



فناوری لایه‌شکافی اسیدی، روشی نوین جهت انگیزش و بهبود تولید از مخازن کربناته

سید مرتضی میرعباسی^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر
سید علی حسینی^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت دانشگاه صنعتی شریف
احسان خامه‌چی^۳ استادیار دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مقدمه

با توجه به افزایش قیمت انرژی در سال‌های اخیر، متولیان صنایع نفت و گاز در فکر یافتن روش‌های جدیدتر و با بازدهی بیشتر، جهت تولید هیدروکربور از مخازن هستند. روش‌های تحریک چاه به منظور بهبود در میزان تولید و سرعت بخشیدن به تولید نفت و گاز میادین مختلف به کار می‌روند. در میان این روش‌ها، لایه‌شکافی با اسید و لایه‌شکافی پروپانتی به عنوان دو گزینه برتر در تولید از مخازن عمیق و کم تراوا پیشنهاد می‌شوند. روش انگیزش، متناسب با ویژگی‌های خاص هر سازند انتخاب می‌شود؛ از این رو در سازندهای ماسه‌سنگی از عملیات لایه‌شکافی پروپانتی^۴ و در سازندهای کربناته اغلب از عملیات لایه‌شکافی اسیدی^۵ استفاده می‌شود.

از آنجایی که بیش از ۸۵ درصد مخازن هیدروکربنی کشورمان از نوع کربناته بوده و اکثر آنها با معضل افت فشار مواجهند، استفاده از روش لایه‌شکافی با اسید در آینده‌ای بسیار نزدیک، ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر به دلیل لزوم حضور کشور در بازارهای بین‌المللی نفت و هم‌چنین بازدهی سریع‌تر روش‌های چاه‌محور در بهبود بهره‌وری، این روش‌ها بیشتر مورد توجه قرار خواهند گرفت. از این رو انجام تحقیقات علمی در مورد روش‌های لایه‌شکافی، به خصوص لایه‌شکافی با اسید بسیار ضروری است.

۱- لایه‌شکافی، روشی نوین در بهبود عملکرد چاه پیچیدگی عملیات لایه‌شکافی در ماهیت

چند علمی^۶ بودن آن است، چرا که طراحی مناسب این عملیات، نیازمند درگیر شدن گروه‌های مختلف مهندسی است. علمی هم‌چون مکانیک سنگ (کنترل هندسه شکاف)، مکانیک سیالات (کنترل جریان سیال و جابه‌جایی اسید یا پروپانت)، مهندسی شیمی (کنترل عملکرد مواد به کار رفته و واکنش اسید با کانی‌ها) و حتی بررسی مسائل زیست‌محیطی در عملیات لایه‌شکافی نقش مهمی را ایفا می‌کنند [۱].

لایه‌شکافی، تزریق یک سیال خاص به درون سازند است. با افزایش نرخ تزریق یا ویسکوزیته سیال، فشار نیز افزایش می‌یابد. اگر میزان تزریق به طور پیوسته افزایش یابد، تنش در نقطه‌ای از سازند بزرگتر از حداکثر تنش قابل تحمل سنگ خواهد شد که این موضوع منجر به شکست سنگ می‌شود.

با هرزروی سیال، فشار درون شکاف و در نتیجه پهنای شکاف نیز کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از کاهش پهنای سیال هرزرفته جایگزین شود. پمپ کردن سیال با همان نرخ هرزروی باعث ثابت ماندن هندسه شکاف می‌شود. به منظور افزایش حجم شکاف، سیال باید سریع‌تر از نرخ هرزروی به درون شکاف پمپ شود [۲].

در عملیات لایه‌شکافی مخازن کم تراوا بر روی نیم طول شکاف (X_p) تأکید می‌شود؛ اما در مخازن با تراوایی بالا قابلیت هدایت شکاف ($k_p w$) مهم‌تر است. پارتس^۷ دو پارامتر X_p و $k_p w$ را در قالب مفهوم قابلیت هدایت بدون بعد شکاف^۸ و به صورت زیر بیان کرده است.

$$C_{FD} = \frac{K_f w}{K X_f} \quad (1)$$

مفهوم C_{FD} ، نسبت بین توانایی شکاف برای انتقال جریان به توانایی سازند برای جریان دادن سیال به شکاف است. به طور کلی این دو ویژگی تولید، باید با یکدیگر متعادل و هم‌تراز باشند [۱].

۲- انواع عملیات لایه‌شکافی

۱-۲- لایه‌شکافی پروپانتی

در این روش پس از انجام بررسی‌های ضروری بر روی سازند مورد نظر، ابتدا با اعمال فشار مناسب، سیالی با ویسکوزیته کم جهت ایجاد شکاف و گسترش آن به داخل چاه پمپاژ می‌شود. پس از تزریق این سیال، سیال اصلی که ویسکوزیته آن به مراتب از ویسکوزیته سیال پیشین بیشتر است به همراه پروپانت به داخل چاه تزریق می‌شود. سیال اصلی باعث افزایش پهنای شکاف و گسترش آن می‌شود. علاوه بر این، پروپانت موجود در آن از بسته شدن شکاف در اثر فشار لایه‌های فوقانی و جانبی جلوگیری می‌کند. پس از تزریق تمام سیالات، ماده رقیق‌کننده موجود در سیال اصلی باعث کاهش ویسکوزیته و خروج آن می‌شود. بدین ترتیب کانالی با قابلیت هدایت بالا جهت جریان نفت باقی می‌ماند [۳].

به طور معمول از این روش در سازندهای با پلاستیسیته بالا، مانند ماسه‌سنگ‌ها استفاده می‌شود. برای موفقیت فرآیند شکافت هیدرولیکی پارامترهایی نظیر وضعیت میدان‌های تنشی منطقه، نوع سیال، پروپانت، نوع دانه‌بندی و غلظت آن، فشار و میزان نرخ تزریق از موارد

کلیدی هستند.

۲-۲- لایه شکافی با اسید

اصول کلی این روش همانند لایه شکافی پروپانتی است. تفاوت اصلی این روش ها در سیال مورد استفاده و همچنین نوع سازند است. سازندهایی مانند سنگ آهک، دولومیت و سنگ گچ (سنگ آهک نرم و با تخلخل بیشتر) با اسید واکنش می دهند و آب، نمک های قابل حل در آب و دی اکسید کربن تولید می کنند. اسید ضمن تیزاب کاری دیواره شکاف ها، سنگ غیر قابل حل در آب را به نمک بسیار حلال و دی اکسید کربن تبدیل می کند. زمانی که پمپ کردن متوقف می شود، فشار به مقدار اولیه کاهش می یابد. اگر الگوی واکنش یکنواخت باشد، سطوح شکاف

به آرامی بسته شده و هیچ گونه قابلیت هدایتی باقی نخواهد ماند. تفاوت ترکیب کانی های سنگ و الگوهای نامنظم جریان، تیزاب کاری غیر یکنواخت را به وجود آورده که منجر به بازماندن برخی از بخش های حل شده می شوند. از این رو در لایه شکافی با اسید، قابلیت هدایت ناشی از حل کنندگی اسید و در لایه شکافی پروپانتی ناشی از پروپانت است [۴].

در برخی موارد به ویژه در سازندهای کربناته، می توان از هر دو عملیات شکافت هیدرولیکی و شکافت اسیدی استفاده کرد که هر کدام برای دستیابی به سطحی از بهبود تولید، دارای مزایا و معایب خاص خود هستند [۴].

عوامل لازم برای امکان انجام لایه شکافی پروپانتی در سازندهای کربناته عبارتند از:

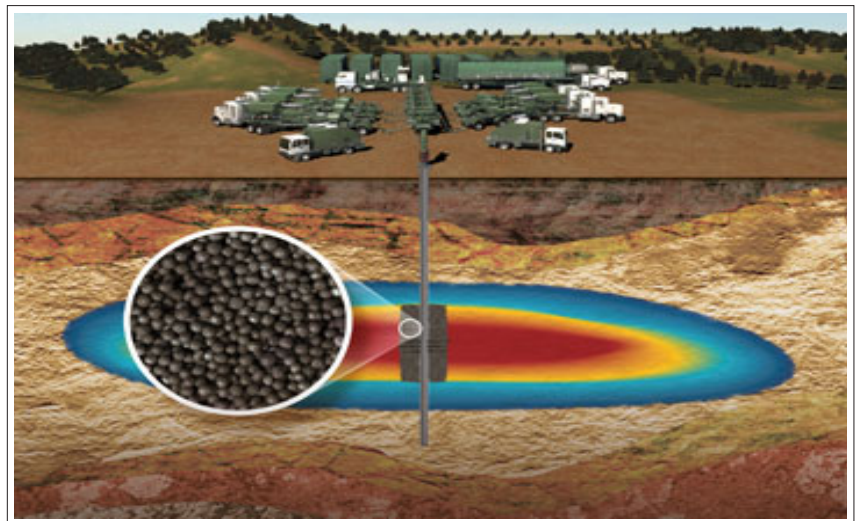
- * حلالیت کم (کمتر از ۶۵ تا ۷۵ درصد) سازند در اسید (HCl)؛
- * سازند نسبتاً همگن کربناته (مثل سنگ آهک خالص)
- * واکنش پذیری اندک سنگ سازند در اسید. مانند دولومیت های با دمای کم (کمتر از ۱۵۰°F)
- * نرم شدن سنگ پس از تماس با اسید و شکست تحت تأثیر فشار لایه های فوقانی
- * بالا بودن فشار انسداد سنگ تا حدی که موجب بسته شدن یا کاهش تراوایی شکاف اسیدی شود؛
- عوامل لازم برای امکان انجام لایه شکافی با اسید در سازندهای کربناته عبارتند از:
- * وجود شکاف های طبیعی در سازند که موجب عدم موفقیت لایه شکافی پروپانتی می شود.
- * سازندهای ناهمگن که دیواره شکاف در آنها به صورت غیر یکنواخت تیزاب کاری می شود.
- * چاه از نظر مکانیکی قابلیت پذیرش پروپانت را نداشته باشد [۶].

۳- روش های انجام عملیات لایه شکافی با اسید

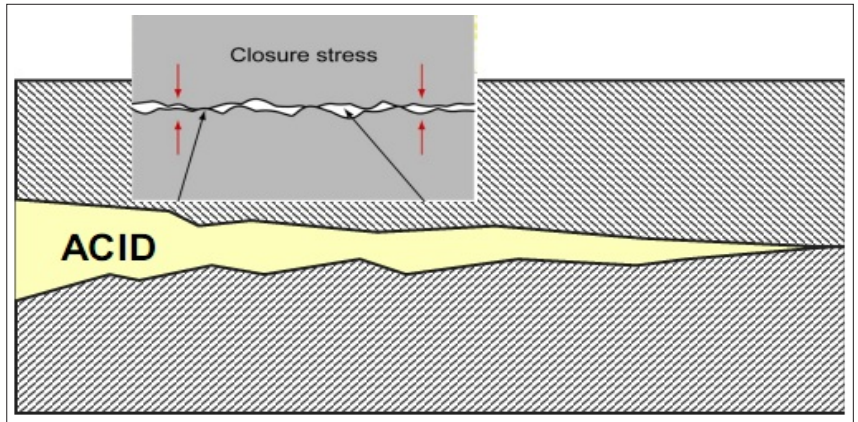
چند روش پایه و کلی برای دستیابی به شکافی با قابلیت هدایت بالا در سازندهای کربناته با استفاده از اسید وجود دارد که در زیر هر کدام از این روش ها مورد بررسی قرار می گیرد.

۳-۱- انگشتی شدن در فاز گرانیو^۱

در این روش از سیال پیشرو^۱ و اسید استفاده می شود. ابتدا سازند توسط یک ژل با گرانیوی بالا (معمولاً آبی که توسط Crosslinker ژله ای شده) به عنوان سیال پیشرو به طور هیدرولیکی شکافته می شود. سیال پیشرو برای ایجاد هندسه شکاف (طول، عرض و ارتفاع) و همچنین خنک کردن سازند به منظور کاهش نرخ واکنش اسید استفاده می شود. پس از این مرحله، اسیدی با گرانیوی کم (معمولاً HCl یا مخلوط آلی HCl) به درون شکاف پمپ می شود. فرض می شود اسید به دلیل تفاوت گرانیوی ها و در نتیجه تحرک پذیری، به صورت انگشتی در درون سیال پیشروی گرانیو حرکت می کند. رایج ترین اسید مورد استفاده، HCl ۱۵ درصد وزنی است. غلظت های بالاتر HCl مانند ۲۰



شکل ۱ | لایه شکافی پروپانتی [۳]



شکل ۲ | مکانیزم لایه شکافی با اسید [۵]



یا ۲۸ درصد، دارای مزیت گر انرژی بیشتر نسبت به اسید ۱۵ درصد، قبل و بعد از مصرف هستند. این موضوع هم چنین موجب کاهش میزان هرزروی می شود [۶].

۳-۲- اسیدکاری شکاف بسته^{۱۱} (CFA)

یکی از روش های افزایش تراوایی نهایی، تکنیک اسیدکاری شکاف بسته است. این روش شامل پمپ کردن مقدار کمتری اسید در مرحله ای جداگانه به درون شکاف های اسیدی بسته شده می باشد. فشار تزریق در این مرحله به طور معمول برابر با فشار لازم برای تزریق سیال در ماتریکس است. هدف از این روش، حصول اطمینان از متصل بودن شکاف ها به چاه است که شبیه به استفاده از پروپانت در آخرین مرحله لایه شکافی پروپانتی، برای حصول اطمینان از بازماندن شکاف می باشد [۶].

۴- دسته بندی سیالات در لایه شکافی با اسید

اسیدهای ویسکوز مورد استفاده در لایه شکافی با اسید را می توان به ۳ گروه تقسیم کرد:

* **اسیدهای ژله ای:** ترکیب های مختلف پلیمری و سایر مواد غلیظ کننده به منزله موادی که می توانند با اسید کلریدریک حالت ژله ای بدهند مورد استفاده قرار می گیرند. این مواد از جنبه های مختلف هم چون میزان غلیظ کنندگی، پایداری اسید و میزان واکنش پذیری اسید مورد بررسی قرار گرفته اند. به نظر می رسد پلیمر زانتان^{۱۲} گزینه مناسبی برای ژله ای کردن اسید باشد؛ چرا که هم از نظر بازدهی و میزان غلیظ کنندگی و هم از نظر پایداری (تادمای ۱۰۴ درجه سانتی گراد) شرایط خوبی را فراهم می کند. قدرت انحلال اسیدهای ژله ای برابر با اسیدهای معمولی بوده و نسبت به آنها هرزروی کمتری دارند، اما واکنش پذیری آنها نیز کمتر است [۷].

* **اسیدهای امولسیون:** دو نوع اسید امولسیون در عملیات لایه شکافی به کار می روند: امولسیون هایی با فاز خارجی اسید و امولسیون هایی با فاز خارجی روغن. محدودیت اصلی در استفاده از اسیدهای امولسیون با روغن عبارتند از: افت زیاد فشار اصطکاکی درون لوله مغزی، قیمت نسبتاً بالا، قدرت انحلال کمتر نسبت

به اسید هیدروکلریک معمولی (ژله ای) و ناپداری امولسیون. با استفاده از امولسیون های اسیدی می توان تا حد قابل قبولی افت فشار اصطکاکی را برطرف کرد [۷].

* **اسیدهای فومی:** حداقل کردن میزان تراوش اسید و کاهش میزان واکنش پذیری آن با تبدیل اسید به فوم پایدار محقق می شود. ضمن اینکه با به کار بردن این نوع اسید، تمیز کردن چاه پس از عملیات سریع تر انجام خواهد شد. یکی از فاکتورهای اساسی در هرزروی اسیدهای فومی دماست. افزایش دما، پایداری فوم را کاهش داده و در نتیجه منجر به افزایش ناگهانی هرزروی می شود. قدرت انحلال اسیدهای فومی در مقایسه با اسیدهای معمولی بسیار کمتر است؛ چرا که درصد حجمی اسید واقعی آنها پایین است (حدود ۲۰ درصد). به همین دلیل این نوع اسیدها تنها در سازندهایی کاربرد دارند که میزان کانی های قابل انحلال جهت رسیدن به هدایت مطلوب در شکاف سنگ کم باشد [۷].

۵- طراحی عملیات لایه شکافی با اسید

دو عامل اصلی کنترل کننده بازدهی عملیات لایه شکافی با اسید، طول مؤثر و قابلیت هدایت شکاف ایجاد شده هستند. طول مؤثر شکاف توسط عواملی نظیر ویژگی های هرزروی اسید، نرخ واکنش اسید و شدت جریان اسید در شکاف کنترل می شود. در نهایت، بیشترین عمق نفوذ اسید توسط هرزروی اسید و یا میزان مصرف آن محدود می شود. قابلیت هدایت شکاف نیز می تواند بر بازدهی عملیات تأثیر بگذارد. برای ایجاد قابلیت هدایت کافی، اسید باید با سطوح شکاف واکنش دهد. سطوح شکاف باید به صورت غیر یکنواخت حل شوند تا کانال های جریانی تراوایی را به گونه ای ایجاد کنند که پس از بسته شدن شکاف نیز این کانال ها حفظ شوند [۴].

در زمان طراحی عملیات شکافت اسیدی باید تمامی عوامل مؤثر بر موفقیت عملیات در نظر گرفته شوند. در چاه های با دمای متوسط و پایین، کنترل هرزروی اسید به عنوان مهم ترین عامل مطرح است. در چاه های با دمای بالا نیز اغلب عمق مؤثر نفوذ با مصرف سریع اسید محدود

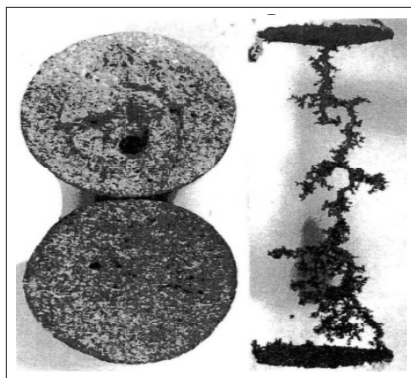
می شود و لذا باید اسیدهای بازدارنده^{۱۳} در نظر گرفته شوند [۴].

۱-۱- مواد و روش های کنترل هرزروی اسید

در حین انجام عملیات لایه شکافی با اسید، کنترل هرزروی سبب ایجاد مشکلاتی در سازندهای کربناته می شود که منحصر به سیالات واکنش پذیر است. افزودنی های کنترل هرزروی و عوامل ژله ای کننده که به طور معمول در سیالات خنثی استفاده می شوند، به ندرت در اسید پایدار مانده و به سرعت هیدرولیز می شوند. اسیدها به طور معمول نیازمند افزودنی های پایدار در برابر اسید^{۱۴} هستند. علاوه بر این، جریان اسید بر روی سطوح شکاف، دائماً سطوح را فرسایش می دهد و سیالات دیواره ساز^{۱۵} نمی توانند بر روی سطوح اندود مؤثری تشکیل دهند. مشکل بیچیده دیگر آن است که در طول عملیات، اسید به صورت انتخابی تمایل به بزرگتر کردن منافذ بزرگ و شکاف های موئین دارد که منجر به ایجاد سوراخ های کرمی و کانال هایی عمود بر سطوح شکاف ها می شود. این پدیده باعث هرزروی بیشتر اسید شده و در نتیجه، به عنوان عامل کنترل کننده ی رشد شکاف در سازندهای کربناته با دمای پایین تا متوسط در نظر گرفته می شود [۴].

در زیر چند روش کنترل هرزروی اسید شرح داده می شود؛

* **سیال پیشرو گرانو:** رایج ترین روش کنترل هرزروی اسید شامل استفاده از یک سیال پیشرو با ویسکوزیته بالا قبل از جریان اسید است. سیال پیشرو به منظور آماده سازی شکاف و تشکیل اندود



۳ | گسترش سوراخ کرمی ها در اثر انحلال سنگ در اسید به صورت ناهمگون

لزوم توجه و مطالعه بیشتر در این زمینه تأکید می شود.
 ۲- به دلیل واکنش غیرقابل پیش بینی اسید و سنگ، مکانیزم های حاکم بر عملیات لایه شکافی به وسیله اسید با مکانیزم حاکم بر لایه شکافی پروپانته متفاوت است. لذا به منظور شبیه سازی این عملیات برای میدانی خاص، حتماً باید از داده های مربوط به آزمایش های لایه شکافی و اسیدکاری صورت گرفته بر روی مغزه های میدان استفاده کرد.

۳- در فرآیند لایه شکافی با اسید مهم ترین پارامترها عبارتند از میزان هرزروی اسید، نرخ واکنش اسید و گسترش سوراخ های کرمی که در این مقاله راهکارهای مواجهه با هر کدام ارائه شد.

۴- طراحی بهینه سیستم های اسیدی برای یک میدان خاص به خواص مکانیک سنگی، خواص سیالات مخزن، امکانات عملیاتی موجود و نتایج آزمایش های بسیاری بستگی دارد. لذا قبل از شروع شبیه سازی و فاز اجرایی عملیات، نیاز به یک مجموعه کامل از داده های مرتبط احساس می شود.

۵- با توجه به اینکه عملیات لایه شکافی فرآیندی است که چندین علم را به طور هم زمان درگیر کرده و تغییر هر پارامتر، تأثیر قابل توجهی بر سایر پارامترها می گذارد، لذا توجه به پارامترهای مختلف طراحی و استفاده از روش های آماری، تصمیم گیری چندمتغیره و در نظر گرفتن تأثیر هم زمان پارامترها بر عملیات ضروری به نظر می رسد.

مسافت طی شده توسط اسید در طول شکاف و قبل از مصرف شدن اثر می گذارند. این متغیرها عبارتند از: حجم اسید استفاده شده، غلظت اسید، نرخ تزریق، دمای سازند، پهنای شکاف و ترکیب سازند [۴].

* سیال پیشرو گرانو: این سیال پیشرو با افزایش پهنای شکاف و خنک کاری سطوح، نرخ واکنش اسید را کاهش می دهد. هم چنین حضور سیالی دیگر در شکاف باعث می شود مقدار کمتری اسید در فضای درون شکاف باقی بماند [۵].
 * بازدارنده های شیمیایی: بازدارنده هایی همچون آلکیل سولفونات ها، آلکیل فسفونات ها یا آلکیل آمین ها با تشکیل فیلم های آب گریز^{۱۶} بر روی سطوح کربناته باعث کاهش سرعت واکنش اسید می شوند. برخی دیگر از بازدارنده ها، با پوشش سطوح کربناته ها با لایه نازکی از کف دی اکسید کربن، نرخ واکنش را کاهش می دهند [۵].

نتیجه گیری و پیشنهادها

۱- با توجه به افت فشار مخازن نفت و گاز کشور به دلیل دوره طولانی تولید از آنها و هم چنین ویژگی سنگ های مخزنی میداین کشورمان و از سوی دیگر با توجه به اهمیت زیاد نفت و گاز در برنامه ریزی های کلان کشور، نیاز به روش های افزایش و بهبود تولید از چاه ها و مخازن نفتی بیش از پیش احساس می شود. به همین دلیل فرآیند لایه شکافی، به ویژه لایه شکافی اسیدی به عنوان روشی نوین و بسیار مؤثر بر روند تولید چاه های نفت و گاز کشور پیشنهاد شده و بر

مقاوم در برابر نفوذ اسید به کار می رود. علاوه بر این، سیال پیشرو وظایف سودمند دیگری نیز بر عهده دارد. سیال پیشرو لوله های تزریق اسید را خنک کرده و در نتیجه هنگام عبور اسید مقدار خوردگی کمتر خواهد شد. این سیال هم چنین سبب خنک شدن شکاف، کاهش نرخ واکنش اسید و افزایش عمق نفوذ اسید تازه خواهد شد. سیال پیشرو پهنای شکاف را نیز افزایش می دهد که منجر به افزایش عمق نفوذ اسید می شود. همچنین میزان انگشتی شدن را بهبود می دهد و موجب کاهش سطح واکنشی اسید و بهبود قابلیت هدایت و طول شکاف می شود [۵].

* اسید کف زده: از دیگر روش های مؤثر کنترل هرزروی سیال، استفاده از اسید کف زده است. اگر قبل از اسید کف زده از سیال پیشرو گرانو استفاده شود، کنترل هرزروی سیال بهتر صورت خواهد گرفت [۵].

۲-۵ مواد و تکنیک های کنترل نرخ واکنش اسید

از دیگر فاکتورهای اصلی محدود کننده نفوذ اسید تازه به درون شکاف ها در سازندهای کربناته، مصرف اسید است. اسید در طول جابه جایی درون شکاف، مدام با سطوح شکاف واکنش داده و قدرتش کاهش می یابد. زمانی که غلظت اسید از یک حد بحرانی (معمولاً حدود ۱۰ درصد غلظت اولیه) کمتر شود، دیگر توانایی تیزاب کاری و ایجاد شکاف های هادی را ندارد. تعدادی از متغیرها بر

پانویس ها

¹ sm.mirabbasi@gmail.com

² hoseini.aut@gmail.com

³ khamehchi@aut.ac.ir

⁴ Proppant Fracturing (Hydraulic Fracturing)

⁵ Acid Fracturing

⁶ Multidisciplinary

⁷ Parts

⁸ Dimension Less Fracture Conductivity

⁹ Viscouse Fingering

¹⁰ Pad

¹¹ Closed Fracture Acidizing

¹² Xanthan

¹³ Retarded Acids

¹⁴ Acid-Stable Additives

¹⁵ Wall Building Fluids

¹⁶ Hydrophobic

منابع

[1] Michael. J. Economides, Kenneth G. Nolte. "Reservoir Stimulation", Third Edition, Published by: Wiley, 2000
 [2] Michael J. Economides, Tony Martin, "Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production", Published by: Energy Tribune Publishing Inc. 2007
 [3] Ching H. Yew, "Mechanics of Hydraulic fracturing", Gulf Publishing Company Houston Texas, 1997
 [4] Michael. J. Economides, Kenneth G. Nolte. "Reservoir

Stimulation", Second Edition, Published by Wiley, 1989
 [5] Tony Martin, "Acidizing Concepts and Design", Bj services, Acidizing Seminar.
 [6] Leonard J. Kalfayan, "Fracture Acidizing: History, Present State, and Future", 2007, SPE 106371
 [7] H. D. Fuhrberg, BEB Gewerkschaften Brigitta, "Well Completion and Stimulation", Federal Republic of Germany. SPE