

# شبیه‌سازی عددی اثر تنش‌های برجا بر روی انرژی ویژه تیغه PDC با استفاده از روش المان مجزا

امیرحسین مزروعی، محمد فاتحی مرجی، مهدی نجفی\* و محسن محبی  
گروه استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۱

## چکیده

در حفاری چاه‌های نفت و گاز، یکی از عوامل موثر و تاثیرگذار در نرخ نفوذ حفاری و مقدار انرژی ویژه (انرژی مورد نیاز برای حذف حجم واحدی از سنگ)، فشار محصورکننده یا به عبارتی دیگر فشار ته چال است. عملیات برش سنگ ترکیبی از دو حالت شکست شکننده و تغییر شکل‌پذیر است. هر کدام از این حالات شکست، تاثیر متفاوتی بر روی انرژی ویژه و ساختار مواد خرد شده و در نتیجه نرخ نفوذ حفاری دارد. در این مقاله جهت درک ارتباط بین حالت شکست سنگ و فشار محصورکننده و تاثیر آن بر روی انرژی ویژه از روش عددی المان مجزا استفاده شده است. برای این منظور در این تحقیق از نرم‌افزار عددی کد جریان اجزاء که رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای را با روش المان‌های مجزا شبیه‌سازی می‌کند، استفاده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده در شرایط بدون فشار، نیروی اعمالی از تیغه باعث شکست اتصالات بین دانه‌ای در یک صفحه‌ای شکست می‌شود. اما در شرایط فشار محصورکننده، مکانیزم متفاوتی در حال وقوع است و اختلاف فشار به‌وجود آمده باعث نگه داشتن مواد خرد شده بر روی همدیگر و افزایش انرژی ویژه می‌شود. همچنین تا فشار حدود ۲۶ MPa با افزایش میزان تنش، انرژی ویژه افزایش نسبتاً خطی دارد. اما بعد از این فشار به‌دلیل افزایش تنش‌های محصورکننده و شرایط نزدیک به لیتواستاتیک، روند افزایشی انرژی ویژه نسبت به افزایش عمق کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** روش عددی المان مجزا، شکست سنگ، انرژی ویژه، تنش برجا و نرم‌افزار PFC2D

مقدمه  
بهره‌برداری از منابع نفت و گاز انجام می‌شود. استفاده از انرژی یک مته حفاری جهت تکه تکه کردن و ایجاد حفره در سنگ، عملی رایج در مکانیزم نفوذ سنگ است.

در صنعت نفت، حفاری سنگ به‌منظور اهداف زیادی از جمله اکتشاف و توسعه میادین هیدروکربوری جهت

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی: mehdinajafi@yazd.ac.ir  
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3253.2502)

فروتنی، تعادل، تعادل و فراتعادل انجام شده است. در شرایط حفاری فرا تعادلی افزایش سه برابری در انرژی ویژه و در شرایط حفاری زیر فشار تعادل کاهش شدید در مقاومت سنگ و انرژی ویژه قابل مشاهده است [۶]. اولین کار انجام شده برای شبیه‌سازی عددی برش سنگ، با استفاده از روش عددی المان محدود FEM بر روی تیغه خراشی<sup>۹</sup> انجام شده است [۷]. همچنین از روش المان محدود برای شبیه‌سازی عمل برش، توسط تیغه برش PDC و شبیه‌سازی فشار ته چاه استفاده شده است [۸-۹]. تلاش‌های برای شبیه‌سازی روند برش سنگ با استفاده از روش عددی المان مجزا و با استفاده از نرم‌افزار عددی کد جریان اجزاء<sup>۱۰</sup> انجام شده است. محققان موفق شدند که وزن روی مته، سرعت روی مته و فشار گل حفاری شبیه‌سازی نمایند و به بررسی تاثیر این عوامل بر روی نرخ نفوذ و انرژی ویژه پردازند [۱۰ و ۱۱]. بنا به مطالعات انجام شده با استفاده از روش عددی المان مجزا DEM، یک ارتباط مستقیم و قابل سنجش بین فشار محصورکننده، انرژی ویژه و انتقال حالت شکست از شکننده به تغییر شکل پذیر وجود دارد و افزایش فشار ته چاه در وزن روی مته ثابت باعث کاهش نرخ نفوذ حفاری می‌گردد [۱۲-۱۴]. همچنین با استفاده از روش عددی ناپیوستگی جابه‌جایی و المان مجزا مطالعاتی بر روی ابزار برش جهت بررسی تاثیر فشار محصورکننده بر روی مکانیزم انتشار ترک و انرژی ویژه در یک نمونه سنگ مصنوعی انجام شده است [۱۵-۱۸].

این نوع حفاری یک فرآیند مکانیکی بر روی سنگ است و از مته‌های مختلف PDC<sup>۱</sup>، هیبریدی و مخروطی جهت این کار می‌توان استفاده نمود [۱]. از جمله عوامل تاثیرگذار بر روی نرخ نفوذ حفاری ROP<sup>۲</sup>، مشخصات سنگ، نوع مته، وزن روی مته WOB<sup>۳</sup>، سرعت روی مته RPM<sup>۴</sup>، هیدرولیک مته، گل حفاری و فشار ته چاه BHP<sup>۵</sup> هست [۲]. عملیات حفاری در یک عمق زیاد با تنش‌های بالا بر روی سطح سنگ در حال حفاری همراه است. همچنین مشاهده شده است که نرخ نفوذ به‌طور چشم‌گیری زیر فشار ته چاه کاهش می‌یابد [۲]. تا سال ۱۹۵۰ صنعت نفت از تاثیر فشار ته چاه بر روی سنگ و روند حفاری بی اطلاع بوده است [۳]. فشار محصورکننده تاثیر به‌سزایی در رفتار سنگ دارد. فشار محصورکننده در ته چاه با تفاضل بین فشار حاصل از ستون سیال حفاری درون چاه و فشار سازند یا فشار داخلی سنگ مساوی است. این کمیت معمولاً با عبارت تفاضل فشار یا  $\Delta P$  بیان می‌شود. مقدار  $\Delta P$  وضعیت چاه را از نظر فروتعادلی، تعادلی و فراتعادلی مشخص می‌کند. هر یک از این حالات چاه، به‌همراه دما و سرعت، تغییر شکل مکانیسم‌های شکست سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد و حفاری را دشوارتر می‌سازد [۱ و ۳]. پس از خرد شدن سنگ، به‌دلیل فشار ستون گل، مواد خرد شده بر روی هم ننگه داشته می‌شود و این امر باعث افزایش کار انجام شده و کاهش بهره‌وری حفاری می‌شود [۴]. جهت بررسی تاثیر فشار محصورکننده بر روی انرژی ویژه MSE<sup>۶</sup> و بهره‌وری حفاری آزمایش‌هایی با استفاده از تیغه PDC به قطر ۱۳ mm بر روی دو نمونه سنگ، ماسه سنگ و مرمَر در فشار محصورکننده بین صفر تا ۱۰۰۰ psi انجام شد. افزایش فشار محصورکننده به‌طور چشم‌گیری باعث افزایش انرژی ویژه و کاهش بهره‌وری حفاری به نصف آن می‌شود که دلیل آن تغییر حالت شکست سنگ از شکننده<sup>۷</sup> به تغییر شکل پذیر<sup>۸</sup> است [۵]. علاوه بر این مطالعات آزمایشگاهی جهت شبیه‌سازی حفاری در شرایط

1. Polycrystalline Diamond Compact (PDC)

2. Rate of Penetration (ROP)

3. Weight on Bit (WOB)

4. Round Per Minute (RPM)

5. Borehole Pressure (BHP)

6. Mechanical Specific Energy (MSE)

7. Brittle

8. Ductile

9. Drag Bit

10. Particle Flow Code 2D

انرژی را دارد [۱۹]. از آنجا که مدل عددی در شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی نماینده سنگ واقعی است، از این‌رو باید از ذرات دیسکی با اتصال تماسی - موازی بین دیسک‌ها استفاده شود. باید در توالی‌های مکرر پارامترهای میکرومکانیکی اتصال‌های تماسی - موازی، نظیر مدول یانگ تماسی  $E$ ، نسبت سختی‌های نرمال و برشی در اتصال تماسی  $K_n/K_s$ ، مدول یانگ اتصال موازی  $\bar{E}$ ، نسبت سختی‌های نرمال و برشی در اتصال موازی، میانگین مقاومت نرمال اتصال موازی  $(Mean)$   $\sigma_n$ ، میانگین مقاومت برشی اتصال موازی  $(Mean)$   $\tau_n$ ، را تغییر می‌دهد تا رفتار تک‌محوره، سه‌محوره و برزلی و کشش مستقیم مدل با نمونه‌های آزمایشگاهی یکسان شود. همچنین در آزمون عددی تک‌محوره باید مدول الاستیک، ضریب پواسون، تنش شروع ترک و مقاومت تک‌محوره و در آزمون عددی سه‌محوره پوش هوک - براون و در آزمون عددی برزلی و کشش مستقیم مقاومت کششی مدل با نمونه آزمایشگاهی کالیبره شود [۲۰ و ۱۹]. این نرم‌افزار با داشتن منطقی وسیع، مدل‌سازی مصالح جامد را آسان نموده و آن‌ها را مانند مجموعه‌ای از ذرات در کنار هم مدل می‌نماید. این روند منطقی به‌وسیله مجموعه دستوراتی به‌صورت فیش در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. عمده مزایای این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم‌افزارهای المان‌جزا عبارت است از [۱۹]:

- تشخیص تماس بین اجزا دیسکی ساده‌تر از تشخیص اتصال و تماس بین سطوح بلوکی شکل و گوشه‌دار (در نرم‌افزارهای UDEC و 3DEC) است.
- هیچ محدودیتی در رابطه با بزرگی جابه‌جایی مدل وجود ندارد و باعث نزدیکی مدل ساخته شده به واقعیت می‌شود.

در این تحقیق شرایط انتخاب شده برای مدل براساس کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه بوده است.

مطالعات آزمایشگاهی بر روی روند برش سنگ جهت درک بهتر عکس‌العمل ابزار برش با سنگ انجام می‌گردد و این امکان را فراهم می‌سازد که درکی بهتر از ارتباط بین نیروهای برش و فاکتورهای تاثیرگذار بر آن داشته باشیم. با این حال آزمایش‌ها هزینه بالایی دارند و اجرای بعضی از آن‌ها با مشکلاتی همراه است. مدل‌های کامپیوتری در چند دهه گذشته به کمک محققان آمده‌اند. مدل‌های کامپیوتری برای ثابت کردن یا تقویت فرضیه‌های که قبلاً توسط کارهای آزمایشگاهی یا مدل‌های تحلیلی ایجاد شده بودند، استفاده می‌شوند. نرخ نفوذ پایین و کاهش بهره‌وری حفاری همیشه به‌عنوان یک چالش در صنعت نفت بوده است. برای غلبه بر این چالش فهم اساسی مکانیزم برش سنگ لازم است. با این حال به‌دلیل پیچیده بودن عکس‌العمل ابزار برش با سنگ در شرایط فشار محصورکننده، فهمیدن این روند پیچیده است. بنابراین در این مطالعه از روش عددی المان‌جزا جهت فهم بهتر تاثیر فشار محصورکننده و تنش‌های برجا بر روی مکانیزم شکست سنگ و انرژی ویژه در حفاری چاه نفت استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره، پارامترهای میکرومکانیکی سنگ آهک اعتبارسنجی شده و سپس با شبیه‌سازی وزن اعمالی روی مته، فشار گل حفاری و فشار محصورکننده، روند برش سنگ توسط تیغه PDC مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

### شبیه‌سازی عددی

#### مدل عددی

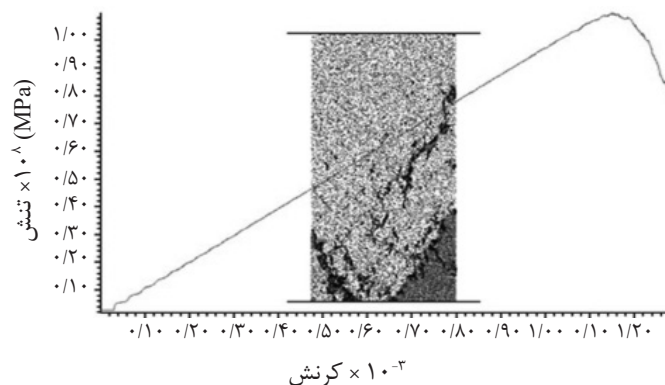
روش عددی المان‌جزا را می‌توان برای تحلیل تنش و تغییر شکل در سازه‌های زیرزمینی با وجود ناپیوستگی درون محیط استفاده کرد. نرم‌افزار PFC2D علاوه بر شبیه‌سازی شروع و گسترش ترک، قادر به فراهم کردن امکان شمارش تعداد و پیگیری مکان ترک‌ها و مقایسه آن‌ها با ثبت و نمایش

کششی در مدل هستند. در مجموع ۱۸۲۵ ترک در نمونه ایجاد شده است، که شامل ۵۶۷ ترک برشی و ۱۲۵۸ ترک کششی هست. همان‌گونه که مشخص است گسیختگی اصلی در مدل از اتصال ترک‌های کششی که در مدل رشد کرده‌اند حاصل می‌گردد. کرنش محوری در مدل با ثبت جابه‌جایی صفحات بالا و پایین اندازه‌گیری می‌شود. کرنش جانبی نیز با ثبت جابه‌جایی جفت دیسک‌های جانبی که در امتداد محور X و در مرکز سطح نمونه قرار گرفته‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. مدول یانگ ۵۰٪ نسبت پواسون ۵۰٪ و مقاومت تک‌محوره از طریق این شبیه‌سازی قابل اندازه‌گیری است. نتایج شبیه‌سازی عددی در رابطه با آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره، در این تحقیق با نتایج عددی و آزمایشگاهی سنگ آهک تطابق مناسبی دارد، که در جدول ۲ نشان داده شده است.

در این تحقیق از پارامترهای میکرومکانیکی سنگ آهک استفاده شده است [۱۰]. در ابتدا با استفاده از آزمون عددی تک‌محوره، اعتبارسنجی و سپس جهت شبیه‌سازی برش سنگ مورد استفاده قرار گرفته است تا بتوان اطلاعات مورد نیاز ماکرو برای نرم‌افزار PFC را به دست آورد. در جدول ۱ پارامترهای میکرومکانیکی استفاده شده نشان داده شده است. از آنجایی که مدل عددی در این شبیه‌سازی باید نماینده سنگ سیمانی شده باشد، لذا از اتصال‌های تماسی - موازی بین دیسک‌ها استفاده شده است. در آزمایش تک‌محوره باید مدول الاستیک، ضریب پواسون و مقاومت تک‌محوره کالیبره گردد. نمودار تنش - کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره و الگوی شکست مدل عددی در شکل ۱ نشان داده شده است. خطوط قرمز و سیاه به ترتیب نشانگر ترک‌های برشی و

جدول ۱ پارامترهای میکرومکانیکی استفاده شده برای مدل عددی در PFC2D [۱۰]

سنگ آهک	میکروپارامترها	سنگ آهک	میکروپارامترها
۸۳	مدول یانگ اتصال موازی E (GPa)	دیسکی	نوع ذره
۳/۸	نسبت سختی‌های اتصال موازی $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)$	۲۶۲۰	دانسیته $\text{kg/m}^3$
۰/۵	ضریب اصطکاک	۰/۳	مینیمم شعاع دیسک $D_{\min}$
۹۱	مقاومت نرمال اتصال موازی $\bar{\sigma}_c$ (MPa)	۱/۶۶	نسبت بیشینه شعاع ماکزیمم به شعاع مینیمم دیسک $D_{\max}/D_{\min}$
۹۱	مقاومت برشی اتصال موازی $\bar{\tau}_c$ (MPa)	۰/۵	ضریب میرایی (a)
۵۵	چسبندگی اتصال موازی (MPa)	۸۳	مدول یانگ تماسی E (GPa)
۰	زاویه اصطکاک اتصال موازی (degree)	۳/۸	نسبت سختی‌های اتصال تماسی



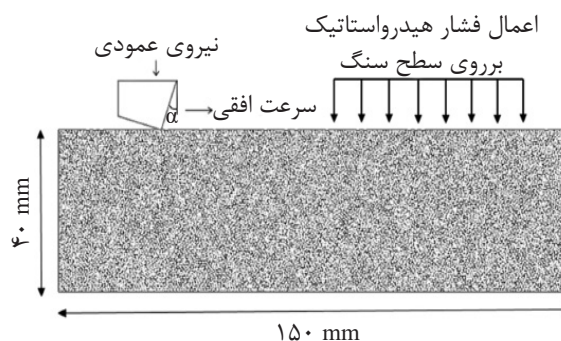
شکل ۱ نمودار تنش - کرنش حاصل از مدل‌سازی عددی و الگوی شکست مدل PFC2D (سنگ آهک)

جدول ۲ پارامترهای ماکرومکانیکی سنگ آهک مورد استفاده در تحلیل نرم افزار PFC2D

نتایج سنگ آهک کارتچ	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ ۵۰٪ (GPa)
آزمایشگاهی [۸]	۱۰۰	۰/۲۹	۷۶
شبیه سازی عددی مقاله [۸]	۱۱۵	۰/۲۶	۹۲
شبیه سازی عددی در این تحقیق	۱۰۸	۰/۲۵	۹۷

## مدل برش سنگ

جهت شبیه سازی برش سنگ در شرایط تحت فشار محصورکننده تیغه برش PDC به قطر ۱۳ mm با زاویه شیب عقب ( $\alpha$ )،  $20^\circ$  در فاصله ۳۰ mm از ابتدا نمونه ای با ابعاد ۴۰×۱۵۰ mm مطابق با شکل ۲ قرار داده شده است و با سرعت افقی ثابت ۱/۵ m/s و وزن روی مته ثابت ۱۰۰۰۰ N با اندازه ۳۵ mm برروی سطح سنگ در پنج عمق مختلف مطابق با داده های جدول ۳ حرکت داده شده است.



شکل ۲ نمونه ساخته شده جهت شبیه سازی برش سنگ

جدول ۳ مدل های عددی شبیه سازی شده در ۵ عمق مختلف

تعداد تست انجام شده	عمق حفاری (m)	تنش های برجا (MPa)
۱	۰	۰
۲	۵۰۰	۱۲/۸۵۱۱
۳	۱۰۰۰	۲۵/۷۰۲۲
۴	۱۵۰۰	۳۸/۵۵۳۳
۵	۲۰۰۰	۵۱/۴۰۴۴

نتایج حاصل از این شبیه سازی ها در دو قسمت مجزا ارائه شده است. لازم به ذکر است در این تحقیق مقدار تنش های قائم و افقی برابر در نظر گرفته شده است ( $K=1$ ) و فرض شده است که

شرایط به لیتواستاتیک نزدیک است.

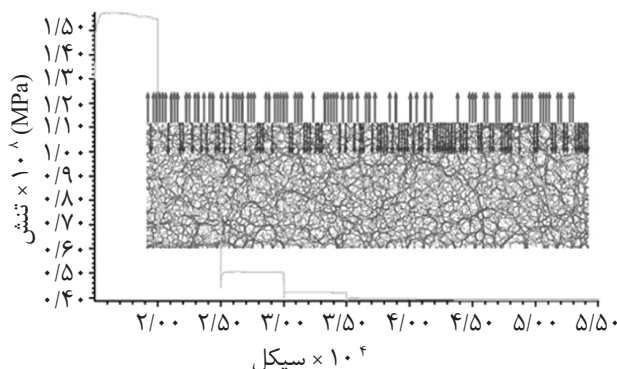
در حفاری چاه، به طور معمول وزن اعمالی روی مته (WOB) توسط اپراتور حفاری کنترل می شود. همچنین نرخ نفوذ (یا جابه جایی عمودی برش دهنده) خروجی سیستم است [۱]. در شبیه سازی با عمق برش ثابت، جابه جایی عمودی برش دهنده ثابت است، که این یک تضاد به حساب می آید و نیروی های عکس العملی برروی برش دهنده (که دلالت بر وزن روی مته دارد) خروجی سیستم است. در حالی که این روش راه حل مناسبی برای توصیف کردن عکس العمل نیروی اعمالی به سنگ است، ولی در کل استدلال استفاده از آن برای وزن اعمالی روی مته ناموفق است [۲۱]. در این تحقیق جهت شبیه سازی WOB در نرم افزار PFC2D از مکانیزم کنترل خودکار<sup>۱</sup> استفاده شده است [۱۹]. مکانیزم کنترل خودکار در واقع دیواری است، که در قالب یک سری از توابع فیش به کار گرفته شده است. آن ها معمولاً برای حفظ تنش های ثابت برروی دیوارها در طول شبیه سازی به کار می رود. بیش تر توابعی که تست دو محوره را کنترل می کنند، از این مدل هستند. در واقع در این قسمت از مکانیزم کنترل خودکار برای حفظ یک نیروی محوری خاص برروی برش دهنده جهت شبیه سازی WOB اعمالی استفاده شده است. مکانیزم خودکار نیروهای متعادل فعال در جهت عمودی برروی برش دهنده را اندازه گیری می کند و آن را با نیروی مشخص شده توسط کاربر مقایسه می کند که نیروهای متعادل خروجی، حاصل جمع نیروی های اعمالی ذرات به برش دهنده هستند.

1. Servo-control

$$\sigma_z = \int_0^z \rho(z) g dz \quad (1)$$

که در آن چگالی سنگ در عمق مشخص است. نیروی هیدرواستاتیک به این معنی است که همیشه (به‌طور مداوم) نیرویی بر سطح سنگ عمود است. بنابراین اگر سنگ تغییر شکل بدهد جهت نیرو بر اساس تغییر شکل هندسی اتفاق افتاده تغییر خواهد کرد. جهت اعمال این فشار هیدرواستاتیک و مهار تنش اعمالی در نمونه از مکانیزم کنترل خودکار استفاده شده است. در اینجا در واقع از تعداد زیادی دیوار با طولی در حدود ۱ mm در قالب مکانیزم خودکار در یکسری از توابع فیش استفاده شده است. یک تفاوت عمده این است، که مکانیزم خودکار در این‌جا برای حفظ تنش اعمالی در نمونه به‌کار می‌رود، در واقع به محض برخورد توپ‌ها، با هر المان، مقدار نیروی عکس‌عملی حساب می‌شود، مقدار این نیرو تقسیم بر سطح المان می‌شود و به‌عنوان مقدار تنش شناخته می‌شود. مقدار تنش با مقدار تنش هیدرواستاتیک، مد نظر کاربر، مقایسه می‌گردد. اگر مقدار تنش المان، از مقدار تنش هیدرواستاتیک کمتر باشد، المان برای وارد کردن نیروی بیش‌تر به‌سمت پایین حرکت می‌کند و در صورتی که مقدار تنش، بیش‌تر باشد، المان به‌سمت بالا حرکت می‌کند. این مکانیزم باعث متعادل‌سازی شرایط حفاری در عمق مورد نظر می‌گردد. شکل ۳ به‌خوبی نحوه اعمال این فشار بر روی سطح نمونه را نشان می‌دهد.

اگر نیرو کمتر از اندازه نیروی مدنظر کاربر باشد، تیغه به‌سمت پایین و در جهت عمودی حرکت می‌کند و اگر نیروی متعادل‌کننده بالاتر از اندازه نیروی مدنظر باشد، برنامه تیغه را به‌سمت بالا حرکت می‌دهد. از آنجایی که این شبیه‌سازی به‌صورت دو بعدی انجام می‌شود، حرکت برش‌دهنده تا حد زیادی ساده شده است. همچنین به‌منظور ایجاد تنش در نمونه، که نماینده حالت واقعی تشکیلات زمین‌شناسی در عمق باشد و بررسی تاثیر آن در مکانیزم شکست سنگ، از مجموعه توابع فیشی که قادر به تنظیم تنش هیدرواستاتیک در نمونه هستند، استفاده شده است. پس از مرحله تعادل هندسی، تابع  $(@stress\_expand2(-2000000,0.05))$ ، فراخوانی می‌گردد. این تابع با دو ورودی فرآیند تنظیم تنش را انجام می‌دهد. ورودی اول مقدار تنش مورد نیاز کاربر و ورودی دوم خطای مجاز در تنظیم تنش است. در این حالت با انجام یک سری چرخه‌های محاسباتی، (در پوشش توابع فیش) تنش موجود در نمونه را افزایش یا کاهش می‌دهد تا به مقدار مورد نظر کاربر برسد. مقدار تنش ایجاد شده در نمونه تابعی از عمق و چگالی سنگ مورد استفاده است. در اعماق بسیار زیاد تنش‌های عمودی و افقی بسیار به‌هم نزدیک می‌شوند و به نزدیک تنش‌های هیدرواستاتیک می‌رسند. اگر چه تنش روباره به‌طور مستقیم به‌دست نمی‌آید اما می‌توان به راحتی از انتگرال چگالی سنگ در اعماق مختلف، آن را محاسبه کرد [۲۲].



شکل ۳ فشار هیدرواستاتیک اعمالی بر روی سطح نمونه با مکانیزم Servo

## نتایج شبیه‌سازی عددی برش سنگ

به‌منظور بررسی نتایج مدل عددی تاثیر تنش برجای هیدرواستاتیک برروی انرژی ویژه و انتقال حالت شکست سنگ بررسی شده است.

## تاثیر تنش برجای هیدرواستاتیک برروی انرژی ویژه

مفهوم انرژی ویژه (MSE) در حفاری سنگ برای اولین بار توسط تیله<sup>۱</sup> به‌عنوان شاخصی جهت اندازه‌گیری کارآیی مکانیکی کارهای انجام شده برروی سنگ پیشنهاد گردید [۲۳ و ۲۴]. طبق معادله ۲ انرژی ویژه به‌عنوان انرژی مورد نیاز برای حفر حجم واحدی از سنگ معرفی می‌شود که این مفهوم تاکنون به‌طور گسترده در مطالعات و کارهای انجام شده برروی سنگ، هم به‌عنوان شاخص کارآیی و هم به‌عنوان مقیاس قابلیت حفاری، مورد استفاده قرار گرفته است [۵ و ۱۱].

$$MSE = \frac{\int (Force) dx}{Volume\ of\ cut} \quad (2)$$

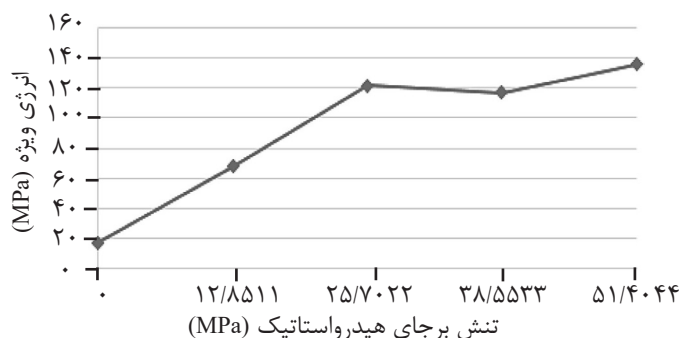
شکل ۴ ارتباط بین تنش برجای هیدرواستاتیک با انرژی ویژه را نشان می‌دهد. با توجه به قانون هیم<sup>۲</sup> [۲۵] تا عمق ۱۰۰۰ m با افزایش تنش برجای انرژی ویژه افزایشی نسبتاً خطی دارد. اما بعد از این عمق به‌دلیل افزایش تنش‌های محصورکننده و شرایط لیتواستاتیک (هیدرواستاتیک) روند افزایشی انرژی ویژه نسبت به افزایش عمق کاهش می‌یابد. تنش برجا تاثیر به‌سزایی در مقدار انرژی ویژه دارد. انجام تست برش سنگ در شرایط فشار ۱۳ MPa

باعث افزایش ۳ برابری انرژی ویژه برش سنگ، نسبت به شرایط عادی (بدون فشار) می‌شود. همچنین افزایش فشار تا ۲۶ MPa باعث افزایش ۳ برابری انرژی ویژه می‌شود، اما در فشار بین ۲۵ تا ۵۰ MPa فقط افزایش ۱۴٪ را در مقدار انرژی ویژه قابل مشاهده است.

## تاثیر فشار محصورکننده برروی مکانیزم شکست سنگ

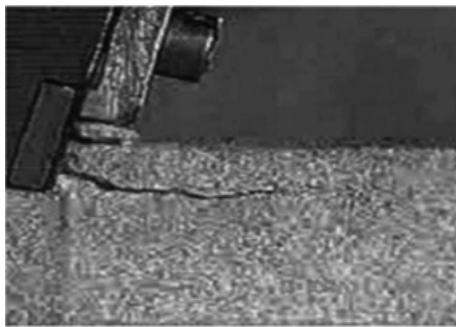
دو حالت شکست متمایز در هنگام برش سنگ به‌وجود می‌آید. یک شکست تغییر شکل‌پذیر که در عمق‌های برش کم اتفاق می‌افتد و این نوع شکست را می‌توان با افزایش تدریجی تعداد میکروتورها و توسعه زون خرد شده در نوک ابزار برش و ترک‌های برشی توصیف کرد (شکل ۵). شکست دیگر، شکست شکننده است که در عمق‌های برش بالا اتفاق می‌افتد و این نوع شکست را می‌توان با افزایش ناگهانی در تعداد میکروتورها که حاصل شکست اتصالات برشی و نرمال بین دو ذره است و گسترش ترک‌های کششی در جلوی تیغه و ایجاد خرده سنگ<sup>۳</sup> توصیف کرد (شکل ۶) [۲۶-۲۸].

تفاوتی اساسی بین برش سنگ، در شرایط بدون فشار و شرایط تحت فشار محصورکننده وجود دارد. دو مکانیزم متفاوت هنگام برش سنگ اتفاق می‌افتد [۲۹].

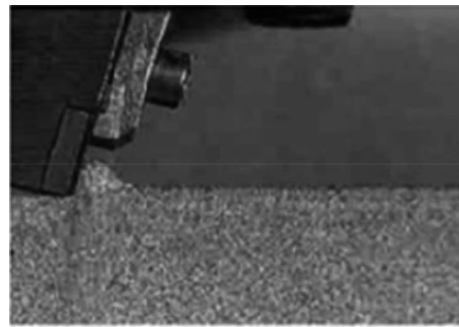


شکل ۴ ارتباط بین تنش برجای هیدرواستاتیک و انرژی ویژه برای تیغه PDC برای سنگ آهک

1. Teale  
2. Heim  
3. Chips



شکل ۶ حالت شکست شکننده [۲۷]



شکل ۵ حالت شکست تغییر شکل‌پذیر [۲۷]

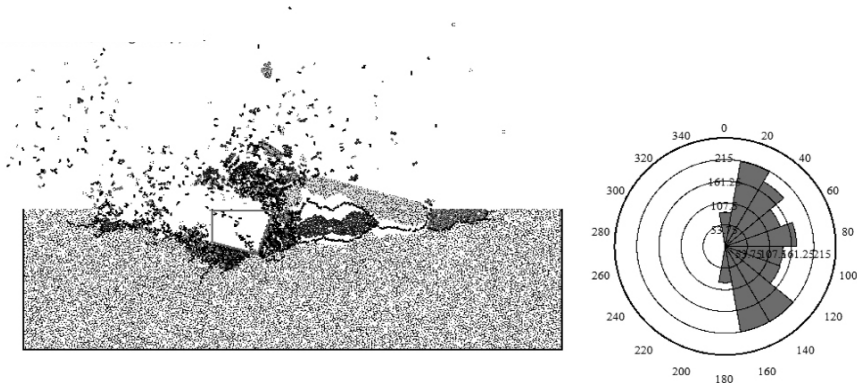
هزاران دانه خرد شده باعث افزایش میزان نیروی مصرفی و به دنبال آن افزایش انرژی ویژه می‌شود.

#### تأثیر فشار محصورکننده بر تعداد ترک

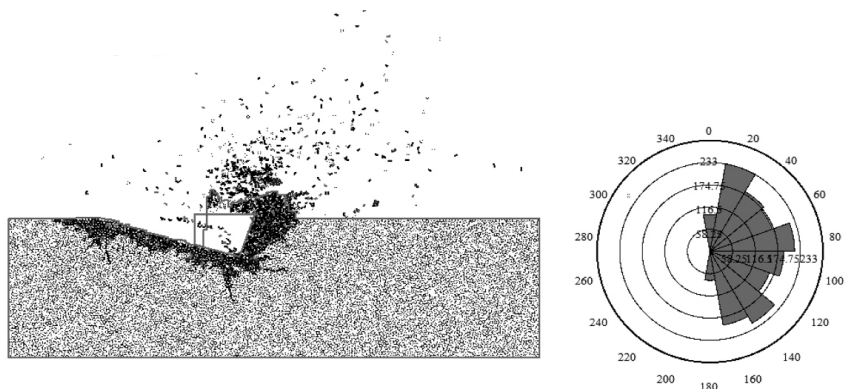
ارتباط بین عمق برش و تعداد ترک در سنگ آهک برای ۵ فشار محصورکننده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۱۲ در عمق برش کمتر از ۳ mm، تغییرات تنش برجا از ۱۳ MPa به ۵۱ MPa تأثیر چندانی در میزان ترک‌های ایجاد شده ندارد. در صورتی که در عمق برش بالای ۳ mm تغییرات فشار محصورکننده در شرایط تاثیرگذار است. سبب افزایش تعداد ترک در سنگ می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت و بخش‌های قبلی، می‌توان گفت که، عمق برش تیغه، هم یکی از تاثیرگذارترین عوامل در تعداد ترک‌های ایجاد شده، مقدار انرژی ویژه مصرفی و نرخ نفوذ است. که برای پیدا کردن رابطه‌ای دقیق نیازمند، انجام تست‌های در عمق برش ثابت در فشارهای مختلف است.

در شرایط بدون فشار نیروی اعمالی از تیغه به سنگ باعث شکست اتصالات بین دانه‌های سنگ در یک صفحه شکست<sup>۱</sup> می‌شود که به خوبی در شکل ۷ مشخص است که صفحه شکست با زاویه‌ای در حدود بین ۱۳۰ تا ۱۷۰° در حال گسترش است و باعث تشکیل خرده سنگ می‌شود. در این حالت کار انجام شده توسط تیغه برش، برای غلبه بر مقاومت اتصالاتی بین دانه‌های سنگ در یک صفحه شکست مصرف می‌شود. اما در شرایط تحت فشار محصورکننده، مکانیزیم متفاوتی در حال وقوع است. در این حالت برش سنگ باعث انباشته شدن سنگ‌های خرد شده در جلوی تیغه می‌شود. فشار منفذی در این مواد خرد شده پایین است، از این رو یک اختلاف فشاری  $\Delta P$  به وجود می‌آید، که باعث نگه داشتن مواد خرد شده بر روی همدیگر می‌شود، این اختلاف فشار باعث می‌شود که مواد خرد شده، جلوی سطح تیغه انباشته و بر روی سطح تیغه حرکت می‌کنند. شکل‌های ۸ تا ۱۱ به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد. در این حالت اتصالات بین دانه‌های سنگ به دلیل فعالیت تیغه به کلی از بین رفته و نیروی اصطکاکی بین

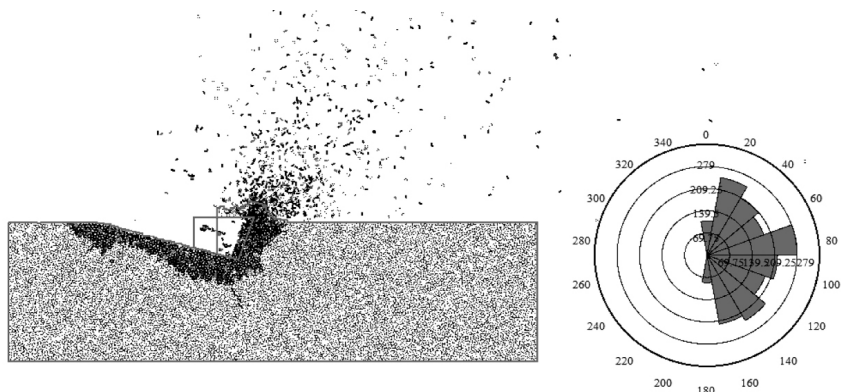




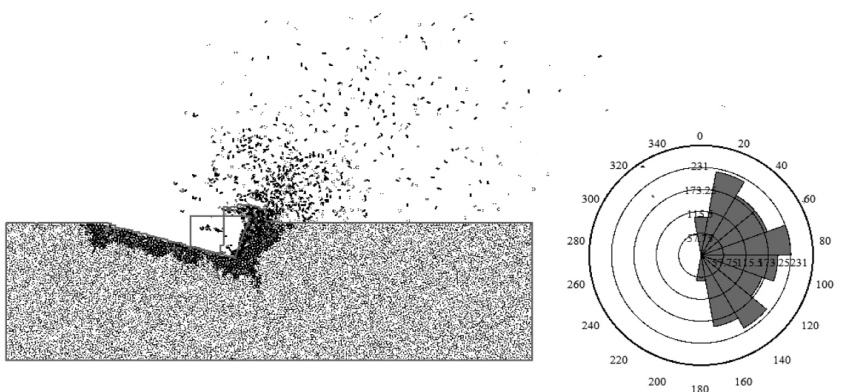
شکل ۷ مکانیزم برش سنگ در شرایط بدون فشارمحصورکننده برای سنگ آهک



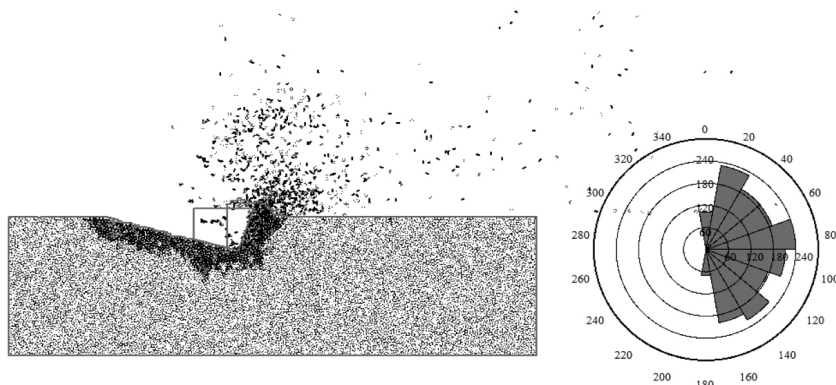
شکل ۸ مکانیزم برش سنگ در شرایط فشارمحصورکننده (۱۳ MPa) برای سنگ آهک



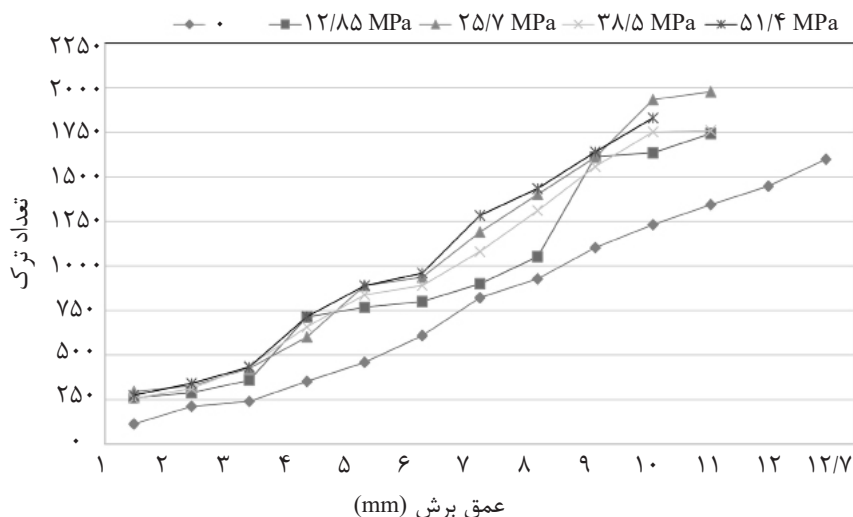
شکل ۹ مکانیزم برش سنگ در شرایط فشارمحصورکننده (۲۶ MPa) برای سنگ آهک



شکل ۱۰ مکانیزم برش سنگ در شرایط فشارمحصورکننده (۳۹ MPa) برای سنگ آهک



شکل ۱۱ مکانیزم برش سنگ در شرایط فشار محصورکننده (۵۱ MPa) برای سنگ آهک



شکل ۱۲ ارتباط بین عمق برش و تعداد ترک در سنگ آهک برای ۵ فشار محصورکننده

ترک را دارد. در این تحقیق از نرم‌افزار PFC به منظور بررسی اثر تنش‌های برجای لیتواستاتیک بر میزان انرژی ویژه مصرفی تیغه PDC استفاده شده است. براساس مدل‌های عددی انجام شده در این تحقیق، مهم‌ترین نتایج حاصله به شرح زیر است:

افزایش میزان تنش از ۱۳ MPa به ۲۶ MPa باعث افزایش سه برابری انرژی ویژه می‌شود ولی این در حالی است که با افزایش میزان تنش از ۲۶ به ۵۲ MPa به دلیل افزایش تنش‌های محصورکننده و شرایط نزدیک به لیتواستاتیک (هیدروستاتیک) روند افزایشی انرژی ویژه نسبت به افزایش تنش کاهش می‌یابد. در هنگام برش سنگ دو مکانیزم متفاوت اتفاق می‌افتد. در شرایط بدون فشار کار انجام شده

### نتیجه‌گیری

عملکرد تیغه‌های برش در عملیات حفاری سنگ از مسایل مهم و پیچیده مهندسی معدن، نفت و عمران است که نیاز به شبیه‌سازی عددی دارد. روش عددی المان مجزا یکی از روش‌های مناسب برای مدل‌سازی مسایل پیچیده مهندسی است که برای آن نرم‌افزارهای متعددی نوشته شده است. در این میان نرم‌افزار PFC2D یک برنامه‌ای دو بعدی المان مجزا است، که از ساختاری قوی برای شبیه‌سازی رفتار یک سنگ واقعی استفاده می‌کند. برنامه‌ای که در هر لحظه قادر به اندازه‌گیری نیروی‌های عکس‌العملی، جابه‌جایی، تنش‌های القایی در سنگ و نحوه‌ای ایجاد و انتشار

تعداد ترک‌های ایجاد شده، مقدار نیروی مصرفی و مقدار انرژی ویژه، شاید بتوان گفت هر عاملی که باعث خردایش بیشتر سنگ و افزایش تعداد میکرو ترک‌ها گردد، باعث افزایش مقدار نیروی مصرفی و انرژی ویژه می‌گردد.

#### علائم و نشانه‌ها

*MSE*: انرژی ویژه (MPa)  
*WOB*: وزن روی مته (N)  
*RPM*: سرعت روی مته (Rpm)  
*ROP*: نرخ نفوذ حفاری (mm/s)

توسط تیغه برش، برای غلبه بر مقاومت اتصالی بین دانه‌های سنگ در یک صفحه شکست مصرف می‌شود اما در شرایط تحت فشار محصورکننده، برش سنگ باعث انباشته شدن سنگ‌های خرد شده در جلوی تیغه می‌شود و نیروی اصطکاکی بین هزاران دانه خرد شده باعث افزایش میزان نیروی مصرفی و به دنبال آن افزایش انرژی ویژه می‌شود. مکانیزیم جریان مواد خرد شده در جلوی تیغه‌ای برش، تابعی از فشار محصورکننده و ذرات خرد شده است و از جمله عوامل موثر در مقدار انرژی ویژه است. با توجه به رابطه مستقیم بین

#### مراجع

- [1]. Bourgoyne A. T., Keith K. M., Chenevert E. and Farrile S. Y., "Applied drilling engineering," 2<sup>nd</sup> ed., Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, pp. 113-189, 1991.
- [2]. Garnier A. J. and Van Lingen N. H., "Phenomena affecting drilling rates at depth," Society of Petroleum Engineers, SPE-1097-G, 1959.
- [3]. Cunningham R. A. and Eenink J. G., "Laboratory study of effect of overburden, formation and mud column pressures on drilling rate of permeable formations," Society of Petroleum Engineers, SPE-1094-G, 1959.
- [4]. Garnier A. J., and Van Lingen N. H., "Phenomena affecting drilling rates at depth," Society of Petroleum Engineers, 1959.
- [5]. Rafatian N., Miska S. Z., L. Ledgerwood W., Mengjiao Y., Ramadan A. and Nicholas E. T., "Experimental study of MSE of a single PDC cutter interacting with rock under simulated pressurized conditions," Society of Petroleum Engineers, SPE Drilling & Completion, Vol. 25, No. 01, 2010.
- [6]. Akbari B., Miska S., Yu M. and Ozbayoglu M., "Experimental investigations of the effect of the pore pressure on the MSE and drilling strength of a PDC Bit," In SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting. Society of Petroleum Engineers, April 17, 2014.
- [7]. Saouma V. E. and Kleinosky M. J., "Finite element simulation of rock cutting: a fracture mechanics approach," In The 25<sup>th</sup> US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, January 1, 1984.
- [8]. Pierry J. and Charlier R., "Finite element modelling of shear band localisation and application to rock cutting by a PDC tool," In Rock Mechanics in Petroleum Engineering. Society of Petroleum Engineers, 1994.
- [9]. Menezes P. L., Lovell M. R., Ilya V. A. and Higgs C. F., "Studies on the formation of discontinuous rock fragments during cutting operation," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Vol. 71, pp.131-142, 2004.
- [10]. Akbari B., Butt S. D., Munaswamy K. and Arvani F., "Dynamic single PDC cutter rock drilling modeling and simulations focusing on rate of penetration using distinct element method," In 45<sup>th</sup> US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2011.
- [11]. Khorshidian H., Mozaffari M. and Butt S. D., "The role of natural vibrations in penetration mechanism of a single

- PDC cutter*,” In 46<sup>th</sup> US Rock mechanics/geomechanics symposium, American Rock Mechanics Association, January 1, 2012.
- [12]. Block G. and Howie J., “*Role of failure mode on rock cutting dynamics*,” In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, January 1, 2009.
- [13]. He X. and Chaoshui X., “*Discrete element modelling of rock cutting: from ductile to brittle transition*,” International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 39, No. 12, pp. 1331-1351, 2015.
- [14]. Curry D. A., et al. “*The effect of borehole pressure on the drilling process in salt*,” Society of Petroleum Engineers, SPE Drilling and Completion, Vol. 32, No. 01, pp. 25-41, 2017.
- [15]. Manouchehrian A. and Fatehi Marji M., “*Numerical analysis of confinement effect on crack propagation mechanism from a flaw in a pre-cracked rock under compression*,” Acta Mechanica Sinica, Vol. 28, No. 5, pp. 1389-1397, 2012.
- [16]. Manouchehrian A., Sharifzadeh M., Marji M. F. and Gholamnejad J., “*A bonded particle model for analysis of the flaw orientation effect on crack propagation mechanism in brittle materials under compression*,” Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 40-52, 2014.
- [17]. Fatehi Marji M., “*Simulation of crack coalescence mechanism underneath single and double disc cutters by higher order displacement discontinuity method*,” Journal of Central South University, Vol. 22, No. 3, pp. 1045-1054, 2015.
- [18]. Haeri H. and Marji M. F., “*Simulating the crack propagation and cracks coalescence underneath TBM disc cutters*,” Arabian Journal of Geosciences, Vol. 9, No. 2, p.124, 2016.
- [19]. Itasca Consulting Group Inc.; “*PFC2D Manual*,” 2018.
- [20]. Cundall P. A. and DL Strack O., “*A discrete numerical model for granular assemblies*,” Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- [21]. Hentz S. F., Donzé V. and Daudeville L., “*Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates*,” Computers and Structures, Vol. 82, No. 29-30, pp. 2509-2524, 2014.
- [22]. WurohTimbo M., “*An improved methodology on wellbore stability prediction using geomechanical analysis*,” PhD Dissertation, Universiti Teknologi Petronas, 2012.
- [23]. Teale R. “*The concept of specific energy in rock drilling*,” International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, Pergamon, Vol. 2, No. 1, pp. 57-73. 1965.
- [24]. Majidi R., Martin A. and Nigel L., “*Pore-pressure estimation by use of mechanical specific energy and drilling efficiency*,” SPE Drilling & Completion, Vol. 32, No. 02, pp. 97-104, 2017.
- [25]. Jaeger J. C., Neville G. W. C. and Zimmerman R., “*Fundamentals of rock mechanics*,” John Wiley and Sons, 4<sup>th</sup> ed., pp. 1-469, 2009.
- [26]. He X., Chaoshui Xu K. P. and Gun H., “*On the critical failure mode transition depth for rock cutting with different back rake angles*,” Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 63, pp. 95-105, 2107.
- [27]. Jaime M. C., Yaneng Z., Jeen-Shang L. and Isaac K. G., “*Finite element modeling of rock cutting and its fragmentation process*,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 80, pp. 137-146, 2015.
- [28]. Yang Y., Chunliang Z., Min L. and Lian C., “*Research on rock-breaking mechanism of cross-cutting PDC bit*,” Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 161, pp. 657-666, 2018.
- [29]. Zhou Y., Wu Z., Isaac G. and Jeen Shang L., “*Mechanical specific energy versus depth of cut in rock cutting and drilling*,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 100, pp. 287-297, 2017.