

## بررسی تأثیر غلظت‌های متفاوت سدیم کلراید بر پایداری سازه‌های شیلی با استفاده از تبادل کاتیونی با یون پتاسیم

سعید نسیماوی، شرکت ملی حفاری ایران

چکیده

تورم و ناپایداری سازه‌های شیلی<sup>۱</sup> یکی از عوامل مهم ایجاد وقفه و تأخیر در عملیات حفاری محسوب می‌شود که عامل اصلی آن نیز اثرات متقابل شیل و سیالات حفاری مورد استفاده است. در این پدیده شیل پس از جذب آب افزایش حجم پیدا می‌کند. تاکنون تلاش‌های زیادی جهت کاهش اثرات مخرب این پدیده انجام شده است. افزودن پتاسیم کلراید به سیال حفاری یکی از راه‌حل‌های مرتفع نمودن این مشکل است که امروزه به کار گرفته می‌شود. انحلال پتاسیم کلراید در سیالات پایه آبی و آزاد شدن کاتیون پتاسیم می‌تواند کانی‌های رسی (سدیم و کلسیم‌دار) با قابلیت تورم<sup>۲</sup> را ضمن تبادل کاتیونی به کانی‌های رسی پایدار (پتاسیم‌دار) در مقابل تورم تبدیل کند. میزان پایداری رس‌ها با تبادل کاتیونی در شرایط مختلف متفاوت است. وجود کاتیون سدیم در سیالات حفاری از جمله عواملی است که موجب تغییر در میزان پایداری می‌شود. با توجه به اینکه سدیم کلراید به عنوان اصلی‌ترین افزاینده در سیالات حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این مطالعه تأثیر حضور سدیم کلراید در کاهش عملکرد کاتیون پتاسیم برای پایدار نمودن شیل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده، بیانگر کاهش تبادل کاتیونی پتاسیم و شیل‌ها متناسب با افزایش غلظت سدیم کلراید محیط است. بنابراین برای کاهش مقدار مصرف پتاسیم به عنوان ماده پایدارکننده، باید غلظت سدیم کلراید در این نوع سیالات کاهش داده شود.

واژگان کلیدی: تبادل کاتیونی، ناپایداری شیل‌ها، کاتیون پتاسیم، سیال حفاری

مقدمه

جلوگیری نمایند. (شکل ۱)

متأسفانه سیالات پایه روغنی<sup>۳</sup> به دلیل ایجاد مشکلاتی از قبیل ناسازگاری با محیط زیست، هزینه بالای مواد تشکیل دهنده و پسماند روغنی، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه به دلیل مشکلات کمتر سیالات پایه آبی از نظر سازگاری زیست محیطی، تحقیقات بیشتر بر روی این نوع از سیالات پایدارکننده شیل‌ها متمرکز شده است [۲].

پتاسیم کلراید یکی از مواد کنترل‌کننده تورم و ناپایداری شیل‌ها در صنعت حفاری محسوب می‌شود. از کلرید پتاسیم به منظور جلوگیری از آب‌پوشی ذرات سازه‌های شیلی نیز استفاده می‌شود. دلیل این امر وجود لایه‌های بسیار نازک آب‌پوشی بر روی یون‌های پتاسیم است. به علت شکل واکنش یون پتاسیم با رس‌ها، این یون در پایداری شیل‌ها به گونه‌ای منحصر به فرد عمل می‌کند. در عین حال می‌دانیم که رس‌ها اجزاء فعال شیل‌ها هستند. برای بیان این نکته یون پتاسیم را با یون‌های مشابه مقایسه می‌کنیم. ابعاد فیزیکی گروه اول جدول تناوبی در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجا که یون‌های کلسیم و منیزیم نیز در اغلب آب‌ها یافت می‌شوند، به فهرست جدول ۱ اضافه شده‌اند [۳].

حفاری در سازه‌های شیلی همواره با مشکلات متعددی روبرو بوده است. جهت غلبه بر این مشکلات، روش‌ها و تکنولوژی‌های متعددی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است. دستیابی به دانش به کارگیری فرمولاسیون مناسب و استفاده از مواد پلیمری و نمک‌ها در گل‌های حفاری پایه آبی در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است. امروزه طراحی یک سیال پایه آبی مناسب برای مقابله با ناپایداری شیل‌ها ذهن بسیاری از کارشناسان صنعت حفاری را به خود مشغول ساخته است.

شیل یک سنگ رسوبی دانه‌ریز با نفوذپذیری کم، تخلخل متوسط و درصد بالایی از خاک رس است. این سازند تقریباً در ۷۵ درصد سازه‌های حفاری شده در سراسر جهان وجود دارد و علت ۹۰ درصد از مشکلات ناپایداری دیواره چاه نیز می‌باشد. این مشکل سالانه هزینه‌های قابل توجهی را به صنعت حفاری وارد می‌سازد [۱]. یکی از راه‌حل‌های مورد استفاده جهت غلبه بر این مشکلات استفاده از سیالات پایه روغنی برای حفر این نوع از سازه‌هاست. سیالات پایه روغنی به دلیل نداشتن فاز آبی آزاد می‌توانند شیل‌های حساس به آب را کنترل کرده و از ریزش و تورم آن‌ها



## ۱- آزمایش‌های بررسی میزان تبادل کاتیونی پتاسیم ( $K^+$ ) با نمونه‌های

### شیلی در سیالات حاوی سدیم کلراید

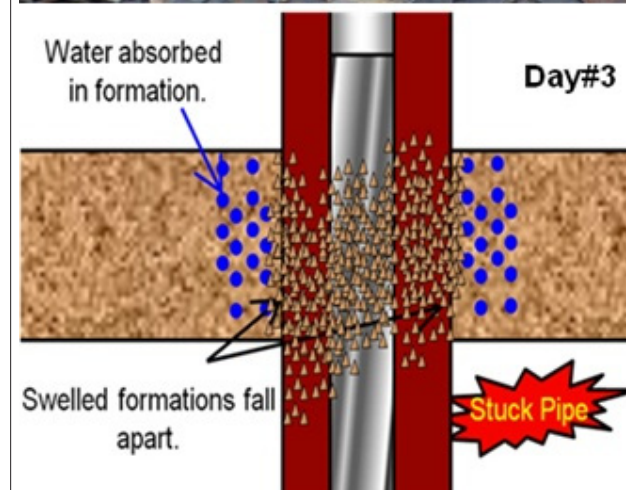
#### ۱-۱- ابزار و مواد مورد استفاده

در این آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری غلظت یون پتاسیم در سیالات از دستگاه نورسنج شعله‌ای<sup>۵</sup> استفاده شده است. سایر مواد شامل نمونه‌های شیلی، (در این آزمایش‌ها از سدیم مونت‌موریلونایت به عنوان نمونه شیلی فعال استفاده شده است) پتاسیم کلراید جامد خالص، سدیم کلراید جامد خالص و آب دیونیزه شده هستند.

#### ۲-۱- روش کار

در این تحقیق آزمایش‌ها در چهار مرحله انجام شده است. در هر مرحله غلظت ثابتی از پتاسیم کلراید برای بررسی فرایند تبادل کاتیونی با نمونه شیل در حضور غلظت‌های مختلف از سدیم کلراید مورد بررسی قرار می‌گیرد. قبل از انجام آزمایش‌ها باید نمونه‌های شیلی را به صورت پودر درآورده و در دستگاه متراکم‌ساز<sup>۶</sup> به مدت ۳۰ دقیقه تحت فشار ۶۰۰۰ پام قرار دهیم (این شرایط برای نمونه‌های شیلی قراردادی بوده و برای همه نمونه‌ها ثابت است). با این کار قرص‌های هم‌شکل و هم‌وزن با تراکم یکسان ساخته می‌شوند. سپس در هر مرحله مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر از غلظت‌های متفاوت محلول سدیم کلراید و غلظت معین پتاسیم کلراید (جدول ۲) را در ۳۱ بشر آزمایشگاهی ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته و نمونه‌های متراکم شده شیلی را نیز درون بشرها می‌گذاریم. لازم به ذکر است که غلظت پتاسیم در مراحل اول تا چهارم به ترتیب معادل ۱۰۰۰، ۷۵۰، ۵۰۰ و ۲۰۰ (ppm) در نظر گرفته شده است. مدت زمان حضور نمونه‌های شیلی درون محلول‌ها می‌تواند متفاوت باشد، ولی برای همه نمونه‌ها باید برابر باشد. پس از گذشت مدت زمان کافی از تبادل کاتیونی یون پتاسیم و نمونه شیلی، به وسیله دستگاه نورسنج شعله‌ای، مقدار غلظت‌های باقی‌مانده از یون پتاسیم را اندازه می‌گیریم. بعد

بنابراین یون‌های پتاسیم می‌توانند از طریق تبادل کاتیونی<sup>۴</sup>، جایگزین یون‌های سدیم موجود در برخی شیل‌ها شده و منجر به محکم شدن شیل‌ها شوند. با این حال در مورد مقدار مصرف این مواد نظرات متفاوتی وجود دارد. حضور سدیم کلراید به عنوان پرمصرف‌ترین افزایه در سیالات پایه آبی می‌تواند بر میزان تبادل کاتیونی پتاسیم در این نوع سیالات حفاری تأثیر داشته باشد [۴]. به عنوان مثال در یک سیال حفاری که در آن از سدیم کلراید استفاده می‌شود، چنان‌چه بخواهیم برای مقابله با ناپایداری شیل، پتاسیم کلراید را اضافه کنیم، این سؤال به وجود می‌آید که آیا وجود سدیم کلراید در سیال حفاری اجازه تبادل کاتیونی با شیل را به پتاسیم کلراید می‌دهد؟ و این که چه مقدار سدیم کلراید و چه مقدار پتاسیم کلراید جهت پایداری بهینه شیل‌ها مورد نیاز است؟ این‌ها سؤالاتی هستند که در صنعت حفاری جواب‌های متفاوتی به آنها داده شده است. در این مقاله سعی می‌شود تا میزان تأثیرات عوامل یاد شده بررسی و راه کارهای کاهش هزینه ساخت سیالات پایه آبی ارائه گردد.



شکل ۱ | تصویری از شیل‌ها در طبیعت (تصویر بالایی) و چگونگی مشکل آفرینی سازندهای شیلی در دیواره چاه‌ها (تصویر پایینی)

۱   شعاع یونی وشعاع آب‌پوشی‌شده کاتیون‌ها [۴]			
نوع یون	انرژی آب‌پوشی (KJ/mol)	قطر یون آب‌پوشی شده (آنگستروم)	قطر یون آب‌پوشی نشده (آنگستروم)
$Li^+$	۵۲۰	۱۴/۶	۱/۵۶
$Na^+$	۴۰۵	۱۱/۲	۱/۹۰
$K^+$	۳۲۲	۷/۴	۲/۶۶
$Rb^+$	۳۰۰	۷/۲	۲/۹۶
$Cs^+$	۲۷۶	۷/۲	۳/۳۴
$Ca^{++}$	۱۵۷۶	۱۹/۲	۱/۹۸
$Mg^{++}$	۱۹۱۹	۲۱/۶	۱/۳۰

محللول در سیال حفاری بیشتر باشد علیرغم وجود سدیم کلراید با غلظت‌های بالا، عمل تبادل کاتیونی انجام می‌شود. این نتیجه بیانگر تمایل زیاد یون پتاسیم نسبت به سایر کاتیون‌های محیط سیال برای جای‌گیری در نمونه‌های شیلی است. با اعمال نسبت ساده‌ای میان غلظت‌های سدیم کلراید فوق و غلظت اشباع سدیم کلراید (حدود ۳۲۰۰۰۰) می‌توان بیان نمود که؛

از انجام تبادل کاتیونی با نمونه شیلی و با محاسبه اختلاف میان غلظت اولیه و ثانویه یون پتاسیم در محللول‌های مذکور، میزان تأثیر غلظت‌های مختلف سدیم کلراید بر فرایند تبادل کاتیونی پتاسیم با نمونه شیلی به‌دست می‌آید.

## ۲- نتایج و بحث

داده‌های به‌دست آمده در جدول ۳ نشان‌دهنده میزان پتاسیم تبادل شده با نمونه شیلی جهت پایدارسازی آن است. همچنین با قرار دادن این اطلاعات در نمودار مرتبط با داده‌های جدول، توقف تبادل کاتیونی در غلظت‌های ثابت یون پتاسیم با نمونه شیلی در اثر حضور غلظت‌های بالای سدیم کلراید، بهتر درک می‌شود.

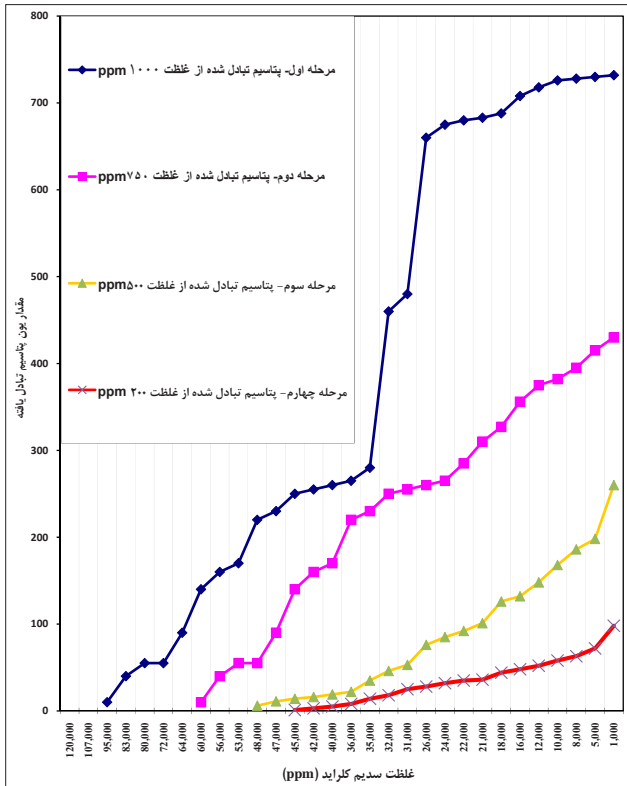
بر اساس نتایج داده‌های ارائه شده در قالب جدول ۳ و شکل ۲ در سیالاتی که در آنها از یون پتاسیم برای پایدارسازی شیل‌ها (از طریق تبادل کاتیونی) استفاده می‌شود، غلظت سدیم کلراید محللول در آن‌ها می‌تواند عامل محدودکننده تبادل کاتیونی پتاسیم و در نهایت پایدارسازی شیل‌ها باشد. همچنین هرچه نسبت غلظت یون پتاسیم به غلظت یون سدیم کلراید

جدول ۳ | مقادیر پتاسیم تبادل شده در چهار مرحله در غلظت‌های متفاوت سدیم کلراید

مرحله چهارم	مرحله سوم	مرحله دوم	مرحله اول	غلظت سدیم کلراید محللول‌ها (×۱۰۰۰ ppm)	ردیف
مقدار پتاسیم تبادل یافته در غلظت (۲۰۰ ppm)	مقدار پتاسیم تبادل یافته در غلظت (۵۰۰ ppm)	مقدار پتاسیم تبادل یافته در غلظت (۷۵۰ ppm)	مقدار پتاسیم تبادل یافته در غلظت (۱۰۰۰ ppm)		
۰	۰	۰	۰	۱۲۰	۱
۰	۰	۰	۰	۱۰۷	۲
۰	۰	۰	۱۰	۹۵	۳
۰	۰	۰	۴۰	۸۳	۴
۰	۰	۰	۵۵	۸۰	۵
۰	۰	۰	۵۵	۷۲	۶
۰	۰	۰	۹۰	۶۴	۷
۰	۰	۱۰	۱۴۰	۶۰	۸
۰	۰	۴۰	۱۶۰	۵۶	۹
۰	۰	۵۵	۱۷۰	۵۳	۱۰
۰	۴	۵۵	۲۲۰	۴۸	۱۱
۰	۱۱	۹۰	۲۳۰	۴۷	۱۲
۱	۱۴	۱۴۰	۲۵۰	۴۵	۱۳
۳	۱۶	۱۶۰	۲۵۵	۴۲	۱۴
۵	۱۹	۱۷۰	۲۶۰	۴۰	۱۵
۸	۲۲	۲۲۰	۲۶۵	۳۶	۱۶
۱۴	۳۵	۲۳۰	۲۸۰	۳۵	۱۷
۱۸	۴۶	۲۵۰	۴۶۰	۳۲	۱۸
۲۵	۵۳	۲۵۵	۴۸۰	۳۱	۱۹
۲۸	۷۶	۲۶۰	۶۶۰	۲۶	۲۰
۳۲	۸۵	۲۶۵	۶۷۵	۲۴	۲۱
۳۵	۹۲	۲۸۵	۶۸۰	۲۲	۲۲
۳۶	۱۰۱	۳۱۰	۶۸۳	۲۱	۲۳
۴۴	۱۲۶	۳۲۷	۶۸۸	۱۸	۲۴
۴۸	۱۳۲	۳۵۶	۷۰۸	۱۶	۲۵
۵۲	۱۴۸	۳۷۵	۷۱۸	۱۲	۲۶
۵۸	۱۶۸	۳۸۲	۷۲۶	۱۰	۲۷
۶۳	۱۸۶	۳۹۵	۷۲۸	۸	۲۸
۷۲	۱۹۸	۴۱۵	۷۳۰	۸	۲۹
۹۸	۲۶۰	۴۳۰	۷۳۲	۱	۳۰
۱۲۲	۲۶۲	۴۳۵	۷۳۵	بدون سدیم کلراید	۳۱

جدول ۴ | مشخصات غلظت محللول‌های تهیه شده جهت قرار دادن نمونه شیل درون آن‌ها

ردیف	غلظت سدیم کلراید محللول‌ها (ppm)	ردیف	غلظت سدیم کلراید محللول‌ها (ppm)
۱	۱۲۰۰۰۰	۱۷	۳۵۰۰۰
۲	۱۰۷۰۰۰	۱۸	۳۲۰۰۰
۳	۹۵۰۰۰	۱۹	۳۱۰۰۰
۴	۸۳۰۰۰	۲۰	۲۶۰۰۰
۵	۸۰۰۰۰	۲۱	۲۴۰۰۰
۶	۷۲۰۰۰	۲۲	۲۲۰۰۰
۷	۶۴۰۰۰	۲۳	۲۱۰۰۰
۸	۶۰۰۰۰	۲۴	۱۸۰۰۰
۹	۵۶۰۰۰	۲۵	۱۶۰۰۰
۱۰	۵۳۰۰۰	۲۶	۱۲۰۰۰
۱۱	۴۸۰۰۰	۲۷	۱۰۰۰۰
۱۲	۴۷۰۰۰	۲۸	۸۰۰۰
۱۳	۴۵۰۰۰	۲۹	۵۰۰۰
۱۴	۴۲۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰
۱۵	۴۰۰۰۰	۳۱	بدون سدیم کلراید
۱۶	۳۶۰۰۰		



۲ نمودار تغییرات میزان تبادل کاتیونی پتاسیم و نمونه شیلی در حضور سدیم کلراید

پتاسیم کلراید وارد سیستم نمود.

۲- با توجه به وارداتی بودن ماده پتاسیم کلراید و قیمت بالای آن، پیشنهاد می شود در صورت استفاده از سیالات پتاسیمی تا حد امکان از مصرف سدیم کلراید در غلظت های بالا خودداری گردد.

۳- در تحقیق انجام شده فقط یک عامل از مجموع عوامل تأثیرگذار در کاهش یا افزایش تبادل کاتیونی پتاسیم و شیل ها بررسی شده است. لذا پیشنهاد می شود در زمینه بررسی سایر عوامل مؤثر در فرایند مذکور نیز بررسی های بیشتر به عمل آید.

$$\frac{\text{غلظت یون پتاسیم}}{\text{غلظت سدیم کلراید محوکننده اثر تبادل کاتیونی}} = \frac{200}{45000}, \frac{500}{53000}, \frac{750}{64000}, \dots, \frac{?}{320000} \quad (1)$$

$$\frac{\text{غلظت یون پتاسیم}}{\text{غلظت سدیم کلراید محوکننده اثر تبادل کاتیونی}} = \frac{2800 \text{ ppm}}{320000 \text{ ppm}} \quad (2)$$

می دانیم که در سیالات حفاری برای تأمین یون پتاسیم از نمک آن، یعنی پتاسیم کلراید استفاده می شود. لذا روابط بالا را می توان به غلظت پتاسیم کلراید (با استفاده از رابطه ۳) تعمیم داد. برای مثال اگر ۱ گرم پتاسیم کلراید را به حجم یک لیتر برسانیم در این محلول خواهیم داشت [۵]:  
(وزن اتمی پتاسیم = ۳۹/۱ gm، وزن ملکولی پتاسیم کلراید = ۷۴/۵۶ gm)

$$\frac{1 \times 39.1 \text{ gm}}{74.56 \text{ gm}} = 0.52 \text{ gm K}^+ \quad (3)$$

چنانچه غلظت ۲۸۰۰ ppm کاتیون پتاسیم را به غلظت پتاسیم کلراید تعمیم دهیم خواهیم داشت؛  
غلظت یون پتاسیم = X

$$\frac{x \times 39.1 \text{ gr}}{74.56 \text{ gr}} = 2.8 \frac{\text{gr}}{\text{lit}} \text{ یون پتاسیم} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \quad (4)$$

$$\text{یون پتاسیم} = 2.8 \frac{\text{gr}}{\text{lit}} = \frac{x \times 39.1 \text{ gr}}{74.56 \text{ gr}}$$

یعنی برای جلوگیری از توقف عمل تبادل کاتیونی پتاسیم یک سیال حفاری در مجاورت محلول اشباع سدیم کلراید باید غلظت کاتیون پتاسیم در آن بیشتر از ۲۸۰۰ ppm یا غلظت پتاسیم کلراید موجود بیشتر از ۱/۸ پوند در بشکه باشد.

### نتیجه گیری و پیشنهادها

۱- با توجه به اینکه به طور معمول در سیالات پتاسیمی از مقادیر بالاتر از غلظت نتیجه گرفته شده استفاده می شود، لذا در صورت حضور سدیم کلراید در سیال حفاری مورد استفاده باید مقداری اضافه تر از مقدار پیش بینی شده

### پانویس ها

1. Shale  
2. Swellable

3. Oil Base Mud  
4. CEC (Cation Exchange Capacity)

5. Flame Photometer  
6. Compactor

### منابع

- [1] Chenevert M.E. and Pernot V., "Control of Shale Swelling Pressures Using Inhibitive Water Based Mud's", SPE 49263 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, September 27-30, 1998.  
[2] Osisanya S.O., "Well site Shale Evaluation Techniques for Control of Shale Related Well bore Instability Problems", Masters Thesis, The University of Texas at Austin, 1986.  
[3] Chenevert M.E. and Osisanya S.O., 1989, "Shale/Mud

- Inhibition Defined with Rig-Site Methods", SPE Drilling Engineering, September, 1989.  
[4] MI-Swaco, "Drilling Fluids Engineering Manual Version 2.1. 1998, CHAPTER 4B

[5] اسکوگک د.، هولرج.، نیمن ت. ۱۹۹۲، «اصول تجزیه دستگاهی»، ترجمه دکتر ژبلا آزاد، دکتر عبدالرضا سلاجقه، دکتر مجتبی شمسی پور، دکتر کاظم کارگشا، تهران، مرکز نشر دانشگاهی، جلد دوم، چاپ یکم، ۱۳۷۴.