژه حفاری برای مرمریت مارون ۲۰ درصد، برای مرمریت باغات ۱۳.۶ درصد و برای مرمریت نیریز ۱۲.۵ درصد کاهش یافته است. این میزان کاهش انرژی ویژه حفاری تحت تأثیر تغییر قطر مته قابل صرف نظر نبود و فرض استقلال انرژی ویژه از پارامترهای حفاری را نقض می‌کند.

۵- فهرست نماده

نماد	واحد	شرح
w	$N.m$	کار انجام شده
F	N	نیرو
A	m^2	سطح اعمال نیرو
N	RPM	سرعت چرخش مته
u	m/min	نرخ نفوذ
V	m^3	حجم حفاری
e	Mpa	انرژی ویژه حفاری
T	$N.m$	گشتاور
ε	Mpa	انرژی ویژه حفاری
ζ	Mpa	مقاومت حفاری
F_t	N	مؤلفه افقی نیرو
F_n	N	مؤلفه عمودی نیرو
K	-	تعداد برش دهنده
r	m	شعاع مته
W	N	بار عمودی
v	m/min	سرعت حفاری
C	Mpa	چسبندگی ذاتی سنگ
φ	$degree$	زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر
φ'	$Degree$	زاویه اصطکاک بین سنگ بکر و زون خرد شده
D	m	قطر مته
θ_f	$degree$	زاویه اصطکاک بین مته و سنگ در انتهای سطح سایش
α	$degree$	زاویه شیب مته

۶- منابع

- [1] Amadi, K., & Iyalla, I. (2012). Application of mechanical specific energy techniques in reducing drilling cost in deepwater development. SPE deepwater drilling and completions conference,
- [2] Armenta, M. (2008). Identifying inefficient drilling conditions using drilling-specific energy. SPE Annual Technical Conference and Exhibition?,
- [3] Chakeri, H., Maleki, A., Shakeri, H., Darbor, M., & Mousapour, H. (2025). Laboratory and numerical investigation of cutting tool performance using a new small-scale linear cutting machine. *Scientific Reports*, 15(1), 22337.
- [4] Dagrain, F. (2001). *Influence of the cutter geometry in rock cutting: an experiment approach* University of Minnesota].
- [5] Detournay, E., & Defourny, P. (1992). A phenomenological model for the drilling action of drag bits. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,
- [6] Faghih, A., Yi, Y., Bayat, A., & Osbak, M. (2017). Efficient drilling in horizontal directional drilling by implementing the concept of specific energy. *Geomechanics and Geoengineering*, 12(3), 201–206.
- [7] Heydari, K. E., Baghbanan, A., & Hashemolhosseini, H. (2026). Advanced continuous drilling for depth-dependent mechanical properties mapping in graded rocks. *Results in Engineering*, 29, 109614.
- [8] Heydari, K. E., Baghbanan, A., Hashemolhosseini, H., & Behnia, M. (2025). Drilling-Based Rock Strength Estimation: A Validated Model for Mohr-Coulomb and a New Theoretical-Empirical Approach for Hoek-Brown Parameters. *Results in Engineering*, 107388.
- [9] Kalantari, S., Baghbanan, A., & Hashemolhosseini, H. (2019). An analytical model for estimating rock strength parameters from small-scale drilling data. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(1), 135–145.
- [10] Kalantari, S., Hashemolhosseini, H., & Baghbanan, A. (2018). Estimating rock strength parameters using drilling data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 104, 45–52.
- [11] Maleki, A., Chakeri, H., Shakeri, H., Khoshzahr, E., & Darbor, M. (2025). Experimental study of effects of mechanical properties of rocks on wear of cutting tools using a new Small-Scale linear cutting machine. *Journal of Mining and Environment*, 16(5), 1809–1826.
- [12] Oloruntobi, O., & Butt, S. (2020). Application of specific energy for lithology identification. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184, 106402.
- [13] Richard, T., Dagrain, F., Poyol, E., & Detournay, E. (2012). Rock strength determination from scratch tests. *Engineering Geology*, 147, 91–100.
- [14] Teale, R. (1965). The concept of specific energy in rock drilling. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,
- [15] Xu, Z., Reed, C. B., Konercki, G., Parker, R. A., Gahan, B. C., Batarseh, S., & Skinner, N. (2003). Specific energy for pulsed laser rock drilling. *Journal of laser applications*, 15(1), 25–30.
- [16] Zhou, J., Liu, Z., Li, C., Du, K., & Yang, H. (2025). Cutting-edge approaches to specific energy prediction in TBM disc cutters: Integrating COSSA-RF model with three interpretative techniques. 22, 241-262. In.



Effect of Bit Size and Geomechanical Properties of Crystalline Marbles on Intrinsic Specific Energy in Rotary Drilling

Mohamadreza Rezaeian Froushani¹, Alireza Baghbanan^{2*}, Keyvan Ebneali Heydari³

1. M.Sc. in Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Professor of Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3. Ph.D. Candidate of Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Received: 28 May 2026 Accepted: 21 June 2026

(*Corresponding author: bagh110@iut.ac.ir)

Keywords

**Rotary Drilling,
Intrinsic Specific Energy,
Cutter Diameter,
Grain Size,
Marble**

Final English Extended Abstract

Optimizing energy consumption in rotary drilling and reducing associated costs has always been one of the primary concerns of researchers in this field. The present study, employing an analytical model based on the limiting equilibrium of forces and using a drilling rig equipped with a Measurement While Drilling (MWD) system developed by the same research team, calculated the intrinsic specific energy of rock during drilling. Based on the theoretical framework, the specific energy of drilling (ϵ) and the drilling resistance (ζ) are not independent quantities, and a linear relationship exists between them. According to the

conducted studies, upon plotting the curves derived from the aforementioned parameters for a fixed-diameter bit under both sharp and dull conditions, an intersection point is observed between the two curves. This point represents the cutting threshold in drilling operations. In this study, the effect of bit diameter — evaluated at three different sizes — on the intrinsic specific energy of drilling was assessed using three marble specimens with varying grain sizes. The findings indicate that intrinsic specific energy is not solely a function of the inherent rock properties, but also depends on drilling parameters. The results demonstrate that with increasing bit diameter, the specific energy of drilling decreased by 20% for maroon marble, 13.6% for Baghat marble, and 12.5% for Neyriz marble. These results reveal the necessity of reconsidering the assumption that intrinsic specific energy is independent of drilling variables.

Summary

This study investigates energy consumption in the rotary drilling process by evaluating the intrinsic specific energy of rock. Utilizing a custom analytical model based on the limit equilibrium of forces and a dedicated measurement device, the research analyzes the relationship between drilling specific energy and drilling resistance. By testing three crystalline marble samples of varying grain sizes with three different cutter bit diameters, the study demonstrates that intrinsic specific energy is not solely an inherent rock property. Instead, it depends significantly on drilling parameters, notably decreasing as cutter diameter increases, which challenges traditional assumptions in the field.

Introduction

Rock drilling is a critical stage in identifying ground characteristics and performing excavation and geotechnological operations in mining, oil and gas engineering, and civil engineering projects. Therefore, optimization of the drilling process directly affects project economics and operational efficiency. Intrinsic specific energy is defined as a measure of the energy required to cut a unit volume of rock. Studies have shown that this parameter is closely related to the uniaxial compressive strength of the rock. It can be regarded as a fundamental parameter for evaluating drilling performance in rotary and rotary-percussive drilling systems and as an important indicator for identifying inefficient drilling conditions. Previous studies have demonstrated that the use of intrinsic specific drilling energy optimization methods can significantly reduce drilling costs. However, the effect of bit diameter on intrinsic specific drilling energy has not yet

been investigated or reported, and this issue constitutes the main objective of the present study. In this research, the effect of three bit sizes on intrinsic specific drilling energy were investigated using three crystalline marble samples with different grain sizes, and the results were compared.

Methodology and Approaches

To experimentally evaluate the proposed method, operational drilling parameters—such as torque, weight on bit, rotational speed, penetration rate, and drilling depth—must be applied and measured under controlled conditions. Consequently, a portable drilling device was designed and fabricated, capable of conducting tests on various rocks both in-situ and on laboratory samples while precisely controlling and recording drilling data. The device applies the operational drilling parameters as inputs and logs the resulting torque and thrust force required for drilling under regulated conditions. Utilizing the outputs of this device and established analytical relationships, the values for drilling specific energy and drilling resistance can be calculated. The drilling experiments were conducted using bits with diameters of 5, 7, and 10 millimeters. These tests utilized both sharp and blunt bits featuring a 20-degree rake angle and were performed on all three crystalline marble samples of varying grain sizes.

Results and Conclusions

The intrinsic specific energy was evaluated for each rock sample using 5, 7, and 10mm bits. Results indicate a distinct inverse relationship between intrinsic specific energy and bit size; as the bit diameter increases, the energy required to excavate a unit volume of rock decreases. This demonstrates that intrinsic specific energy is fundamentally dependent on bit dimensions, directly refuting the conventional assumption that specific energy remains independent of drilling parameters.