بررسی و مطالعه آزمایشگاهی میزان آب از دست دادگی و عمق نفوذ سیال حفاری در شرایط استاندارد API و مقایسه با بستر ماسه‌ای

علیرضا نصیری* و مجید ولی‌زاده
پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی نفت
nasiriar@ripi.ir

پژوهش نفت
سال بیست و سوم
شماره ۷۴
صفحه، ۱۳۲-۱۲۶ ۱۳۹۲
تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۳/۷

چکیده

در حال حاضر برای اندازه‌گیری افت صافی سیال حفاری از آزمایش استاندارد API می‌شود. در این آزمایش یک کاغذ صافی با قطر دهانه ۲/۷ میکرون نقش سازند تراوا را ایفا می‌کند که با شرایط چاه تفاوت زیادی داشته و در بسیاری موارد نتایج آزمایش کاملاً مغایر با شرایط واقعی می‌باشد. آزمایش استاندارد API تنها میزان آب از دست دادگی سیال در حالت استاتیک را نشان می‌دهد و با استفاده از آن نمی‌توان عمق نفوذ صافاب سیال به درون سازند را بررسی نمود. در این تحقیق، از یک بستر ماسه‌ای با دانه‌بندی بین مش ۲۰ و ۴۰ یا ۰/۵۱-۰/۲۹ mm که تحت نیروی ۱ Kgf فشرده شده است، به‌عنوان جایگزین کاغذ صافی جهت اندازه‌گیری افت صافاب سیال حفاری در شرایط واقعی سازند و مشخص کردن عمق نفوذ استفاده گردید و تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین افت صافاب و عمق نفوذ آن در حضور بستر ماسه‌ای در مقایسه با کاغذ صافی مشاهده شد. بنابراین، می‌توان گفت اندازه‌گیری صافاب گل به‌وسیله کاغذ صافی مشخص کننده شرایط سازند نبوده و باید از روش‌های واقعی‌تر همچون بستر ماسه‌ای برای بررسی این پدیده استفاده نمود. همچنین کارایی بعضی مواد به عنوان کنترل کننده افت صافی و جلوگیری از صدمات به مخازن با این روش قابل ارزیابی است که در روش آزمایشگاهی API قابل بررسی نبود.

واژه‌های کلیدی: افت صافی سیال، عمق نفوذ سیال، آسیب سازند، بستر ماسه‌ای، سیال حفاری

مقدمه

افت صافی از پارامترهای مهم سیال حفاری است که باید به دقت کنترل شود. افت صافاب زیاد سیال حفاری و نفوذ آن به درون سازند تولیدی می‌تواند باعث آسیب شدید و دائمی به مخزن شده و تولید را به شدت کاهش دهد. از دیگر مشکلات ایجاد شده ناشی از نفوذ زیاد صافاب سیال حفاری درون سازند تولیدی، عدم امکان تفسیر صحیح داده‌های چاه‌نگاری است. همچنین افت صافی زیاد سیال حفاری می‌تواند مشکلات ناپایداری چاه را افزایش دهد. در عملیات حفاری، به منظور جلوگیری از ورود سیال

مخزن به درون چاه و کنترل فشار طبقات، لازم است فشار هیدروستاتیکی ناشی از سیال حفاری بزرگ‌تر از فشار منفذی سازند باشد. باید توجه داشت که اگر میزان این فشار از فشار مخزن بیشتر شود، سیال حفاری تمایل به نفوذ درون سازند تراوا را پیدا می‌کند. افت صافاب سیال حفاری به دو صورت استاتیکی و دینامیکی وجود دارد. صافاب استاتیکی سیال زمانی است که سیال حفاری گردش ندارد و اندود صافی گل ایجاد شده دچار فرسایش نمی‌شود. افت صافاب دینامیکی سیال هنگامی رخ می‌دهد که سیال در حال گردش بوده و در نتیجه رشد و تشکیل اندود صافی گل به دلیل فرسایش ناشی از گردش سیال حفاری محدود می‌باشد. به طور کلی افت صافاب دینامیکی سیال بیشتر از افت صافاب استاتیکی آن است [۱].

میزان افت صافاب سیال حفاری که عمدتاً توسط روش استاندارد API، ارزیابی و کنترل می‌شود از نوع افت صافاب استاتیکی می‌باشد. آزمایش افت صافاب API از ۴۰ سال پیش تاکنون به منظور ارزیابی کیفیت اندود گل به کار می‌رود. این آزمایش بعدها برای بررسی کیفیت بنتونایت نوع Wyoming نیز مورد استفاده قرار گرفت. بدین صورت که میزان صافاب عبور کرده از کاغذ صافی، شاخصی از کیفیت بنتونیت مخلوط شده در آب ارائه می‌نمود. از این آزمایش جهت تشخیص ویژگی‌های عمق نفوذ صافاب سیال حفاری با توجه به میزان صافاب عبور کرده از کاغذ صافی طی مدت زمان ۳۰ دقیقه و تحت فشار ۱۰۰ psi استفاده می‌شود [۲ و ۳]. به طور کلی فرض بر این است که سیالی که در روش استاندارد API میزان افت صافی کمتری دارد، عمق نفوذ کمتری نیز در سازند خواهد داشت. کاغذ صافی مورد استفاده در این آزمایش نماینده مناسبی از سازند واقعی نمی‌باشد. با توجه به تجربیات میدانی، مشخص شده که آزمایش افت صافی استاندارد API برای سیالات حاوی درصد مواد جامد کم، کاربرد ندارد. زیرا برخی از این سیستم‌های سیال که به عنوان سیالات غیر تهاجمی[1] شناخته می‌شوند، هنگامی که توسط آزمایش استاندارد API مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، حجم صافاب بالایی از خود نشان می‌دهند. دلایل دیگری نیز وجود دارد که نشان می‌دهد آزمایش افت صافاب استاندارد API شاخص مناسبی از مقدار واقعی آن در سیال نیست. به عنوان مثال مشکل گیر تفاضلی لوله‌های حفاری و یا آسیب وارده به سازندهای بهره‌ده، معمولاً در چاه‌هایی رخ می‌دهد که در آنها از سیال حفاری با میزان افت صافی استاندارد API بسیار کم استفاده شده است. همچنین نمودارهای مقاومتی گرفته شده از این چاه‌ها حاکی از عمق نفوذ قابل توجه صافاب سیال به درون سازند می‌باشد. هر چند این نفوذ تابعی از نوع سیال، جنس سازند و نوع تر شوندگی است، اما نکته قابل توجه این است که در این چاه‌ها از سیالاتی که به عنوان سیالات غیر تهاجمی مطرح بوده‌اند، استفاده شده است [۴].

بررسی‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق سعی شده است که برای سیالات مختلف مورد استفاده در صنعت حفاری، مقایسه‌ای بین آزمایشات افت صافاب در شرایط استاندارد API و با حضور بستر ماسه‌ای انجام شود. اندازه‌گیری افت صافی توسط بستر ماسه‌ای با استفاده از دستگاه فیلترپرس استاندارد API انجام شده است با این تفاوت که به جای کاغذ صافی از مقدار معینی ذرات سیلیس با درجه خلوص بیش از ۹۹٪ و با دانه‌بندی مشخص (بین مش ۲۰ و ۴۰ یا ۰/۵۱–۰/۲۹ mm) به عنوان مدلی از یک مخزن ماسه‌ای با نفوذپذیری بالا، استفاده شده است. به منظور مشاهده چگونگی نفوذ صافاب سیال به درون بستر ماسه‌ای، یک محفظه شفاف آکریلیکی به جای محفظه فلزی دستگاه فیلترپرس API مورد استفاده قرار گرفته است.

بستر ماسه‌ای برخلاف کاغذ صافی، دارای شکل منظمی نبوده و می‌تواند به راحتی تحت تأثیر عوامل مختلف تغییر کند. بنابراین، لازم است بستر ماسه‌ای مورد استفاده برای تمامی آزمایش‌ها از نظر حجم، ابعاد، جنس و نحوه آماده‌سازی کاملاً مشابه باشد تا بتوان نتایجی با تکرارپذیری قابل قبولی به‌دست آورد. در صورتی که این بستر خیلی نازک باشد، نتیجه آزمایش به شدت به بی‌نظمی‌هایی که در بستر ماسه‌ای رخ می‌دهد، حساس خواهد بود. از طرف

1. Non-invasion Fluids

دیگر در صورتی که ضخامت بستر ماسه‌ای زیاد باشد، حجم قابل توجهی از صافاب سیال، درون بستر ماسه‌ای باقی می‌ماند. در این صورت باید به این نکته توجه داشت که حجم واقعی صافاب، برابر حجم صافاب عبور کرده از بستر ماسه‌ای به‌علاوه حجم صافاب باقی مانده درون بستر ماسه‌ای خواهد بود [٤].

از نظر ابعاد ذرات بستر ماسه‌ای، تحقیقات به عمل آمده نشان می‌دهد که لازم است محدوده دانه‌بندی ذرات ماسه‌ای، کوچک (mm ۰/۵۱-۰/۲۹) باشد تا نتایج آزمایش‌ها قابلیت تکرارپذیری داشته باشند. البته می‌توان با توجه به نوع سازند مورد بررسی در شرایط واقعی، نوع دانه‌بندی بستر ماسه‌ای را انتخاب کرد. مقدار مناسب بستر ماسه‌ای با دانه‌بندی مش‌بین ٤٠-٢٠ حدود gr ٢٠٠ در نظر گرفته شد. در این حالت ضخامت بستر ماسه‌ای خیلی نازک نبوده و می‌توان تحلیل صحیحی از نتایج آزمایش داشت. همچنین ضخامت بستر خیلی زیاد نیست تا موجب شود حجم زیادی از صافاب سیال درون بستر ماسه‌ای باقی بماند [٥].

به منظور یکنواخت‌تر شدن شرایط آزمایش جهت آماده‌سازی بستر ماسه‌ای درون سِل فیلترپرس API، پس از ریختن gr ٢٠٠ از ماسه درون سِل فیلترپرس، بستر ماسه‌ای را با تکان دادن سِل هم‌سطح کرده و سپس با استفاده از یک دیسک دایره‌ای و گذاشتن یک وزنه Kg ١ روی آن، سطح بستر را کاملاً یکنواخت می‌کنیم تا میزان فشردگی بستر در آزمایش‌ها تقریباً یکسان باشد [٥].

برای جلوگیری از به هم‌خوردگی سطح بستر ماسه‌ای هنگام ریختن سیال درون سِل فیلترپرس، وسیله‌ای مطابق شکل ١ ساخته شد. انتقال سیال بر روی بستر ماسه‌ای توسط این دستگاه به آرامی صورت گرفته و از ایجاد تلاطم و به هم‌خوردگی سطح بسترماسه‌ای جلوگیری می‌شود. با توجه به مشخصات بستر ماسه‌ای، میزان قطر دهانه حفرات آن حدوداً ٢٠٠ میکرون تخمین زده می‌شود که نسبت به کاغذ صافی در روش استاندارد API در حدود ٥٠ برابر بیشتر است [٤].

با توجه به تمامی نکات فوق، روش انجام آزمایش ذیل جهت اندازه‌گیری افت صافاب سیال حفاری توسط فیلترپرس API با استفاده از بستر ماسه‌ای به جای کاغذ صافی به‌کار گرفته شد. مراحل انجام آزمایش اندازه‌گیری افت صافی با بستر ماسه‌ای به شرح زیر است:

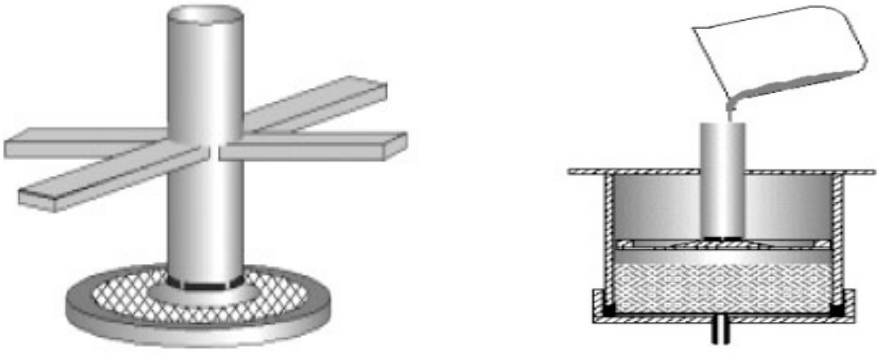
١- اتصال قطعات دستگاه فیلترپرس API مطابق با روش کار صورت گرفت. با این تفاوت که به جای سِل فلزی دستگاه از سِل شفاف آکریلیکی استفاده می‌شود (بدون استفاده از کاغذ صافی).

٢- مقدار gr ٢٠٠ از ماسه دانه‌بندی شده بین مش ٤٠-٢٠ درون سِل فیلترپرس ریخته می‌شود.

٣- بستر ماسه‌ای با تکان دادن سِل و هم‌سطح شده و سپس با استفاده از دیسک دایره‌ای و وزنه kg ١ سطح بستر یکنواخت می‌شود.

٤- انتقال سیال حفاری به درون سِل با استفاده از لوله مخصوص ساخته شده

٥- بستن درپوش سِل فیلترپرس و قرار دادن آن در جای خود



شکل ١- سل اندازه‌گیری افت صافی سیال بر روی بستر ماسه‌ای (سمت راست) و وسیله مورد استفاده برای جلوگیری از به‌هم‌خوردگی سطح بستر ماسه‌ای در هنگام تخلیه سیال به درون سل فیلتر پرس

٦- اعمال فشار psi ۱۰۰ به درون سِل و جمع‌آوری صافاب سیال در مدت زمان ۳۰ دقیقه [٤].

مراحل انجام آزمایش اندازه‌گیری افت صافی سیال طبق روش استاندارد API عبارتست از:

۱- کاغذ صافی (واتمن ۵۰ یا معادل آن) روی توری قرار گرفته و واشر پلاستیکی روی کاغذ صافی گذاشته می‌شود.

۲- دیواره سل روی واشر قرار گرفته و با چرخاندن محکم می‌شود.

۳- سیال را درون سل تا فاصله mm ۱۳ از لبه بالایی سل ریخته و درپوش سل روی آن گذاشته می‌شود.

٤- فشار psi ۱۰۰ توسط رگلاتور روی سیال اعمال شده و سپس تایمر روشن می‌شود.

۵- مقدار افت صافاب در مدت زمان ۳۰ دقیقه معادل افت صافاب استاندارد API اندازه‌گیری می‌شود [٦].

آزمایش‌های انجام شده

در این تحقیق، سیالات مختلفی که در حفاری چاه‌های مناطق نفت‌خیز جنوب استفاده می‌شود، مورد ارزیابی قرار گرفت که مشخصات آنها در جداول ۱ تا ٤ آورده شده است. این سیالات به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که شامل گل‌های پایه روغنی (امولسیونی و امولسیون معکوس) و گل‌های پایه آبی مورد استفاده باشد. پس از تهیه سیالات، هریک از آنها درون سِل حرارتی مخصوص ریخته شده و به مدت ١٦ ساعت در درجه حرارت‌های مختلف با توجه به نوع سیال، به صورت دینامیکی در آون غلطان حرارت داده می‌شود. سپس خواص رئولوژی هر یک توسط ویسکومتر مدل 35Chann ساخت شرکت Chandler در دمای ٦٠ °C اندازه‌گیری می‌شود که نتایج آن در جداول ۱ تا ٤ ارائه شده است. در نهایت میزان افت صافی استاندارد API (با استفاده از کاغذ صافی Fann با قطر دهانه ۵-۲ میکرون) و افت صافی توسط بستر ماسه‌ای برای هریک از نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که میزان افت صافاب استاندارد API برای سیال امولسیونی کمتر از افت صافاب اندازه‌گیری شده بر روی بستر ماسه‌ای است که علت آن به عدم وجود مواد جامد در درون گل امولسیونی مربوط می‌شود. در حالی که برای سیالات پایه روغنی، بنتونیتی و گلایکولی، به علت وجود مواد جامد(هرچند به میزان کم) یک هم‌پوشانی مناسب بر روی بستر ماسه‌ای وجود دارد. بنابراین، میزان افت صافی استاندارد API بیشتر از افت صافاب اندازه‌گیری شده بر روی بستر ماسه‌ای است.

جدول ۱- ترکیب سیال امولسیونی به همراه خواص رئولوژی و افت صافی قبل و بعد از حرارت

افزایه‌های سیال	واحد	مقدار	
آب شیرین	ml	**۱۰۵**	
امولسیفایر	ml	**۳/۵**	
گازوییل	ml	**۲٤۵**	
افزایه کاهنده عمق نفوذ	gr	**٤**	
١٦ ساعت رول در دمای ٩٣ °C و اندازه‌گیری خواص رئولوژی سیال در دمای ٦٠ °C			
خواص سیال	واحد	قبل حرارت	بعد حرارت
ویسکوزیته ظاهری (Av)	cP	۱۰۰	۹۱
ویسکوزیته پلاستیک (Pv)	cP	٦۰	٤۹
نقطه واروی (Yp)	$lb/100ft^2$	۸۰	۸٤
مقاومت ژله‌ای (10sec/10min)	$lb/100ft^2$	۲۳/۲۸	۳۰/۳٤
pH	-	۸/۵٤	۵/٦٤
افت صافاب استاندارد API	ml	۲٦	٤۳
افت صافاب بستر ماسه‌ای	ml	–	بدون کنترل
دانسیته سیال	gr/cm^3	۰/۸۸	

جدول۲- ترکیب سیال پایه روغنی به همراه خواص رئولوژی و افت صافی قبل و بعد از حرارت

افزایه‌های سیال	واحد	مقدار
گازوییل	ml	۲۸۳/۵
کنترل کننده افت صافاب (FLC)	gr	۱۱
امولسیفایر اولیه	gr	۹/۵
آهک	gr	۱۱
آب نمک کلرید کلسیم (S.gr=1.21)	ml	۳۵
امولسیفایر ثانویه	gr	۳/٦
ویسکوزیفایر	gr	۳/۳
افزایه کاهنده عمق نفوذ	gr	٤
۱٦ ساعت رول در دمای ºC ۱۲۱ و اندازه گیری خواص رئولوژی سیال در دمای ºC ٦۰		
خواص سیال	واحد	قبل حرارت / بعد حرارت
ویسکوزیته ظاهری (Av)	cP	۱۰/۲۵ / ۱۱/۵
ویسکوزیته پلاستیک (Pv)	cP	۹/۵ / ۱۰/۵
نقطه واروی (Yp)	$lb/100ft^2$	۱/۵ / ۲
مقاومت ژله‌ای (۱۰min/۱۰sec)	$lb/100ft^2$	۰/۵/۱ / ۰/۵ /۱
پایداری الکتریکی	volt	۸۰٦ / ۹۵۰
افت صافاب فشار بالا /دما بالا (۲۵۰^F/ ۵۰۰^{psi})	ml	– / ۳۳
افت صافاب بستر ماسه‌ای	ml	– / ۰
دانسیته سیال	gr/cm^3	۰/۹۱

جدول۳- ترکیب سیال پایه آبی(بنتونیتی) به همراه خواص رئولوژی و افت صافی قبل و بعد از حرارت

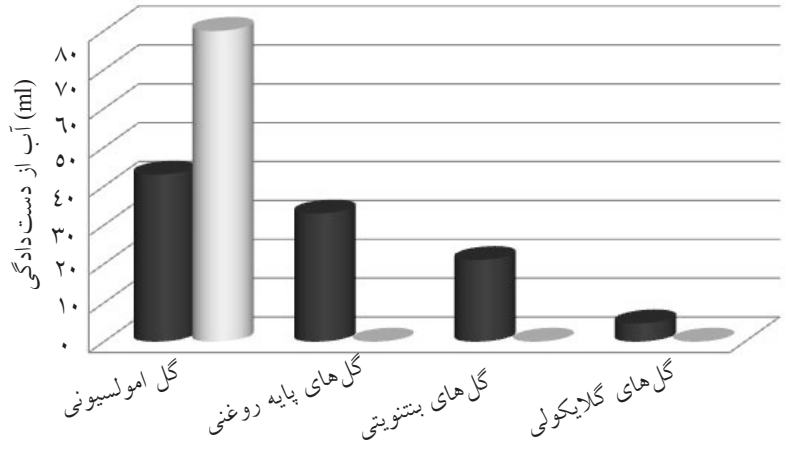
افزایه‌های سیال	واحد	مقدار
آب شیرین	ml	۳۵۰
بنتونیت	gr	۱۵
باریت	gr	۱۲۸
افزایه کاهنده عمق نفوذ	gr	٤
۱٦ ساعت رول در دمای ºC ۸۲ و اندازه گیری خواص رئولوژی سیال در دمای ºC ٦۰		
خواص سیال	واحد	قبل حرارت / بعد حرارت
ویسکوزیته ظاهری (Av)	cP	۱۸/۵ / ۱۳
ویسکوزیته پلاستیک (Pv)	cP	۱۱ / ۱۱
نقطه واروی (Yp)	$lb/100ft^2$	۱۵ / ٤
مقاومت ژله ای (۱۰min/۱۰sec)	$lb/100ft^2$	۱۰/۱۲ / ٤/۵
pH	–	۹/۱۲ / ۸/۳۳
افت صافاب استاندارد API	ml	۱۸/۵ / ۲۱
افت صافاب بستر ماسه ای	ml	– / ٦
دانسیته سیال	gr/cm^3	۱/۲۸

جدول٤- ترکیب سیال پایه آبی (گلایکولی) به همراه خواص رئولوژی و افت صافی قبل و بعد از حرارت

افزایه‌های سیال	واحد	مقدار
آب شیرین	ml	۳۵۰
کربنات سدیم (سودا اَش)	gr	۰/۵
هیدروکسید سدیم	gr	۰/۵
پلیمر زانتان	gr	۰/۵
کلرید پتاسیم	gr	۲۱
پلیمر PAC-UL	gr	٤-۳
گلایکول	ml	۲۱
پلیمر PHPA	gr	۱
پودر سنگ آهک	gr	به مقدار نیاز تا وزن gr/cm^3 ۱/۲
افزایه کاهنده عمق نفوذ	gr	٤

۱٦ ساعت رول در دمای °C ۹۳ و اندازه گیری خواص رئولوژی سیال در دمای °C ٦۰

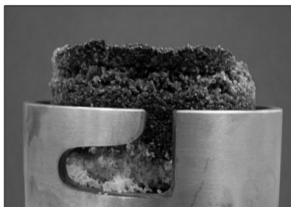
خواص سیال	واحد	قبل حرارت	بعد حرارت
ویسکوزیته ظاهری (Av)	cP	٥٤/٥	٦۰
ویسکوزیته پلاستیک (Pv)	cP	۳۳	۳٦
نقطه واروی (Yp)	$lb/100ft^2$	٤۳	٤۸
مقاومت ژله‌ای (۱۰min/۱۰sec)	$lb/100ft^2$	٥/۸	٦/۹
pH	-	۱۰/۹٥	۹/۲٥
افت صافاب استاندارد API	ml	٥	٤/۷
افت صافاب بستر ماسه‌ای	ml	-	۰
دانسیته سیال	gr/cm^3	۱/۲۰	



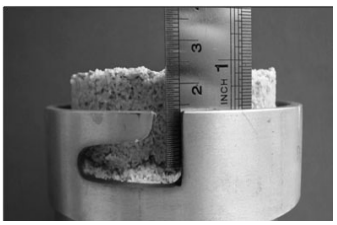
شکل۲- مقایسه افت صافی استاندارد API و افت صافی توسط بستر ماسه‌ای برای سیالات مختلف

همان‌طور که درشکل ۲ مشاهده می‌شود، سیالات پایه روغنی، بنتونیتی و گلایکولی بر روی بستر ماسه‌ای به علت هم‌پوشانگی مناسب افزایه کاهنده عمق نفوذ [1]، هیچ‌گونه افت صافی ندارد. در شکل‌های۳ تا ۵ میزان عمق نفوذ سیال به درون بستر ماسه‌ای برای سیال پایه روغنی، سیال بنتونیتی و گلایکولی رسم شده است.

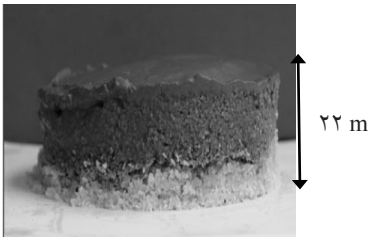
1. Invasion Depth



شکل۳- عمق نفوذ سیال پایه نفتی در بستر ماسه‌ای



شکل٤- عمق نفوذ سیال گلایکولی در بستر ماسه‌ای



شکل٥- عمق نفوذ سیال بنتونیتی در بستر ماسه‌ای

نتیجه‌گیری

- ارتباط مستقیم و مشخصی بین مقدار افت صافی استاندارد API و عمق نفوذ صافاب سیال به درون سازند تراوا وجود ندارد. به عبارتی نمی‌توان از روی افت صافی به‌دست آمده به روش API قضاوت قطعی درخصوص کنترل افت صافی نمونه‌های گل داشت.

- با استفاده از آزمایش ساده اندازه‌گیری افت صافی بر روی بستر ماسه‌ای می‌توان تحلیل بهتری در رابطه با میزان عمق نفوذ سیال به درون سازند به‌دست آورد. این موضوع کمک شایانی به انتخاب سیالاتی می‌کند که علاوه بر داشتن مشخصات فیزیکی و شیمیایی مناسب، کمترین آسیب به لحاظ نفوذ سیال در درون سازندهای بهره‌ده را داشته و از صدمات وارده جلوگیری می‌نماید.

- جهت کنترل کیفی مواد جدیدی که به عنوان کنترل کننده نفوذ سیال حفاری به درون سازندها معرفی می‌شوند، می‌توان از روش پیشنهادی در این پژوهش استفاده کرد. در این حالت تشکیل غشای ناتراوا بر روی بستر ماسه‌ای توسط این مواد قابل بررسی و مطالعه می‌باشد که در روش‌های رایج آزمایشگاهی این قابلیت وجود ندارد.

علائم و نشانه‌ها

Apparent viscosity (AV): ویسکوزیته ظاهری

Plastic viscosity (PV): ویسکوزیته پلاستیک

Yield point (YP): نقطه واروی، نقطه تسلیم

bbl (pound per barrel): (پوند بر بشکه)

cP: سانتی پوآز

مراجع

[1]. Darley H. C. H and Gary G. R, "Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids", 5th Ed., Gulf professional publishing, 1988, Chapter 8.

[2]. Van Engelhardt W. and Schindewolf E., "*The filtration of clay suspensions*", Kolloid Z, 1953 Vol 127, pp 150-164.

[3]. Larsen D. H, "*Determining the filtration Characteristics of drilling muds*", J. Petrol. Eng. ,Sep 1938 pp 42-48.

[4]. Santos H., Villas-Boas B., Lomba R. F. T., Oliveira S. F. and Costa J. F., *API Filtration and Drilling Fluid Invasion: Is There Any Correlation?*, Petroleum Engineering Conference held in Caracas, Venezuela, SPE 53791, April 1999.

[5]. Technical Recommendation Manual, AMC's DFC Laboratory, Perth, Western Australia, 10/12/2010.

[6]. Standard Procedure for Testing Drilling Fluids, API Recommended Practice 13-B, 12th Ed, Sep 1988.