



بررسی اثر بنتونایت بر کارایی پلیمرهای پلی آنیونیک سلولز (PAC) و نشاسته‌ی سیب‌زمینی (Starch) در سیال حفاری پایه آبی

علیرضا نصیری^۱، پژوهشگر صنعت نفت تهران

میر احمد حسینی^۲، شرکت ملی نفت ایران
فرهاد ملائی^۳، کارشناس ارشد اکتشاف نفت

رسول رسولی منش^۴، بهزاد تخم‌چی^۵، دانشگاه شاهرود
علیرضا ساکی^۶، شرکت ملی حفاری ایران

چکیده

در تحقیق حاضر، تأثیر حضور بنتونایت بر رفتار رئولوژی و همچنین میزان افت صافاب سیالات پلیمری بررسی شده است. برای تهیه‌ی نمونه سیالات مورد آزمایش، از دو نوع پلیمر با دو منشأ متفاوت که کاربرد زیادی هم در سیالات حفاری دارند، استفاده شده است: نشاسته‌ی سیب‌زمینی که پلیمری طبیعی است؛ و پلی آنیونیک سلولز که با نام PAC در صنعت حفاری شناخته می‌شود و جزء پلیمرهای طبیعی اصلاح شده محسوب می‌گردد. همچنین از ۳ نوع آب متفاوت (آب فاقد افزودنی یا همان آب شیر، آب دریا و آب اشباع از نمک سدیم کلراید) به‌عنوان فاز پیوسته‌ی نمونه سیالات استفاده شده است. تعداد ۳۰ نمونه سیال (۱۵ نمونه از آن‌ها حاوی پلیمر نشاسته و ۱۵ نمونه‌ی دیگر حاوی پلیمر PAC) تهیه و تحت آزمایش قرار گرفتند. خواص رئولوژی و میزان افت صافاب نمونه سیالات، قبل و بعد از افزودن مقادیر مختلف بنتونایت به ترکیب سیالات، اندازه‌گیری و نمودارهای مربوط به آن‌ها رسم شده و با مقایسه‌ی آن‌ها، تأثیری که حضور بنتونایت و نیز نوع آب مورد استفاده به‌عنوان فاز پیوسته، بر رفتار نمونه سیالات گذاشته، بررسی شده است. نتایج نشان دادند که افزایش بنتونایت در ترکیب نمونه سیالات پلیمری، باعث افزایش خواص رئولوژی این سیالات می‌شود؛ ولی پارامتر افت صافاب در مقادیر کم بنتونایت، کاهش یافته و با افزایش بنتونایت، مقدار این پارامتر نیز بیش‌تر می‌شود. همچنین، میزان شوری فاز پیوسته‌ی سیال، بر کارایی نشاسته، بر خلاف پلی آنیونیک سلولز، تأثیر چندانی ندارد.

واژگان کلیدی: سیال پلیمری، بنتونایت، نشاسته‌ی سیب‌زمینی، پلی آنیونیک سلولز، خواص رئولوژی، افت صافاب، سیال حفاری پایه آبی

مقدمه

سیب‌زمینی^۲ که پلیمری طبیعی است. همچنین، برای فاز پیوسته‌ی سیال، از سه نوع آب متفاوت استفاده شده است: آب بدون افزودنی یا همان آب شیر^۳، آب دریا^۴ و آب اشباع از نمک کلرید سدیم^۵. بنتونایت یکی از اجزای تشکیل‌دهنده‌ی اکثر سیالات حفاری پایه آبی است. علاوه بر ایجاد گرانروی مناسب، دیگر دلایل استفاده از این نوع رُس در سیال حفاری عبارت است از: افزایش توانایی تمیزکنندگی چاه، کاهش نفوذ آب یا صافاب سیال حفاری به درون لایه‌های تراوا و نفوذپذیر، ایجاد کیک گلی نازک با تراوایی پایین بر روی دیواره‌ی چاه، افزایش پایداری دیواره‌ی چاه در مقاطعی با سیمان‌شدگی ضعیف و جلوگیری از هرزروی سیال حفاری یا کاهش آن. در سیالات حفاری معمولاً از بنتونایت سدیم‌دار استفاده می‌شود [۳].

پلیمرها یکی دیگر از افزودنی‌های سیالات حفاری هستند که به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند، امروزه تقریباً جزء جدایی‌ناپذیر این سیالات محسوب می‌شوند. پلیمرهای مورد استفاده در صنعت حفاری به‌طور کلی به سه گروه تقسیم می‌شوند:

یکی از مهمترین عوامل تعیین‌کننده‌ی میزان موفقیت یک عملیات حفاری، انتخاب مناسب و کنترل سیستم سیال حفاری مربوط به آن عملیات است؛ بدین معنی که، انتخاب یک سیستم سیال حفاری مناسب، باعث بهبود عملیات حفاری و بالعکس، انتخاب سیستم سیال نامناسب، باعث ایجاد مشکلات و هزینه‌ی زیادی در عملیات خواهد شد. ترکیب سیال حفاری در هر عملیات، با توجه به شرایط و ملزومات آن عملیات مشخص می‌شود [۱].

امروزه بخش زیادی از سیالات مورد استفاده در صنعت حفاری را سیالات پلیمری تشکیل می‌دهند. بنتونایت نیز یکی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده‌ی بسیاری از سیالات حفاری محسوب می‌شود که از دیرباز در صنعت حفاری مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بنتونایت بر خواص رئولوژی و همچنین افت صافاب در سیال پلیمری انجام شده است. در تهیه‌ی سیال پلیمری از دو نوع پلیمر استفاده شده است: پلی آنیونیک سلولز با گرانروی پایین^۱ که پلیمری طبیعی و اصلاح شده است و نشاسته‌ی

*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (rasool_rasoolimanesh@yahoo.com)

* پلیمرهای طبیعی

* پلیمرهای طبیعی اصلاح شده

* پلیمرهای مصنوعی [۴]

همچنین، استفاده از هردوی این پلیمرها، پایداری حرارتی سیال را افزایش داده و باعث حفظ خواص رئولوژی سیال در دماهای بالا می‌شود [۹]. لارسن در سال ۲۰۰۷ رفتار سیالات پلیمری را در شرایط فشار و حرارت بالا بررسی کرد. او از تحقیق خود نتیجه گرفت که تأثیر پارامتر فشار بر رفتار رئولوژی سیالات پلیمری بسیار جزئی است؛ برخلاف پارامتر حرارت که تأثیر بسیار زیادی بر خواص رئولوژی سیالات پلیمری و رفتار پلیمرها دارد [۱۰].

۱- مواد آزمایشگاهی و تهیه نمونه سیالات

تمامی آزمایش‌های مربوط به این پژوهش، در آزمایشگاه سیال، در پژوهشکده‌ی صنعت نفت تهران انجام شده است. لوازم آزمایشگاهی مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها عبارتند از: دستگاه هم‌زن الکتریسیته مدل Hamilton Beach جهت مخلوط کردن مواد مورد نیاز برای تهیه سیالات، دستگاه pH متر دیجیتال دقیق جهت اندازه‌گیری pH سیال، دستگاه گرانروی سنج دوار مدل FANN 35 جهت اندازه‌گیری خواص رئولوژی سیالات، و دستگاه فیلترپرس مدل 175NL جهت اندازه‌گیری افت صافاب نمونه سیالات. مواد مورد استفاده در سیالات مورد آزمایش و هدف از افزودن

هریک از آن‌ها در جدول ۱- آورده شده است. به‌طور کلی، تعداد ۳۰ نمونه سیال جهت انجام آزمایش‌ها تهیه شد که در ۱۰ نمونه از آن‌ها آب شیر، در ۱۰ نمونه‌ی دیگر آب دریا و در ۱۰ نمونه‌ی باقیمانده آب اشباع از نمک سدیم کلراید (NaCl) فاز پیوسته‌ی سیال را تشکیل داده است. آب دریا و آب اشباع به ترتیب حاوی ۴۰ گرم و ۳۱۵ گرم NaCl در ۱ لیتر آب هستند [۶].

برای تهیه نمونه سیالات مورد آزمایش، ابتدا مخزن مخلوط‌کن با فاز پیوسته‌ی سیال، یعنی آب، پُر شد. از آنجایی که حجم سیالات مورد استفاده در تحقیق حاضر ۳۵۰ میلی‌لیتر است، برای تهیه آب دریا مقدار ۹ گرم و برای تهیه آب اشباع مقدار ۱۱۰ گرم NaCl به آن اضافه شد. سپس، جهت کنترل سختی آب و رسوب یون‌های کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) مقدار ۰/۵ گرم سودا اش و همچنین،

نشاسته، یک پلیمر طبیعی است که به دلیل دارا بودن قابلیت انحلال در آب، در صنعت حفاری کاربرد فراوانی دارد. وظیفه‌ی اصلی این ماده، کاهش افت صافاب سیال حفاری است. با این حال، از آنجایی که نشاسته هنگام قرار گرفتن در آب، این توانایی را دارد که با جذب مولکول‌های آب متورم شود، بنابراین، ایجاد خاصیت گرانروی مناسب نیز، یکی دیگر از پیامدهای افزودن نشاسته به سیال حفاری است. بدین ترتیب با افزودن نشاسته به سیال حفاری می‌توان به‌طور همزمان کاهش افت صافاب و افزایش خواص رئولوژی سیال را مشاهده کرد. از طرف دیگر، ذرات متورم شده‌ی نشاسته می‌تواند با جذب ذرات رسی در مقاطعی از چاه که فاقد لوله‌ی جداری هستند، نفوذ این ذرات به داخل سازند را کاهش دهند [۵].

پلی‌آنیونیک سلولز (PAC) یکی از مشتقات سلولز است که جزء پلیمرهای طبیعی اصلاح شده محسوب می‌شود. هدف اصلی از افزودن این ماده در سیال حفاری، همانند نشاسته، کاهش افت صافاب سیال حفاری است. ولی با این وجود، با توجه به خاصیت غلیظ‌کنندگی که این ماده دارد، به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی گرانروی سیال نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. پلی‌آنیونیک سلولز در آب شور و همچنین، در آب فاقد نمک قابل استفاده است و تا ۱۴۹ درجه‌ی سانتی‌گراد پایداری خود را حفظ می‌کند [۶]. این ماده در سه نوع متفاوت موجود است: با ویسکوزیته‌ی بالا^۱، با ویسکوزیته‌ی متوسط^۲ و با ویسکوزیته‌ی پایین که همگی آن‌ها از نظر کنترل افت صافاب، کارایی مشابهی دارند، ولی گرانروی‌های متفاوتی به سیال می‌دهند که با توجه به شرایط عملیات، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷].

از جمله تحقیقاتی که در زمینه‌های مشابه انجام شده می‌توان به مقاله‌ی ایشام و ادريس اشاره کرد که در سال ۲۰۰۱ با موضوع کاربرد نشاسته‌های محلی و مواد کنترل‌کننده‌ی افت صافاب در صنعت نفت، منتشر شد. آن‌ها در تحقیق خود به مقایسه‌ی کارایی پلیمر PAC با پلیمرهای محلی ساگو^۳ و تاپکو^۴ پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این دو پلیمر محلی می‌توانند خواص رئولوژی معادل با رئولوژی PAC در سیال ایجاد کنند. بنابراین، با جایگزینی این مواد با پلیمر PAC می‌توان در هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد [۸]. همچنین، نصیری و همکاران در سال ۲۰۱۲ طی مقاله‌ای تأثیر پلی‌تین و پلی‌دریل (دو پلیمر مصنوعی جهت ایجاد خواص رئولوژی مطلوب در سیال حفاری) بر سیال حفاری پایه‌آبی را بررسی کردند. آن‌ها با آزمایش‌هایی که در این پژوهش انجام دادند نتیجه گرفتند که پلیمر پلی‌تین باعث کاهش خواص رئولوژی سیال حفاری و در نتیجه، سهولت پمپاژ آن می‌شود. در عین حال، از ته‌نشینی ذرات بنتونایت نیز جلوگیری می‌کند.

جدول ۱ | مواد افزودنی و وظایف آن‌ها در سیالات مورد آزمایش

وظیفه‌ی ماده افزودنی	ماده‌ی افزودنی
کنترل سختی آب	سودا اش (Na_2CO_3)
کنترل صافاب	نشاسته (Starch)
کنترل صافاب	پلی‌آنیونیک سلولز (PAC Lv)
ایجاد گرانروی و کنترل صافاب	بنتونایت
افزایش pH سیال	کاستیک سودا (NaOH)



گرانروی سنج دوار را با سیال مورد نظر پُر کرده سپس، سیال را با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه به گردش در آورده و بعد از گذشت ۱۰ ثانیه، سرعت چرخش را به ۳ دور بر ثانیه کاهش می‌دهیم. مجدداً بعد از گذشت ۱۰ ثانیه (یا ۱۰ دقیقه) از چرخش گل با سرعت ۳ دور در دقیقه، بیشترین انحراف عقربه‌ی دستگاه را یادداشت می‌کنیم که این مقدار، معادل مقاومت ژله‌ای ۱۰ ثانیه (یا ۱۰ دقیقه) بر حسب پوند بر ۱۰۰ فوت مربع ($\frac{lb}{100ft^2}$) است.

در مرحله‌ی بعد، جهت اندازه‌گیری اُفت صافاب سیال، با استفاده از دستگاه فیلترپرس بدین صورت عمل شد که شیر اصلی هوا را با چرخاندن پیچ دستی که روی آن تعبیه شده است در جهت ساعت گرد، باز کردیم تا فشارسنج عدد ۱۰۰ psi را نشان داد. قبل از شروع آزمایش مطمئن شدیم که تمام قطعات، به‌خصوص کاغذ صافی^{۱۷} کاملاً خشک و تمیز است. سپس، سلول سیال را در جای خود قرار دادیم و آن را با چرخاندن دکمه‌ی زیرین سلول، قفل کردیم. بعد از آن، سلول را با سیال مورد آزمایش تا اندازه‌ای پُر کردیم که سیال، کمی از سلول بیرون بریزد تا مطمئن شویم که سلول کاملاً پُر شده است. سپس، درپوش سلول را در جای خود قرار دادیم و جهت جمع‌آوری و تعیین حجم سیال خروجی، استوانه‌ی مدرج که کاملاً تمیز و خشک شده بود را در زیر خروجی دستگاه قرار دادیم. در روشن کردیم و پس از گذشت ۳۰ دقیقه، مقدار سیال خروجی را خوانده و ثبت کردیم. جداول ۴-۵، ۶، ۷ به ترتیب مقادیر گرانروی پلاستیک، نقطه‌ی واروی، مقاومت ژله‌ای و اُفت صافاب به دست آمده برای نمونه سیالات مورد آزمایش را نشان می‌دهند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر بنتونایت بر ویسکوزیته‌ی پلاستیک

نمودار ویسکوزیته‌ی پلاستیک بر حسب مقدار بنتونایت موجود در سیال، برای سیالات حاوی نشاسته و PAC به ترتیب در شکل‌های ۱-۱

به منظور کنترل pH سیال، مقدار ۰/۴ گرم کاستیک سودا^{۱۱} (NaOH) به سیال در حال مخلوط شدن اضافه شد. بعد از آن، مقدار مشخص از پلیمر مورد آزمایش (نشاسته یا PAC) به سیال در حال خلوط شدن اضافه و زمان کافی جهت مخلوط شدن به آن داده شد. در آخرین مرحله نیز، مقدار مشخص از بنتونایت به سیال اضافه و اجازه داده شد تا به خوبی در ترکیب سیال هم بخورد. جداول ۲-۳ به ترتیب ترکیب نمونه سیالات حاوی نشاسته و PAC را نشان می‌دهند.

۲- آزمایش‌های انجام شده

همانطور که پیشتر ذکر شد، جهت تعیین خواص رئولوژی نمونه سیالات، از گرانروی سنج دوار مدل FANN 35 استفاده شد. این دستگاه دارای سرعت‌های ۳، ۶، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور در دقیقه است که علاوه بر اندازه‌گیری گرانروی سیال حفاری، نقطه‌ی واروی و مقاومت ژله‌ای سیال را نیز مشخص می‌کند. دستگاه دارای یک عقربه است که با توجه به سرعت‌های مذکور، زاویه انحراف^{۱۲} آن (θ) اندازه‌گیری شده و توسط روابط ۱-۴ تا ۴، خواص رئولوژی سیال مورد آزمایش اندازه‌گیری می‌شود.

$$\mu = \frac{300 \times \theta}{rpm} \quad (1)$$

$$AV = 0.5 \times \theta_{600} \quad (2)$$

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

$$YP = \theta_{300} - PV \quad (4)$$

در روابط بالا μ گرانروی موثر^{۱۳}، AV گرانروی ظاهری^{۱۴}، و PV گرانروی پلاستیک^{۱۵} است که همگی بر حسب سانتی‌پواز (cp) می‌باشند. YP نیز نقطه‌ی واروی^{۱۶} سیال بر حسب پوند بر ۱۰۰ فوت مربع ($\frac{lb}{100ft^2}$) است [۱۱].

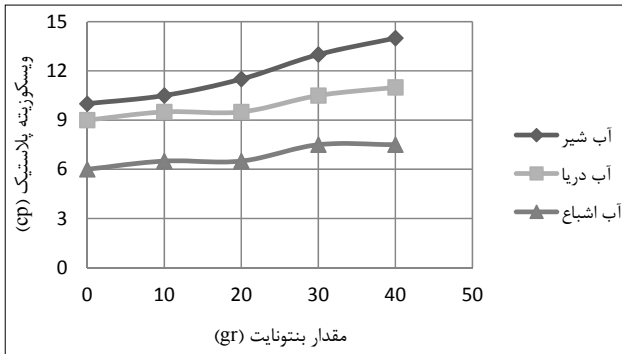
برای اندازه‌گیری مقاومت ژله‌ای نمونه سیالات نیز از گرانروی سنج دوار استفاده شد. روش کار بدین صورت است که ابتدا، مخزن سیال

۲ ترکیب سیالات حاوی پلیمر نشاسته

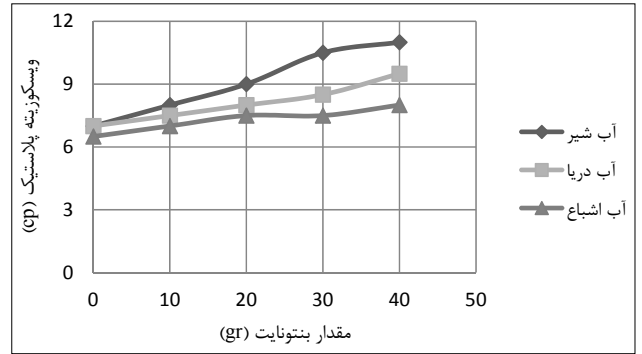
آب اشباع		آب دریا					آب شیر								
۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره‌ی نمونه
۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	سودا اش (gr)
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	کاستیک سودا (gr)
۹/۳	۹/۳	۹/۶	۹/۸	۹/۷	۹/۹	۹/۵	۹/۲	۹/۴	۹/۵	۹/۸	۹/۵	۹/۴	۹/۴	۹/۷	pH
۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	نشاسته (gr)
۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	بنتونایت (gr)

پلاستیک سیالات برای هر سه نمونه آب شیر، آب دریا و آب اشباع از نمک افزایش می‌یابد. دلیل این امر، خاصیت جذب آب توسط ذرات بنتونایت است. در واقع، ذرات بنتونایت دارای بار منفی جزئی بر روی سطح خود هستند

۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که ویسکوزیته‌ی پلاستیک در هر دو گروه سیالات حاوی پلیمر نشاسته و نیز پلیمر PAC، با مقدار بنتونایت موجود در آن رابطه‌ی مستقیم دارد. یعنی، با افزایش مقدار بنتونایت موجود در سیال، ویسکوزیته‌ی



شکل ۲ | ویسکوزیته پلاستیک سیالات حاوی PAC بر حسب مقدار بنتونایت موجود در سیال



شکل ۱ | ویسکوزیته پلاستیک سیالات حاوی نشاسته بر حسب مقدار بنتونایت موجود در سیال

جدول ۳ | ترکیب سیالات حاوی پلیمر PAC

آب اشباع					آب دریا					آب شیر					
۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	شماره‌ی نمونه
۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	سودا اش (gr)
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	کاستیک سودا (gr)
۱۰/۱	۹/۹	۹/۵	۹/۵	۹/۶	۹/۳	۹/۴	۹/۵	۹/۸	۹/۵	۹/۴	۹/۶	۹/۸	۹/۴	۹/۸	pH
۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	نشاسته (gr)
۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	بنتونایت (gr)

جدول ۴ | گرانروی پلاستیک سیالات مورد آزمایش بر حسب cp

۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره‌ی نمونه
۸	۷/۵	۷/۵	۷	۶/۵	۹/۵	۸/۵	۸	۷/۵	۷	۱۱	۱۰/۵	۹	۸	۷	گرانروی پلاستیک
۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	شماره‌ی نمونه
۷/۵	۷/۵	۶/۵	۶/۵	۶	۱۱	۱۰/۵	۹/۵	۹/۵	۹	۱۴	۱۳	۱۱/۵	۱۰/۵	۱۰	گرانروی پلاستیک

جدول ۵ | نقطه‌ی واروی سیالات مورد آزمایش بر حسب °ft^۲/lb

۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره‌ی نمونه
۱۴	۱۰	۷	۵	۳	۱۴	۱۱	۸	۶	۴	۱۵	۱۲	۸	۵	۴	نقطه‌ی واروی
۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	شماره‌ی نمونه
۷	۷	۷	۶	۳	۱۱	۱۰	۸	۷	۵	۱۸	۱۵	۱۳	۹	۶	نقطه‌ی واروی



باعث ایجاد خاصیت آنیونی در ذرات PAC می‌شود. این ذرات آنیونی، مولکول‌های آب (که خاصیت قطبی دارند) را جذب کرده و متورم می‌شوند. بنابراین، با افزایش حجم ذرات جامد موجود در سیال، خواص رئولوژی آن از جمله ویسکوزیته‌ی پلاستیک سیال نیز افزایش می‌یابد.

حال اگر PAC در آب حاوی NaCl قرار گیرد (خصوصاً اگر این آب که فاز پیوسته‌ی سیال را تشکیل می‌دهد اشباع از این نمک باشد)، به دلیل افزایش مقدار یون کلر (Cl⁻) در آب و ربوده شدن مولکول‌های قطبی آب توسط این یون، ذرات PAC دیگر نمی‌توانند به راحتی مولکول‌های قطبی آب را جذب کنند و با آن‌ها پیوند هیدروژنی تشکیل دهند. در نتیجه، افزایش حجمی هم، رخ نمی‌دهد و خواص رئولوژی چنین سیالی، نسبت به سیالی که فاز پیوسته‌ی آن را آب شیر یا آب دریا تشکیل می‌دهد، کاهش می‌یابد.

از سوی دیگر، افزایش NaCl در سیال حاوی بنتونایت، باعث کاهش کارایی بنتونایت نیز می‌شود. در واقع، با انحلال NaCl در آب و افزایش یون Na⁺، این یون توسط لایه‌های بنتونایت که دارای بار منفی هستند، جذب می‌شود.

این عمل دو پیامد دارد: یکی اینکه باعث متراکم شدن و چسبیدن ذرات رُسی به یکدیگر شده و از پراکنده شدن این ذرات در سیال جلوگیری می‌کند، و دیگر اینکه، واکنش مولکول‌های قطبی آب با ذرات بنتونایت کاهش می‌یابد؛ زیرا این ذرات با یون Na⁺ پیوند برقرار کرده و به پایداری رسیده‌اند. بنابراین، کارایی بنتونایت جهت ایجاد خواص رئولوژی مطلوب در چنین سیالی کاهش می‌یابد.

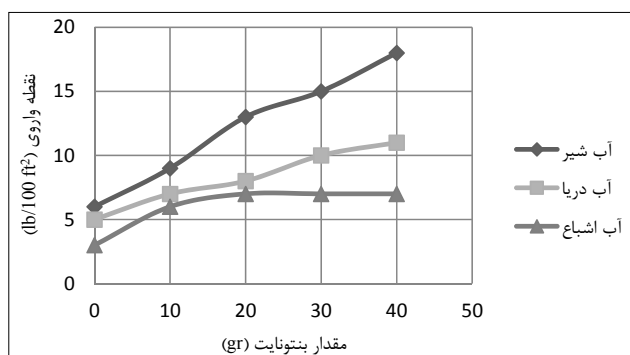
و به همین دلیل، مولکول‌های آب (که دارای خاصیت قطبی هستند) را بین لایه‌های خود جذب کرده و افزایش حجم پیدا می‌کنند [۱۲]. افزایش حجم ذرات بنتونایت، معادل با افزایش حجم ذرات جامد موجود در سیال است.

از طرف دیگر، ویسکوزیته‌ی پلاستیک یک سیال، تابع ویسکوزیته‌ی فاز مایع آن سیال و نیز حجم مواد جامد موجود در آن است. بنابراین، افزایش مقدار بنتونایت، موجب افزایش ویسکوزیته‌ی پلاستیک سیال می‌شود.

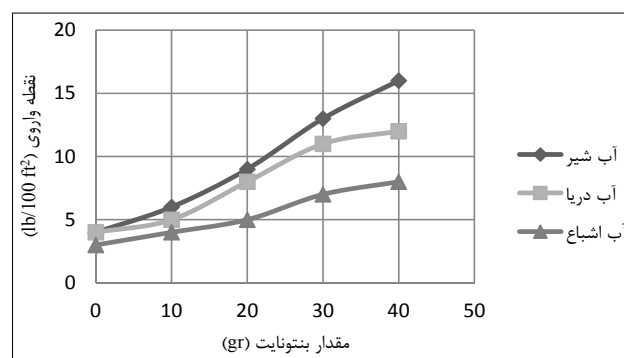
در مورد تأثیر شوری بر ویسکوزیته‌ی پلاستیک سیال، با توجه به رفتار نمونه سیالات فاقد بنتونایت (نمونه‌های ۱، ۶، ۱۱، ۱۶، ۲۱ و ۲۶) بر اساس دو شکل ۱- و ۲ می‌توان گفت پارامتر شوری بر رفتار پلاستیک سیال حاوی نشاسته تأثیر چندانی ندارد و افزایش آن، تنها باعث کاهش ناچیزی در مقدار ویسکوزیته‌ی پلاستیک سیال شده است. برخلاف سیال حاوی نشاسته، تأثیر پارامتر شوری بر سیال حاوی PAC بسیار چشم‌گیر است و با افزایش آن، مقدار ویسکوزیته‌ی پلاستیک این سیال، کاهش قابل توجهی می‌یابد.

دلیل اصلی این تفاوت در رفتار دو نمونه سیال، احتمالاً به ساختار مولکولی متفاوت نشاسته و PAC برمی‌گردد. در مقیاس مولکولی، ذرات نشاسته بر خلاف ذرات PAC، خاصیت یونی ندارند و یا اینکه خاصیت آنیونی جزئی دارند.

در واقع، هنگامی که ذرات PAC در آب قرار می‌گیرند، از زنجیره‌های پلیمری خود، یون سدیم (Na⁺) آزاد می‌کنند که این امر



شکل ۴ | نقطه واروی سیالات حاوی PAC بر حسب مقدار بنتونایت موجود در سیال



شکل ۵ | نقطه واروی سیالات حاوی نشاسته بر حسب مقدار بنتونایت موجود در سیال

جدول ۶ مقاومت ژله‌ای (۱۰ ثانیه) سیالات مورد آزمایش بر حسب lb/۱۰۰ft ^۲												
شماره‌ی نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
مقاومت ژله‌ای	۲/۲	۳	۳/۳	۴/۱	۵/۲	۲/۱	۲/۸	۳/۳	۳/۸	۴/۵	۱/۹	۲/۵
شماره‌ی نمونه	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷
مقاومت ژله‌ای	۲/۸	۳/۴	۳/۹	۴/۵	۵/۴	۲/۵	۳/۲	۳/۲	۴/۱	۴/۵	۲/۱	۲/۴

۲-۳- تأثیر بنتونایت بر نقطه‌ی واروی

نمودار مقادیر نقطه‌ی واروی بر حسب مقدار بنتونایت برای نمونه سیالات حاوی نشاسته و PAC به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار بنتونایت در هر دو گروه سیالات حاوی پلیمرهای نشاسته و PAC، مقادیر نقطه‌ی واروی این سیالات نیز افزایش می‌یابد.

یعنی این دو پارامتر با هم رابطه‌ی مستقیم دارند. دلیل این امر مجدداً خاصیت جذب آب توسط ذرات بنتونایت است. یکی از عوامل کنترل‌کننده‌ی نقطه‌ی واروی سیال، حجم ذرات جامد موجود در آن است [۱۳]. بنابراین، با تورم ذرات بنتونایت، مقدار این عامل کنترل‌کننده نیز افزایش می‌یابد.

در مورد تأثیر شوری سیال بر مقدار نقطه‌ی واروی آن، مشاهده می‌شود که این پارامتر در سیال حاوی نشاسته، بر خلاف سیال حاوی PAC تأثیر چندانی ندارد. احتمالاً دلیل آن، مجدداً به افزایش یون کلر (Cl⁻) در آب اشباع از نمک برمی‌گردد که باعث کاهش کارایی پلیمر PAC می‌شود.

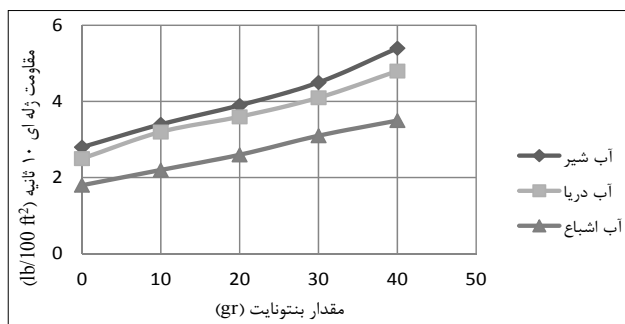
نکته‌ی دیگری که از شکل ۴- می‌توان استنتاج کرد این است که افزایش بنتونایت در نمونه سیالات حاوی PAC که فاز پیوسته‌ی آن‌ها را آب اشباع از نمک تشکیل می‌دهد (یعنی نمونه‌های ۲۶- الی ۳۰)، تا مقدار مشخصی می‌تواند باعث افزایش نقطه‌ی واروی سیال شود. در آزمایش انجام شده در این تحقیق، افزودن بنتونایت تا ۲۰ گرم در ۳۵۰ میلی‌لیتر آب اشباع از نمک، نقطه‌ی واروی سیال را افزایش داده و با افزودن مقادیر بیشتر بنتونایت (۳۰ و ۴۰ گرم) مقدار نقطه‌ی

واروی سیال، ثابت باقی مانده است. یکی از دلایل این امر می‌تواند کاهش خواص الکتریکی و یونی ذرات بنتونایت در آب اشباع از نمک باشد. از آنجایی که یکی دیگر از عوامل کنترل‌کننده‌ی نقطه‌ی واروی سیال، خاصیت الکتریکی ذرات آن سیال می‌باشد، بنابراین، با افزایش آنیون‌های کلر در آب اشباع از نمک، مولکول‌های قطبی آب با این آنیون‌ها وارد واکنش شده و سیال از نظر بار الکتریکی تا حدودی خنثی می‌شود و کمتر با ذرات بنتونایت و PAC وارد واکنش می‌شود. به همین دلیل، مقدار پارامتر نقطه‌ی واروی در چنین سیالی کاهش می‌یابد و افزودن بنتونایت به آن، تا مقدار مشخصی می‌تواند موثر واقع شود.

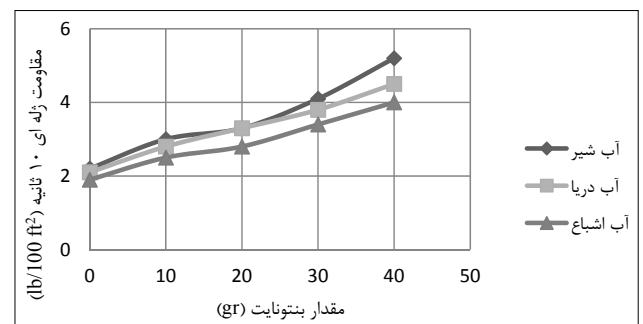
۳-۳- تأثیر بنتونایت بر مقاومت ژله‌ای

شکل‌های ۵- و ۶ نمودار نقطه‌ی واروی بر حسب مقدار بنتونایت را برای دو گروه سیالات حاوی نشاسته و PAC نشان می‌دهد. طبق این شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که این ویژگی از سیالات مورد آزمایش نیز همان روندی را طی می‌کند که دو ویژگی رئولوژی قبلی، یعنی ویسکوزیته‌ی پلاستیک و نقطه‌ی واروی طی کردند. مجدداً با افزایش مقدار بنتونایت، مقدار پارامتر مقاومت ژله‌ای سیالات نیز در هر دو گروه سیالات حاوی نشاسته و PAC، افزایش یافته است.

در مورد تأثیر شوری آب مورد استفاده نیز مشاهده می‌شود که مجدداً این پارامتر بر مقاومت ژله‌ای سیال حاوی نشاسته، بر خلاف سیال حاوی PAC، تأثیر چندانی ندارد که دلیل این امر همانطور که قبلاً توضیح داده شد، کاهش کارایی پلیمر PAC، در سیال اشباع از



شکل ۶ | مقاومت ژله‌ای سیالات حاوی PAC بر حسب مقدار بنتونایت موجود در سیال



شکل ۵ | مقاومت ژله‌ای سیالات حاوی نشاسته بر حسب مقدار بنتونایت موجود در سیال

جدول ۷ اُفت صافاب سیالات مورد آزمایش بر حسب ml/۳۰ min															
شماره‌ی نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
اُفت صافاب	۱۱	۶/۴	۸/۹	۱۱/۴	۱۴/۱	۱۱/۲	۷/۷۵	۹/۷۵	۱۳/۶	۱۵	۱۲	۱۰/۶	۱۲/۴	۱۵/۳	۱۹/۵
شماره‌ی نمونه	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
اُفت صافاب	۲۳	۸	۹/۱	۱۰/۵	۱۳	۲۶	۷/۲	۹/۵	۱۲/۲	۱۴/۹	۳۷	۱۴	۱۵/۲	۱۹/۸	۲۰/۷

شکل‌ها مشاهده می‌شود که در هر دو گروه سیالات حاوی نشاسته PAC، با افزایش مقدار NaCl موجود در سیال، افت صافاب آن افزایش می‌یابد. در واقع همانطور که قبلاً اشاره شد، با افزایش مقادیر شوری سیال، میزان هیدراته^{۱۸} شدن ذرات بنتونایت در آب کاهش می‌یابد [۵]. به عبارت دیگر، به دلیل افزایش یون‌های سدیم (Na^+)، نیروی چسبندگی بین ذرات بنتونایت افزایش یافته و از پراکنده شدن آن‌ها در آب جلوگیری می‌شود. از طرف دیگر، افزایش یون‌های کلر (Cl^-)، تمایل مولکول‌های آب برای واکنش با ذرات بنتونایت و پلیمر را کاهش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر بنتونایت بر خواص رئولوژی و افت صافاب سیالات حفاری حاوی پلیمرهای نشاسته و پلی‌آنیونیک سلولز انجام گرفت که در تهیه سیالات مورد آزمایش از سه نوع آب مختلف (آب شیر، آب دریا و آب اشباع از سدیم کلراید) به عنوان سیال پایه استفاده شد و اثر آن‌ها نیز بر رفتار سیال بررسی شد. نتایج زیر از این تحقیق حاصل شد:

* سیالات حاوی پلیمر نشاسته نسبت به سیالات حاوی پلیمر پلی‌آنیونیک سلولز خواص رئولوژی پایین‌تری دارند که این امر احتمالاً به دلیل غیریونی بودن یا خاصیت یونی پایین ذرات نشاسته نسبت به ذرات پلی‌آنیونیک سلولز است که باعث تشکیل زنجیره‌های پلیمری کوتاه‌تری توسط ذرات نشاسته می‌شود.

* مشاهده رفتار نمونه سیالات فاقد بنتونایت نشان می‌دهد که تأثیرپذیری پلیمر نشاسته از حضور نمک سدیم کلراید، نسبت به پلیمر پلی‌آنیونیک سلولز بسیار کمتر است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت پلیمر نشاسته بر خلاف پلیمر پلی‌آنیونیک سلولز، در سیالات حاوی نمک سدیم کلراید، کارایی خود را حفظ می‌کند.

* در صورت افزایش مقادیر بنتونایت و همچنین شوری فاز پیوسته سیال، رفتار رئولوژی سیالات حاوی پلیمر نشاسته در مقایسه

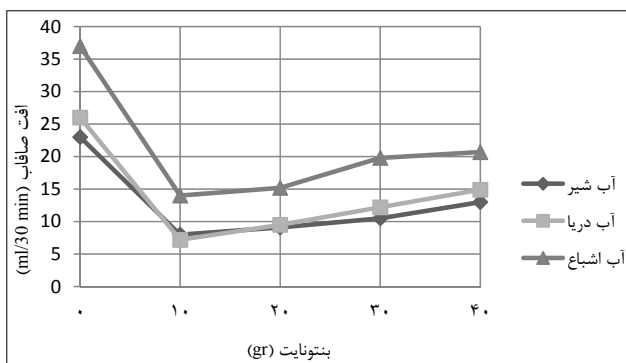
نمک NaCl است. با بررسی و مقایسه‌ی شکل‌های ۱ تا ۶ که خواص رئولوژی نمونه سیالات مورد آزمایش را نشان می‌دهند، می‌توان مشاهده کرد که خواص رئولوژی هر دو گروه سیالات حاوی نشاسته و PAC از روندی خاص پیروی می‌کنند.

به طور کلی می‌توان گفت با تغییر فاز پیوسته‌ی نمونه سیالات مورد آزمایش (آب شیر، آب دریا و آب اشباع) خواص رئولوژی سیالات حاوی نشاسته در مقایسه با سیالات حاوی PAC، شدت تغییرات کمتری دارد؛ بدین معنی که سیالات حاوی PAC، نسبت به تغییرات شوری سیال، حساسیت بیشتری دارند. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، دلیل این امر می‌تواند تأثیر پارامتر شوری بر کارایی پلیمر PAC و ذرات بنتونایت، و همچنین، تأثیر ناچیز آن بر کارایی پلیمر نشاسته باشد.

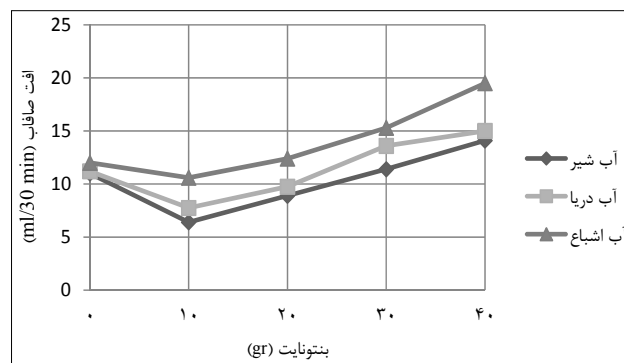
۳-۴- تأثیر بنتونایت بر افت صافاب

شکل‌های ۷ و ۸ نمودار افت صافاب بر حسب مقدار بنتونایت را برای دو گروه سیالات حاوی نشاسته و PAC نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌ها مشخص است، برای هر دو گروه سیالات حاوی نشاسته و PAC و همچنین، برای هر سه نوع آب مورد استفاده، در صورت عدم حضور بنتونایت در ترکیب سیال، مقادیر افت صافاب بسیار زیاد است. با افزودن مقدار ۱۰ گرم بنتونایت، افت صافاب به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد و به شرایط مطلوب نزدیک می‌شود. با این وجود، افزودن مقادیر بیشتر از ۱۰ گرم بنتونایت، افزایش افت صافاب را در پی دارد. این امر می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که سیالات پلیمری مورد آزمایش، حجم مشخصی از بنتونایت را می‌توانند در ترکیب خود پراکنده کنند و بیشتر از آن مقدار، می‌تواند منجر به ته‌نشینی ذرات بنتونایت و در نتیجه، افزایش پارامتر افت صافاب شود.

همچنین، در مورد تأثیر شوری سیال بر پارامتر افت صافاب، طبق



شکل ۸ | افت صافاب سیالات حاوی PAC بر حسب مقدار بنتونایت



شکل ۷ | افت صافاب سیالات حاوی نشاسته بر حسب مقدار بنتونایت

پلی آنیونیک سلولز، تا مقدار مشخصی باعث کاهش افت صافاب سیال می‌شود و بیشتر از آن مقدار، افت صافاب سیال را افزایش می‌دهد.

* افزایش مقادیر نمک سدیم کلراید، خصوصاً تا حد اشباع، باعث کاهش کارایی موثر بنتونیت (در افزایش خواص رئولوژی و کاهش افت صافاب سیال) می‌شود. ■

با سیالات حاوی پلیمر پلی آنیونیک سلولز، شدت تغییرات کمتری دارد.

* افزودن بنتونیت به هر دو گروه سیالات حاوی نشاسته و پلی آنیونیک سلولز، و همچنین در هر سه نمونه آب مورد آزمایش، باعث افزایش خواص رئولوژی این سیالات می‌شود.
* افزودن بنتونیت به هر دو گروه سیالات حاوی نشاسته و

پانویس‌ها

1 Polyanionic Cellulose Low Viscosity (PAC Lv)	7 PAC High Viscosity	13 Effective Viscosity
2 Starch	8 PAC Regular Viscosity	14 Apparent Viscosity
3 Fresh Water	9 Sago	15 Plastic Viscosity
4 Sea Water	10 Tapioca	16 Yield Point
5 Salt Saturated Water	11 Caustic Soda	17 Screen
6 Fluid Loss	12 Dial reading	18 Hydration

منابع

- [1] Ademiluyi Taiwo, Joel O. F. and Amuda A. Kazeem, "Investigation of Local Polymer (Cassava Starches) as a Substitute for Imported Sample in Viscosity and Fluid Loss Control of Water Based Drilling Mud", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, December 2011, Vol. 6, No. 12.
- [2] Mohamed Khodja, Jean Paul Canselier, Faiza Bergaya, Karim Fourar, Malika Khodja, Nathalie Cohaut, Abdelbaki Benmounah, "Shale Problems and Eater-Based Drilling Fluid Optimisation in the Hassi Massaoud Algerian Oil Field", Applied Clay Science, 2010, Vol 49, pp 383393-.
- [3] A Senthil Kumar, Vikas Mahtho & V.P. Sharma, "Behavior of Organic Polymer on the Rheological Properties of Indian Bentonite-Water Based Drilling Fluid System and its Effect on Formation Damage", Indian Journal of Chemical Technology, September 2003, Vol. 10, pp 525530-.
- [4] عماد کاوه، "سیستم سیال حفاری گلایکولی"، اهواز، انتشارات شرکت ملی حفاری، شهریور ۱۳۸۸
- [5] M. K. Ghassem Alaskari and Reza Nickdel Teymoori, "Effect of Salinity, pH and Temperature on CMC Polymer and XC Polymer Performance", International Journal of Engineering, December 2007, Vol. 20, No. 3, pp 283291-.
- [6] Aramco Production Company Drilling Fluids Manual, "Drilling Fluids Manual", Saudi Arabian Oil Company Hazarder publication, June 2006.
- [7] A. O. Olatunde1, M. A. Usman, O. A. Olafadehan1, T. A. Adeosun, O.E. Ufot, "Improvement of Rheological Properties of Drilling Fluid Using Locally Based Materials", Petroleum and Coal ISSN 13372012 ,7027-, pp 6575-.
- [8] Issham Ismail and Ahmad Kamal Idris, "The Prospect of Utilizing Local Starches as Fluid Loss Control Agents in the Petroleum Industry", University of Malaysia (UTM), Department of Petroleum Engineering, 2001, Session B1-11.
- [9] A. R. Nasiri, M. Valizadeh1, H. Norouzi, and M. Hemmati, "Investigating the Effect of Polythin and Polydrill on the Properties of Drilling Fluids", Journal of Petroleum Science and Technology, 2012, Vol. 2, No. 1, pp 37- 42.
- [10] Hvard Larsen, "Behaviour of Polymer Muds under High Pressure- High Temperature Conditions", Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering and technology, Diploma Thesis Spring 2007.
- [11] سعید عوض علی‌پور، رضا مجیدی، "مبانی مهندسی نفت"، چاپ دوم، تهران، انتشارات نوپردازان، ۱۳۸۵.
- [12] Mohamed Khodja, Malika Khodja Saber, Jean Paul Canselier, Nathalie Cohaut4 and Faïza Bergaya4, "Drilling Fluid Technology: Performances and Environmental Considerations", Applied Clay Science, 2011, Vol 52, pp 245253-.
- [13] Khaled J. Hassiba, Mahmood Amani, "The Effect of Salinity on the Rheological Properties of Water Based Mud under High Pressure and High Temperature for Drilling Offshore and Deep Wells", Earth Science Research, Published by Canadian Center of Science and Education, 2013, Vol. 2, No. 1.