

استراتژی روش مدرن استفاده از تکنولوژی لیزر pulsednd:yag در افزایش نرخ نفوذ و کاهش هزینه‌های حفاری

امیر افضل کیانی شاهوند^۱، داریوش شیرمردی^۲، برزو عسکری^{۳*}، حسین محمدی^۴

^۱ مهندسی نفت، بهره برداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان

^۳ دکترای چینه و فسیل شناسی، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان

^۴ کارشناسی ارشد مهندسی نفت - حفاری، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، کارشناس ارشد شرکت ملی حفاری ایران

دریافت: ۹۲/۱/۲۰ پذیرش: ۹۲/۵/۳۰

چکیده

بر خلاف روش‌های حفاری قدیمی که اغلب باعث کاهش فوق العاده‌ی نفوذپذیری سنگ‌ها می‌شوند، روش حفاری با استفاده از تکنولوژی لیزر باعث افزایش نفوذپذیری سنگ و در نهایت افزایش تولید نفت از چاه می‌شود. حفاری سنگ با استفاده از تکنولوژی لیزر، فرایندی جهت حذف سنگ است که در آن از تنش حرارتی برای شکستن سنگ به قطعات کوچکتر و خارج کردن خرده‌ها و سنگ‌های کوچک باقی‌مانده توسط روش‌های تخلیه استاندارد استفاده می‌شود. روند عمل حفاری سنگ با استفاده از لیزر به پارامترهای موج لیزر، ویژگی‌های پرتو و پاکسازی گاز همراه بستگی دارد. در این مقاله هدف اصلی مطالعه بر روی استراتژی تکنولوژی لیزر pulsednd:yag، جهت چگونگی افزایش نرخ نفوذ و بررسی پارامترهایی است که در حفاری سنگ با استفاده از لیزر اثر می‌گذارند؛ همچنین در پایان این مقاله در رابطه با اثر استفاده از تکنولوژی لیزر بر کاهش هزینه‌های حفاری، مطالبی آورده شده است.

کلمات کلیدی: پارامترهای لیزر pulsednd:yag، سنگ، نرخ نفوذ، هزینه‌های حفاری

مقدمه

در سال‌های اخیر روش‌های جدید متعددی در زمینه حفاری‌های نوین پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های قابل قبول که نظر بسیاری از مهندسين را به خود جلب کرده است، حفاری چاه‌های نفت و گاز با استفاده از تکنولوژی لیزر می‌باشد. تحقیقات در زمینه استفاده از تکنولوژی لیزر در حفاری چاه‌های نفت و گاز از سال ۱۹۹۷ آغاز شده است. اولین آزمایش توسط ارتش آمریکا با عنوان پروژه MIRACL صورت گرفت. این آزمایش نشان داد که با استفاده از لیزر، سرعت حفاری در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ برابر افزایش می‌یابد. آزمایش بعدی توسط نیروی هوایی آمریکا با عنوان COIL انجام شد [۳]. هدف اصلی تمامی آزمایش‌هایی که تا کنون انجام شده است، دست یابی به بیشترین میزان حفاری سنگ با کمترین توان مورد نیاز لیزر می‌باشد. بدین ترتیب برای حفاری چاه‌های نفت با استفاده از



تکنولوژی لیزر، از لیزرهایی که قابلیت پرتاب پرتو لیزر از راه دور را دارند، استفاده می‌کنند. لیزر pullednd:yag با توان و کیفیت بالا، تنها تکنولوژی است که پتانسیل و قابلیت پرتاب پرتو، از مسیرهای طولانی را دارد. در این مقاله سعی شده است تا با مطالعه بروی تکنولوژی لیزر pullednd:yag جهت چگونگی افزایش نرخ نفوذ در نمونه سنگ‌های مخزن و بررسی پارامترهای لیزر، یک رابطه پایدار و قوی بین تکنولوژی لیزر pullednd:yag با فرآیند حفاری چاه‌های نفت و گاز ارایه شود.

بحث و روش تحقیق

پس از بحث و بررسی و انجام آزمایشات فراوان در ایران، در مورد روند تاثیرات تکنولوژی لیزر در افزایش نرخ نفوذ نمونه سنگ‌های مخزن، موارد ذیل مورد بررسی قرار گرفت:

۱- نوع و مزایای دستگاه لیزری مورد استفاده

لیزر بکار رفته در این مطالعات، یک لیزر ۱/۶ کیلو واتی pullednd:yag با کابل فیبر نوری پرتابی می‌باشد. ویژگی‌های لیزر مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. مزایای لیزر pullednd:yag نسبت به دیگر لیزرهای حفاری سنگ عبارتند از:

- ۱- قابلیت پرتاب پرتو، از مسیرهای طولانی را داراست.
- ۲- بارگیری حرارتی روی سنگ را گسترش می‌دهد؛ که این خود باعث تخریب بیشتر سنگ می‌شود.
- ۳- پرتوهای لیزر خیلی سریع در یک اندازه نقطه معین می‌توانند همگرا شوند؛ این پرتوهای همگرا شده مانع باریک شدن تدریجی قطر سنگ می‌شوند [۴].

جدول ۱. ویژگی‌های لیزر pullednd:yag [۴]

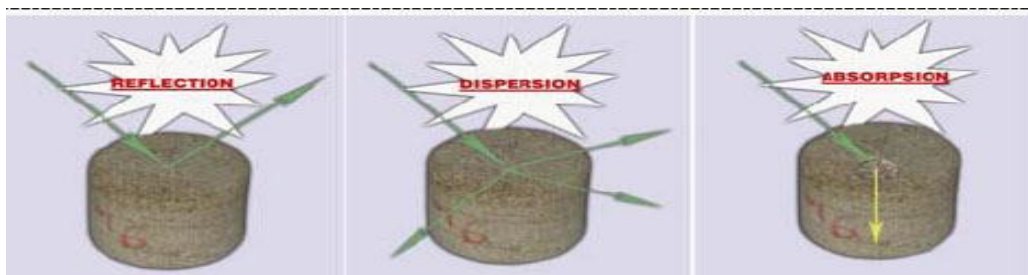
1064 nm	طول موج
1600 watts	توان متوسط
64 joules	ماکزیمم انرژی
0.1-10 milliseconds	پهنای موج
800 hz	میزان تکرار

۲- عملکرد دستگاه لیزری مورد استفاده

وقتی که نیروی لیزر بر سنگ اعمال می‌شود، یک حوزه‌ی دمایی در سنگ به وجود می‌آید. توزیع دما در طول دوره‌ی اولیه لیزرکاری را می‌توان با استفاده از مدل ساده شده انتقال حرارت carslow و jaeger بدست آورد و فرض می‌کنیم بخشی از سنگ که در معرض پرتو لیزر قرار دارد، بخشی نامحدود، همگن و جامد الاستیک می‌باشد؛ آنگاه توزیع دما از رابطه زیر بدست می‌آید [۵]:

$$T(Z, t) = \frac{2q(Kt)^{\frac{1}{2}}}{k} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2(Kt)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (1)$$

در این رابطه، T درجه حرارت در فاصله طبیعی سنگ از سطح جامد بر حسب (C) ، Z فاصله طبیعی سنگ از سطح جامد بر حسب (m) ، q ثابت شار انرژی لیزر بر حسب $(\frac{\text{watt}}{\text{cm}^2})$ ، K ضریب پراکندگی حرارت در سنگ بر حسب $(\frac{\text{m}^2}{\text{s}})$ ، k رسانایی گرمایی سنگ بر حسب $(\frac{\text{w}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}})$ ، t زمان از لحظه آغاز عملیات بر حسب (s) و ierfc انتگرال متمم توابع خطا می‌باشد. در محل تماس لیزر با سطح سنگ سه منطقه قابل تشخیص است: ۱- منطقه تبخیر شده ۲- منطقه مذاب شده ۳- منطقه سست شده [۱]. با برخورد اشعه‌های لیزر به سطح سنگ ممکن است اشعه‌ها یکی از عکس‌العمل‌های ذیل را از خود نشان دهند [۶]: ۱- اشعه‌ها منعکس شوند ۲- اشعه‌ها پخش شوند ۳- اشعه‌ها جذب شوند (شکل ۱).



شکل ۱. عکس‌العمل‌های تابشی هنگام برخورد به سطح سنگ [۶]

آزمایش‌ها نشان داده‌اند که پرتوهای منعکس شده و پراکنده شده نسبت به پرتوهای جذب شده، اثر کمتری بر سنگ می‌گذارند؛ در حقیقت مکانیسمی که باعث خرد شدن و در نهایت حفاری سنگ می‌شود، مکانیسم جذب اشعه‌های لیزر است [۷].

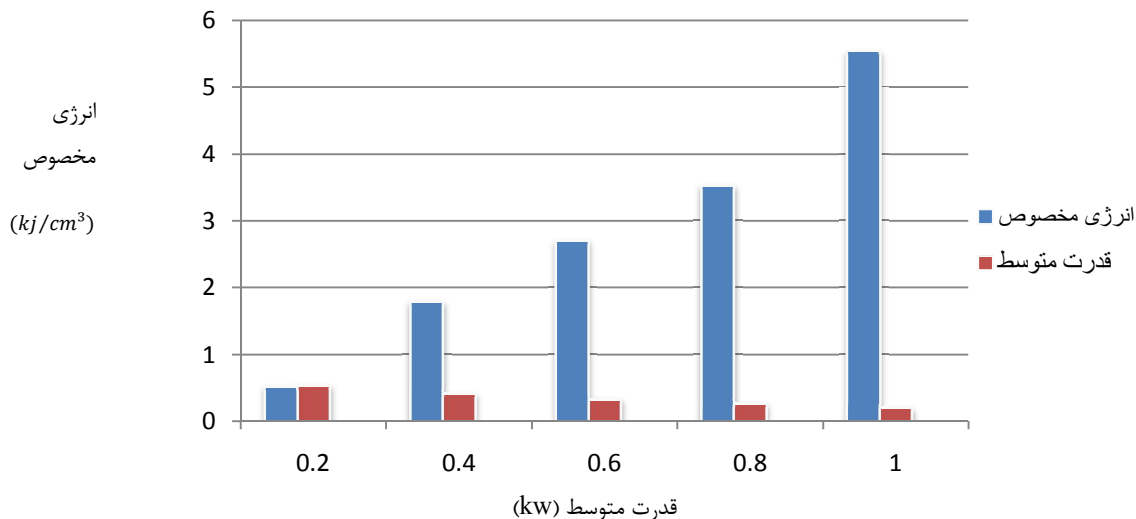
۳- پارامترهای مورد نیاز لیزر pulsednd:yag برای حفاری سنگ

لیزرهای نوع CO_2 با انتقال انرژی می‌توانند برای تضعیف سنگ (ایجاد شکاف یا برش در سنگ)، به وسیله اشعه‌های غیرمتمرکز استفاده شوند. در گذشته از لیزرهای نوع CO_2 و pulsednd:yag، برای پیدا کردن بهترین روش کنترل پارامترها استفاده می‌شد؛ اما امروزه از تئوری انرژی مخصوص (انرژی لازم برای برداشتن یک واحد حجم سنگ) که برای سنگ‌های مختلف شناخته شده است، استفاده می‌شود [۵]. آزمایش تغییر قدرت مخصوص لیزر (sp) در تکه سنگ‌ها نشان داد که لیزر از طریق کاهش قدرت مخصوص به میزان $1 \times 10^3 \frac{\text{w}}{\text{cm}^2}$ ، سنگ‌ها را به ترتیب تبخیر، ذوب و خرد کرده است [۸]. دمای مکانیسم تبخیر معمولاً خیلی بیشتر از حد قدرت مخصوص لازم برای بدست آوردن خرد شدگی می‌باشد، پس بنابراین از بین سه مکانیسم (تبخیر، ذوب و خرد شدن)، خرد شدن کارآمدترین روش باشد. در جدول شماره ۲ حداقل انرژی مخصوص (SE) برای دو نوع سنگ مخزن آورده شده است. در این جدول می‌توان دید که از طریق کنترل هر یک از پارامترهای قدرت مخصوص و زمان قرارگیری در معرض پرتوی لیزر، مکانیسم حذف سنگ می‌تواند تغییر کند. مکانیسم خردشدگی نیاز به انرژی مخصوص کمتری دارد. همچنین در جدول ۲ نشان داده شده است که لیزر

pullsednd:yag، با دارا بودن یک چهارم قدرت متوسط لیزر نوع CO₂ می‌تواند ۲/۵ برابر قدرت مخصوص بیشتری فراهم کند. قدرت کمتر از حد متوسط قدرت لیزر، سنگ را در محدوده‌ی خرد شدگی نگه می‌دارد. همانطور که از جدول ۲ استنباط می‌شود، در صورت افزایش زمان قرارگیری نمونه سنگ در معرض پرتوهای لیزر (از ۰/۵ ثانیه به ۱ ثانیه)، نمونه سنگ ذوب خواهد شد. در واقع زمان باعث افزایش انرژی مخصوص شده است که این به معنی آن است که برخی زمان‌های استراحت بین پیوستگی‌های لیزر لازم است تا از ذوب شدن سنگ جلوگیری شود. شکل ۲ ارتباط بین انرژی مخصوص و قدرت متوسط در محدوده‌ی لیزر pullsednd:yag را نشان می‌دهد. داده‌ها موجود در جدول ۲ نشان‌دهنده افزایش قدرت متوسط و کاهش انرژی مخصوص می‌باشد؛ در نتیجه قدرت متوسط و انرژی مخصوص با هم نسبت عکس دارند که این خود در انتخاب قدرت لیزر و سایز پرتوهای اشعه لیزر نقش به‌سزایی دارد. در حفاری سنگ‌های چاه نفتی، نرخ نفوذ (ROP) متغیر مهمی برای سنجش وسایل مختلف حفاری است. نرخ نفوذ به پارامترهای مختلفی بستگی دارد و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۹]:

$$ROP = \frac{SP}{SE} \left(\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right) \quad (2)$$

در این رابطه SP، توان منتقل شده به سیستم لیزری به ازای واحد سطح $\left(\frac{\text{w}}{\text{cm}^2} \right)$ و SE مقدار انرژی لازم برای خارج کردن حجم واحد سنگ $\left(\frac{\text{w} \cdot \text{sec}}{\text{cm}^3} \right)$ می‌باشد. همانطور که از رابطه ۲ استنباط می‌شود، نرخ نفوذ با قدرت مخصوص به صورت مستقیم و با انرژی مخصوص به صورت عکس ارتباط دارد. پس می‌توان گفت که با افزایش قدرت مخصوص و کاهش انرژی مخصوص، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. شکل ۲ و جدول ۲ این واقعیت را بیان نموده‌اند.



شکل ۲. ارتباط بین انرژی مخصوص و قدرت متوسط لیزر

جدول ۲. شرایط و نتایج حذف سنگ به وسیله لیزر

انرژی مخصوص (kj/cm ³)	زمان قرارگیری در معرض پرتوی لیزر (s)	قدرت مخصوص (w/cm ²)	قدرت متوسط (w)	سایز اشعه های لیزر (mm)	لیزر استفاده شده	نوع سنگ
۲/۵ (خردشدن)	۰/۵	۷۱۲	۲۰۲۰	۱۹	CO ₂	ماسه سنگ خاکستری بئرا
۳/۵ (خردشدن + ذوب خفیف)		۷۸۰	۲۲۱۰	۱۹		
۴/۵ (خردشدن + ذوب متوسط)		۱۷۴۵	۲۲۱۰	۱۲/۷		
۳۰ (ذوب سنگین)		۲۳۶۹	۳۰۰۰	۱۲/۷		
۰/۵۲ (خردشدن)	۰/۵	۴۲۱۷	۵۳۴	۱۲/۵	PULSED ND:YAG	شیل
۱/۷۹ (خردشدن)		۳۲۸۰	۴۱۵			
۲/۷۱ (خردشدن)		۲۶۱۰	۳۳۰			
۳/۵۳ (خردشدن)		۲۰۷۰	۲۶۲			
۵/۵۴ (خردشدن)		۱۵۹۰	۲۰۲			
۳/۶ (ذوب متوسط)	۱	۴۲۱۷	۵۳۴			

۴- بررسی شرایط تحت تاثیر حفاری سنگ بوسیله لیزر pulsednd:yag

در این آزمایش پارامترهای لیزر بوسیله شلیک پرتو لیزر به قطر ۱۲ mm در سه درجه شاخص متفاوت و به مدت ۰/۵ ثانیه، روی یک نمونه سنگ مخزن بررسی شدند. البته برای انتخاب پارامترهای لیزر از پارامترهایی که بالاترین سرعت تخریب یا سرعت نفوذ را داشته باشند، استفاده می‌شود. شکل ۳ نقاط سطحی حفاری شده بوسیله سه نوع پارامتر لیزری متفاوت را که E8L1R50 (نقطه ۱)، E8L2R50 (نقطه ۲) و E8L3R100 (نقطه ۳) هستند را نشان می‌دهد. هر سه نوع پارامتر لیزری ذکر شده، نمونه سنگ مخزن را سوراخ کرده‌اند اما پارامتر E8L3R100 بدلیل دارا بودن متوسط (1600W) و انرژی پالس ($16 \frac{J}{pulse}$) بالا و همچنین به خاطر سریعتر بودن نرخ نفوذ آن برای آزمایشات حفاری سنگ انتخاب شده است. روند عمل حفاری سنگ به مدت زمان انجام عملیات لیزر کاری، مدت زمان توقف دستگاه لیزر بین شلیک‌های پرتوی لیزر و سرعت چرخشی نمونه بستگی دارد. همانطور که در جدول شماره ۳ نشان داده شده است، در سرعت چرخشی پایین تر از ۶۰ درجه بر ثانیه و مدت زمان طولانی لیزر کاری (بیش تر از ۶ ثانیه)، نرخ نفوذ کاهش یافته و نمونه سنگ هم ترک برداشته است (شکل ۴ الف)). ترک‌های ایجاد شده، باعث جذب انرژی ورودی لیزر و در نهایت شکستن سنگ می‌شوند. انجام عملیات لیزر کاری بصورت طولانی، انرژی بیشتری را از مقدار مورد نیاز برای خرد کردن سطح داخلی نمونه سنگ فراهم می‌کند که در نهایت باعث ذوب و شکستن سنگ می‌شود. همچنین در جدول ۳ نشان داده شده است که در سرعت چرخشی بالاتر از ۶۰ درجه بر ثانیه و

استراحت دادن به دستگاه لیزر در هنگام پرتو دهی تناوبی (دو ثانیه روشن و دو ثانیه خاموش)، نرخ نفوذ افزایش یافته و همچنین از ذوب و شکستن سنگ در هنگام حفاری جلوگیری می‌کند (شکل ۴(ب)). بنابراین برای جلوگیری از ذوب شدن و ترک برداشتن سنگ، زمان‌های استراحت برای پرتو دهی لازم است.



شکل ۳. نقاط سطحی حفاری شده بوسیله سه نوع پارامتر لیزری متفاوت: E8L1R50 (نقطه ۱)، E8L2R50 (نقطه ۲) و E8L3R100 (نقطه ۳)

جدول ۳. شرایط تحت تاثیر حفاری نمونه سنگ‌های مخزن به وسیله لیزر

نمونه سنگ ترک خورده؟	نرخ نفوذ	مدت زمان استراحت لیزر (s)	مدت زمان لیزر کاری (s)	سرعت چرخشی (°/s)
بله	کم	۰	۱۲	۳۰
بله	کم	۰	۲/۷	۵۰
بله	کم	۰	۶	۶۰
نه	بالا	۲	۲	۶۰



شکل ۴. سوراخ‌های ایجاد شده در نمونه سنگ‌های مخزن بوسیله لیزر (الف) ترک خورده و (ب) ترک نخورده

۵- روند تاثیرات حفاری با لیزر بر روی هزینه های حفاری

هزینه هرفوت حفاری چاه های نفت وگازاز رابطه زیر بدست می آید [۲]:

$$C_t = \frac{C_{bit} + (t+T)C_{rig}}{\Delta D} \quad (3)$$

در این رابطه، C_t هزینه حفاری به ازای حفاری یک فوت از چاه بر حسب دلار $(\frac{\$}{ft})$ ، C_{bit} هزینه مته بر حسب دلار $(\$)$ ، C_{rig} هزینه کرایه دکل بر حسب دلار $(\frac{\$}{hr})$ ، t زمان پیمایش بر حسب ساعت (hr) ، T زمان حفاری بر حسب ساعت (hr) و ΔD عمق حفاری شده با مته مورد نظر می باشد. از این فرمول چنین به نظر می رسد که هزینه های حفاری به مدت زمانی که یک مته را در چاه می رانیم، بستگی دارد. هزینه های حفاری با عمق حفاری شده به ازای هر مته رابطه عکس دارد. هنگام استفاده از سیستم لیزری به جای مته ی حفاری، عمق حفاری شده توسط سیستم لیزری افزایش می یابد. در نهایت مته از صنعت حفاری حذف و قسمت عمده ای از هزینه های حفاری کاهش می یابد. به عنوان مثال برای حفاری یک چاه ساحلی با روش حفاری دورانی هزینه ای حدود ۴۰۰۰۰۰ دلار لازم است که با حفاری لیزری می توان حداقل سرعت حفاری را ۱۰ برابر کرد پس هزینه تجهیزات نسبت به هزینه های قبلی به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. با این حال بکارگیری اینگونه لیزرها به دلیل وجود طول موج های بلند و خطرات ناشی از آن تا حدی محدود و غیر قابل اعتماد شده است.

نتیجه گیری

با توجه به مشاهدات و مطالب ذکر شده، حفاری با استفاده از لیزر `pulsednd:yag` را می توان یک انقلاب بزرگ در صنعت حفاری دانست. داده های آزمایشگاهی مقدماتی نشان می دهد که لیزر `pulsednd:yag` به دلیل دارا بودن توان متوسط و انرژی پالس بالا می تواند سنگ را حفاری کند و نفوذپذیری سنگ را افزایش دهد. استفاده از لیزر `pulsednd:yag` در تقلیل مقاومت سنگ موجب می شود سرعت حفاری افزایش یابد که در نتیجه باعث کاهش فوق العاده ی زمان و هزینه های حفاری و بالا رفتن دقت حفاری می گردد. با این وجود برای جایگزینی حفاری لیزری با حفاری دورانی یا حداقل استفاده از حفاری لیزری در کنار حفاری دورانی به یک مبارزه و تلاش گسترده نیاز است.

علائم و نشانه ها

ROP $(\frac{cm}{sec})$: Penetration rate

SE $(\frac{w.sec}{cm^3})$: Specific energy

SP $(\frac{w}{cm^2})$: Specific power

منابع

۱. مرتضی اصانلو، "روشهای حفاری"، انتشارات صدا، تهران، ۱۳۸۶.
۲. علیرضا مؤذنی، محمد نبئی، "مهندسی حفاری"، انتشارات دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی، اصفهان، ۱۳۹۰.



3. graves r.m., Obrien d.g., star wars laser technology applied to drilling and completion gas wells spe 54925, spe annual technical conference and exhibition, new Orleans, Louisiana, 1998.
4. xu z., reed c.b., parker r.a., graves r.m., laser spallation of rocks for oil well drilling, the 23rd international congress on applications of laser & electro – optics, sanfrancisco, California, 2004.
5. parker r.a., xu z., reed c.b., Graves r.m., drilling large diameter holes in rocks using multiple laser beams International congress on applications of laser & electro- optics, Jacksonville, florida, 2003.
6. gahanb.c., parker r.a., sahim b., hamberto f., xu z., laser drilling determination of energy required to remove rock, spe71466, spe annual technical conference and exhibition, new Orleans, Louisiana, 2001.
7. xu z., reed c.b., graves r.m., parker r.a., laser spallation of rocks for oil well drilling, 23rd international congress on applications of laser & electro- optics, 2004.
8. xu z., reed c.b., konercki g., gahanb.c., parker r.a., batarseh s., graves r.m., Figueroa h., skinnern., specific energy for pulsed laser rock drilling, journal of laser application, 2003.
9. sihna p., gour a., laser drilling research and application an update, spe/iadc 102017, spe/iadc Indian drilling technology conference and exhibition, mumbai, India, 2006.