

## مطالعه‌ی اثرگذاری استفاده از دندانه‌های الماسه مخروطی در مته‌های الماسی پلی کریستال برای حفاری با سرعت زیاد در سازندهای بسیار سخت

حسین یآوری\*، رسول خسروانیان<sup>۱</sup>، دانشگاه صنعتی امیرکبیر • محمد فضالی‌زاده<sup>۲</sup>، دانشگاه کلگری کانادا

### چکیده

مته‌های الماسی پلی کریستال که به مته‌های PDC<sup>۳</sup> معروف هستند به گستردگی و با موفقیت در همه جای دنیا استفاده شده‌اند. از عوامل مقبولیت آنها می‌توان به عمر زیاد و سرعت قابل قبول آنها اشاره کرد. این مته‌ها نسبت به ضربه حساس هستند و در سازندهای بسیار سخت (مثل لایه‌های کربناته‌ی سخت حاوی چرت و پیریت) عملکرد ضعیفی دارند. همچنین دندانه‌های آنها به دلیل ساختاری، گشتاور زیادی دارند و به سرعت آسیب می‌بینند. نوع جدیدی از مته‌های PDC با دندانه‌های الماسه CDE<sup>۴</sup> نام دارند. وجه تمایز این مته‌ها در مقایسه با سایر انواع مته‌ی PDC ساختار دندانه‌های آنهاست که الماسی مخروطی شکل است. وجود این دندانه‌های مخروطی، ویژگی‌های جدیدی را به مته PDC می‌دهد و سبب عملکرد بهتر آن به‌خصوص در سازندهای سخت می‌شود؛ از جمله اینکه ساختار مخروطی شکل دندانه‌ها در مقابل ساییدگی و ضربه‌های وارده به مته مقاومت بیشتری دارند و سبب افزایش عمر مته و نیاز کمتر به تعویض آن در سازندهای سخت و افزایش سرعت میانگین حفاری در این سازندها می‌شود. دندانه‌های مخروطی شکل همچنین، گشتاور کمتری روی مته دارند که به مته اجازه می‌دهد بهتر زاویه‌سازی کند و باعث بهبود عملکرد مته در حفاری‌های جهت‌دار می‌شود. از دیگر مزایای این نوع مته ارتعاشات کمتر رشته‌ی حفاری و ایجاد خرده‌های حفاری بزرگ‌تر است. در این مطالعه، مته‌های CDE و نحوه‌ی عملکرد آنها بررسی شده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۱۲/۰۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۳/۰۴

### واژگان کلیدی:

مته‌ی الماسی پلی کریستال، دندانه‌های الماسه‌ی مخروطی، سرعت حفاری، گشتاور روی مته، ارتعاشات رشته‌ی حفاری

### مقدمه

را کاهش می‌دهد. از مزایای این مته‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳]:

- عمر زیاد و حفاری عمق‌های زیاد بدون نیاز به تعویض مته
- قابلیت استفاده در انواع سازندها
- دارای بدنه‌ی<sup>۵</sup> بسیار قوی است که به‌ندرت ساییده<sup>۶</sup> می‌شود.
- با گذاشتن نازل، تمیز کاری زیر مته به خوبی صورت می‌گیرد.
- به‌علت نداشتن ناحیه‌ی متحرک کمتر مانده<sup>۷</sup> می‌گذارد.
- نیاز به وزن کمتری روی مته دارد.

مته‌های PDC به‌دلیل ساختار دندانه‌هایشان گشتاور زیادی دارند و نسبت به ضربه حساسند. در سازندهای نرم به‌دلیل نرمی لایه‌ها مته آسیب نمی‌بیند اما در سازندهای سخت مته بلافاصله آسیب می‌بیند. سازندگان مته‌های PDC به این موضوع پی برده‌اند و در طراحی‌های خود تجدیدنظر کرده و نوع جدیدی از مته‌های PDC که در سازندهای سخت قابل استفاده‌اند و گشتاور کمتر، عمر و پایداری بیشتر و جهت‌گیری بهتری دارند را طراحی کرده‌اند [۴].

از اواسط دهه‌ی ۷۰ میلادی مته‌های الماسی پلی کریستال وارد صنعت حفاری جهان شدند. سطح مته‌های یاد شده را لایه‌ای از الماس‌های مصنوعی به‌قطر ۰/۴ اینچ پوشش می‌دهد. این لایه با حاشیه‌ای از تنگستن کارباید در دما و فشار زیاد مرزبندی و در جای خود محکم می‌گردند [۱]. امروزه سرعت تغییر در طراحی و ساختار مته‌های پلی کریستال زیاد بوده و مدل‌های جدید با کارایی‌های ارتقاء یافته به بازار ارائه شده است. مته‌های PDC در سازندهای نرم، متوسط و نیمه‌سخت کارآیی زیادی دارند. طبق گزارش‌های موجود مته‌های PDC در سازندهای کربناته و تبخیری‌های تمیز (بدون شیل) بیشترین کارآیی را دارند و در ماسه‌سنگ‌ها، سیلتستون‌ها و شیل‌های سخت غیر چسبنده نیز کارآیی خوبی دارند [۲].

از عوامل مهم طراحی مته‌های PDC شکل مته و مقطع تاج‌مانند آنهاست. شکل دندانه‌ها و زاویه‌ی قرارگیری آنها نیز با توجه به نرمی و سختی سازند تعیین می‌شود. با اینکه قیمت مته‌های PDC چندین برابر مته‌های سه کاجی است اما در عمل استفاده از آنها به‌صرفه است و هزینه‌ی حفر چاه

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (h.yavari@nioc.ir)

به سرعت می شکست. استفاده از مته‌های الماسه<sup>۱</sup> به همراه توربین با سرعت چرخش زیاد (حدود ۱۴۰۰-۱۳۰۰ دور بر دقیقه) برای حفاری این حفره تا حدودی موفقیت آمیز بود. مته‌های الماسه در این لایه‌ی متوسط، سرعت حفاری ۳/۴ متر بر ساعت داشتند که هر مته حدود ۵۵۰ متر را حفاری کرد [۵]. مته‌های الماسه علاوه بر قیمت زیاد، خرده‌های حفاری بسیار ریزی تولید می کردند که جداسازی آنها در سطح حتی توسط سانتریفیوژ هم غیرممکن بود و با حفاری قسمتی از چاه وزن گل افزایش می یافت که نیاز به استفاده از گل جدید داشت و سبب افزایش هزینه می شد [۶]. در حفاری این حفره، مته‌های کاجی<sup>۲</sup> اگرچه نسبت به مته‌های الماسه سرعت بیشتری داشتند اما با حفاری مترها کمی کاملاً ساییده می شدند و نیاز به پیمایش و تعویض مته بود که این امر سبب افزایش هزینه‌ها می شد. شکل ۱- مته‌های کاجی استفاده شده را نشان می دهد [۷].

شکل ۲- مته‌های PDC استفاده شده در این میدان در لایه‌ی حاوی چرت را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود دندان‌های این مته به خصوص قسمت‌های سفید رنگ، شکسته اند که نشان می دهد عمده ترین اشکال مته‌ی PDC ساختار دندان‌های آنست [۷].

در نتیجه یک مته‌ی PDC جدید با ساختار دندان‌های مخروطی شبیه به مته‌های کاجی طبق آنچه در شکل ۳- نشان داده شده پیشنهاد گردید [۸]. یک آنالیز المان محدود برای بررسی

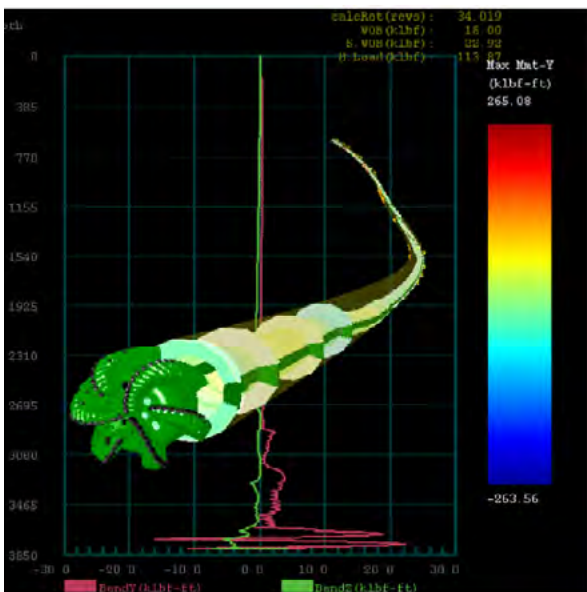
توسعه‌ی مخازن میدان چیناروسکو در قزاقستان نیازمند حفاری در سنگ‌های کربناته بسیار سخت حاوی چرت بود. لایه‌ی سخت کربناته و از عمق ۲۰۵۰ تا ۳۱۱۰ متر حاوی ۱۰ تا ۵۰ درصد چرت است. استفاده از مته‌ی PDC برای حفاری این حفره موفقیت آمیز نبود؛ زیرا دندان‌های مته‌های PDC



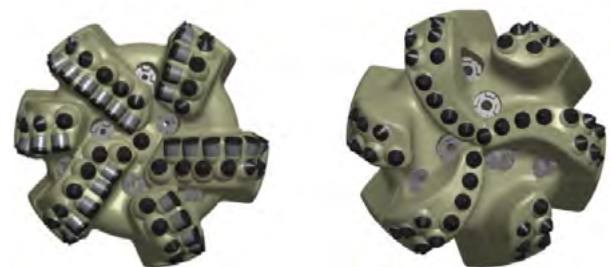
شکل ۱ | مته‌ی کاجی استفاده شده در سنگ‌های کربناته‌ی سخت حاوی چرت [۸]



شکل ۲ | مته‌ی PDC استفاده شده در سازند کربناته‌ی سخت حاوی چرت [۷]



شکل ۳ | آنالیز المان محدود برای بررسی عملکرد مته‌های مختلف قبل از راندن در سازند [۷]



شکل ۴ | مته‌ی PDC جدید با دندان‌های الماسه مخروطی [۸]



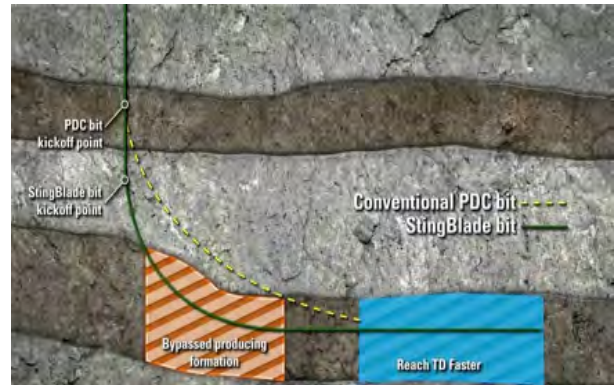
- ایجاد خرده‌های حفاری بزرگ‌تر
- کاهش هزینه‌های حفاری در لایه‌های سخت

شکل ۶- عملکرد مته‌ی CDE در برابر مته‌های کاجی و مته‌ی PDC برای حفاری در حفره‌ی ذکر شده را نشان می‌دهد. در چاه‌های الف و ب برای حفاری این حفره از تعداد زیادی مته استفاده شده است. همه‌ی این مته‌های کاجی و PDC پس از کمی حفاری در این سازند به دلیل سرعت حفاری کم یا گشتاور زیاد از چاه بیرون آورده شده‌اند که به شدت فرسوده شده بودند. در حالی که در چاه هدف که از مته‌ی CDE استفاده شده حفاری کل حفره تنها با استفاده از یک مته‌ی CDE و با سرعت زیادی انجام شده و مته نیز ساییدگی کمی داشته است. از طرفی به دلیل آنکه با استفاده از مته‌ی CDE ارتعاشات رشته‌ی حفاری به شدت کاهش می‌یابد حفره‌ی حفاری شده در چاه هدف در مقایسه با چاه‌های الف و ب کیفیت بهتر و انحراف از مسیر کمتری نیز داشته است.

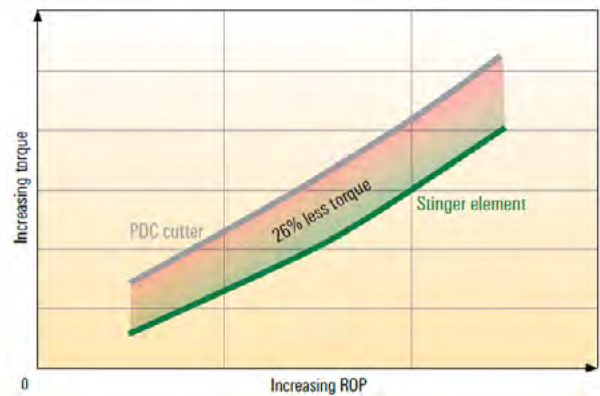
این مته‌ی جدید، CDE نام دارد که ویژگی بارز آن ساختار دندان‌هاس است. شکل ۷- ساختار این مته را نشان می‌دهد [۱]. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود ساختار این مته ترکیبی از ساختار مته‌ی کاجی و مته‌ی PDC است. در ادامه عملکرد مته‌ی CDE و ویژگی‌های آن بررسی شده است.

### ۱- افزایش متراژ و سرعت حفاری

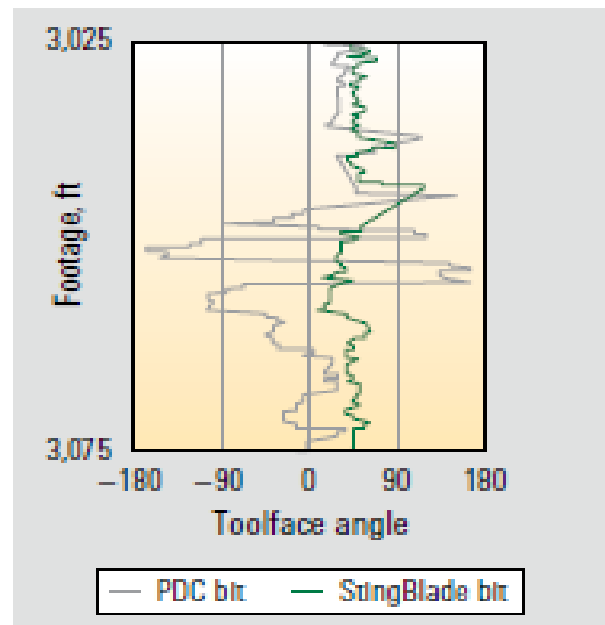
در مته‌ی CDE به دلیل درگیری کمتر دندان‌های مخروطی با سازند در مقایسه با دندان‌های رایج در مته‌های PDC، گشتاور و ارتعاشات کمتری ایجاد می‌شود. کاهش گشتاور روی مته و ارتعاشات رشته‌ی حفاری سبب افزایش عمر مته و تجهیزات درون‌چاهی می‌گردد. همچنین دندان‌های با ساختار مخروطی شکل نسبت به دندان‌های رایج مته‌های PDC، استقامت بیشتری در برابر ضربه<sup>۱۱</sup> دارند. طبق آزمایش انجام شده توسط شرکت اسمیت دندان‌های الماسه‌ی مخروطی استقامت بسیار زیادی در برابر ضربه دارند. شکل ۸- عملکرد دندان‌ها را در برابر ضربه نشان می‌دهد. در این آزمایش شرایط حفاری در یک سنگ کربناته‌ی سخت با سرعتی معادل ۶۰ فوت بر ساعت شبیه‌سازی می‌شود که نیرویی معادل ۱۸۰۰۰ پوند به هر دندان وارد می‌شود. دندان‌های مته‌ی PDC در همان برخورد اول می‌شکند؛ در حالی که دندان‌های مته‌ی CDE پس از ۱۰۰ برخورد همچنان سالم باقی مانده



شکل ۱۰ | عملکرد مته‌های PDC و مته‌ی CDE در حفاری جهت‌دار [۱۵]



شکل ۱۱ | رابطه‌ی گشتاور و سرعت حفاری برای مته‌ی PDC و مته‌ی CDE [۸]



شکل ۱۲ | تغییرات toolface angle برای مته‌ی PDC و مته‌ی CDE [۱۵]

PDC باعث کاهش سرعت حفاری، ارتعاشات رشته‌ی حفاری، کاهش زاویه‌سازی<sup>۱۱</sup>، خطر از دست دادن نقطه‌ی هدف<sup>۱۳</sup>، افزایش زمان و هزینه‌های حفاری و در نهایت کاهش بازده آن می‌شود. دندان‌های الماسه‌ی مخروطی مته‌های CDE به دلیل درگیری کمتر با سازند، گشتاور و ارتعاشات کمتر، زاویه‌سازی بهتر و سرعت حفاری بیشتری دارند [۸]. شکل-۱۰ عملکرد مته‌های PDC و مته‌ی CDE را در حفاری جهت‌دار نشان می‌دهد. همان‌طور که در بالا گفته شد مته‌های CDE قابلیت زاویه‌سازی و کنترل‌پذیری بهتری دارند [۱۵].

شکل-۱۱ گشتاور و سرعت حفاری را برای مته‌های PDC و مته‌ی CDE نشان می‌دهد. مته‌های CDE، ۲۶ درصد گشتاور کمتری دارند [۶ و ۸]. مته‌های CDE در مقایسه با مته‌های PDC کنترل‌پذیری<sup>۱۴</sup> بهتری نیز دارند. شکل-۱۲ تغییرات زاویه‌ی مسیر<sup>۱۵</sup> را برای مته‌ی PDC و مته‌ی CDE نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مته‌ی CDE نوسانات کمتر و کنترل‌پذیری بهتری دارد [۱۵].

### ۳- کاهش ارتعاشات رشته‌ی حفاری

ارتعاشات رشته‌ی حفاری سبب کاهش سرعت حفاری و خراب شدن تجهیزات درون‌چاهی می‌شود. طبق شکل-۱۳ نیروهای جانبی<sup>۱۶</sup> وارده به دندان‌های مته‌ی PDC سبب ناپایداری و ایجاد ارتعاشات ناخواسته در رشته‌ی حفاری می‌شود [۵ و ۷].

شکل-۱۴ ارتعاشات رشته‌ی حفاری را در مته‌ی CDE و مته‌ی PDC نشان می‌دهد [۸]. دندان‌های مخروطی مته‌های CDE نیروی جانبی کمتری دارند. در نتیجه این مته‌ها با گشتاور و ارتعاشات کمتری حفاری می‌کنند که این امر سبب افزایش عمر مته، سرعت حفاری و جلوگیری از ایجاد مشکلات در تجهیزات درون‌چاهی می‌شود. همچنین هنگام حفاری با مته‌ی CDE به دلیل ارتعاشات کمتر رشته‌ی حفاری، چاه حفر شده کیفیت بهتر و انحراف از مسیر کمتری دارد که این امر سبب کاهش مشکلات در هنگام راندن لوله‌ی جداری و سیمان‌کاری چاه می‌شود [۸].

### ۴- ایجاد خرده‌های بزرگ‌تر

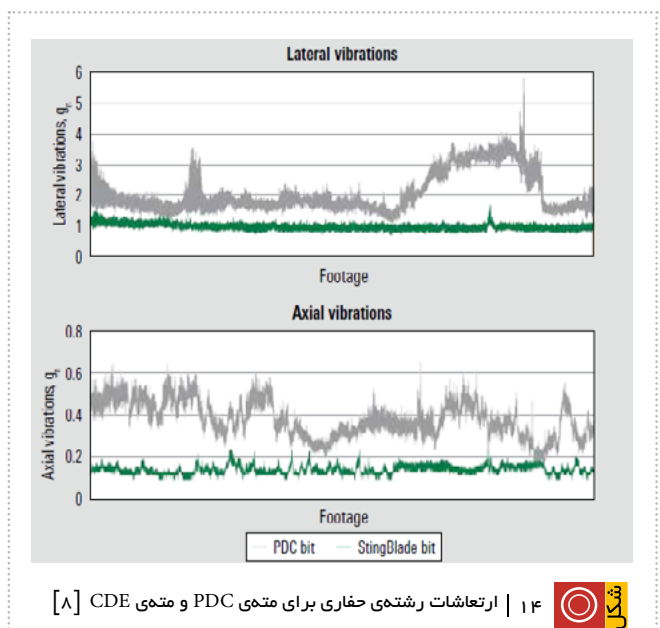
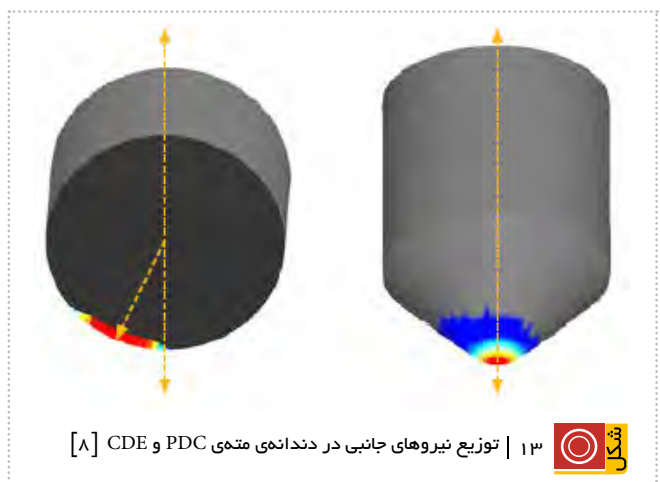
طبق شکل-۱۵ مدل آنالیز اجزای محدود<sup>۱۷</sup> نشان می‌دهد دندان‌های الماسه‌ی مخروطی تنش بیشتری به سازند وارد می‌کنند و وزن روی مته به صورت نقطه‌ای و متمرکز به سازند وارد شده و سبب شکست آن می‌گردد. شکل-۱۵ تنش وارده به

است. نتایج حفاری با مته‌ی CDE در ۲۷ کشور مختلف نشان می‌دهد که این مته‌ها در سازندهای سخت متراژ حفاری را حدود ۵۶ درصد افزایش داده‌اند [۶ و ۸ و ۹].

همان‌طور که در شکل-۹ دیده می‌شود دندان‌های مته‌ی CDE مثل دندان‌های مته PDC از جنس الماس با روکشی از تنگستن کاربید است اما ساختار مخروطی شکل آنها سبب مقاومت بیشتری در برابر ساییدگی می‌شود. طبق شکل-۹ مقاومت دندان‌های الماسه‌ی مخروطی در برابر ضربه دو برابر مقاومت دندان‌های معمولی است و حدوداً ۳۰-۲۵ درصد مقاومت بیشتری در برابر ساییدگی دارند که سبب افزایش متراژ و سرعت میانگین حفاری می‌شود.

### ۲- بهبود زاویه‌سازی و کنترل‌پذیری بهتر

در هنگام زاویه‌سازی و حفاری جهت‌دار، گشتاور زیاد مته‌های



قسمت متحرک در ساختار خود، کمتر مانده در چاه بجا می‌گذارند. مکانیسم شکستن سازند در این مته‌ها خراشیدن است و در نتیجه به وزن کمتری روی مته نیز احتیاج دارند. در سازندهای سخت نظیر سازند کربناته‌ی حاوی چرت و پیریت، مته‌های PDC به دلیل ساختار دندان‌ها گشتاور زیادی دارند و با ارتعاشات شدید و درگیری مته با سازند به سرعت دندان‌ها می‌شکنند و عملکرد ضعیفی دارند.

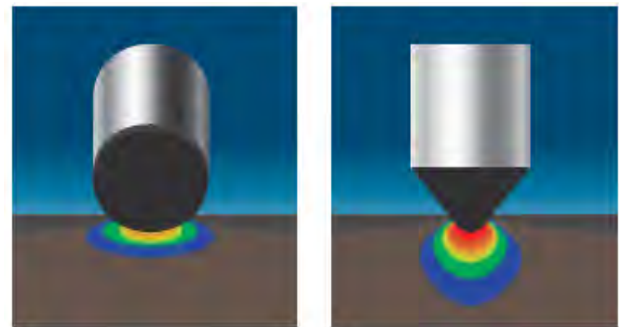
در حفاری سازندهای سخت با مته‌های الماسه نیز سرعت کم است و خرده‌های حفاری آنقدر ریز هستند که در سطح سانتریفیوژ هم نمی‌تواند خرده‌ها را از گل جدا کند و پس از مدتی حفاری، باید گل جدید ساخته شود که با توجه به قیمت زیاد آنها هزینه‌ها به شدت افزایش می‌یابد. اگرچه مته‌های کاجی سرعت حفاری بیشتری دارند اما عمر آنها کم است، به سرعت سائیده می‌شوند و نیاز به تعویض دارند که این امر باعث افزایش زمان و هزینه‌های حفاری می‌شود.

بر اساس مطالعات، شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط آنالیز المان محدود و مشاهدات میدانی، نوع جدیدی از مته‌های PDC که دندان‌های الماسه‌ی مخروطی دارند در حفاری لایه‌های بسیار سخت عملکرد بسیار خوبی دارند. به طوری که بدون نیاز به تعویض مته، به طور کامل و با سائیدگی بسیار کم می‌توانند سازندهای بسیار سخت را حفاری نمایند. ویژگی‌های این مته‌ی جدید که CDE نام دارد تنها به دلیل ساختار دندان‌های الماسه‌ی مخروطی مقاوم آنست. دندان‌های مخروطی، مکانیسم شکستن سازند را در مته‌ی PDC از خراشیدن به خرد کردن/خراشیدن تغییر داده و به همین دلیل که کمتر با سازند درگیر می‌شوند گشتاور کمتر، جهت‌پذیری بهتر، قابلیت زاویه‌سازی بیشتر و ارتعاشات کمتری نیز دارند. این مته‌ها به دلیل ساختار مقاوم دندان‌هایشان، گشتاور و ارتعاشات کمتر و در نتیجه عمر بیشتری نیز دارند. همچنین به دلیل آنکه مکانیسم شکست آنها خراشیدن نیست سرعت حفاری آنها نیز بیشتر است و خرده‌های بزرگ‌تری تولید می‌کنند که سبب می‌شود حمل خرده‌های حفاری و تمیزکاری چاه بهتر انجام شود. در حفاری برخی میادین کشور به دلیل وجود سازندهای کربناته سخت و سازندهای حاوی چرت و پیریت استفاده از مته‌های کاجی و PDC از نظر مترآژ و سرعت حفاری نتایج بسیار ضعیفی داشته و چاه حفر شده نیز کیفیت مناسبی نداشته است. در این میادین استفاده از فن‌آوری جدید CDE می‌تواند مترآژ و سرعت حفاری را افزایش داده و سبب کاهش هزینه‌های حفاری گردد.

سنگ و توزیع آنرا برای هر دو نوع دندان‌ها نشان می‌دهد [۸]. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که مته‌های CDE خرده‌های حفاری با قطر بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر ایجاد می‌کنند که این امر سبب می‌شود تمیزکاری چاه و حمل خرده‌ها به سطح بهتر صورت گیرد. این خرده‌ها همچنین می‌توانند برای تعیین تراوایی، تخلخل، نوع سازند و نوع سیال سازند استفاده شوند. شکل-۱۶ اندازه‌ی خرده‌های ایجاد شده توسط این نوع مته در مقایسه با مته‌ی PDC را نشان می‌دهد [۸ و ۱۵].

### نتیجه‌گیری

بارزترین ویژگی مته‌های PDC عمر زیاد و قابلیت حفاری با مترآژ زیاد در انواع سازندهاست. در این مته‌ها سائیدگی بدنه به ندرت اتفاق می‌افتد. این مته‌ها همچنین به دلیل نداشتن



شکل ۱۵ | توزیع تنش ناشی از دندان‌های الماسه‌ی مخروطی و دندان‌های رایج در مته‌های PDC [۵۹۷]



شکل ۱۶ | اندازه‌ی خرده‌های حفاری برای مته‌های PDC و مته‌ی CDE [۱۵]

1. mfazaeli@yahoo.com	7. Fish	12. Build Rate
2. rasoolkhosravianian@yahoo.com	8. Impregnated diamond bit	13. Target
3. Polycrystalline diamond compact	9. Roller Cone	14. Toolface Control
4. Sting Blade Conical Diamond Element	10. Sting Blade Conical Diamond Element	15. Toolface Angle
5. Gage	Bit	16. Lateral Force
6. Under gage	11. Impact Strength	17. Finite Element Analysis

- 7 - 9 December 2009.
- [10]. H. Aslaksen, M. Annand, R. Duncan, A. Fjaere, L.Paez, SPE; Smith Technologies, 2006. Integrated FEA Modeling Offers System Approach to Drillstring Optimization\_ paper IADC/SPE 99018 presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Miami, Florida, U.S.A, 21 - 23 February 2006.
- [11]. John Schilling, Emy Cooley, Mike Azar, Allen White, Kerry Koffler, Scott McDonough, Jordan Self, Bradley Krough, 2016. Conical diamond element bit significantly reduces drilling cost of laterals, IADC/SPE-180499-MS.
- [12]. Vyacheslav German, Lukoil; Mikhail Pak, Michael Azar and Smith Bits, a Schlumberger Company, 2015. Conical Diamond Element Bit Sets New Performance Benchmark Drilling Extremely Hard Carbonate/Chert Formations, Perm Region Russia\_ paper SPE/IADC 173144 presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, United Kingdom, 17-19 March 2015.
- [13]. Nik Fahusnaza Nik Mohd Najmi, Azrin Soh, Divya Nair, Muhammad Afiq Zaim, Taufik Omar, Biju James, Bramanta Subroto, Schlumberger, 2015. Advanced FEA Modeling Delivers Solution for Designing a Dual Hole Opening BHA for a Single Directional Run\_ paper SPE/IADC presented at London, United Kingdom, 17 - 19 March 2015.
- [14]. Michael Azar, Allen White, Steven Segal, Suman Velvaluri, Gary Garcia, Smith Bits, a Schlumberger Company; Malcolm Taylor, Novatek Inc, 2013. Pointing Towards Improved PDC Bit Performance: Innovative Conical Shaped Polycrystalline Diamond Element Achieves Higher ROP and Total Footage\_ paper SPE/IADC 163521 presented at The Netherlands, 5-7 March 2013.
- [15]. کاتالوگ تولیدات مته های اسمیت، کمپانی شلمبرژر، 2016. مته های Sting- Blade Conical diamond element
- [16]. German, V., Pak, M., and Azar, M., 2015. Diamond Element Bit Sets New Performance Benchmarks Drilling Extremely Hard Carbonate/Chert Formations, Perm Region Russia. Presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, England, UK, 17-19 March. SPE-173144-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/173144-MS>.
- [1]. سایت اداره ملی ثبت اختراعات ایالات متحده آمریکا (United States Patent and Trademark Office).
- [2]. هادی آشتیانی عبدی، شرکت نفت فلات قاره ایران، ۱۳۸۹. مته های هیبریدی پیوند روپا و واقعیت، مجله اکتشاف و تولید، شماره ۷۵، دی ماه ۱۳۸۹.
- [3]. عارف شمشکی، محمدرضا صادقی مقدم، سید امیررضا پورهایمی، ۲۰۱۵، بررسی و چگونگی کاربرد مته های PDC در عملیات حفاری و استخراج، چهارمین همایش ملی شیمی و مهندسی شیمی با رویکرد توسعه نانو.
- [4]. Azar, M., White, A., Velvaluri, S., Beheiry, K., Johnny, M.M., 2013. Middle East Hard/Abrasive Formation Challenge: Reducing PDC Cutter Volume at Bit Center Increases ROP/Drilling Efficiency\_ paper SPE/IADC 166755 presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Dubai, UAE, 7-9 October 2013.
- [5]. Mikhail Pak, Michael Azar, Joerg Pahl, Zhaikmunai LLP, 2016. Conical diamond element enables PDC bit to efficiently drill chert interval at high ROP Replacing Turbine/Impregnated BHA, IADC/SPE-178765-MS.
- [6]. Azar, M., White, A., Segal, S., Velvaluri, S., Garcia, G., Taylor, M., 2013. Pointing Towards Improved PDC Bit Performance: Innovative Conical Shaped Polycrystalline Diamond Element Achieves Higher ROP and Total Footage\_ paper SPE/IADC 163521 presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 5-7 March 2013.
- [7]. Farah Farhana Iskandar, Davide Fanti, Tan Tai Liang, 2016. Innovative conical diamond element bits deliver superior performance drilling a geothermal well in the Philippines, OTC-26421-MS.
- [8]. Venkataramanan Radhakrishnan, Anil Chuttani, Fauzia Anggrani, Huang Nan, Sirikania Onkvisit, 2016, Conical diamond technology delivers step change in directional drilling performance, IADC/SPE-180515-MS.
- [9]. Mohannad Al-Muhailan, Iqbal Hussain, Kuwait Oil Company; Harish Maliekkal, Osama Ghoneim, Prakash Nair, Mustafa Fayed; Smith Bits/Schlumberger, 2009. New HTHP Cutter Technology Coupled with FEA-Based Bit Selection System Improves ROP by 60% in Abrasive Zubair Formation\_ paper IPTC 17122 presented at International Petroleum Technology Conference. Doha, Qatar,