

بررسی و مطالعات آزمایشگاهی تاثیر افزایه‌های دانه‌بندی شده در کاهش آسیب حفاری مخازن شکاف‌دار

پژوهش‌نفت

سال بیست و چهارم
شماره ۷۷

صفحه، ۶۶-۵۳ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۱/۲۳

محمد سلیمانی^{*}، سعیده رعیت دوست و مجید سجادیان

۱- مرکز مطالعات تکنولوژی حفاری، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی

نفت، پژوهشگاه صنعت نفت

soleymanim@ripi.ir

واژه‌های کلیدی: سیالات حفاری، آسیب سازند، مخازن شکاف‌دار، نمک‌های دانه‌بندی شده، افزایه‌های فیبری

چکیده

سیالات حفاری آسیب‌های جدی به شکاف‌های طبیعی لایه‌های تولیدی چاه‌های هیدروکربنی وارد کرده و موجب کاهش تولید می‌شوند. روش‌های مختلفی برای مقابله با این مشکلات وجود دارد به طوری که می‌توان با استفاده از الیاف‌های دانه‌بندی شده به عنوان افزودنی در سیالات حفاری، عمق نفوذ و گستره آسیب دیدگی سازند را کاهش داد. یکی از این روش‌ها استفاده از افزودنی‌های مختلفی است که بتواند عمق آسیب سازند ناشی از ورود جامدات سیالات حفاری را کاهش دهد. به همین منظور از کربنات کلسیم دانه‌بندی شده و نوعی افزایه فیبری شکل محلول در اسید جهت کاهش آسیب دیدگی مخازن شکاف‌دار استفاده گردید که افزایه فیبری شکل در مقایسه با کربنات کلسیم عملکرد مطلوب از خود نشان داد. در این مقاله مکانیزم مسدودسازی شکاف‌ها ناشی از تأثیر دو نوع افزودنی کنترل هرزروی فیبری با طول بلند و باریک در کنار افزودنی با دانه‌بندی مناسب بررسی شده است. نتایج نشان دادند که مقدار صافاب در استفاده از ذرات فیبری به میزان ۹ml/5hr بوده و میزان بهبود تراوایی ۵۰٪ بوده است.

مقدمه

در اکثر مخازن هیدروکربنی، برداشت از سیستم شکاف‌های ناحیه تولیدی صورت می‌گیرد به طوری که این شکاف‌ها تراوایی مناسبی را برای جریان یافتن نفت و گاز به داخل حفره چاه حتی هنگامی که تراوایی سنگ خیلی کم باشد، فراهم می‌کنند. در بسیاری از موارد مشاهده شده که میزان بهره‌برداری به میزان قابل توجهی در عملیات حفاری در لایه‌های تولیدی با گل پایه آبی یا روغنی، حتی در شرایطی که حفاری فرا تعادلی انجام شده، کاهش یافته است. مواد کنترل کننده هرزروی گل حفاری به منظور اتصال عرضی به سطح شکاف و حفرات و همچنین جلوگیری از گسترش شکاف که ممکن است حین حفاری پدید آید، استفاده می‌شود. این راهبرد منجر به توسعه گسترده مواد افزودنی مؤثر در برخی شرایط شده است. برخی قوانین تجربی

۱۲ اینچ و قطر ۱ اینچ را دارد. اندازه‌گیری فشار در چهار جهت نمونه مغزه امکان‌پذیر بوده و نرخ صافاب با مشاهده و سنجش مداوم حجم خروجی از انتهای مغزه، اندازه‌گیری می‌شود. تراوایی هر مقطع از نمونه سنگ قابل محاسبه است. نگره‌دارنده مغزه طوری طراحی شده که همزمان با گردش سیال در سراسر سطح شکاف، گل حفاری به درون شکاف وارد می‌شود. کاهش تراوایی ناشی از گردش گل، در بخش‌های مختلف مشاهده می‌گردد. پس از گردش گل، اندود صافی آن به طور فیزیکی در روی سطح شکاف بررسی شده و با تزریق آب نمک در جهت معکوس، تغییر تراوایی پیش و پس از گردش گل اندازه‌گیری می‌شود [۲].

روش انجام آزمایش

از ۱۸ نمونه مغزه ماسه سنگی به طول ۸ اینچ استفاده شده است. تراوایی نمونه‌های مغزه بدون شکاف نسبت به آب نمک برابر با ۲۱۲ ml/dr و میانگین تخلخل نمونه‌ها ۰.۲۳٪ است. شکاف‌هایی در طول محوره‌های سنگ مخزن ایجاد می‌شود. سطح شکاف ایجاد شده مدل مناسب و معقولی برای سطح شکاف تازه (بدون کانی) در سنگ است. این روش نسبت به برش با اره به واقعیت نزدیک‌تر است. البته لازم به ذکر است که برای سیستم شکاف طبیعی مناسب نمی‌باشد زیرا به شکاف‌های متناوب توجه نشده و نیز میزان ناهمواری و زبری سطوح ظاهراً تصادفی بوده است. در مواردی که دهانه شکاف بزرگ‌تر مورد نیاز است، از ماسه به ابعاد ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرون یا کربنات کلسیم با دانه‌بندی ۱ μ، بین دو سطوح شکاف، استفاده شده است. تراوایی شکاف پر شده با ماسه، از ۲۰ d تا ۴۰ d در نوسان می‌باشد در حالی که برای نوع پر شده با کربنات کلسیم تحت فشار ۵۰۰ psi این مقدار ۲۵۰ d بوده است. معادله ۱، برای محاسبه عرض شکاف (با فرض عبور جریان از یک شکاف) استفاده شده است [۲].

$$W = 2 \left[\frac{3}{2} \frac{A}{h_f} (k_f - k_m) \right]^{1/3} \quad (1)$$

که در رابطه بالا، W عرض شکاف، A سطح مقطع نمونه مغزه، h_f طول شکاف و k_f و k_m به ترتیب تراوایی شکاف و ماتریکس سنگ است. عرض شکاف برابر ۲ md اندازه‌گیری شده است. ترکیبات سیالات حفاری مورد

برای حل مشکل هرزروی گل به کار می‌روند که عبارتند از:
۱- استفاده از گل‌های پایه روغنی برای کم کردن مشکلات هرزروی از سیال پایه آبی
۲- توزیع اندازه، غلظت، شکل و شیوه آماده‌سازی افزودنی‌های سیال حفاری برای موفقیت بهینه‌سازی ضروری است.

با توجه به مطالعات و تجارب آزمایشگاهی و سرچاهی، گل‌های حفاری با اندود صافی مستحکم از نظر مکانیکی، در سراسر سطح یک شکاف منجر به کاهش مشکلات هرزروی می‌شود. شکاف‌های القایی، مکانیسم اصلی هرزروی است، لذا از مواد کنترل‌کننده که به طور مؤثر مانع رشد شکاف می‌شوند، استفاده می‌گردند. Loeppeke و همکاران، براساس مطالعاتی که بر روی اثرات ذرات متصل‌کننده (منفرد و دوگانه) روی سطح شکاف انجام داده‌اند، دریافته‌اند که در صورت عدم تطابق اندازه ذرات با عرض شکاف، اتصال پایدار تشکیل نمی‌شود. در صورتی که توزیع مناسب اندازه، توانایی زیادی در مسدود کردن دارد [۱]. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که ترکیبی از ذرات دانه‌بندی شده می‌تواند مناسب‌ترین مانع در ورودی شکاف فراهم آورد. به طوری که ترکیبی از ذرات فیبری (الیافی) در اندازه‌های مختلف برای جلوگیری از هدر رفت گل در سازندهای سست شدیداً تخلیه شده، پیشنهاد می‌شود. این مطالعه به بررسی مشکل هرزروی گل حفاری به داخل شکاف از دیدگاه مهندسی تولید (در مقابل مهندس حفار) پرداخته است. به این معنی که اگرچه در حفاری یک چاه کاهش هزینه‌های هرزروی سیال ضروری است، بهبود تراوایی در شبکه شکاف‌ها که مجرای برای جریان سیال به داخل حفره چاه محسوب می‌شود نیز اهمیت زیادی دارد. از این رو، کاهش آسیب شبکه شکاف طبیعی سازند از نقطه نظر تولید، ضروری بوده و کوتاهی در انجام آن ممکن است سبب کاهش غیر قابل جبران در تولید از چاه‌های تکمیلی باشد.

دستورالعمل و تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده شامل مغزه نگهدارنده نمونه استاندارد Hassler با برخی تغییرات مهم است که دستگاه مذکور قابلیت استفاده از نمونه مغزه به طول ۳ تا

نتوانسته تراوایی را بهبود بخشد. این نتیجه به روشنی نشان می‌دهد که سازندهای ترک‌دار، در صورت استفاده از سیال حفاری فاقد افزایه کنترل هرزروی، آسیب جدی دیده و تراوایی آسیب دیده با جریان برگشتی بازیابی نمی‌شود. رفتار صافاب سیال حفاری در زمان‌های نخستین آزمایش در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود. نمودار حجم صافاب تجمعی Q بر حسب ریشه دوم زمان به وضوح، تناوبی از جهش ناگهانی صافاب با تشکیل اندود صافی خارجی را نشان می‌دهد (بخش خط مستقیم نمودار).

با گذشت زمان همان‌طوری‌که در آزمایشات تحت شرایط صافاب دینامیکی امکان انتظار می‌رفت (خط مستقیم نمودار شکل ۱-الف) تشکیل اندود خارجی متوقف می‌شود. این اتفاق نشان‌دهنده حالت پایا به همراه با اندود صافی با ضخامت ثابت و نرخ افت صافی یکنواخت سیال است. نمودار شکل ۳ نشان می‌دهد که کیک گل پس از ۲ min به طور کامل تشکیل نشده است. زیرا سیال حفاری در خارج از مغزه جریان دارد و شکاف پر از گل بوده و آسیب تراوایی بسیار شدید است.

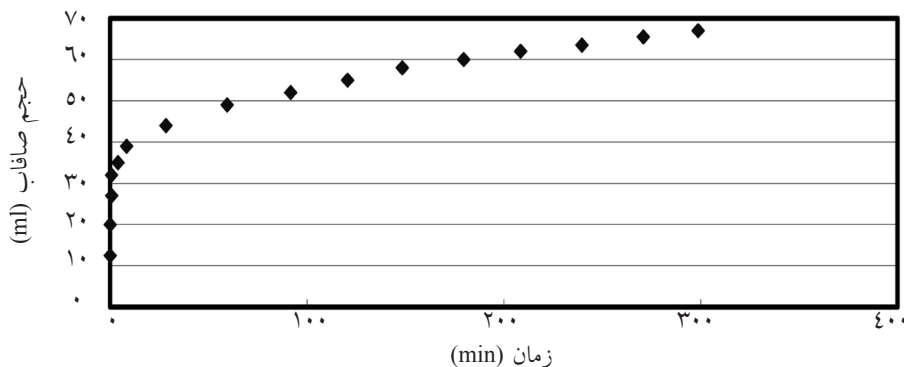
استفاده در این مطالعه شامل ۴۰ gr بنتونیت، ۱ لیتر آب، ۲۰ گرم کلرید سدیم، ۳ گرم کربوکسی متیل سلولوز و افزودنی‌های کنترل هرزروی است.

بحث و نتایج آزمایشگاهی

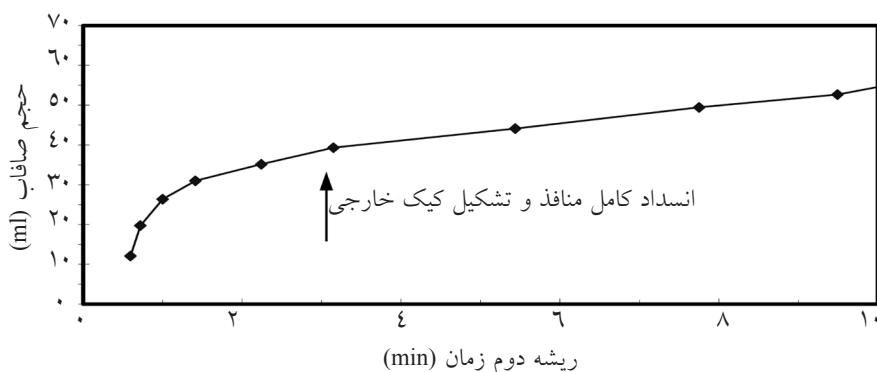
در شکل‌های ۱ و ۲، تغییرات تراوایی شکاف و افت صافی سیال حفاری (۴۰ gr بنتونیت، یک لیتر و ۰/۳٪ کربوکسی متیل سلولوز) بدون افزایه‌های کنترل هرزروی رسم شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود، تراوش و جهش ناگهانی صافاب در طول شکاف بسیار بالا است. مقدار ۳۰ ml گل حفاری در طول شکاف جریان یافته و در مجرای خروجی در انتهای مغزه در مدت یک دقیقه جمع‌آوری شده است. شکل ۲، نتایج تخریب تراوایی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود هر سه مقطع به میزان زیادی آسیب دیده و حتی در آخرین مقطع، تراوایی به ۲۰٪ نسبت به مقدار اولیه خود کاهش یافته است.

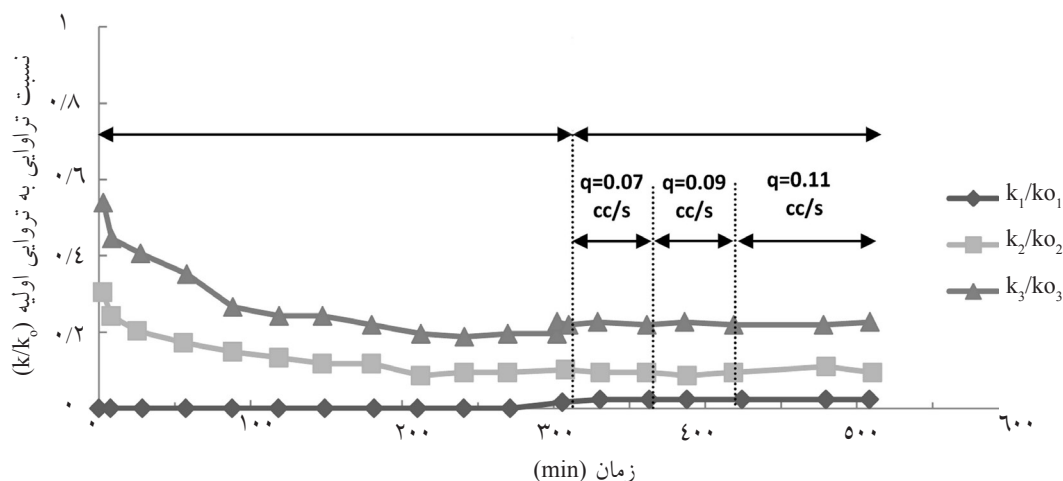
همان‌گونه که مشاهده می‌شود به دلیل ورود مواد جامد گل به درون شکاف، جریان برگشتی آب شور با نرخ بالا نیز



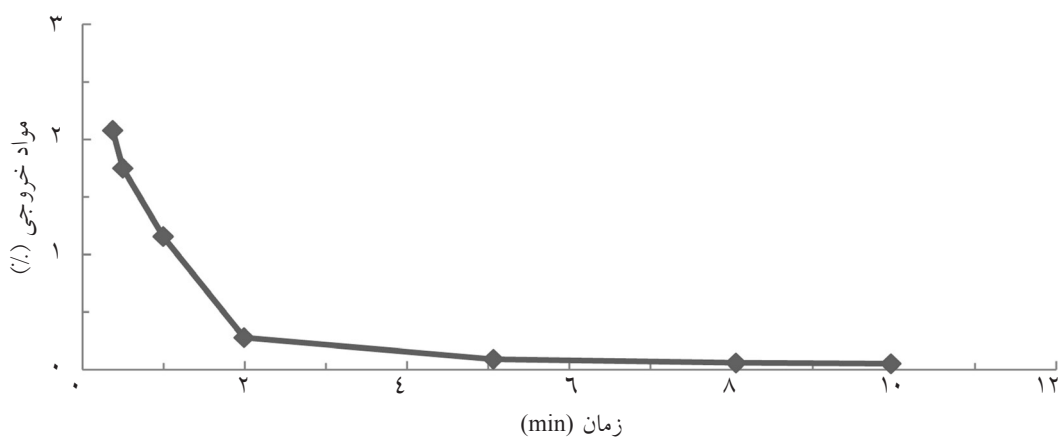
شکل ۱-الف- صافاب دینامیکی سیال بر حسب زمان (بدون افزودنی کنترل هرزروی، عرض شکاف $103 \mu\text{m}$)



شکل ۱-ب- رفتار صافاب سیال در زمانهای اولیه (نشانه انسداد و تشکیل کیک خارجی است)



شکل ۲- آسیب تراوایی شکاف بر حسب زمان (ترکیب گل مشابه شکل ۱ و عرض شکاف $103 \mu\text{m}$)



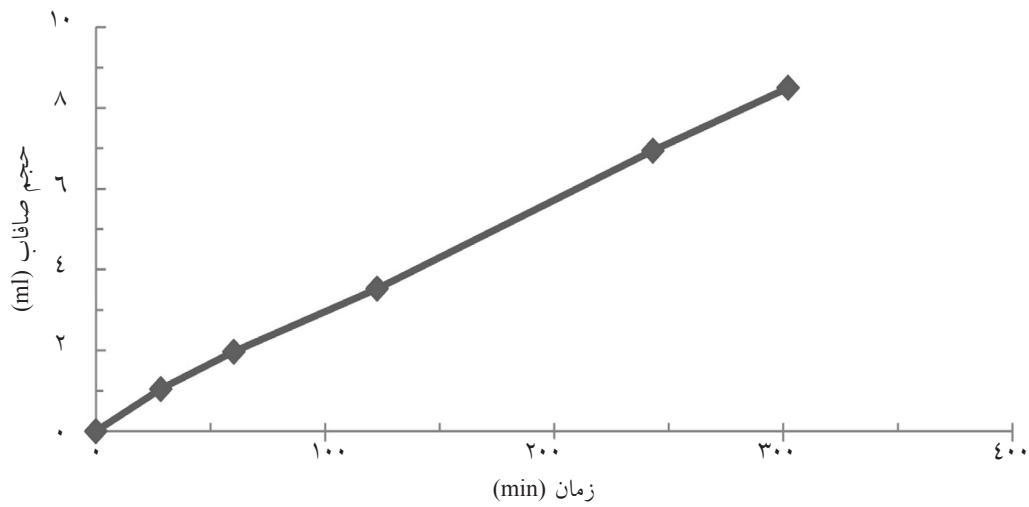
شکل ۳- نمودار نیم رخ غلظت ذرات در سیال خروجی (بدون استفاده از افزایش کنترل هرزروی و انسداد)

دو نمونه یکسان می‌باشد که ناشی از عمق نفوذ کم ذرات الیافی به درون شکاف سازند است. تصویری از شکاف پس از آزمایش به وضوح نشان می‌دهد که اندود صافی سیال درست در 2 mm ابتدایی درون شکاف تشکیل شده است. یعنی ذرات الیافی و فیبری در انسداد حفرات و جلوگیری از هجوم ذرات گل، نقش بارزی دارند. تصویر مواد الیافی با وضوح بالا ($80\times$) پراکنده در آب نشان می‌دهد که بسیاری از ذرات الیاف در کنار یکدیگر قرار گرفته و توده فیبری تشکیل می‌دهند. این توده‌ای تشکیل یافته از الیاف، متخلخل و شکل‌پذیر بوده و نسبت به مواد جامد هم اندازه روی دیواره چاه به آسانی رسوب می‌نماید. پس از تشکیل پلهایی از الیاف، ذرات خاک رس به آسانی روی آنها نشست و با ایجاد اندود صافی از هجوم و نفوذ ذرات سیال حفاری جلوگیری می‌کند.

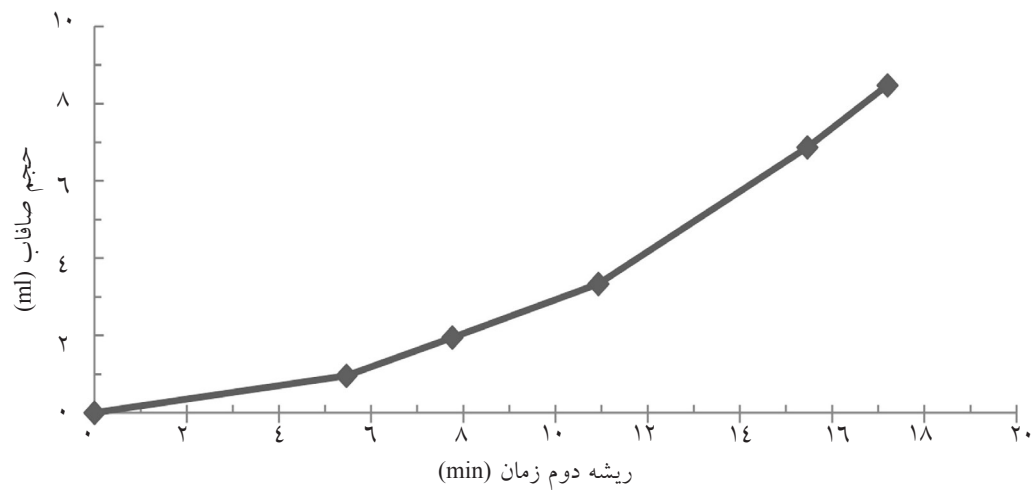
اثر افزودنی‌های الیافی

در شکل‌های ۴ و ۵، نتایج حاصل از آزمایشات بر روی سیال حفاری حاوی 0.05% وزنی ذرات الیافی رسم شده است.

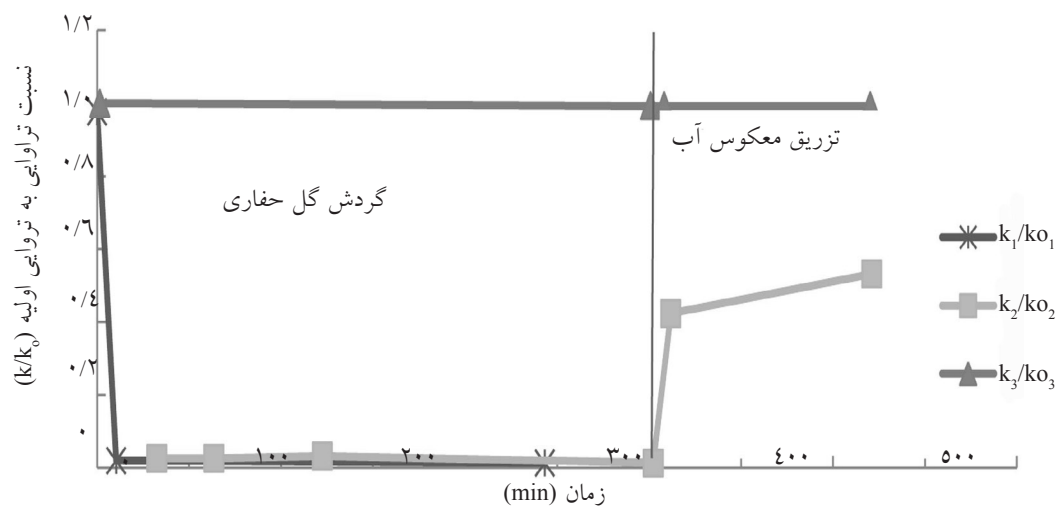
نتایج به وضوح نشان می‌دهد که ذرات الیافی، افت صافی سیال و تخریب تراوایی را کاهش داده‌اند. مقدار صافاب در زمان 30 دقیقه اولیه فقط 1 ml و پس از گذشت 5 ساعت میزان آن حدود 9 ml شده است. تراوایی شکاف در دو مقطع آخر برابر مقدار اولیه است. جریان خلاف جهت آب نمک، منجر به بهبود 50% تراوایی مقطع نخست نسبت به مقدار اولیه شده است. در شکل‌های ۶ و ۷، نتایج برای گل‌های حفاری مشابه با عرض شکاف دو برابر مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، گرچه نرخ صافاب برای شکاف عریض‌تر (شکل ۶ الف) بزرگ‌تر از شکاف باریک است (شکل ۴ الف)، ولی تخریب تراوایی برای هر



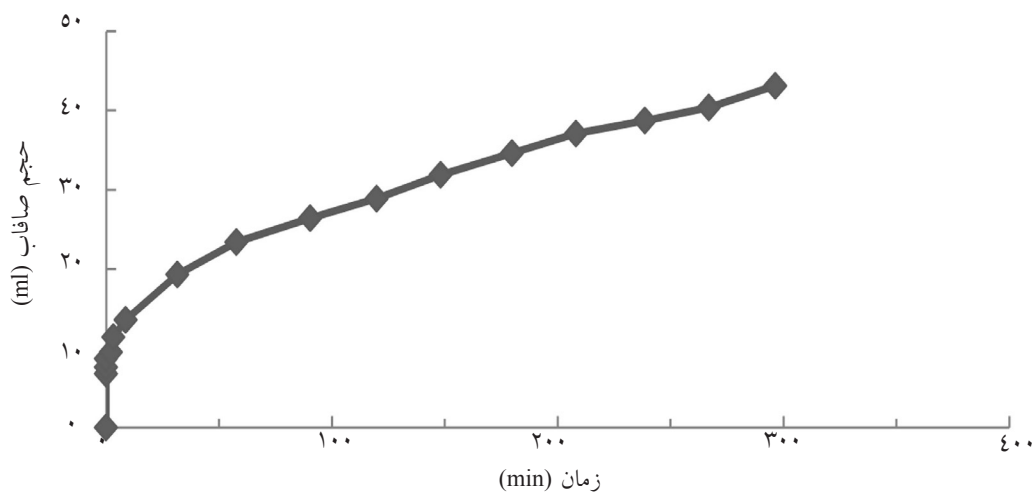
شکل ۴ الف- صافاب دینامیکی بر حسب زمان (۰/۵٪ ذرات الیافی در گل و عرض شکاف ۱۲۱ μm)



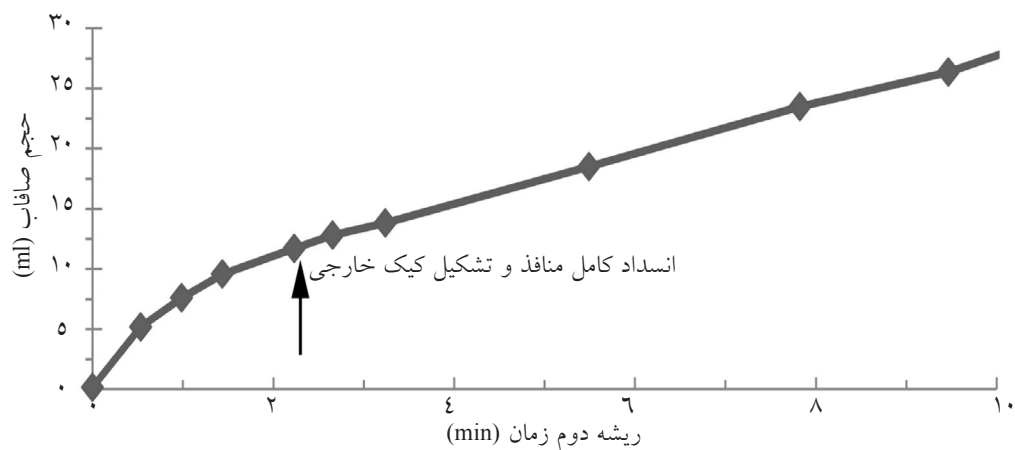
شکل ۴ ب- رفتار افت صافی دینامیکی سیال در زمان‌های اولیه



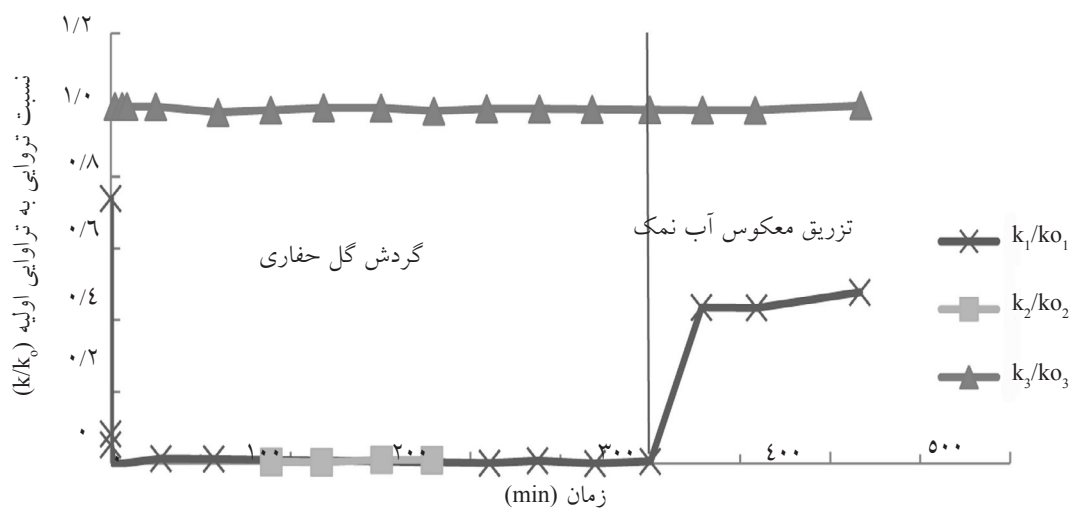
شکل ۵- نمودار تخریب تراوایی شکاف بر حسب زمان (عرض شکاف ۱۲۱ μm)



شکل ۶ الف- صافاب دینامیکی بر حسب زمان (۰/۵٪ ذرات الیافی در گل و عرض شکاف $221 \mu\text{m}$).



شکل ۶ ب- رفتار صافاب دینامیکی سیال در زمان‌های اولیه



شکل ۷- تخریب تراوایی شکاف بر حسب زمان (عرض شکاف $221 \mu\text{m}$)

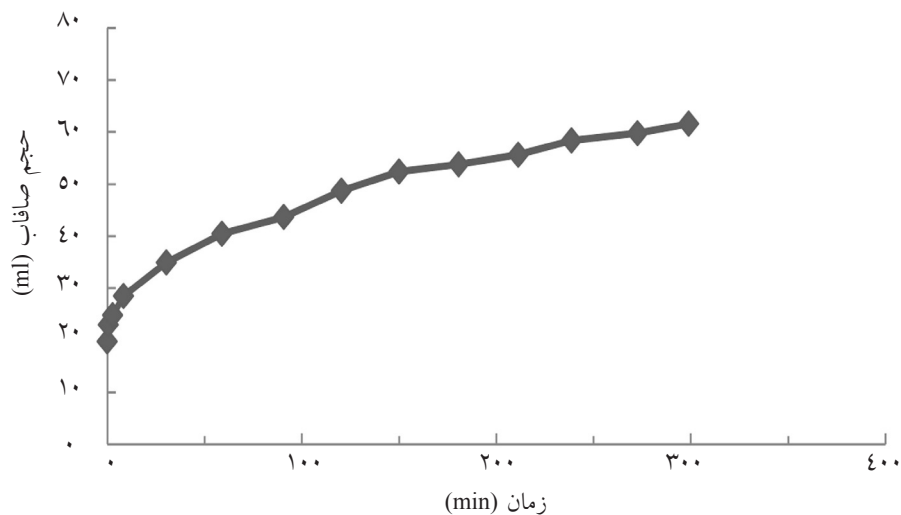
حفاری مشابه به همراه افزودنی‌های فیبری ولی با عرض شکاف در حدود ۲ mm (پوشیده با ذرات کربنات کلسیم ۱ mm) و با تراوایی حدود ۲۵۰ dr را نشان می‌دهد.

با وجود دهانه عریض شکاف و تراوایی بالای آن، ذرات الیافی (فیبری) همچنان در ۳ اینچ اولیه شکاف پل تشکیل داده و به بخش‌های دیگر آن آسیب نمی‌زند.

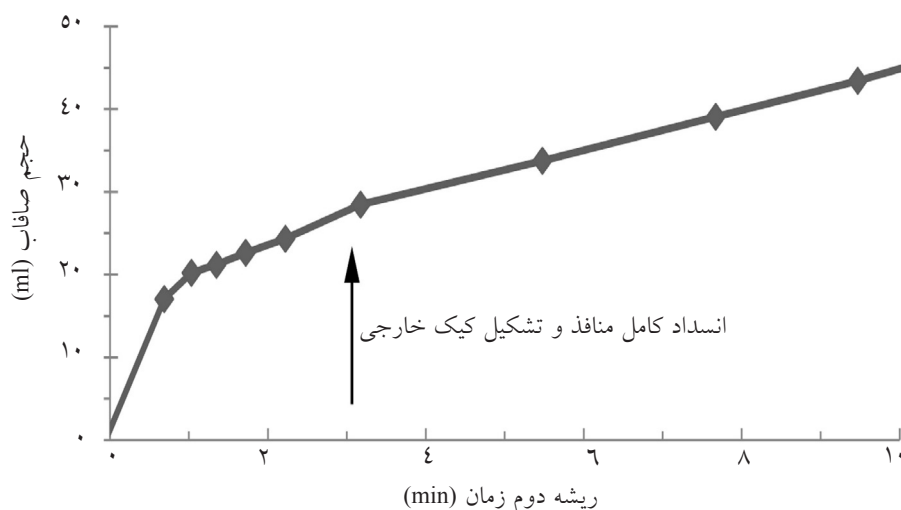
اثر افزودنی‌های دانه‌بندی شده

شکل ۱۰، توزیع اندازه ذرات کربنات کلسیم را نشان می‌دهد که به عنوان افزاینده هرزروی (مواد پل‌ساز) در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته است.

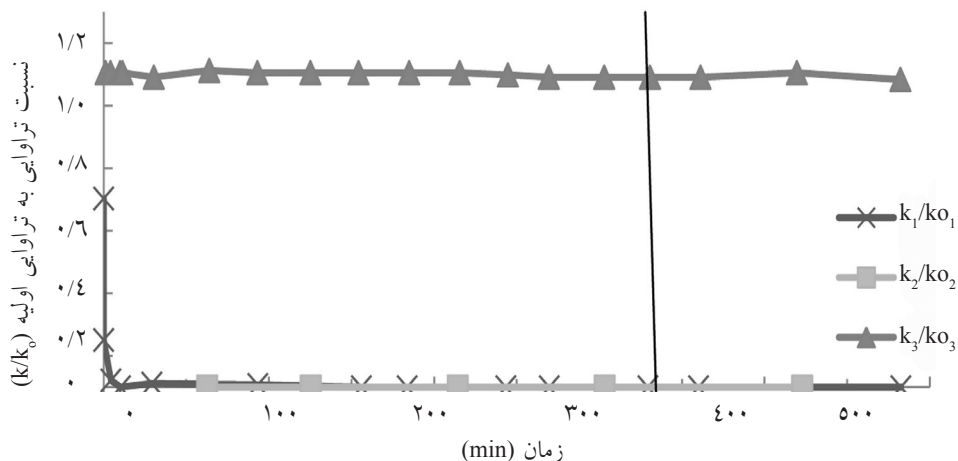
تصاویری از اندود صافی جداشده از سطح شکاف با بزرگ‌نمایی بالا نشان می‌دهند که با نشست ذرات خاک رس روی پل الیافی، اندود صافی کم تراوا تشکیل می‌شود. به محض تشکیل پل، انتقال و برداشتن آن توسط جریان، به دلیل وجود ذرات ریز کارساز درون آن در جهت جریان گل حفاری و همچنین وجود نقاط تماس زیاد بین توده فیبر و سطح شکاف (در مقایسه با یک یا دو نقطه تماس جامدات) به آسانی میسر نمی‌باشد. با تصویربرداری از اندود گل جدا شده از سطح شکاف، می‌توان یک کم تراوای حاصل از رسوب ذرات رس بر روی پل‌های مواد الیافی را مشاهده نمود. شکل‌های ۸ و ۹، نتایج گل‌های



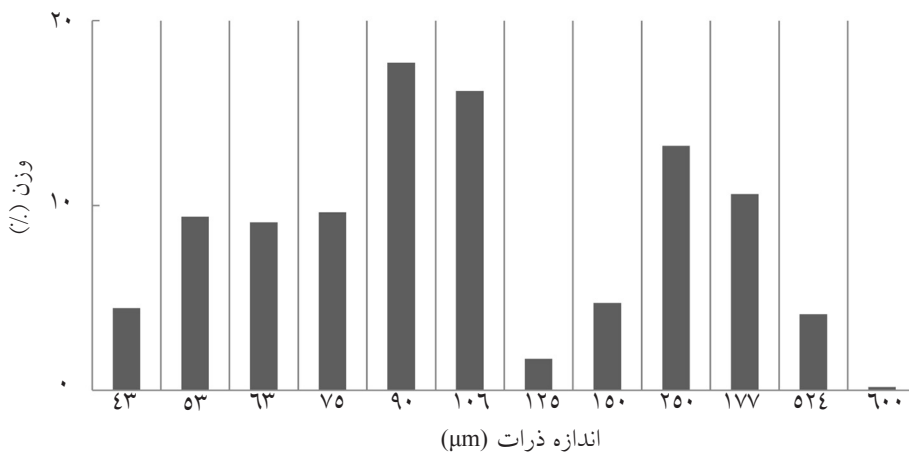
شکل ۸- الف - صافاب دینامیکی بر حسب زمان [۰/۵٪ ذرات الیافی در گل، عرض شکاف ۲ mm]



شکل ۸- ب: رفتار صافاب دینامیکی سیال در زمان‌های اولیه



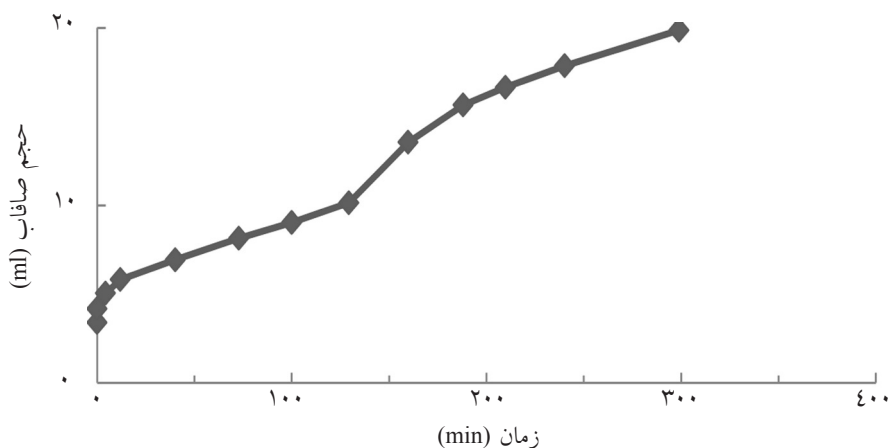
شکل ۹- آسیب تراوایی شکاف بر حسب زمان [۰/۵٪ ذرات الیافی افزوده شده (عرض شکاف ۲ mm)]



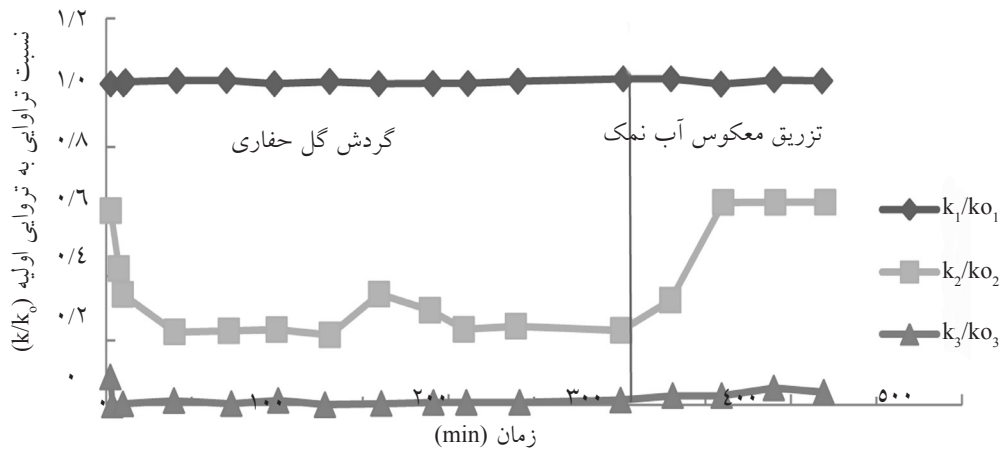
شکل ۱۰- توزیع اندازه ذرات کربنات کلسیم

تصاویر گرفته شده پس از آزمایش نشان می‌دهد که ۴ اینچ اولیه شکاف به شدت آسیب دیده و جریان برگشتی از آب نمک نتوانسته تراوایی را بهبود بخشد. در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که ذرات گل به ۴ اینچ ابتدای شکاف وارد شده است.

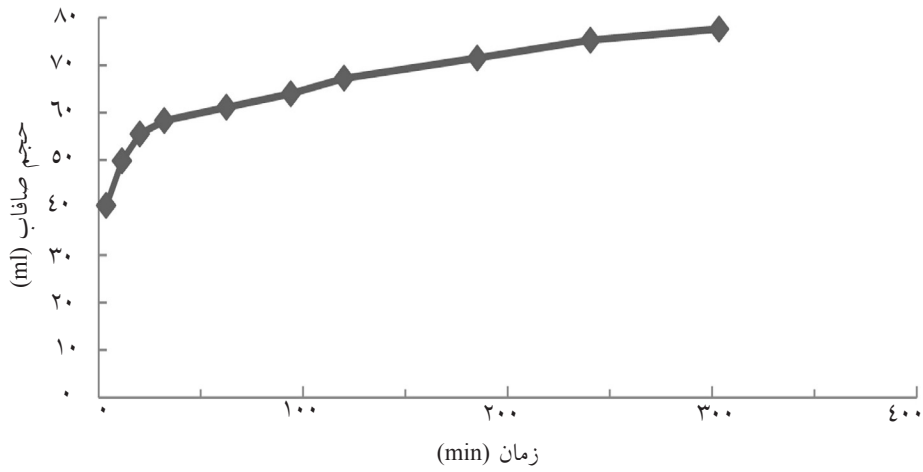
توزیع ذرات بشکل تابع دو نمایی بوده و اطمینان می‌دهد که برخی ذرات بزرگ برای ایجاد پل در سراسر شکاف‌های عریض همواره وجود دارند. شکل‌های ۱۱ و ۱۲، نتایج آزمایشگاهی حاصل از افزودن یک درصد وزنی ذرات کربنات کلسیم (عامل پل‌ساز) به گل حفاری را نشان می‌دهد.



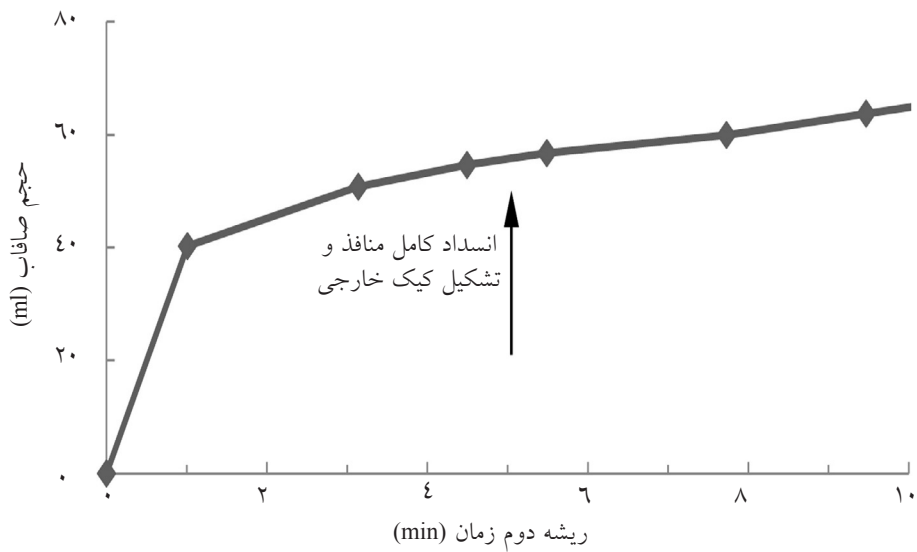
شکل ۱۱- نمودار صافاب دینامیکی بر حسب زمان (عرض شکاف ۱۱۳ μm)



شکل ۱۲- تخریب تراوایی شکاف بر حسب زمان (عرض شکاف $113 \mu m$)



شکل ۱۳ الف- صافاب دینامیکی بر حسب زمان (عرض شکاف $113 \mu m$)



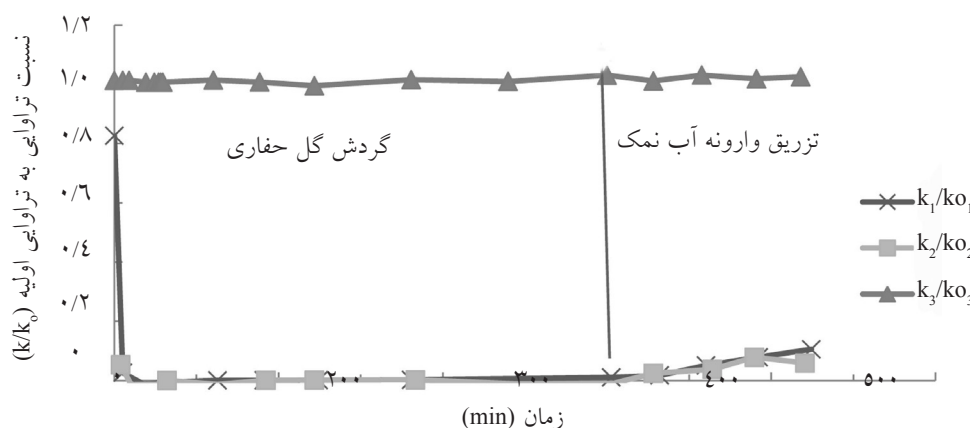
شکل ۱۳ ب- رفتار صافاب دینامیکی سیال در زمان‌های اولیه

اندود صافی بیرونی در حال شکل گیری است. به خوبی مشخص شده، زمانی که چنین اندودی شروع به تشکیل و رشد می کند، حجم صافاب استاتیکی با ریشه دوم زمان (\sqrt{t}) و حجم صافاب دینامیکی با زمان (t) متناسب است [۲ و ۳]. در نمودارهای ۱ب، ۲ب، ۳ب، ۴ب و ۵ب تغییرات حجم صافاب در زمانهای ابتدایی بر حسب ریشه دوم زمان (\sqrt{t}) رسم شده است. شکل ۱۱ نشان می دهد که گل برای تشکیل پل در سطح شکاف با دهانه باریک تقریباً به ۱۰ دقیقه زمان نیاز دارد. افزودن ۰/۵٪ وزنی از ذرات فیبری، زمان تشکیل پل و در نهایت صافاب جهشی را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. شکل ۱۲ نشان می دهد که اتصال بلافاصله برای شکاف با عرض کم ایجاد می گردد. همچنین صافاب ناگهانی در مدت آزمایش مشاهده نمی شود و نرخ افت صافی سیال نسبت به زمان ثابت است. هنگامی که عرض شکاف افزایش می یابد (شکل ۱۳ب، ۱۴ب) جهش ناگهانی صافاب سیال افزایش یافته و زمان لازم برای تشکیل پل کامل در ورودی شکاف، افزایش می یابد. همان گونه که در شکل ۱۳ب، ۱۴ب مشاهده می شود، زمان مورد نیاز برای تشکیل پل در شکافهایی با عرض $221 \mu\text{m}$ و 2 mm به ترتیب ۵ و ۱۰ دقیقه است. مدت لازم برای تشکیل کامل پل توسط ذرات کربنات کلسیم برای شکافی با عرض $207 \mu\text{m}$ ، حدود 30 min طول می کشد که زمان بیشتری می باشد (شکل ۱۳ب). به روشنی مشخص است که ذرات فیبری نسبت به کربنات کلسیم در تشکیل پل در سراسر سطح شکاف، عملکرد مؤثرتری دارند.

با مقایسه شکل های ۱۳ و ۱۴ در می یابیم که ذرات کربنات کلسیم دانه بندی شده به اندازه ذرات فیبری در تشکیل پل ها مؤثر نمی باشند. عرض شکاف برای دو آزمایش تقریباً مشابه است. به هر حال ذرات جامد گل که در آن از ذرات الیافی (فیبری) استفاده شده، حدود 2 mm وارد شکاف شده اند که می تواند با ذرات کربنات کلسیم که به ۴ اینچ از شکاف وارد شده اند، مقایسه شود. افزایش ناگهانی در نرخ صافاب (شکل ۱۱) نشان می دهد که پس از 130 دقیقه پل های ایجاد شده توسط کربنات کلسیم (CaCO_3) ناپایدار می باشد. به طوری که چنین رفتاری هرگز توسط ذرات فیبری دیده نشده است. همچنین اندازه نسبی ذرات کربنات کلسیم و عرض شکاف ممکن است دلیل بر عدم کارایی آن باشد. در شکل ۱۰ مشاهده می شود که غالب ذرات کربنات کلسیم نمی توانند به درون شکاف وارد شوند. شکل های ۱۳ و ۱۴، نشان دهنده نتایج برای شکاف عریض تر ($207 \mu\text{m}$) با گل مشابه است. نتایج نشان می دهد که ساختار پل پایدار است و حجم زیادی از گل (50 ml) در سراسر شکاف جریان یافته و تراوایی به شدت تخریب شده است. جریان برگشتی آب نمک، توانسته تراوایی را تنها تا حدود ۲۰٪ مقدار اولیه بهبود ببخشد. جهش ناگهانی صافاب سیال حاوی کربنات کلسیم، شاید از نقطه نظر حفاری قابل قبول باشد، اما از نظر بهره برداری بسیار خطرناک است.

ایجاد پل و اندود صافی بیرونی

می توان با آنالیز داده های صافاب در زمان های اولیه، زمانی را مشخص کرد که ساختار پل در سازند تکمیل شده و



شکل ۱۴- میزان آسیب تراوایی شکاف بر حسب زمان (عرض شکاف $207 \mu\text{m}$)

مکانیسم رسوب ذرات الیافی

همان‌گونه که گفته شد، ذرات فیبری به آسانی در دیواره چاه‌ها رسوب کرده و اتصالات پایدارتری را ایجاد می‌کنند. برای درک این موضوع، لازم است نیروهای کششی هیدرودینامیکی که بر روی ذرات فیبری وارد می‌شوند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. برای این منظور، فرض شده که توده فیبری شامل N ذره است که $N/3$ آنها موازی با جهت جریان و $2/3N$ عمود بر جهت جریان هستند. شکل ۱۵ شماتیک نیروهای کششی هیدرودینامیکی که روی توده فیبری به هنگام فیلتراسیون دینامیکی اعمال می‌شود را نشان می‌دهد. پس از رسوب، انباشت الیاف‌ها فرو پاشیده و پل پایدار در سطح شکاف ایجاد می‌نماید.

شایدیگر [۴] رابطه‌ای برای محاسبه نیروی کششی روی مواد فیبری در سیال نیوتنی ارائه کرده است. برای محاسبه نیروی سایش اعمال شده روی توده مواد فیبری در سیال غیر نیوتنی، معادلات تقریبی زیر (رابطه ۲ و ۳) استفاده شده است:

$$F_y = \frac{N}{3} 4\pi\mu_a v_y L_f + \frac{2N}{3} \frac{4\pi\mu_a v_y L_f}{2 - \ln Re_y} \quad (2)$$

$$F_x = \frac{N}{3} 4\pi\mu_a v_x L_f + \frac{2N}{3} \frac{4\pi\mu_a v_x L_f}{2 - \ln Re_x} \quad (3)$$

که در آن، v_y سرعت صافاب، v_x سرعت جریان گل در مرکز توده فیبری، μ_a گرانیوی ظاهری گل حفاری و Re_x و Re_y اعداد رینولدز در دو جهت x و y هستند. در معادلات ۲ و ۳ جمله اول مربوط به نیروی کششی توده فیبر موازی با جهت جریان و جمله دوم مربوط به الیاف عمود بر جهت جریان می‌باشند. اگر توده فیبری بر روی سطح شکاف رسوب کند، روابط زیر باید برقرار باشد [۵]:

$$\left(\frac{F_y}{F_x}\right)_f \geq 1 \quad (4)$$

یا

$$\left(\frac{F_y}{F_x}\right)_f = \left(\frac{4 - \ln Re_y}{2 - \ln Re_y}\right) \left(\frac{2 - \ln Re_x}{4 - \ln Re_x}\right) \frac{v_y}{v_x} \geq 1 \quad (5)$$

برای سیالات حفاری مدل توانی، عدد رینولدز به صورت رابطه ۶ نوشته می‌شود [۳]:

$$Re = \frac{2^n R^n v^{2-n} \rho_f}{8n-1K} \quad (6)$$

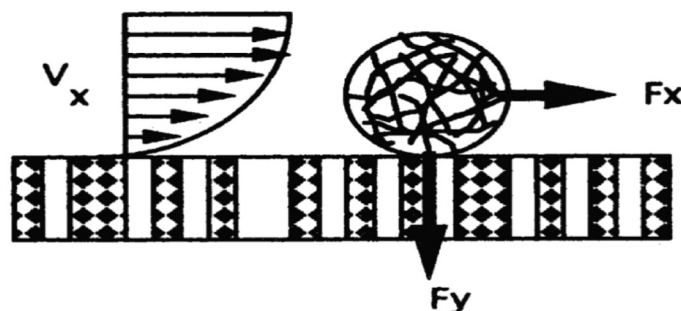
که در آن n و K پارامترهای رئولوژیکی سیالات حفاری مدل توانی، R شعاع توده فیبر به هنگام محاسبه نیروی کششی در جهت x یا شعاع فیبر منفرد حین محاسبه نیروی در جهت y ، و ρ_f چگالی مایع و v سرعت سیال است. در دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده، گل حفاری از طریق شیار جریانی یافته و v_x به صورت رابطه ۷ محاسبه می‌شود [۶]:

$$v_x = \frac{2\bar{v} \left(4 + \frac{2}{n}\right) \bar{v}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right) h \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \left[\frac{h \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{2} - \left(\frac{h}{2} - R\right) \left(1 + \frac{1}{n}\right) \right] \quad (7)$$

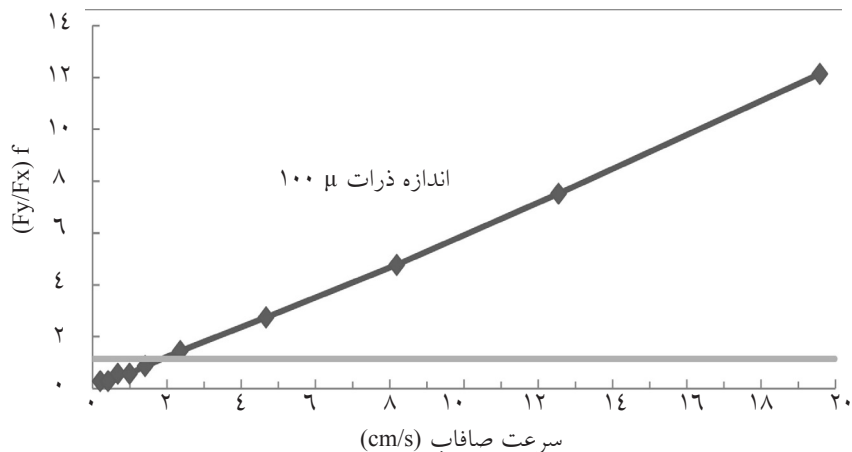
که در آن h ارتفاع شیار و \bar{v} میانگین سرعت جریان است. شکل ۱۶، نمودار F_y/F_x بر حسب سرعت صافاب v_y را نشان می‌دهد. در این رابطه، v_y از داده‌های افت صافی مشخص شده در شکل ۶ الف به دست می‌آید.

هنگامی که v_y بزرگتر از 0.2 cm/s باشد، توده‌های فیبر با اندازه 100μ تحت شرایط چنین آزمایشی می‌تواند رسوب کند. در آزمایشات دینامیکی (شکل ۶ الف)، سرعت صافاب برای 5 min اول بیشتر از 0.2 cm/s می‌باشد. به عبارت دیگر، توده فیبر با اندازه 100 mm می‌تواند در 5 min نخست و متعاقباً، فقط توده‌های کوچک‌تر می‌توانند رسوب کنند. مطالعات Jiao و Sharma نشان می‌دهند که برای ذرات کروی جامد، مقدار s (F_y/F_x) از رابطه ۸ محاسبه می‌شود [۷]:

$$\left(\frac{F_y}{F_x}\right)_s = \left(\frac{2 v_y}{3 R \gamma_w}\right)^n \quad (8)$$



شکل ۱۵- شماتیک نیروهای کششی وارده بر توده مواد فیبری تعلیق



شکل ۱۶- نمودار نسبت نیروی رسوب و نیروی برشی بر حسب سرعت صافاب برای ذرات الیافی

سرعت جریان گل v_x در رسوب ذرات نسبت به ذرات جامد برجسته تر است. بنابر این، توصیه می شود برای ایجاد و تشکیل پل های انسداد حفرات در طول شکاف، از جریان گل با نرخ پایین استفاده گردد. لازم به ذکر است برای رسوب توده های الیاف روی شکاف ها به افت صافی با سرعت بالا نیاز است. می توان با رویکرد آسیب سازند، از موارد فوق چنین استنباط کرد که:

کارایی و عملکرد ذرات فیبری فقط در مخازن شکاف دار و یا با نفوذپذیری بالا که در آنها میزان هرزروی ناگهانی بالاست، بسیار مطلوب می باشد. به عبارت دیگر استفاده از چنین افزایه هایی برای مخازنی با نفوذپذیری متوسط یا پایین، توصیه نمی شود.

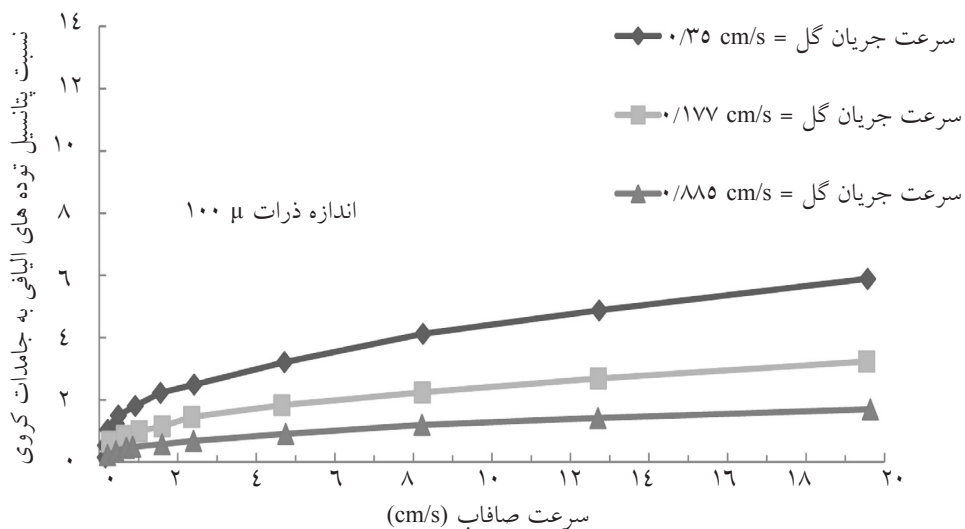
که در آن، γ_w نرخ تنش در سطح اندود صافی است. با تقسیم معادلات ۵ و ۸، پتانسیل رسوب توده الیافها نسبت به ذرات جامد در همان اندازه به صورت زیر به دست می آید.

$$\left(\frac{F_y}{F_x}\right)_f / \left(\frac{F_y}{F_x}\right)_s \geq 1 \quad (9)$$

رسوب توده های فیبری، بسیار شبیه به ذرات کروی با اندازه مشابه تحت شرایط جریانی یکسان می باشد.

شکل ۱۷، نتایج محاسباتی با استفاده از داده آزمایشات مربوط به شکل ۶ الف را برای ذرات ۱۰۰ μ در v_x مختلف نشان می دهد.

این شکل نشان می دهد که پتانسیل رسوب توده های الیافی، در سرعت زیاد صافاب v_y و سرعت جریان پایین گل حفاری v_x افزایش می یابد. به عبارت دیگر نقش و اثر



شکل ۱۷- پتانسیل رسوب توده های الیاف و جامدات کروی در سرعت جریانی مختلف (بر حسب سرعت صافاب اندازه ذرات ۱۰۰ μ)

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و مطالعاتی به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

۱- در حفاری مخازن شکاف‌دار اگر از سیالات حفاری بدون افزایه‌های کنترل هرزروی استفاده شود، آسیب جدی به شکاف‌ها وارد می‌شود. به طوری که این نواحی با سیالات حفاری پر شده و کاهش نفوذپذیری با جریان‌های برگشتی بهبود نمی‌یابد.

۲- استفاده از ذرات فیبری (الیافی) دانه‌بندی شده سایزبندی شده به عنوان افزایه در گل‌های حفاری، موجب کاهش آسیب‌دیدگی شبکه شکاف‌ها در سازند می‌شود.

۳- نتایج نشان می‌دهد توده‌های فیبری در سرتاسر سطح شکاف‌ها پلی ایجاد کرده و پس از آن ذرات بنتونیت با ایجاد اندود صافی مؤثر از ورود و هجوم جامدات و صافاب سیالات حفاری به درون سازن جلوگیری می‌کنند.

۴- محاسبات تقریبی نیروی کششی وارد شده بر توده‌های الیاف، نشان می‌دهد که تحت شرایط دینامیکی، ذرات الیاف در مقایسه با افزایه‌های کروی شکل و با اندازه مشابه، تمایل بیشتری به رسوب روی سطح شکاف از خود نشان می‌دهند. همچنین معلوم می‌شود اثر سرعت برشی روی ذرات الیافی نسبت به نوع کروی شکل، بارزتر بوده و در زمانی که سرعت جریان گل حفاری بالا باشد، این مواد به سختی رسوب می‌کنند.

۵- استفاده از افزودنی‌های فیبری در عملیات حفاری مخازن با شکاف‌های طبیعی توصیه می‌شود.

۶- نتایج آزمایشات نشان داد علاوه بر مزایای به کارگیری افزایه‌های الیافی که پیشتر اشاره گردید، کاربرد این مواد باعث می‌شود گسترده‌گی آسیب سازندهای شکاف‌دار بمیزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

علائم و نشانه‌ها

A : سطح مقطع نمونه مغزه (cm^2)

F_y : نیرو در جهت y ، (N)

F_x : نیرو در جهت x ، (N)

h : طول شیار، (cm)

h_f : طول شکاف، (cm)

k : تراوایی اندازه‌گیری شده مغزه (cm^2)

k_f : تراوایی شکاف، (cm^2)

k_m : تراوایی خمیره سنگ (ماتریکس) (cm^2)

k_o : تراوایی مغزه بدون صدمه دیدگی (cm^2)

K : پارامتر رئولوژیکی

L_f : طول شکاف (cm)

Re_x : عدد رینولدز در جهت x

Re_y : عدد رینولدز در جهت y

v : سرعت سیال (cm/s)

v : سرعت متوسط جریان گل (cm/s)

v_x : سرعت جریان گل (cm/s)

v_y : سرعت صافاب (cm/s)

W : عرض شکاف (cm)

γ_w : سرعت برشی در سطح اندود صافی (s^{-1})

μ_a : گرانروی ظاهری (cP)

ρ_f : چگالی مایع (gr/cm^3)

زیرنویس

a : ظاهری

f : شکاف، الیاف

n : پارامتر رئولوژیکی

s : ذره کروی

w : در سطح کینک

x : مؤلفه x

y : مؤلفه y

مراجع

- [1]. Leoppke G. E., Glowka D. A., and Wright E. K., *Design and evaluation of lost-circulation materials for severe environments*, JPT, 328; Trans., AIME, 289, March 1990.
- [2]. Zh Li., Jienian Ya and et.al: "A new method for optimized design of temporary blocking agent used for formation protection in south shallow water area of dagang oilfield". *Journal of Oil & Gas Technology*, 7,29(3), pp. 299-301(in Chinese), 2000.
- [3]. Thomas B. and Sharma M. M., "Distribution of mud induced damage around horizontal wellbores," in press, *SPE Production & Facilities*, SPE. pp. 39468, 2000.
- [4]. Scheidegger A. E., *The physics of flow Through Porous Media*, U. of Toronto Press, 1974.
- [5]. Jiao D. and Sharma M. M., "Mechanism of cake buildup in crossflow filtration of colloidal suspension", *J. Colloid and Interface Sci.*, pp. 162, 454, 1994.
- [6]. Gidley J. L. et al., *Recent advances in hydraulic fracturing*, Monograph Series, SPE, Richardson, TX, 22, 112.
- [7]. Jiao D. and Sharma M. M., *Formation damage caused by static and dynamic filtration of water-based muds*, paper SPE 23823 presented, *SPE Formation Damage Control Symposium*, Lafayette, LA, Feb. pp. 26-27, 1992.