

نقش عوامل عملیاتی در برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ به روش میکروحفاری

سجاد کلانتری*

گروه مهندسی معدن، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱

چکیده

تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ همچون مقاومت فشاری تک محوره، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بروش حفاری بدلیل سهولت و سریعتر بودن آن مورد توجه می‌باشد و حفاری در مقیاس کوچک می‌تواند بعنوان یک روش غیر مخرب محسوب شود. در راستا توسعه و تکمیل مدل تحلیلی ارائه شده اخیر خود و همچنین کارهای تجربی انجام گرفته در موضوع تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ از داده های حفاری، ضرورت داشت به نقش و تأثیر عوامل عملیاتی مختلف بر نتایج برآورد شده از این تکنیک توجه شود و برای هر کدام از این عوامل تأثیر گذار محدوده کاربردی مناسبی ارائه شود. این عوامل شامل پارامترهای مته از جمله هندسه مته، جنس مته و میزان ساییدگی آن و پارامترهای حفاری همچون نرخ نفوذ، سرعت چرخش و انرژی ویژه حفاری می‌باشد. تعیین محدوده مناسب برای این پارامترها می‌تواند ضمن اطمینان از نتایج بدست آمده برای پارامترهای مقاومتی سنگ، قدمی در جهت استاندارد سازی این روش باشد. از این رو در این تحقیق یک سنگ مرمر با ساختار نسبتاً همگن و همسانگردی جهت بررسی تجربی نقش این عوامل انتخاب شد و آزمونهای استاندارد آزمایشگاهی و آزمونهای حفاری در مقیاس کوچک بر روی نمونه‌های این سنگ انجام گرفت و نقش هر کدام از پارامترهای مذکور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمونهای حفاری نشان می‌دهد که در صورت انتخاب درست پارامترهای مختلف مته و حفاری، پارامترهای مقاومتی برآورد شده برای سنگ از داده‌های حفاری، با نتایج آزمونهای استاندارد مرسوم مطابقت خوبی دارد. در این روش زاویه شیب مته و ساییدگی آن نقش مهمی دارد. بطوریکه جهت برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ استفاده از یک مته کند با زاویه شیب مناسب ضرورت دارد. اما نتایج برآورد شده متأثر از میزان تغییرات سایش مته نمی‌باشد. عمق نفوذ در حفاری متأثر از سرعت چرخش و بار پشت مته بوده که علاوه بر مکانیزم شکست در سنگ، راندمان حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

پارامترهای مقاومتی سنگ، روش میکروحفاری، نقش عوامل عملیاتی

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

دارد. نمودارهای مبنایی که با این هدف در آزمایشگاه تهیه می‌شود بعنوان مبنایی جهت بررسی و اندازه‌گیری مقاومت فشاری سنگ و همچنین مصالح مختلفی همچون بتن، ملات، آجر و غیره نیز استفاده می‌شود [1]، [2]، [3]، [4]، [5]، [6]، [7] و [8]. در این روش نقش سایش مته اهمیت زیادی دارد و روشهایی جهت کنترل تأثیر آن بر روی نتایج بدست آمده ارائه شده است [2]. در روشهای تحلیلی، مدل‌های مختلفی توسط افراد متعدد ارائه شده است که عموماً مبتنی

تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از داده‌های حفاری براساس روشهای تجربی و تحلیلی توسط افراد مختلفی ارائه شده است. در بیشتر روشهای تجربی مقدار نیروی بار پشت مته لازم تحت شرایط حفاری با سرعت چرخش و نرخ نفوذ ثابت اندازه گیری و تحت عنوان مقاومت حفاری مطرح می‌باشد. این مقاومت حفاری همبستگی خوبی با مقاومت فشاری تک محوره سنگ و سایر مصالح

* نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی معدن، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران
پست الکترونیک:

s-kalantari@iau-maragheh.ac.ir

s.kalantari58@gmail.com

آدرس: مراغه، بلوار درخشی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، تلفن: ۰۴۱-۳۷۴۵۴۵۰۶

ادامه آن تحقیق، جهت توسعه و تکمیل این تکنیک، نقش و تأثیر عوامل عملیاتی بر روی نتایج بدست آمده نیز مورد بررسی قرار گیرد. از این رو در این مقاله به این موضوع پرداخته می‌شود. در راستای این موضوع، بررسی نقش عوامل مختلف از جمله پارامترهای هندسی مته مانند زاویه شیب مته، قطر مته و وضعیت ساییدگی و جنس آن، پارامترهای مؤثر در فرآیند حفاری مانند زون خرد شده و اصطکاک بین بخشهای مختلف مته و سنگ، پارامترهای حفاری همچون نرخ نفوذ، سرعت چرخش و انرژی ویژه ضرورت داشت. هر چند که خیلی از پارامترهای مؤثر که در حفاریهایی با مقیاس بزرگ وجود دارند، در مقیاس کوچک مطرح نیستند، اما برخی از آنها از جمله هندسه مته و پارامترهای حفاری مانند نرخ نفوذ و سرعت چرخش در این ابعاد حضور داشته و می‌تواند نتایج حفاری بدست آمده را تحت تأثیر قرار دهند. برخی از این پارامترها در ابعاد مختلف توسط افراد متعدد بررسی شده بطوری که افرادی همچون هیب و فلوم [32]، هوو و میدلتون [33]، کاراساوا و میساوا [34]، لی و فیندزیان [35]، سینور و همکاران [36] و کودزیر و ریچارد [37] به نقش و تأثیر پارامترهای هندسی مته در فرآیند حفاری برای مته‌های مختلف پرداخته‌اند. افرادی چون تیله [19]، چیتمن و دانیال [38]، شی و همکاران [29]، ریچارد و همکاران [39]، رجب اف و میسکا [40] و دتورنی و دفورنی [41] به نقش پارامترهای حفاری تأکید کرده‌اند. در این تحقیق جهت بررسی تأثیر این عوامل، یک نمونه سنگ مرمر (از معدن مرمر قره) انتخاب شده است و آزمونهای آزمایشگاهی استاندارد شامل آزمایش مقاومت فشاری تک محوره جهت برآورد مقاومت فشاری تک محوره سنگ مرمر، آزمایش استاندارد مقاومت فشاری سه محوره جهت برآورد چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی این سنگ انجام گرفته است. سپس آزمونهای حفاری بر روی نمونه‌های مکعبی شکل همین سنگ جهت برآورد پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ از داده‌های حفاری براساس مدل تحلیلی انجام شده است. برای این منظور ماشین حفاری قابل حملی در ابعاد کوچک ساخته و بکار گرفته شده است که علاوه بر قابلیت حفاری با توان بالا، قابلیت اندازه‌گیری و ثبت همزمان پارامترهای گشتاور، نیروی بار پشت مته، نرخ نفوذ، سرعت چرخش مته و عمق حفاری را دارد. بکمک این ماشین، آزمایشهای حفاری بر روی سنگ مرمر انجام گرفته و براساس مدل ارائه شده، تأثیر عوامل عملیاتی مختلف حفاری بر روی پارامترهای مقاومتی برآورد شده بررسی می‌شود.

۲- مدل تحلیلی کلانتری و همکاران

این مدل بر مبنای حفاری چرخشی است. مدلی بر اساس تعادل حدی نیروها در یک مته اسکنه‌ای T شکل مطابق شکل ۱- (a) با زاویه

بر تعادل نیروها و یا مبتنی بر تعادل انرژی می‌باشند. مدلهایی که براساس تعادل انرژی ارائه شده است [9]، [10]، [11]، [12]، [13]، [14]، [15]، [16]، [17] و [18] برگرفته از مدل انرژی ویژه حفاری تیله [19] می‌باشند. در این مدلها حداقل مقدار انرژی لازم برای حفاری واحد حجم سنگ بعنوان یک شاخص برای هر سنگ مطرح بوده و در شرایط فشار اتمسفر برابر مقاومت فشاری تک محوره سنگ می‌باشد. مدلهای مبتنی بر تعادل نیروها، بر اساس تعادل نیروها در فرآیند حفاری سنگ توسط ابزار حفاری می‌باشند [20]، [21]، [22]، [23]، [24]، [25] و [26]. این کارها بیشتر با هدف بررسی کارایی حفاری بوده و برخی از آنها روشهایی برای برآورد مقاومت فشاری تک محوره سنگ از پارامترهای حفاری ارائه می‌کنند. یکی از مهم‌ترین آنها مدل ارائه شده توسط دتورنی و دفورنی [20] برای مته‌های خراشی و مته‌های PDC (*Polycrystalline Diamond Cutter*) می‌باشد، که جهت بررسی کارایی این مته‌ها در فرآیند حفاری می‌باشد. این مدل اساس آزمایش خراش جهت برآورد مقاومت فشاری تک محوره سنگ است، که طی فرآیند برش مستقیم توسط یک ابزار برشی ساده با پوشش PDC صورت می‌گیرد [27]، [28]، [29]. اخیراً کلانتری و همکارانشان [30] و [31] یک مدل تحلیلی بر مبنای تعادل حدی نیروها در فرآیند حفاری ارائه کرده‌اند که با استفاده از مکانیزم حفاری چرخشی در مقیاس کوچک با یک ماشین حفاری دستی توسط مته‌های اسکنه‌ای T شکل قابلیت مشابهی را فراهم می‌کند. در این مدل تلاش شده است که شرایط واقعی فرآیند برش در حفاری با این مته‌ها اعمال شود. این روش برخلاف آزمایش خراش که فقط بر روی نمونه‌های سنگی قابل انجام است، هم بر روی نمونه‌های سنگی و هم در محل پروژه از سطوح سنگی قابل دسترس نیز بصورت نقطه‌ای پارامترهای مقاومتی سنگ همچون زاویه اصطکاک، چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوره سنگ را برآورد می‌کند و امکان بررسی عمقی بناهای سنگی را از نظر هوازنگی و فرسایش فراهم می‌کند. در این روش حداقل با دو مرحله حفاری با یک مته کند در دو نرخ نفوذ متفاوت با یک قطر دلخواه و به عمق ۵ سانتیمتری و دو مرحله حفاری با یک مته تیز مطابق شرایط حفاری مته کند می‌توان پارامترهای مقاومتی سنگ را بطور مستقیم از داده‌های حفاری براساس مدل تحلیلی برآورد کرد. مزیت این مدل نسبت به مدل‌های قبلی این است که علاوه بر مقاومت فشاری تک محوره پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ را نیز برآورد می‌کند و متأثر از میزان ساییدگی مته و یا کندی آن نمی‌باشد. این روش جهت استفاده گسترده‌تر نیاز به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر نتایج برآورد شده و تعیین محدوده کاربردی مناسب برای آن عوامل تأثیرگذار دارد. از آنجایی که این مدل تحلیلی و نحوه‌ی برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ از داده‌های حفاری در دو کار قبلی کلانتری و همکاران [30] و [31] ارائه شده است و ضرورت داشت در

مطابق این مدل برای دو شرایط مته؛ مته کند و مته تیز رابطه خطی بین دو پارامتر انرژی ویژه حفاری ($E = F_t^c/A$) و مقاومت حفاری ($S = F_n^c/A$) بدست می‌آید.

در شرایطی که مته کند (*Blunt*) است [31]:

$$E = (\tan\theta_f)S + \left\{ \frac{2C\cos(\varphi' - \varphi)}{(1 + \tan\varphi'\tan\varphi)} \times \frac{[1 + \tan\varphi'\tan\alpha - (\tan\alpha + \tan\varphi')\tan\theta_f]}{[\cos(\varphi' - \varphi) - \sin^2(\varphi' - \varphi) + \sin(\varphi' - \varphi)]} \right\} \quad (1)$$

در شرایطی که مته تیز (*Sharp*) است [31]:

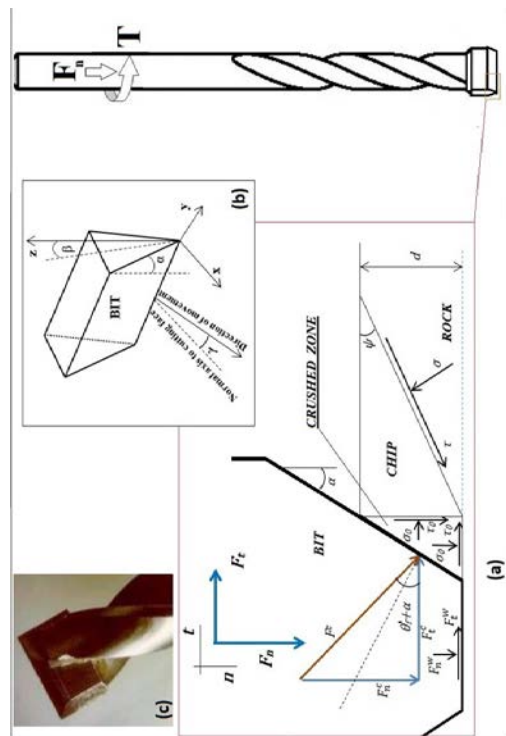
$$E = \frac{1}{\tan(\alpha + \theta_f')} S \quad (2)$$

در این دو رابطه پارامترهای φ ، φ' و C به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی سنگ، زاویه اصطکاک بین سنگ بکر و زون خرد شده و چسبندگی ذاتی سنگ می‌باشد و چهار پارامتر θ_f ، θ_f' ، α و A بعنوان پارامترهای عملیاتی هستند که به ترتیب زاویه اصطکاک بین زون خرد شده و مته، زاویه اصطکاک بین سنگ بکر و مته، زاویه شیب مته و سطح مقطع مؤثر برش می‌باشد. زاویه اصطکاک بین مته و سنگ و همچنین مته و زون خرد شده به جنس مته و سنگ برمی‌گردد و زاویه شیب مته مربوط به هندسه مته می‌باشد و سطح مقطع مؤثر برش متأثر از قطر مته و عمق برش می‌باشد. تلاش می‌شود به نقش و تأثیر آنها در این تحقیق پرداخته شود. قبل از اینکه به نقش و تأثیر هر کدام از این پارامترها پرداخته شود لازم است فرآیند نفوذ و ایجاد عمق برش و همچنین نحوه محاسبه سطح مقطع مؤثر برش در مته‌های اسکنه‌ای T شکل تشریح گردد. زیرا این ابزار در بیشتر حفاری‌هایی با مقیاس کوچک (میکروحفاری) جهت برآورد پارامترهای مقاومتی سنگها و حتی سایر مصالح استفاده می‌شود. سطح مقطع مؤثر برش مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$A = d \cdot D \quad (3)$$

که در این رابطه D قطر مته و d عمق برش می‌باشد. برای یک مته اسکنه‌ای T شکل تعداد ابزارهای برشی برابر ۲ بوده که حول محور مته در فاصله صفر از هم می‌چرخند. 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 (*helical trajectory*) که توسط ملور [42] ارائه شده است، 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

شیب α تحت شرایط حفاری در فشار اتمسفر است. با توجه به اینکه راستای حرکت مته هر لحظه بر جهت برش مماس می‌باشد، زاویه جانبی (γ) مطابق شکل ۱- (b) صفر خواهد بود. جهت کاهش تماس مته با دیواره چال، زاویه گیر مته (β) مطابق شکل ۱- (b) منفی در نظر گرفته می‌شود. طی فرآیند حفاری انتهای مته توسط نیروی بار پشت بصورت پیوسته به سمت پایین حرکت کرده و در آن نفوذ می‌کند. متناسب با این نفوذ، عمق برش لازم بوجود می‌آید. همزمان با این نفوذ، در جهت برش سنگ موادی که در فرآیند نفوذ مته خرد شده‌اند بین سطح برش مته و سنگ محبوس و متراکم می‌گردد. در واقع این زون خرد شده متراکم به عنوان یک واسطه بین مته و سنگ بکر عمل می‌کند. در اثر نیروی اعمالی (F^c) از طرف مته، این زون خرد شده، بخشی از این نیرو را به سنگ بکر در دیواره عمودی که معادل عمق برش می‌باشد، منتقل می‌کند و بخشی از نیروی F^c را به کف چال انتقال می‌دهد. این زون خرد شده متراکم با مقاومت‌های متفاوتی با سنگ بکر و مته در تماس است. وقتی که مقدار نیروی انتقالی به سنگ توسط این زون خرد شده متراکم به حداکثر مقدار خود می‌رسد، منجر به گسیختگی در سنگ بکر تحت زاویه ψ می‌گردد. در این شرایط سه بخش مجزا بوجود می‌آید که در تماس با یکدیگر هستند. این سه بخش شامل مته، زون خرد شده متراکم و گوه سنگ بکر گسیخته شده تحت بار اعمالی از طرف زون خرد شده می‌باشد.



شکل ۱- طرح مدل تحلیلی کلاتری و همکاران [31]

در سایش مته و نوسان نیروی برشی می‌شود. در هر دوی این موارد، برای حفاری ناپایدار محسوب می‌شود. بنابراین زمانی حفاری در وضعیت پایدار قرار دارد که $d = \delta$ 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.

۳- نحوه برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ از داده‌های حفاری

برای بدست آوردن پارامترهای مقاومتی سنگ از داده‌های حفاری کافیتست که دو خط مربوط به رابطه (۱) و رابطه (۲) رسم شود. برای هر کدام از این دو خط حداقل دو نقطه لازم است. برای هر نقطه نیاز به یک حفاری با قطر دلخواه در یک نرخ نفوذ و سرعت چرخش ثابت و دلخواه می‌باشد. بطوریکه حتی می‌توان هر دو نقطه را تنها با حفاری یک سوراخ در ابعاد میلیمتری از سطح سنگ به عمق ۵ سانتیمتر در دو مرحله با نرخ نفوذ و سرعت چرخش متفاوت بدست آورد. این حفاری هم با مته تیز و هم با مته کند انجام می‌شود. همزمان با حفاری، پارامترهای گشتاور و نیروی بار پشت مته در شرایطی که حفاری به شرایط پایدار رسیده است اندازه گیری و ثبت می‌شود. حال برای هر نقطه دو پارامتر انرژی ویژه حفاری $(S = \frac{F_n^c}{A})$ و مقاومت حفاری $(E = \frac{F_t^c}{A})$ بدست می‌آید. به کمک این دو نقطه خطوط مربوط به مته تیز و مته کند رسم می‌شود. شیب و عرض از مبدأ این خطوط بدست می‌آید. مطابق مدل تحلیلی کلانتری و همکاران [30] فاصله عمودی محل طلاقی این دو خط از محور افقی، برابر مقدار مقاومت فشاری تک محوره سنگ است. مقدار زاویه اصطکاک بین مته و سنگ (θ_f') از شیب نمودار مته تیز بدست می‌آید و براساس رابطه زیر مقدار زاویه اصطکاک بین سنگ بکر و زون خرد شده (φ') محاسبه می‌شود [31]:

$$\varphi' = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\alpha + \theta_f') - \tan\alpha}{1 - \tan\alpha \tan(\alpha + \theta_f')} \right) \quad (5)$$

با محاسبه مقدار (φ') از رابطه (۵)، زاویه اصطکاک داخلی

سنگ (φ) از رابطه زیر بدست می‌آید [31]:

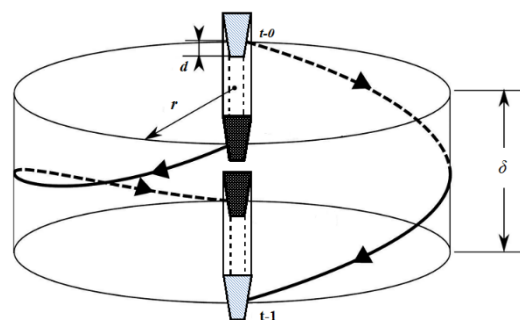
$$\tan\varphi' = \frac{\pi}{2} \tan\varphi \quad (6)$$

حال مقدار زاویه اصطکاک بین زون خرد شده و صفحه

برش مته (θ_f) از شیب نمودار خط مته کند محاسبه می‌شود و نهایتاً مقدار چسبندگی ذاتی سنگ از مقدار عرض از مبدأ رابطه خطی مته کند قابل محاسبه است.

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. می‌توان فرض کرد که برای یک مته اسکنه‌ای T شکل دو برش دهنده (cutter) با طول r وجود دارد که در محور چرخش به هم چسبیده‌اند و هر کدام تحت تأثیر نیروی عمودی F_n قرار دارند. بخاطر چرخش متقارن و ساییدگی یکسان این برش دهنده‌های صلب، مسیرهایی که توسط هر کدام از آنها انجام می‌گیرد، یکسان می‌باشد. در این شرایط مطابق شکل (۲) وقتی که مته به اندازه ۱۸۰ درجه می‌چرخد، مقدار جابجایی عمودی برش دهنده‌ها برای یک بازه زمانی معین برابر δ بوده و جابجایی افقی برای لبه انتهایی هر کدام از آنها نیز برابر $\frac{2\pi r}{k}$ می‌باشد. که k تعداد ابزارهای برشی و r شعاع مته یا همان طول ابزار برشی می‌باشد. متناسب با این حرکت‌ها برای یک بازه زمانی مشخص، وقتی که سرعت چرخش مته برابر N و سرعت حفاری برابر v باشد، مقدار δ برابر است با،

$$\delta = \frac{2\pi v}{kN} \quad (4)$$



شکل ۲- طرح حرکت حلزونی شکل مته (باز تعریف از [43])

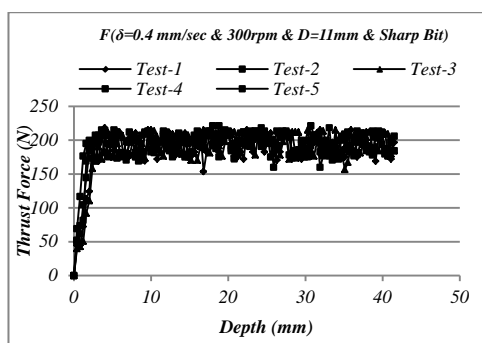
اگر مقدار نفوذ برای همه برش دهنده‌ها یکسان فرض شود و برابر d باشد. در شرایط حفاری واقعی برای یک مقدار حرکت عمودی معین مته (δ) سه وضعیت وجود دارد. حالت اول زمانی که $d > \delta$ است، هر برش دهنده کاهش عمق نفوذ خود را در مکانی که قبلاً توسط برش دهنده دیگر اشغال شده بود، تجربه کند. این شرایط تنها زمانی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

۴- آزمونهای تجربی

یکسان برای دفعات متعدد تکرار کرد. از اینرو نمونه‌های سنگی شرایط همگن و همسانی داشتند و هر آزمایش حفاری حداقل با چهار بار تکرار انجام گرفته و مقادیر گشتاور و بار پشت مته مطابق شکل‌های (۴) الف و (۴) ب بعد از پایدار شدن حفاری ثبت شده اند.



شکل ۳- نمایشی از دستگاه حفاری با قابلیت حفاری و اندازه‌گیری داده‌های حفاری



شکل ۴- نمودارهای از نیروی بار پشت مته اندازه‌گیری شده توسط دستگاه حفاری در سنگ مرمر با تکرار آزمایش.

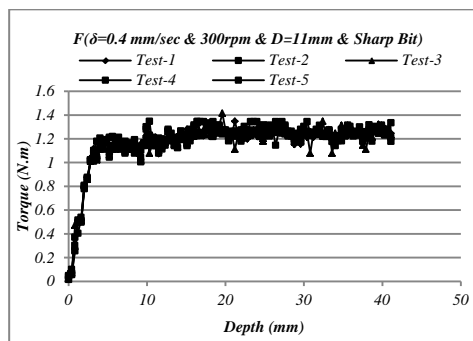
در این تحقیق ابتدا تعدادی نمونه مکعبی از سنگ مرمر (از معدن مرمر قره) تهیه شد. این سنگ دارای ساختار توده‌ای متراکم، همگن و همسانگرد می‌باشد و در نمونه‌های انتخاب شده تا حد ممکن به این پارامترها توجه شده است. نمونه‌های سنگی مکعبی با ابعاد تقریبی $200 \times 150 \times 300$ میلی‌متر الی $150 \times 100 \times 150$ میلی‌متر تهیه شد. سپس از برخی از نمونه‌های مکعبی در آزمایشگاه مغزه‌گیری انجام گرفت. آزمونهای آزمایشگاهی استاندارد شامل آزمایش مقاومت فشاری تک محوره جهت برآورد مقاومت فشاری تک محوره سنگ مرمر، آزمایش استاندارد مقاومت فشاری سه محوره جهت برآورد چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی این سنگ انجام شد. از آنجایی که قرار بود آزمونهای حفاری در فشار اتمسفر انجام گیرد آزمونهای مقاومت فشاری سه محوره برای تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ با حداقل فشار جانبی محصور (>3 مگاپاسکال) انجام گرفت. مطابق این آزمایشهای استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM)، مقاومت فشاری تک محوره سنگ مرمر برابر ۱۰۰ مگاپاسکال، مقدار چسبندگی $19/3$ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی برابر 46 درجه برآورد گردید. حال برای بررسی نقش پارامترهای عملیاتی حفاری بر اساس مدل جدید، لازم است آزمونهای حفاری در مقیاس کوچک و بر روی نمونه‌های سنگی انجام گیرد. در این آزمونهای حفاری، پارامترهای حفاری نظیر گشتاور، نیروی بار پشت مته، سرعت چرخش، نرخ نفوذ و عمق حین حفاری اندازه‌گیری می‌شود. جهت اندازه‌گیری، کنترل و ثبت این داده‌ها، دستگاه حفاری قابل حملی با قابلیت حفاری در سنگهای مختلف هم در محل پروژه و هم در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های سنگی و با قابلیت خودکنترلی و ثبت داده‌های حفاری مطابق شکل (۳) در دانشگاه صنعتی اصفهان طراحی و ساخته شد. این دستگاه از دو موتور مستقل جهت بار پشت مته و گشتاور استفاده می‌کند و بعد از دریافت اطلاعات حفاری لازم بصورت خود کنترل حفاری نموده و ضمن اندازه‌گیری و ثبت داده های حفاری آنها را در یک فایل اکسل با فرمت *.xlsx* ذخیره می‌نماید.

برای آزمایشهای حفاری نمونه‌های سنگی مکعبی با ابعاد تقریبی $200 \times 150 \times 300$ میلی‌متر الی $150 \times 100 \times 150$ میلی‌متر تهیه شد. همزمان آزمونهای حفاری توسط دستگاه حفاری ساخته شده بر روی نمونه‌های مکعبی انجام گرفت. قبل از انجام حفاریها همه کارهای واسنجی مربوط به دستگاه حفاری انجام شده است و اطلاعات تکمیلی در این خصوص در رساله دکترای کلانتری [45] آورده شده است. در این آزمایشها تکرار پذیری آزمایش اهمیت زیادی دارد. بطوری که بتوان آزمایش حفاری را با شرایط کاملاً

هرچند شناخت کامل همه عوامل و بررسی تأثیرات آنها در یک مدل تحلیلی کار بسیار دشواری است. ولی در این تحقیق تلاش شده است به برخی از پارامترهای خیلی مهم که می‌توانند در نتایج برآورد شده تأثیرگذار باشند، پرداخته شود. برخی از عوامل تأثیرگذار در فرآیند حفاری بطور ناخواسته وجود داشته و امکان تغییر در آنها وجود ندارد. تنها راه کنترل تأثیر آنها، شناخت این عوامل و اعمال تغییرات در شرایط حفاری و ابزارهای حفاری می‌باشد تا به این طریق تأثیر آنها بر روی نتایج حاصل از این فرآیند حفاری به حداقل برسد. این عوامل شامل: پارامترهای سنگ یعنی پارامترهای ساختاری، بافت، همگنی و غیر همگنی، همسانگردی و ناهمسانگردی، تخلخل، رطوبت، نوع کانی‌ها، چگالی، مکانیک رفتاری سنگ و پارامترهای محیطی (شامل تنشهای محصور و فشار حفره‌ای) هستند. مقیاس حفاری در این میان نقش مهمی داشته بطوری که حفاری در مقیاس کوچک تأثیر بسیاری از این پارامترهای محیطی را از بین برده و یا به حداقل ممکن می‌رساند. در این شرایط میتوان حفاری را بدون نیاز به سیال حفاری انجام داده و تأثیر و نقش سیال حفاری را بر روی نتایج بدست آمده از بین برد. از طرفی بدلیل تغییرات اندک ویژگیهای مختلف سنگها در ابعاد کوچک تأثیر ناهمگنی و تا حدی ناهمسانگردی در سنگ نیز از بین می‌رود و این موارد در روش میکرو حفاری بیشتر صادق می‌باشد. تأثیر تنشهای محصور در این روش که در فشار اتمسفر انجام می‌گیرد تقریباً وجود ندارد و از این نظر روش بسیار خوبی می‌باشد. ولی برخی پارامترهای عملیاتی هستند که می‌تواند بر نتایج بدست آمده تأثیرگذار باشد که در ادامه به نقش برخی از پارامترهای مهم در روش میکرو حفاری پرداخته می‌شود.

۱-۵ زاویه شیب مته

زاویه شیب مته مطابق شکل ۱- (b) بین محور عمودی مته با سطح برش مته ایجاد می‌شود و برابر α می‌باشد. این زاویه یکی از مهمترین پارامترها در تکنیک برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ از داده‌های حفاری می‌باشد. بطوری که افراد مختلفی هیب و فلوم [32]، کاراساوا و میساوا [34]، لی و فیندزیان [35]، سینور و همکاران [36] و کودزیر و ریچارد [37] به نقش و تأثیر زاویه شیب مته در فرآیند حفاری برای مته‌های خراشی و PDC پرداخته و گزارش کردند که مته‌ها در زاویه شیب بین ۱۰ الی ۲۰ درجه کمترین نیروی برشی را برای سرعت حفاری (در راستای محور مته) مورد نظر دارند و نرخ نفوذ با کاهش زاویه شیب مته در مته‌های PDC بهبود می‌یابد. جهت کنترل تأثیر زاویه شیب مته بر روی پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری تک محوره برآورد شده از داده‌های حفاری بر اساس مدل تحلیلی جدید بررسی شد. برای این منظور پارامترهای هندسی دیگر مته ثابت نگه داشته شد و تغییرات زاویه شیب مته (α) بر روی نتایج پارامترهای مقاومتی برآورد شده



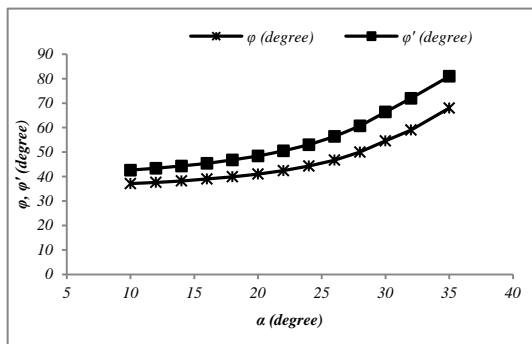
شکل ۵- نمونه‌های از گشتاور اندازه‌گیری شده توسط دستگاه حفاری در سنگ مرمر با تکرار آزمایش.

در آزمایش حفاری از مته‌های اسکنه‌ای T شکل با نوک تنگستن کاربرد مطابق شکل ۱- (c) استفاده شده است. این مته‌ها به قطر ۹ و ۱۱ میلیمتر و با زاویه شیب ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه می‌باشند. مته‌ها در دو نوع تیز (با سطح مقطع مستطیلی ضخامت انتهایی مته کمتر از ۰/۱ میلیمتر) و کند (با سطح مقطع مستطیلی و ضخامت انتهایی حداکثر ۱/۲ میلیمتر) تهیه شدند. در این آزمایشها، برای حفاری از نرخ نفوذهای ۱۸ الی ۴۸ میلیمتر در دقیقه و سرعت چرخش ۳۰۰ الی ۳۵۰ دور در دقیقه برای مته تیز و نرخ نفوذهای ۱۲ الی ۴۲ میلیمتر در دقیقه با سرعت چرخش ۳۰۰ الی ۴۰۰ دور در دقیقه برای مته کند استفاده شده است. تمام داده‌های استفاده شده برای گشتاور و نیروی بار پشت مته از میانگین نتایج بدست آمده از تکرار آزمایش همانند شکل‌های ۴ و ۵ ثبت شده اند. مجموع آزمایشهایی که با مته‌های مختلف انجام شد بیش از ۷۰ مورد بوده که هر کدام از آنها با تکرار همراه بوده است. از این تعداد آزمایش ۵۶ مورد انتخاب شدند که ۳۳ مورد با مته تیز و ۲۳ مورد آزمایش با مته کند می‌باشد. در این آزمایشها اندازه‌گیریها در سیستم متریک بوده و پارامترهای گشتاور برحسب نیوتن متر، بار پشت مته برحسب نیوتن، نرخ نفوذ برحسب میلیمتر بر دقیقه، سرعت چرخش بر حسب دور در دقیقه و عمق حفاری بر حسب میلیمتر اندازه‌گیری شده است.

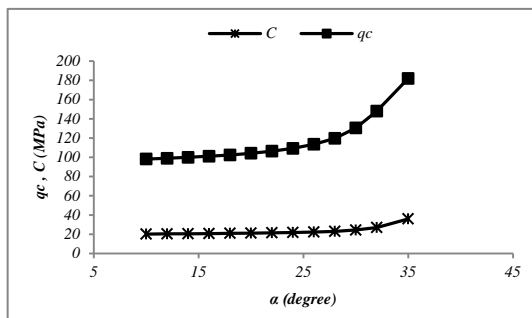
مطابق آنچه که در بخش ۳ توضیح داده شد پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره سنگ، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ بطور مستقیم برآورد می‌شود.

۵- بررسی نقش پارامترهای عملیاتی در مدل تحلیلی کلانتری و همکاران

بررسی و تعیین دامنه تأثیر پارامترهای مختلف بر نتایج مدل‌های تحلیلی یکی از مهمترین بخشهای هر مدل می‌باشد، که می‌تواند در ارزیابی قابلیت و کارایی آن مدل نقش داشته باشد.



شکل ۶- تغییرات مقادیر برآورد شده برای زاویه اصطکاک داخلی سنگ (ϕ) و زاویه اصطکاک بین سنگ بکر و زون خرد شده متراکم (ϕ') با تغییر زاویه شیب مته (α)



شکل ۷- تغییرات مقادیر برآورد شده چسبندگی (C) و مقاومت فشاری تک محوره (q_c) با تغییر زاویه شیب مته (α)

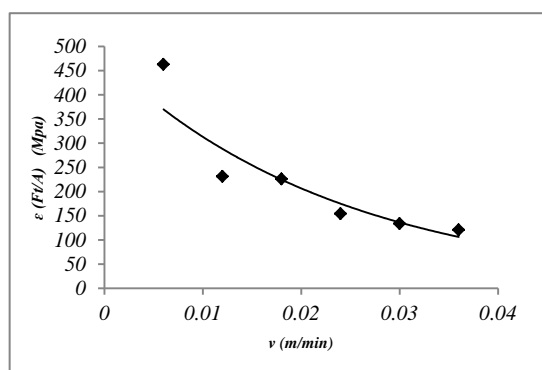
۲-۵ زاویه جانبی و زاویه گیر مته

زاویه جانبی مته مطابق شکل ۱- (b) زاویه بین محور عمود بر سطح برش مته با راستای حرکت مته بوده و برابر γ می‌باشد. براساس مطالعات صورت گرفته توسط رجب اف، افزایش زاویه جانبی باعث افزایش انرژی ویژه حفاری می‌شود. این افزایش در محدوده بین صفر الی ۳۰ درجه ناچیز بوده ولی از ۳۰ الی ۶۰ درجه قابل ملاحظه می‌باشد. [40]. در مته اسکنه‌ای با انتهای تخت استفاده شده در مدل تحلیلی جدید مطابق شکل ۱- (b) همیشه زاویه جانبی مته بر راستای برش مماس بوده بنابراین همیشه زاویه جانبی مته برابر صفر و یا کمی منفی می‌باشد. در این صورت تأثیر آن بر روی نتایج در حد صفر می‌باشد. زیرا در زاویه جانبی صفر درجه و یا منفی، بیشترین مقدار نیروی برشی از مته به سنگ انتقال می‌یابد. از این رو در این مدل نیازی به بررسی تأثیر تغییرات زاویه جانبی مته نمی‌باشد و در این مدل مقدار صفر برای زاویه جانبی گزینه مطلوبی می‌باشد. زاویه گیر مته که بین سطح جانبی مته و محور عمودی مته ایجاد می‌شود، مطابق شکل ۱- (b) برابر β می‌باشد. معمولاً این زاویه در حفاریهایی

برای سنگ مرمر ارزیابی گردید. شکل (۶) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی سنگ (ϕ) و زاویه اصطکاک بین سنگ بکر و زون خرد شده متراکم (ϕ') برآورد شده با زاویه شیبهای مختلف را نشان می‌دهد. برای رسم این نمودار حفاریهایی تحت شرایط مختلف با مته هایی به قطر ۹ و ۱۱ میلیمتری با زاویه شیبهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه انجام شده و به ازای داده‌های حفاری هر کدام از آنها، مطابق بخش ۳ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و زاویه اصطکاک بین سنگ و زون خرد شده (ϕ') محاسبه شده است و تغییرات مقدار آنها با تغییرات زاویه شیب مته (α) رسم شده است. مطابق این شکل در شرایطی که زاویه شیب مته به محدوده ۱۵ الی ۲۰ درجه نزدیک است مقدار زاویه اصطکاک داخلی برآورد شده از آزمونهای حفاری به زاویه اصطکاک بدست آمده از آزمایش استاندارد (۴۶ درجه) نزدیک است. به عبارتی وقتی زاویه شیب مته کمتر از ۲۰ درجه می‌باشد، تأثیر آن بر روی پارامترهای برآورد شده یعنی زاویه اصطکاک داخلی سنگ و اصطکاک بین زون خرد شده متراکم و سنگ خیلی کمتر می‌باشد. اما وقتی که زاویه شیب مته از ۲۰ درجه بالاتر می‌رود با افزایش آن مقادیر برآورد شده برای پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی سنگ و زاویه اصطکاک بین زون خرد شده متراکم و سنگ بکر افزایش می‌یابد. این افزایش از ۳۰ درجه به بعد به سرعت افزایش می‌یابد. استفاده از زاویه شیبهای پایین‌تر از ۱۵ درجه احتمال لب پر شدن مته در سرعت چرخشهای بالا را افزایش می‌دهد.

همین روند برای پارامترهای چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوره در نمودار شکل (۷) انجام شده است. تأثیر زاویه شیب مته بر روی چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوره برآورد شده براساس مدل تحلیلی جدید نشان می‌دهد که وقتی زاویه شیب مته مطابق شکل (۷) کمتر از ۲۵ درجه می‌باشد، تأثیر آن بر روی چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوره برآورد شده ناچیز می‌باشد. اما در زاویه شیب بزرگتر از ۲۵ درجه با افزایش زاویه شیب مته مقدار چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوره برآورد شده به تدریج افزایش می‌یابد. به عبارتی مقدار چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوره برآورد شده از آزمونهای حفاری توسط مته هایی با زاویه شیب کمتر از ۲۵ درجه به مقدار چسبندگی بدست آمده از آزمونهای استاندارد چسبندگی (۱۹/۳ مگاپاسکال) و مقاومت فشاری تک محوره (۱۰۰ مگاپاسکال) نزدیک است. تأثیر افزایش زاویه شیب مته بر روی مقدار مقاومت فشاری تک محوره سنگ برآورد شده توسط مته‌هایی با زاویه شیب ۲۵ درجه به بعد بیشتر از چسبندگی بوده و با شیب بیشتری شروع به افزایش می‌کند. از اینرو پیشنهاد می‌شود که مقادیر زاویه شیب مته در آزمایشهای تعیین پارامترهای مقاومتی سنگها بین ۱۵ الی ۲۰ درجه انتخاب شود. انتخاب زوایای خیلی کمتر از این مقدار بدلیل سرعت بالای چرخش بویژه برای مته‌های اسکنه‌ای در سنگهای سخت منجر به لب پر شدن آن خواهد شد.

دور در دقیقه انجام گرفت. مقادیر انرژی ویژه $(E = F_t^c/A)$ برای این حفاری‌ها محاسبه و تغییرات انرژی ویژه حفاری با نرخ نفوذهای مختلف به ازای هر دور چرخش مته مطابق شکل (۸) نشان می‌دهد که با افزایش نرخ نفوذ به ازای هر دور چرخش مته مقدار انرژی ویژه حفاری کاهش می‌یابد. این کاهش در نرخ نفوذهای بالاتر روند کندی یافته و تقریباً به سمت مقدار ثابت حرکت می‌کند. هرچند جهت رسیدن به مقدار ثابت نیاز به حفاری با نرخ نفوذهای بالاتر و استفاده از یک مته با تیزی ایده‌آل می‌باشد. چون کندی مته مانع از نفوذ بیشتر مته در سنگ شده و منجر به افزایش نیروی اصطکاکی انتهایی مته می‌شود. لذا در صورت کندی مته، کافی نبودن بار پشت مته و سرعت چرخش بالای مته باعث کاهش عمق نفوذ به ازای هر دور چرخش مته می‌شود که نهایتاً منجر به افزایش انرژی لازم برای حفاری واحد حجم سنگ یا همان انرژی ویژه حفاری می‌شود. این انرژی بجای صرف برش سنگ، بصورت اصطکاک در انتهای مته مصرف می‌شود. از اینرو انتخاب عمق نفوذ بالاتر می‌تواند در افزایش کارایی حفاری و کاهش خطای مقادیر برآورد شده بویژه برای چسبندگی شود.



شکل ۸- تغییرات انرژی ویژه حفاری با نرخ نفوذ در سنگ مرمر ($N=350rpm$)

۴-۵ سایش مته و جنس مته

استفاده از مته کند (با سطح انتهایی ساییده شده) جهت برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ براساس مدل کلانتری و همکاران یک ضرورت است. بیشتر مته‌های حفاری با مکانیزم برشی، سطح جلویی مته دارای روکش PDC بوده که بر روی بدنه تنگستن کارباید قرار گرفته است. وقتی که مته ساییده می‌شود سطح تماس انتهایی مته در تماس با تنگستن کارباید خواهد بود. چقرمگی بالای تنگستن کارباید نسبت به الماس شرایط اصطکاکی متفاوتی را ایجاد می‌کند. بطوریکه در این شرایط اصطکاک بین سطح انتهایی مته و سنگ بیشتر منعکس کننده اصطکاک داخلی سنگ می‌باشد [20]، [27]،

با مقیاس بزرگ جهت جلوگیری از گیر کردن مته در داخل چال بین مثبت ۵ الی ۱۰ درجه می‌باشد. اما در این تحقیق بدلیل حفاری با عمق کم و عدم وجود این مشکل، این زاویه تقریباً صفر بکارگرفته می‌شود تا از تماس مته در محدوده عمق برش با دیواره چال جلوگیری شده و منجر به ایجاد گشتاور اضافی نشود.

۳-۵ عمق برش

یکی از عواملی که در فرآیند حفاری نقش اساسی دارد و پارامترهای زیادی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، عمق برش به ازای هر دور چرخش مته می‌باشد. بررسی‌های متعددی توسط افراد مختلف در مورد انتخاب عمق برش حفاری به ازای هر دور چرخش مته چه در بحث بررسی کارایی مته‌های حفاری و چه در بحث تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ از داده‌های حفاری صورت گرفته است. بطوریکه افرادی همچون تیله [19]، چیتمن و دانیال [38]، شی و همکاران [29]، ریچارد و همکاران [39] و رجب اف و مسیکا [40] به این موضوع پرداخته و اثر این پارامتر را در نیروی برشی مماسی مته در قالب انرژی ویژه بررسی کرده و بیان داشته‌اند که با افزایش نرخ نفوذ انرژی ویژه حفاری کاهش می‌یابد. عبارتی اگر انرژی ویژه برابر نیروی مماسی برشی اعمال شده بر سنگ تقسیم بر سطح مقطع مؤثر برش باشد، مقدار این انرژی ویژه با افزایش عمق برش در همه سنگها کاهش می‌یابد و بعد از مقداری کاهش به یک مقدار ثابت می‌رسد. این مقدار ثابت همان انرژی ویژه ذاتی سنگ بوده که مستقل از عمق برش می‌باشد و مقدار آن برابر حداقل انرژی لازم برای حفاری واحد حجم سنگ می‌باشد. به گفته تیله [19] مقدار این انرژی ویژه ذاتی در فشار اتمسفر برابر مقاومت فشاری تک محوره سنگ می‌باشد. هرچند که در اکثر حفاریها عمق برش خیلی کوچک می‌باشد اما همین عمق برش از نظر تعیین نوع مد شکست در فرآیند حفاری نیز اهمیت زیادی دارد. بطوریکه بگفته ریچارد و همکاران [28] یک عمق برش بحرانی وجود دارد که اگر مقدار عمق برش از این مقدار بحرانی بیشتر باشد نوع شکست سنگ از نوع ترد (*Brittle*) بوده و در عمق برش کمتر از آن نوع شکست سنگ از نوع تغییر شکل پذیر (*Ductile*) خواهد بود و برای برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ بویژه مقاومت فشاری تک محوره از داده‌های حفاری باید عمق برش از این عمق بحرانی کمتر باشد و شرایط شکست پلاستیک حاکم شود. زیرا در عمق برشهای بالاتر امکان شکست ترد وجود داشته و پارامترهای برآورد شده دقیق نخواهد بود. در حفاری هایی با مقیاس کوچک، عمق برش همیشه کوچکتر از عمق برش بحرانی می‌باشد و شرایط شکست پلاستیک حاکم است. بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، بر مبنای حفاریهایی با نرخ نفوذهای مختلف در سنگ مرمر می‌باشد. برای این منظور حفاریهایی توسط مته تیز با قطر ۹ میلیمتری تحت نرخ نفوذهای بین ۶ الی ۳۶ میلیمتر بر دقیقه و سرعت چرخش ۳۵۰

همکاران [2] برای تصحیح داده‌های مقاومت حفاری اندازه‌گیری شده استفاده شود.

۵-۵ سرعت چرخش

سرعت چرخش مته و سرعت حفاری می‌تواند با تحت تأثیر قرار دادن نرخ نفوذ به ازای هر دور چرخش بر نتایج حفاری بویژه بر راندمان حفاری تأثیر داشته باشند. در معادله خطی $E - S$ هر دو پارامتر E و S به دلیل تقسیم شدن نیروی بار پشت مته و نیروی برشی مته بر سطح مقطع مؤثر برش $A = (v/N)D$ ، تأثیر تقریباً یکسانی بر هر دو طرف معادله دارد. این شرایط زمانی صادق است که متناسب با افزایش سرعت چرخش مته نیروی بار پشت مته نیز افزایش یابد. در غیر این صورت با افزایش سرعت چرخش مته تحت بار پشت مته ثابت فقط انرژی ویژه حفاری (E) افزایش می‌یابد و مقاومت حفاری (S) تغییری نمی‌کند. این تغییر باعث تغییر در شیب نمودار $E - S$ می‌شود. در این صورت نتایج برآورد شده نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند. افزایش نیروی بار پشت مته متناسب با افزایش سرعت چرخش می‌تواند در حفظ عمق برش مؤثر باشد و مانع از مصرف انرژی برای اصطکاک بجای برش سنگ شود. بررسی‌های انرژی ویژه حفاری نشان می‌دهد که برای حفاری‌هایی در این مقیاس سرعت حفاری بین ۳۰۰ الی ۴۰۰ دور در دقیقه برای نرخ نفوذهای ۱۲ الی ۳۶ میلیمتر در دقیقه مناسب می‌باشد. در این محدوده تغییرات انرژی ویژه حفاری متناسب با مقاومت حفاری تغییر کرده و شیب نمودار $E - S$ کمتر تحت تأثیر پارامترهای حفاری قرار می‌گیرد.

۶- نتیجه گیری

این مقاله در ادامه تحقیقات نویسنده در موضوع تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ از داده‌های حفاری بوده و با هدف تکمیل و توسعه این روش انجام شده است. در این تحقیق به نقش و تأثیر عوامل عملیاتی مختلف بر نتایج برآورد شده از این تکنیک پرداخته شد و براساس نتایج آزمونهای استاندارد تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ و نتایج آزمونهای میکروحفاری برای هر کدام از این عوامل محدوده کاربردی مناسبی پیشنهاد شد. مطابق این تحقیق؛

- از پارامترهای هندسی مته زاویه شیب مته اهمیت زیادی در تکنیک میکرو حفاری دارد و در زوایای بین ۱۵ الی ۲۰ درجه با زاویه جانبی صفر و زاویه گیر منفی پارامترهای مقاومتی برآورد شده از روش میکروحفاری با استفاده از مته‌هایی با زاویه شیب این محدوده به نتایج آزمونهای استاندارد نزدیک است. در این شرایط بیشترین مقدار نیروی برشی از مته به سنگ انتقال می‌یابد.
- عمق برش به ازای هر دور چرخش مته متاثر از دو پارامتر سرعت چرخش مته و بار پشت مته می‌باشد. استفاده از

[28]، [29]، [41] و [44]. در حالیکه این شرایط در سطح صفحه برش مته وجود ندارد. از اینرو وقتی در روش میکرو حفاری از مته‌هایی با جنس تنگستن کارباید استفاده می‌شود در سطح انتهایی و سطح صفحه برش مته شرایط اصطکاکی یکسانی حاکم می‌باشد. وقتی که مته ساییده می‌شود سطح انتهایی آن افزایش یافته و نیروی عمودی لازم برای حفظ نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. همزمان به دلیل افزایش سطح تماس در انتهای مته منجر به افزایش نیروی اصطکاک انتهایی مته می‌شود. بنابراین در یک نرخ نفوذ ثابت با افزایش سایش مته فقط مقاومت حفاری و انرژی ویژه حفاری افزایش می‌یابد. چون هر دو متناسب با هم افزایش می‌یابد. از اینرو تغییری در شیب نمودار $E - S$ مته کند ایجاد نخواهد کرد. از آنجایی که از شیب روابط خطی (۱) و (۲) برای برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ استفاده می‌شود، در رابطه (۱) شیب نمودار تابعی از θ_f و در رابطه (۲) شیب نمودار تابعی از θ'_f و α می‌باشد که α زاویه شیب مته بوده و مربوط به هندسه مته می‌باشد و θ'_f بیانگر اصطکاک بین مته و سنگ بوده و بیشتر به جنس مته و سنگ بستگی دارد و ارتباطی با میزان سایش سطح انتهایی مته ندارد. از اینرو در مدل کلانتری و همکاران میزان تغییر سایش مته تأثیری در زاویه اصطکاک برآورد شده ندارد و تنها باعث خواهد شد که مقادیر بدست آمده برای مقاومت حفاری و انرژی ویژه حفاری متناسب با شیب نمودار مقادیر بالاتری بدست آیند. در رابطه (۱) عبارت عرض از مبدأ تابعی از شیب نمودار ($\tan\theta_f$) و پارامترهای φ ، φ' ، α و C می‌باشد که بیشتر متاثر از پارامترهای سنگ و زون خرد شده متراکم می‌باشد و اثری از سایش مته مشاهده نمی‌شود. این موضوع استفاده از تکنیک میکرو حفاری برای برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ با نرخ نفوذهای پایین را توجیه می‌کند. ولی پیشنهاد می‌شود جهت کسب نرخ نفوذهای بالاتر و داشتن راندمان حفاری بهتر در شرایطی که از مته‌هایی با قطر نزدیک ۱۰ میلیمتر استفاده می‌شود سطح مقطع ساییده شده مته در محدوده ۱۰ الی ۱۲ میلیمتر مربع حفظ شود. زیرا افزایش ساییدگی انتهای مته منجر به کاهش نرخ نفوذ و افزایش مقاومت حفاری می‌شود و با کاهش نرخ نفوذ، انرژی ویژه حفاری افزایش می‌یابد. این امر موجب می‌شود که نقاط بدست آمده در نمودار خطی $E - S$ برای مته کند در فاصله دورتری از نقطه برش (محل طلاقی نمودارهای خطی مته کند و مته تیز) قرار گیرند و نقطه برش بدست آمده از محل تقاطع نمودارهای مته کند و تیز دقیق نباشد و باعث خطای بیشتر در برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ از داده‌های حفاری شوند. معمولاً وقتی از روش میکرو حفاری در ارزیابی هوازدگی و یا در ارزیابی مقاومت نسبی سنگ و هر مصالح دیگر استفاده می‌شود، تنها پارامتر نیروی عمودی مته تحت عنوان مقاومت حفاری اندازه‌گیری و استفاده می‌شود. در این شرایط کنترل ساییدگی مته ضرورت داشته و توصیه می‌شود جهت کنترل تأثیر ساییدگی مته از روش پیشنهادی دلگادو و

تنش برشی در صفحه گسیختگی سنگ	MPa	τ
تنش عمودی در صفحه گسیختگی سنگ	MPa	σ
مؤلفه نیروی عمودی مته	N	F_n
مؤلفه نیروی مماسی مته که عمود بر محور مته می‌باشد	N	F_t
نیروی عمل کننده بر صفحه برش مته	N	F^c
نیروی اصطکاکی عمل کننده در سطح سایش مته	N	F^w
مؤلفه عمودی نیروی عمل کننده بر صفحه برش مته	N	F_n^c
مؤلفه افقی نیروی عمل کننده بر سطح برش مته	N	F_t^c
مؤلفه عمودی نیروی اصطکاکی عمل بر سطح سایش مته	N	F_n^w
مؤلفه مماسی نیروی اصطکاکی عمل بر سطح سایش مته	N	F_t^w
زاویه صفحه گسیختگی سنگ نسبت به افق	$degree$	ψ
زاویه شیب مته	$degree$	α
اصطکاک بین مته و زون خرد شده در صفحه برش	$degree$	θ_f
اصطکاک بین سطح انتهایی مته و سنگ	$degree$	θ'_f
زاویه اصطکاک داخلی سنگ	$degree$	ϕ
اصطکاک بین سنگ بکر و زون خرد شده متراکم	$degree$	ϕ'
چسبندگی ذاتی سنگ	MPa	C
عمق برش	m	d
قطر مته	m	D
سطح مقطع مؤثر برش	m^2	A
گشتاور مته	$N.m$	T
سرعت چرخش مته	rpm	N
انرژی ویژه حفاری سنگ	$MPa \text{ or } N.m/m^3$	E
مقاومت حفاری سنگ	MPa	S
سرعت حفاری	m/min	v

سرعت‌های چرخش بالا و بار پشت مته پایین منجر به نتایج غیر واقعی بویژه در چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوره می‌شود. در این مقیاس از حفاری، نرخ نفوذهای بالای ۱۲ میلیمتر در دقیقه، سرعت چرخش زیر ۴۰۰ دور در دقیقه مناسب می‌باشد.

- در روش میکرو برای برآورد مقاومت فشاری سنگ شکست پلاستیک ضرورت دارد. حفاری با عمق برش بیشتر منجر به شکست ترد در سنگ و حفاری با عمق برش کمتر منجر به شکست پلاستیک در سنگ می‌شود. برای این هدف عمق برش بحرانی مد نظر است که در شرایط حفاری پایدار فراهم می‌شود.
- در روش میکرو حفاری استفاده از مته کند (با سطح انتهایی سایید شده) جهت برآورد پارامترهای مقاومتی سنگ یک ضرورت می‌باشد. ولی ساییدگی انتهای مته در صورت حفظ عمق برش تأثیری بر روی پارامترهای مقاومتی برآورد شده سنگ ندارد. زیرا در روش میکرو حفاری نقش اصطکاک صفحه برش در جلوی مته نسبت به سطح انتهایی مته جهت برآورد زاویه اصطکاک داخلی سنگ بیشتر می‌باشد. ولی جهت حفظ عمق برش مناسب، سطح سایش مته کند برای قطرهای زیر ۱۰ میلیمتر بیش از ۱۲ میلیمتر مربع توصیه نمی‌شود.
- در یک نرخ نفوذ ثابت با افزایش سایش مته فقط مقاومت حفاری و انرژی ویژه حفاری افزایش می‌یابد و تأثیری بر روی پارامترهای برآورد شده ندارد.
- چقرمگی بالای تنگستن کارباید نسبت به الماس شرایط اصطکاکی متفاوتی را ایجاد می‌کند. بطوریکه در این شرایط اصطکاک بین سطح انتهایی مته و سنگ بیشتر منعکس کننده اصطکاک داخلی سنگ می‌باشد.

۷- سپاس‌گزاری

در اینجا لازم می‌دانم از راهنمایی و همکاری اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر علیرضا باغبانان عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان و جناب آقای دکتر حمید هاشم‌الحسینی عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان تشکر کنم.

۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
τ_0	MPa	تنش مماسی در زون خرد شده
σ_0	MPa	تنش هیدرواستاتیک در زون خرد شده

۹- منبع ها

- The Wear of Milled Tooth Bits Using MWD Torque And Weight-on-Bit. Drilling Conference (pp. 453–462). New Orleans: SPE/IADC 13475.
- [16] Pessier R.C., J., & Fear M. (1992). Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers (pp. 373-388). Washington: SPE.
- [17] Warren T. M. (1987). Penetration Rate Performance of Roller Cone Bits. SPE Drilling Engineering, 9-18.
- [18] Li Z., & Itakura K.-i. (2012). An Analytical Drilling Model of Drag Bits for Evaluation of Rock Strength. The Japanese Geotechnical Society Soils and Foundations(216–227). doi:10.1016/j.sandf.2012.02.002).
- [19] Teale R. (1965). The Concept of Specific Energy in Rock Drilling. Int. J. Rock Mech. Mining Sci, 57-73.
- [20] Detournay E., & Defourny E. (1992). A Phenomenological Model for the Drilling Action of Drag Bits. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 13-23.
- [21] Gerbaud L., Menand S., & Sellami, H. (2006). PDC Bits: All Comes From the Cutter Rock Interaction. the IADC/SPE Drilling Conference held in Miami, 21–23 February. Florida, U.S.A.: SPE.
- [22] Chiaia B., Brunetto M. B., & Carpinteri A. (2013). Mathematical Modeling of the Mechanics of Core Drilling in Geomaterials. Machining Science and Technology(1-25). DOI: 10.1080/10910344.2012.747881.
- [23] Wojtanowicz A. K., & Kuru E. (1993). Mathematical Modeling of PDC Bit Drilling Process Based On a Single-Cutter Mechanics. (Vol. 115 – 247). Journal of Energy Resources Technology, (115). doi:10.1115/1.2906429.
- [24] Nakajima I., & Kinoshita S. (1979). Theoretical Studies on Cutting Force of Rock Fracture Mechanism in Rock Cutting. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 49-55.
- [25] Roxborough F. F., & Philips H. R. (1975). Rock Excavation By Disc Cutter. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 361-366.
- [26] Hareland G., & Rashidi B. (2010). A Drilling Rate Model for Roller Cone Bits and Its Application. International Oil & Gas Conference and Exhibition (pp. 1-7). Beijing, China: SPE.
- [27] Richard T., Dagrain F., Poyol E., & Detournay E. (2012). Rock Strength Determination From Scratch Tests. Engineering Geology(91-100). doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.011.
- [28] Richard T., Detournay E., Drescher A., Nicodeme P., & Fourmaintraux D. (1998). The Scratch Test As a Means To Measure Strength of Sedimentary Rocks. SPE/ISRM 47196, 15-23.
- [29] Schei G., Fjaer E., Detournay E., & Zausa F. [1] Pamplona M., Kocher M., Snethlage R., & Barros L. A. (2007). Drilling Resistance: Overview and Outlook. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, D-70176, 158: 665–676.
- [2] Delgado Rodrigues J., & Costa D. (2004). A New Method for Data Correction in Drill Resistance Tests for the Effect of Drill Bit Wear. International Journal for Restoration, 10, 1 –18.
- [3] Fratini F., Rescic S., & Tiano P. (2006). A New Portable System for Determining the State of Conservation of Monumental Stones. Materials and Structures(139–147). DOI 10.1617/s11527-005-9013-8.
- [4] Del Monte E., & Vignoli A. (1-2 Settembr 2008). In situ mechanical characterization of the mortar in masonry buildings with DRMS. SACoMaTiS 2008 International RILEM Conference. Como Lake – Italy.
- [5] Costa D., Magalhães A., & Veiga R. (2012). Characterization of Mortars Using DRMS: Tests on Field Panels Samples. LNEC, Lisbon, Portugal: HMC.
- [6] Felicetti R. (2006). The Drilling Resistance Test For The Assessment of Fire Damaged Concrete. Cement & Concrete Composites, 321-329.
- [7] Tiano P., & Rescic S. (2004). New Diagnostic Tools For In-situ Evaluation of Conservative Treatments For Monumental Stones. EAS Conference, November 15 – 18. Somerset: NJ.
- [8] Valentini E., Benincasa A., Tiano P., Fratini F., & Rescic S. (2008). On Site Drilling Resistance Profiles of Natural Stones. Italy: SINT Technology s.r.l.
- [9] Karasawa H., Ohno T., Kosugi M., & Rowley J. C. (2002). Methods to Estimate the Rock Strength and Tooth Wear While Drilling With Roller-Bit Part 2 Insert Bits. Journal of Energy Resources Technology (133-139). DOI: 10.1115/1.1482406#.
- [10] Karasawa H., Ohno T., Kosugi M., & Rowley J. C. (2002). Methods to Estimate the Rock Strength and Tooth Wear While Drilling With Roller-Bits Part 1 Milled-Tooth Bits. Journal of Energy Resources Technology(125-131). DOI: 10.1115/1.1482405#.
- [11] Ohno T., Karasawa H., Kosugi M., & Rowley, J. C. (2004). Proposed Practical Methods to Estimate Rock Strength and Tooth Wear While Drilling With Roller-Cone Bits. Journal of Energy Resources Technology, 302-310.
- [12] Bingham M. G. (1964). How Rock Properties Are Related to Drilling. Oil & Gas Journal, 94-101.
- [13] Wolcott D.S. R., & Bordelon D. (1993). Lithology Determination Using Downhole Bit Mechanics Data. 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers (pp. 769-778). Texas: Society of Petroleum Engineers.
- [14] Hoberock L. L., & Bratcher G. J. (1996). A New Approach for Determining In-Situ Rock Strength While Drilling. Journal of Energy Resources Technology, 118, 249-255.
- [15] Burgess T. M., & Less W. G. (1985). Measuring

- [37] Cheatman J. B., & Daniels W. (1979). A Study of Factors Influencing the Drillability of Shales: Single Cutter Experiments With Stratapax Drill Blanks. *J. Energy Resour. Technol.*, (101). doi:10.1115/1.3446918.
- [38] Richard T., Coudyzer C., & Desmette S. (2010). Influence of Groove Geometry and Cutter Inclination in Rock Cutting. 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City: ARMA 10-429.
- [39] Rajabov V., & Miska S. Z. (2012). The Effects of Back Rake and Side Rake Angles on Mechanical Specific Energy of Single PDC Cutters with Selected Rocks at Varying Depth of Cuts and Confining Pressures. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 6-8 March. San Diego, California, USA : Society of Petroleum Engineers.
- [40] Detournay E., Richard T., & Shepherd M. (2008). Drilling Response of Drag Bits: Theory and Experiment. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*(1347–1360). doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.010.
- [41] Mellor M., "Mechanics of Cutting and Boring. Part 2: Kinematics of Axial Rotation Machines", Report 76-16, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, USA, 1978.
- [42] Chiaia B., Borri-Brunetto M., Carpinteri A., "Mechanical modelling of the mechanics of core drilling in geomaterials", *Machining Science and Technology*, Vol. 17, p 1-25, 2013.
- [43] Adachi J., Detournay E., & Andrew D. (1996). Determination of rock strength parameters from cutting tests. *Rock Mechanics Tools and Techniques*. 2nd North American Rock Mechanics Symposium. Balkema, Rotterdam.
- [۴۴] کلانتری سجاد، " تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از داده‌های حفاری(بروش تحلیلی و آزمایشگاهی)" پایان نامه دکترا، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۷
- (2000). The Scratch Test: An Attractive Technique for Determining Strength and Elastic Properties of Sedimentary Rocks. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas.
- [30] S.Kalantari, H.Hashemolhosseini, A.Baghbanan (2018). Estimating rock strength parameters using drilling data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45-52.
- [31] S.Kalantari, A.Baghbanan, H.Hashemolhosseini (2019). An analytical model for estimating rock strength parameters from smallscaledrilling data. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 135-145.
- [31] Hibb L. E. J., L. J., & Flom D. G. (1978). Diamond Compact Cutter Studies for Geothermal Bit Design. *Journal of Pressure Vessel Technology*(doi:10.1115/1.3454488), 406-416.
- [32] Hoover E. R., & Middleton J. N. (1981). Laboratory Evaluation of PDC Drill Bits Under High-Speed and High-Wear Condition. *Journal of Petroleum Technology*, 2316-2321.
- [33] Karasawa H., & Misawa S. (1992). Laboratory Testing to Design PDC Bits for Geothermal Well Drilling. *Drilling Technology ASME, PED*, 40, 135-141.
- [34] Li X., & Find Xian X. (1993). Wear and Damage to PDC Bits. *Unsolicited Paper SPE 26294*.
- [35] Sinor L. A., Powers J. R., & Warren T. M. (1998). The Effect of PDC Cutter Density, Back Rake Size and Speed on Performance. IADC/SPE Drilling Conference, 3-6 March., Dallas, Texas.
- [36] Coudyzer C., & Richard T. (2005). Influence of the Back and Side Rake Angles in Rock Cutting. AADE-05-NTCE- 75 - Proceedings of National Technical Conference and Exhibition. Texas.

