

مطالعه آزمایشگاهی روش نوین حفاری با لیزر: انقلابی در صنعت حفاری و اکتشاف

مهدی بخت بیدار^{۱*}، محسن قربانخانی^۲، محمدرضا کاظمی اسفنه^۳، مهدی علی محمدی^۴

- ۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، باشگاه پژوهشگران جوان، امیدیه، ایران، ۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، باشگاه پژوهشگران جوان، امیدیه، ایران، ۳- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، گروه نفت، امیدیه، ایران، ۴- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، باشگاه پژوهشگران جوان، امیدیه، ایران

bakhtbidarm@hotmail.com

چکیده

در این مقاله به بحث و بررسی تکنولوژی حفاری با لیزر که اساسی‌ترین جایگزین برای حفاری دورانی می‌باشد، پرداخته می‌شود. ما ابتدا با تاریخچه کوتاهی از آزمایشاتی که قبلاً در موسسات دیگر انجام شده است می‌پردازیم. در ادامه با ذکر پارامترهای موثر بر روی کاهش مقدار انرژی مخصوص سنگ و در نتیجه افزایش مقدار سرعت حفاری، به بررسی این مورد خواهیم پرداخت. موضوع دیگری که در این آزمایش به آن اشاره خواهد شد، تأثیرات لیزر بر روی سرعت حفاری، هزینه‌های حفاری و همچنین محیط زیست می‌باشد. و در آخر با داده‌هایی که از آزمایشات مختلفی که در طی این تحقیق بدست آمده است اثبات خواهد شد که این نوع حفاری نوین می‌تواند جایگزین مناسب و مقرون به صرفه ای به جای حفاری دورانی باشد.

حفاری با لیزر یکی از راه‌کارهای موثر و مناسب جهت حفاری و عملیات مشبک کاری سازندهای سخت و متراکم با عمق زیاد می‌باشد. یکی از مزایای استفاده از لیزر جهت حفاری چاه‌های نفت و گاز، توانایی کاهش مدت زمان حفاری می‌باشد. در حفاری با لیزر به جهت تماس نداشتن با سطح سنگ در حین حفاری و جلوگیری از توقف حفاری برای تعویض مته، در مدت زمان حفاری صرفه جویی عمده‌ای صورت خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: حفاری با لیزر، سرعت حفاری، انرژی مخصوص، محیط زیست

۱- مقدمه

امروزه، حفاری‌های نوین و بررسی در مورد روش‌های ممکن برای جایگزینی با حفاری دورانی بحث مورد علاقه بسیاری از سیاست‌گذاران صنعت نفت و مهندسين حفاری می‌باشد. روش‌های متعددی برای جایگزینی با حفاری دورانی پیشنهاد شده است که از جمله از آنها می‌توان به حفاری با بخار آب، حفاری با فشار آب و حفاری با لیزر اشاره کرد. از بین این روش‌ها، شاید حفاری با لیزر یکی از روش‌های مورد قبولی که نسبت به سایر روش‌ها تحقیقات گسترده در مورد آن انجام شده است، می‌باشد. آزمایش‌های متعدد ثابت کرده که با استفاده از تکنولوژی لیزر در حفاری سنگ‌ها می‌توان در عین افزایش سرعت حفاری، هم زمان هزینه‌های حفاری و آلودگی زیست محیطی را کاهش داد. در این مقاله سعی بر آن شده است که یک ارتباط قوی بین تکنولوژی لیزر و صنعت حفاری چاه‌های نفت و گاز ایجاد شده تا زمینه‌ساز ورود این تکنولوژی به صنعت حفاری شود.

از سال ۱۹۷۷ تا کنون در زمینه استفاده از تکنولوژی لیزر در حفاری چاه‌های نفت و گاز تحقیقات وسیعی صورت گرفته است. اولین آزمایش توسط ارتش آمریکا تحت عنوان پروژه MIRACL صورت گرفت. این آزمایش نشان داد که سرعت حفاری با استفاده از لیزر در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ برابر افزایش می‌یابد. آزمایش بعدی توسط نیروی هوایی آمریکا تحت عنوان COIL انجام شد.^[۱] آزمایش‌های مختلفی که تا کنون انجام شده است، همگی یک هدف اصلی را دنبال می‌کردند و آن، بیشترین حفاری سنگ با کمترین توان مورد نیاز لیزر می‌باشد. بر همین اساس آزمایشات متعدد با پارامترهای مختلف انجام شد. از آن جمله، آزمایش MIRACL که توسط آقایان O'Brien و Graves انجام گرفت، که در آن از سیستم لیزری امواج پیوسته (CW) با طول موج $3/8 \mu\text{m}$ با توان لیزری ۶۰۰ KW تا ۱۲۰۰ KW، می‌باشد. در این آزمایش در طول ۴/۵ ثانیه تابش لیزری، عمق حفاری در حدود ۲/۵ اینچ برای ماسه سنگ گزارش شد. این موضوع برای پارامترهای مختلف فرق می‌کند، پارامترهایی که بر روی حفاری با لیزر تأثیر گذارند عبارتند از: توان لیزر، طول موج، مکانیسم کاری سیستم (امواج پیوسته یا امواج ضربه‌ای)، نوع لیزر و نیمرخ اشعه تابشی^[۲].

با انتخاب سیستم لیزی مناسب با توجه به پارامترهای لیزری می‌توان سرعت حفاری را به طور قابل توجهی افزایش داد. تا کنون مزایای بسیاری در مورد استفاده از لیزر در حفاری چاه‌های نفت و گاز، گزارش شده است. این مزایا عبارتند از: (ایجاد جداری سرامیکی بر روی دیواره چاه به دلیل ذوب شدن سنگ، کاهش روزهای کاری دکل حفاری و مدت زمان توقف حفاری، ایجاد قطر یکسان از سطح تا ته چاه، کاهش احتمال گیر لوله‌های حفاری، کاهش چشم‌گیر هزینه‌های حفاری، استفاده از لوله‌های سبک و جایگزینی برخی لوله‌های سنگین با فیبرهای نوری، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و مدیریت مطلوب محیط زیست، افزایش سرعت حفاری به ۱۰ تا ۱۰۰ برابر مقدار حاضر)^[۳].

جایگزینی حفاری با لیزر به جای حفاری دورانی با برخی مخالفان روبرو می‌باشد، زیرا برخی از مشکلات که در حین حفاری با لیزر با آن مواجه می‌شویم، هنوز به طور عمده قابل چشم‌پوشی نیستند. از جمله از این مشکلات عبارتند از: (۱- چرخش سیال حفاری در حین عملیات حفاری و تأثیر آن بر روی انرژی منتقل شده به سطح سنگ ۲- انتقال انرژی از منبع لیزر موجود در سطح به عدسی لیزر در ته چاه)^[۴].

۲- مراحل حفاری با لیزر

هنگامی که اشعه‌های لیزر به سطح سنگ برخورد می‌کنند، سنگ در طی مراحل زیر به ترتیب حفاری می‌شود: ایجاد ریز شکستگی، ذوب شدن، تبخیر شدن^[۳].

با برخورد اشعه‌های لیزر به سطح سنگ ممکن است اشعه‌ها یکی از عکس العمل‌های زیر را از خود نشان دهند: الف- اشعه‌ها منعکس شوند، ب- اشعه‌ها پخش شوند، ج- اشعه‌ها جذب شوند [۵] (شکل ۱).

آزمایشات نشان داده است که پرتوهای منعکس شده و پراکنده شده نسبت به پرتوهای جذب شده، اثر کمی بر روی سنگ می‌گذارند. در حقیقت مکانیسمی که باعث خرد شدن و در نهایت حفاری سنگ می‌شود، مکانیسم جذب شدن اشعه‌های لیزر می‌باشد [۶].

در سنگ‌هایی که ضریب انتقال گرمایی بالایی دارند، اشعه‌های لیزر می‌توانند آب‌های تجمعی کریستالی به همراه مواد معدنی محلول موجود در سنگ را تبخیر کرده و باعث انبساط سنگ شده و در نهایت در ساختار سنگ ریز شکستگی‌هایی به وجود آید. در آزمایشات مختلف همراه با عملیات لیزرکاری از گاز نیتروژن نیز استفاده می‌شود. از دلایل استفاده از گاز نیتروژن می‌توان به سوزاندن گازهای خارج شده در حین حفاری سنگ و خارج کردن غبارهای به وجود آمده، اشاره کرد. این گاز باعث تا در هر مرحله از لیزر کاری خرده‌های به وجود آمده پاک شود. در حفاری دورانی از سیال حفاری برای انتقال کنده‌ها از انتهای چاه به سطح استفاده می‌شود، در حالیکه تحقیقات در زمینه حفاری با لیزر در حضور سیال حفاری ادامه دارد [۷]. شاید یکی از پارامترهای حفاری که تا کنون کمتر مورد توجه واقع شده است، پارامتر سرعت حفاری می‌باشد. سرعت حفاری (ROP) یکی از فاکتورهای اساسی در حفاری چاه‌های نفت و گاز می‌باشد، به طوری که بسیاری از هزینه‌های حفاری به بهبود و کنترل نرخ حفاری بستگی دارد. به طور کلی برای مهندسان حفار نرخ حفاری زیاد، مطلوب می‌باشد، زیرا هزینه‌ها و روزهای کاری دکل حفاری کاهش می‌یابد.

در این مقاله سعی شده تا با مقایسه نرخ حفاری دورانی با حفاری لیزری، با استفاده از داده‌ها و اطلاعات آزمایشگاهی، یک رابطه پایدار و قوی بین تکنولوژی لیزر با حفاری چاه‌های نفت و گاز به وجود آید. با استفاده از آزمایشات متعدد، نرخ حفاری برای هر نمونه سنگ (ماسه سنگ، سنگ آهک و شیل) در حالت‌های اشباع و غیر اشباع بدست آمده است. هدف از این آزمایشات بدست آوردن مقدار واقعی نرخ حفاری با توجه به دستگاه‌های موجود می‌باشد.

۳- بحث و روش کار

نمونه سنگ‌هایی که در این مقاله از آنها استفاده شده است، شامل سه گروه سنگ (ماسه سنگ، سنگ آهک، شیل) بوده است (شکل ۲). هر کدام از این سه گروه نیز شامل سه نوع سنگ با عمق، میزان تخلخل و اشباع متفاوت بودند. از هر کدام از این سه گروه، یک نمونه سنگ به وسیله آب اشباع شد تا نتایج و مقایسات دقیق بتواند صورت گیرد. برای اولین بار در کشور از دستگاه سی تی اسکن به منظور مشاهده تغییرات قبل و بعد از عملیات لیزر کاری، مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه سی تی اسکن، Picker1200 با ولتاژ ۱۳۰ KW با مقدار جریان ۸۰ MA در طول دوره ۲ ثانیه مورد استفاده قرار گرفت. از تمامی ۹ نمونه تصویر برداری سی تی اسکن گرفته شد و سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه لیزر مورد حفاری قرار گرفتند. سیستم لیزی مورد استفاده در این آزمایش، دستگاه DC-G-2512 با توان ۷۰W و مکانیسم کاری امواج پیوسته بود (شکل ۳). در این مقاله جهت بررسی دقیق پارامترهای موثر در تاثیر اشعه لیزر بر روی سنگ، دو مرحله آزمایش طراحی گردید.

• فاز اول آزمایشات

سیستم لیزر از ۱۰۰٪ توان خود استفاده کرده که سرعت پرتو زایی اشعه آن در حدود (10mm/s) بود. در این آزمایش از مکانیسم ماریپیچی برای حفاری استفاده شد که در آن سنگ به مدت ۶۶ ثانیه به قطر ۱ cm حفاری شد. پس از آن از نمونه‌ها

مجدداً تصویر بردای سی تی اسکن صورت گرفت. شکل ۴ تصاویر سی تی اسکن را قبل و بعد از لیزر کاری نشان می دهد. سپس مشاهدات زیر مورد بررسی قرار گرفت:

مقدار انرژی مخصوص (SE)، نرخ حفاری (ROP)، مقایسه میزان نرخ حفاری و انرژی مخصوص برای نمونه های اشباع و غیر اشباع، تأثیر حفاری با لیزر بر روی هزینه های حفاری، تأثیر حفاری با لیزر بر روی مدیریت محیط زیست. نمونه سنگ هایی که در این آزمایش از آنها استفاده شد، از سازندهایی که بیشترین مواجهه با این نوع سنگ ها در هنگام حفاری صورت می گیرد انتخاب شد. جدول ۱ مشخصات فیزیکی مانند حجم، وزن و عمق نمونه گیری هر نمونه سنگ را نشان می دهد. پس از اشباع سنگ ها مشخصات آنها از جمله تخلخل و وزن اشباع اندازه گیری شده که در جدول ۲ آمده است. نرخ حفاری به پارامترهای مختلفی بستگی دارد و از رابطه زیر بدست می آید [۸]:

$$ROP = \frac{SP}{SE} \quad (\text{cm/sec}) \quad (1)$$

که در آن

SP: توان منتقل شده به سیستم لیزری به ازای واحد سطح (w/cm^2)

SE: مقدار انرژی لازم برای خارج کردن حجم واحد سنگ (w.sec/cm^3)

برای بدست آوردن SP از رابطه ۲ استفاده می شود [۵]:

$$SP = \frac{P_{avg}}{A_r} \quad (2)$$

که در رابطه ۲

P_{avg} : میانگین توان لیزر (w)

A_r : سطح حفاری شده (cm^2)

همچنین برای بدست آوردن SE نیز از رابطه زیر استفاده می شود [۷]:

$$SE = \frac{E}{V_r} = \frac{P_{avg} \times t}{V_r} \quad (3)$$

که در فرمول بالا:

E: انرژی منتقل شده به واحد سطح (w.sec)

V_r : حجم کنده شده توسط اشعه لیزر (cm^3)

T: مدت زمان تابش اشعه لیزر (sec)

همانطور که پیش از این اشاره شد نرخ حفاری به دو عامل SP و SE بستگی دارد. در آزمایشات انجام شده مقدار SP با ثابت بودن سطح مقطع حفاری برای تمامی نمونه ها (1cm)، مقداری ثابت و در حدود 89.1719 w/cm^2 بوده است. با ثابت بودن SP و تغییرات در میزان SE، نرخ حفاری برای هر نمونه سنگ متفاوت می باشد. میزان SE وابسته به نوع سنگ و مشخصات فیزیکی سنگ مانند: ضریب انتقال گرما، تخلخل، دانسیته و ... می باشد. جدول ۳ مقدار انرژی مخصوص و سرعت حفاری را برای هر نمونه سنگ نشان می دهد.

• فاز دوم آزمایشات

در فاز دوم آزمایشات به منظور شناسایی سه ناحیه خرد شدگی، ذوب شدگی و تبخیر در اثر واکنش اشعه تابش شده به سنگ از فاصله های کانونی متغیر استفاده شد. سیستم لیزر CO_2 که با مکانیسم پالسی عملیات تابش لیزری را انجام می داد به گونه ای

طراحی گردید تا با بهترین فاصله کانونی عملیات حفاری را انجام دهد. طراحی فاصله کانونی و ثابت نمودن این فاصله باعث آن گردید تا بیشترین نفوذ حفاری بدست آید. در حین تغییر فاصله کانونی، شعاع اشعه لیزر نیز تغییر می‌یافت. با تغییر فاصله کانونی از ۰.۵- تا ۱۵ سانتی متر، شعاع اشعه لیزر نیز از ۰.۵ تا ۱۷ میلی متر تغییر کرد. هدف از طراحی فاز دوم آزمایشات رسیدن به بیشترین عمق حفاری در کنار تغییر پارامترهایی از قبیل توان متوسط لیزری تابش شده به سطح سنگ (P_{avg})، حداکثر توان تابشی در هر پالس (P_{peak})، مقدار انرژی در هر شلیک اشعه و سرعت تابش اشعه می‌باشد. در جدول ۴ نتایج بدست آمده از فاز دوم آزمایشات نشان داده شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود تعداد زیادی از پارامترها به نسبت فاز اول، مورد سنجش قرار گرفته شده است. در این مرحله انرژی هر شلیک اشعه از ۱ تا ۲۴ j/shot، حداکثر توان لیزر از ۱۰ تا ۲۰۰ وات و عرض هر پالس از ۰.۵ تا ۲ میکروثانیه متغیر بود. قبل از آزمایشات توان متوسط لیزر ۱۶۰ وات محاسبه گردیده بود ولی در حین آزمایشات این پارامتر از ۷۴ تا ۱۶۰ وات اندازه‌گیری شد. این اختلاف بین توان متوسط محاسبه شده و توان متوسط اندازه‌گیری شده به دلیل کیفیت پایین فیبرهای نوری منتقل کننده اشعه لیزر و شلیک‌های با انرژی پایین می‌باشد. با استفاده از این پارامترها و مشاهدات انجام گرفته نمودار شکل ۵ طراحی شد. در این نمودار نواحی مختلف که در اثر تابش اشعه لیزر ایجاد می‌شود، به وضوح مشخص شد. دامنه این تغییرات محسوس و قابل شناسایی می‌باشد. این نمودار برای نمونه ماسه سنگی کشیده شده است. تغییر ناحیه سنگ به توان لیزر و دمای ذوب مواد در نمونه سنگ بستگی دارد. دمای ذوب نمونه سنگ با درصد کوارتز موجود در سنگ رابطه مستقیم دارد. آزمایشات نشان داد که با افزایش دمای محیط سنگ، ناحیه خرد شدگی کاهش می‌یابد یا به عبارت دیگر عمق محدوده خردشدن کاهش می‌یابد. همانطور که در این نمودار ملاحظه می‌کنید پایین‌ترین مقدار انرژی مخصوص دقیقاً پیش از آغاز ناحیه ذوب قرار دارد. در شکل ۶ دو ناحیه خرد شدگی و ذوب شدگی بر روی نمونه سنگ شیل در اثر تابش لیزر به وضوح نشان داده شده است. با استفاده از مفهوم انرژی مخصوص که ذکر گردید، هر چه قدر درصد کوارتز موجود در سنگ بیشتر باشد آنگاه مقدار انرژی مخصوص افزایش پیدا می‌کند. در هنگام حفاری در مناطق کم عمق با توجه به درصد کوارتز کمتر، با طراحی یک سیستم بهینه شده برای خارج کردن غبارات حفاری می‌توان سرعت حفاری را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. پارامترهایی که بر این پدیده موثر می‌باشند شامل ترکیبات ماتریکس و مواد معدنی موجود در سنگ و مشخصات حرارتی مانند رسانایی، ظرفیت و ضریب انتقال حرارت سنگ می‌باشد. برخی مشخصات فیزیکی سنگ‌های بررسی شده به همراه درصد کوارتز این نمونه‌ها در جدول ۵ آمده است.

۴- مشاهدات

• مقدار انرژی مخصوص (SE)

همانطور که در جدول ۳ مشاهده شد، مقدار انرژی لازم برای حفاری واحد حجمی در ماسه سنگ در حالت غیر اشباع در مقایسه با دیگر نمونه‌ها کمتر می‌باشد. انرژی مخصوص برای ماسه سنگ در حدود 32 j/cm^3 تا 36 j/cm^3 می‌باشد. این مقدار برای سنگ آهک در حدود 39 j/cm^3 تا 42 j/cm^3 و برای شیل در حدود 42 j/cm^3 تا 45 j/cm^3 می‌باشد. با توجه به اینکه انرژی مخصوص وابسته به اشعه‌هایی که منعکس، پخش یا جذب می‌شوند، دارد، این مطلب قابل استنباط است که میزان اشعه‌های جذب شده در ماسه سنگ بیشتر از سنگ‌های دیگر می‌باشد. البته از طریق آزمایش‌های انجام گرفته، مشاهده گردید که این مطلب برای نمونه‌های اشباع معکوس می‌باشد. این تفاوت در مقدار انرژی مخصوص و در نتیجه سرعت حفاری بر

اساس چندین عامل قابل توجه است که در بخش ۳-۴ به آن خواهیم پرداخت. شکل ۷ این مطلب را به وضوح نشان می دهد.

• سرعت حفاری (ROP)

پس از اندازه گیری سرعت حفاری برای هر نمونه سنگ، مشخص شد که بیشترین نرخ حفاری مربوط به ماسه سنگ می باشد (جدول ۳). آزمایش ها نشان می دهد که بیشترین ضریب گرمایی جابجایی مربوط به ماسه سنگ می باشد. همانطور که در مطالب پیشین اشاره شد، با افزایش ضریب انتقال گرمایی، ریز شکستگی هایی که در اثر تابش لیزری بر روی سنگ ایجاد می شود، افزایش می یابد. با افزایش این ریز شکستگی ها سرعت حفاری بالا رفته و سنگ در مدت زمان کمتری حفاری می شود. همچنین افزایش ریز شکستگی ها که در داخل ماتریکس سنگ و سطح آن اتفاق می افتد، باعث افزایش تراوایی سنگ می شود. در این مقاله از لیزر کم توان در حدود ۷۰W استفاده شده است، در حالیکه امروزه آزمایشات لیزری با لیزرهای پر توان در حدود ۶۰KW انجام می شود. با بهبود و افزایش توان سیستم می توان سرعت حفاری را بالا برد، همچنین با تغییر پارامترهایی از جمله طول موج، نوع لیزر، نوع فیبرهای انتقال دهنده توان لیزر و ... شکل ۸ مقایسه سرعت حفاری برای هر کدام از نمونه سنگ ها در حالت غیر اشباع می باشد.

• مقایسه سرعت حفاری و انرژی مخصوص

همانطور که از جدول ۳ مشاهده می شود، نرخ حفاری و میزان SE برای نمونه های غیر اشباع کاملاً متفاوت با نرخ حفاری و میزان SE برای نمونه های اشباع می باشد.

محدوده انرژی مخصوص برای نمونه های اشباع، برای شیل در حدود 31 j/cm^3 برای سنگ آهک در حدود 59 j/cm^3 و برای ماسه سنگ در حدود 84 j/cm^3 می باشد. با توجه به مقادیر فوق، مشخص می شود که بیشترین نرخ حفاری برای نمونه های اشباع متعلق به شیل و سپس سنگ آهک و ماسه سنگ می باشد. این موضوع از آنجایی اهمیت پیدا می کند که در حفاری چاه های نفت و گاز، بیشترین مقدار حفاری متعلق به سازندهای شیلی می باشد. شیل دارای تخلخل زیاد ولی تراوایی کم می باشد و با توجه به عمق آن، دانسیته آن نیز فرق می کند. با توجه به جدول ۲ می توان دلیل این موضوع را به نسبت اشباع سنگ نیز مربوط ساخت. همانطوری که در جدول مشاهده می شود، اشباع ماسه سنگ بیشتر از شیل می باشد و مقدار آب بیشتری را در ساختمان خود حفظ می کند. بنابراین در هنگام تابش لیزر بر سطح ماسه سنگ بیشترین مقدار توان لیزر صرف تبخیر کردن آب موجود در ساختمان سنگ می شود و انرژی منتقل شده به سنگ کاهش می یابد که باعث کم شدن نرخ حفاری در نمونه های اشباع نسبت به نمونه های غیر اشباع می شود. البته این مطلب به استثنای شیل می باشد زیرا با اشباع شیل، سرعت حفاری آن نیز افزایش می یابد به طوری که نرخ حفاری لیزری شیل اشباع بیشتر از نرخ حفاری ماسه سنگ غیر اشباع می باشد. شکل ۹ این موضوع را به وضوح نشان می دهد.

• تأثیر حفاری با لیزر بر روی هزینه های حفاری

هزینه هر فوت حفاری چاه های نفت و گاز از فرمول زیر بدست می آید [۹]:

$$C_t = \frac{B + C_r(t+T)}{F} \quad (4)$$

که در رابطه ۴

C_1 : هزینه هر فوت حفاری بر حسب دلار (\$/ft)

B: هزینه هر مته حفاری بر حسب دلار (\$)

C_2 : هزینه ساعت‌های کاری دکل حفاری بر حسب دلار (\$/h)

t: عمر هر مته حفاری بر حسب ساعت (h)

T: مدت زمان‌های توقف حفاری و زمان‌های لوله بالا لوله پایین بر حسب ساعت (h)

F: عمق حفاری شده به ازای هر مته حفاری (ft)

همانطور که از فرمول بالا استنباط می‌شود، هزینه‌های حفاری با طول حفاری شده به ازای هر مته رابطه عکس دارد. به طوری که هنگام استفاده از سیستم لیزری به جای مته حفاری، طول حفاری شده توسط سیستم لیزری افزایش می‌یابد، بنابراین قسمت عمده‌ای از هزینه‌های حفاری کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد به دلیل استفاده از انرژی الکتریکی به جای انرژی مکانیکی در سیستم لیزری از میزان آسیب‌های وارده به رشته حفاری در حین حفاری کاسته می‌شود. که این مسئله خود نیازمند تحقیق و بررسی بیشتر می‌باشد. همچنین با استفاده از سیستم لیزری، طول روزهای کاری دکل حفاری کاهش یافته و عمر مته حفاری که از لیزر استفاده می‌کند، افزایش می‌یابد.

• تأثیر حفاری با لیزر بر روی آلودگی‌های زیست محیطی

در هنگام حفاری یک حلقه چاه، بسیاری از پساب‌هایی که در حین حفاری تولید شده است بدون مدیریت صحیح وارد چرخه طبیعت می‌شود. بسیاری از این پساب‌ها در اثر استفاده از تجهیزات قدیمی و تکنولوژی‌های نادرست تولید می‌شود. در حین حفاری و زمانی که از گل پایه روغنی برای حفر چاه استفاده می‌شود، آسیب بسیاری به محیط زیست وارد می‌شود زیرا در این نوع گل که بیشتر برای حفاری سازندهای شیلی از آن استفاده می‌شود، از مواد شیمیایی که برای محیط زیست مضر می‌باشد استفاده می‌شود. این مواد شیمیایی در اثر چرخش‌های متناوب سیال حفاری وارد چرخه محیط زیست می‌شوند. با ورود سیستم لیزری به صنعت حفاری چاه‌های نفت و گاز بسیاری از این آلودگی‌ها کاهش می‌یابد. در کاربردهای این سیستم ما می‌توانیم حفاری غباری را انجام دهیم که در این نوع حفاری به جای استفاده از گل‌های پایه روغنی از سیال هوا برای حفاری استفاده می‌شود. همچنین بسیاری از ضایعاتی که در حین حفاری به وجود می‌آید، کاهش می‌یابد، زیرا به دلیل جایگزینی سیستم الکترونیکی به جای سیستم مکانیکی، به جای استفاده از تجهیزات سنگین مانند لوله‌های حفاری سنگین از اجزای سبکتری استفاده می‌شود و آلودگی‌های زیست محیطی به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

استفاده از سیستم لیزری در صنعت حفاری به جای حفاری دورانی دارای مزایای زیادی می‌باشد ولی در عین حال این مزایا بستگی به بسیاری از پارامترهای لیزری و نوع لیزر مورد استفاده دارد. همانطور که در این مقاله نشان داده شد، می‌توان با ورود سیستم حفاری با لیزر به صنعت حفاری چاه‌های نفت و گاز شاهد پیشرفت چشم‌گیر و بسیار سریعی در این صنعت، باشیم. ورود این سیستم به صنعت حفاری مستلزم آزمایش‌های متعدد میدانی و گذشت زمان می‌باشد. برای شروع می‌توان از حفاری لایه‌های مشخص، مخصوصاً لایه‌هایی که در حفاری مشکل‌زا می‌باشند شروع کرد و با گذشت زمان و تثبیت سیستم آنرا

گسترش داد. با استفاده از نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود افزایش سرعت حفاری در سنگ وابسته به کاهش میزان انرژی مورد نیاز برای حفاری سنگ می‌باشد [۱۰].

در نمونه‌های غیر اشباع، ماسه سنگ دارای بیشترین سرعت حفاری بوده و در نمونه‌های اشباع، شیل بیشترین سرعت حفاری را دارا بود. با توجه به این موضوع که بیشتر سازندهای حفاری شده در ایران از نوع شیل یا ماسه سنگ می‌باشند، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ورود این سیستم به صنعت حفاری، انقلابی بزرگ را به وجود خواهد آورد. در این مقاله به دلیل وجود برخی محدودیت‌ها، نمونه‌هایی که مورد آزمایش قرار گرفت از سه گروه اصلی سنگ‌ها تشکیل شده بود. از این رو برای نتیجه‌گیری‌های کلی می‌توان از نمونه‌های مختلف مانند سنگ‌های کربناته، دولومیتی، گرانیت و ... استفاده کرد که این خود مستلزم تحقیقات گسترده با همکاری سازمان‌های مربوطه می‌باشد.

آزمایشات نشان داد که با جذب انرژی منتقل شده از دستگاه لیزر به ماتریکس سنگ، دمای محیط سنگ به سرعت افزایش می‌یابد. این افزایش دما در زمان‌های آغازین باعث تبخیر مواد معدنی موجود در سنگ شده و با افزایش حجم سنگ باعث خرد شدن آن می‌گردد. در این مرحله انرژی مخصوص (SE)، تا ناحیه انتقال به طور منظم با شیب زیاد کاهش می‌یابد. با گذشت زمان و افزایش گرمای سنگ پس از تبخیر مواد معدنی، ماتریکس سنگ ذوب می‌شود و مقدار انرژی مخصوص (SE)، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با توجه به امکانات موجود در این مرحله از آزمایشات، قادر به بررسی ناحیه تبخیری نمی‌باشیم. به نظر می‌رسد افزایش انرژی مخصوص تا مرحله تبخیر به صورت آهسته صورت می‌گیرد اما در مورد ناحیه تبخیر هنوز اطلاعاتی در دست نویسندگان جهت ارائه موجود نمی‌باشد. با توجه به مشاهدات انجام گرفته می‌توان نتیجه‌گیری کرد که، سیستم تخلیه و خارج سازی غبارات حفاری تاثیر بسیار عمده‌ای بر روی کاهش انرژی مخصوص و در نتیجه افزایش سرعت حفاری دارد. با بهینه سازی سیستم تخلیه غبارات حفاری می‌توان زمانی که واکنش در ناحیه خرد شدن است افزایش داد و باعث افزایش عمق و سرعت حفاری شد. همچنین بدست آوردن یک فاصله کانونی مناسب حیاتی می‌باشد. با تابش اشعه لیزر از یک فاصله کانونی مناسب می‌توان شاهد حفاری عمیق‌تر، منظم و یک‌دست بود.

به نظر می‌رسد استفاده از حفاری با لیزر در مقاطع ابتدایی که خاک سست می‌باشد و احتمال ریزش خرده‌ها را داریم، مقرون به صرفه نمی‌باشد زیرا سرعت حفاری دورانی در این مقاطع به دلیل سست بودن خاک بیشتر از حفاری لیزر می‌باشد. همچنین با توجه به شعاع بیشتر چاه در مقاطع ابتدایی، میزان انرژی لازم برای حفاری سنگ افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت حفاری کاهش خواهد یافت. به نظر می‌رسد با استفاده از لیزر در لایه‌های پایین که خرده‌های حفاری به صورت غبار و سبک وزن می‌باشند، می‌توان با استفاده از سیال هوا خرده‌های حفاری (غبارهای به وجود آمده در اثر حفاری با لیزر) را به بیرون چاه هدایت کرد. به دلیل اینکه این غبارها با استفاده از هوا به بیرون هدایت شده‌اند و برای انتقال این غبارها از سیال پایه روغنی استفاده نشده است، آلودگی‌های زیست محیطی کمتری را نیز شاهد خواهیم بود. البته اثبات دقیق این نتیجه‌گیری‌ها نیازمند چالش‌های فراوان همراه با آزمایش‌های گسترده و میدانی می‌باشد.

در ابعادی دیگر از این بحث به نظر می‌رسد می‌توان عملیات مانده‌یابی درون چاه‌های نفت و گاز را با استفاده از لیزر بهبود بخشید. البته این تکنولوژی زمانی مفید خواهد بود که ما با مانده‌های ریز و بی‌ارزش روبرو باشیم که بیرون آوردن آن‌ها نیاز نمی‌باشد. می‌توان این مانده‌ها را به جای بیرون آوردن در همان جا ذوب کرده و عملیات حفاری را ادامه دهیم. همچنین امروزه بهبود مشبک کاری چاه‌های نفت و گاز با استفاده از لیزر در دست بررسی و تحقیق توسط مهندسين نفت می‌باشد [۱۱].

۶- پیشنهادات

در مراحل بعدی آزمایشات نیاز به تحقیق و بررسی بر روی موارد زیر ضروری می‌باشد:

أ. آزمایشات مربوط به زاویه تابش لیزر طراحی شده و بهترین زاویه جهت تابش اشعه لیزر بر روی سطح سنگ بدست آید.

ب. در طی حفاری با لیزر گازهای ایجاد شده از سازند در اثر حفاری با لیزر بر روی سرعت حفاری (ROP)، موثر می‌باشند. این گازها باعث کاهش سرعت حفاری می‌شوند.

ت. شرایط داخل زمین مانند فشار و دمای آن برای آزمایشات شبیه سازی شوند. آیا وارد کردن تنش و فشار بر روی سنگ باعث افزایش انرژی مخصوص می‌گردد و آیا اینکه افزایش حرارت باعث کاهش یا افزایش انرژی مخصوص می‌گردد، جزء سوالاتی می‌باشند که لازم است محققین درباره آن به بررسی‌های دقیق تر بپردازند.

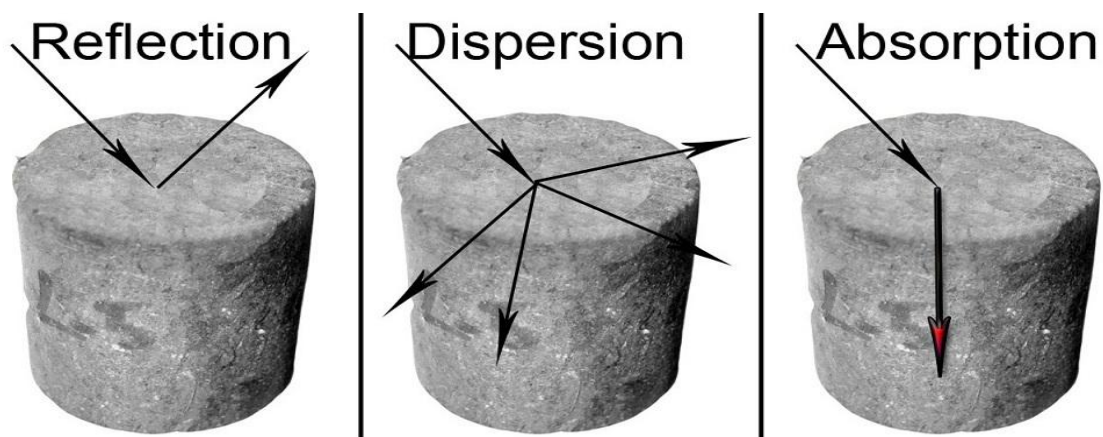
در پایان لازم می‌دانیم که ذکر شود، ورود کامل تکنولوژی جدید به هر صنعت نیازمند گذشت زمان و آزمایش‌های فراوان می‌باشد. بدیهی است که در ابتدای ورود هر تکنولوژی جدید آن تکنولوژی با مشکلات و نواقصی روبرو می‌باشد، ولی با گذشت زمان و گسترش تحقیقات می‌توان این نواقص را رفع کرده و تکنولوژی جدید را تثبیت کرد.

تشکر و قدردانی

در پایان لازم می‌دانیم از باشگاه پژوهشگران جوان واحد امیدیه که عهده دار و حامی هزینه‌های این آزمایشات بوده اند کمال تشکر و سپاس را داشته باشیم. همچنین از جناب آقای دکتر منتظری به عنوان استاد راهنمای این پروژه کمال قدردانی را داریم. از جناب آقای مولائی به عنوان رئیس باشگاه واحد امیدیه و همچنین انجمن بین المللی مهندسين نفت و به خصوص خانم احمدیانی که همواره مشوق و راهنمای ما بوده اند کمال تشکر و سپاسگذاری را داریم.

فهرست علائم:

ROP: سرعت حفاری، SP: توان مخصوص، SE: انرژی مخصوص، W: وات، S: ثانیه، ft: فوت، \$: دلار، J: ژول، h: ساعت، mm: میلی متر، cm: سانتی متر



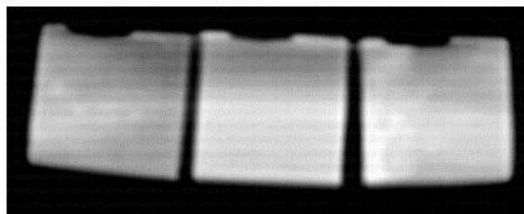
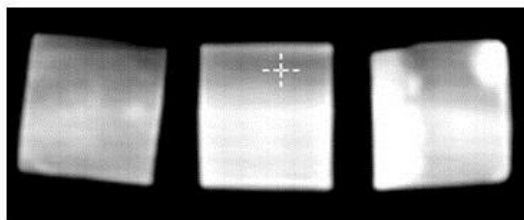
شکل ۱- عکس العمل اشعه‌های تابشی هنگام برخورد به سطح سنگ



شکل ۲- نمونه سنگ‌های مورد آزمایش (از راست به چپ: ماسه سنگ، سنگ شیل، سنگ آهک)



شکل ۳- دستگاه لیزری استفاده شده و عملکرد دستگاه



شکل ۴- تصاویر سی تی اسکن، قبل و بعد از حفاری با لیزر

جدول ۱- مشخصات فیزیکی نمونه سنگها (* نمونه‌های اشباع با آب)

نمونه‌ها	عمق (ft)	حجم (cm ³)	وزن (gr)
*ماسه سنگ-۱	2691	33.314	79.35
ماسه سنگ-۲	2806	30.722	80.22
ماسه سنگ-۳	3025	34.389	82.8
*سنگ آهک-۱	5106	12.722	35.2
سنگ آهک-۲	5146	12.756	33.83
سنگ آهک-۳	5207	12.756	38.48
*شیل-۱	6873	13.193	36.74
شیل-۲	7649	12.251	35.73
شیل-۳	8006	13.193	34.03

جدول ۲- میزان تخلخل و وزن اشباع نمونه‌های اشباع با آب

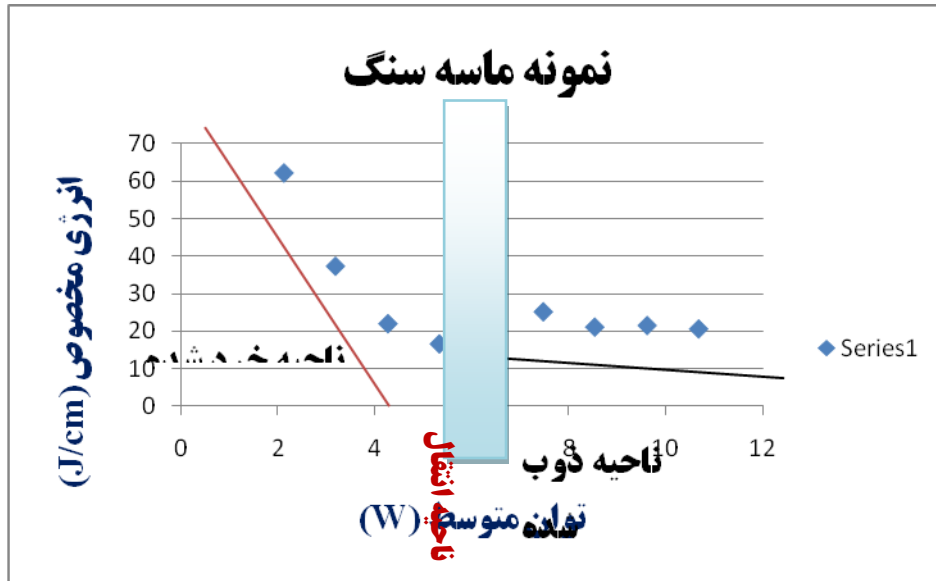
نمونه‌ها	تخلخل (%)	وزن اشباع (gr)
*ماسه سنگ-۱	8.52	82.19
*سنگ آهک-۱	1.96	35.45
*شیل-۱	2.27	37.04

جدول ۳- میزان انرژی مخصوص و سرعت حفاری برای نمونه سنگ‌ها

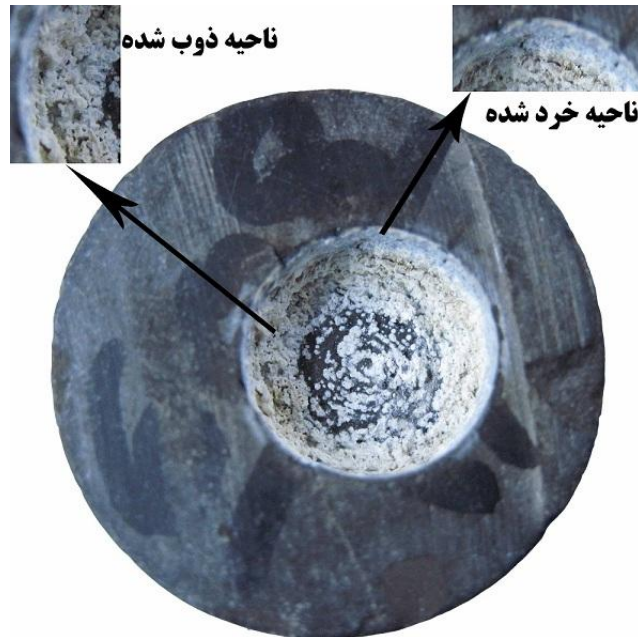
نمونه‌ها	انرژی مخصوص (J/cm ³)	سرعت حفاری (cm/sec)	سرعت حفاری (m/h)
*ماسه سنگ-۱	۸۴۰۷۶	۰.۰۰۱	۰.۰۳۸۱
ماسه سنگ-۲	۳۲۶۹۶	۰.۰۰۲۷	۰.۰۹۸۱
ماسه سنگ-۳	۳۶۷۸۳	۰.۰۰۲۴	۰.۰۸۷۲
*سنگ آهک-۱	۵۸۸۵۳	۰.۰۰۱۵	۰.۰۵۴۵
سنگ آهک-۲	۴۲۰۳۸	۰.۰۰۲۱	۰.۰۷۶۳
سنگ آهک-۳	۳۹۲۳۵	۰.۰۰۲۲	۰.۰۸۱۸
*شیل-۱	۳۰۹۷۶	۰.۰۰۲۸	۰.۱۰۳۶
شیل-۲	۴۲۰۳۸	۰.۰۰۲۱	۰.۰۷۶۳
شیل-۳	۴۵۲۷۱	۰.۰۰۱۹	۰.۰۷۰۹

جدول ۴- پارامترهای اندازه گیری شده در فاز دوم آزمایشات

سرعت اشعه	موارد اندازه گیری شده			موارد تخمین زده شده			نوع سیستم لیزری	نوع سنگ	شماره آزمایش
	انرژی هر شلیک (J/shot)	حداکثر توان (W)	توان متوسط (W)	انرژی هر شلیک (J/shot)	حداکثر توان (W)	توان متوسط (W)			
۱	۰.۳	۶۹	۷۴	۱	۳۰۰	۱۶۰	CO ₂ پالسی	ماسه سنگ	۱
۱	۱.۳	۹۲	۸۶	۳	۳۰۰	۱۶۰	CO ₂ پالسی		۲
۲									۳
۲	۴.۸	۱۳۳	۹۵	۶	۶۰۰	۱۶۰	CO ₂ پالسی		۴
۲	۱۰.۵	۲۲۱	۹۱	۱۲	۶۰۰	۱۶۰	CO ₂ پالسی		۵
۲	۲۳.۱	۲۶۰	۱۲۰	۲۴	۱۲۰۰	۱۶۰	CO ₂ پالسی		۶
۱	۸.۹	۱۱۸	۷۹	۱۲	۶۰۰	۱۶۰	CO ₂ پالسی	سنگ آهک	۷
۱	۹.۷	۱۴۲	۱۰۷	۱۲	۶۰۰	۱۶۰	CO ₂ پالسی	شیل	۸
۲									۹



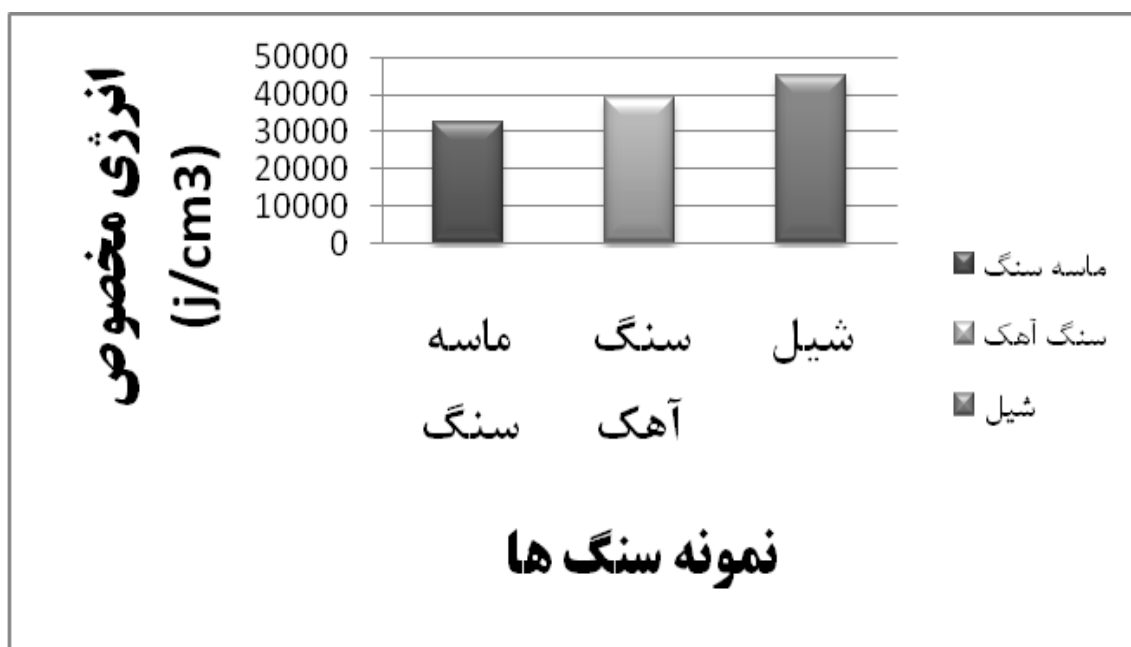
شکل ۵- نواحی مختلف واکنش در اثر تابش لیزر بر اساس توان متوسط (۱/۱۰۰) و انرژی مخصوص با لیزر CO₂ (در این نمودار ناحیه انتقال به وضوح مشخص شده است)



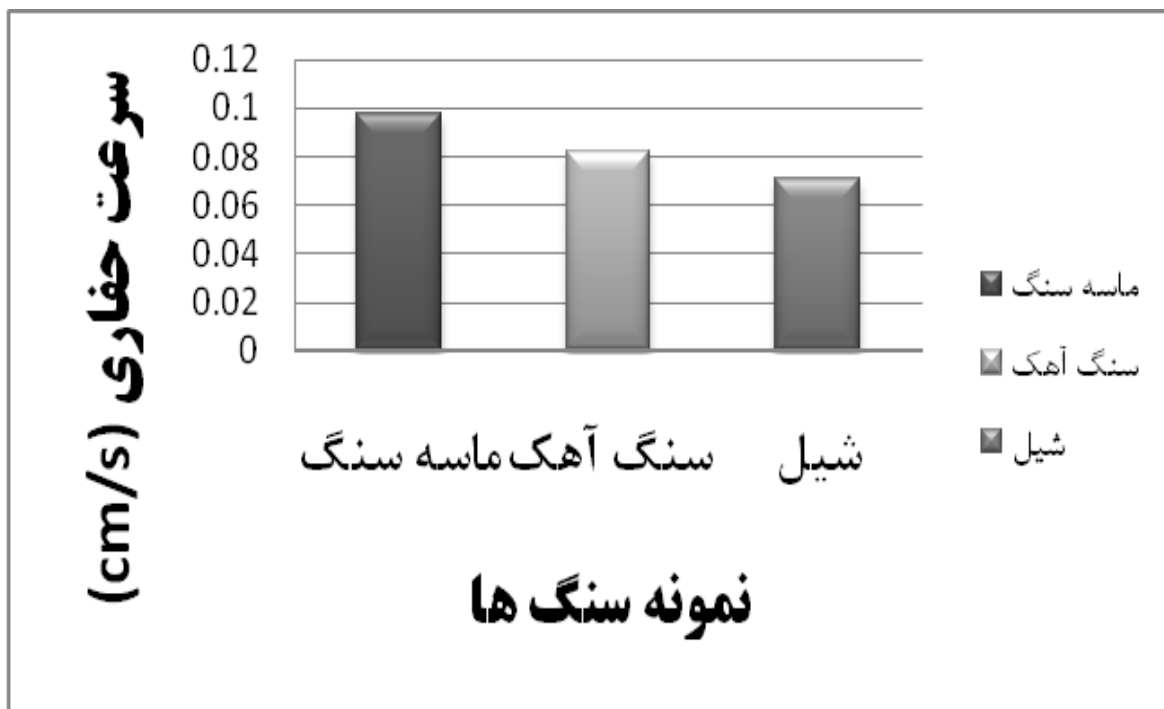
شکل ۶- نواحی ایجاد شده در اثر حفاری نمونه با لیزر (نمونه سنگ شیل)

جدول ۵- ترکیبات، درصد کوارتز، و مشخصات گرمایی انواع نمونه سنگ‌های مورد آزمایش

نمونه سنگ	کانی‌های موجود در بافت سنگ	ترکیبات	درصد کوارتز (%)	رسانایی گرمایی $10^3(\text{cal/sec/cm}^0\text{C})$	ظرفیت گرمایی $(\text{cal/g}^0\text{C})$	ضریب پخش (cm^2/esc)
ماسه سنگ	کوارتز فلدسپات Opaq سایر کانی‌ها	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe -	85 10 3 2	۶.۲	0.21	11.3
سنگ آهک	کلسیم کربنات سایر کانی‌ها	CaCO ₃ MgO	85 5 10	4.8	0.22	8.1
شیل	کوارتز فلدسپات سایر کانی‌ها	SiO ₂ Al ₂ O ₃	۳۵ ۲۰ ۴۵	-	-	۷.۵



شکل ۷- مقدار انرژی مخصوص برای هر نمونه سنگ در حالت غیر اشباع



شکل ۸- مقدار نرخ حفاری برای هر نمونه سنگ در حالت غیر اشباع



شکل ۹- مقایسه میزان نرخ حفاری، در حالت اشباع و غیر اشباع

منابع

- [1] R.M Graves , D.G O'Brien D.(1998) "StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completion Gas Wells", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, SPE 549259.
- [2] R.M Graves , D.G O'Brien D.(1999) "StarWars Laser Technology for Gas Drilling and Completions in 21st Century", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, SPE 56625.
- [3] S. Pooniwala. (2006) "Lasers: The next bit", SPE Eastern regional in Ohio, USA, SPE 104223.
- [4] N. Bjorndalen, H.A Belhaj, K.R Agha, M.R Islam. (2003) "Numerical investigation of laser drilling", SPE Eastern regional in Pennsylvania, USA, SPE 84844.
- [5] B.C. Gahan, Ricahad A. Parker, Sahim B, Humberto. F, Zhiyue X D.(2001) "Laser Drilling: Determination of Energy Required to Remove Rock", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, , New Orleans, Louisiana, SPE 71466.
- [6] Z. Xu, C. Reed, R. Graves, R. Parker. (2004) "Laser spallation of rocks for oil well drilling", 23rd PICALO conference in USA, LIA 140.
- [7] R. Parker, Z. Xu, R. Graves, B. Gahan. (2003) "Drilling large diameter holes in rocks using multiple laser beams", ICALEO conference in China, LIA 504.
- [8] P. Sihna, A. Gour D.(2006) "Laser Drilling Research and Application: An Update", SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition, Mumbai, India, SPE/IADC 102017.
- [9] A. Moazeni, M. Nabaei, E.F.(2009) "Drilling Engineering", Shabak 978-964-2596-874.
- [10] S. Batarseh, H. Figueroa, N. Skinner, Z. Xu. (2003) "Specific energy for pulsed laser rock drilling", Journal of Laser Applications, Volume 15.
- [11] Z. Xu, C. Reed, R. Graves, R. Parker. (2004) "Rock perforation by pulsed ND:YAG laser", 23rd PICALO conference in USA, LIA 138.

Experimental investigation of advanced laser drilling method: A revolution in drilling and exploration industry

Mahdi Bakhtbidar, Mohsen Ghorbankhani, Mohammad Reza Kazemi Asfeh & Mehdi Alimohammadi

Abstract

The paper is an update to the current status of laser drilling technique – the first fundamental change to rotary drilling. We begin with a brief history of already experiment which performed by another institutes. Next, we will discuss about effective parameters on reduce specific energy thereupon increase rate of penetration. Stress has been put on the effect of laser drilling on rate of penetration, drilling costs, and waste management that we discuss about these things in this research. Finally, experiments show that this advanced laser drilling technique can be efficient and economically for exchange with current rotary drilling.

Laser drilling is found to be more efficient way to drill and perforate wells through hard rock formations encountered at greater depth. One of the major advantages of laser drilling is its potential to reduce drilling time. Laser cut drilling time reduced by not contacting the rock, eliminating the need to stop and replace a bit.

Key words: Laser Drilling, Rate of Penetration, Specific Energy, Waste Management