

شبیه‌سازی عددی اثر زاویه شیب عقب تیغه *PDC* بر روی مکانیزم شکست سنگ با استفاده از روش المان مجزا

محمد فاتحی‌مرجی^۱، امیرحسین مزروعی‌سیدانی^۲، مهدی نجفی^۳، محسن محبی^۴، مهاجر عبادی^۵

۱. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد

۳. استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد

۴. دکترای تخصصی؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد

۵. مهندس ارشد برنامه‌ریزی حفاری؛ معاونت فنی حفاری شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2018.63110

چکیده

در صنعت نفت، عمران و معدن، از انواع مختلف ابزار برش جهت استخراج مواد سنگی استفاده می‌شود. از این رو بررسی عکس‌العمل ابزار برش با سنگ می‌تواند راهکاری مناسب جهت تحلیل مسائل مرتبط با شکست‌های به وجود آمده در آن در زمان حفاری باشد. یکی از عوامل مؤثر بر مکانیزم شکست سنگ در زمان حفاری، هندسه‌ی ابزار برش (تیغه برش) است که تأثیر بسزایی در انرژی ویژه *MSE* (انرژی مورد نیاز برای حفر حجم واحدی از سنگ) مصرفی دارد. روش عددی المان مجزا یکی از پیشرفته‌ترین روش‌ها برای مدل کردن مسائلی است که با کرنش و تغییر شکل بالا همراه است. هدف اصلی این تحقیق شبیه‌سازی برش سنگ و بررسی تأثیر

زاویه شیب عقب در عملکرد تیغه *PDC* بر روی دو نمونه سنگ رسوبی (ماسه‌سنگ و سنگ آهک) است. بنابراین از نرم‌افزار عددی کد جریان اجزاء (*PFC2D*) که رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای را با روش المان‌های مجزا (*DEM*) شبیه‌سازی می‌کند، استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، سنگ آهک نسبت به ماسه‌سنگ به انرژی ویژه بیشتری نیاز دارد که دلیل آن می‌تواند مقاومت بیشتر سنگ آهک نسبت به ماسه‌سنگ باشد. اما افزایش زاویه شیب عقب از ۱۰ درجه به ۴۰ درجه باعث افزایش انرژی ویژه مصرفی در هر دو نوع سنگ می‌شود. در حقیقت نیروی افقی برش عامل اصلی تأثیرگذار در مقدار انرژی ویژه است. علاوه بر این نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که مکانیزم جریان مواد خرد شده در جلوی تیغه‌ی برش تابعی از هندسه‌ی تیغه و زاویه اصطکاک بین تیغه و ذرات خرد شده سنگ است که از جمله عوامل مؤثر در مقدار انرژی ویژه محسوب می‌گردد.

واژگان کلیدی

تیغه برش *PDC*
روش عددی المان مجزا
انرژی ویژه
مکانیزم شکست
زاویه شیب عقب

و مت‌های با برنده‌های غلتکی (*Roller Cone Bits*) طبقه‌بندی می‌کنند (*Bourgoyne et al., 1986*). مت‌های *PDC* (*Polycrystalline Diamond Compact*) نسل جدیدی از مت‌های تیغه ثابت هستند؛ این مت‌ها می‌توانند بارهای ضربه‌ای و چرخشی زیادی را بدون این‌که تیغه‌هایشان بشکنند تحمل کنند و در واقع طرح تیغه تأثیر مستقیم در قابلیت حفاری دارد. اصولاً مت‌های تیغه ثابت طوری طراحی

۱. پیش‌گفتار

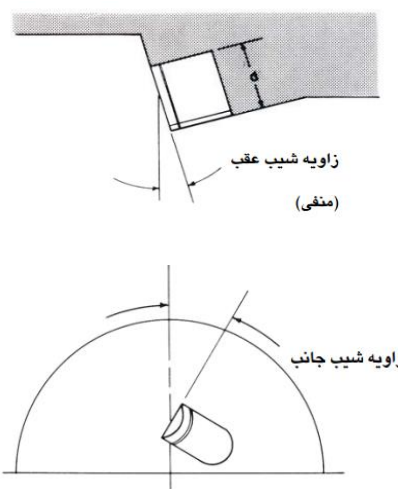
مت‌ها عامل انتقال انرژی دریافتی از لوله‌ی حفاری به سنگ است و از این روش موجب نفوذ در آن می‌گردد. میزان انرژی مت‌ها باید به حدی باشد که بتواند مقاومت سنگ را در هم بشکند. نوع مت‌ها انتخابی بستگی به نوع سنگی دارد که باید حفاری شود. معمولاً مت‌های حفاری دورانی را بر طبق نحوه‌ی طراحی آن‌ها به دو دسته مت‌های تیغه ثابت (*Fixed Cutter Bits*)

استفاده از تیغه‌ی برش *PDC* انجام شده است و مدل‌هایی را برای نیروهای فعال بر روی برش دهنده با در نظر گرفتن عمق برش، زاویه‌ی برش دهنده و شرایط فیزیکی سنگ ارائه شده است (Hibbs & Flom, 1978; Glowka, 1989). همچنین آزمایش‌هایی بر روی مته‌ی *PDC* در مقیاس کامل انجام و از چهار مته با زاویه‌ی شیب عقب ۷، ۱۵، ۲۰، ۲۵، استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده مته با زاویه شیب عقب ۲۰ درجه بیش‌ترین نرخ نفوذ را دارد و بهترین انتخاب برای حفاری در سنگ شیل است (Hough, 1986). آزمایش‌های برشی بر روی سه نمونه‌ی، ماسه‌سنگ، سنگ مرمر، و شیل، جهت بررسی تأثیر زاویه شیب عقب و زاویه شیب جانب بر روی انرژی ویژه انجام شده است. افزایش زاویه شیب عقب، باعث افزایش میزان انرژی ویژه مصرفی می‌شود. همچنین در سنگ مرمر به دلیل نوسانات نیروی زیاد، میزان انرژی ویژه مصرفی، سه برابر بیش‌تر از شیل است. انرژی ویژه *MSE* برش دهنده در ارتباط است با شرایط مکانیکی سنگ (Rajabov et al, 2012; Cho, 1997). طبق معادله (۱) انرژی ویژه *MSE*^۱ برابر است با مقدار کار انجام شده برای حفر حجم واحدی از سنگ (Rafatian et al, 2010; Khorshidian et al, 2012).

$$MSE = \frac{\int (Force).dx}{Volume\ of\ cut} \quad (1)$$

اولین کار انجام شده برای شبیه‌سازی عددی برش سنگ، با استفاده از روش عددی المان محدود (*FEM*) بر روی تیغه‌ی خراشی^۲ انجام شده است (Saouma & Kleinovsky, 1984). همچنین از روش المان محدود برای شبیه‌سازی عمل برش، توسط تیغه‌ی برش *PDC* و شبیه‌سازی فشار ته چاه استفاده شده است (Pierry & Charlier, 1994; Menezes, et al, 2014). تلاش‌هایی برای شبیه‌سازی روند برش سنگ با استفاده از روش عددی المان مجزا و با استفاده از نرم‌افزار

شده‌اند که با استفاده از مکانیسم شکافتن حفاری می‌کنند (Bourgoyne et al., 1986). این نوع از مته‌ها در سازندهای نرم، سفت و با سختی متوسط و در سازندهای غیر سازنده که حالت چسبندگی ندارند، بهترین کارایی را دارند (Karadzhova, Gergana Nikolova, 2014). اولین بار تیغه‌های *PDC* در دهه‌ی ۱۹۷۰ توسط شرکت جنرال الکتریک ساخته شدند. این تیغه‌ها از لایه‌های الماس مصنوعی با ضخامت ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر که روی زیرساختار کاربید تنگستنی ضخیمی پوشیده شده‌اند، تشکیل شده است (Bourgoyne et al., 1986). تیغه‌های *PDC* با زاویه حمله‌ی معینی نسبت به سنگ، بر روی بدنه‌ی مته قرار می‌گیرند؛ که زاویه جهت یا زاویه‌ی انحراف تیغه نامیده می‌شود. امتداد برنده‌ی مته برحسب زاویه شیب عقب^۱ و زاویه شیب جانب^۲ تعریف می‌شود (Kerr, Callin Joe, 1988; Bourgoyne et al., 1986). در شکل ۱ این دو زاویه نشان داده شده است.



شکل ۱. امتداد برنده که برحسب، زاویه شیب عقب و زاویه شیب جانب بیان شده است (Bourgoyne et al., 1986).

هنگامی که در دهه ۱۹۷۰ مته‌های *PDC* معرفی شدند، بیش‌تر محققان تحقیقات خود را به توسعه‌ی مدل‌هایی برای مته‌های *PDC* متمرکز کردند. آزمایش‌های برش سنگ با

¹Back rake angle

²Slid rake angle

³ Mechanical Specific Energy

⁴ Drag Bit

با شبیه‌سازی وزن اعمالی روی مته روند برش سنگ توسط تیغه PDC مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۲. شبیه‌سازی عددی

۱.۲ مدل عددی

روش عددی المان مجزا را می‌توان برای تحلیل تنش و تغییر شکل در سازه‌های زیرزمینی با وجود ناپیوستگی درون محیط استفاده کرد. نرم افزار 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 انرژی را دارد (Itasca, 2008). از آنجا که مدل عددی در شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی نماینده سنگ واقعی است، لذا 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 \bar{K}_n/\bar{K}_s ، میانگین مقاومت نرمال اتصال موازی σ_c (Mean)، میانگین مقاومت برشی اتصال موازی τ_c (Mean)، را تغییر می‌دهد تا رفتار تک محوره، سه محوره و برزیلی و کشش مستقیم مدل با نمونه‌های آزمایشگاهی یکسان شود. همچنین در آزمون عددی تک محوره باید مدول الاستیک، ضریب پواسون، تنش شروع ترک و مقاومت تک محوره و در آزمون عددی سه محوره پوش هوک-براون و در آزمون عددی برزیلی و کشش مستقیم مقاومت کششی مدل با نمونه آزمایشگاهی کالیبره شود (Itasca, 2008; Cundall & Strack, 1979).

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 به وسیله مجموعه دستوراتی به صورت فیش در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. عمده‌ی مزایای این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم‌افزارهای

عددی کد جریان اجزاء^۵ انجام شده است. محققان موفق شدند که وزن روی مته^۶، سرعت روی مته^۷ و فشار گل حفاری را شبیه‌سازی نمایند و به بررسی تأثیر این عوامل بر روی نرخ نفوذ^۸ و انرژی ویژه بپردازند (Akbari et al 2011; Khorshidian et al, 2012). همچنین مدل‌های برشی با استفاده از روش عددی المان مجزا (نرم‌افزار PFC2D) ارائه شده است که در این مطالعات وابستگی دو حالت شکست سنگ (تغییر شکل‌پذیر^۹ و شکننده^{۱۰}) را به عمق برش و زاویه تیغه، بررسی نموده‌اند و طبق نتایج به دست آمده عمق بحرانی انتقال حالت شکست سنگ با افزایش زاویه شیب عقب، افزایش می‌یابد. همچنین شکست شکننده که در عمق‌های برش بالا رخ می‌دهد، با افزایش زاویه‌ای تیغه هم می‌تواند اتفاق بیفتد (Huang et al., 1999; Huang et al., 2013; He et al., 2017). علاوه بر این با استفاده از روش عددی ناپیوستگی جابجایی مطالعاتی بر روی ابزار برش جهت بررسی نحوه‌ی انتشار ترک و انرژی ویژه انجام شده است (HosseiniNasab & Marji, 2007; Marji, 2015; Haeri & Marji, 2016).

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 تأثیرگذار بر آن داشته باشیم. با این حال آزمایش‌ها هزینه‌ی 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. بنابراین در این مطالعه از روش عددی المان مجزا جهت فهم بهتر عکس‌العمل ابزار برش با سنگ در حفاری چاه نفت استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، پارامترهای میکرومکانیکی دو نمونه سنگ، ماسه‌سنگ و سنگ آهک اعتبارسنجی شده و سپس

⁵ Particle Flow Code 2D

⁶ Weight on Bit

⁷ Round per Minute

⁸ Rate of Penetration

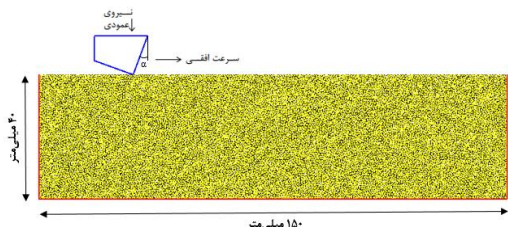
⁹ Ductile

¹⁰ Brittle

نتایج اعتبارسنجی، آزمون عددی تک محوره در قسمت پیوست ارائه شده است.

۲.۲ مدل برش سنگ

جهت شبیه‌سازی برش سنگ نمونه‌ای با ابعاد 40×150 میلی‌متر مطابق با شکل ۲ طراحی شده است. ۴ تیغه PDC به قطر ۱۳ میلی‌متر با زاویه شیب عقب، $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ درجه، با سرعت افقی ثابت $1/5$ متر بر ثانیه و وزن روی مته 5000 نیوتن بر روی نمونه به اندازه ۳۵ میلی‌متر حرکت داده شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در ۳ قسمت مجزا ارائه شده است.



شکل ۲. نمونه ساخته شده جهت شبیه‌سازی برش سنگ

در حفاری چاه، به طور معمول وزن اعمالی روی مته توسط اپراتور حفاری کنترل می‌شود. و نرخ نفوذ (یا جابجایی عمودی برش دهنده) خروجی سیستم است (Bourgoyne et al., 1986). در شبیه‌سازی با عمق برش ثابت، جابجایی عمودی برش دهنده ثابت است، که این یک تضاد به حساب می‌آید. و نیروی‌های عکس‌العملی بر روی برش دهنده (که دلالت بر وزن روی مته دارد) خروجی سیستم است. در حالی که این روش راه حل مناسبی برای تعریف کردن عکس‌العمل نیروی اعمالی به سنگ است، ولی در کل استدلال استفاده از آن برای وزن اعمالی روی مته ناموفق است (Hentz et al., 2004). هدف این تحقیق توسعه مدلی برای بررسی روند برش سنگ توسط تیغه PDC است که قادر به شبیه‌سازی WOB برای برش دهنده باشد. جهت شبیه‌سازی WOB در نرم‌افزار PFC2D از مکانیزیم (کنترل خودکار^{۱۱}) استفاده شده است (Itasca, 2008). مکانیزیم Servo-control در واقع دیواری است، که در قالب یکسری از توابع فیش به کار گرفته شده است. آن‌ها معمولاً برای حفظ تنش‌های ثابت بر روی دیوارها

المان مجزا عبارت است از (Itasca, 2008):

الف- تشخیص تماس بین اجزا دیسکی ساده‌تر از تشخیص اتصال و تماس بین سطوح بلوکی شکل و گوشه‌دار (در نرم‌افزارهای UDEC و 3DEC) است.

ب- هیچ محدودیتی در رابطه با بزرگی جابجایی مدل وجود ندارد و باعث نزدیکی مدل ساخته شده با واقعیت می‌شود.

در این تحقیق از پارامترهای میکرومکانیکی دو نمونه سنگ ماسه‌سنگ (Joodi et al., 2012) و سنگ آهک (Akbari et al., 2011) استفاده شده است. با استفاده از آزمون عددی تک محوره، اعتبارسنجی و سپس جهت شبیه‌سازی برش سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۱ پارامترهای میکرومکانیکی استفاده شده نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای میکرومکانیکی استفاده شده برای

مدل عددی در PFC2D (Akbari et al., 2011; Joodi et al., 2012)

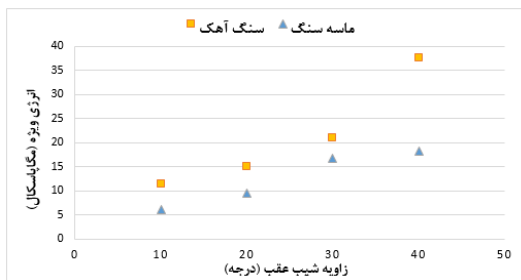
سنگ آهک	ماسه‌سنگ	میکرو پارامترها
دیسکی	دیسکی	نوع ذره
۲۶۲۰	۲۰۵۰	دانسیته kg/m^3
۰/۳	۰/۳	مینیمم شعاع دیسک D_{min}
۱/۶۶	۱/۶۶	نسبت بیشینه شعاع ماکزیمم به شعاع مینیمم دیسک D_{max}/D_{min}
۰/۵	۰/۷	ضریب میرایی (α)
۸۳	۱۲/۱	مدول یانگ تماسی E (GPa)
۳/۸	۳/۰۸	نسبت سختی‌های اتصال تماسی $\left(\frac{k_n}{k_s}\right)$
۸۳	۱۲/۱	مدول یانگ اتصال موازی \bar{E} (GPa)
۳/۸	۳/۰۸	نسبت سختی‌های اتصال موازی $\left(\frac{k_n}{k_s}\right)$
۰/۵	۰/۵	ضریب اصطکاک
۹۱	۵۱/۹	مقاومت نرمال اتصال موازی (MPa) $\bar{\sigma}_c$
۹۱	۵۱/۹	مقاومت برشی اتصال موازی (MPa) $\bar{\tau}_c$
۵۵	۳۲	چسبندگی اتصال موازی (MPa)
۰	۳۵	زاویه اصطکاک اتصال موازی (degree)

¹¹ Servo-control

۳. نتایج شبیه‌سازی عددی

۱.۳ تأثیر زاویه شیب عقب بر روی MSE تیغه برش PDC

مفهوم انرژی ویژه (MSE) در حفاری سنگ برای اولین بار توسط تیله (Teale, 1965)، به عنوان شاخصی جهت اندازه‌گیری کارایی مکانیکی کارهای انجام شده بر روی سنگ پیشنهاد گردید. طبق معادله ۱، انرژی ویژه به عنوان انرژی مورد نیاز برای حفر حجم واحد سنگ معرفی می‌شود که این مفهوم تاکنون به طور گسترده در مطالعات و کارهای انجام شده بر روی سنگ، هم به عنوان شاخص کارایی و هم به عنوان مقیاس قابلیت حفاری، مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۵ نتایج تأثیر زاویه شیب عقب را بر روی انرژی ویژه در دو نمونه سنگ ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک پس از ۳۵ میلی‌متر جابجایی نشان می‌دهد. مقدار انرژی ویژه برای هر تست از معادله ۱ حساب شده است.

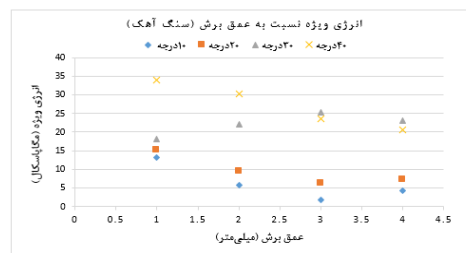


شکل ۵. رابطه بین زاویه شیب عقب با انرژی ویژه

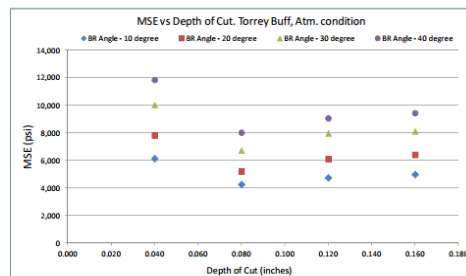
افزایش زاویه تیغه از ۱۰ درجه به ۴۰ درجه باعث افزایش انرژی ویژه در هر دو نمونه سنگ می‌شود. افزایش انرژی ویژه، برای سنگ آهک نرخ متفاوتی در مقایسه با ماسه‌سنگ دارد. تفاوت در مقدار انرژی ویژه در این دو سنگ بسیار جالب است. یکی از دلایل بیش‌تر بودن مقدار انرژی ویژه در سنگ آهک نسبت به ماسه‌سنگ، مقاومت بیش‌تر سنگ آهک است. اما یکی از دلایل اصلی آن را می‌توان نوسانات زیاد نیروی افقی در سنگ آهک نسبت به ماسه‌سنگ دانست. در سنگ آهک سیمان‌شدگی بین ذرات و چسبندگی بین آن‌ها نسبت به ماسه‌سنگ قوی‌تر است که به نحوه‌ی تشکیل آن بستگی دارد. و از این رو به مقدار انرژی ویژه بیش‌تری جهت خردایش سنگ نیاز است. اما سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود، این است که چرا با افزایش زاویه تیغه، ما به مقدار انرژی ویژه بیش‌تری

در طول شبیه‌سازی به کار می‌رود. بیش‌تر توابعی که تست دو محوره را کنترل می‌کنند، از این مدل هستند. در واقع در این مطالعه از مکانیزم Servo-control برای حفظ یک نیروی محوری خاص بر روی برش دهنده جهت شبیه‌سازی WOB اعمالی استفاده شده است. مکانیزم Servo نیروهای متعادل فعال در جهت عمودی بر روی برش دهنده را اندازه‌گیری می‌کند، و آن را با نیروی مشخص شده توسط کاربر مقایسه می‌کند، که نیروهای متعادل خروجی، حاصل جمع نیروی‌های اعمالی ذرات به برش دهنده هستند. اگر نیرو کمتر از اندازه‌ی نیروی مدنظر کاربر باشد، تیغه به سمت پایین و در جهت عمودی حرکت می‌کند، و اگر نیروی متعادل کننده بالاتر از اندازه‌ی نیروی مدنظر باشد، برنامه تیغه را به سمت بالا حرکت می‌دهد. از آنجایی که این شبیه‌سازی به صورت دو بعدی انجام می‌شود، حرکت برش دهنده تا حد زیادی ساده شده است.

به منظور بررسی دقت و صحت نتایج شبیه‌سازی عددی برش سنگ در این تحقیق، روند تغییرات انرژی ویژه نسبت به عمق برش برای چهار زاویه شیب عقب ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ با نتایج آزمایشگاهی رجبو (Rajabov et al., 2012) مقایسه شده است. شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی عددی در PFC2D را نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی رجبو و همکاران در شکل ۴ دارد.

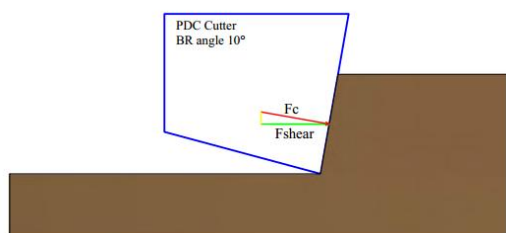


شکل ۳. رابطه بین انرژی ویژه و عمق برش

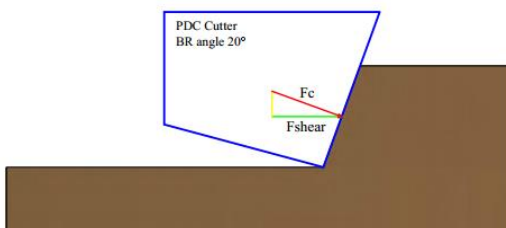


شکل ۴. رابطه بین انرژی ویژه و عمق برش (Rajabov et al., 2012)

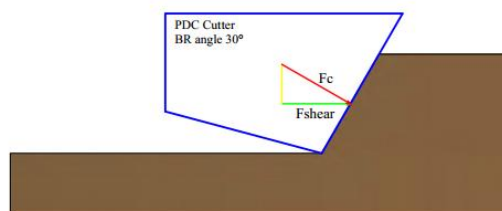
دوم برای افزایش نیروی افقی و نرمال با افزایش زاویه شیب عقب، تغییر جهت نیروی برش با افزایش زاویه شیب عقب است. این نیروها بر روی تیغه PDC در شکل ۶ نشان داده شده است. نیروی برش F_c که بر روی سطح برش دهنده فعال است به صورت عمودی به سطح برش دهنده اعمال می‌شود و نقش بزرگی را در روند برش سنگ ایفا می‌کند. اندازه‌ی این نیروی برش به زاویه‌ای که این نیرو با سطح تیغه می‌سازد بستگی دارد. همچنین جهت نیروی برش در شکل ۸ برای زاویه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درجه نشان داده شده است. در واقع F_c معادل با یک نیروی برشی F_{shear} ، که برای شکست اتصالات بین دانه‌ای و برش سنگ به کار می‌رود است. شکل ۶ ارتباط بین نیروی برشی F_{shear} و نیروی برش F_c را که تابعی از زاویه تیغه است، نشان می‌دهد. دقیقاً می‌توان بیان نمود که با افزایش زاویه شیب عقب به مقدار نیروی برش F_c بیش‌تری به منظور ایجاد کردن همان میزان نیروی برشی F_{shear} لازم است.



الف) ۱۰درجه

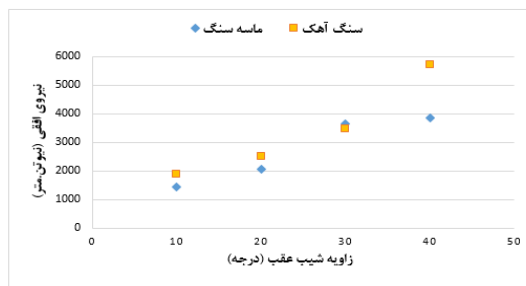


ب) ۲۰درجه

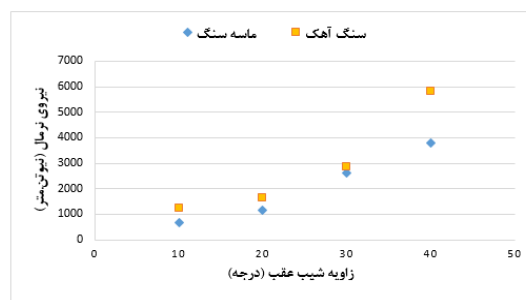


ج) ۳۰درجه

جهت برش نیاز داریم؟ نیروی افقی برش و سطح برش تیغه، دو پایه‌ی اساسی انرژی ویژه هستند. برای پاسخ به این سؤال باید به تجزیه و تحلیل این دو مورد پرداخته شود. زمانی که به این دو پارامتر به صورت جداگانه نگاه شود، متوجه می‌شویم که در حقیقت، نیروی افقی برش، عامل اصلی در مقدار MSE است، و سطح برش تیغه نمی‌تواند با تغییرات زاویه، تغییر اساسی در مقدار MSE داشته باشد. مطابق با شکل ۶ هنگامی که زاویه تیغه از ۱۰ درجه به ۴۰ درجه افزایش می‌یابد، مقدار نیروی افقی در هر دو سنگ (سه برابر) می‌شود، که این خود باعث افزایش انرژی ویژه می‌شود و این نکته لازم به ذکر است، که مطابق با شکل ۷، نه تنها مقدار نیروی افقی افزایش می‌یابد، بلکه مقدار نیروی نرمال هم افزایش می‌یابد.



شکل ۶. تغییرات نیروی افقی نسبت به تغییرات زاویه شیب عقب

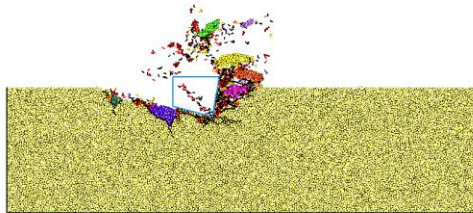


شکل ۷. تغییرات نیروی نرمال نسبت به تغییرات زاویه شیب عقب

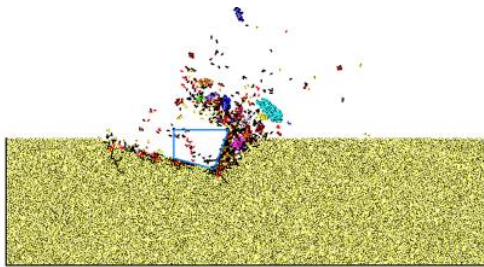
دو دلیل اصلی برای افزایش نیروی برش با افزایش زاویه شیب عقب وجود دارد. اولین و مهم‌ترین دلیل آن، این است که در حقیقت با افزایش زاویه تیغه، سطح تماس بین سنگ و تیغه، افزایش می‌یابد. که این خود دلیلی بر افزایش نیروی برش که شامل نیروی اصطکاکی بین سنگ و تیغه است، می‌شود. دلیل

شبه‌سازی عددی اثر زاویه شیب عقب تیغه PDC بر روی مکانیزم شکست سنگ با استفاده از روش المان مجزا

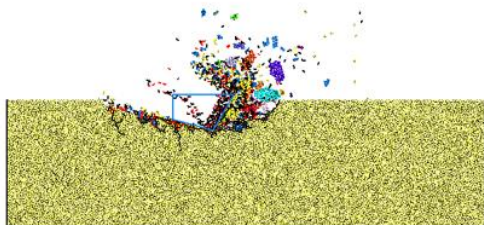
در واقع رابطه ۲ رابطه‌ای بین نیروی نرمال و نیروی برش با زاویه‌ی اصطکاک را به عنوان تابعی از زاویه شیب عقب بیان می‌کند. مطابق با شکل‌های ۱۰ تا ۱۷ با افزایش زاویه تیغه، مواد خرد شده تمایل دارند، که به سمت عقب و به زیر تیغه حرکت کنند، که دلیل آن را می‌توان کاهش زاویه اصطکاک بین سطح تیغه و سنگ دانست؛ که باعث حرکت راحت و آرام مواد خرد شده در زیر تیغه می‌شود. و به دنبال آن، به دلیل خردایش مجدد مواد سنگی خرد شده، مقدار نیرو و انرژی ویژه بیش‌تری جهت برش مصرف می‌شود. بدین جهت یکی از دلایل افزایش مقدار انرژی ویژه را می‌توان مکانیزم جریان مواد خرد شده در زیر تیغه دانست، که هیدرولیک مته و فشار گل خروجی از نازل مته، جهت پاک‌سازی از اهمیت بسیاری برخوردار است.



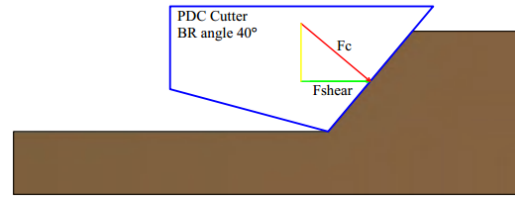
شکل ۱۰. نحوه‌ی شکست سنگ آهک تحت فعالیت تیغه با زاویه ۱۰ درجه



شکل ۱۱. نحوه‌ی شکست سنگ آهک تحت فعالیت تیغه با زاویه ۲۰ درجه



شکل ۱۲. نحوه‌ی شکست سنگ آهک تحت فعالیت تیغه با زاویه ۳۰ درجه



۴۰ درجه

شکل ۸. افزایش نیروی برش با افزایش زاویه شیب عقب برای تیغه برش PDC

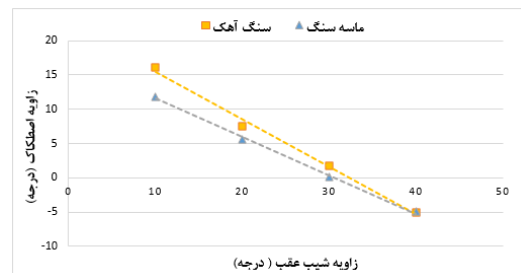
۲.۳ تأثیر زاویه شیب عقب بر روی زاویه اصطکاک

بین سنگ و تیغه برش PDC

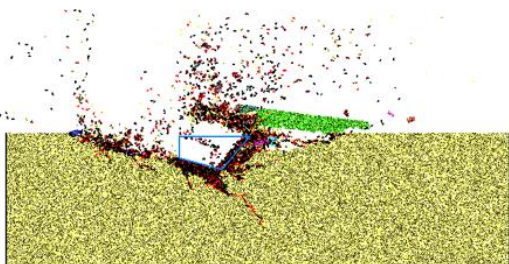
نیروی‌های اصطکاک‌ی فعال بر روی سطح تیغه به نحوه‌ی جریان سنگ در زیر سطح تیغه بستگی دارد. رژیم جریان سنگ در جلوی سطح تیغه، شدت عملکرد تیغه‌ی PDC و نیروهای فعال بر روی تیغه را تغییر می‌دهد. مطابق شکل ۹ با افزایش زاویه تیغه، اصطکاک بین تیغه و سنگ کاهش پیدا می‌کند. سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود، این است که، اگر مواد سنگی تغییر نمی‌کند، پس چگونه زاویه اصطکاک تغییر می‌کند؟ در واقع عامل تأثیرگذار در مقدار زاویه‌ی اصطکاک، تغییرات زاویه‌ای تیغه است که مطابق با شکل ۸ باعث تغییرات نیروی برش و نیروی اعمالی به تیغه می‌شود. مقدار زاویه اصطکاک برای زاویه‌های مختلف تیغه با استفاده از رابطه ۲ حساب شده است (Akbar & Miska, 2016; Akbari et al., 2014).

$$F_n / F_c = \tan(\theta + \psi) \Rightarrow \psi = \text{Arctan}(F_n / F_c) - \theta \quad (2)$$

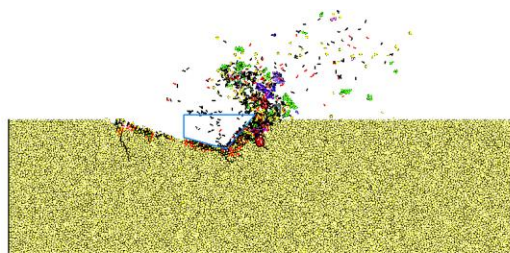
که در آن، ψ زاویه اصطکاک بین سطح تیغه و سنگ است، F_c و F_n به ترتیب مؤلفه‌های نیروی نرمال و برشی و θ زاویه‌ی شیب عقب تیغه است.



شکل ۹. رابطه بین زاویه اصطکاک و زاویه شیب عقب



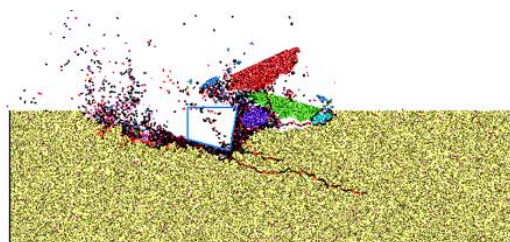
شکل ۱۷. نحوه‌ی شکست ماسه‌سنگ تحت فعالیت تیغه با زاویه ۴۰ درجه



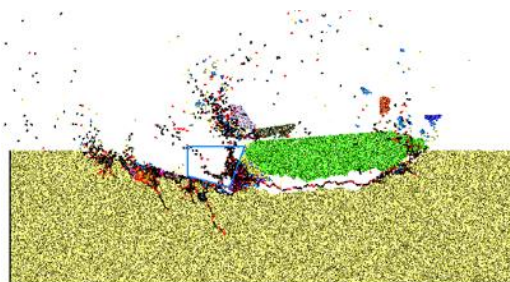
شکل ۱۳. نحوه‌ی شکست سنگ آهک تحت فعالیت تیغه با زاویه ۴۰ درجه

۳.۳ تأثیر عمق برش بر روی مکانیزم شکست سنگ

دو حالت شکست متمایز در هنگام برش سنگ به وجود می‌آید. یک شکست تغییر شکل‌پذیر که در عمق‌های برش کم اتفاق می‌افتد و این نوع شکست را می‌توان با افزایش تدریجی تعداد میکرو ترک‌ها و توسعه زون خرد شده در نوک ابزار برش و ترک‌های برشی توصیف کرد (شکل ۱۸). شکست دیگر، شکست شکننده است که در عمق‌های برش بالا اتفاق می‌افتد و این نوع شکست را می‌توان با افزایش ناگهانی در تعداد میکرو ترک‌ها که حاصل شکست اتصالات برشی و نرمال بین دو ذره است و گسترش ترک‌های کششی در جلوی تیغه و ایجاد *Chip* توصیف کرد (شکل ۱۹). (Huang et al., 2013; He & Xu, 2017).



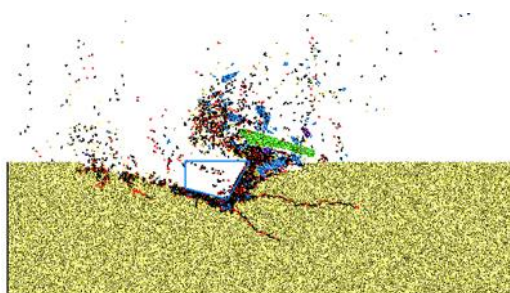
شکل ۱۴. نحوه‌ی شکست ماسه‌سنگ تحت فعالیت تیغه با زاویه ۱۰ درجه



شکل ۱۵. نحوه‌ی شکست ماسه‌سنگ تحت فعالیت تیغه با زاویه ۲۰ درجه

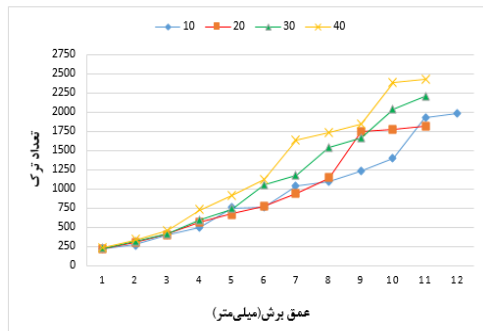


شکل ۱۸. حالت شکست تغییر شکل‌پذیر (jaime et al., 2015)



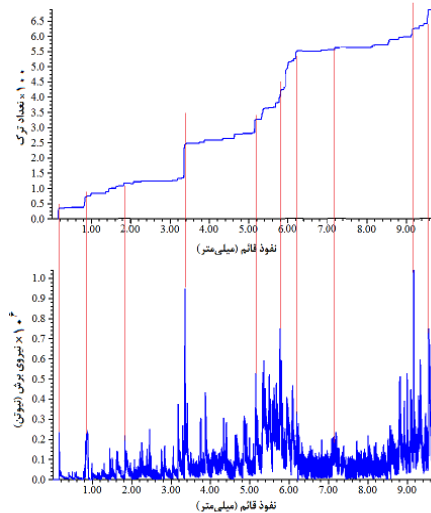
شکل ۱۶. نحوه‌ی شکست ماسه‌سنگ تحت فعالیت تیغه با زاویه ۳۰ درجه

شبه‌سازی عددی اثر زاویه شیب عقب تیغه *PDC* بر روی مکانیزم شکست سنگ با استفاده از روش المان مجزا



شکل ۲۱. رابطه بین عمق برش و تعداد ترک در ماسه‌سنگ

شکل ۲۲ ارتباط بین نیروی برش، با تعداد ترک‌های ایجاد شده در هنگام نفوذ تیغه را نشان می‌دهد. افزایش ناگهانی نیروی برش، باعث افزایش چند برابری تعداد ترک‌ها و به دنبال آن باعث انتقال حالت شکست سنگ از تغییر شکل پذیر به شکننده می‌شود. در ناحیه‌ای که نوسانات نیروی ثابت است، تعداد ترک‌ها هم روند ثابتی را دنبال می‌کند که این خود نشان دهنده‌ی ناحیه‌ی تغییر شکل پذیر است. نوسانات نیروی برش با تعداد ترک‌های ایجاد شده ارتباط مستقیم دارد و افزایش ناگهانی نیروی برش، باعث افزایش ناگهانی تعداد میکرو ترک‌ها می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که رابطه‌ی مستقیم بین تعداد ترک‌های ایجاد شده، مقدار نیروی مصرفی و مقدار انرژی ویژه است.



شکل ۲۲. ارتباط بین نیروی برش و تعداد ترک‌های ایجاد شده در سنگ آهک



شکل ۱۹. حالت شکست شکننده (jaime et al, 2015)

تغییر حالت شکست سنگ از شکل پذیر به شکننده را به اصطلاح انتقال حالت شکست سنگ^{۱۲} می‌نامند (Huang et al., 2013; He et al., 2017). شکل‌های ۲۰ و ۲۱، تعداد ترک‌های ایجاد شده در ۴ زاویه مختلف را به عنوان تابعی از عمق برش نشان می‌دهد. برای سنگ آهک و ماسه‌سنگ انتقال حالت شکست سنگ در عمق برش بین ۳ تا ۴ میلی‌متر با افزایش ناگهانی تعداد میکرو ترک‌ها اتفاق می‌افتد و عمق برش ۳ میلی‌متر را می‌توان عمق برش بحرانی نام‌گذاری نمود. در هر دو نمونه سنگ تا عمق برش ۳ میلی‌متر تعداد ترک‌های ایجاد شده برای هر ۴ زاویه تقریباً یکسان است اما از عمق برش بالای ۳ میلی‌متر، زاویه تیغه نقش مؤثری در تعداد ترک‌های ایجاد شده و میزان خردایش سنگ دارد. به طوری که بزرگترین *chip*‌های تشکیل شده برای سنگ آهک و ماسه‌سنگ با توجه به شکل‌های (۱۵، ۱۴، ۱۱، ۱۰) مربوط به زاویه‌های ۱۰ و ۲۰ درجه است. بیش‌ترین میزان خردشدگی با توجه به شکل‌های (۱۷، ۱۶، ۱۳، ۱۲) در زاویه‌های ۳۰ و ۴۰ درجه اتفاق افتاده است.



شکل ۲۰. رابطه بین عمق برش و تعداد ترک در سنگ آهک

¹² Rock Failure Mode Transition

۴. نتیجه گیری

عملکرد تیغه‌های برش در عملیات حفاری سنگ از مسأله مهم و پیچیده‌ی مهندسی معدن، نفت و عمران است که نیاز به شبیه‌سازی عددی دارد. روش عددی المان مجزا یکی از روش‌های مناسب برای مدل‌سازی مسائل پیچیده مهندسی است که برای آن نرم‌افزارهای متعددی نوشته شده است. در این میان نرم‌افزار *PFC2D* یک برنامه‌ی 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، جابجایی، تنش‌های القایی در سنگ و نحوه‌ی ایجاد و انتشار ترک را دارد. بر اساس مدل‌های عددی انجام شده در این تحقیق، مهم‌ترین نتایج حاصله به شرح زیر است:

- زاویه‌ای شیب عقب تیغه *PDC*، تأثیر قابل توجهی بر روی انرژی ویژه دارد. تیغه *PDC* با زاویه‌ی ۱۰ درجه در مقایسه با زاویه‌ی ۴۰ درجه به انرژی ویژه کمتری نیاز دارد و تأثیر بیشتری در میزان خردایش سنگ دارد.
- سنگ آهک نسبت به ماسه‌سنگ به انرژی ویژه بیشتری نیاز دارد که به خاطر مقاومت بیشتر سنگ آهک نسبت به ماسه‌سنگ است. اما دلیل اصلی آن را می‌توان نوسانات زیاد نیروی افقی در سنگ آهک نسبت به ماسه‌سنگ دانست. در سنگ آهک سیمان شدگی بین ذرات و چسبندگی بین آن‌ها نسبت به ماسه‌سنگ قوی‌تر است.
- مکانیزیم جریان مواد خرد شده در جلوی تیغه‌ی برش، تابعی از هندسه‌ی تیغه و زاویه اصطکاک بین تیغه و ذرات خرد شده است و از جمله عوامل مؤثر در مقدار انرژی ویژه، است.
- نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد، که افزایش عمق برش، تنها باعث انتقال حالت شکست سنگ از شکل‌پذیر به شکننده می‌شود، همچنین زاویه تیغه هم نقش مؤثری در تعداد ترک‌های ایجاد شده و میزان خردایش سنگ دارد. به طوری که بزرگترین *chip* های تشکیل شده برای سنگ آهک و ماسه‌سنگ مربوط به زاویه‌های ۱۰ و ۲۰ درجه است و بیش‌ترین میزان خردشدگی در زاویه‌های ۳۰ و ۴۰ درجه اتفاق افتاده است. با توجه به رابطه‌ی مستقیم بین 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.

۵. سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت مالی شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان مقاله برخورد لازم می‌دانند تا از حمایت‌های بی دریغ شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب برای انجام این پژوهش تقدیر و تشکر نمایند.

۶. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۲ معرف نمادهای مورد استفاده در این مقاله است.

جدول ۲. سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
<i>MSE</i>	<i>MPa</i>	انرژی ویژه
<i>WOB</i>	<i>N</i>	وزن روی مته
<i>RPM</i>	<i>rpm</i>	سرعت روی مته
<i>ROP</i>	<i>mm/s</i>	نرخ نفوذ
ψ	°	زاویه اصطکاک
F_n	<i>N</i>	نیروی نرمال
F_c	<i>N</i>	نیروی برش
θ	°	زاویه شیب عقب
F_{shear}	<i>N</i>	نیروی برشی

۷. پیوست

نتایج شبیه‌سازی عددی در رابطه با آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، در این مقاله با نتایج عددی و آزمایشگاهی ماسه‌سنگ و سنگ آهک تطابق مناسبی دارد، که در جدول ۳ و جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین نمودار تنش- کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی آزمون مقاومت فشاری تک محوره ماسه‌سنگ و سنگ آهک در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ نشان داده شده است.

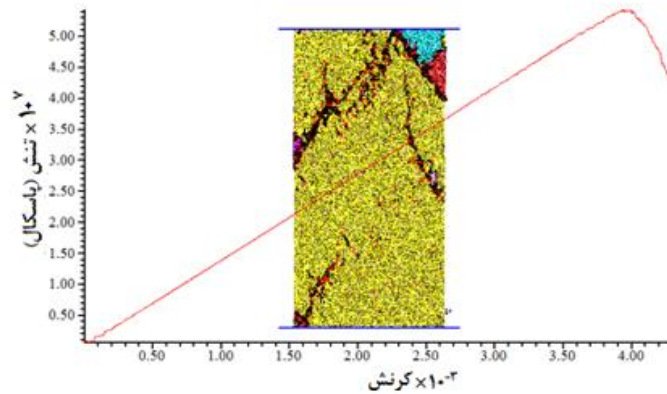
شبیه‌سازی عددی اثر زاویه شیب عقب تیغه *PDC* بر روی مکانیزم شکست سنگ با استفاده از روش المان مجزا

جدول ۳. پارامترهای ماکرو مکانیکی مورد استفاده در تحلیل نرم افزار *PFC2D* (ماسه‌سنگ) (Joodi et al, 2012)

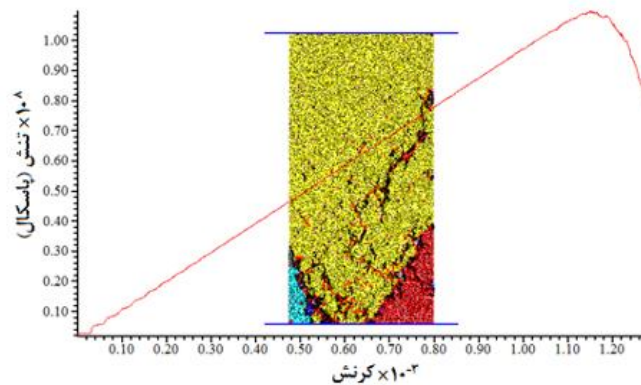
نتایج ماسه سنگ	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ ۵۰٪ (GPa)
آزمایشگاهی (Joodi et al, 2012)	۴۹	—	۱۴
شبیه‌سازی عددی مقاله (Joodi et al, 2012)	۴۸/۸	۰/۳۶	۱۴/۳
شبیه‌سازی عددی در این تحقیق	۵۴	۰/۳۶	۱۴/۳

جدول ۴. پارامترهای ماکرو مکانیکی مورد استفاده در تحلیل نرم افزار *PFC2D* (سنگ آهک) (Akbari et al, 2011)

نتایج سنگ آهک	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ ۵۰٪ (GPa)
آزمایشگاهی (Akbari et al, 2011)	۱۰۰	۰/۲۹	۷۶
شبیه‌سازی عددی مقاله (Akbari et al, 2011)	۱۱۵	۰/۲۶	۹۲
شبیه‌سازی عددی در این تحقیق	۱۰۸	۰/۲۵	۹۷



شکل ۲۳. نمودار تنش- کرنش، حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم افزار *PFC2D* (ماسه‌سنگ)



شکل ۲۴. نمودار تنش- کرنش، حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم افزار *PFC2D* (سنگ آهک)

۸. مراجع

- Akbari, B., & Miska, S. (2016). The effects of chamfer and back rake angle on PDC cutters friction. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 347-353.
- Akbari, B., Butt, S. D., Munaswamy, K., & Arvani, F. (2011, January). Dynamic single PDC cutter rock drilling modeling and simulations focusing on rate of penetration using distinct element method. In *45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
- Akbari, B., Miska, S. Z., Yu, M., & Rahmani, R. (2014, August). The effects of size, chamfer geometry, and back rake angle on frictional response of PDC cutters. In *48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
- Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young, F. S. (1991). *Applied drilling engineering* (Vol. 2, pp. 137-144). Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
- Cho, H. (1997). *Effects of Cutting Forces on Mechanical Rock Properties Using a Single Polycrystalline Diamond Compact (PDC) Drag Bit* (Doctoral dissertation, University of Oklahoma).
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *geotechnique*, 29(1), 47-65.
- Glowka, D. A. (1989). Use of single-cutter data in the analysis of PDC bit designs: Part 1-development of a PDC cutting force model. *Journal of Petroleum Technology*, 41(08), 797-849.
- Haeri, H., & Marji, M. F. (2016). Simulating the crack propagation and cracks coalescence underneath TBM disc cutters. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 124.
- He, X., Xu, C., Peng, K., & Huang, G. (2017). On the critical failure mode transition depth for rock cutting with different back rake angles. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 95-105.
- Hentz, S., Donzé, F. V., & Daudeville, L. (2004). Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates. *Computers & structures*, 82(29), 2509-2524.
- Hibbs, L. E., & Flom, D. G. (1978). Diamond compact cutter studies for geothermal bit design. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 100(4), 406-416.
- Hough Jr, C. L. (1986). The Effect of Back Rake Angle on the Performance of Small-Diameter Polycrystalline Diamond Rock Bits: ANOVA Tests. *ASME J. Energy Resour. Technol*, 108(4), 305-309.
- Hosseini_Nasab, H., & Fatehi Marji, M. (2007). A semi-infinite higher-order displacement discontinuity method and its application to the quasistatic analysis of radial cracks produced by blasting. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(3), 439-458.
- Huang, H., Detournay, E., & Bellier, B. (1999). Discrete element modelling of rock cutting. *Rock Mechanics for Industry*, 1(1), 123-130.
- Huang, H., Lecampion, B., & Detournay, E. (2013). Discrete element modeling of tool-rock interaction I: rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(13), 1913-1929.

- Itasca Consulting Group Inc.; 2008; "PFC2D Manual".
- Jaime, M. C., Zhou, Y., Lin, J. S., & Gamwo, I. K. (2015). Finite element modeling of rock cutting and its fragmentation process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 137-146.
- Joodi, B., Sarmadivaleh, M., Rasouli, V., & Nabipour, A. (2012). Simulation of the cutting action of a single PDC cutter using DEM. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 81, 143-150.
- Karadzhova, G. N. (2014). Drilling efficiency and stability comparison between Tricone, PDC and Kymera drill bits (Master's thesis, University of Stavanger, Norway).
- Kerr, C. J. (1988). PDC drill bit design and field application evolution. *Journal of petroleum technology*, 40(03), 327-332.
- Khorshidian, H., Mozaffari, M., & Butt, S. D. (2012, January). The Role of Natural Vibrations in Penetration Mechanism of a single PDC cutter. In 46th US Rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association.
- Marji, M. F. (2015). Simulation of crack coalescence mechanism underneath single and double disc cutters by higher order displacement discontinuity method. *Journal of Central South University*, 22(3), 1045-1054.
- Menezes, P. L., Lovell, M. R., Avdeev, I. V., & Higgs, C. F. (2014). Studies on the formation of discontinuous rock fragments during cutting operation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71, 131-142.
- Piery, J., & Charlier, R. (1994, January). 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.
- Rafatian, N., Miska, S. Z., Ledgerwood, L. W., Yu, M., Ahmed, R., & Takach, N. E. (2010). Experimental study of MSE of a single PDC cutter interacting with rock under simulated pressurized conditions. *SPE Drilling & Completion*, 25(01), 10-18.
- Rajabov, V., Miska, S. Z., Mortimer, L., Yu, M., & Ozbayoglu, M. E. (2012, January). 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. In *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Saouma, V. E., & Kleinosky, M. J. (1984, January). Finite element simulation of rock cutting: a fracture mechanics approach. In *The 25th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- Teale, R. (1965, March). The concept of specific energy in rock drilling. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 2, No. 1, pp. 57-73). Pergamon