

# ارزیابی عملکرد یک پایدارساز شیلی پایه آمینی جدید در سیالات حفاری پایه آبی

پژمان براتی<sup>۱</sup>، خلیل شهبازی<sup>۱\*</sup>، مصیب کمری<sup>۲</sup> و محمد کمال قاسم العسگری<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

۲- ارزیابی مخازن، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۱۶

## چکیده

ناپایداری و ریزش دیواره چاه در حین حفاری سازندهای شیلی یکی از دردسرسازترین و هزینه‌برترین اتفاقاتی است که مهندسان حفاری با آن مواجه هستند. از جمله تلاش‌های اولیه جهت کنترل این ناپایداری‌ها، استفاده از افزودنی‌های مناسب در سیالات حفاری پایه آبی می‌باشد. پژوهش حاضر با هدف معرفی یک افزودنی پایه آمینی جدید با نام تالوآمین اتوکسیله، در سیالات حفاری و به منظور کاهش تورم و افزایش پایداری سازندهای شیلی انجام گرفته است. خصوصیات بازدارندگی تورم شیلی تالوآمین اتوکسیله با استفاده از آزمون‌های مختلف با انواع شرایط محیطی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بنتونایت در محیط‌های حاوی تالوآمین اتوکسیله توانایی جذب آب و هیدراته شدن را ندارد، و همچنین تالوآمین اتوکسیله سبب کاهش تورم ذرات بنتونایت و مانع متلاشی شدن کندهای حفاری در محیط‌های آبی خواهد شد. از طرف دیگر، تالوآمین اتوکسیله دارای عملکرد قابل مقایسه در برابر پتاسیم کلراید به عنوان یک پایدارساز شیلی رایج در صنعت حفاری می‌باشد. تالوآمین اتوکسیله همچنین سازگاری مناسبی با دیگر افزایش‌دهنده‌های رایج در سیالات حفاری دارد. در ساختار تالوآمین گروه‌های آمینی وجود دارد که توانایی برقراری پیوندهای هیدروژنی با سطح صفحات ذرات بنتونایت را دارند که منجر به کاهش میزان جذب آب بر این سطوح گردیده است که در نهایت سبب کاهش در میزان تورم ذرات بنتونایت می‌گردد.

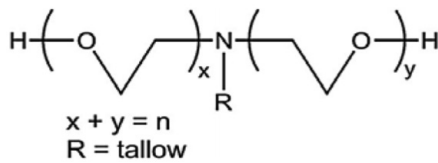
**کلمات کلیدی:** پایدارساز شیلی، تالوآمین اتوکسیله، تورم‌سنج خطی دینامیکی، سیالات حفاری، پیوند هیدروژنی.

## مقدمه

سیالات پایه آبی با مشکل تورم و فروپاشی مواجه هستند. این اتفاق منجر به گشادشدگی چاه‌ها، گیر رشته و کاهش بازده حفاری می‌شود [۱ و ۲]. از این رو مهندسان حفار همواره به دنبال کنترل تورم لایه‌های شیلی زیرزمینی هستند و به این منظور از سیالات حفاری پایه نفتی استفاده می‌کنند. این

شیل‌ها بخش عظیمی از سازندهای زیرزمینی را تشکیل می‌دهند. این گونه از سنگ‌ها به علت دارا بودن کانی‌های رسی فعال در صورت تماس با

تعداد مشخصی از واحدهای اتیلن اکساید<sup>۱۶</sup> می‌باشد.



شکل ۱ ساختار تئوری تالوآمین اتوکسیله [۷].

نوع پلی‌آمینی که در این مطالعه بررسی شده است، دارای تعداد ۱۵ واحد اتیلن اکساید در هر مولکول تالو آمین اتوکسیله می‌باشد و با نام تجاری KETALO 15 شناخته می‌شود. به علت وجود گروه آمینی در این ساختار، تالوآمین اتوکسیله ماهیتاً کاتیونی می‌باشد. جدول مشخصات تالوآمین اتوکسیله مورد استفاده در این مطالعه، در جدول ۱ آمده است. این پلی‌آمین هم‌اکنون در ایران به مقدار انبوه تولید می‌شود و از لحاظ تامین ماده جهت انجام عملیات حفاری مشکلی وجود ندارد. بنتونایت استفاده شده در آزمایشات از شرکت سیالات حفاری پارس، تهران، ایران، تهیه گردید. کنده‌های حفاری استفاده شده از سازند آسماری میدان نفتی مارون در جنوب غربی ایران، چاه شماره ۳۲۲، عمق ۳۴۴۶ m تهیه گردید. مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی بنتونایت و کنده‌های حفاری مورد استفاده، بر طبق روش API تعیین گردید [۸] که به ترتیب ۶۳ و ۲۶ میلی‌اکووالان بر g ۱۰۰ می‌باشد. پتاسیم کلراید و پتاسیم هیدروکسید از شرکت مرک آلمان و مواد ساخت سیالات حفاری نیز از شرکت سیالات حفاری پارس، تهران<sup>۱۷</sup>، ایران تامین گردید.

نوع از سیالات حفاری، نسبت به سیالات حفاری پایه آبی گران‌تر هستند و اثرات تخریبی شدیدتری نیز بر محیط زیست خواهند داشت [۳ و ۴]. گونه‌های دیگر از سیالات حفاری که مورد توجه مهندسان حفار می‌باشد، سیالات حفاری نمکین<sup>۱</sup> می‌باشند. این نوع از سیالات حفاری دارای نمک‌های تک ظرفیتی (مانند سدیم و پتاسیم کلراید) و یا نمک‌های دو ظرفیتی (مانند کلسیم کلراید) هستند. در این نوع از سیالات، به منظور داشتن یک قدرت بازدارندگی مطلوب از مقادیر بالای نمک استفاده می‌گردد که علاوه بر داشتن اثرات تخریبی بر محیط زیست، بر عملکرد دیگر افزایش‌دهنده‌های سیالات حفاری نیز تاثیر منفی خواهند داشت [۵ و ۶]. اخیراً آمین‌ها<sup>۲</sup> و مشتقات آنها، به دلیل داشتن توانایی کنترل تورم لایه‌های شیلی و همچنین گسترده‌ی خصوصیات قابل تطبیق با هر نوع شرایط حفاری، مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. در این پژوهش خصوصیات ضد تورمی تالوآمین اتوکسیله<sup>۳</sup> بر روی کانی‌های رسی و بنتونایت (با درصد مونتموریلونایت بالا)، با استفاده از آزمون‌های بازدارندگی تورم بنتونایت<sup>۴</sup>، رسوب بنتونایت<sup>۵</sup>، سازگاری<sup>۶</sup> با دیگر افزایش‌دهنده‌های سیالات حفاری، بازآوری کنده‌های حفاری<sup>۷</sup>، تورم‌سنجی خطی دینامیکی<sup>۸</sup>، ترشوندگی<sup>۹</sup>، جذب آب هم‌دما<sup>۱۰</sup> و پتانسیل زتا<sup>۱۱</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان مکانیزم احتمالی عملکرد این افزایش‌دهنده با استفاده از نتایج حاصل از آزمون‌ها و با توجه به ساختار شیمیایی آن، بیان گردیده است.

## روش کار

### مواد مصرفی

تالوآمین اتوکسیله با نام شیمیایی تالوآمین پلی‌اتیلن گلاکول اتر<sup>۱۲</sup> (CAS No. 61791-26-2) از شرکت صنایع شیمیایی کیمیاگران امروز<sup>۱۳</sup> تهیه گردید. ساختار تئوری این آمین در شکل ۱ ارائه شده است [۷]. این نوع پلی‌آمین<sup>۱۴</sup> با نام تجاری KETALO شناخته می‌شود و یک سورفکتانت<sup>۱۵</sup> غیر یونی با

1. Salty Drilling Fluids
2. Amines
3. Tallow Amine Ethoxylate
4. Bentonite Hydration Inhibition
5. Bentonite Sedimentation
6. Compatibility
7. Drill Cutting Recovery
8. Dynamic Linear Swelling
9. Wettability
10. Isothermal Water Adsorption
11. Zeta Potential
12. Tallow Amine Polyethylene Glycol Ether
13. Kimyagaran Emrooz Chemical Industries Company
14. Polyamine
15. Surfactant
16. Ethylen Oxide (EO)
17. Pars Drilling Fluid (PDF) Company

جدول ۱ خصوصیات تالوآمین اتوکسیله (ارسال شده از آزمایشگاه کنترل کیفیت شرکت صنایع شیمیایی کیمیاگران امروز).

تالوآمین اتوکسیله	محصول
مایع قهوه‌ای رنگ	شکل ظاهری در ۲۵ °C
۹/۸	pH
۹۱۰/۷	وزن مولکولی (g/mol)
۱/۰۲۳۶	وزن مخصوص در ۲۵ °C
-۷	نقطه انجماد/ذوب (°C)
بیشتر از ۲۶۰	نقطه جوش (°C)
۶۱/۶	مقدار آمین کلی <sup>۱</sup> (میلی گرم پتاسیم هیدروکسید بر گرم)
۰/۰۸	مقدار آب (wt%)
محلول	انحلال در آب

شرکت فن اندازه‌گیری شد. همچنین میزان قدرت بازدارندگی تالوآمین اتوکسیله (در غلظت ۲ درصد وزنی) با پتاسیم کلراید که یکی از رایج‌ترین پایدارسازهای شیلی مورد استفاده در صنعت حفاری می‌باشد، مقایسه گردید.

#### آزمون رسوب بنتونایت

به منظور اندازه‌گیری میزان ناپایداری کانی‌های رسی در محیط‌های بازدارنده از این تست بهره برده می‌شود. در این آزمایش به محلول‌های آبی از تالوآمین اتوکسیله (با غلظت‌های ۰ تا ۳ درصد وزنی)، مقدار ۳ درصد وزنی پودر بنتونایت اضافه گردید و بعد از مخلوط کردن، درون لوله‌های آزمایش (طول داخلی ۱۴۵ mm و قطر داخلی ۱۰ mm) ریخته شد و به حالت سکون و عمود رها گردید. بعد از گذشت ۲۴ hr یک سطح قابل مشاهده و واضح بین رسوب و روآبه<sup>۹</sup> تشکیل شد که با اندازه‌گیری فاصله بین این سطح و سر لوله (h) و تقسیم آن بر طول داخلی لوله (H)، نسبت h/H بر حسب غلظت‌های مختلف تالوآمین اتوکسیله رسم گردید.

#### روش انجام آزمایشات

##### آزمون بازدارندگی تورم بنتونایت

به منظور ارزیابی قدرت بازدارندگی تالوآمین اتوکسیله در مقابل هیدراته شدن کانی‌های رسی در سیالات حفاری از این آزمون استفاده گردید. در این آزمون ابتدا محلول‌های آبی از تالوآمین اتوکسیله با غلظت‌های ۰ تا ۳ درصد وزنی به وسیله همزن مغناطیسی آماده گردید و سپس مقدار ۱۰ درصد وزنی پودر بنتونایت (به عنوان نمونه‌ای از یک کانی رسی متورم شونده) به هر یک از آنها اضافه شد. سپس با استفاده از همزن به مدت ۳۰ min با سرعت ۳۰۰۰ rpm مخلوط گردید. پس از گذشت ۲۴ hr در شرایط محیطی، با استفاده از دستگاه گرانروی‌سنج دوام‌مدل ۳۵<sup>۲</sup> ساخت شرکت فن<sup>۳</sup> و با استفاده از روابط زیر مشخصات رئولوژیکی آنها اندازه‌گیری و محاسبه گردید [۹]:

$$AV(cp) = \frac{\theta_{600}}{2} \quad (1)$$

$$PV(cp) = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (2)$$

$$YP\left(\frac{lb}{100ft^2}\right) = \theta_{300} - PV \quad (3)$$

در این روابط، به ترتیب AV<sup>۴</sup>، PV<sup>۵</sup> و YP<sup>۶</sup> به معنای ویسکوزیته ظاهری، ویسکوزیته پلاستیک و نقطه تسلیم می‌باشد. در پایان میزان افت صاف‌آب<sup>۷</sup> در دما و فشار پایین توسط دستگاه سنجش افت صاف‌آب یا فیلتر پرس دما و فشار پایین<sup>۸</sup> ساخت

1. Total Amine

2. 35SA Rotational Viscometer

3. Fann Instrument Company

4. Apparent Viscosity

5. Plastic Viscosity

6. Yield Point

7. Filtration Volume

8. Low Pressure – Low Temperature (LPLT) Filter Press

9. Supernatant

رها می‌گردد. سپس گرانروی سنج با سرعت ۳ rpm مجدداً چرخانده می‌شود و بیشترین انحراف عقربه به عنوان استحکام ژل ۱۰ s و همچنین ۱۰ min ثبت می‌شود.

#### آزمون بازیابی کنده‌های حفاری

به منظور ارزیابی تاثیر افزودن تالوآمین اتوکسیله به بهبود میزان بازیابی کنده‌های حفاری در سیالات حفاری مختلف (جدول ۲) از این آزمون طبق پروسه حفاری سایزبندی شده (دارای اندازه بین ۲ الی ۴ mm) API [۸] استفاده گردید. در این آزمون ۱۰ g کنده به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۷۰ °C، در تماس با سیال مورد آزمایش قرار گرفت. سپس میزان بازیابی کنده‌های حفاری (با سایز بیشتر از ۰/۵ mm) طبق رابطه ۴ محاسبه گردید. در این آزمون کنده‌های حفاری مورد استفاده به مدت ۲۴ hr در دمای ۱۰۵ °C (قبل و بعد از تماس با سیال مورد آزمایش) خشک شده بودند.

$$\%R = \frac{Iw - Fw}{Iw} \times 100 \quad (4)$$

در این معادله، R به معنایی میزان بازآوری<sup>۱</sup>، Iw و Fw به ترتیب به معنای وزن‌های اولیه<sup>۷</sup> و ثانویه<sup>۸</sup> می‌باشند.

عملکرد این پلی‌آمین با پتاسیم کلراید نیز مقایسه شد.

#### آزمون سازگاری با دیگر افزایش‌دهنده‌های رایج سیالات حفاری

به منظور بررسی سازگاری تالوآمین اتوکسیله با دیگر افزایش‌دهنده‌های رایج در سیالات حفاری، دو نوع سیال حفاری با ترکیب‌های اشاره شده در جدول ۲ تهیه گردید و سپس اثر افزودن تالوآمین اتوکسیله (با غلظت ۲ درصد وزنی) بر خواص رئولوژیکی آنها بررسی شد. در این آزمون، سیالات حفاری به مدت ۴ hr در دمای ۷۰ °C درون کوره غلظان<sup>۱</sup> (با سرعت ۲۲ rpm) قرار داده شدند و سپس خواص رئولوژیکی که شامل ویسکوزیته ظاهری (AV)<sup>۲</sup>، ویسکوزیته پلاستیک (PV)<sup>۳</sup> و نقطه واروی (YP)<sup>۴</sup> می‌باشند و میزان افت صاف‌آب آنها به ترتیب در دماهای ۵۵ و ۴۳ °C همانند روش اشاره شده در بخش آزمون بازدارندگی تورم بنتونایت، تعیین گردید. به منظور اندازه‌گیری مقدار استحکام ژله‌ای<sup>۵</sup> (GS) ۱۰ s و ۱۰ min، ابتدا سیال درون ظرف گرانروی سنج دوار با سرعت ۶۰۰ rpm به مدت ۶۰ s چرخانده می‌شود و سپس به مدت ۱۰ s و همچنین ۱۰ min به حالت سکون

جدول ۲ ترکیب سیالات حفاری مورد استفاده در آزمون سازگاری با دیگر افزایش‌دهنده‌های رایج سیالات حفاری.

مواد	سیال حفاری ساده (پایه)	سیال حفاری کامل	مواد	سیال حفاری ساده (پایه)	سیال حفاری کامل
آب مقطر (mL)	۴۵۰ (g)	۴۵۰ (g)	Barite	۴۸ (g)	۴۸ (g)
PAC-LV (g)	۲/۵۷ (g)	۲/۵۷ (g)	KOH	۹ =pH	۹ =pH
Starch HV (g)	۱۰/۲۸ (g)	۱۰/۲۸ (g)	PHPA	۰ (g)	۱/۱۴ (g)
XC-Polymer (g)	۱/۵۴ (g)	۱/۲۸ (g)	PAC-R	۰ (g)	۱/۲۸ (g)
Anti-Foam (ml)	۰/۲ (g)	۰/۲ (g)	KCl	۰ (g)	۲۱
Bactericide (g)	۰/۵ (g)	۰/۵ (g)	-	-	-

- Rolling Oven
- Apparent Viscosity
- Plastic Viscosity
- Yield Point
- Gel Strength
- Recovery
- Initial Weight
- Final Weight

### آزمون تورم‌سنجی خطی دینامیکی

این نوع کانی‌ها در برابر تورم می‌شود. به این منظور سوسپانسیون‌هایی حاوی بنتونایت (غلظت ۰/۵ درصد وزنی) و تالوآمین اتوکسیله (غلظت‌های ۰ الی ۳ درصد وزنی) تهیه گردید و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری توزیع پتانسیل زتا<sup>۱</sup> مدل Zetasizer Nano ZS، مقدار پتانسیل زتای این سوسپانسیون‌ها اندازه‌گیری شد.

### نتایج و بحث

#### آزمون بازدارندگی تورم بنتونایت

اثر افزودن تالوآمین اتوکسیله در غلظت‌های مختلف بر خواص رئولوژیکی سوسپانسیون بنتونایت - آب شامل PV، AV و YP و همچنین میزان افت صاف‌آب صافی، توسط آزمون بازدارندگی تورم بنتونایت بررسی گردید. در غیاب تالوآمین اتوکسیله، بنتونایت به خوبی در محیط آبی هیدراته شد و خواص رئولوژیکی به میزان زیاد افزایش یافت (شکل ۲). از طرف دیگر نیز میزان صاف‌آب عبوری سوسپانسیون بنتونایت به شدت کاهش یافته است. این کاهش در میزان صاف‌آب عبوری به علت هیدراته شدن و ورقه ورقه شدن شدید ذرات بنتونایت می‌باشد که منجر به ایجاد یک گل مناسب با میزان تراوایی پایین شده است. هنگامی که مقدار اندکی تالوآمین اتوکسیله (غلظت ۰/۵ درصد وزنی) به محیط افزوده شد، بنتونایت به خوبی هیدراته نشد. این اتفاق منجر به کاهش خواص رئولوژیکی، و افزایش مقدار صاف‌آب عبوری گردید. با افزایش غلظت تالوآمین اتوکسیله به ۲ درصد وزنی، فرآیند کاهش خواص رئولوژیکی و افزایش میزان صاف‌آب عبوری سوسپانسیون بنتونایتی نیز تسریع پیدا کرده است.

به منظور اندازه‌گیری میزان تورم خطی<sup>۱</sup> قرص‌های بنتونایتی<sup>۲</sup>، که در تماس با سیالات مختلف مورد آزمایش قرار داشت از دستگاه تورم‌سنج خطی دینامیکی<sup>۳</sup> استفاده گردید. در این آزمون، قرص‌های بنتونایتی با وزن ۱۰ g (قطر ۲۸/۳ mm) و تحت فشار ۴۰۰۰ psi (به مدت ۶ min) توسط دستگاه قرص‌ساز<sup>۴</sup> تهیه شدند. سپس قرص‌های بنتونایتی تهیه شده درون دستگاه تورم‌سنج خطی دینامیکی به مدت ۴۰۰۰ min در تماس با سیال مورد آزمایش قرار داده شدند و میزان افزایش ضخامت آنها با استفاده از ضخامت‌سنج<sup>۵</sup> ثبت گردید. سپس افزایش ضخامت قرص‌های بنتونایتی به درصد تورم (نسبت افزایش ضخامت قرص بنتونایتی به ضخامت اولیه آن) تبدیل گردید.

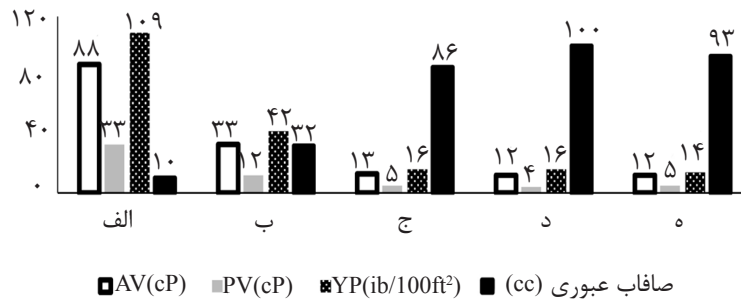
#### آزمون ترشوندگی

از آنجایی که برخی از پایدارسازهای شیلی می‌توانند با جذب روی سطح کانی‌های رسی، خصوصیات ترشوندگی سطوح را تغییر دهند و سبب کاهش خاصیت آب‌دوستی<sup>۶</sup> آنها گردند [۵]، در نتیجه تاثیر جذب تالوآمین اتوکسیله روی خصوصیات ترشوندگی سطوح ذرات بنتونایت مورد بررسی قرار گرفت. در این روش از شیوه معرفی شده توسط آقای وو<sup>۷</sup> [۱۰] استفاده گردید. در این روش، اسلایدهای شیشه‌ای آغشته به یک لایه خشک شده از مخلوط بنتونایت (غلظت ۲ درصد وزنی) و تالوآمین اتوکسیله (غلظت‌های ۰ و ۲ درصد وزنی) درون دستگاه تنسیومتر قرار داده شد و میزان زاویه تماس<sup>۸</sup> "قطره آب هوا - سطح اسلاید شیشه‌ای"، در شرایط محیطی اندازه‌گیری گردید.

#### آزمون پتانسیل زتا

جذب پایدارسازهای شیلی بر روی سطح کانی‌های رسی سبب کاهش بار سطحی این صفحات می‌گردد و میزان آب‌گریزی<sup>۹</sup> سطوح را افزایش می‌دهد که در نهایت منجر به پایداری و مقاومت

1. Linear Swelling
2. Bentonite Wafers
3. Dynamic Linear Swell-meter
4. Hydraulic Compactor
5. Dial Indicator
6. Hydrophilic Property
7. Wu
8. Hydrophobicity
9. Zeta Potential Analyzer



شکل ۲ تاثیر تالوآمین اتوکسیله و پتاسیم کلراید بر روی خواص رئولوژیکی (شامل AV، PV و YP) و میزان صافاب عبوری سوسپانسیون‌های بنتونایتی، الف) آب مقطر، ب) ۰/۵ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله، ج) ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله، د) ۲ درصد وزنی پتاسیم کلراید، ه) ۳ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله.

شده است، یک سوسپانسیون پایدار تشکیل نشده است، و تجمع<sup>۱</sup> و رسوب<sup>۲</sup> بنتونایت رخ داده است. با افزایش غلظت تالوآمین اتوکسیله در محیط به میزان ۲ درصد وزنی، قدرت بازدارندگی محیط افزایش یافته و میزان تجمع ذرات بنتونایت بیشتر شده است. با مقایسه نتایج بین غلظت‌های ۲ و ۳ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله این نتیجه برمی‌آید که افزایش غلظت تالوآمین اتوکسیله به مقادیر بیشتر از ۲ درصد وزنی کمک چندانی به افزایش توان بازدارندگی محیط (ناپایداری ذرات بنتونایت) نکرده است. با مقایسه عملکرد تالوآمین اتوکسیله با پتاسیم کلراید این نتیجه بر می‌آید که تالوآمین اتوکسیله می‌تواند ب خوبی سبب ناپایداری ذرات بنتونایت در محیط‌های آبی شود و از این جهت عملکردی همانند پتاسیم کلراید داشته باشد.

#### آزمون سازگاری با دیگر افزایش‌های رایج سیالات حفاری

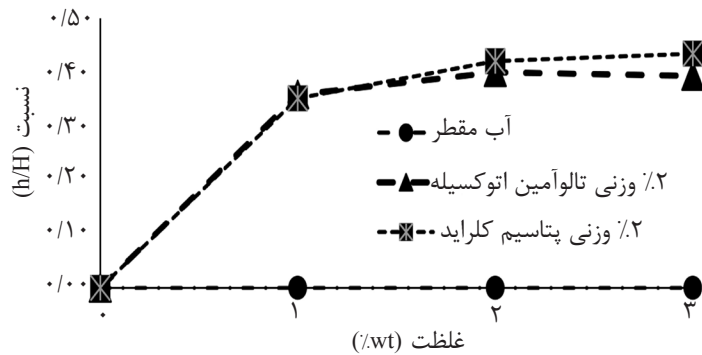
با توجه به نتایج شکل ۴، در هر دو نوع گل ساده و کامل، افزودن تالوآمین اتوکسیله تاثیر مخربی بر روی خواص رئولوژیکی و میزان صافاب عبوری سیالات حفاری ساده و کامل نداشته است. به عبارت دیگر این افزایش با دیگر افزایش‌های رایج سیالات حفاری کاملاً سازگار بوده و خللی در عملکرد آنها ایجاد نخواهد کرد.

با توجه نتایج می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش غلظت تالوآمین اتوکسیله به مقادیر بالا (بیشتر از غلظت ۳ درصد وزنی) بهبود چندانی در کنترل تورم بنتونایت (کاهش خواص رئولوژیکی و افزایش میزان صافاب عبوری) حاصل نمی‌شود. از طرف دیگر نیز حضور پتاسیم کلراید در محیط سبب جلوگیری از هیدراته شدن بنتونایت در سوسپانسیون گردیده است. با مقایسه خواص رئولوژیکی و میزان صافاب عبوری سوسپانسیون‌های بنتونایتی در حضور پتاسیم کلراید و تالوآمین اتوکسیله در غلظت برابر (۲ درصد وزنی)، این نتیجه برمی‌آید که تالوآمین اتوکسیله می‌تواند به خوبی مانع هیدراته شدن بنتونایت در محیط‌های آبی گردد و از لحاظ قدرت کنترل‌کنندگی تورم کانی‌های رسی نیز با پتاسیم کلراید به عنوان یکی از پایدارسازهای شیلی رایج نیز رقابت کند.

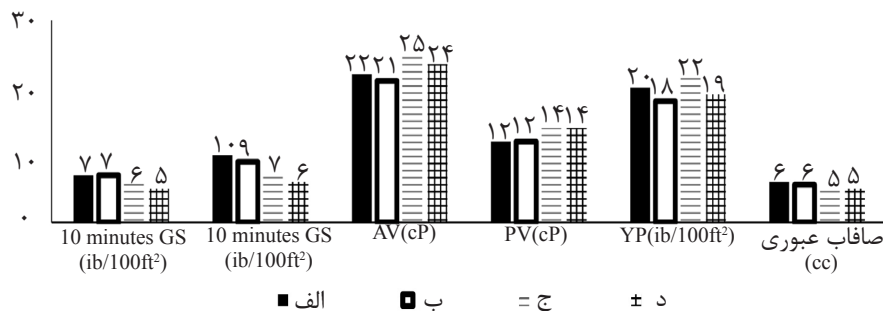
#### آزمون رسوب بنتونایت

بر اساس شکل ۳، هنگامی که هیچ کدام از پایدارسازهای شیلی (تالوآمین اتوکسیله و پتاسیم کلراید) در محیط حضور نداشته است، بنتونایت توانسته است درون محیط آبی به خوبی هیدراته و پخش شود. در حقیقت درون لوله آزمایشگاهی هیچ گونه رسوبی در این حالت ایجاد نگردیده است و نسبت  $h/H$  همواره برابر صفر بوده است. هنگامی که بنتونایت به محیط آبی حاوی تالوآمین اتوکسیله با غلظت ۱ درصد وزنی وارد

1. Flocculation  
2. Sedimentation



شکل ۳ رفتار رسوب بنتونایت در محلول‌های آبی حاوی تالوآمین اتوکسیله و پتاسیم کلراید.



شکل ۴ تاثیر تالوآمین اتوکسیله بر روی خصوصیات رئولوژیکی و میزان صافی عبوری سیالات حفاری ساده و کامل (الف) سیال حفاری ساده، (ب) سیال حفاری ساده + ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله، (ج) سیال حفاری کامل، (د) سیال حفاری کامل + ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله.

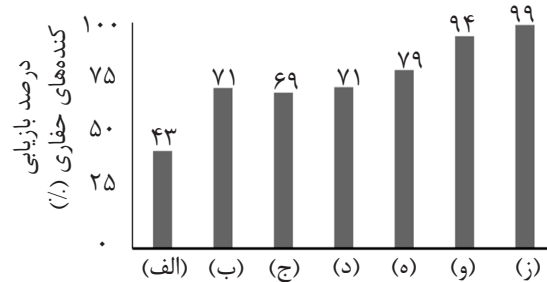
شدن کنده‌های حفاری می‌باشد. حضور تالوآمین اتوکسیله در سیالات حفاری ساده و کامل میزان بازآوری کنده‌های حفاری را به ترتیب ۷/۶ و ۵ درصد وزنی افزایش داده است که بیان‌گر بازده مناسب تالوآمین اتوکسیله حتی در سیالات حفاری با ترکیبات مختلف می‌باشد.

#### آزمون تورم‌سنجی خطی دینامیکی

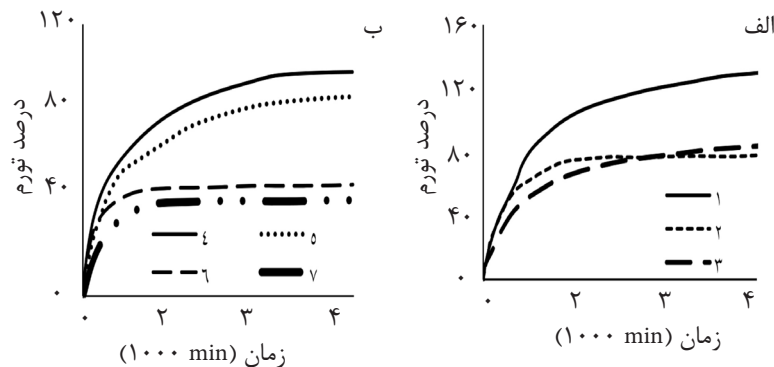
در مرحله اول، میزان تورم قرص‌های بنتونایتی در دمای  $26^{\circ}\text{C}$  و در تماس با آب مقطر، محلول‌های آبی تالوآمین اتوکسیله و پتاسیم کلراید با غلظت‌های برابر ۲ درصد وزنی، اندازه‌گیری گردید (شکل ۶). به صورت کلی، میزان تورم قرص‌های بنتونایتی در حال تماس با تمام سیالات مورد آزمایش، در ساعات اولیه آزمون زیاد و سریع بوده است و رفته رفته از سرعت تورم کاسته شده است. با توجه به شکل ۶ (الف)، میزان تورم قرص‌های بنتونایتی در حال تماس با آب مقطر شدید بوده و بعد از گذشت ۲۴ و ۶۶ hr، میزان تورم آن‌ها به ترتیب به حدود ۱۰۸ و ۱۳۰، رسیده است.

#### آزمون بازیابی کنده‌های حفاری

در این آزمون، میزان بازیابی کنده‌های حفاری در محیط‌های آب مقطر، محلول‌های آبی تالوآمین اتوکسیله و پتاسیم کلراید با غلظت‌های برابر ۲ درصد وزنی و همچنین در سیالات حفاری ساده و کامل (جدول ۲) اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج آزمون (شکل ۵)، مقدار بازیابی کنده‌های حفاری در آب مقطر میزان ۴۳/۱ درصد وزنی به دست آمد. در حضور تالوآمین اتوکسیله (غلظت ۲ درصد وزنی)، مقدار بازیابی کنده‌های حفاری به ۶۹ درصد وزنی افزایش یافت. افزایش ۲۵/۹ درصد وزنی در میزان بازآوری کنده‌های حفاری بیان‌گر این است که تالوآمین اتوکسیله به خوبی محیط را در برابر هیدراته و متلاشی شدن کنده‌های حفاری مقاوم کرده است. از طرفی، در محیط آبی حاوی پتاسیم کلراید نیز میزان بازیابی کنده‌های حفاری به مقدار ۷۱ درصد وزنی افزایش داشته است که با میزان بازآوری محیط حاوی تالوآمین اتوکسیله تقریباً برابری می‌کند. این اتفاق بیان‌گر قدرت مناسب تالوآمین اتوکسیله در کنترل تورم و هیدراته



شکل ۵ نتایج آزمون بازآوری کنده‌های حفاری، (الف) آب مقطر، (ب) ۲ درصد وزنی پتاسیم کلراید، (ج) ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله، (د) سیال حفاری ساده، (ه) سیال حفاری ساده + ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله، (و) سیال حفاری کامل، (ز) سیال حفاری کامل + ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله.



شکل ۶ نتایج آزمون تورم‌سنجی خطی دینامیکی: (الف) محلول‌های آبی، (ب) سیالات حفاری. (۱) آب مقطر، (۲) ۲ درصد وزنی پتاسیم کلراید، (۳) ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله، (۴) سیال حفاری ساده، (۵) سیال حفاری ساده + ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله، (۶) سیال حفاری کامل، (۷) سیال حفاری کامل + ۲ درصد وزنی تالوآمین اتوکسیله.

بر می‌آید که میزان تورم قرص بنتونایتی در حال تماس با پتاسیم کلراید، بیشتر از میزان تورم قرص در حال تماس با تالوآمین اتوکسیله می‌باشد. این مورد بیان‌گر این است که در زمان‌های اولیه حفاری، میزان خطر ریزش دیواره چاه (ناشی از تورم و هیدراته شدن لایه‌های شیلی فعال) در حضور پتاسیم کلراید بیشتر از تالوآمین اتوکسیله خواهد بود. از طرفی در پایان آزمون (در پایان ۶۶ hr از شروع آزمون)، میزان تورم قرص بنتونایتی در هر دو محلول حاوی تالوآمین اتوکسیله و پتاسیم کلراید با یکدیگر برابر می‌باشد که بیان‌گر قدرت قابل توجه تالوآمین اتوکسیله در کنترل تورم کانی‌های رسی می‌باشد. در مرحله دوم، میزان تورم قرص‌های بنتونایتی در تماس با سیالات حفاری ساده و کامل (در دمای ۶۵°C) اندازه‌گیری گردید (شکل ۶ (ب)).

افزودن تالوآمین اتوکسیله با غلظت ۲ درصد وزنی به محیط آبی، میزان تورم قرص بنتونایتی را از همان ساعات آغازین آزمون کنترل کرده است و کاهش داده است. همچنین میزان تورم قرص بنتونایتی را بعد از گذشت ۲۴ و ۶۶ hr به ترتیب به میزان ۳۳ و ۴۷٪ نسبت به حالتی که قرص در حال تماس با آب مقطر بوده است، کاهش داده است. از طرفی حضور تالوآمین اتوکسیله سبب گردیده است که میزان افزایش تورم قرص بنتونایتی، بعد از گذشت مدت زمان ۲۴ hr مقدار ناچیزی باشد، که بیان‌گر قدرت مناسب تالوآمین اتوکسیله در کنترل تورم قرص بنتونایتی است. با مقایسه میزان تورم قرص‌های بنتونایتی در حال تماس با تالوآمین اتوکسیله و پتاسیم کلراید در زمان‌های اولیه آزمون (تا رسیدن به ۳۸ hr از شروع آزمون)، این نتیجه



می‌تواند به حالت پایدار و با زاویه تماس میانگین  $22/54$  درجه بر روی سطح اسلاید شیشه‌ای قرار بگیرد. به عبارت دیگر جذب مولکول‌های تالوآمین اتوکسیله بر روی سطح ذرات بنتونایتسبب تغییر ترشوندگی آنها گردیده است، که نشان‌دهنده‌ی قدرت بازدارندگی تالوآمین اتوکسیله در جلوگیری از تورم و هیدراته شدن کانی‌های رسی می‌باشد.

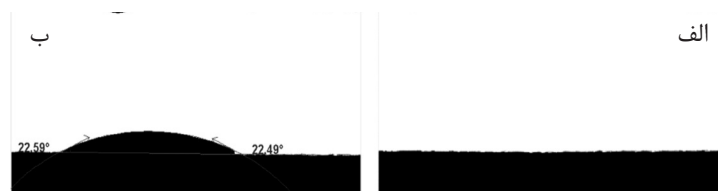
#### آزمون پتانسیل زتا

میزان کاهش بارهای سطحی صفحات ذرات بنتونایت با استفاده از آزمون پتانسیل زتا اندازه‌گیری گردید. پتانسیل زتا بیان‌گر میزان پایداری ذرات کلئیدی در محیط‌های آبی می‌باشد و به نوعی میزان نیروی دافعه بین ذرات کلئیدی (صفحات بنتونایت) را نشان می‌دهد. هر چقدر اندازه پتانسیل زتای سوسپانسیون بنتونایتی مقدار بالاتری باشد، بیان‌گر پایداری بیشتر ذرات بنتونایت در محیط می‌باشد. در مقادیر پایین پتانسیل زتا، بار سطحی صفحات بنتونایت پایین می‌باشد و ذرات ناپایدار گردیده و دچار تجمع<sup>۳</sup> و رسوب<sup>۴</sup> می‌نمایند. با توجه به نتایج (شکل ۸)، ذرات بنتونایت در آب مقطر پایداری بسیار بالایی دارند (پتانسیل زتای  $-39/6$  میلی ولت)، در صورتی که با افزودن مقدار ناچیزی از تالوآمین اتوکسیله (غلظت  $0/5$  درصد وزنی) به محیط، میزان پایداری ذرات بنتونایت به شدت کاهش یافته و مقدار پتانسیل زتا به میزان  $-28/9$  کاهش یافته است.

با افزودن تالوآمین اتوکسیله به سیالات حفاری ساده و کامل، میزان تورم قرص‌های بنتونایتی به ترتیب ۱۱ و ۷٪ کاهش داشته است که بیانگر این موضوع است که تالوآمین اتوکسیله حتی در سیالات حفاری مختلف (ساده و کامل) نیز می‌تواند به خوبی عمل کرده و میزان تورم قرص‌های بنتونایتی را کنترل کند.

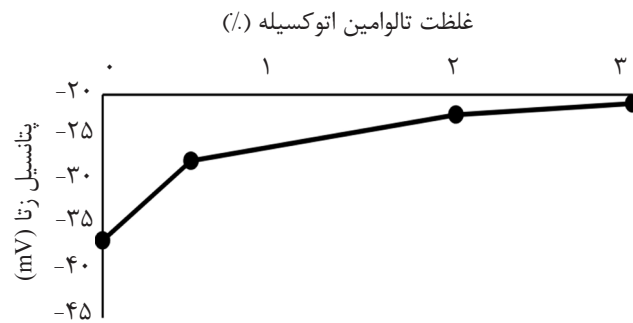
#### آزمون ترشوندگی

تاثیر جذب مولکول‌های تالوآمین اتوکسیله بر ترشوندگی ذرات بنتونایت با استفاده از روش معرفی شده توسط آقای وو [۱۰] بررسی گردید. در این آزمون از معادله یانگ-لاپلاس<sup>۱</sup> برای محاسبات زاویه تماس<sup>۲</sup> بین قطره آب و سطح اسلاید شیشه‌ای (آغشته به یک لایه از سوسپانسیون بنتونایت-تالوآمین اتوکسیله) استفاده شد. تصاویر قطره‌های آب به همراه زاویه تماس آن‌ها در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. سطح ذرات بنتونایت به علت دارا بودن بارهای منفی، مولکول‌های قطبی آب را به شدت جذب می‌کنند و به صورت کاملاً آب‌دوست می‌باشند. به همین دلیل قطره آب رها شده بر روی سطح اسلاید شیشه‌ای (شکل ۷ الف))، به سرعت جذب سطح شده است و زاویه تماس قطره و سطح صفر شده است. در حالت دوم، هنگامی که سطح اسلاید شیشه‌ای آغشته به یک لایه از سوسپانسیون بنتونایت - تالوآمین اتوکسیله شده است، به علت تغییر میزان بارهای سطحی و خصوصیات سطحی ذرات بنتونایت که محصول جذب مولکول‌های تالوآمین اتوکسیله بر سطح ذرات می‌باشد، قطره آب



شکل ۷: زاویه تماس بین قطره آب و سطح اسلایدهای شیشه‌ای آغشته به سوسپانسیون‌های آبی از: الف) آب مقطر (غلظت صفر درصد وزنی از تالوآمین اتوکسیله)، ب) تالوآمین اتوکسیله با غلظت ۲ درصد وزنی.

1. Flocculation
2. Sedimentation
3. Flocculation
4. Sedimentation



شکل ۸ پتانسیل زتای ذرات بنتونایت در محیط‌های آبی حاوی تالوآمین اتوکسیله با غلظت‌های مختلف.

[۱۵ - ۱۸] و انواع مواد آمینی و مشتقات آنها<sup>۱-۳</sup>، ۱۹ و ۲۰] با استفاده از پیوندهای هیدرونی جذب سطح صفحات بنتونایت می‌گردند. به این طریق با مولکول‌های آب بر سر برقراری پیوند هیدروژنی با سطح صفحات ذرات بنتونایت رقابت می‌کنند و جایگزین این مولکول‌ها خواهند شد و یک لایه محافظ در برابر جذب مولکول‌های آب ایجاد خواهند کرد، که منجر به کاهش تورم ذرات بنتونایت خواهد شد. همان‌طور که در بخش آزمایشات اشاره گردید، در ساختار مولکولی تالوآمین اتوکسیله (شکل ۱)، گروه‌های آمینی فعال قرار دارند. این گروه‌های آمینی می‌توانند با سطح صفحات ذرات بنتونایت پیوندهای هیدروژنی برقرار کنند و جذب این صفحات گردند. در حقیقت مولکول‌های تالوآمین اتوکسیله بر سر جذب بر سطح صفحات ذرات بنتونایت با مولکول‌های قطبی آب رقابت می‌کنند و مکان‌های در دسترس<sup>۴</sup> مولکول‌های آب را کاهش می‌دهند که منجر به کاهش میزان تورم و هیدراته‌شدن ذرات بنتونایت می‌گردند.

### نتیجه‌گیری

نتایج آزمون‌های بازدارندگی تورم بنتونایت، رسوب بنتونایت، بازیابی کنده‌های حفاری و تورم‌سنجی خطی دینامیکی نشان داد که تالوآمین اتوکسیله

با افزایش غلظت تالوآمین اتوکسیله، مقدار ناپایداری ذرات بنتونایت بیشتر گردیده است. با مقایسه پتانسیل زتا در دو غلظت ۲ و ۳ درصد وزنی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت تالوآمین اتوکسیله به مقادیر بیشتر از ۲ درصد وزنی، میزان ناپایداری ذرات بنتونایت به مقدار ناچیزی کاهش یافته است که بیانگر این است که غلظت بهینه تالوآمین اتوکسیله جهت پایدار سازی لایه‌های شیلی، غلظت ۲ درصد وزنی می‌باشد که در نتایج آزمون‌های پیشین نیز اشاره شد.

### مکانیزم عملکرد تالوآمین اتوکسیله

بنتونایت ساختاری لایه‌لایه<sup>۱</sup> دارد که هر لایه از یک صفحه هشت وجهی آلومینا<sup>۲</sup> و دو صفحه چهار وجهی سیلیکا<sup>۳</sup> تشکیل شده است [۱۱]. هنگامی که ذرات بنتونایت به محیط آبی وارد می‌شوند، مولکول‌های قطبی آب از طریق پیوندهای هیدروژنی به اتم‌های اکسیژنی که بر روی سطح خارجی صفحات سیلیکا قرار دارند، پیوند برقرار می‌کنند [۱۱ - ۱۳]. حال اگر پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب و سطح خارجی صفحات سیلیکا را با دیگر پیوندهای هیدروژنی جابجا کنیم، مقدار جذب مولکول‌های آب به سطح این صفحات کمتر خواهد شد و این جذب به تاخیر خواهد افتاد. این پدیده سبب کاهش تورم و هیدراته شدن ذرات بنتونایت خواهد شد [۱۴]. با مطالعه مفهومی مقالات علمی منتشر شده، این نتیجه حاصل شد که پایدارسازهای شیلی مختلفی در سیالات حفاری مانند گلیکول‌ها و مشتقات آنها<sup>۴</sup>

1. Layered
2. Alumina Octahedral Sheet
3. Silica Tetrahedral Sheet
4. Glycols and Glycol-Derivatives
5. Amines and Amine-Derivatives
6. Available Sites

مولکول‌های آب به سطح صفحات ذرات بنتونایت کاهش خواهد داشت و پایداری ذرات بنتونایت را در برابر تورم افزایش می‌دهد. تالوآمین اتوکسیله سازگاری مناسبی را با دیگر افزایش‌دهنده‌های سیالات حفاری دارد و می‌تواند در این نوع از سیالات نیز حتی در دماهای بالا، به خوبی عمل کرده و قدرت بازدارندگی مناسبی را از خود نشان دهد.

### علائم و نشانه‌ها

*KOH*: پتاسیم هیدروکسید (g)

*AV*: ویسکوزیته ظاهری (cp)

*PAC-LV*: پلی آنیونیک سلولز-ویسکوزیته کم (g)

*PAC-R*: پلی آنیونیک سلولز-ویسکوزیته معمولی (g)

*h*: فاصله سطح رسوب تا سر لوله آزمایش (mL)

*PHPA*: پلی اکریل آمید هیدرولیز شده (g)

*H*: طول داخلی لوله آزمایش (mL)

*PV*: ویسکوزیته پلاستیک (cp)

*HV*: ویسکوزیته بالا (cp)

می‌تواند به خوبی میزان تورم ذرات بنتونایت را در هر دو دمای پایین و بالا کنترل کند و قدرت بازدارندگی قابل مقایسه‌ای را با پتاسیم کلراید به عنوان یک پایدارساز شیلی رایج از خود نشان دهد. بر طبق نتایج آزمون‌ها، غلظت بهینه تالوآمین اتوکسیله مقدار ۲ درصد وزنی است و در این غلظت قدرت بازدارندگی مناسبی را از خود نشان می‌دهد. مکانیزم عملکرد تالوآمین اتوکسیله<sup>۱</sup> نیز بر اساس توانایی برقراری پیوندهای هیدروژنی با اتم‌های اکسیژن واقع بر سطح صفحات ذرات بنتونایت (سطوح خارجی صفحات سیلیکا) می‌باشد. این مولکول‌ها می‌توانند با مولکول‌های آب بر سر جایگاه‌های در دسترس (جهت برقراری پیوندهای هیدروژنی) رقابت کرده و آنها را کنار بزنند. در حقیقت، جذب مولکول‌های تالوآمین اتوکسیله بر سطح ذرات کانی‌های رسی، منجر به تغییر خصوصیات سطح صفحات از جمله ترشوندگی و میزان بارهای سطحی صفحات می‌گردد. در نتیجه تمایل

### مراجع

- [1]. Qu Y., Lai X., Zou L. and Su Y., "Polyoxyalkyleneamine as shale inhibitor in water-based drilling fluids", Applied Clay Science, Vol. 44, No. 1, pp. 265-268, 2009.
- [2]. Zhong H., Qiu Z., Huang W. and Cao J., "Poly (oxypropylene)-amidoamine modified bentonite as potential shale inhibitor in water-based drilling fluids", Applied Clay Science, Vol. 67-68, No. 1, pp. 36-43, 2012.
- [3]. Zhong H., Qiu Z., Huang W. and Cao J., "Shale inhibitive properties of polyether diamine in water-based drilling fluid", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 78, No. 2, pp. 510-515, 2011.
- [4]. Zhong H., Qiu Z., Huang W., Qiao J., Li H. and Cao J., "The development and application of a novel polyamine water-based drilling fluid", Petroleum Science and Technology, Vol. 32, No. 4, pp. 497-504, 2014.
- [5]. Wang L., Liu S., Wang T. and Sun D., "Effect of poly (oxypropylene) diamine adsorption on hydration and dispersion of montmorillonite particles in aqueous solution", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 381, No. 1, pp. 41-47, 2011.
- [6]. Chesser B., "Design considerations for an inhibitive, stable water-based mud system", SPE Drilling Engineering, Vol. 2, No. 4, pp. 331-336, 1987.
- [7]. Tush D., Loftin K. A. and Meyer M. T., "Characterization of polyoxyethylene tallow amine surfactants in technical mixtures and glyphosate formulations using ultra-high performance liquid chromatography and triple quadrupole

- mass spectrometry*", Journal of Chromatography A, Vol. 1319, No. 1, pp. 80-87, 2013.
- [8]. American Petroleum Institute, "Recommended practice standard procedure for laboratory testing of drilling fluids: API Specifications 13I", Dallas: American Petroleum Institute, 2000.
- [9]. American Petroleum Institute, "Recommended practice on the rheology and hydraulics of oil-well drilling fluids: API Specifications 13D", Dallas: American Petroleum Institute, 1995.
- [10]. Wu W., "Baseline studies of the clay minerals society source clays: colloid and surface phenomena", Clays and Clay Minerals, Vol. 49, No. 5, pp. 446-452, 2001.
- [11]. Ava Drilling Fluids and Services, "Drilling fluid manual Rome", Ava Drilling Fluids & Services, 2004.
- [12]. Roehl E. and Hackett J., "A laboratory technique for screening shale swelling inhibitors", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 1982.
- [13]. Ewy R. and Morton E., "Wellbore-stability performance of water-based mud additives", Journal of Petroleum Technology, Vol. 61, No. 9, pp. 78-79, 2009.
- [14]. Barati P., Keshtkar S., Aghajafari A., Shahbazi K. and Momeni A., "Inhibition performance and mechanism of Horsetail extract as shale stabilizer", Petroleum Exploration and Development, Vol. 43, No. 3, pp. 522-527, 2016.
- [15]. Aaton M. and Elliott G., "Water-based glycol drilling muds: Shale inhibition mechanisms", European Petroleum Conference, London, United Kingdom, 2007.
- [16]. Liu S., Mo X., Zhang C., Sun D. and Mu C., "Swelling inhibition by polyglycols in montmorillonite dispersions", Journal of Dispersion Science and Technology, Vol. 25, No. 1, pp. 63-65, 2004.
- [17]. De Souza C., Lima A. and Nascimento R., "Hydrophobically modified poly (ethylene glycol) as reactive clays inhibitor additive in water-based drilling fluids", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 117, No. 2, pp. 857-864, 2010.
- [18]. Li J., Yang P., Guan J., Sun Y., Kuang X. and Chen S., "A new type of whole oil-based drilling fluid", Petroleum Exploration and Development, Vol. 41, No. 4, pp. 490-496, 2014.
- [19]. ZohnG H., Qiu Z., Huang W., Xie, B. and Wang W., "Bis(hexamethylene) triamine as potential shale inhibitor in water-based drilling fluid", Open Petroleum Engineering Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 49-56, 2013.
- [20]. Xuan Y., Jiang G., Li Y., Wang J. and Geng H., "Inhibiting effect of dopamine adsorption and polymerization on hydrated swelling of montmorillonite", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 422, pp. 50-60, 2013.