

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^۱
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
www.Reservoir.ir

بررسی عوامل موثر بر انرژی مخصوص در حفاری چاه های نفت و گاز با لیزر

سید محسن باقرخانی^۱، نجم بالدی^۲، قاسم طعیمی^۳

خدمات فنی چاه های شرکت پیراحفاری ایران
m.bagherkhani@gmail.com

چکیده

اهمیت حفاری در صنعت نفت و گاز یک اهمیت راهبردی است، چنانچه هر کشور در بخش بالادست صنعت نفت خود توان کافی را نداشته باشد پس از مدتی نقاط استراتژیک صنعت را از دست خواهد داد. در ایران صنعت حفاری همواره به عنوان یکی از چالشهای اصلی در این صنعت مطرح بوده است. همزمان با بالا رفتن عمر چاه ها ، هزینه تعمیر چاه ها نیز افزایش می یابد و در آینده به خدمات این بخش برای حفر چاه های جدید بیشتر نیاز داریم، ضمن آنکه به کارگیری تجهیزات مدرن تر در زمینه حفاری ، راندمان تولید را افزایش خواهد داد. تکنولوژی حفاری با لیزر یکی از همین تجهیزات مدرن در حفاری در جهان می باشد که هزینه حفاری و زمان حفاری را بسیار کاهش می دهد . در این مقاله به بررسی عوامل موثر در حفاری با لیزر و به خصوص روشهای کاهش انرژی مخصوص حفاری برای بالا بردن نرخ نفوذ مته می پردازیم که یک عامل بسیار تاثیر گذار در هزینه های حفاری می باشد. نرخ نفوذ مته در حال حاضر در ایران ۳۷ متر در روز است که با رعایت یکسری پارامترها و تامین بموقع و صحیح کالا و مواد ، به مقدار بهینه ۴۵ تا ۵۰ متر در روز افزایش پیدا کند. از جمله این پارامترها دستیابی به تکنولوژی های مدرن است که لیزر سرآمد آنها می باشد. در نهایت به بررسی یک مثال عملی پیاده سازی این روش طی یک پروسه ترکیبی بین حفاری با لیزر و دستگاه لوله مغزی سیار پرداخته ایم .

واژه های کلیدی : حفاری با لیزر ، نرخ نفوذ در سنگ ، انرژی مخصوص ، پاکسازی ، فیبر نوری ، لوله مغزی سیار

^۱ کارشناسی ارشد پژوهش - پیراحفاری

^۲ رییس خدمات فنی چاه ها- پیرا حفاری

^۳ کارشناس ارشد برنامه ریزی حفاری- معاونت امور فنی (حفاری)

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^۱

۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱

www.Reservoir.ir

۱. مقدمه

روشهای مکانیکی حفاری چاه های نفت و گاز که از اواسط قرن ۱۹ ام آغاز شد ، ادامه دهنده تکنیک های حفاری اولیه در چین بود. اوایل قرن ۲۰ شیوه حفاری سیم بکسلی به حفاری با رشته‌های لوله‌های فولادی اضافه گردید و حتی در موارد بسیاری جای آن را اشغال نمود [۱]. و سپس این تکنیک به مرور زمان تکمیل شد و ارتقا یافت. اما هنوز رقیب جدی برای این روش حفاری پیدا نشده بود تا اینکه در دهه های ۶۰ و ۷۰ میلادی از انرژی نور یا همان لیزر در صنعت استفاده شد و برای لیزرها، ۱۰۰ سطح مختلف توان اعمالی در آزمایشگاه برای تضعیف سنگ و کمک به شکستن مکانیکی آن آزمایش شد [۲]. سپس در سال ۱۹۹۴ ، کنگره آمریکا طی حکمی دستور انتقال تکنولوژی دفاعی و نظامی جنگ سرد را به موارد عمرانی صادر کرد و استفاده از تکنولوژی لیزر در قالب پروژه جنگ ستارگان کلید خورد. از سال ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۹ ، موسسه تحقیقاتی گاز که حال به موسسه تکنولوژی گاز (GTI, USA) تغییر نام داده شده است ، به مدت ۲ سال روی روشهای مختلف لیزر برای حفاری در پروژه های نفت و گاز تحقیق انجام داد و روشهایی که قبل از آن طی پروژه جنگ ستارگان صورت پذیرفته بود را ارتقا بخشید. اولین فاز این تحقیق توسط لیزر MIRACL توسط ارتش آمریکا در نیومکزیکو روی ماسه های سفید صورت پذیرفت [۳]. تستهای اولیه روی سنگ ماسه پتانسیل بالای لیزر برای انجام فرآیند حفاری را نشان داد. اشعه لیزر با سرعت $450 \frac{\text{ft}}{\text{hr}}$ حفاری می کرد که سرعت نفوذ آن حدود ۱۰۰ برابر نرخ های رایج آن زمان بود. در یک تست ، یک پرتو لیزر ۶ اینچ ، ۶ پوند از یک سنگ ماسه Berea را در ۴ ثانیه توسط لیزر MIRACL با قدرت ۹۰۰ KW انجام داد [۴] ، که متناسب با نرخ نفوذ سنگ برابر $1/79 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ یا $211/8 \frac{\text{ft}}{\text{hr}}$ می باشد. این فاز اول در گزارشی تفصیلی [۵] آمد که نشان می داد لیزرهای دارای پتانسیل حفاری و آماده سازی چاه های نفت و گاز می باشند. فاز دوم این تحقیق توسط لیزر COIL که یک لیزر با قدرت بالا می باشد و در سال ۱۹۷۷ توسط آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی آمریکا (AFB) در نیومکزیکو برای دفاع هوا به هوا ابداع شد. از این لیزر به صورت بسیار گسترده ای روی بیش از ۱۰۰ نمونه سنگ از جمله سنگ ماسه ، سنگ آهک ، سنگ شیل ، نمک ، گرانیست و بتن آزمایش صورت پذیرفت که نتیجه آن بدین صورت بود که همگی توسط لیزر تخریب می شوند البته با توان و مدت زمان تابش متفاوت لیزر نسبت به یکدیگر این واقعه صورت می گرفت. این لیزر توانایی نفوذ به انواع سنگ ها که به صورت نمونه با آب ، آب نمک ، نفت و گاز اشباع شده اند را داشته و می تواند همگی را حفاری کنند [۶].

پس از مشخص شدن امکان پذیری استفاده از لیزرهای توان بالا برای کاربردهای نفت و گاز ، دپارتمان انرژی آمریکا (DOE) فاز سوم را که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ برای تعیین انرژی مورد نظر بود را آغاز کرد. در این مرحله کنسرسیومی از چند شرکت برای تحقیقات به همراه DOE تشکیل شد که شامل Colorado School of Mines ، موسسه تکنولوژی گاز ، آزمایشگاه های ملی آرگون ، کمپانی هالیبرتون ، و کمپانی ملی نفت ونزولا بود [۵]. دو لیزر Nd:YAG و CO₂ ، در آزمایشگاه ملی آرگون در شیکاگو مورد استفاده قرار گرفتند و پاسخ ها به حد کافی دلگرم کننده بود که باعث فاز بعدی تحقیق از مارس ۲۰۰۲ تا فوریه ۲۰۰۳ شد. در این بازه زمانی ، GTI به همراه شرکای خود در حال تعیین این موضوع بودند که انواع لیزرها و سنگ ها تحت شرایط شبیه سازی درون چاهی ، چه مقدار دقیق عمل می کنند و چه میزان انرژی برای شکستن سنگ ها نیاز دارند و یک مدل برای فرآیند حفاری با لیزر که راهنمای بسیار مفیدی برای توسعه تکنولوژی حفاری با لیزر در آینده شد ارائه کردند. حاصل این تحقیقات یک سری نکات کلیدی مانند ، انرژی موردنیاز برای از بین بردن یک واحد سنگ ، چه میزان پالس لیزر نرخ نفوذ را افزایش می دهد، چه میزان انرژی لازم است تا پرتو لیزر به عمق چاه برسد و اینکه چه میزان انرژی در این میان تلف می شود، بود [۶].

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^۴
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir

۲. سیستم رایج حفاری با لیزر

هدف نهایی یک سیستم حفاری با لیزر این است که برای حفاری توسط لیزر، هزینه و زمان به مراتب کمتری نسبت به حفاری چرخشی مرسوم انجام دهیم. یک سیستم حفاری با لیزر ترکیبی از سیستم لیزر^۴، طرح حفاری^۵، سیستم انتقال توان^۶، رشته حفاری^۷ و اسمبلی انتهای چاه^۸ می باشد. هنگام حفاری، فیبرهای نوری برای انتقال مقدار زیادی انرژی لیزر به درون چاه مورد استفاده قرار می گیرند. انرژی انتقالی به سنگ باید توسط یک اشعه^۹ یا تعدادی اشعه های کوچکتر بر اساس قطر اشعه صورت پذیرد. حفاری توسط لیزر یکسری تفاوت‌هایی با حفاری های مکانیکی چرخشی رایج دارد. برای مثال بدلیل اینکه نیاز به نیروی وزن زیاد روی مته نمی باشد پس احتیاجی به رشته های حفاری فولادی و سنگین نمی باشد. همچنین اگر بخواهیم از فیبر نوری برای انتقال انرژی لیزر به درون چاه استفاده کنیم پس فرآیند لوله گذاری ترتیبی^{۱۰} پیچیده و سخت خواهد شد، پس بهتر است از یک روش ترکیبی با سیستم دستگاه لوله مغزی سیار^{۱۱} استفاده کنیم که در این مقاله بدان اشاره شده است و بدلیل استفاده همزمان از لیزر و مته پس نیازی به مته های سنگین و پر هزینه نمی باشد و در ضمن سیال حفاری و سیستم کنترل آن باید با روش ترکیبی جدید تطبیق داده شود.

۳. عوامل تاثیر گذار بر حفاری توسط لیزر

حفاری با لیزر دارای یکسری عوامل مشترک با حفاری چرخشی رایج است و برخی عوامل مرتبط فقط با لیزر می باشند که در ادامه به برخی از آنها پرداخته شده است. هر سیستم حفاری با لیزر به سه عامل اصلی بستگی دارد که شامل سنگ، چاه و لیزر می باشد که در نمودار ۱ عوامل تاثیرگذار مهم آن آورده شده اند و در انتها در جداول ۳ و ۴ مشخصات انواع سنگ و لیزر نیز آورده شده اند.



نمودار ۱ عوامل موثر در حفاری با لیزر

⁴ Laser System

⁵ Drilling Scheme

⁶ Power Delivery System

⁷ Drill String

⁸ Bottom Hole Assembly

⁹ Beam

¹⁰ Sectional Tubing

¹¹ Coil Tubing

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^{۱۲}
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir

۳-۱- نرخ نفوذ

نرخ نفوذ سرعتی است که مته حفاری می‌تواند سنگ را شکسته و حفاری چاه را انجام دهد. در حفاری سنگ‌های چاه نفتی نرخ نفوذ (ROP)^{۱۳} متغیر مهمی برای سنجش وسایل مختلف حفاری است [۷] و معمولاً با یکی از واحدهای فوت بر ساعت یا سانتی متر بر ثانیه به عنوان پیشرفت کار بیان می‌گردد. ROP با قدرت مخصوص به صورت مستقیم و با انرژی مخصوص به صورت عکس ارتباط دارد که به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]:

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

که در رابطه (۱):

SP - قدرت مخصوص بر حسب kW/cm^2
 SE - انرژی مخصوص بر حسب kJ/cm^3

۳-۲- بررسی عوامل موثر بر انرژی مخصوص

برای شکستن یک سنگ بصورت مکانیکی یا گرمایی نیاز به ایجاد فشار می‌باشد، که این فشار بر اساس نوع سنگ و شرایط محیطی بیشتر می‌گردد. به عنوان مثال هنگامی که یک سنگ ذوب می‌شود، ابتدا گرمای کافی باید ایجاد گردد تا به نقطه ذوب سنگ برسد. هنگامی که این توان و انرژی به حد آستانه^{۱۴} می‌رسند، میزان انرژی موردنیاز برای شکستن یا حذف یک واحد سنگ تقریباً مشخص و ثابت است [۸]. این پارامتر انرژی، یک عامل برای اندازه‌گیری میزان انرژی لازم برای تخریب یک واحد سنگ است که از آن به عنوان انرژی مخصوص^{۱۴} (SE) تعریف می‌گردد. عبارت SE دارای تعاریف مختلفی می‌باشد و در صنعت حفاری به عنوان یک عامل موثر در نرخ حفاری از آن استفاده می‌گردد [۹، ۱۰]. این انرژی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$SE = \frac{\text{انرژی ورودی}}{\text{حجم تخریب شده}} \quad (2)$$

۳-۲-۱ پارامترهای تاثیرگذار روی اندازه‌گیری SE:

در فرآیند تخریب توسط لیزر سه حالت برای یک سنگ هنگام برخورد لیزر با توان بالا می‌تواند رخ دهد که عبارتند از: انعکاس^{۱۵}، پخش کردن^{۱۶} و جذب^{۱۷} اشعه می‌باشد [۱۱]. میزان انرژی یک تابع موج الکترومغناطیسی E_{inc} به سه بخش زیر تقسیم می‌شوند:

$$E_{inc} = E_{refl} + E_{sc} + E_{abs} \quad (3)$$

که در آن E_{refl} ، E_{sc} ، E_{abs} بترتیب میزان انرژی انعکاس، پخش و جذب تابع موج الکترومغناطیس است.

¹² Rate Of Penetration

¹³ Threshold

¹⁴ Specific Energy

¹⁵ Reflection

¹⁶ Scattering

¹⁷ Absorption

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^۱
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir

اگر یک سطح از نوع مسطح^{۱۸} باشد، مانند یک آینه، اکثر انرژی تابشی را پخش می‌کنند و میزان بازتاب پذیری توسط نوع ساختار جامد تعیین می‌گردد، در حالیکه میزان پخش اشعه توسط طول موج، λ ، تعیین می‌شود. اما در واقع این انرژی جذب شوندگی است که باعث گرم شدن و تبخیر سنگ می‌شود. انعکاس و پخش نمایانگر میزان انرژی می‌باشد که از انرژی جذب شده کم شده و تلف شده است. پس در نتیجه اگر انعکاس و پخش انرژی به حداقل برسد، متعاقب آن میزان انرژی که به سطح سنگ رسیده و جذب شده و در نتیجه باعث تخریب و حفاری در سنگ می‌شود به حداکثر می‌رسد [۱۳].

فاکتورهایی که روی میزان انرژی جذب شده به نمونه سنگ‌ها تاثیر می‌گذارند به عنوان اثرات درجه دوم شناخته می‌شوند، و شامل ایجاد مواد مذاب، گازهای ایجاد شده در اثر جذب، ذوب و تخریب سنگ‌ها درون حفره‌ای که تحت لیزر قرار می‌گیرند، می‌باشند [۱۱]. هنگامی که یک سنگ تحت تاثیر انرژی لیزر با توان بالا قرار می‌گیرد سه حالت می‌تواند برای آن رخ دهد که شامل: خرد شدن^{۱۹}، ذوب شدن یا تبخیر سنگ در ازای انرژی انتقال داده شده به آن می‌باشد [۱۲]. ذوب مواد معدنی درون سنگ‌ها زمانی رخ می‌دهد که درجه حرارت سطح سنگ از درجه حرارت ذوب این مواد بالاتر برود که در این صورت مواد معدنی ذوب شده و بصورت شیشه‌ای در می‌آیند. میزان ذوب تابعی از کانی‌شناسی سنگ^{۲۰} و فضای بین‌شبهه داخلی سنگ می‌باشد. سنگ‌ها دارای ضریب هدایت گرمایی بالایی می‌باشند، پس انتقال گرما موثرتر و دما درون سنگ نیز یکنواخت‌تر نسبت به دیگر محیط‌ها می‌باشد که یک عامل مفید است و نزدیکتر بودن ذرات^{۲۱} درون سنگ به یکدیگر، باعث انتقال حرارت بیشتری می‌گردد، که نتیجه آن ذوب بیشتر سنگ‌ها می‌باشد [۹]. اگر چه این انتقال حرارت سریعتر صورت می‌پذیرد، اما به دلیل فشردگی این سنگ‌ها، میزان انحراف^{۲۲} گرما از مسیر خود به مسیرهای دیگر، که اجتناب‌ناپذیر است، با نرخ سریعتری صورت می‌پذیرد. که در موجب کاهش مواد مذاب می‌گردد. همچنین، برخی مواد معدنی تجزیه شده و تولید گاز می‌کنند. به عنوان نتیجه، این ذوب شدگی و گازها مقداری از انرژی لیزر را به خود جذب می‌کند و در نتیجه انرژی کمتری به سطح سنگ می‌رسد که این مورد مطلوب نمی‌باشد [۱۵]. ترک خوردگی^{۲۳} همچنین یک فاکتور تاثیرگذار روی SE می‌باشند، بصورتیکه آنها نمایانگر انرژی مورد استفاده برای اهداف دیگر در مقابل تبخیر سنگ‌ها هستند، و در مورد مقادیر بالای SE بکار می‌روند [۱۱]. ترک خوردگی‌ها در دو دسته ماکرو و میکرو دسته بندی می‌شوند که ترک‌های ماکرو بصورت واضح قابل مشاهده می‌باشند اما ترک‌های میکرو فقط با میکروسکوپ قابل تشخیص می‌باشند و رفتار ترک‌ها از یک نوع سنگ به نوع سنگ دیگر تفاوت دارند [۱۸، ۱۹] (تصویر ۱).

¹⁸ Planner

¹⁹ Spall

²⁰ Mineralogy

²¹ Grains

²² Dissipating

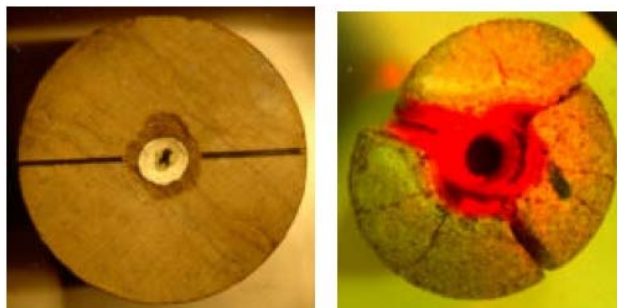
²³ Fractures

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^{۲۴}

۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱

www.Reservoir.ir



تصویر ۱ مقایسه ترک خوردگی ، سنگ آهک بدون ترک خوردگی و سنگ ماسه با ترک خوردگی زیاد

رفتار ترک ها روی سنگ ها به فاکتورهایی مانند کانی شناسی، خصوصیات گرمایی سنگ ها، حجم فضای خالی بین آنها^{۲۴}، ابعاد نمونه سنگ و میزان فشار اعمال شده بستگی دارند. کانی شناسی روی رفتار ترک تاثیر می گذارد [۲۰]. خاک های رس^{۲۵} که حاوی آب می باشند، هنگامی که تحت دمای بالا قرار می گیرند سعی در تخلیه بصورت بخار دارند. این مورد باعث افزایش فشار در منفذها می گردد و باعث ترک خوردگی می شود. سنگ ماسه و سنگ شیل^{۲۶} دارای ضریب هدایت گرمایی بالایی هستند و حاوی خاک رس زیادی می باشند. از سمت دیگر، سنگ آهک دارای ضریب هدایت گرمایی پایین تری می باشد و حاوی میزان کمی خاک رس و کوارتز هستند. بنابراین ترک ها در سنگ ماسه و سنگ رس بیشتر قابل انتظار است و در سنگ آهک این میزان کمتر می باشد. پس هنگامی که ضریب هدایت گرمایی سنگ بالا باشد، سنگ سریعتر گرم شده و توزیع دما درون سنگ بهتر صورت می پذیرد. همچنین برای سنگ های با ضریب هدایت گرمایی بالاتر ، فرآیند سرد شدن بصورت تدریجی در طی هسته سنگ صورت می پذیرد [۲۱]. و نکته دیگر اینکه ترک ها در سنگ های ماسه ای بتدریب و نه بصورت تصادفی گسترش می یابند. آزمایش ها نشان داده اند که افزایش دما باعث می شود که ذرات کوارتز منبسط گردند [۲۲]. در ۶۰۰ درجه سلسیوس ذرات با ضریب ۱،۷۵٪ نسبت به سایز اصلی خود منبسط می گردند. در مواردی که تماس بین ذرات بسیار زیاد است (فضای خالی کم است)، ذرات فضایی برای منبسط شدن ندارند و بنابراین ترک ها بیشتر گسترش می یابند. ابعاد نمونه سنگ نیز می تواند روی رفتار ترک ها موثر باشد، بصورتیکه در طی یک سری آزمایشاتی که روی سنگ ها صورت پذیرفت ، سنگ های با قطر ۲،۵۴cm خصوصاً اطراف حفره بیشتر ترک می خوردند نسبت به سنگ هایی که با قطر ۳،۰۹cm کمتر دچار ترک خوردگی می شدند. در نهایت مشاهده شده است که یکی از کاربردهای اعمال فشار روی هسته سنگ، حداقل کردن ایجاد ترک ماکرو است ، در حالیکه ترک میکرو در این شرایط افزایش می یابد [۲۳].

۲-۲-۳ روشهای محاسبه SE :

حال برای محاسبه SE باید حجم تخریب شده واحد سنگ را بدست آوریم که این مورد را می توان توسط ۲ روش زیر محاسبه کرد

۲-۲-۳-۱ روش تفاوت وزنی^{۲۷}

تفاوت بین نمونه قبل و بعد از عملیات تابش لیزر ضربدر چگالی حجمی ماده. تحت شرایط ایده آل ، اگر پاکسازی موثر باشد، لیزر باید یک سوراخ مشابه با شکل پرتو خود ایجاد کند . حجم ماده تخریب شده در رابطه SE از معادله ۴ بدست می آید :

²⁴ Void Space

²⁵ Clays

²⁶ Shale

²⁷ Weight Differential Method

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir

$$SE = \frac{\text{انرژی ورودی}}{\text{حجم تخریب شده}} = \frac{P}{\frac{dv}{dt}} = \frac{[\frac{kw}{cm^2}] \cdot \text{Time}}{cm} = \frac{kw}{\frac{cm^3}{sec}} = \frac{kJ}{cm^3} + C \quad (4)$$

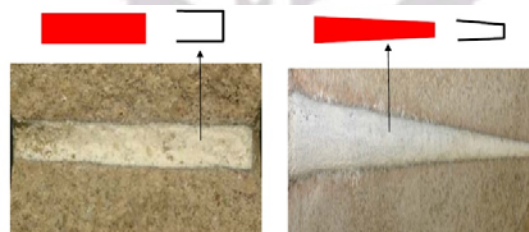
که در آن :

P = توان ورودی (Watts)

$\frac{dv}{dt}$ = مشتق (تغییرات) حجم بر اساس زمان ($\frac{cm^3}{sec}$)

۳-۲-۲-۲-۲ روش هندسی^{۲۸}

اندازه گیری قطر و عمق سوراخ حفره و بکارگیری معادله هندسی صحیح که در آن از هندسه استوانه ای^{۲۹} برای پرتوهای لیزر موازی^{۳۰} و از هندسه مخروطی^{۳۱} برای پرتوهای لیزر متمرکز^{۳۲} استفاده می گردد که در تصویر ۲ نشان داده شده است:



تصویر ۲ تاثیر نوع شکل اشعه روی حفره ایجاد شده

۳-۳-۳ مقایسه روشهای هندسی و تفاوت وزنی

به منظور بررسی این محاسبات یکسری آزمایش توسط لیزر روی دو نمونه سنگ آهکی و ماسه ای انجام شده است. در این آزمایش ۱۰ نمونه سنگ ماسه ای با ابعاد قطر ۵,۰۸cm (۲ اینچ) و در ارتفاع ۵,۰۸cm (۲ اینچ) را قبل از اینکه تحت لیزر قرار گیرند بصورت دقیق وزن کرده و آنرا یادداشت می کنیم. هر کدام از نمونه ها بمدت ۸ ثانیه تحت لیزر با قدرت ۵,۳۴kw و لیزر در فاصله ۰,۳۵ اینچ از نمونه ها قرار گرفته است. پس از لیزر مجدد نمونه ها را وزن کرده چگالی حجمی هر نمونه مجدد با اندازه گیری وزن و حجم آنها می گردد. حجم تخریب شده سپس با ضرب چگالی حجم و وزن از دست رفته توسط لیزر بدست می آید. روش دوم بر اساس ابعاد حفره با اندازه گیری قطر حفره و عمق آن، حجم تخریب شده را مقایسه می کند. در نمودار شماره ۲ مقایسه دو روش برای سنگ آهک و در نمودار شماره ۳ مقایسه دو روش برای سنگ ماسه آمده است.

²⁸ Geometric Method

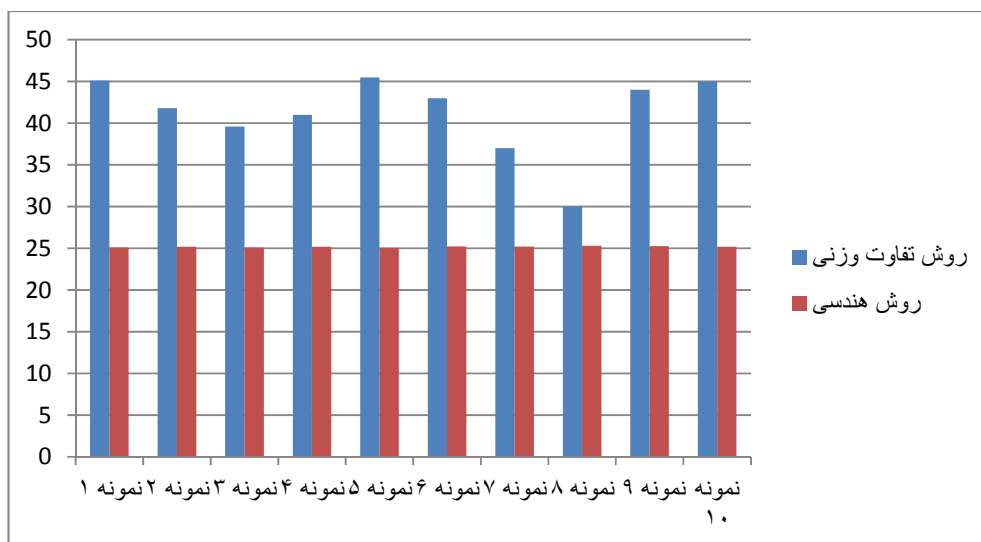
²⁹ Cylindrical

³⁰ Collimated

³¹ Conical

³² Focused

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir



نمودار ۲ مقایسه SE روشهای هندسی و تفاوت وزنی برای نمونه های سنگ آهک



نمودار ۳ مقایسه SE روشهای هندسی و تفاوت وزنی برای نمونه های سنگ ماسه

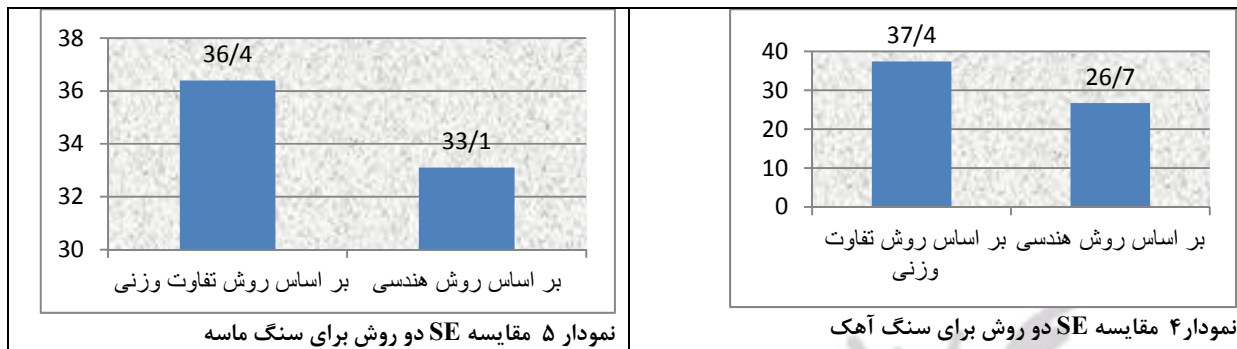
حال با محاسبه میانگین برای هر دو روش که در نمودارهای ۴ و ۵ آمده است، مشاهده می شود که در سنگ آهک تفاوت بسیار زیاد اما در سنگ ماسه کمتر است که در ادامه به دلایل این مهم پرداخته می شود

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^۳

۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱

www.Reservoir.ir



۴-۳- بهینه سازی پاکسازی^{۳۳}

آزمایش‌های پیشین نشان داده است که از بین بردن خرده سنگ‌ها^{۳۴} و ذرات باقیمانده سنگ توسط یک روش موثر پاکسازی در ایجاد یک حفره عمیق در سنگ ماسه، به مراتب دشوارتر و مهمتر از سنگ آهک است [۲۵]. طبق این نتایج تکه سنگ‌ها و خاکی که از شکستن سنگ توسط لیزر ایجاد می‌شود باید هر چه سریعتر از مسیر پرتو لیزر حذف شود تا انرژی کمتری تلف گردد. هر ماده‌ای که مسیر پرتو لیزر را تا رسیدن به سطح سنگ مسدود کند مقداری از انرژی پرتو را جذب می‌کند و اجازه نمی‌دهد که به نقطه مورد نظر (سنگ) برسد پس در نتیجه از میان برداشتن این خرده سنگ‌ها کمک شایانی به فرآیند حفاری می‌کند. برای پاکسازی مسیر اشعه لیزر روشهای متفاوتی ارائه شده است که بعنوان مثال می‌توان به دو سیستم نازل گاز^{۳۵} و تقویت کننده هوا^{۳۶} اشاره کرد [۲۶، ۲۷]. اصل کاری تقویت کننده هوا فراهم آوردن یک جریان پاکسازی گاز روی مقطع مورد نظر است، که باعث شود پرتو لیزر بصورت مستقیم روی مقطع مورد نظر بتابد. تقویت کننده هوا در هر دو حالت خلا و پاکسازی می‌تواند کار کند، و در هر دو حالت انرژی مخصوصی که به سطح مقطع مورد نظر می‌رسد محاسبه شده و تفاوت آنها لحاظ شده است. در تصویر ۳ تفاوت میان استفاده و عدم استفاده از تقویت کننده هوا و نازل گازی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌کنید سوراخها با یکدیگر تفاوت فاحشی دارند. اما در مقایسه بین تقویت کننده هوا و نازل گاز نیز، هر دو روی سنگ آهک^{۳۷} دارای انرژی مخصوص یکسانی هستند، اما در مورد سنگ ماسه^{۳۸} قضیه متفاوت است و نازل گاز مکانیسم پاکسازی به مراتب بهتری نسبت به تقویت کننده هوا دارد که در نمودار ۶ آمده است. که در توضیح آن باید گفت سنگ ماسه از درصد بالایی سیلیس^{۳۹} برخوردار است که زمانی که پرتو لیزر بصورت می‌پذیرد و دمای ایجاد شده از این پرتوافشانی به دمای مورد نیاز ذوب سیلیس می‌رسد، ذوب می‌شود [۲۸]. زمانی که این اتفاق رخ می‌دهد یک ماده غلاف مانند شیشه به سرامیک بوجود می‌آید. در این شرایط نازل گاز پاکسازی به مراتب بهتری نسبت به تقویت کننده هوا دارد و می‌تواند قطعات خرد شده سیلیکا را از جلوی مسیر پرتو حذف کند و در نتیجه اتلاف حرارتی و متعاقب آن فاز بعدی که یعنی اتلاف انرژی است را نیز کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث می‌شود که انرژی

³³ Purge optimization

³⁴ Debris

³⁵ Gas Nozzle

³⁶ Air Amplifier

³⁷ Limestone

³⁸ Sandstone

³⁹ Silica

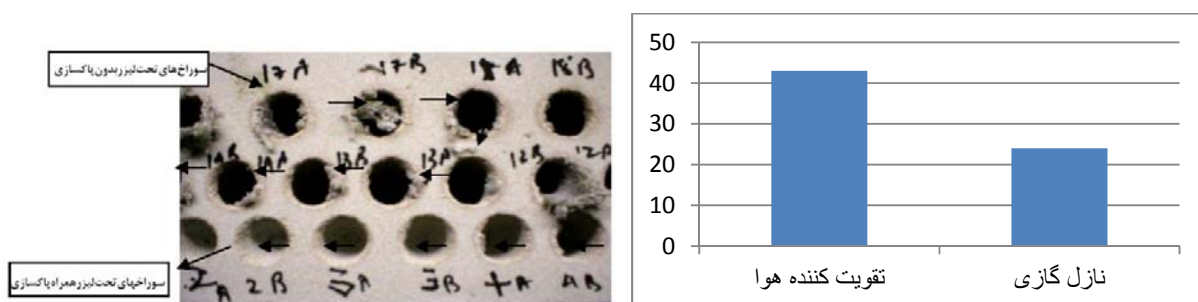
مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^{۴۰}

۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱

www.Reservoir.ir

مخصوص بیشتری به سطح سنگ برسد که بصورت میانگین حدود ۲ برابر روش تقویت کننده هوا می باشد و بسیار مطلوب است. در نتیجه پاکسازی یک عنصر بسیار مهم در تخریب سنگ توسط لیزرهای با قدرت بالا است که با پاک کردن مسیر پرتو لیزر، انرژی حداکثری را به سطح مقطع مورد نظر می رساند.



تصویر ۳ تأثیر پاکسازی روی ایجاد حفره توسط لیزر

۳-۵- مقایسه لیزر درون و بیرون آب

از آنجایی که لیزر می تواند سنگ ها را حتی درون آب نیز ذوب یا خرد کند، و سنگ اشباع شده توسط آب سریعتر بریده می شود [۱۶]، پس مطلوب است که جت آب ۴۰ را به لیزر برای انجام فرآیند حفاری مفید و موثرتر اضافه کنیم. جدول ۱ نشان دهنده تفاوت بین یک لیزر با محیط خشک معمولی و یک لیزر به همراه جت آب است. تفاوت در کارایی و بازده به ازای افزایش عمق حفره کاملاً مشخص است. جدول ۲ نیز نشان دهنده تفاوت بین حفاری چرخشی رایج و حفاری لیزر همراه با جت آب است [۳۰، ۳۱].

جدول ۱. مقایسه بین لیزر خشک متداول و لیزر همراه با جت آب

عامل مقایسه ای	لیزر به همراه جت آب	لیزر خشک متداول
شکل موتور	استوانه ای و ثابت	مخروطی
فاصله کاری	دورتر	نزدیک تر
خنک کنندگی	جت آب باعث خنک کنندگی مواد بین پالس های لیزر می گردد. اثر حرارتی ناچیز	خطر حرارتی قابل توجه
از بین بردن خرده سنگ ها	جت آب قطعات بریده شده یا ذوب و بخار شده را به بیرون از محوطه لیزر می راند.	به کمک گاز صورت می پذیرد. بازده کمتری دارد

جدول ۲ مقایسه بین حفاری چرخشی متداول و حفاری با لیزر همراه جت آب

عامل مقایسه ای	حفاری با لیزر به همراه جت آب	حفاری چرخشی متداول به همراه گل حفاری
نوع انرژی	حرارتی (گرما توسط نور تولید می)	مکانیکی (چرخشی)

⁴⁰ Water-Jet

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی

۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱

www.Reservoir.ir

	شود)	
نسبت نفوذحفره ROP	بالاتر (از ۱۰ تا ۱۰۰ برابر)	پایین تر
خنک کنندگی	جت آب مواد بین پالس های لیزر را خنک می کند. اثر حرارتی ناچیز	گل حفاری مته را خنک می کند. اثر حرارتی ناچیز .
از بین بردن خرده سنگ ها	جت آب قطعات بریده شده یا ذوب و بخار شده را به بیرون از محوطه لیزر می راند.	گل حفاری برای از بین بردن خرده ها استفاده می گردد.
میزان آلودگی	بسیار پایین	بسیار بالا

جدول ۳ بررسی خصوصیات انواع سنگ

نوع سنگ	درصد کوارتز (%) [۱۳]	چگالی حجمی (g/cm ³) [۱۳]. [۱۴]	رنگ	تخلخل (%) [۹.۱۴]	نفوذپذیری [۸]	ضریب هدایت گرمایی (W/m-K) [۸]
سنگ ماسه Mesaverde	۷۵	۲,۶۴	روشن به سمت خاکستری تیره	۲۰	۱۱۵	۱,۹۰
سنگ ماسه زرد Berea	۹۰	۲,۰۳	زرد	۲۳	۶۰۰۰	۲,۳۴
سنگ ماسه Berea خاکستری	۸۵	۲,۰۸	خاکستری	۲۱	۴۸۰	۲,۳۴
سنگ آهک	۰	۲,۴۳	سفید به سمت خاکستری	۰,۶	۰,۰۲	۱,۵۷
سنگ رس	۳۵	۲,۴۹	مشکی	۳	۰,۲	۳,۱۵

جدول ۴ خصوصیات انواع لیزر

نوع لیزر	مکان کشف	طول موج (μm)	توان مورد استفاده (kw)
MIRACL	ارتش آمریکا	۶,۲ تا ۲,۶	۹۰۰
COIL	نیروی هوایی آمریکا	۱,۳۱۵	۸
Pulsed CO Laser	نیروی هوایی آمریکا	۶ تا ۵	۶
Pulsed CO ₂ Laser	آزمایشگاه لیدر مسکو، روسیه	۱۰,۶	۶
CO Laser	نیروی هوایی آمریکا	۱۰,۶	۸
CO ₂ Laser	نیروی هوایی آمریکا	۱۰,۶	۱۰
Nd:YAG	آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا	۱۰,۱	۶
Direct Diode	دپارتمان تکنولوژی ملی آمریکا	۰,۸	۴

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^{۴۱}
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir

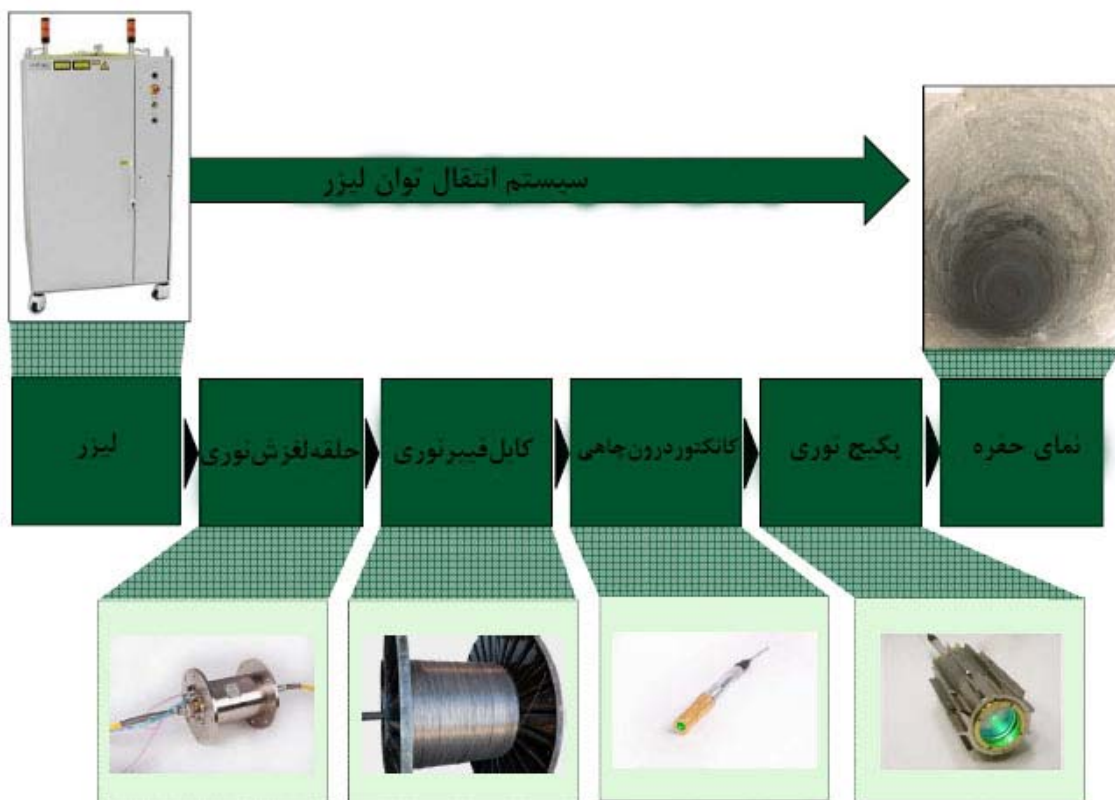
۴. ترکیب عملی لیزر با دستگاه لوله مغزی سیار

در سال ۲۰۰۹، ARPA-E به کمپانی فورو مبلغ ۹ میلیون دلار برای توسعه تکنولوژی حفاری با تماس کم^{۴۱} داد تا قابلیت این روش را برای حفاری سنگ‌های بسیار قوی مورد آزمایش قرار دهد. هدف از این پروژه بررسی کاهش هزینه‌های حفاری تا ۱/۱۰ هزینه رایج کنونی بود. شرکت فورو اشعه لیزر با توان بالا را به سطح سنگ‌ها فرستاد و به سرعت دمای سنگ را به صدها درجه سلسیوس رساند. در این روش انرژی لیزر درون یک مته حفاری مکانیکی متمرکز می‌گردد، شوک گرمایی باعث خرد شدن سنگ می‌شود و سطح سنگ را به اندازه چندین میلیمتر خرد کرده و در نتیجه ساختار مستحکم اولیه خود را از دست داده است. حال مته مکانیکی به راحتی و با توان بسیار ناچیز می‌تواند کار خود را انجام دهد. این فرآیند ترکیبی مکانیکی - لیزری به طرز فوق العاده ای انرژی مورد نیاز را کاهش می‌دهد. درمقایسه این روش با دیگر روشها می‌توان گفت که دکلهای بزرگ حفاری نیاز به حدود ۲۰۰۰HP، معادل ۱.۵MW را دارد [۱۱]. راه اندازی یک فیبر لیزر با انرژی ۲۰KW فقط نیاز به ۱۰۰KW انرژی دارد، و مته مکانیکی نیز برای تخریب سنگ نرم شده فقط نیاز به ۱۰HP یا ۷.۵KW انرژی دارد. دیگر نکته اینکه تضعیف توان در طول کابل فیبر نوری اجتناب ناپذیر می‌باشد اما می‌توان با اعمال یکسری تغییرات از جمله عایق بندی صحیح و استفاده از شیشه مرغوب درون فیبر نوری و همچنین استفاده از یکسری رله‌های تقویت کننده پالس نوری این افت توان را کاهش داد به صورتیکه با اعمال این روشها در طول فیبر نوری این پروژه با قطر ۱۲.۵in، با شیلد فلزی و در شرایط دمایی ۲۰۰ درجه سلسیوس با طول موج ۱۰۷۰ نانومتر، توان لیزر در این فیبر نوری حدود $0.7 \frac{\text{db}}{\text{km}}$ تضعیف دارد که در نتیجه در طول ۴ کیلومتر کابل حدود ۳db تضعیف توان در طول فیبر رخ می‌دهد.

همانگونه که در تصویر ۴ مشاهده می‌کنید، سیستم انتقال توان لیزر طی یک سیکل و به کمک ترکیبی از ابزار مکانیکی و اپتیکی این انرژی را به سطح سنگ به منظور حفاری انتقال می‌دهد. در این پروسه ابتدا سیستم لیزر، انرژی لیزر مورد نیاز را تهیه کرده سپس آنرا به حلقه لغزش نوری داده تا کابل فیبر نوری بتواند انرژی لیزر را دریافت کند. پس از دریافت انرژی توسط کابل فیبر نوری در انتهای فیبر و ابتدای ورودی پکیجی که مته در آن قرار گرفته است، کانکتور درون چاهی متصل شده و از آنجا به یک پکیج که در تصویر ۵ اسمبل قطعات درون آن به تفصیل آورده شده است متصل می‌گردد. در پکیج نوری لیزر اپتیکی و مته مکانیکی با هم ترکیب شده و ابتدا اشعه لیزر به سطح سنگ تابیده سپس مته مکانیکی بکار رفته در این پکیج کار خود را روی سنگی که سطح آن نرم شده آغاز کرده و در نتیجه با نیروی به مراتب کمتری حفاری خود را آغاز می‌کند. در ادامه حلقه لغزش نوری و کابل فیبر نوری توضیح داده شده اند و در تصویر ۶ نمایی از سایت عملی این پروژه را مشاهده می‌کنید.

⁴¹ Low-Contact

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir



تصویر ۴ نمای سیستم انتقال توان لیزر

۴-۱- حلقه لغزش نوری^{۴۲}

از این قطعه برای انتقال و استفاده از اشعه در فیبر نوری در مکانهایی که لغزش و چرخش وجود دارد استفاده می‌گردد و بدین وسیله منبع لیزر به قرقره کابل فیبر نوری متصل می‌شود. امروزه پیشرفت عظیمی در انتقال انرژی صورت پذیرفته است و می‌توان انرژی لیزر با قدرت ۲۰ KW با سرعت ۵rpm توسط حلقه لغزش نوری انتقال داد. این حلقه بصورت پیوسته توانایی کار در رنج دمایی ۴۰- تا ۲۰۰F در تمامی شرایط جوی را دارا می‌باشد. این حلقه می‌تواند بصورت مستقیم روی یک تویی^{۴۳}، دستگاه لوله مغزی سیار قرار گیرد یا اینکه می‌تواند توسط اتصالی بصورت مجزا استفاده گردد. این حلقه توانایی کار با رابط‌های رایج LLK, GBH, QD یا هر رابط رایج دیگری را نیز دارد.

۴-۲- کابل فیبر نوری

کابل فیبر نوری وظیفه انتقال انرژی از منبع لیزر به سطح مقطع موردنظر درون چاه را دارد، و باید قابلیت کنترل از راه دور این انرژی را نیز دارا باشد. فیبر نوری یکی از محیط‌های انتقال داده با سرعت بالا است. این فیبر رشته‌ای از تارهای شیشه‌ای بوده که هر کدام از این تارها دارای ضخامتی معادل تار موی انسان است و از آنها برای انتقال اطلاعات سیگنال‌های نوری در مسافت‌های طولانی استفاده می‌شود. این تارها در کلاف‌هایی سازماندهی شده و کابل‌های نوری را پدید می‌آورند.

⁴² Optical Slip Ring (OSR)

⁴³ Hub

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی^۴

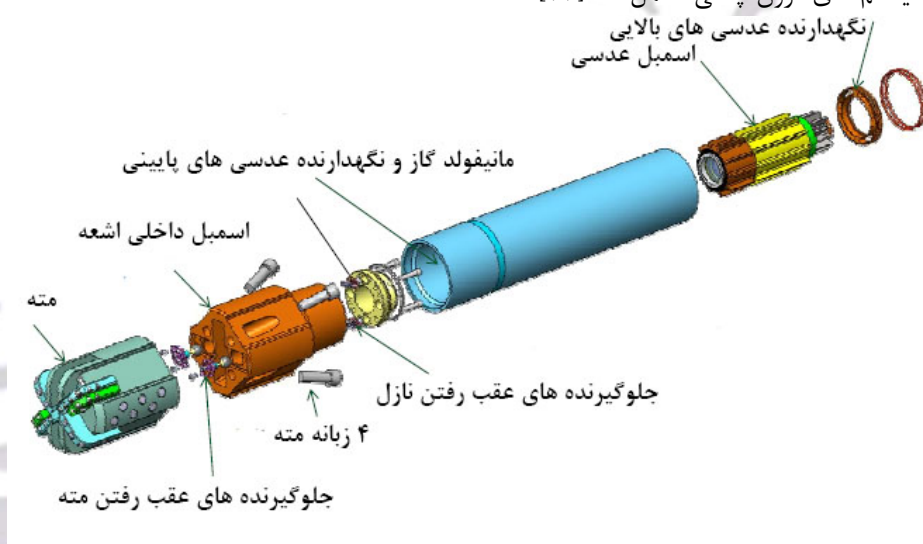
۷ خرداد ۱۳۹۴، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱

www.Reservoir.ir

یک فیبر نوری از سه بخش متفاوت تشکیل شده اند که شامل هسته^{۴۴}، روکش^{۴۵} و بافر رویه^{۴۶} می باشد. که در آن هسته، بخش نازک شیشه ای در مرکز فیبر که سیگنالهای نوری در آن حرکت می کنند. روکش، بخش خارجی فیبر بوده که دور تا دور هسته را احاطه کرده و باعث برگشت نور منعکس شده به هسته می گردد. و بافر رویه، روکش پلاستیکی است که باعث حفاظت فیبر در مقابل رطوبت و سایر مواد آسیب پذیر درون چاه می گردد[۳۲].

کابل فیبر نوری که در پروژه فورو استفاده شده است قابلیت انتقال توان بالای ۲۰KW را در فاصله بالای ۶۵۰۰ فوت را دارا می باشد (این فیبر می تواند توان را تا فاصله حدود ۴ کیلومتر انتقال دهد). به علت شرایط خاص جوی و محیطی که در پروژه های حفاری حکمفرماست بسته بندی^{۴۷} که استفاده می گردد قابلیت تحمل دما تا ۴۰۰ درجه فارنهایت و فشار ۲۰۰۰۰PSi را می تواند برای سیستم های درون چاهی تحمل کند[۳۳].



تصویره اسمبلی مته مکانیکی و لیزر در پکیج درون چاه

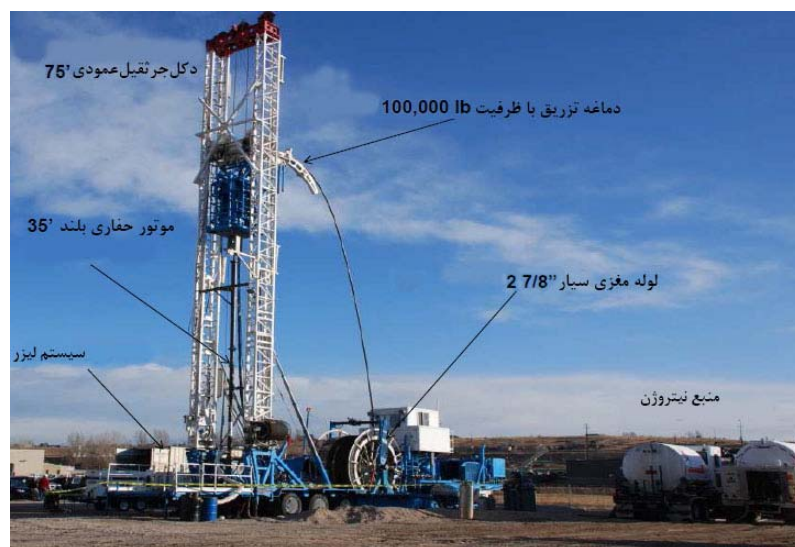
⁴⁴ Core

⁴⁵ Cladding

⁴⁶ Buffer Coating

⁴⁷ Housing

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir



تصویر ۶ نمای عملی از سایت اجرای پروژه

۵. نتیجه گیری

مسیر حفاری در حفر یک چاه را می توان به سه قسمت تقسیم کرد. بخش کم عمق، بخش میانی و بخش مخزن. بخش کم عمق که معمولاً بعنوان سرچاه نامیده می شود، شامل رسوبات ناپایدار است. بنابراین در این بخش استحکام سازند پایین بوده اما بخش مخزن پایداری بیشتری داشته و هدف اصلی حفر چاه است. بنابراین فرآیند حفاری باید به گونه ای باشد که آسیبی به سازند وارد نشود. در حفر قسمت ابتدایی چاه بدلیل اینکه نیروی زیادی لازم نیست و خرده سنگ ها بیشتر هستند پس بهتر است از حفاری دورانی رایج استفاده شود اما در بخش مخزن که نیروی زیادی لازم است و ساختار سنگ استحکام به مراتب بیشتری دارد از نیروی لیزر بهره می بریم و همانگونه که در مقاله مشاهده نمودید بهترین روش برای این قبیل حفاری ها استفاده از حفاری ترکیبی دستگاه لوله مغزی سیار به همراه لیزر است که بدلیل وجود دستگاه لوله مغزی سیار در شرکت پیرا حفاری ایران می توان از ترکیب آن با انرژی لیزر بهره جست. کاربرد دیگر لیزر در عملیات مانده یابی است که بعنوان مثال می توان برای مجرا بندها یا قسمت هایی که مسیر را سد کرده اند و ارزش استخراج سالم را ندارند می توان با این سیستم آنها را منهدم نموده و در هزینه و زمان بسیار صرفه جویی نمود. همواره یکی از مهمترین مباحثی که در مدیریت هر پروژه ای مد نظر قرار می گیرد مقوله زمان است. با توجه به اهمیت مدیریت زمان و هزینه پروژه ها، افزایش سرعت حفاری و بهینه سازی آن یکی از عوامل اساسی در پیشبرد اهداف پروژه می باشد. از آنجا که یکی از عوامل مهم در جبران عقب افتادگی از برنامه و یا کاهش زمان حفاری و تکمیل چاههای نفت و گاز سرعت نرخ نفوذ حفاری می باشد، تلاش جهت افزایش نرخ حفاری و ارائه راهکارهای مناسب در این راستا می تواند بسیار سودمند باشد. در این زمینه در این مقاله به بررسی راهکارهای افزایش این نرخ بوسیله کاهش انرژی مخصوص پرداخته ایم. که بوسیله کنترل عواملی مانند انتخاب نوع و توان لیزر، نوع سیال و روش برای پاکسازی محیط لیزر، بررسی خاصیت سنگ مانند ترک خوردگی و نقطه ذوب و ساختار کانی شناسی آن، شرایط اشباع یا عدم اشباع بودن آن، نوع فیبر نوری مورد استفاده و حداقل رساندن افت توان در طول فیبر و شرایط چاه مورد احداث می توان این انرژی را حداقل و در نتیجه نرخ نفوذ حفاری را به حداکثر خود رساند که موجب کاهش هزینه و زمان حفاری می گردد.

مراجع:

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی

۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱

www.Reservoir.ir

- [1] Ramona M. Graves and Darien G. O'Brien, "StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells", paper SPE 49259 presented at the 1998 SPE Annual Technical Conference and Exhibition in New Orleans, Louisiana, September 27-30.
- [2] Pierce, K.G., Livesay, B.J., Finger J.T. (1996) "Advanced Drilling System Study", work performed at Sandia National Laboratories is supported by the U.S. Department of Energy under contract DEAC04- 94AL8500, 1996
- [3] Brian C. Gahan, "Laser Drilling: Understanding Laser/Rock Interaction Fundamentals", GasTips, Spring 2002, Gas Technology Institute.
- [4] Ramona M. Graves and Darien G. O'Brien, Targeted Literature Review: Determining the Benefits of StarWars Lasers Technology for Drilling and Completing Natural Gas Wells, GRI-98/0163, July, 1998.
- [5] Darien G. O'Brien, Ramona M. Graves and Erin A. O'Brien, "StarWars Laser Technology for Gas Drilling and Completions in the 21st Century", paper SPE 56625 presented at the 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition in Houston, Texas, October 3-6.
- [6] Naeem, M. Cutting performance comparison between low power LPSS and SM Fiber laser for silicon wafers; Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing; June29-July2, 2009; Kobe Japan
- [۷]. Z. Xu, C. B. Reed and G. Konercki ,B. C. Gahan, R.A. Parker, S. Batarseh, R. M. Graves, H. Figueroa, N. Skinner, "Specific energy for pulsed laser rock drilling," Journal of Laser Application, V.15, No. 1, 2003
- [۸] Bonet, L., Cunha, J.C.S. and Prado, M.G.: "Drilling Optimization: A New Approach to Optimize Drilling Parameters and Improve Drilling Efficiency", Drilling Technology, ASME, 1995.
- [۹] Bourgoynne, A.T., Jr. and Young, F.S., Jr.: "A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection", SPE 4238, SPEAIME Sixth Conference on Drilling and Rock Mechanics, Austin, TX, January 1973.
- [۱۰] Fear, M.J.: "How to Improve Rate of Penetration in Field Operations", SPE 55050, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, USA, March 12-15, 1999.
- [۱۱] J.M. A. Chernysheva, A. A. Krylov, P. G. Kryukov, N. R. Arutyunyan, A. S. Pozharov, E. D. Obratsova, and E.M. Dianov, "Thulium-doped modelocked all-fiber laser based on NALM and carbon nanotube saturable absorber," Opt. Exp., vol. 20, pp. B124-B130, Dec. 10, 2012.
- [12] French, P, Naeem, M, Leach, E, Clowes, J, Sharp, M, " Macro and Micro applications for fiber lasers in laser material processing of aerospace composite material; Conference Proceedings ICALEO 2009; Orlando, Florida, USA; November 2- November 5 2009
- [13] Potter, J.M., (2010) "Development of a Hydrothermal Spallation Drilling System for EGS", Geothermal Technologies Program 2010 Peer Review ICOTA. 2005. An Introduction to Coiled Tubing: History, Applications and Benefits
- [14] Samih Batarseh, Application of the Laser Technology in the Oil and Gas Industry: An Analysis of High-Power Laser- Rock Interaction and its Effect on Altering Rock Properties and Behavior, PhD Dissertation, Colorado School of Mines, 2001.
- [15] W. H. Somerton, Thermal Properties and Temperature- Related Behavior of Rock/Fluid System, Elsevier Science Publications B. V., Amsterdam, The Netherlands, 1992.
- [۱۶] K. T. Voisey and T. W. Clyne, "Laser drilling of cooling holes through plasma sprayed thermal barrier coatings," Surf. Coat. Technol. **176**, 296-306, 2004
- [17] - Pankaj Sinha and Aabhaas Gour, Indian School Of Mines. —Laser Drilling Research and Application: An Update. SPE/IADC 102017
- [18]- W.Han , " Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging ", PhD. Thesis , Mechanical Engineering / Worcester polytechnic Institute , 2004.
- [۱۹] M. Schneider, L. Berthe, R. Fabbro, and M. Muller, "Measurement of laser absorptivity for operating parameters characteristic of laser drilling regime," J. Phys. D **41**, 155502, 2008
- [۲۰] J.A. McNally, J. Folkes, and I. R. Pashby, "Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges," Mater. Sci. Technol. **20**, 805-813, 2004.
- [۲۱] R. Poprawe, I. Kelbassa, K. Walther, M. Witty, D. Bohn, and R. Krewinkel, "Optimising and manufacturing a laser-drilled cooling hole geometry for effusion-cooled multi-layer plates," Proc. of ISROMAC-12, Paper No. 20091, Honolulu, USA, 2008.
- [۲۲]- W. Han, J. S. Yokum and R.J. Pryputniewicz , " Parametric study of laser micro drilling process for MEMS fabrication ", Proc.2004 SEM International congress & Exposition , in press , 2004.
- [۲۳] B.C. Brian, R. A. Parker, R. Graves, C.B. Reed, Z. Xu, "Laser Drilling: Drilling with The Power of Light," Annual Report, Department of Energy Cooperative Agreement No. DE-FC26-00NT40917, September 2001.
- [25]- R.Parker , Z.Xu,C.Reed,R.Graves,B.Gahan,S.Batarsh and D.Plaines , " Drilling large diameter holes in rocks using multiple laser beams (504)", pp(1-6),2004.
- [26]- K.T.Voisey,S.S.Kudesia,W.S.O.Rodden,D.P.Hand,J.D.C.Jones and T.W.Clyne , " Melt ejection during laser drilling of metals ", Mat.Sci&Eng. Pp(1-28), 2002.

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
www.Reservoir.ir

- [۲۷]- K.T.Voisey,C.F.Cheng &T.W.Clyne," Quantification of melt ejection phenomena during laser drilling ",
Mat.res.soc.symp.vol.617,pp(1-7),2000.
- [۲۸] Ramona M. Graves, Samih Batarseh, Richard A. Parker and Brian C. Gahan, "Temperatures Induced by High Power Lasers: Effects on Reservoir Rock Strength and Mechanical Properties", paper SPE/ISRM 78154 presented at the 2002 SPE/ISRM Rock Mechanics Conference in Irving, Texas,October 20-23.
- [29] - Journal of Petroleum Science and Engineering 59 (2007). —A new technique for treatment of permeability damage due to asphaltene deposition using laser technology!. pp., 302–303.
- [30] - Brian C. Gahan & et al. —Improving Gas Well Drilling And Completion With High Energy Lasers!. Gas Technology Institute. pp., 1-7.
- [31]- K.A.Nowakowski," Laser beam interaction with materials for micro scale applications ",PhD.Thesis submitted to the faculty of the Worcester poly technique Institute-Mechanical engineering , 2005.
- [۳۲] A. Chamorovskiy, A. V. Marakulin, S. Ranta, M. Tavast, J. Rautiainen, T. Leinonen, A. S. Kurkov, and O. G. Okhotnikov, "Femtosecond modelocked holmium fiber laser pumped by semiconductor disk laser," Opt. Lett., vol. 37, pp. 1448–1450, May 1, 2012.
- [۳۳] Pessier, R., Damschen, M.(2010) Hybrid Bits Offer Distinct Advantages in Selected Roller-Cone and PDC Bit Applications, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 2-4 February 2010, New Orleans, Louisiana, USA

