



## بررسی عوامل زمان و هزینه در حفاری دورانی و لیزری

امیرافضل کیانی شاهرود \* دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

داریوش شیمردی \*، برزو عسگری \* دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان

چکیده

طی چند سال اخیر به دلیل مشکلاتی از قبیل زمان بر بودن و هزینه‌های فراوان حفاری و سایر محدودیت‌ها در روش‌های حفاری قدیمی، روش‌ها و راهکارهای جدیدی پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به حفاری لیزری اشاره کرد. هدف اصلی تمامی آزمایش‌هایی که تاکنون انجام شده دستیابی به بیشترین مقدار حفاری با کمترین زمان و هزینه بوده است. در این تحقیق دو عامل زمان و هزینه در حفاری یکی از چاه‌های جنوب غربی کشور به روش لیزری با روش دورانی مقایسه شده و سپس بهترین روش حفاری که زمان و هزینه‌های این چاه را به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد ارائه شده است. نتایج این پروژه نشان داد که استفاده از فن آوری لیزر در صنعت حفاری سبب افزایش سرعت حفاری و در نهایت کاهش زمان و هزینه‌های حفاری می‌شود.

واژگان کلیدی: حفاری دورانی، حفاری لیزری، زمان و هزینه‌های حفاری

مقدمه

موفقیت ردیابی شده است [۴]. در این مقاله سعی شده با مقایسه‌ی زمان و هزینه‌های حفاری دورانی با حفاری لیزری و با استفاده از داده‌ها و اطلاعات میدانی، رابطه‌ای پایدار و قوی بین فن آوری لیزر و فرآیند حفاری چاه‌های نفت و گاز ارائه گردد.

### ۱- نوع و مزایای دستگاه لیزری مورد استفاده

با انتخاب سیستم لیزری مناسب می‌توان سرعت حفاری را تا حد قابل توجهی افزایش داد. متغیرهای مؤثر بر حفاری با لیزر عبارتند از: توان لیزر، طول موج، مکانیسم کاری سیستم (امواج پیوسته یا امواج ضربه‌ای)، نوع لیزر و نیمرخ اشعه‌ی تابشی. قدرت لیزر به کار رفته در این مطالعات،  $1/6 \text{ KW}$  با کابل فیبر نوری پرتابی است. در این لیزر اتم‌های برانگیخته نئودیمیم در شبکه بلورین ایتیریم، آلومینیم و گارنت (نوعی سنگ) نگهداری می‌شوند. نتایج داده‌های میدانی نشان می‌دهد که این لیزر به دلیل توان متوسط و انرژی زیاد پالس می‌تواند سنگ را حفاری کرده و نفوذپذیری آنرا افزایش دهد. ویژگی‌های لیزر مورد استفاده در جدول ۱- ارائه شده است. مزایای لیزر  $\text{pulsed nd:yag}$  نسبت به سایر لیزرهای حفاری سنگ عبارتند از:

- سرعت و دقت زیاد
- قابلیت پرتاب پرتو از مسیرهای طولانی
- گسترش بارگیری حرارتی روی سنگ که سبب تخریب بیشتر

به دلیل تنوع سنگ‌ها انواع مختلف سیستم حفاری نیز جهت حفر چال یا چاه در سنگ به وجود آمده است [۱]. در اوایل قرن بیستم شیوه‌ی حفاری سیم بکسلی به حفاری با رشته‌ی لوله‌های فولادی اضافه شد و حتی در موارد بسیاری جای آنرا اشغال کرد. اما هر دوی این روش‌ها برای حفاری چاه‌های نفت و گاز که از نوع حفاری عمیق هستند بسیار وقت گیر، خطرناک و پرهزینه است [۲]. یکی از روش‌های قابل قبول که نظر بسیاری از مهندسان را به خود جلب کرده حفاری چاه‌های نفت و گاز با استفاده از فن آوری لیزر است. تحقیقات در زمینه‌ی استفاده از فن آوری لیزر در حفاری چاه‌های نفت و گاز از ۱۹۹۷ آغاز شده است. نخستین آزمایش با عنوان پروژه‌ی MIRACL و توسط ارتش آمریکا انجام شد. در آزمایش MIRACL که توسط اوبرین و گریوز انجام شد از سیستم لیزری امواج پیوسته (CW) با طول موج  $3/8 \mu\text{m}$  و توان لیزری ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ kw استفاده شد. در این آزمایش طی  $4/5$  ثانیه تابش لیزری، عمق حفاری حدود  $2/5$  اینچ برای ماسه‌سنگ گزارش شد. این آزمایش نشان داد که با استفاده از لیزر، سرعت حفاری حدود ۱۰ تا ۱۰۰ برابر افزایش می‌یابد [۳]. آزمایش بعدی توسط نیروی هوایی آمریکا و با عنوان COIL انجام شد. این لیزر پرتو CW عمل می‌کند و پیشرفتی برای ارتش حساب می‌شود، هم‌اکنون برای کاربردهای صنعتی تکمیل شده است. لیزر coil در گستره‌ای ۳۱ مایلی (۵۰ کیلومتر) با

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (shirmardi1376@gmail.com)

سنگ می‌شود

■ پرتوهای لیزر می‌توانند خیلی زود در اندازه‌ی یک نقطه‌ی معین همگرا شوند. این پرتوهای همگرا شده مانع باریک شدن تدریجی قطر سنگ می‌شوند.

■ میانگین قدرت مورد نیاز لیزر کم است. پس در شرایط لازم برای عمل تحویل انرژی می‌توان به آسانی از فیبر نوری استفاده کرد.

■ حفاری سنگ با مکانیزم خردشدن انجام می‌شود و خرده‌ها و سنگ‌های کوچک باقی‌مانده به راحتی توسط روش‌های تخلیه‌ی استاندارد خارج می‌شوند [۵].

## ۲- معایب دستگاه لیزر pulsed nd:yag

برخی کارشناسان، مخالف جایگزین حفاری لیزری pulsed nd:yag با حفاری دورانی هستند. چراکه بعضی مشکلات حفاری با لیزر هنوز قابل چشم‌پوشی نیستند که از جمله‌ی آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

■ چرخش گل حفاری در حین عملیات حفاری و تأثیر آن بر انرژی منتقل شده به سطح سنگ

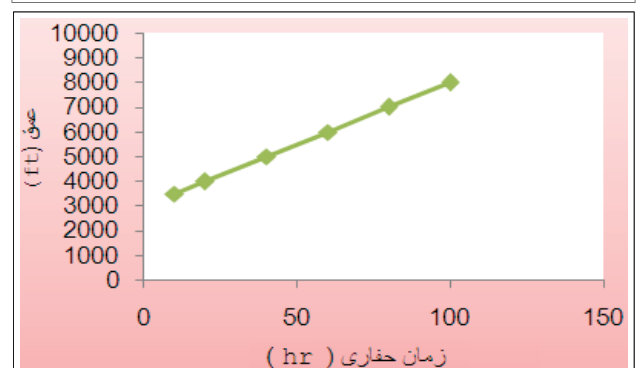
■ انتقال انرژی از منبع لیزر موجود در سطح به عدسی لیزر در سطح چاه

■ استفاده‌ی همزمان از اشعه‌ی لیزر و گل حفاری و تأثیر آن بر انتقال کنده‌های حفاری از ته چاه به سطح

■ آسیب رساندن به سازندهای پر فشار حاوی هیدروکربن

۱ ویژگی‌های لیزر pulsed nd:yag [۵]

مقدار	کمیت
1064nm	طول موج
1600watts	توان متوسط
joules 64	بیشینه‌ی انرژی
0.1-10 milliseconds	پهنای موج
800 hz	تعداد تکرار



۱ ارتباط عمق و زمان حفاری دورانی [۷]

■ کارآیی روش‌های ارسال امواج به صورت پالس‌های ناگهانی [۶]

## ۳- ارزیابی زمان عملیات حفاری با لیزر pulsed nd:yag

زمان لازم برای عملیات پیمایش به عمق چاه، دکل مورد استفاده و نحوه‌ی حفاری بستگی دارد. زمان لازم برای تعویض یک مته و شروع عملیات حفاری با استفاده از رابطه‌ی ۱- به دست می‌آید:

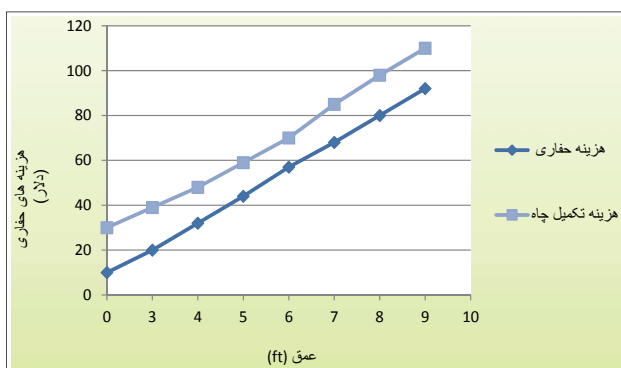
$$t_t = 2 \left[ \frac{t_s^-}{I_s^-} \right] D \quad (1)$$

که در آن  $t_t$  زمان پیمایش برای تعویض مته‌ها و شروع عملیات حفاری،  $t_s^-$  زمان میانگین لازم برای اضافه کردن یک استند به رشته‌ی لوله‌ی حفاری،  $I_s^-$  طول میانگین یک استند از رشته‌ی لوله‌ی حفاری و  $D$  عمق پیمایش است. همان‌طور که از رابطه‌ی ۱- استنباط می‌شود زمان لازم برای عملیات پیمایش به شکل خطی با عمق افزایش می‌یابد. شکل ۱- ارتباط بین عمق و زمان حفاری دورانی را نشان می‌دهد؛ بدین ترتیب که هرچه عمق حفاری بیشتر باشد زمان لازم برای عملیات پیمایش نیز بیشتر خواهد بود [۷]. با استفاده از سیستم لیزری، طول روزهای کاری دکل کاهش می‌یابد. چراکه در عمل لوله و مته‌ای وجود ندارد و در نتیجه نیازی هم به خارج کردن لوله‌ها و تعویض سرمته‌ی فرسوده وجود ندارد.

## ۴- ارزیابی هزینه‌ی عملیات حفاری با لیزر pulsed nd:yag

هزینه‌های حفاری معمولاً بر اساس متر از حفاری (دلار به ازای هر فوت) در بعضی موارد نیز بر حسب دلار در ساعت محاسبه می‌شوند [۱]. هزینه‌ی هر فوت حفاری چاه‌های نفت و گاز از رابطه‌ی ۲- به دست می‌آید:

$$C_t = \frac{C_{bit} + (t + T)C_{rig}}{\Delta D} \quad (2)$$



۲ ارتباط عمق و هزینه‌ی حفاری دورانی [۸]



جداری را حذف می کند [۲].

#### ۵- بحث و بررسی

جداول-۲ و ۳ به ترتیب نتایج روزهای کاری دکل و هزینه‌های حفاری دورانی و لیزری انجام شده در یکی از چاه‌های جنوب غربی ایران را نشان می‌دهد. این چاه در ۲۰۱۱ به دلیل وجود مانع (سازندی) در عمق تقریبی ۷۷۹۹ft، نشت سازند گچساران و راندن لوله‌های مغزی ۱۵۷/۴۸-۴۷/۲۴ اینچ تعمیر شد. داده‌های جدول بر اساس رفع مانع و تمیزسازی چاه تا عمق ۸۷۶۰ft هستند. پس از بحث و بررسی و انجام آزمایش‌های فراوان روی این چاه، موارد مدنظر در این جداول بررسی شد.

#### ۵-۱- روند تأثیرات لیزر pulsed nd:yag روی حفاری چاه

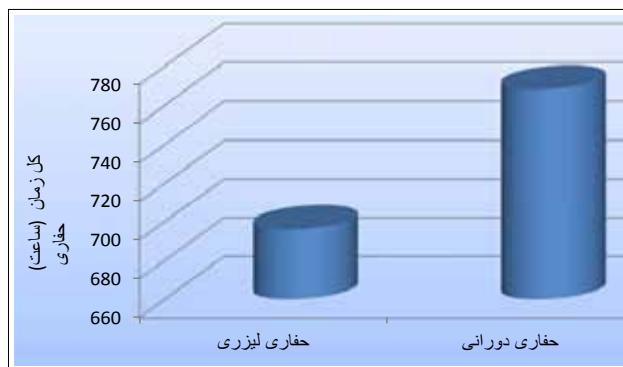
در صورت استفاده از حفاری لیزری در صنعت حفاری قسمت عمده‌ای از هزینه‌های مربوط به لوله‌های حفاری، مته و تثبیت کن، سیمان کاری و گل حفاری حذف می‌شود. زیرا در اثر تماس لیزر با سطح سنگ حرارت بسیاری ایجاد می‌شود که سبب ذوب سنگ و ایجاد غلافی سرامیک مانند روی دیواره‌ی چاه خواهد شد. همچنین در حفاری لیزری به جای انرژی مکانیکی از انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳- نشان داده شده در صورت حذف لوله‌های حفاری، مته و تثبیت کن، سیمان کاری و گل حفاری از مقدار کل هزینه‌های حفاری این چاه به ترتیب مبالغ ۶۸۲، ۱۵۰، ۲۹۰ و ۶۰۹ دلار حذف خواهد شد و هزینه‌های حفاری به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد.

#### ۵-۲- روند تأثیرات حفاری دورانی و لیزری بر زمان و هزینه‌های حفاری چاه

استفاده از لیزر در کاهش مقاومت سنگ سبب می‌شود سرعت

که در این رابطه  $C_1$  هزینه‌ی حفاری به‌ازای هر فوت از چاه  $C_{bit}$  (\$/ft) هزینه‌ی مته (\$)،  $C_{rig}$  هزینه‌ی کرایه‌ی دکل (\$/hr) زمان پیمایش  $T$  (hr) زمان حفاری (hr) و  $\Delta D$  عمق حفاری شده با مته‌ی مورد نظر است. این رابطه نشان می‌دهد که هزینه‌ی حفاری به مدت زمان راندن مته در چاه بستگی دارد. شکل ۲- که ارتباط بین عمق و هزینه‌ی حفاری دورانی را نشان می‌دهد؛ بدین ترتیب که هرچه عمق حفاری بیشتر باشد هزینه‌ی حفاری نیز بیشتر خواهد بود [۸]. امروزه برای نصب یک سکوی حفاری و حفاری در خشکی حدود ۴۰۰ هزار دلار و در دریا حدود ۴/۵ میلیون دلار لازم است. این در حالی است که با افزایش عمق و سخت تر شدن سنگ‌ها هزینه‌ها بیشتر از این افزایش می‌یابند. به دلیل اینکه اشعه‌ی لیزر عملاً تماس مستقیمی با سنگ و مصالح ندارد و در نتیجه نیازی هم به خارج کردن لوله‌ها و تعویض سر مته‌ی فرسوده وجود ندارد قدرت نفوذ لیزر در سنگ بیشتر است. نکته‌ی جالب دیگر آن است که در اثر تماس لیزر با سنگ حرارت بسیاری ایجاد می‌شود که سبب ذوب شدن سنگ و ایجاد غلافی سرامیکی مانند روی دیواره‌ی چاه خواهد شد و هزینه‌های رایج برای خرید و نصب لوله‌های فولادی

شرح	زمان (hr)	هزینه (\$)
انتقال و برپا کردن دکل	۱۶۸	۱۰۵۶
جاده‌سازی و ساختمان محل چاه	-	۷۴۰
مته و تثبیت‌کن	-	۱۵۰
لوله‌های حفاری	-	۶۸۲
گل حفاری	-	۶۰۹
سیمان‌کاری	-	۲۹۰
هزینه‌ی اولیه‌ی چاه	-	۳۵۵
زمان تلف‌شده‌ی عملیات	۷۲	۶۸۲
عملیات تکمیل چاه	۵۲۸	۵۰۰
جمع کل	۷۶۸	۹۵۶۰



شکل ۴ | تأثیر حفاری دورانی و لیزری بر زمان حفاری چاه



شکل ۳ | هزینه‌های حفاری چاه با روش حفاری لیزری (جدول-۳)

به نمودار شکل‌های ۴-۵ با استفاده از سیستم دورانی در حفاری این چاه زمان و مبالغ کل هزینه‌های حفاری به ترتیب ۷۶۸ ساعت و ۹۵۶۰ دلار خواهد بود. این در حالی است که با استفاده از فن آوری لیزر در حفاری این چاه زمان و هزینه‌های حفاری به ۶۹۶ ساعت و ۷۸۲۹ دلار خواهد رسید؛ یعنی با استفاده از لیزر، زمان و هزینه‌های حفاری به ترتیب ۱۰ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابند.

### نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات انجام شده در این پروژه، نتایج زیر حاصل شد:

- نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سرعت حفاری از عوامل اصلی و تأثیرگذار در حفاری چاه‌های نفت و گاز است. چراکه با افزایش سرعت حفاری، زمان و هزینه‌های حفاری به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابند.
- استفاده از فن آوری لیزر در صنعت حفاری باعث افزایش سرعت حفاری می‌شود. چون در حفاری لیزری عملاً لوله و مته‌ای وجود ندارد و نیازی هم به خارج کردن لوله و تعویض سرته‌ی فرسوده نیست.
- برای حفاری چاه‌های نفت و گاز با استفاده از فن آوری لیزر بهتر است از لیزرهای pulsed nd:yag با قابلیت پرتاب پرتو لیزر از راه دور استفاده شود. این لیزر به دلیل دارا بودن توان متوسط و انرژی پالس زیاد می‌تواند سنگ را حفاری کرده و نفوذپذیری آنرا افزایش دهد.
- داده‌های میدانی نشان می‌دهد لیزر pulsed nd: yag سبب کاهش ۱۰ و ۱۸ درصدی زمان و هزینه‌های حفاری خواهد شد.
- برای جایگزینی حفاری دورانی با حفاری لیزری یا دست‌کم استفاده از حفاری لیزری در کنار حفاری دورانی نیاز به داده‌های قوی و اثبات‌های متعدد میدانی است.

حفاری حداقل ۴۰ درصد افزایش یابد. چراکه عملاً لوله و مته‌ای وجود ندارد و در نتیجه نیازی هم به خارج کردن لوله‌ها و تعویض سرته‌ی فرسوده نیست. با افزایش سرعت حفاری، روزهای کاری دکل و هزینه‌ی حفاری کاهش می‌یابند. شکل‌های ۴-۵ به ترتیب تأثیر حفاری دورانی و لیزری بر زمان و هزینه‌های حفاری را نشان می‌دهند. با توجه

۳ نتایج روزهای کاری دکل و هزینه‌های حفاری لیزری (چاه-۷۶) میدان نفتی اهواز

شرح	زمان (hr)	هزینه (\$)
انتقال و برپا کردن دکل	۱۶۸	۱۰۵۶
جاده‌سازی و ساختمان محل چاه	-	۷۴۰
هزینه‌ی تجهیزات لیزر	-	۵۰۰۰
هزینه‌ی اولیه‌ی چاه	-	۳۵۵
زمان تلف‌شده‌ی عملیات	۴۸	۲۷۸
عملیات تکمیل چاه	۴۸۰	۴۰۰
جمع کل	۶۹۶	۷۸۲۹



۵ تأثیر حفاری لیزری و دورانی بر هزینه‌های حفاری چاه

### پانویس‌ها

<sup>1</sup> kiani.petro215@gmail.com

<sup>2</sup> askariborzu@gmail.com

### منابع

- conference and exhibition, new orleans, Louisiana, SPE 549259.
- [۵] کیانی شاهوند، ا. شیرمردی، د.، عسکری، ب.، محمدی، ح.، استراتژی روش مدرن استفاده از فن آوری لیزر pulsed nd: yag در افزایش نرخ نفوذ و کاهش هزینه‌های حفاری، مجله‌ی فرآیند نو، شماره‌ی ۴۲، تابستان ۱۳۹۲
- [6] bjomdalen, n., belhaj, h.a., agha, k.r., islam, m.r. (2003). numerical investigation of laser drilling, spe eastern regional in Pennsylvania, usa, spe 84844.
- [۷] نادری، م.، ابراهیم کوچان، م.، سجادیان، و.ا.، ۱۳۸۶، مهندسی حفاری کاربردی، انتشارات مشتاق دانش، تهران
- [۸] مؤذنی، ع.ر.، نبی، م.، ۱۳۹۰، مهندسی حفاری، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی
- [۱] اصانلو، م.، ۱۳۷۵، روش‌های حفاری، مرکز نشر صدا، تهران
- [2] reed, c.b., xu, z., parker, r.a., gahan, b.c., batarseh, s., graves, r.m., Figueroa, h., deeg, w. (2003). application of high powered lasers to drilling and completing deep wells, u.s. doe report anl/td/tm 0302-.
- [3] Graves, R.M., o'Brien, D.G. (1999). Star wars laser technology for gas drilling and completions in 21st century, SPE Annual technical conference and exhibition, Houston, texas, spe 56625.
- [4] Graves, R.M., o'Brien, D.G. (1998). Star wars laser technology applied to drilling and completion Gas wells, SPE Annual technical