

کاربرد پلاسما در صنعت حفاری

سید علیرضا طباطبایی نژاد، رضا لشکری،^۱ دانشگاه صنعتی تبریز

چکیده

در تمام جهان گروه‌های محقق در تلاش برای اختراع ادوات و روش‌هایی جدید در جهت کاهش هزینه‌ها، بالا بردن سرعت حفاری و پایین آوردن مدت زمان حفاری هستند. در حدود ۲۰ تکنولوژی جدید بدون نیاز به تماس مته با سازند مانند: لیزر، جت آب، مشعل پلاسمایی، فرا صوتی، مایکروویو و اختراع شده است. اما تنها تعداد معدودی از این روش‌ها توانسته کارایی لازم را در آزمایشگاه به اثبات رسانند و بعضی در حال تست‌های نهایی جهت ورود به بازار است. یکی از کشفیات دهه‌های اخیر، کشف فاز چهارم ماده به نام پلاسما و استفاده از آن در صنایع مختلف است. در این مقاله به استفاده از تکنولوژی پلاسما در صنعت حفاری و تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌پردازیم و مزایا و مشکلات عملیاتی کاربرد آن را بررسی می‌کنیم.

اصلاحات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۷/۲۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۱۰/۲۸

واژگان کلیدی:

مشعل پلاسمایی^۱ غیرانتقالی، سیستم ثبت آبی داده^۲، کانال پلاسما^۳، شکاف حرارتی^۴، جداری درجا^۵

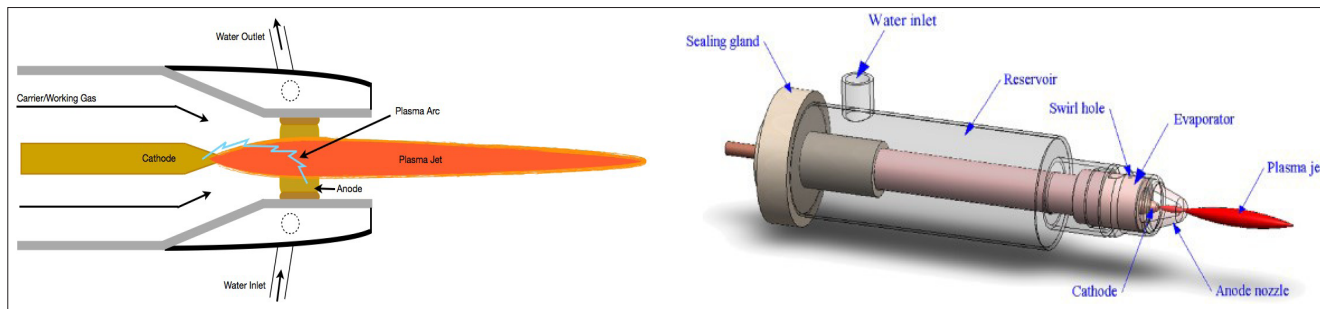
مقدمه

بالا در جهت حفاری سازند استفاده کرد. انتخاب روشی مناسب بدون نیاز به درگیر شدن فیزیکی مته با سازند و حفاری آن بدون نیاز به غلبه بر مقاومت‌های مکانیکی سنگ می‌تواند روشی مناسب برای حفاری اینگونه سازندها باشد. با استفاده از حرارت ایجاد شده از پلاسما، یکی از سه حالت خرد شدن، ذوب و یا بخار شدن سنگ رخ می‌دهد و می‌توان از این روش‌ها برای حفاری استفاده کرد.

۱- کاربرد پلاسما در حفاری

با توجه به نیاز فشار نزدیک به خلاء برای ایجاد پلاسمای سرد و فشار بالای چاه‌ها، تاکنون استفاده از پلاسمای سرد در حفاری غیرممکن بوده و استفاده از پلاسمای گرم و مشعل پلاسمایی روشی مناسب برای حفاری است. در مشعل پلاسمایی (انتقالی و غیرانتقالی)، پلاسما با یونیزه کردن گاز با سرعت بالا (m/sec) در ۸۰۰۰-۲۰۰۰ که از میان دو الکتروود عبور می‌کند، ایجاد می‌شود. در مشعل پلاسمایی غیرانتقالی، الکتروودها در درون بدنه دستگاه قرار

پلاسما فاز چهارم ماده و برگرفته از فاز گاز است که با دادن انرژی، اتم‌های آن یونیزه شده و متشکل از الکترون، یون و اتم‌های خنثی در حال حرکت است که با یکدیگر برخورد کرده و برخوردهایی کشسان یا غیرکشسان را پدید می‌آورد [۱]. پلاسما به دو صورت پلاسمای گرم و پلاسمای سرد تولید می‌شود. پلاسمای گرم در فشار بالا و با دادن انرژی به گاز با جریان AC و یا DC ایجاد شده و می‌تواند به دمایی در حدود ۱۰۰,۰۰۰ درجه کلوین برسد. پلاسمای سرد در فشارهای نزدیک به خلاء تولید شده و دارای دمایی پایین است [۲]. با کشف پلاسما توسط Sir William Crookes در سال ۱۸۷۹ و استفاده از آن بصورت صنعتی در دهه‌های اخیر در جهت تولید لامپ‌های فلورسنت (General Electric Co, ۱۹۲۷)، تولید الماس (Werner Schmeltenmeier, ۱۹۵۳) و تلاش در جهت بکارگیری آن در صنایع نفت و گاز قوت گرفت [۳]. حفاری سنگ‌های سخت پروسه‌ای هزینه‌بر و زمان‌گیر است و در حفاری مکانیکی باید از طوق مته با وزن و مقاومت بسیار



۱ | مشعل پلاسمایی

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (r_lashkari@sut.ac.ir)

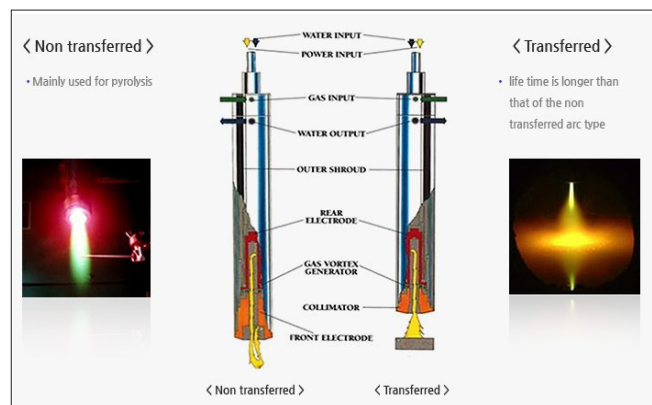
ساختی گراد) است. مزیت استفاده از مشعل پلاسمایی انتقالی، تشکیل قوس پلاسمایی بیرون از بدنه دستگاه و هدر نرفتن گرما توسط آب خنک کاری الکترودهای دستگاه و نیز مصرف کمتر الکترودها است. معمولاً از این روش در برشکاری صفحات و ایجاد پوشش حفاظتی بر روی آنها استفاده می‌شود. اما در حفاری سنگ‌های سخت بعلا پائین بودن توانایی هدایت الکتریکی سنگ، از مشعل پلاسمایی غیرانتقالی استفاده می‌شود [۴].

پلاسمای ولتاژ بین ۵۰۰V-۱۰ و جریان ۱۰۰۰A-۱۰۰ ایجاد می‌شود. بنابراین با توجه به میزان ولتاژ و آمپر ژنراتور دکل‌ها و تراک‌های شرکت‌های خدمات سرچاهی می‌توان انرژی لازم برای کارکرد دستگاه را تامین کرد و دستگاه بدون نیاز به دکل و بالوله مغزی^۷ و یا وایرلاین^۸ جهت حفاری به درون چاه فرستاده شود. در جدول ۱- اطلاعات یک ژنراتور کاترپیلا در دکل حفاری بیان شده است [۵,۶]. معمولاً جنس الکترودها از مس، تنگستن، گرافیت، نقره و مولیبدن و جنس گاز، اکسیژن، نیتروژن، آرگون، هلیوم و هوا است [۷]. گازهای دوامی مانند اکسیژن و نیتروژن می‌توانند میزان قابل توجهی از انرژی را در زمان حرارت دیدن در خود ذخیره کنند، ولی با توجه به مصرف بالای الکترودها در گازهای دوامی، معمولاً از گازهای بی اثر مانند هلیوم و آرگون استفاده می‌شود [۵]. آقای Bouche در سال ۱۹۶۴ موفق به ساخت مشعل پلاسمایی و آزمایش آن برای ذوب و خرد کردن سنگ‌های مختلف شد. در این آزمایش پلاسمای بهترین عملکرد را در حفاری گرانیت داشت [۵]. امروزه تعداد کمی از شرکت‌ها بر روی ساخت مته پلاسمایی^۹ کار می‌کنند که یکی از موفق‌ترین آنها شرکت حفاری GA Drilling در کشور اسلواکی است [۸]. در حفاری با روش پلاسمای، دیگر خواص مکانیکی سنگ مدنظر قرار نگرفته، بلکه خصوصیات حرارتی مانند نقطه ذوب، نقطه جوش و بخار شدن و قدرت هدایت حرارتی سنگ تعیین کننده نرخ نفوذ در سنگ و ... است و با توجه به ذوب و یا بخار شدن خرده‌های حفاری در این روش، نمی‌توان از روش‌های

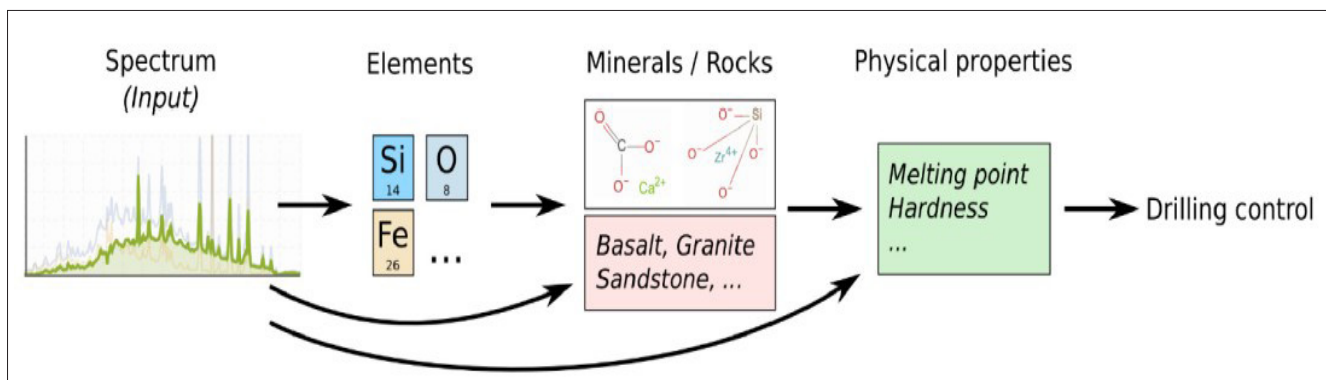
گرفته و قوس پلاسمای در درون دستگاه ایجاد می‌شود. اما در مشعل پلاسمایی انتقالی^۶، ماده هادی جریان الکتریکی که در بیرون از بدنه دستگاه قرار دارد، جایگزین یکی از الکترودهای درون بدنه مشعل پلاسمایی شده و باعث ایجاد قوس پلاسمایی در بیرون از دستگاه و با فاصله ای زیاد از آن می‌شود. یکی از مواردی که باعث پائین آمدن راندمان پلاسمای می‌شود، نیاز به آب برای خنک کاری الکترودها است. زیرا دمای پلاسمای ایجاد شده فراتر از دمای ذوب الکترودها (۳۶۰۰-۳۰۰۰ درجه

۱ | اطلاعات ژنراتور کاترپیلا مدل YZ08 [6]

مدل	YZ08
نرخ تولید نیرو	۸۰۰ KW
نرخ تولید ولتاژ	۷۵۰ V
نرخ جریان	۱۱۵۰ A
بیشترین میزان جریان	۱۶۰۰ A
بازدهی	۹۲,۷ %



۲ | مشعل پلاسمایی انتقالی (سمت راست) و مشعل پلاسمایی غیر انتقالی (سمت چپ)



۳ | طیف‌نگاری امواج دریافتی از سنگ [۹]

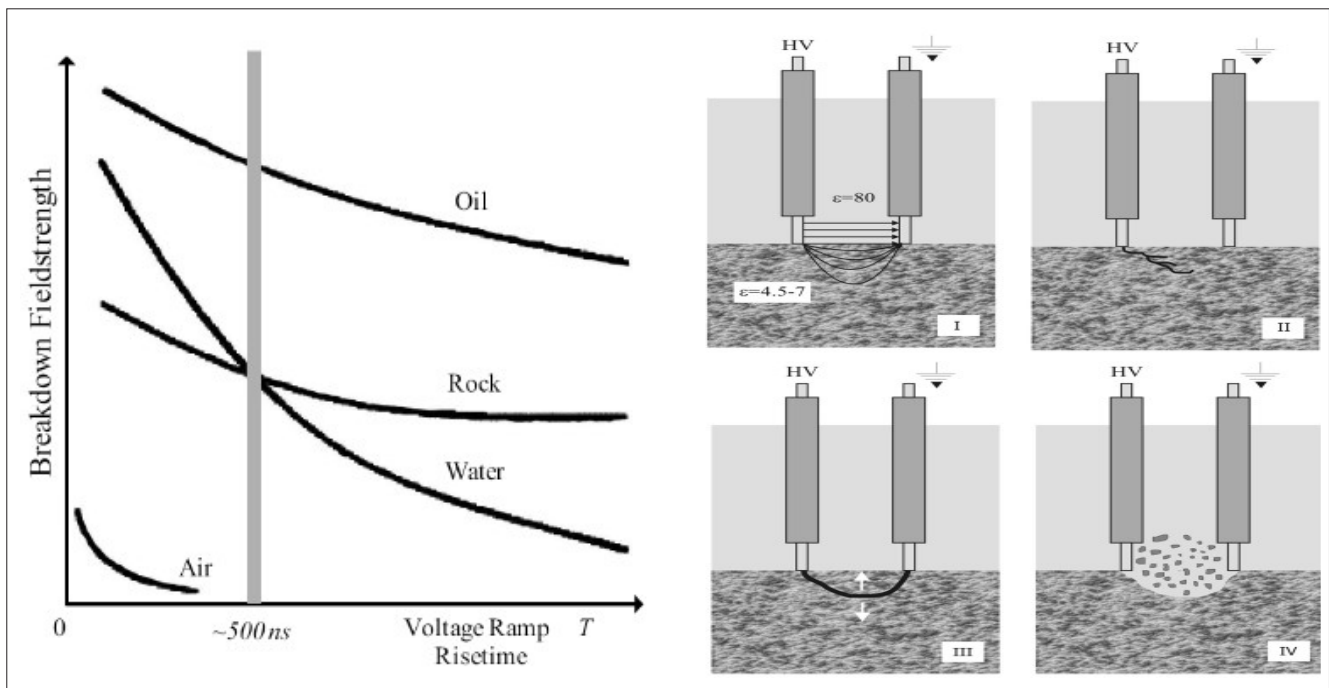
الکتریکی سیال پیرامون سنگ است [۱۰]. تعداد پالس‌های دستگاه حفاری با کانال پلاسما، بین ۵ تا ۲۰ پالس در ثانیه بوده و در زمان شروع کانال پلاسما و ایجاد جرقه، ولتاژ بسیار بالایی مورد نیاز است. اما پس از ایجاد جرقه، مقاومت پلاسما به شدت کاهش یافته و به زیر یک اهم می‌رسد و دیگر به آمپر بالا در زمان شروع و ولتاژ بالا پس از ایجاد شدن قوس پلاسمایی نیازی نیست. در تحقیقی دیگر که توسط J. Biela, C. Marxgut, D. Bortis & J. W. Kolar (۲۰۰۹) انجام شد، استفاده از مدولاتور برای بهینه‌سازی انرژی مصرفی دستگاه بررسی شد. [۱۱]

حفر چاه‌های زمین گرمایی^{۱۲} با عمق‌های بالاتر از ۱۰ کیلومتر و دما و فشار بالای ۳۷۴ درجه سانتیگراد و ۱۰۰۰ بار، توسط تکنولوژی معمول حفاری دارای محدودیت و هزینه بسیار بالایی است. روشی نوین در سال ۲۰۰۹ توسط Kocis به نام تکنولوژی پلاسمای الکتریکی^{۱۳} جهت حفاری چاه‌های زمین گرمایی پیشنهاد شد که با استفاده از پدیده الکترو هیدرولیک^{۱۴} و ایجاد امواج شوک^{۱۵} سنگ را خرد کرده و با پمپاژ سیال حفاری، کنده‌ها را به سطح حمل می‌کرد. این روش آزمایشات خود را در آزمایشگاه و تست‌های محوطه‌ای به پایان رسانده و مجموعه شرکت‌های JIP (Joint Industry Project) در حال تکمیل این پروژه برای شروع حفاری چاه‌های زمین گرمایی است [۹].

بعلت داشتن حجم و وزن بالای تجهیزات حفاری معمول و تکیه بر نیروی

مرسوم نمونه‌گیری از کنده‌های برگشتی سرچاه برای تعیین جنس سنگ سازند استفاده کرد. سنگ‌ها در زمان حرارت دیدن، از خود طول موج‌هایی را ساطع می‌کنند. با دریافت پرتوهای ساطع شده از سنگ‌های حرارت دیده در چاه، ارسال آنها به سطح توسط فیبرهای نوری، تجزیه و تحلیل اطلاعات دریافتی و تعیین نوع سنگ توسط سیستم ثبت آنی داده، می‌توان متناسب با نوع سنگ، گرمای خروجی بهینه مشعل پلاسمایی را تنظیم کرد [۹].

در یک تحقیق انجام شده استفاده از کانال پلاسما برای ایجاد کنارگذر و چاه‌های چند شاخ‌ای^{۱۱} بررسی شد. حفاری در این روش بر اساس ایجاد پدیده شکست الکتریکی^{۱۱} در سیال حفاری پیرامون سنگ و ایجاد پالس‌های فشاری صوتی و در ادامه شکست سطح سنگ و دوم بعلت بالاتر بودن مقدار بحرانی شکست الکتریکی آب در مقابل مقدار بحرانی شکست الکتریکی سنگ برای پالس‌های الکتریکی زیر نیم میکروثانیه، شکست الکتریکی زودتر سنگ نسبت به آب و عبور کانال پلاسما از درون سنگ و خرد کردن سنگ است. میزان حرارت پلاسمای ایجاد شده در شکست الکتریکی سنگ باعث انبساط شدید مسیر عبور پلاسما و ایجاد پالس‌های فشاری می‌شود. این فشار زمانی که از مقدار استحکام سنگ بالاتر باشد، باعث شکاف و تکه تکه شدن سنگ می‌شود. در تخریب سنگ بعلت ایجاد کانال پلاسما، پدیده شکست الکتریکی سنگ بسیار قوی‌تر و موثرتر از پالس‌های صوتی ایجاد شده در شکست

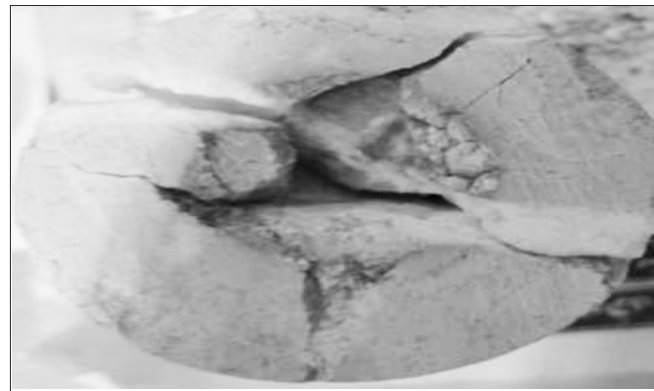


شکل ۴ | ولتاژ شکست هوا، آب، سنگ و نفت تابعی از افزایش مدت زمان ولتاژ پالس (سمت راست) تشکیل کانال پلاسما در سنگ در مجاورت آب (سمت چپ) [۱۲]

یکی از معایب استفاده از مشعل پلاسمایی، انبساط حرارتی سنگ و ایجاد شکاف‌های حرارتی در دیواره چاه است که موجب کاهش مقاومت دیواره چاه به مقدار قابل توجهی می‌شود. در آزمایش Mohsen Bazargan, August Gudmundsson (۲۰۱۵) مشخص شد که در معرض حرارت قرار دادن گرانیت و سنگ آهک به مدت ۷ تا ۱۰ ثانیه، مدول الاستیسیته گرانیت و سنگ آهک را بسیار کاهش داده و مقاومت آنها را به مقدار قابل توجهی پایین می‌آورد که در چاه واقعی می‌تواند، شکاف‌های گرمایی موثری را ایجاد کند و انبساط حرارتی باعث انتشار این شکاف‌ها شود. به علاوه استرس‌های موثر در لایه‌های پرفشار می‌تواند باعث تغییر شکل و خم شدن چاه شود. یکی از راهکارها، استفاده از سیال حفاری فوم است. مهمترین مزیت استفاده از فوم پایین بودن هدایت حرارتی آن است. زیرا هدایت حرارت بالای تولید شده به دیواره چاه می‌تواند باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای از جمله ذوب شدن سنگ‌های اطراف دیواره چاه و کاهش تراوایی و آسیب‌سازندی شود. همچنین ناحیه انتقال گرما^{۱۶}، مزیت‌هایی مانند کاهش مقاومت سنگ و آسیب‌سازندی با ایجاد شکاف را دارد. بنابراین کنترل و هدایت میزان حرارت توسط مشعل پلاسمایی به سنگ برای تجزیه آن و استفاده بهینه از فوم می‌تواند نرخ نفوذ حفاری را بالا برد [۱۴].

در تحقیق Paul Rivenberg (۲۰۱۶) استفاده از دستگاه^{۱۷} جاپروترون به عنوان دستگاه تولید کننده پلاسمای با استفاده از فرکانس رادیویی^{۱۸} برای

گرایش برای گردش سیال حفاری، امکان استفاده از روش‌ها معمول حفاری در سیارات دیگر وجود ندارد. بنابراین از سال ۲۰۱۴ مرکز تحقیقات ناسا با همکاری شرکت Zaptec پروژه‌ای را برای بدست آوردن تکنولوژی حفاری پلاسمای آغاز کرد و هم اکنون در حال انجام آزمایشات اولیه است. از خصوصیات این تکنولوژی، ایجاد پلاسمای با حرارت بالا با استفاده از دستگاهی با وزن ۲۵۰ کیلوگرم و با مصرف انرژی یک کیلو وات در اوج مصرف و استفاده از گاز دی اکسید کربن فشرده به عنوان سیال حفاری برای حفاری تا عمق ۵۰ تا ۱۰۰ متری زمین است [۱۳].



۵ ایجاد شکاف حرارتی در گرانیت بعد از حرارت با قوس پلاسمای به مدت ۹ ثانیه [۱۴]

۲ مزایا و معایب استفاده از مشعل پلاسمایی در حفاری چاه

مزایا	مشکلات عملیاتی
<ul style="list-style-type: none"> • بالا بودن راندمان حفاری (۷۰٪) • عدم نیاز به تعویض طوق مته • کم شدن تعداد تریپ‌ها • بالا بودن نرخ نفوذ حفاری • کاهش مدت زمان حفاری • کم شدن اصطکاک و خستگی رشته حفاری • حفاری بدون تماس مته با سازند • کم شدن هزینه کلی حفاری • کم شدن آلودگی‌های زیست محیطی • توانایی در حفاری اعماق بیشتر • عدم نیاز به چرخش رشته حفاری 	<ul style="list-style-type: none"> • عدم توانایی در ایجاد حفره‌های بزرگ • احتمال ایجاد انفجار در سازندهای حاوی هیدروکربن • مصرف بالای الکترود • پایین آمدن راندمان حفاری بعلت بالاتر بودن دمای پلاسمای ایجاد شده از نقطه ذوب الکترودها و نیاز به خنک کردن آنها • پایین آمدن استحکام دیواره چاه بعلت ایجاد استرس‌های حرارتی و ایجاد شکاف و یا تغییر شکل چاه • عدم توانایی در استفاده از مواد کنترل هرزروی به علت تجزیه حرارتی این مواد در سر مته • احتمال ایجاد هرزروی کامل در زون‌های پرفشار به علت ایجاد شکاف‌های حرارتی • محدودیت در تأمین آب اغلب دکل‌های خشکی در صورت اجبار به ادامه حفاری با هرزروی کامل (نرخ معمول آبرسانی ۱۵۰-۱۲۰ بشکه در ساعت است) • احتمال نیاز به سیمانکاری از سطح به دالیز، به علت احتمال هرزروی سیمان از شکاف‌های دیواره چاه در عملیات سیمانکاری معمول • محدودیت در استفاده از گل‌های پایه روغنی بعلت خطر انفجار، بخار شدن و هزینه بالای آن در زمان هرزروی • عدم توانایی در کنترل خصوصیات گل بعلت تجزیه حرارتی افزاینده‌های گل • احتمال ایجاد حفره در چاه و یا ذوب و بخار شدن ناقص سنگ در سازند تشکیل شده از سنگ‌های مختلف • ایجاد آسیب‌سازندی در محدوده گرما دیده اطراف دیواره چاه به علت ذوب مینرال‌های سنگ • عدم توانایی در استفاده از پلاسمای سرد در چاه بعلت نیاز به فشار بسیار پایین و نزدیک به خلاء در چاه • محدودیت در استفاده از وایرلاین و لوله مغزی در حفاری به علت استحکام پایین دیواره چاه و احتمال گیر و گذاشتن مانده • عدم توانایی در تفسیر خرده‌های برگشتی به صورت مرسوم، به علت ذوب و بخار شدن آنها

در حفاری چاه‌های واقعی، مشکلات عملیاتی بسیاری وجود دارد که باید حل شود. در جدول-۲ مزایای استفاده از این روش و مشکلات عملیاتی موجود در استفاده از مشعل پلاسمایی بیان شده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به مزایا و مشکلات عملیاتی کاربرد پلاسما در صنعت حفاری و تحقیقات و کارهای عملیاتی انجام شده در استفاده از پلاسما در بخش‌های دیگر صنایع نفت و گاز و نتایج موثر در این بخش‌ها، به نظر می‌رسد این تکنولوژی تنها جهت انجام خدمات سرچاهی مانند: انجام مشبک کاری، آسیب کردن رشته جداره، تغییر ترشوندگی، ازدیاد برداشت و ... کاربرد داشته و در حفاری چاه‌های عمیق و با تنوع لیتولوژی سازندی، با مشکلات بسیاری روبرو است. اما حفاری چاه‌هایی با سیال حفاری هوا، فوم و آب که هرزروی کامل در آنها مشکل ساز نبوده و مصرف مواد کنترل کننده خصوصیات گل و یا کنترل کننده هرزروی بسیار پایین بوده و دارای استحکام بالایی دیواره چاه هستند، می‌توانند گزینه مناسبی برای استفاده از روش حفاری پلاسما باشد. ■

ذوب سنگ (بازالت و گرانیت) و حفاری چاه بررسی شد تا بتوان به وسیله سنگ‌های ذوب شده در ته چاه، دیواره چاه را عایق‌بندی و با ایجاد فشار بالا در اثر گرم شدن سیال حفاری، از ریزش چاه جلوگیری کرد. از مزایای این دستگاه، توانایی در هدایت حرارت ایجاد شده و ایجاد چاه‌هایی بیضوی شکل با توجه به استرس‌های موجود در دیواره چاه و بالا بردن استحکام چاه است [۱۵].

هم‌اکنون تیم‌های تحقیقاتی در حال بررسی ایجاد جداری درجا در حین عملیات حفاری بوسیله اضافه کردن مواد تولیدکننده لایه مقاوم بر روی دیواره چاه، (مانند رسوب دادن پودر آهن بر روی دیواره چاه) برای پایدارسازی آن در حفاری سازندهای ناپایدار هستند و امیدوارند بتوان به توانایی ساخت دیواره‌ای با مقاومت رشته جداره در حین عملیات حفاری دست یافت [۱۶].

۲- ارائه و تحلیل نتایج

استفاده از روش حفاری پلاسما با تمام مزایای آن، در سال‌های گذشته تنها در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده و برای استفاده از آن

پانویس‌ها

- | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1.Non-Transferred Plasma Torch | 10.Side Track & Multilateral Wells |
| 2.Real Time Data Acquisition (RTDA) | 11.Electrical Breakdown |
| 3.Plasma Channel | 12.Geothermal Wells |
| 4. Thermal Fractures | 13.Electric Plasma Technology |
| 5.Insitu Casing | 14.Electrohydraulic Phenomenon |
| 6.Transferred Plasma Torch | 15.Shock Waves |
| 7.Coiled Tubing | 16.Heat Invaded Zone |
| 8.Wire line | 17.Gyrotron |
| 9.Plasma Bit | 18.Radio Frequency RF |

منابع

- | | |
|--|---|
| [1] Chiow san wong, rattachat mongkolnavin Elements Of Plasma Technology book , springer | J.W.Mackersie and S.J.Macgregor, university of strathclyde, Glasgcow, UK |
| [2] Claire Tendero, et al., Atmospheric pressure plasmas: A review, Spectrochimica Acta PartB, 61, 2006, 230- | [11] Solid state modulator for plasma channel drilling, J.Biela, C.Marxgut, D.Bortis & J.W.Kolar,power electronic system laboratory, ETH Zurich, Transactions on dielectrics and electrical insulation, Vol 16, NO 4, August 2009 |
| [3] Plasma technology Process Diversity + Sustainability, federal ministry of education and research germany, november 2001 | [12] Plasma Channel Miniature Hole Drilling Technology, I.V.Timoshkin, J.W.Mackersie and S.J.Macgregor, IEEE Transactions on plasma science, vol 32 No 5, october 2004 |
| [4] Arc Discharge,plasma torch (different approaches) contribution of M.Guivan to Teregeo intermediate report | [13] A new plasma drilling technology with applications for moon,asteroid and mars exploration and ISRU, B.W.Johansen,P.lee,Zaptec INC, NASA Ames research centrt, Lunar and planetary science conference,2014 |
| [5] Novel Drilling Techniques by Dr.william c.Maurer | [14] Wellbore instability during plasma torch drilling in geothermal reservoirs, ARMA 150214-, Mohsen Bazargan, Agust Gudmundsson, 2015 |
| [6] NDCO rig user manual, book 5, power supply,motor and well electricity system,YZ08 DC Motor | [15] Paul Rivenberg, Plasma Science and fusion center, Rock, drill bit, microwave: a new path through the earths crust, April 12,2016 |
| [7] Gomez, E.; Rani, D.A.; Cheeseman, C.R.; Deegan, D.; Wise, M.; Boccaccini, A.R. (2009). "Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review". Journal of Hazardous Materials. 161 (2-3) | [16] Igor kocis et al., Utilization of electrical plasma for hard rock drilling and casing milling, SPE/IADC, 2015 |
| [8] GA Drilling, Altering future of upstream & renewable energy | |
| [9] Utilization of electrical plasma for hard rock drilling and casing milling,SPE/IADC-173016-MS Igor kocis,tomas kristofic,malus gajdos,gabriel horvath and slavomir jankovic,GA Drilling AS | |
| [10] Plasma channel microhole drilling technology, I.V.Timoshkin, | |