

Performance of Partially-Hydrolyzed Polyacrylamide in Water Based Drilling Fluids

Ali Reza Nasiri* and Majid Valizadeh

Research Institute of Petroleum Industry, P.O. Box: 14665-1998, Tehran, Iran

Received 10 April 2012, accepted 8 April 2013

ABSTRACT

Fluid properties with constant improvement in efficiency have been noticeable as important criteria in drilling operation. The main drilling fluid properties highly depend on utilization of new polymers with high efficiency in drilling fluid composition. In this paper, the performance of a new polymer, called partially hydrolyzed polyacrylamide polymer (PHPA), is studied which has recently entered the drilling fluids industry in Iran. Hence viscosity property, fluid loss control and shale inhibition of this polymer have been evaluated based on an international standard method of API-13-I by considering the drilling and operational priorities of the country. Then the thermal effect, salt contaminants such as sodium chloride, calcium chloride, magnesium chloride and pH tolerance effect as major pollution indicators are also investigated in relation to polymeric fluid properties. The results obtained by the tests show that furthermore polymer PHPA increases rheological properties (apparent viscosity, plastic fluidity and yield point) and it plays important role in increases in fluid loss. This polymer has also demonstrated acceptable resistance toward sodium chloride contaminants, but its efficiency decreases toward calcium and magnesium ion contaminants. The thermal tests show that polymer PHPA has high thermal stability up to 150°C. This polymer improves shale inhibition property and by encapsulation mechanism prevents dispersion of shale cuttings into the drilling fluid system as it stops any changes in fluid properties which will finally results in wellbore stability.

Keywords:

drilling fluid,
polyacrylamide,
mud contaminant,
fluid loss,
shale recovery

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: nasiriar@ripi.ir

کارایی پلی‌آکریل آمید آبکافت شده جزئی در سیالات حفاری پایه آبی

علیرضا نصیری*، مجید ولی‌زاده

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی نفت، صندوق پستی ۱۴۶۶۵-۱۹۹۸

دریافت: ۹۱/۱/۲۲، پذیرش: ۹۲/۱/۱۹

چکیده

بهبود خواص سیال حفاری به عنوان یکی از پارامترهای مهم در افزایش بازده عملیات حفاری همواره مورد توجه بوده است. از راه‌های بهبود خواص این سیال، استفاده از پلیمرهای جدید و کارآمد در ترکیب آن است. در این پژوهش، عملکرد پلی‌آکریل آمید آبکافت شده جزئی (PHPA) بررسی شده است. این پلیمر به تازگی وارد صنعت حفاری کشور شده است، ولی متاسفانه درباره عملکرد فنی آن اطلاعات جامعی وجود ندارد. شرکت‌های مصرف‌کننده در کنترل کیفی و نحوه به‌کارگیری این ماده برای فرمول‌بندی و طراحی سیال حفاری در شرایط عملیاتی با مشکلاتی مواجه‌اند. بدین منظور، خواص گرانش‌سازی و کنترل‌کنندگی از دست رفتن سیال و شیل‌ها با استفاده از این پلیمر با اولویت شرایط حفاری چاه‌های عملیاتی کشور ارزیابی شده است. در ادامه اثر دما، آلاینده‌های نمکی همچون سدیم کلرید، کلسیم و منیزیم و همچنین تغییرات pH که از عمده‌ترین شاخص‌های آلودگی به‌شمار می‌روند، بر خواص سیال پلیمری بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمون‌ها نشان می‌دهد، پلیمر PHPA ضمن افزایش و بهبود خواص رئولوژیکی سیال حفاری، در کاهش از دست رفتن سیال نیز نقش بسزایی ایفا می‌کند. همچنین، این پلیمر در برابر آلاینده نمک سدیم کلرید از مقاومت قابل قبولی برخوردار است، ولی کارایی آن در برابر آلاینده‌هایی همچون یون‌های کلسیم و منیزیم (نمک‌های کلرید کلسیم و منیزیم) کاهش می‌یابد. آزمون‌های گرمایی در دماهای مختلف نشان می‌دهد، پلیمر PHPA پایداری گرمایی زیاد تا دمای ۱۵۰°C دارد. همچنین، این پلیمر خاصیت بازدارندگی شیل بنتونیتی موجود در سیال را بهبود می‌دهد و با سازوکار کپسول‌کنندگی به عنوان عمده‌ترین شاخص این پلیمر از پخش شدن خرده‌های حفاری شیل به درون سامانه سیال حفاری جلوگیری می‌کند و مانع از تغییر خواص سیال می‌شود.

واژه‌های کلیدی

سیال حفاری،
پلی‌آکریل آمید،
آلاینده‌های گل حفاری،
از دست رفتن سیال،
بازرسی شیل

مقدمه

سیال حفاری (drilling fluid) که زمانی از آن فقط به عنوان عاملی برای حمل و انتقال خرده‌های حفاری به سطح زمین یاد می‌شد، در حال حاضر یکی از اساسی‌ترین عامل موفقیت یا شکست عملیات حفاری است. واژه گل حفاری به محیط آب یا روغنی اطلاق می‌شود که ذرات جامد در آن به حالت معلق درآمده‌اند. به دلیل نقش‌های مهم این گل در عملیات حفاری، وجود خواص معین و مطلوب در این سیال ضروری است. در مراحل مختلف عملیات حفاری ممکن است، این خواص تحت تأثیر عوامل زیرزمینی به نحو نامطلوبی دست‌خوش تغییر شوند. با توجه به اهمیت کنترل این تغییرات در عملکرد کیفی سیال حفاری، سالانه مبالغ زیادی صرف پژوهش و مطالعات مختلف درباره پیدا کردن وسایل و روش‌های مناسب برای کنترل صحیح خواص رئولوژیکی گل و تقلیل آثار عوامل زیرزمینی روی این خواص می‌شود. کیفیت عملیات حفاری پیش از هر چیز تابع عملکرد مناسب گل حفاری انتخاب شده در شرایط موجود زمین است.

از آغاز استفاده از این سامانه‌ها، حفاری دورانی (rotary drilling) با به‌کارگیری گل حفاری همراه بوده و وظیفه آن عمدتاً انتقال خرده‌های حفاری از ته چاه به سطح زمین بود. با پیشرفت روش‌های حفاری دورانی، گل‌های حفاری نیز توسعه یافته و به همین مقدار هم وظایف آنها بیشتر و حساس‌تر شد. مهم‌ترین وظایف سیال حفاری عبارت‌اند از:

- انتقال خرده‌های حفاری به خارج از چاه و تمیزسازی آن،
- کنترل فشار سازند در نتیجه ایجاد فشار هیدروستاتیکی به‌وسیله ستون سیال حفاری،
- معلق نگه‌داشتن خرده‌های حفاری به هنگام توقف گردش سیال حفاری،
- خنک کردن و روان‌سازی مته و لوله‌های حفاری،
- اندود کردن و پایدارسازی دیواره چاه،
- انتقال توان هیدرولیکی گل به تجهیزات درون چاهی و مته حفاری،
- کنترل خوردگی و
- به حداقل رساندن آسیب وارد شده به سازند بهره‌ده [۱].

پلیمرهای استفاده شده در سیال حفاری

از سال ۱۹۳۰، پلیمرها به همراه گل‌های حفاری استفاده شده‌اند. نشاسته گندم که پلیمری طبیعی است، به عنوان پرمصرف‌ترین افزودنی کنترل‌کننده از دست رفتن سیال در سیالات حفاری مصرف شده است. از آن زمان تا کنون، پلیمرها اختصاصی‌تر شده‌اند و به

همین دلیل استقبال از آنها نیز رو به افزایش نهاده است. پلیمرها، جزئی از سامانه‌های آبی سیالات حفاری محسوب می‌شوند که امروزه متداول هستند. اما بعضی از سامانه‌ها که کاملاً وابسته به پلیمر هستند، به عنوان سامانه‌های پلیمری خوانده می‌شوند.

پلیمرهای طبیعی که در گل حفاری به کار می‌روند، از پلیمر شدن مولکول‌های قندی تشکیل شده‌اند و به گروهی از ترکیبات تعلق دارند که پلی‌ساکارید گفته می‌شوند. نشاسته، پلیمری طبیعی است که از منابع گیاهی و غلات به‌دست می‌آید. در این میان، سیب‌زمینی و ذرت از منابع بسیار مهم تأمین نشاسته برای گل‌های حفاری محسوب می‌شوند.

به‌کارگیری پلیمرهای طبیعی تغییر یافته در گل‌های حفاری بسیار متداول است. سلولوز و نشاسته پلیمرهای طبیعی هستند که به کرات برای تهیه پلیمرهای طبیعی تغییر یافته استفاده می‌شوند. مشتقات تغییر یافته پلیمرهای طبیعی می‌توانند ویژگی‌های کاملاً متفاوت از پلیمر مرجع داشته باشند. برای گل‌های حفاری پلیمرهای طبیعی غیر یونی (مثل سلولوز و نشاسته) تبدیل به پلی‌الکترولیت می‌شوند. اغلب پلیمرها در آب حل نمی‌شوند، بنابراین نمی‌توان از آنها در گل‌های حفاری استفاده کرد، مگر اینکه تغییراتی در آنها حاصل شود. برای ایجاد انحلال‌پذیری در آب، پلیمرها در بعضی مواقع تبدیل به پلی‌الکترولیت می‌شوند. این تغییر شامل یک اصلاح در واحدهای تکرار شونده پلیمر است. پلی‌الکترولیت پلیمری با حل شدن در آب، پلی‌یون و یون‌های مخالف با بارهای متضاد ایجاد می‌کند. پلی‌یون بارهایی دارد که در طول زنجیر پلیمر تکرار می‌شوند. بارها، می‌توانند مثبت (در پلیمرهای کاتیونی) یا منفی (در پلیمرهای آنیونی) باشند. چند مثال از پلیمرهای کاتیونی وجود دارد، اما اغلب پلیمرهای استفاده شده در گل‌های حفاری بار منفی دارند. کارایی پلی‌الکترولیت بستگی به مواضع مختلف گروه‌های یون‌شونده روی پلیمر دارد که آن هم به غلظت پلیمر، غلظت و نحوه توزیع گروه‌های یون‌شونده، شوری و سختی و pH مایع (گل) [۲] وابسته است.

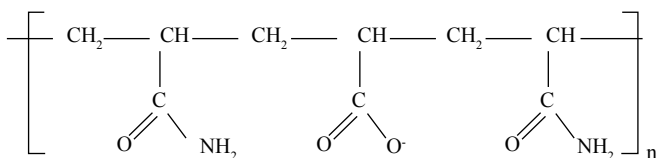
انحلال‌پذیری پلیمرها تحت تأثیر pH تغییر می‌کند. اغلب pH مقدار یونش گروه‌های فعال روی زنجیر پلیمر را معین می‌کند. از گروه‌های فعال که در پلیمرهای آبی بیشتر معمول بوده، گروه کربوکسیل است. گروه کربوکسیل یون شده یکی از مشخصات برجسته اغلب پلیمرهای آنیونی مثل PHPA، MC و صمغ زانتان است. بیشترین انحلال‌پذیری گروه کربوکسیل از pH حدود ۸/۵ تا ۹/۵ اتفاق می‌افتد. pH برابر ۸/۵ برای یون شدن و حل شدن پلیمر ضروری است. اگر مقدار زیادی سدیم هیدروکسید اضافه شود، خواص چسبندگی تا حدی کم می‌شود. اگر pH معکوس ایجاد شود، یعنی pH محلول اسیدی شود (کمتر از ۷)

گروه کربوکسیل به شکل کربوکسیلیک اسید اولیه خود برمی‌گردد و پلیمر انحلال‌پذیری خود را از دست می‌دهد [۲]. شوری (نمک‌دار بودن) نقش مهمی را در کارایی پلیمر دارد. نمک از باز شدن زنجیر پلیمر و افزایش طول آن هنگام حل شدن در آب جلوگیری می‌کند. گذشته از این پلیمر کوچک‌تر شده و به شکل کلاف درمی‌آید و انحلال‌پذیری آن نیز کاهش می‌یابد. وقتی یون‌های دو ظرفیتی مثل کلسیم و منیزیم در گل حفاری وجود داشته باشند، آثار آنها روی سامانه می‌تواند بیشتر باشد. مثل یون‌های سدیم که آب جذب می‌کنند و مانع از ترکیب آب و پلیمر می‌شوند، یون‌های کلسیم و منیزیم نیز قابلیت جذب آب بیشتری نسبت به یون سدیم دارند. این کار باعث می‌شود، جذب آب پلیمر در مجاورت آنها بسیار ناچیز باشد.

پلیمر تجاری Poly - Plus از معمول‌ترین PHPAهاست که در گل‌های حفاری استفاده می‌شود. این پلیمر متشکل از ۶۵ تا ۷۰٪ آکریل آمید و درصد باقی‌مانده، آکريلات است. محدوده وزن مولکولی آن تا ۲۰ میلیون است. Poly - Plus به عنوان پلیمر پایدارکننده شیل با خاصیت کپسول‌کنندگی ذرات جامد در سامانه‌های آب شیرین و آب نمکی (NaCl و KCl) استفاده می‌شود [۲].

استفاده از سیالات حفاری پایه آبی به عنوان جایگزینی برای سیالات حفاری پایه روغنی به‌طور فزاینده‌ای رو به افزایش است. زیرا مقررات زیست‌محیطی بسیار سخت‌گیرانه موجود، هزینه استفاده از سیالات پایه روغنی را افزایش داده است. از چالش‌های مطرح در استفاده از سیالات پایه آبی، مبحث پایدارسازی دیواره چاه و حفاری لایه‌های شیل مشکل‌زاست [۵].

در سال ۱۹۷۳، Scheuerman برای سیال حفاری با افزایش PHPA اختراعی را ثبت کرد. سامانه سیال حفاری مطرح شده در این ثبت اختراع به‌طور گسترده در حفاری چاه‌های میدین خلیج مکزیک، کانادا، آلاسکا، دریای شمال و سایر نقاط جهان استفاده می‌شود. این نوع سیال تا به امروز به عنوان یکی از مؤثرترین نوع از سیالات بازدارنده شیل مطرح است [۶]. پلیمر PHPA در دیواره داخلی چاه با سازوکار کپسول‌کنندگی به ذرات رس متصل شده و از آب‌گیری و پخش شدن آنها (که طبیعتاً باید انجام گیرد) جلوگیری می‌کند. گروه کربوکسیل آنیونی به بارهای مثبتی متصل می‌شود که در لبه‌های ذرات رس وجود دارد. این عمل باعث پایداری پوشش دیواره داخلی چاه و جلوگیری از آب‌گیری رس‌ها می‌شود. مشابه همین اثر روی خرده‌های حفاری دیده می‌شود.



طرح ۱- ساختار مولکولی پلیمر پلی‌آکریل آمید آبکافت شده جزئی (PHPA) [۲].

پلیمرهای آنیونی مشکلی مضاعف نیز با کلسیم دارند. کلسیم با گروه‌های آنیونی که روی پلیمر قرار دارند، واکنش می‌دهد. اگر چنین چیزی اتفاق بیفتد، پلیمر انبوه شده و می‌تواند از سامانه بیرون رانده شود. به همین دلیل است که در عملیات سدیم کربنات (خاکستر سود) اضافه می‌شود تا کلسیم از سامانه حذف شود. پلیمرهایی که کمی آنیونی هستند مانند صمغ زانتان و پلیمرهایی که غیریونی هستند مثل نشاسته، با کلسیم رسوب نمی‌کنند. با وجود این، پلیمرهای مزبور تحت تأثیر ویژگی‌های قوی جذب آب کلسیم قرار می‌گیرند و از کارایی آنها در مجاورت کلسیم کاسته می‌شود [۲].

ناپایداری دیواره چاه مشکلی جدی در حفاری است. در گزارش حفاری گفته شده است که ۷۵٪ از سازندها، حاوی شیل هستند و ۹۰٪ مشکلات پایداری چاه در این سازندها رخ می‌دهد. عوامل اصلی و مؤثر بر پایداری شیل‌ها مرتبط با خواص مکانیکی و عوامل فیزیکی و شیمیایی است. در این مطالعه، آثار سیالات حفاری روی پایداری شیل‌ها بررسی شده است. افزون بر این، برنامه‌ای برای گسترش و بهبود آثار سیالات حفاری پلیمری روی خواص مکانیکی و چگونگی اصلاح کارایی آنها طراحی شده است. تمام نمونه‌های شیل که تنها در معرض سیالات حفاری پلیمری قرار داده شدند، کمترین پایداری را نشان دادند. اما با استفاده از سیالات حفاری اشباع از KCl، پایداری آنها افزایش داده شد [۳، ۴].

پلی‌آکریل آمید آبکافت شده جزئی (PHPA)

پلی‌آکریل آمید آبکافت شده جزئی (PHPA) اغلب برای معرفی پلی‌آریل آمید - پلی‌آکريلات به‌کار می‌رود (طرح ۱). محصول نهایی PHPA همان پلیمری است که از پلیمر شدن آریل آمید - آکريلات حاصل می‌شود. خواص PHPA تحت تأثیر وزن مولکولی و نسبت

حفاری با شرایط چاه‌های داخل کشور اطلاعات فنی بسیار محدودی در دسترس کارشناسان مربوط است. از این رو، هدف اصلی پژوهش حاضر، مطالعه و بررسی عملکرد پلیمر PHPA و روش ارزیابی کارایی آن از جنبه‌های مختلف چون خاصیت گرانشی، کنترل از دست رفتن سیال، پایداری شیل و ارزیابی اثر آلاینده‌های نمکی و نیز تغییرات pH با توجه به گاز هیدروژن سولفید فراوان موجود در چاه و دمای زیاد آن تا 150°C (دو ویژگی مهم چاه‌های ایران) بر خواص این پلیمر در سیالات حفاری پایه آبی برای کاربرد در صنعت حفاری کشور است.

تجربی

مواد

بتنویت شاخص آزمایشگاهی مطابق با استانداردهای بین‌المللی API و OCMA، پلیمر کربوکسی متیل سلولوز با گرانشی زیاد (CMC-HV) از شرکت Lamberti، پلیمر صمغ زانتان (Xanthan Gum) با نام تجاری DUO-TEC از شرکت MI، پلی آکریل آمید آبکافت شده جزئی (PHPA) با نام تجاری Poly-Plus از شرکت MI، سدیم کلرید، کلسیم کلرید، منیزیم کلرید، پتاسیم کلرید، سدیم هیدروکسید و کلریدریک اسید از شرکت Merck، آب مقطر، آب دریا (آب نمک ۴٪) و آب اشباع از نمک تهیه شدند.

دستگاه‌ها و روش‌ها

گرانروی سنج چرخان

در این پژوهش، از گرانروی سنج چرخان مدل ۳۵ کارخانه فن استفاده شده است. گرانروی سنج چرخان از دو استوانه هم مرکز تشکیل شده است که یکی ثابت بوده و دیگری می‌چرخد [۹]. استوانه خارجی با سرعت زاویه‌ای ثابتی به گردش درمی‌آید و گشتاور مقاوم، روی استوانه توپر داخلی اعمال می‌شود. بدین ترتیب، سیال قرارگرفته در فضای حلقوی، دچار جریان برش ساده می‌شود. گشتاور مقاوم به کمک یک فنر پیچشی متصل به یک عقربه اندازه‌گیری می‌شود. مقدار انحراف عقربه به راحتی روی صفحه‌ای مدور مدرج قابل مشاهده است یا اینکه از یک دستگاه برای ثبت آن استفاده می‌شود. در گرانروی سنج چرخان موارد زیر قابل ذکر است [۹]:

الف- اندازه تنش برشی مستقیماً با درجه خوانده شده متناسب است.
ب- مقدار سرعت برش مستقیماً با سرعت چرخش محور متناسب است (برحسب rpm).

مطالعه روی شیل‌ها مشخص کرده که نسبت ۷۰ به ۳۰ واحدهای آکریل آمید به واحدهای آکريلات برای گل‌های حفاری مطلوب است. همچنین، پلیمرهایی با وزن مولکولی بیشتر بهتر از پلیمرهایی با وزن مولکولی کم شیل را احاطه می‌کنند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، آکريل آميد لازم است با سدیم آکريلات پلیمر شود تا به راحتی به حالت محلول در آب درآید. با این همه ترکیب ۱۰٪ پلی آکريلات نمی‌تواند کارایی ترکیبی با نسبت ۳۰ به ۷۰ داشته باشد. حتی در وزن‌های مولکولی تقریباً زیاد، نسبت ۳۰ به ۷۰ مهار شیل را بهتر انجام می‌دهد [۲].

در یک محیط نمکی، PHPA در ظرفیت پایداری شیل خیلی مؤثر است. گرچه غلظت پلیمر باید برای دستیابی به اثر قابل ملاحظه‌ای روی گرانشی صافی سیال افزایش داده شود. در مواردی که شوری آب زیاد باشد، PHPA به راحتی در آب آزاد آبدار نمی‌شود و پلیمر تا حدی حلقه‌ای می‌شود. این موضوع موجب کاهش گرانشی پلیمر می‌شود، ولی با توجه به آنیونی بودن پلیمر، هنوز روی نواحی فعال کاتیونی سطح چاه جذب می‌شود. کاربرد PHPA در گل‌های حفاری حاوی نمک (NaCl) به سادگی بیانگر این مطلب است که برای مشاهده آثار مشابه کپسول‌کنندگی و افزایش گرانشی سیال باید مقدار بیشتری پلیمر اضافه شود. از آنجا که گل‌های نمکی، به‌ویژه گل‌های KCl، موجب افزایش پایداری شیل می‌شوند، گل PHPA نمکی پایداری بیشتری در شیل ایجاد می‌کند. نمک یا KCl باعث پایداری زیاد شیل شده و PHPA باعث گرانشی سیال می‌شود که آن هم مقدار نفوذ سیال را به درون سازند محدود می‌کند [۷].

از اشکالات PHPA، حساسیت آن نسبت به وجود کلسیم است، به نحوی که همانند پلی آکريلات گروه‌های کربوکسیل آنیونی با کلسیم واکنش می‌دهند. این موضوع به‌ویژه در آب شیرین مشکل‌ساز است، زیرا کلسیم می‌تواند باعث رسوب پلیمر شود. در برخی از حالات این پلیمر در مجاورت کلسیم به عنوان منعقدکننده عمل می‌کند. به‌ویژه هنگامی که محتوای جامدات سیال حفاری کم است. در سامانه‌هایی که ذرات جامد زیاد است، وارد شدن کلسیم باعث انعقاد سامانه شده و در نتیجه گرانشی خیلی زیاد می‌شود [۷].

هدررفت پلیمر PHPA روی تکان‌دهنده به علت ایجاد حالت چشم ماهی، نبود روش انجام آزمایش سریع و آسان برای تعیین غلظت پلیمر PHPA در گل پمپ شده و برگشتی از چاه و همچنین آسیب دیدن سازند ناشی از به کار بردن PHPA از جمله سایر معایب این پلیمر است [۸].

از آنجا که پلیمر یادشده به تازگی وارد صنعت حفاری کشور شده است، متأسفانه از کارایی این ماده برای فرمول‌بندی و طراحی سیالات

دستگاه فیلترپرس

مقدار از دست رفتن سیال گل به وسیله دستگاه فیلترپرس بررسی و معین می‌شود. آزمون بدین ترتیب است که سرعت عبور فاز مایع گل حفاری از کاغذ صافی استاندارد در شرایط ویژه‌ای از فشار، دما، زمان و نیز ضخامت اندودی که گل در اثر از دست رفتن سیال، طی این مدت روی کاغذ صافی به‌جا می‌گذارد، اندازه‌گیری می‌شود.

اندازه‌گیری از دست رفتن سیال گل در شرایط فشار ۶۹۰ kPa (۱۰۰ psi) و دمای محیط طی مدت ۳۰ min را طبق استاندارد API (American Petroleum Institute) عصاره‌گیری می‌نامند. این اندازه‌گیری به وسیله دستگاه فیلترپرس API انجام می‌شود [۹]. همچنین در این پژوهش از pH متر رقمی، انواع سرندها (مش ۵، ۱۰ و ۳۵)، گرم‌خانه غلتان (rolling oven)، ترازوی الکتریکی و همزن الکتریکی استفاده شد.

مدل نظری استفاده شده در ارزیابی خواص سیال حفاری

مدلی که اغلب برای نشان دادن خواص جریان سیال حفاری استفاده می‌شود، مدل پلاستیک Bingham است. این مدل نشان می‌دهد، پس از اعمال نیروی اولیه لازم برای به حرکت درآمدن سیال، سرعت ثابت تنش برشی با افزایش سرعت برش مشاهده می‌شود. معادله این مدل به شکل زیر است:

$$SS = Y_p + P_v \times SR \quad (1)$$

که در آن SS تنش برشی، SR سرعت برش، Y_p نقطه تسلیم و P_v گرانیوی پلاستیک است. سهمی که گرانیوی پلاستیک در ایجاد مقاومت در برابر جریان و حرکت گل دارد، ناشی از اصطکاک مکانیکی است. اصطکاک مکانیکی در گل حفاری ممکن است، در اثر عوامل زیر به وجود آید [۱۰]:

- بین ذرات جامد موجود در گل،
- بین ذرات جامد و فاز مایعی که آنها را احاطه کرده است و
- در اثر برش‌های خود مایع.

سهمی که نقطه تسلیم در ایجاد مقاومت در برابر جریان و حرکت گل دارد، ناشی از نیروهای الکتروشیمیایی یا نیروی جاذبه درون گل است. این نیروها خود در نتیجه تجمع شارهای مثبت و منفی روی سطح ذرات جامد یا اطراف آنها به وجود می‌آید. نقطه تسلیم معیاری برای اندازه‌گیری این نیروها در شرایط دینامیک گل است و به عوامل زیر بستگی دارد [۱۱]:

- غلظت حجمی ذرات جامد گل و خواص سطحی آن.

- غلظت و نوع یون‌های موجود در فاز مایع گل یعنی جایی که ذرات جامد در آن جا پراکنده‌اند.

برای نشان دادن خواص رئولوژیکی سیالات حفاری معمولاً مدل پلاستیک Bingham به کار می‌رود. وقتی از دستگاه گرانیوی سنج چرخان مدل ۳۵ استفاده می‌شود، SR متناسب با سرعت چرخش بر حسب rpm و SS متناسب با درجه خوانده شده دستگاه است. در این حالت، معادله مدل پلاستیک Bingham به شکل زیر در می‌آید [۱۰]:

$$\theta = Y_p + P_v \times \frac{\text{rpm}}{300} \quad (2)$$

معادله (۲) نشان می‌دهد، درجه انحراف (θ) تابعی از سرعت چرخش (rpm) است. Y_p و P_v پارامترهای معادله‌اند که برای به دست آوردن مقادیر آنها کافی است، به ازای دو مقدار دلخواه از سرعت چرخش مقادیر متناظر θ اندازه‌گیری شود. سپس با داشتن دو معادله و دو مجهول، ضرایب مربوط محاسبه می‌شود. از حل معادله (۲) برای سرعت‌های ۶۰۰ و ۳۰۰، مقادیر P_v و Y_p از معادله‌های زیر به دست می‌آیند [۱۰]:

$$P_v = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (3)$$

$$Y_p = \theta_{300} - P_v \quad (4)$$

با توجه به تعریف، گرانیوی ظاهری (A_v) عبارت از گرانیوی یک سیال غیرنیوتنی در SR معادل rpm ۶۰۰ است. اگر درجه خوانده شده برای rpm = ۶۰۰ را θ_{600} و این مقادیر در معادله (۵) قرار داده شود، مقدار گرانیوی ظاهری به دست می‌آید [۱۰]:

$$A_v = 300 \times \frac{\text{dial reading}}{\text{rpm}} = 300 \times \frac{\theta_{600}}{600} = \frac{1}{2} \theta_{600} \quad (5)$$

روش‌ها

بررسی خاصیت گرانیوی پلیمر PHPA در مقایسه با پلیمرهای CMC-HV و صمغ زانتان

برای بررسی خاصیت گرانیوی پلیمرهای مختلف، سیالاتی با غلظت‌های ۱، ۲ و ۳ lb/barrel (معادل ۱، ۲ و ۳ g بر ۳۵۰ mL سیال) از سه پلیمر PHPA، CMC-HV و صمغ زانتان با آب معمولی ساخته شد. گرانیوی ظاهری هر یک از نمونه‌ها با گرانیوی سنج مدل ۳۵ اندازه‌گیری شد.

بررسی اثر غلظت PHPA بر از دست رفتن سیال

در این مجموعه از آزمون‌ها، برای بررسی اثر PHPA بر از دست رفتن سیال، پنج نمونه سیال پایه حاوی ۱۵ lb/barrel نمک پتاسیم کلرید و ۱۰ lb/barrel بنتونیت ساخته شد. سپس، به ۴ نمونه از آنها به ترتیب مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۴ lb/barrel از پلیمر PHPA اضافه شد. نمونه پنجم به عنوان نمونه فاقد پلیمر به منظور مقایسه با سیالات پلیمری در نظر گرفته شد. مقدار از دست رفتن سیال نمونه‌ها طبق روش استاندارد API با دستگاه فیلتر پرس API اندازه‌گیری شده است.

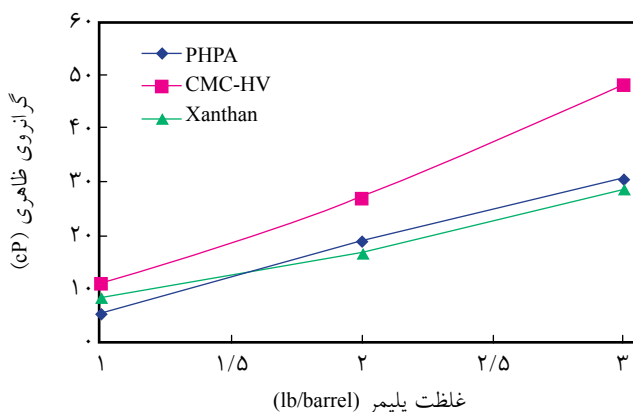
نتایج و بحث

بررسی خاصیت گرانوسازی پلیمر PHPA در مقایسه با پلیمرهای

CMC-HV و صمغ زانتان

پلی‌آکریل آمید جزئی آبکافت شده، از افزودنی‌های سیالات حفاری بنتونیتی است که به منظور پایداری شیل‌ها پیشنهاد شده است. در شرایط دما و فشار زیاد، پایداری گرمایی این پلیمر ارزیابی شد. چهار غلظت از بنتونیت (۲، ۳، ۴ و ۵٪) و پنج غلظت از PHPA (۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷٪) در آزمون‌ها استفاده شده است. با به کارگیری غلظت‌های متفاوت از پلیمر مزبور، فرمول‌بندی سیالات حفاری پایه آبی بهبود یافته است.

شایان ذکر است، مقدار جذب ذرات رس به وسیله پلیمر بر خواص رئولوژیکی سیال و کنترل از دست رفتن سیال مؤثر است [۱۲]. از این رو، برای بررسی خاصیت گرانوسازی پلیمرهای مختلف، سیالاتی با غلظت‌های ۱، ۲ و ۳ lb/barrel (معادل ۱، ۲ و ۳ g بر



شکل ۱- اثر غلظت پلیمرهای مختلف (Xanthan، CMC-HV و PHPA) بر گرانروی ظاهری در آب معمولی در دما و فشار آزمایشگاه (دمای ۲۵°C و فشار ۱ atm).

بررسی اثر تغییرات pH بر گرانروی ظاهری سیال PHPA

برای بررسی اثر تغییرات pH بر گرانروی سیال پلیمری، هفت نمونه سیال پایه شامل ۱/۵ lb/barrel از پلیمر PHPA در آب نمک سدیم کلرید ۶٪ وزنی تهیه شد. سپس، با استفاده از کلریدریک اسید و محلول سدیم هیدروکسید، pH نمونه در محدوده ۱۴-۴ تنظیم و پس از آن گرانروی ظاهری هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

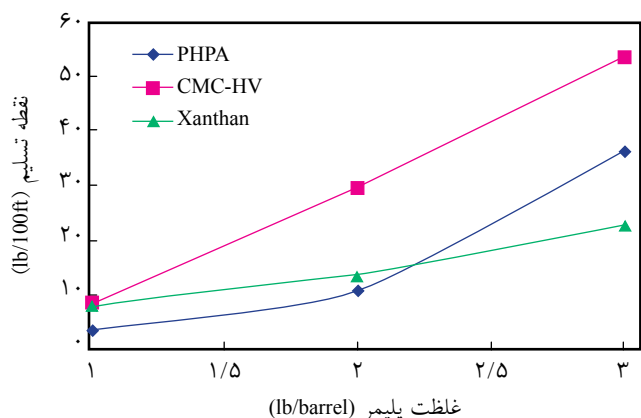
بررسی اثر دما بر گرانروی ظاهری سیال PHPA

برای ارزیابی اثر دما بر گرانروی سیال حاوی پلیمر PHPA، پنج نمونه سیال پایه حاوی ۱/۵ lb/barrel از پلیمر PHPA در آب مقطر تهیه شد. نمونه‌ها به مدت ۱۶ h به طور دینامیکی در دماهای ۲۵، ۶۵، ۹۳، ۱۲۱ و ۱۵۰°C قرار گرفتند. سپس، گرانروی ظاهری هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

بررسی اثر و نقش پلیمر PHPA بر خاصیت بازدارندگی شیل

برای بررسی اثر پلیمر PHPA بر خاصیت بازدارندگی شیل، از روش آزمون پراکنش شیل طبق استاندارد بین‌المللی صنعت نفت آمریکا (API 13-I) استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا خرده‌های شیل به ابعاد ۴-۲ mm (بین الک مش ۵ و ۱۰) از مونت‌موریلونیت تهیه و آماده شد. سپس، ۴ نمونه سیال پایه شامل ۱۵ lb/barrel نمک پتاسیم کلرید در آب مقطر ساخته و به نمونه‌ها به ترتیب مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ lb/barrel از پلیمر PHPA اضافه شد. نمونه چهارم به عنوان نمونه پایه و فاقد پلیمر در نظر گرفته شد.

در مرحله بعد، به هر چهار نمونه سیال، مقادیر یکسانی (۱۰ g) از خرده‌های شیل اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ۸ h در دمای ۲۵۰°F به طور دینامیکی در گرم‌خانه غلتان گرما داده شد. پس از اتمام زمان گرمادهی، هر یک از نمونه‌ها از الک مش ۳۵ (معادل قطر دهانه عبور داده شد تا خرده‌های بزرگ‌تر از این اندازه روی الک جمع‌آوری شود. سپس، با استفاده از ترکیب محلول آبی اشباع سدیم کلرید و آب نمک پتاسیم کلرید ۱۵٪ به نسبت ۵ به ۱، خرده‌های شیل باقی‌مانده روی الک شست و شو داده شدند تا ذرات گل چسبیده به آنها شسته شوند. در نهایت الک حاوی ذرات شیل، به منظور شستن آب نمک از سطح آنها دو تا سه مرتبه در ظرف حاوی آب معمولی فرو برده شد. پس از آن الک، به مدت ۴ h در دمای ۱۱۰°C قرار داده شد تا ذرات شیل باقی‌مانده روی آن کاملاً خشک شوند. در انتها خرده‌های شیل باقی‌مانده روی الک به دقت توزین و مقدار بازیابی شیل برای سیال محاسبه شد.



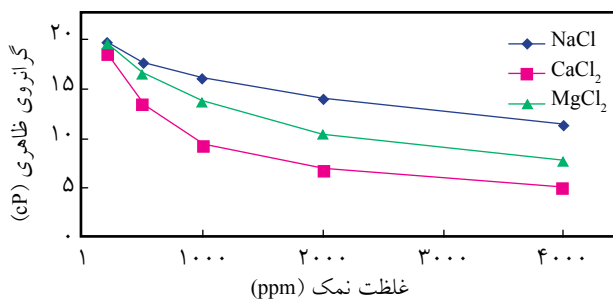
شکل ۳- اثر غلظت پلیمرهای مختلف (Xanthan، CMC-HV و PHPA) بر نقطه تسلیم در آب معمولی در دما و فشار آزمایشگاه (دمای 25°C و فشار 1 atm).

شده از سازند به درون سیال حفاری، اهمیت می‌یابد.

بررسی اثر نمک‌های مختلف بر گرانروی سیال حاوی پلیمر PHPA

در این مجموعه از آزمون‌ها، اثر غلظت‌های مختلف از سه نوع نمک سدیم کلرید، کلسیم کلرید و منیزیم کلرید بر گرانروی سیال پایه حاوی $1/5$ lb/barrel از پلیمر PHPA ارزیابی شد. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت نمک‌های مختلف، گرانروی ظاهری سیال کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش در گرانروی ظاهری به ترتیب برای نمک کلسیم کلرید بیشتر از منیزیم کلرید و سدیم کلرید است.

وجود نمک‌ها نقش مهمی را در کارایی پلیمر ایفا می‌کنند. نمک سدیم کلرید از باز شدن زنجیر پلیمر هنگام حل شدن در آب جلوگیری می‌کند. وجود یون‌های دوظرفیتی مثل کلسیم و منیزیم این مشکل را دوچندان می‌کند. یون‌های کلسیم و منیزیم حتی بیشتر از یون سدیم آب جذب می‌کنند و در نتیجه آب را از دسترس پلیمر

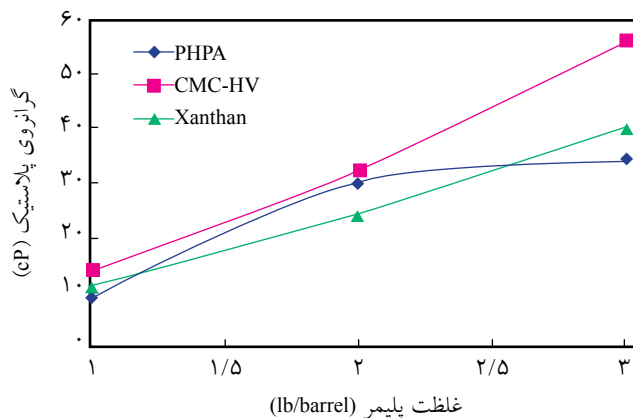


شکل ۴- اثر غلظت نمک‌های مختلف (NaCl، CaCl_2 و MgCl_2) بر گرانروی ظاهری سیال پلیمری با غلظت $1/5$ g بر 350 mL آب مقطر در دما و فشار آزمایشگاهی (دمای 25°C و فشار 1 atm).

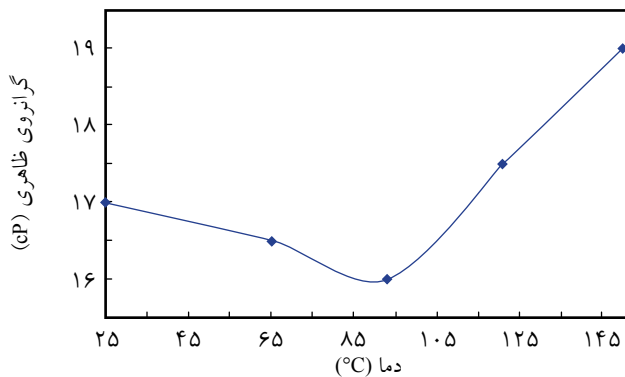
از سه پلیمر CMC-HV، PHPA و صمغ زانتان با آب معمولی ساخته شده و گرانروی ظاهری هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج در شکل ۱ آمده است.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت پلیمرهای مختلف، گرانروی ظاهری سیالات نیز افزایش یافته است. این افزایش برای پلیمر CMC-HV بیشتر و برای سایر پلیمرها تقریباً مقداری یکسان است. به‌طور کلی، افزودن هر نوع پلیمر موجب افزایش گرانروی می‌شود. اما نقش اصلی که آن ماده می‌تواند ایفا کند مهم است، به‌طوری که در عملیات حفاری نیز از CMC-HV به عنوان یک گرانروکننده قوی در عمق‌های زیاد، صمغ زانتان به عنوان گرانروکننده متوسط و مقاوم در برابر نمک‌ها و PHPA به عنوان کنترل‌کننده شیل‌ها استفاده می‌شود. همچنین در بررسی گرانروی پلاستیک و نقطه تسلیم، که نتایج آن در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است، مشخص می‌شود، تا غلظت $2/5$ lb/barrel از PHPA مقدار گرانروی پلاستیک آن نسبت به زانتان بیشتر است که با افزایش غلظت، سیر نزولی پیدا می‌کند.

سطح گرانروی پلاستیک PHPA نیز در مقایسه با CMC-HV در تمام غلظت‌ها کمتر است. درباره نقطه تسلیم نیز مشخص شد، PHPA تا غلظت 2 lb/barrel دارای بازده کمتر از دو پلیمر دیگر است. در غلظت‌های بیشتر از این ماده نقطه تسلیم نسبت به زانتان افزایش می‌یابد، اما همچنان نسبت به CMC-HV دارای نقطه تسلیم کمتری است. شایان ذکر است، پارامتر گرانروی پلاستیک مقاومت ایجاد شده ناشی از برخورد مواد جامد و نقطه تسلیم مقاومت ناشی از وجود بارهای مثبت و منفی درون سیال حفاری است که بیشتر در عملیات میدانی و در بررسی آثار افزودنی‌های شیمیایی و اثر خرده‌های وارد



شکل ۲- اثر غلظت پلیمرهای مختلف (Xanthan، CMC-HV و PHPA) بر گرانروی پلاستیک در آب معمولی در دما و فشار آزمایشگاه (دمای 25°C و فشار 1 atm).

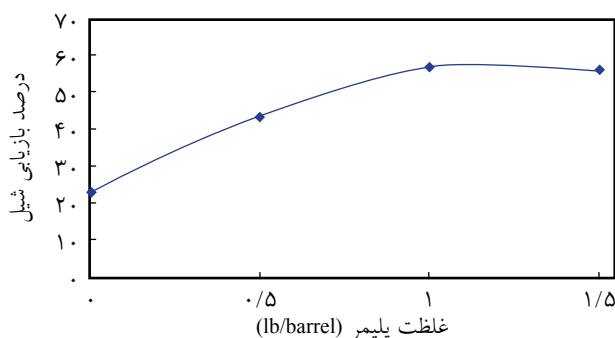


شکل ۶- تغییرات گرانروی ظاهری سیال پلیمری حاوی ۱/۵ g از PHPA بر ۳۵۰ mL آب مقطر در دماهای مختلف.

کاهش می‌یابد. با ادامه افزایش دما و ازدیاد جنبش مولکولی، امکان افزایش برخورد مونومرها زیاده‌تر می‌شود. از این رو، پایداری گرمایی و گرانروی افزایش می‌یابد. همچنین، مقدار بازیابی شیل برای سیال به کمک معادله (۶) محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$(6) \quad \text{وزن اولیه خرده‌های شیل} \times 100 = \frac{\text{وزن خرده‌های شیل پس از گرما}}{\text{وزن اولیه خرده‌های شیل}} = \text{درصد بازیابی شیل}$$

نتایج حاصل از این آزمون در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، مقدار بازیابی شیل در سیالات حاوی پلیمر PHPA به مراتب بیشتر از سیال پایه است. همچنین، بیشترین مقدار بازیابی شیل در غلظت ۱ lb/barrel از پلیمر حاصل شده است. در تحلیل عملکرد PHPA می‌توان گفت، این پلیمر به علت داشتن گروه کربوکسیل آنیونی به بارهای مثبتی که در لبه‌های ذرات رس در دیواره داخلی چاه و نیز خرده‌های حفاری وجود دارد، متصل می‌شود تا به وسیله سازوکار کپسول‌کنندگی از آب‌گیری و پخش شدن آنها (که طبیعتاً باید انجام گیرد) جلوگیری شود.



شکل ۷- اثر غلظت‌های مختلف پلیمر PHPA بر مقدار بازیابی شیل در دمای آزمایشگاه (۲۵°C) و فشار ۶۹۰ kPa (۱۰۰ psi).

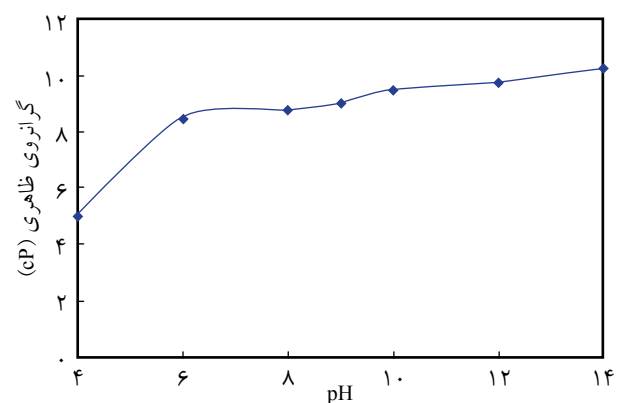
دور ننگه می‌دارد. پلیمرهای آنیونی مشکل مضاعفی نیز با کلسیم و منیزیم دارند. این ترکیبات با گروه‌های آنیونی که روی پلیمر قرار دارند واکنش می‌دهند و پلیمر انبوه شده می‌تواند از سامانه بیرون رانده شود. این موضوع، دلیل اصلی کاهش گرانروی پلیمر PHPA در مجاورت نمک‌هاست. برای رفع این مشکل در صنعت معمولاً به سیالات حفاری سدیم کربنات (خاکستر سود) اضافه می‌شود تا کلسیم و منیزیم حذف شوند.

بررسی اثر تغییرات pH بر گرانروی ظاهری سیال PHPA

نتایج بررسی اثر تغییرات pH بر گرانروی سیال پلیمری در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود، با افزایش pH مقدار گرانروی ظاهری نیز افزایش می‌یابد. pH سیالات حفاری به منظور کنترل خوردگی معمولاً بین ۹/۵ تا ۱۰ تنظیم می‌شود. از این رو مشاهده می‌شود، پلیمر PHPA در این pH به علت جذب بهتر در آب گرانروی مناسبی دارد. همچنین مشخص می‌شود، این پلیمر در برابر آلودگی‌های قلیایی همچون سیمان خواص رئولوژی خود را حفظ می‌کند.

بررسی اثر دما بر گرانروی ظاهری سیال PHPA

نتایج ارزیابی اثر دما بر گرانروی سیال حاوی پلیمر PHPA، در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود، گرانروی ظاهری سیال با افزایش دما تا ۹۳°C به تدریج کاهش می‌یابد، ولی با افزایش دما از ۹۳ تا ۱۵۰°C مقدار گرانروی ظاهری افزایش می‌یابد. علت این تغییر در رئولوژی می‌تواند ناشی از آن باشد که در دمای کمتر از ۹۳°C برخی از پیوندهای ضعیف در اثر گرما شکسته شده و گرانروی



شکل ۵- اثر تغییرات pH بر گرانروی ظاهری سیال پلیمری حاوی ۱/۵ g از PHPA بر ۳۵۰ mL آب نمک سدیم کلرید ۶٪ در دما و فشار آزمایشگاهی (دمای ۲۵°C و فشار ۱ atm).

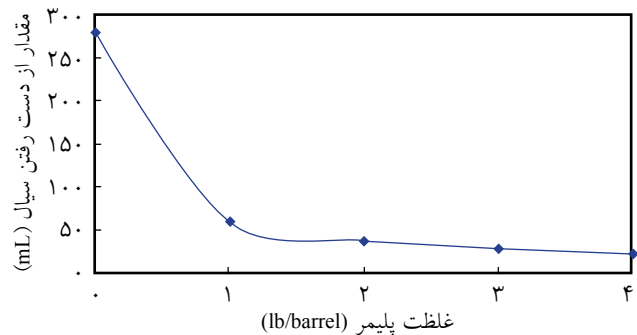
بیشتر (خاصیت گرانش‌سازی) را در مقایسه با پلیمر صمغ زانتان دارد. پلیمر PHPA در برابر آلایندگی نمک سدیم کلرید خواص رئولوژیکی خود را تقریباً حفظ می‌کند. اما، این پلیمر در غلظت‌های زیاد نمک‌های کاتیون دو ظرفیتی (کلسیم و منیزیم) خواص رئولوژیکی خود را تا اندازه‌ای از دست می‌دهد که این پدیده به علت رسوب پلیمر در مجاورت غلظت زیاد کاتیون‌های کلسیم و منیزیم است. نتایج آزمایش اثر pH بر خواص سیال نشان می‌دهد، با افزایش pH سیال عملکرد پلیمر بهبود می‌یابد و خواص رئولوژیکی بهتری نشان می‌دهد. افزایش دما تا 150°C ، اثر مخربی بر خواص رئولوژیکی سیال پلیمری ندارد و پلیمر قابلیت حفظ خواص را تا دماهای زیاد دارد. این ویژگی منحصر به فرد موجب می‌شود تا از این پلیمر بتوان در حفاری چاه‌های عمیق با دما و فشار ته‌چاهی زیاد استفاده کرد.

پلیمر PHPA، به علت افزایش گرانش‌سازی از دست رفتن سیال و همچنین خاصیت کپسول‌کنندگی خرده‌های شیل موجب افزایش خاصیت بازدارندگی سیال حفاری می‌شود. با استفاده از این پلیمر در کنار نمک پتاسیم کلرید می‌توان ضمن افزایش پایداری لایه‌های شیل مشکل‌زا، با حداقل مشکلات حفاری از پراکنش خرده‌های شیل حفاری شده نیز به درون سامانه سیال جلوگیری کرد. استفاده از پلیمر PHPA به تنهایی خود باعث کاهش از دست رفتن سیال حفاری می‌شود. بنابراین، پلیمر مزبور علاوه بر داشتن خاصیت گرانش‌سازی و پایدارکنندگی شیل، می‌تواند به عنوان کاهنده از دست رفتن سیال حفاری استفاده شود.

از آنجا که کارشناسان سیالات حفاری بیشتر به خواص ماکروسکوپی همچون تغییرات گرانش‌سازی، از دست رفتن سیال و چگالی توجه دارند و به وسیله این پارامترها نتایج و ویژگی‌های سیال حفاری را بررسی می‌کنند، شایسته است برای بررسی‌های میکروسکوپی، تحلیل چرایی و سازوکارهای عملکرد پلیمرها در سیالات حفاری و بهینه‌سازی ساختار آنها از جمله PHPA، متخصصان پلیمر پژوهش‌های کامل‌تری انجام دهند.

مراجع

1. Darley H.C.H. and Gary G.R., *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*, 5th ed., Gulf professional, USA, 1988.
2. MI-Drilling Fluid Engineering Manual, Chapt. 6, Polymer Chemistry and Applications, 1998.
3. Liu X., Luo P., Liu H., Liang D., and Luo F., Keeping Shale



شکل ۸- اثر غلظت‌های مختلف از پلیمر PHPA بر مقدار از دست رفتن سیال بنتونیتی در دمای آزمایشگاه (25°C) و فشار 690 kPa (100 psi).

بررسی اثر غلظت PHPA بر از دست رفتن سیال

در این مجموعه از آزمون‌ها برای بررسی اثر PHPA بر از دست رفتن سیال، پنج نمونه سیال پایه حاوی 15 lb/barrel نمک پتاسیم کلرید و 10 lb/barrel بنتونیت ساخته شد. سپس به ۴ نمونه از آنها به ترتیب مقادیر ۱، ۲، ۳ و 4 lb/barrel از پلیمر PHPA اضافه شد. نمونه پنجم به عنوان نمونه فاقد پلیمر به منظور مقایسه با سیالات پلیمری در نظر گرفته شد. مقدار از دست رفتن سیال نمونه‌ها طبق روش استاندارد API با دستگاه فیلترپرس API اندازه‌گیری شده که نتایج آن در شکل ۸ آمده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود، سیالات حاوی پلیمر PHPA از دست رفتن سیال به مراتب کمتری از سیال پایه فاقد پلیمر دارند. همچنین با افزایش غلظت پلیمر، مقدار از دست رفتن سیال نیز کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

افزودن پلیمر PHPA به سیال حفاری موجب تقویت خواص رئولوژیکی (گرانش‌زایی، گرانش‌زایی، گرانش‌زایی و نقطه تسلیم) سیال می‌شود. از این رو، پلیمر مزبور قابلیت ایجاد سطح رئولوژی

- Formation Stability by Optimizing Drilling Fluid in Yangta Oil Field Western China, SPE 13313-MS, *International Petroleum Technology Conference*, Doha, Qatar, 7-9 December, 2009.
4. Kumar S. and Kachari J., Use of KCL-Polymer Clouding Out Polyol Drilling Fluid in Combating High Pressure in Deep Exploratory Wells of Assam Filed, SPE 128849-MS, *Society of*

- Petroleum Engineers Oil and Gas India Conference and Exhibition*, Mumbai, India, 20-22 January, 2010.
5. Guerrero X., Guerrero M., and Warren B., Use of Amine/PHPA System to Drill High Reactive Shales in the Orito Field in Colombia, SPE 104010-MS, *First International Oil Conference and Exhibition in Mexico*, Cancun, Mexico, 31 August-2 September, 2006.
 6. Hale A.H. and Mody F.K., Partially Hydrolyzed Polyacrylamide (PHPA) Mud Systems for Gulf of Mexico Deepwater Prospects, SPE 25180-MS, *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, New Orleans, Louisiana, 2-5 March, 1993.
 7. Carico R.D., and Bagshaw F.R., Description and Use of Polymers Used in Drilling, Workover and Completions, SPE 7747, *SPE Production Technology Symposium*, Hobbs, New Mexico, 30-31 October, 1978.
 8. Liao W.A. and Siems D.R., Adsorption Characteristics of PHPA on Formation Solids, SPE 19945-MS, *SPE/IADC Drilling Conference*, Houston, Texas, 27 February-2 March, 1990.
 9. Soltaniyan H., *Use of Polymer and Biopolymer Mud in Drilling Opration*, Tehran University, Chapt. 4 and 5, 2000.
 10. Walter R., *Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluid*, Gulf Professional, 1953.
 11. Annis Max R. and Smith Martin V., *Drilling Fluids Technology*, Revised ed., August 1996.
 12. Kelessidis V.C., Zografou M., and Chatzistamou V., Optimization of Drilling Fluid Rheological and Fluid Loss Properties Utilizing PHPA Polymer SPE, *18th Middle East Oil and Gas Show and Conference (MEOS) (SPE 164351-MS)*, International Exhibition Centre, Manama, Bahrain, 10 - 13 March, 2013.
 13. Standard Procedure for Testing Drilling Fluids, API Recommended Practice 13-I, September 1988.