Archive of SID

مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
تهران، ۲۹ خرداد ماه ۱۳۹۳ مجری: هم اندیشان انرژی کیمیا
تلفن: ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱ www.Reservoir.ir

بررسی امکان‌سنجی استفاده از سیالات هوشمند در صنعت نفت

احسان کمری[۱]*، صابر محمدی[۲]، بابک شعبانی[۳] ، حسن محمودیان[۴]
پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
*kamarie@ripi.ir

چکیده

در سال‌های اخیر توسعه ساختارهایی که به صورت پیوسته خود را مانیتور نموده و عملکرد خود را بهینه می‌سازند، پیشرفت چشم‌گیری داشته است. مواد و ساختارهای یاد شده تحت عنوان مواد و ساختارهای هوشمند شناخته می‌شوند. در حقیقت مواد و ساختارهای یاد شده با توجه به کارایی خاص خود، از عملکرد سیستم‌های بیولوژیک تقلید می‌کنند. مهم‌ترین چالش موجود در این زمینه این است که معمولاً عبارت‌های مواد و ساختارهای هوشمند به درستی به کار گرفته نمی‌شوند. هرچند واژه‌شناسی زبان انگلیسی سرنخ‌هایی برای این عبارات ارائه می‌کند، اما اکثر مهندسین به جای استفاده از واژه‌نامه‌ها از اصطلاحات رایج در زبان خود استفاده می‌کنند. به عبارت دیگر معمولا عبارت "مواد هوشمند" بدون تعریف دقیقی از آنچه مورد نظر است، به کار گرفته می‌شود. از طرف دیگر ارائه یک تعریف دقیق برای این دسته از مواد به طرز عجیبی دشوار است. هرچند عبارت مواد هوشمند به صورت گسترده در متون علمی و غیرعلمی مورد استفاده قرار می‌گیرد، توافق کلی بر روی معنای آن وجود ندارد. در این مقاله به مطالعه کاربرد سیالات مختلف هوشمند در صنعت نفت پرداخته شده است. در این راستا منابع مطالعاتی مختلف در این زمینه بررسی شده و مزایا و محدودیت‌های این تکنولوژی نوظهور مورد بحث قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: سیالات هوشمند، الکترورئولوژیک، مگنتورئولوژیک، صنعت نفت.

[۱] دکتری مهندسی نفت، مخازن هیدروکربوری
[۲] کارشناسی ارشد مهندسی نفت، مخازن هیدروکربوری
[۳] کارشناسی ارشد مهندسی نفت
[۴] کارشناسی ارشد مهندسی نفت

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

واژه سیالات هوشمند عموما به عنوان سیالی که به صورت نیونونی عمل می‌کند تا زمانی که یک محرک خاصی عمل نکند، اطلاق می‌گردد. زمانی که محرکی از یک نوع مناسب یا یک نیروی کافی اعمال شود، ذرات با سایز میکرومتر در جهت همراهی با سیال به صف می‌شوند به صورتی که مقاومت در برابر سیال هوشمند، ویسکوزیته، به صورت قابل ملاحضه‌ای زیاد شود [۱و۲] و این سیال مشابه جامد می‌گردد [۳].

دو گروه عمده از سیالات هوشمند الکترورئولوژیکی (ER)[1] و مگنتورئولوژیک (MR)[2] هستند که نمی‌توان فواید آنها را با هم مقایسه کرد[۴]. هر دو سیال از یک سیال دی‌الکتریک تشکیل شده‌اند ولی در نوع ذرات معلق و زمینه کاربرد مورد نیاز با هم متفاوت هستند [۴،۲]. یکی از اجزای اصلی سیالهای مگنتورئولوژیک انتخاب ذراتی با خاصیت آهنربایی زیاد مانند آهن کربونیل[3] می‌باشد که به صورت معلق در روغن معدنی[4]، روغن مصنوعی[5] وگلیکول وجود دارد [۷،۱]. سیالهای الکترورئولوژیکی از ذرات قطبی شده در یک تعلیق کلوئیدی همراه با یک روغن[6] که ثابت دی الکتریک آن از ذرات قطبی شده کمتر است، تشکیل شده است [۸، ۹].

دامنه تحقیقاتی مواد هوشمند وسیع و پیچیده است که نه تنها به خود ماده بر می‌گردد بلکه همچنین کاربردها و جنبه‌های فنی آن نیز مد نظر است. انواع بسیار گوناگونی از مواد هوشمند و روش‌های مختلف دسته‌بندی آن‌ها وجود دارند. با توجه به مطالعات قبلی، محققان دانشگاه ایالت میشیگان در سال ۱۹۸۸ اولین کسانی بودند که از سیالات الکترورئولوژیکی برای خلق مواد هوشمند استفاده کردند. گرانروی مواد حاصله از این سیالات در واکنش به جریانات الکتریکی تقریباً بصورت لحظه‌ای تغییر می‌کرد. این اوّلین باری بود که اصطلاح سیالات هوشمند بکار برده شد. در همان سال، گزارشی درباره پلیمرهای عاملی رسانا با پتانسیل کاربرد به عنوان سیالات هوشمند منتشر شد. دو سال بعد در سال ۱۹۹۱ مقاله‌ای در مورد پلیمرها و هیدروژل‌های حساس به محیط و کاربرد آن‌ها به عنوان بیومواد هوشمند انتشار یافت.

سیالات هوشمند، گروهی از مواد هوشمند هستند که خواص آن‌ها (گرانروی، کشش‌سطحی و سایر خصوصیات سیال) تحت تأثیر محرک‌های خارجی مانند میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی، نور، دما و PH به صورت لحظه‌ای و برگشت‌پذیر تغییر می‌کند. سیالات هوشمند بسته به نوع محرک‌ها به گروه‌های مختلفی دسته‌بندی می‌شوند. به عنوان مثال، سیالات مگنتورئولوژیک[7] (MR) تحت تأثیر میدان مغناطیسی از مایع به جامد یا از جامد به مایع تغییر حالت می‌دهند، در حالی‌که سیالات الکترورئولوژیک در اثر اعمال میدان الکتریکی به ساختارهای رشته‌ای[8] که از گرانروی بالاتری برخوردارند، تبدیل می‌شوند. از طرف دیگر آلیاژهای حافظه‌دار و پلیمرها به تغییرات دمایی حساس هستند؛ به عبارت دیگر می‌توان با تغییر دما، تغییر شکلی در مواد یاد شده ایجاد کرد یا تغییر شکل ایجاد شده را برطرف نمود. پلیمرهای حساس به PH گروه دیگری از مواد هوشمند به‌شمار می‌روند که در اثر تغییر PH محیط اطراف متورم یا متراکم می‌شوند.

۲- کاربرد سیالات هوشمند در صنعت نفت

با توجه به اهمیت بهره‌برداری صحیح از مخازن هیدروکربوری و گسترش تکنولوژی‌های نوین در صنعت نفت، استفاده از سیالات هوشمند در این حوزه نیز بسیار مورد توجه است. در ادامه تعدادی از کاربردهای این سیالات در حوزه مهندسی نفت و

[1] Electrorheological Fluids
[2] Magnetorheological Fluids
[3] Carbonyl Iron
[4] Mineral Oil
[5] Synthetic Oil
[6] Oil
[7] Magnetorheological Fluids
[8] Fibrous Structures

www.SID.ir

Archive of SID

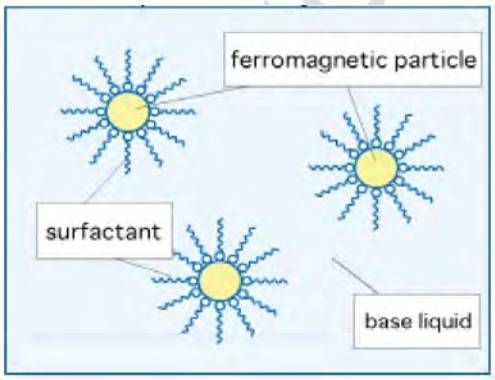
در جهت بهبود بازیافت از مخازن بیان می‌شود.

۲-۱ سیلاب‌زنی با سورفکتانت بهبود یافته با سیال هوشمند مغناطیسی در فرآیند ازدیاد برداشت نفت

یکی از مشکلات کلیدی بازیابی نفت در مخازن نفت دوست، غلبه بر نیروهای کشش‌سطحی است که تلاش می‌کنند نفت را به سطح سنگ متصل نگه‌دارند. در مخازن آب‌دوست نیروهای کشش‌سطحی حباب‌های نفتی ایجاد می‌کنند که راه‌های عبور را مسدود می‌کنند. کاهش تنش بین سطحی و بنابراین کاهش مقاومت در برابر جریان به راحتی با استفاده از سیلاب‌زنی با سورفکتانت بهبود یافته و با محلول مغناطیسی قابل دست‌یابی است. نفت می‌تواند با استفاده از محلول مغناطیسی که به عنوان حلال بهتری برای سورفکتانت عمل می‌کند، قطبی‌تر شود [۸].

ایده کنترل خواص محلول‌های مغناطیسی با میدان مغناطیسی منجر به بسیاری از کاربردهای جدید شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، محلول مغناطیسی متشکل از نانوذرات فرومغناطیس پوشانده شده با لایه‌ای از سورفکتانت است که در یک محلول واسطه شناور می‌باشد. خواص محلول‌های مغناطیسی از قبیل دانسیته، ظرفیت حرارتی و ویسکوزیته در تعیین ترکیب/غلظت ذرات محلول‌های مغناطیسی با توجه به خواص مورد نیاز برای محلول‌های ازدیادبرداشت موثر است. آزمایشات نشان می‌دهد که یک محلول مغناطیسی به نسبت محلول حامل خود از دانسیته بالاتری برخوردار است.

محلول مغناطیسی تحت تأثیر یک میدان الکترومغناطیسی قوی در ناحیه نزدیک چاه، می‌تواند نقش موثری در حرکت سیال در داخل مخزن ایفا کند. تحت تأثیر امواج میدان الکترومغناطیسی، جهت‌گیری ممان‌های دوقطبی سیال مخزن اتفاق می‌افتد که منجر به افت خواص سیال مخزن مانند ویسکوزیته می‌شود که خود باعث جریان سیال مخزن در ناحیه متخلخل می‌گردد [۸].



شکل ۱: شمای یک محلول مغناطیسی [۸].

۲-۲- استفاده از پلیمرهای هوشمند در سیلاب‌زنی شیمیایی

یک برنامه تحقیقاتی پایه‌ای و هماهنگ در دپارتمان انرژی آمریکا با همراهی دانشگاه میسیسیپی جنوبی در جریان است که هدف نهایی آن، توسعه پلیمرهای هوشمند چندکاره‌ای[1] است که می‌توانند نسبت به محرک (قدرت یونی، PH، دما و تنش برشی) بصورت درجا پاسخ دهند و در نتیجه به شکل قابل ملاحظه‌ای راندمان جاروبی[2] را در فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت بهبود بخشند. تولید بیشتر نفت درجای اولیه و بخش عظیمی از نفت کنارگذار[3] و غیر قابل برداشت با روش‌های رایج سیلاب‌زنی شیمیایی، به کمک پلیمرهای هوشمند ممکن خواهد شد. دو نوع ساختاری از پلیمرهای هوشمند چندکاره برای این کار در نظر گرفته شده‌اند که می‌توانند به تنهایی و یا با همدیگر در فرآیندهای سیلاب‌زنی با آب استفاده شوند. پلیمرهای

[1] Smart Multi-functional Polymers (SMFPs)
[2] Sweep Efficiency
[3] By-passed

www.SID.ir

Archive of SID

هوشمند چندکاره نوع I می‌توانند بصورت بازگشت‌پذیر مایسل‌هایی در آب تشکیل دهند که اصطلاحاً پلی صابون[1] نامیده می‌شوند و کشش‌سطحی کمتری را در سطح مشترک آب/ نفت نتیجه می‌دهند. پلیمرهای هوشمند چندکاره نوع II، پلیمرهایی با وزن مولکولی زیاد هستند که به منظور تغییر گرانروی سیالات تزریقی طی فرایند برداشت طراحی شده‌اند.

عملکرد مطلوب این سیستم‌ها وابسته به ترکیب دقیق مونومرهای عاملی منتخب در طول ساختار ماکرومولکولی آن‌ها است تا به عنوان سنسور یا محرک توسط تغییرات محیطی سیال پیرامون خود فعال شوند. جایگذاری مونومرهای آب‌دوست، آبگریز و محرک بوسیله تکنیک پلیمراسیون رادیکالی کنترل شده[2] انجام می‌شود. گروه‌های عاملی پاسخگو به محرک می‌توانند منجر به تغییرات ساختاری در پلیمرها شوند که رفتار سورفکتانتی (نوع I)، گرانروی (نوع II) و نفوذپذیری نفت و فازهای آبی را تغییر خواهند داد.

بنابراین رفتار جریان سیال در درون سنگ مخزن متخلخل می‌تواند با تغییرات غلظت الکترولیت، PH، دما و نرخ جریان عوض شود. این تکنولوژی پیشنهادی بطور قابل ملاحظه‌ای از نظر محیط زیستی نیز جذاب است زیرا این سیستم‌ها می‌توانند در آب سنتز شده، پردازش شوند و از آب جدا و یا بازیافت شوند [۹].

۲-۳-فوم هوشمند

کنترل تحرک‌پذیری[3] با استفاده از سورفکتانت[4]، از روش‌های موثر افزایش بازیافت در فرآیند سیلاب‌زنی با دی‌اکسیدکربن[5] است. اضافه کردن سورفکتانت در طول تزریق متناوب آب و دی‌اکسید کربن[6] یا تزریق هم‌زمان با دی‌اکسیدکربن، باعث ایجاد فوم در مخزن می‌شود و تحرک‌پذیری دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهد. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بعضی از سورفکتانت‌ها تولید فوم هوشمند می‌کنند که به صورت انتخابی تحرک‌پذیری دی‌اکسیدکربن را در مغزه‌های با تراوایی بالاتر، بیشتر از مغزه‌های با تراوایی کمتر کاهش می‌دهند. آزمایش‌های گوناگونی جهت بررسی اثر فوم‌های هوشمند در بازیافت نفت از مخازن انجام شده است که در ادامه یکی از این آزمایش‌ها و نتایج آن شرح داده می‌شود [۱۰].

۲-۳-۱- تأثیر فوم هوشمند در افزایش بازیافت سیلاب‌زنی با دی‌اکسیدکربن

جهت بررسی اثر تأثیر فوم هوشمند بر ازدیاد برداشت نفت به کمک دی‌اکسید کربن در مخازن ناهمگن، دو سیستم مغزه مرکب[7] طراحی شده است. سیستم مغزه تهیه شده در واقع یک مغزه مرکب هم‌محور[8] است که دارای دو ناحیه با تراوایی مختلف است. این ناحیه‌ها می‌توانند در تماس مویینگی[9] با هم باشند و یا نباشند. در ابتدا یک مغزه به طول ۶/۷ سانتیمتر و قطر ۳/۵۶ سانتیمتر با اپوکسی و روکش فولادی زنگ نزن، پوشش داده شد و سپس در وسط آن حفره‌ای به قطر ۱/۶ سانتیمتر ایجاد و درون آن با ذرات یکنواخت ماسه سیلیکا پر شد؛ در واقع این مغزه مرکبی است که لایه‌ها با هم در تماس مویینگی هستند. برای شبیه‌سازی عدم تماس لایه‌ها با هم، سیستم مرکب مغزه‌ای مانند نمونه اول آماده شد و در حفره ایجاد شده ابتدا یک لوله از جنس آلیاژ برنج قرار داده شد و سپس توسط ذرات سیلیکا پر شد. مشخصات دو مغزه مرکب ساخته شده (دو ناحیه با تراوایی مختلف بدون تماس و دو ناحیه با تراوایی مختلف در تماس مویینگی) در جدول ۱ آورده شده است [۱۰].

---

[1] Polysoaps
[2] Controlled Radical Polymerization (CRP)
[3] Mobility
[4] Surfactant
[5] CO_2 Flooding
[6] Water Alternating Gas (WAG)
[7] Composite Core
[8] Coaxial Composite Core
[9] Capillary Contact

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: ویژگی‌های مغزه‌های مرکب مورد استفاده جهت بررسی اثر تاثیر فوم هوشمند بر ازدیاد برداشت نفت به کمک دی‌اکسیدکربن در مخازن ناهمگن [۱۰]

Type of Composite Core	Center Region			Annulus Region	
	Φ	K (md)	Area (cm2)	Φ	K (md)
Isolated Coaxial	0.19	120	1.27	0.23	590
Capillary Contact	0.19	450	2.01	0.22	1250

آزمایش‌ها در دو فاز انجام شد. در فاز اول آزمایش‌ها، مغزه‌های مرکب در ابتدا با آب نمک یا سورفکتانت قبل از تزریق دی‌اکسیدکربن اشباع شدند. در فاز دوم آزمایش، قبل از تزریق دی‌اکسیدکربن ، مغزه‌ها با نفت تا اشباع آب باقیمانده[1] اشباع شدند. تمام آزمایش‌ها با تزریق نرخ ثابت دی‌اکسیدکربن به تنهایی یا دی‌اکسیدکربن/سورفکتانت با نسبت حجمی ۴ به ۱ انجام شدند. جدول ۲ و جدول ۳، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی دو مغزه مرکب را نشان می‌دهد. بر اساس و جدول ۳، در آزمایش شماره ۱، میان‌شکنی[2] دی‌اکسیدکربن در ناحیه با تراوایی بالا (ناحیه حلقوی) بعد از تزریق ۰٫۶۳ PV[3] و در ناحیه با تراوایی پایین (ناحیه مرکزی) بعد از تزریق ۱٫۱۳ PV اتفاق می‌افتد. تزریق هم‌زمان دی‌اکسیدکربن و آب‌نمک، که به نوعی تزریق متناوب آب و دی‌اکسیدکربن را شبیه‌سازی کرده است، به مقدار بسیار کمی در ناحیه حلقوی (۰٫۶۴ PV) زمان میان‌شکنی دی‌اکسیدکربن را به تاخیر انداخته است. با اضافه شدن سورفکتانت به دی‌اکسیدکربن و آب نمک، زمان میان‌شکنی دی‌اکسیدکربن به ۱٫۱۲ PV و ۱٫۸۶ PV به ترتیب در ناحیه با تراوایی بالا و ناحیه با تراوایی کم، افزایش پیدا کرده است. افزایش زمان میان‌شکنی دی‌اکسیدکربن با اضافه شدن سورفکتانت به خوبی قابل مشاهده است. در حالتی نیز که از دی‌اکسیدکربن و فوم جهت جابه‌جایی نفت استفاده شده، افزایش زمان میان‌شکنی دی‌اکسیدکربن، قابل توجه است. افزایش زمان میان‌شکنی برای مغزه مرکب با دو ناحیه با تراوایی مختلف در تماس موییننگی را می‌توان در جدول ۲ و جدول ۳مشاهده کرد. از مقایسه داده‌های جدول ۲ و جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که زمان‌میان‌شکنی دی‌اکسیدکربن با اضافه کردن فوم هوشمند در هر دو سیستم مغزه مرکب، افزایش یافته است. فوم هوشمند باعث افزایش بازدهی جاروبی[4] دی‌اکسیدکربن شده است. این افزایش بازدهی جاروبی ناشی از کاهش قابل توجه حرکت دی‌اکسیدکربن در ناحیه با تراوایی بالاست. شکل ۲ و شکل ۳ میزان کل بازیافت نفت برای هر دو مغزه مرکب را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل‌ها نیز نشان می‌دهند، استفاده از فوم باعث افزایش میزان کل بازیافت نفت شده است [۱۰].

جدول ۲: خلاصه نتایج آزمایش‌های مغزه مرکب با دو ناحیه با تراوایی مختلف بدون تماس [۱۰]

Run #	Description	Flow Rate (cc/hr)	Ratio	Breakthrough in Annulus Region (PV)	Breakthrough Center Region (PV)
1	CO_2 displaced brine	16.00	1	0/63	1.13
2	CO_2 /brine displaced brine	16.45	4:1	0.64	1.17
3	CO_2 -foam displaced surf.	16.45	4:1	1.12	1.86
4	CO_2 displaced oil	16.00	1	0.24	N/A
5	CO_2 /brine displaced oil	16.45	4:1	0.74	N/A
6	CO_2 -foam displaced oil	16.45	4:1	0.88	2.56
N/A: no breakthrough was observed					

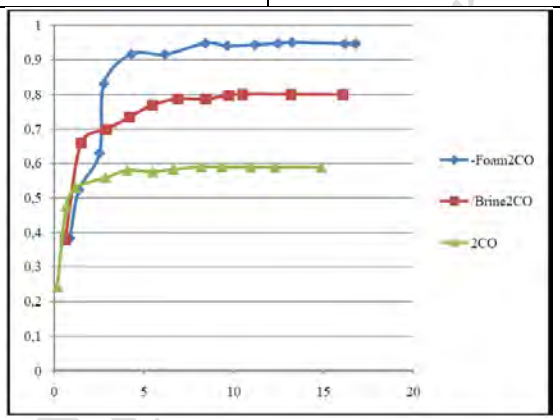
[1] Residual Water Saturation
[2] Breakthrough
[3] Pore Volume
[4] Sweep Efficiency

www.SID.ir

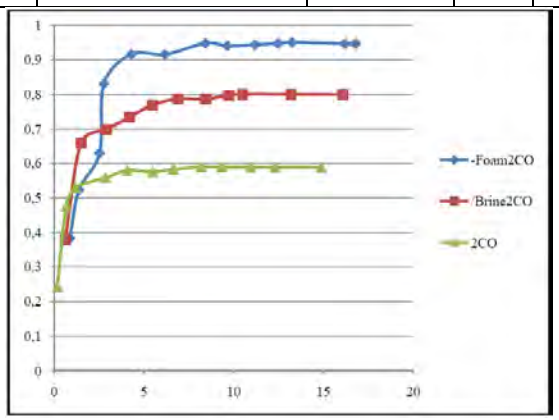
Archive of SID

جدول ۳: خلاصه نتایج آزمایش‌های مغزه مرکب با دو ناحیه با تراوایی مختلف در تماس موییننگی [۱۰]

Run #	Description	Flow Rate (cc/hr)	Ratio	Breakthrough in Annulus Region (PV)	Breakthrough Center Region (PV)
1	CO_2 /brine displaced brine	16.45	4:1	0.42	0.62
2	CO_2 -foam displaced surf.	16.45	4:1	0.66	0.61
3	CO_2 displaced oil	16.00	1	0.44	0.5
4	CO_2 /brine displaced oil	16.45	4:1	0.46	0.61
5	CO_2 -foam displaced oil	16.45	4:1	0.86	0.34



شکل ۲: میزان کل بازیافت نفت مغزه مرکب با دو ناحیه با تراوایی مختلف بدون تماس [۱۰]



شکل ۳: میزان کل بازیافت نفت مغزه مرکب با دو ناحیه با تراوایی مختلف در تماس موییننگی[۱۰]

۲-۴- فیلتریت گل حفاری هوشمند[1]

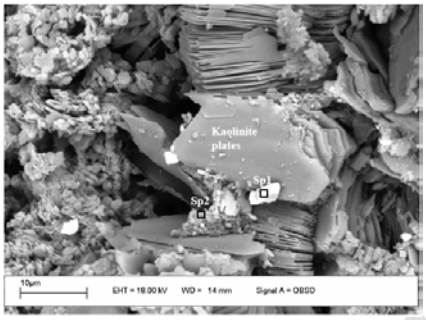
عوامل متعددی باعث آسیب به سازند می‌شوند. جلوگیری از عوامل آسیب به سازندی که حاصل از ماهیت مخزن و تولید از مخزن است، بسیار مشکل است. این عوامل را می‌توان به صورت طبیعی فرض کرد، که با و بدون حضور سیالات حفاری و تکمیل چاه رخ می‌دهد. از نمونه‌های آسیب طبیعی به سازند می‌توان به رسوبات آلی و غیرآلی که ناشی از افت فشار در اطراف دیواره چاه و مهاجرت ذرات ریز سازند به طرف دهانه چاهاست، اشاره کرد. مهاجرت ذرات و به خصوص مهاجرت ذرات کائولیت، از عوامل مهم آسیب به سازند می‌باشند. برای حل این مشکل از فیلتریت گل حفاری هوشمندی استفاده شده است که با درمان نواحی اطراف دیواره چاه حتی قبل از حفاری آن عمق خاص، از مهاجرت ذرات کائولیت جلوگیری کند. با ثابت شدن ذرات کائولیت در جای خود، از آسیب سازند در طول عملیات بهره‌برداری در اثر مهاجرت ذرات کائولیت جلوگیری می‌شود.

کائولیت‌ها رس‌های سیلیکات‌آلومینیوم آبدار[2] با ساختار ورقه‌ای توسعه یافته‌ای هستند. شکل ۴ وجود ورقه‌های کائولیت در یک نمونه سنگ مخزن را نشان می‌دهد. کائولیت‌ها رفتار نفت دوست[3] از خود نشان می‌دهند. شکل ۵ تصویر SEM یک نمونه سنگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، سطح کائولیت توسط نفت در برگرفته شده است که حاکی از نفت دوست بودن کائولیت است. ذرات تمایل دارند در فازی که آنها را تر می‌کند، باقی بمانند. کائولیت سطح تماس بسیار زیادی نسبت به حجم دارد و به راحتی با حرکت درون فازی که آنها را تر می‌کند، درون حفره‌ها مهاجرت می‌کند. به همین دلیل ذرات کائولیت با جریان نفت درون حفره ها مهاجرت می‌کنند.

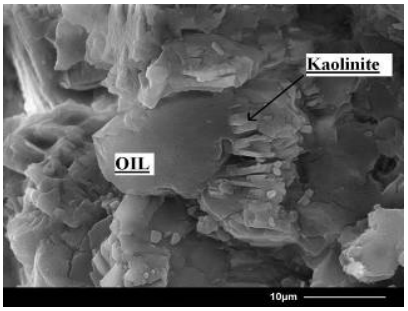
[1] Smart Drilling Mud Filtrate
[2] Hydrous Aluminum Silicate Clay
[3] Oil Wet

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴: حضور ورقه‌های کائولیت در یک نمونه سنگ.



شکل ۵: تصویر SEM یک نمونه سنگ مخزن با کانی‌های کائولیت پوشش داده شده با آب.

به دلیل وجود دو محیط متفاوت ترشوندگی بر روی سطح کانی‌ها، کائولیت توزیع ترشوندگی غیرمعمولی دارد. بنابراین دو فیلتریت هوشمند طراحی شده است: یکی برای تغییر ترشوندگی کائولیت از نفت‌دوست به آب‌دوست است و دیگری برای تاثیر بر نواحی آب‌دوست کانی‌ها است تا آنها را به هم محکم کند. تغییر ترشوندگی کائولیت از نفت‌دوست به آب‌دوست قبل از اینکه مهاجرت ذرات آغاز شود، باعث محافظت آنها در برابر حرکت نفت می‌شود. ذرات کائولیت در فاز آب که به اندازه نفت حرکت نمی‌کنند، باقی می‌مانند. بنابراین بر اساس گفته میوکه[1] که بیان می‌کند: ذرات فقط در صورتی حرکت می‌کنند که فازی که آنها را تر می‌کند، حرکت کند، این ذرات در جای خود باقی می‌مانند چون فاز آب حرکت نمی‌کند. ثابت‌سازی درجای کانی‌های کائولیت توسط عاملی انجام می‌شود که توسط فلمینگ[2] و همکارانش شرح داده شده است [۱۱]. هر سیالی که به چاه تزریق می‌شود ممکن است باعث آسیب به سازند شود. اندازه‌گیری میزان آسیب وارد شده به سازند معمولاً به صورت نسبت تراوایی K/K_o (نسبت تراوایی کاهش یافته به تراوایی اولیه) بیان می‌شود. به این آزمایش که در صنعت انجام می‌شود، بازگشت تراوایی[3] نیز گفته می‌شود [۱۲].

۲-۵- آب هوشمند[4]

سیلاب‌زنی با آب[5] برای زمان‌های طولانی به عنوان یکی از روش‌های ازدیاد برداشت ثانویه[6] بوده است. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی نفت خام، آب نمک و سنگ انجام شده است. این تحقیقات نشان داده‌اند که ترکیب آب تزریقی می‌تواند ویژگی‌های ترشوندگی مخزن را در طول انجام عملیات سیلاب‌زنی با آب به گونه‌ای تغییر دهد که باعث افزایش ازدیاد برداشت نفت گردد. بنابراین تزریق آب هوشمند با ترکیب و شوری مناسب می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های بازیافت ثالثیه نفت[7] عمل کند؛ اگر چه از لحاظ اقتصادی مهم است که سیلاب‌زنی با آب در شرایط بهینه خود در فرآیندهای برداشت ثانویه انجام شود. نمونه‌های تزریق آب هوشمند در مخازن کربناته و ماسه‌سنگی عبارتند از:

- تزریق آب دریا در مخازن گچی با دمای بالا
- سیلاب‌زنی با آب دارای شوری کم در مخازن ماسه سنگی

مکانیزم شیمیایی که در مخازن ماسه‌سنگی و در مخازن کربناته باعث تغییر ترشوندگی سنگ مخزن می‌شوند، هنوز مورد بحث و بررسی است [۱۳].

---

[1] Muecke
[2] Fleming
[3] Return Permeability
[4] Smart Water
[5] Water Flooding
[6] Secondary Oil Recovery
[7] Tertiary Oil Recovery

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۶- برایت واتِر[1]

جهت افزایش میزان تولید از یک مخزن معمولاً روش‌های برداشت ثانویه، مانند سیلاب‌زنی با آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های رایج قدیمی سیلاب‌زنی با آب معمولاً با بازدهی جاروبی[2] پایینی همراه هستند و معمولا ۴۰٪ تا ۵۰٪ نفت درجا در مخزن باقی می‌ماند [۹]. در هنگام سیلاب‌زنی با آب، نواحی سارق[3] باعث میان‌شکنی[4] سریع آب می‌شوند و در نهایت به کاهش بازده جاروبی سیلاب‌زنی با آب منجر می‌شوند (شکل ۶) [۱۴].

در طول ۴۰ سال اخیر تلاش‌های گسترده‌ای جهت بهبود بازیافت نفت از طریق کنترل تحرک‌پذیری نفت با استفاده از پلیمرها و پلیمرهای مشتق شده از ژل‌ها انجام شده است. بیشتر این فعالیت‌ها بر روی اطراف دیواره چاه با استفاده از ژل و پلیمرها متمرکز بوده است و همچنین کارهای قابل ملاحظه‌ای بر روی سیلاب‌زنی با پلیمر انجام شده است. همه فرآیندهای سیلاب‌زنی با پلیمر با تغییر گرانروی فاز آبی، تحرک‌پذیری آب را کنترل می‌کنند. بیشتر پلیمرها با جذب‌سطحی بر روی سطح سنگ، ترواپی سنگ را نیز تغییر می‌دهند. سیلاب‌زنی با پلیمر نقاط قوت و ضعف گوناگونی دارد. پلیمرها به شوری، دما، تنش برشی و تخریب بیولوژیکی تا حدی حساس هستند. محدودیت‌هایی نیز بسته به فرآیندهای سیلاب‌زنی با آب وجود دارد. گرانروی بالای پلیمرها، مانع از تزریق آنها با نرخ بالا می‌شود. متاسفانه موثر بودن فرآیند با سیلاب‌زنی با پلیمر در گرانروی‌های پایین کاهش می‌یابد و این محدوده کاربرد این فرآیند را کاهش می‌دهد. در پروژه‌هایی که در میادین با موفقیت سیلاب‌زنی با پلیمر استفاده شده است، هزینه فرآیند سیلاب‌زنی نسبتاً بالا می‌باشد. بر اساس برآوردهای انجام شده در سال ۱۹۹۶ این هزینه حدود ۸ تا ۱۰ دلار در هر بشکه بود.

به نظر می‌رسد که روشی با محدودیت‌های کمتر و مقرون به صرفه‌تر در برای بهبود بازده جاروبی[5] نیاز باشد. این عمل با تزریق سیالی با گرانروی پایین‌تر محقق می‌شود که بعداً در درون مخزن، تبدیل به فازی با گرانروی بسیار بالا یا مسدود کننده شود [۱۵]. در سال‌های اخیر استفاده از برایت واتر[6] در جهت بهبود فرآیند سیلاب‌زنی با آب بسیار مورد توجه واقع شده است. این ذرات با مکانیسم‌های مختلف که در ادامه توضیح داده شده‌اند می‌توانند باعث بهبود این فرآیند شوند.

فناوری برایت واتِر با مشارکت سه شرکت (بی‌پی[7]، شورون[8] و نالکو[9]) توسعه داده شده است و اکنون به صورت صنعتی توسط شرکت تیورکو[10] عرضه شده است. این فناوری در نظر دارد بازدهی سیلاب‌زنی با آب را با تزریق مستقیم در ناحیه نفتی، بهبود بخشد. برایت‌واتِر در واقع مواد شیمیایی با ذرات ریز میکرونی است که برای بهبود بازدهی سیلاب‌زنی با آب طراحی شده‌اند. این ذرات بسیار ریز از فناوری فعال‌سازی حرارتی استفاده می‌کنند و وقتی به مقصد می‌رسند، متورم می‌شوند. مکان‌هایی که در آن ذرات ریز متورم می‌شوند، توسط دمای مخزن دیکته می‌شود. متورم شدن ذرات توسط دما شبیه به متورم شدن ذرت بوداده در حضور حرارت است (شکل ۷). ذرات بسیار ریز تا چندین برابر حجم اولیه خود متورم شده و انباشته می‌شوند که با این روش گلوگاه‌های نواحی سارق را مسدود می‌کنند. این امر آب تزریقی را به سمت نواحی نفتی که قبلا جاروب نشده‌اند، هدایت می‌کند و در نتیجه نفت بیشتری تولید می‌شود (شکل ۸و شکل ۹ **Error! Reference source not found.**) [۱۶]. انواع مختلفی از این محصول موجود است که بسته به ویژگی‌های نواحی سارق، شوری آب و دمای مخزن دارد [۱۷]. از مزایای فناوری برایت‌واتِر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۸]:

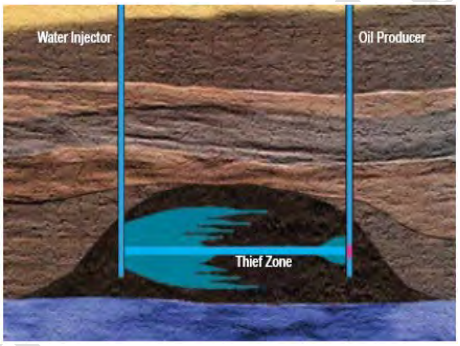
---

[1] Bright Water
[2] Sweep Efficiency
[3] Thief Zones
[4] Breakthrough
[5] Sweep Efficiency
[6] BrightWater
[7] BP
[8] Chevron
[9] Nalco
[10] Tiorco

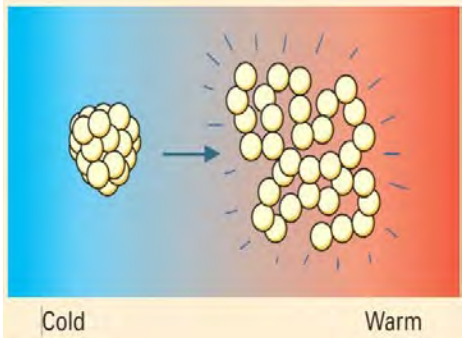
www.SID.ir

Archive of SID

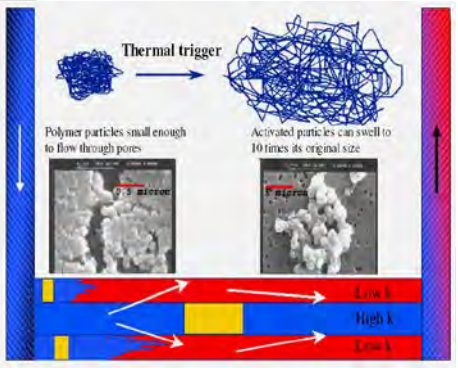
- جریان آب را به درون نواحی سارق با تراوایی بالا محدود می‌کند.
- از تولید آب ناخواسته با هزینه بالا جلوگیری می‌کند.
- باعث افزایش بازدهی جاروبی می‌شود.
- باعث افزایش بازیافت از مخزن تا ۱۰٪ می‌شود.
- می‌تواند با تجهیزات تزریق مواد شیمیایی رایج مورد استفاده قرار گیرد.
- در آب به صورت محلول است.
- خطری برای مخزن و محیط زیست ندارد.
- برای تزریق این مواد نیاز به متوقف کردن عملیات تزریق وجود ندارد.



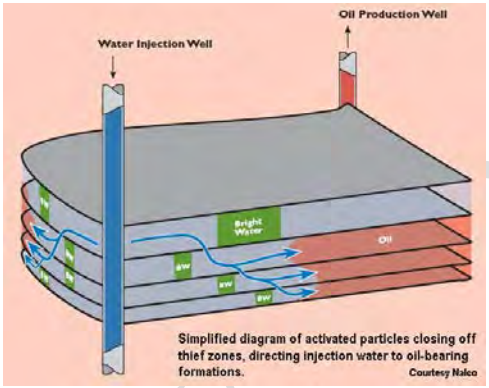
شکل ۶: میان‌شکنی سریع آب به خاطر نواحی سارق که باعث کاهش بازدهی سیلاب‌زنی با آب می‌شود.



شکل ۷: تورم ذرات برایت واتِر در حضور دما.



شکل ۸: نحوه عملکرد برایت واتِر که همراه با آب تزریقی به نواحی سارق می‌رود و در آنجا تحت تأثیر دما متورم می‌شود و نواحی سارق را مسدود می‌کند. با مسدود شدن نواحی سارق، آب به سمت سایر نواحی که دارای نفت جا بجا نشده هستند، حرکت می‌کند.



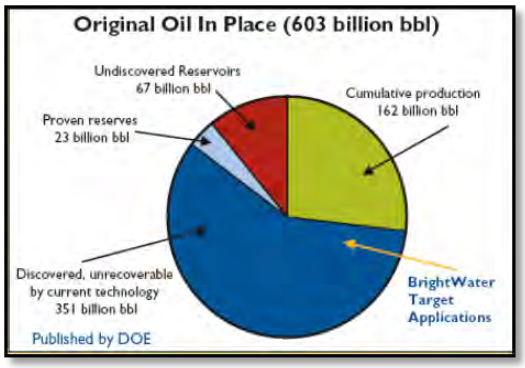
شکل ۹: تصویر سیلاب‌زنی و نقش مواد ریز

بر اساس برآوردهای دپارتمان انرژی آمریکا[1] بیشتر مخازن نفت ضریب بازیافت کمی دارند. بر اساس این گزارش بیش از ۶۰۰ میلیارد بشکه از نفت مخازن شناخته شده آمریکا که حدود نصف تا دوسوم نفت درجای جهان را تشکیل می‌دهد، توسط فناوری کنونی غیرقابل بازیافت است. این حجم بسیار عظیم از نفت را می‌توان با استفاده از فناوری ذرات بسیار ریز استخراج نمود. شکل ۱۰ بخش عظیم نفت غیر قابل بازیافت دنیا، که هدف استفاده از فناوری برایت‌واتِر است، نشان می‌دهد.

[1] U.S. Department of Energy (DOE)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰: بخش عظیم نفت غیر قابل بازیافت دنیا، که هدف استفاده از فناوری برایت‌واتِر است.

جهت استفاده از فناوری دارای ذرات ریز، محصول به صورت مایع به محل انجام سیلاب‌زنی با آب منتقل می‌شود. محلول یاد شده از مواد شیمیایی فعال، پراکنده‌ساز[1] و یک حلال هیدروکربنی سبک تشکیل شده است. محصول گرانروی پایینی دارد، بنابراین با آب تزریقی مخلوط‌پذیر بوده و به راحتی تزریق می‌شود. زمانی که محلول با پراکنده‌ساز به طور هم‌زمان تزریق می‌شود، به دلیل مایع بودن به راحتی می‌تواند در خط لوله آب، تزریق شده و به پیش‌آمیختن و مخزن‌های ذخیره در میدان نیازمند نمی‌باشد. محصول به طور پیوسته بسته به قابلیت پمپ کردن میدان، برای دوره یک تا دو هفته تزریق می‌شود و با شروع و قطع کردن تزریق مواد، عملیات سیلاب زنی ادامه دارد.

برای اطمینان از رسیدن ذرات به مکان‌های از قبل تعیین شده، پیش از فعال شدن کامل، درک دقیق از مخزن مفید است. این فرآیند مانند هر واکنش شیمیایی فعال‌سازی توسط یک سری متغیر مشترک مانند دما، زمان و PH کنترل می‌شود. دانستن تغییرات دمایی مخزن بین چاه تولیدی و تزریقی بسیار مهم است.

این فناوری بر اساس مدل کردن جبهه‌های دمای نواحی احتمالی سارق استوار است و نالکو از این دانش برای انتخاب محصول درست به گونه‌ای که ذرات در محل درست متورم شوند، استفاده می‌کند. خواص رئولوژیکی سیال تزریقی قبل از متورم شدن ذرات بسیار مهم است. مهم‌ترین مزیت استفاده از این ذرات در این است که آن‌ها رئولوژی یا گرانروی سیال تزریقی را تغییر نمی‌دهند. بدین ترتیب الگوهای حرکت آب را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند. توزیع این ذرات به توزیع طبیعی آب در مخزن بستگی دارد. در نواحی که آب تمایل بیشتری برای حرکت دارد، حرکت ذرات نیز در آن نواحی هم بیشتر است (شکل ۹). البته این به معنی حرکت نکردن ذرات در سایر جهت‌ها نیست، بلکه ذرات یاد شده در سایر جهت‌ها کمتر حرکت می‌کنند. این فناوری برای مخازن ماسه‌سنگی طراحی شده است و برای مخازن شکاف‌دار به دلیل بسیار بزرگ بودن قطر حفرات، مناسب نیست. این ذرات در محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۲۲۰ °F کاربرد دارند. در دمای بالاتر از این محدوده، ذرات به آهستگی شروع به تجزیه شدن می‌کنند و در دمای پایین‌تر از این محدوده، واکنش‌های شیمیایی بسیار آهسته اتفاق می‌افتد که ممکن است موثر نباشند [۱۶].

فناوری برایت واتِر در نواحی متعددی توسط بی‌پی و چِورون امتحان شده است. این فناوری اولین بار توسط چِورون در میدان میناس[2] اندونزی در سال ۲۰۰۱ مورد استفاده قرار گرفت. در این میدان ۳۰۰۰۰۰ بشکه افزایش در تولید نفت مشاهده شد. طولانی‌ترین مورد استفاده از این فناوری در میدان نفتی پرودهو بِی[3] شرکت بی‌پی است. استفاده از مزیت‌های فناوری یاد شده در این میدان همچنان ادامه دارد و تاکنون افزایش ۴۷۵۰۰۰ بشکه‌ای در تولید نفت مشاهده شده است. بی‌پی استفاده از این فناوری را در میادین دیگر به همراه پَن انرژی آمریکن[4] در اواخر سال ۲۰۰۶ و اواسط سال ۲۰۰۷ در پروژه‌های سیلاب‌زنی

[1] Dispersant
[2] Minas
[3] Prudhoe Bay
[4] Pan American Energy

www.SID.ir

Archive of SID

با آب میادین در خشکی کولوئل کایک[1] و پیدرا کلاوادا[2] و در آرژانتین شروع کرده است. همچنین چِورون به بررسی این فناوری در دریای شمال اشاره کرده است[۱۶]. شرکت شِل[3] نیز در جولای سال ۲۰۰۹ برای اولین بار این فناوری را در یکی از میادین دریایی برزیل که با مشکل میان‌شکنی سریع آب روبرو بوده است، مورد استفاده قرار داده است [۱۹].

قابل ذکر است که آب هوشمند برای میدان‌های با ویژگی‌های زیر مناسب‌تر است:

- میادین با ذخایر نفت قابل حرکت
- میان‌شکنی سریع آب با برش آب بالا
- مشکل اختلاف تراوایی زیاد (نواحی سارق با تراوایی حداقل ۵ برابر نواحی جاروب نشده)
- تخلخل نواحی با بیشترین تراوایی > ۱۷٪
- تراوایی نواحی سارق >۱۰۰ میلی دارسی
- دمای ۵۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد
- زمان گذر تزریقی – تولیدی > ۳۰ روز
- شوری آب تزریقی کمتر از ۷۰۰۰۰ ppm

۳- نتیجه‌گیری

ویژگی‌های سیالات هوشمند را می‌توان به صورت موارد زیر خلاصه کرد:

- کنترل خواص محلول‌های مغناطیسی با میدان مغناطیسی در جهت کاهش کشش سطحی و گرانروی سیالات مخزن.
- بهبود راندمان جاروبی در فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت با استفاده از پلیمرهای هوشمند و همچنین بازیافت نفت کنارگذار و غیر قابل برداشت که با روش‌های رایج سیلاب‌زنی شیمیایی قابل تولید نیستند.
- کنترل تحرک‌پذیری به صورت انتخابی با استفاده از فوم‌های هوشمند در جهت ازدیاد برداشت نفت.
- جلوگیری/کاهش آسیب سازند و جلوگیری از رسوبات آلی و غیرآلی در اثر افت فشار در اطراف چاه با استفاده از فیلتریت گل حفاری هوشمند.
- تغییر ویژگی‌های ترشوندگی سنگ مخزن به منظور افزایش بازیافت نفت با استفاده از آب هوشمند.
- هدایت آب تزریقی به سمت نواحی نفتی جاروب نشده، محدود کردن نفوذ آب تزریقی به نواحی با تراوایی بالا، جلوگیری از تولید ناخواسته آب و کاهش خطرات زیست محیطی با استفاده از برایت واتر که در نهایت باعث افزایش بازدهی جاروبی نفت و تولید نفت بیشتر خواهد شد.

۴- منابع

1. Stanway, R.: smart fluids: current and future developments. Materials Science and Technology, 20, pp. 931-939, 2004.
2. Kciuk, M. and Turczyn, R.: Properties and application of magnetorheological fluids. Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering, 18, pp. 127-130, 2006.
3. Lara-Prieto, V.: vibration characteristics of MR cantilever sandwich beams: experimental study. Smart Materials and Structures, 9 (1), 2010.
4. Ouellette, J.: Smart fluids move into the marketplace. The industrial physicist, pp. 14-17, 2003/2004.
5. Rajamohan, V., Sedaghati, R. and Rakheja, S.: Vibration analysis of a multi-layer beam containing magnetorheological fluid. Smart Materials and Structures, 19, 2010.
6. Lue, J. and Mao, C.: Viscosity measurement of electrorheological fluids: corn starch and silicon microparticles mixed with silicone oil. Measurement science and Technology, 8, pp. 1323-1327, 1997.
7. Tao, R. and Sun, J.: Three-dimensional structure of induced electrorheological solid. Physical Review Letters, 67, pp.

[1] Koluel Kaike
[2] Piedra Clavada
[3] Shell

www.SID.ir

Archive of SID

398-401, 1991.
8. Kothari, N., Raina, B., Chandak, K. B., Lyer, V. and Mahajan, H.P.: Application of Ferrofluid for Enhanced Surfactant Flooding in IOR. Paper SPE 131272, SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, 14-17 June, 2010,
9. McCormick, C. and A. Lowe, Smart Multifunctional Polymers for Enhanced Oil Recovery. National Energy Technology Laboratory, September 2003 - March 2007.
10. Tsau, J.S., Yaghoobi, H, Grigg, R.B.: Smart Foam to Improve Oil Recovery in Heterogeneous Porous Media. Paper SPE 39677, SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 19-22 April, 1998.
11. Watson, R.B., Viste, P., Kageson-Loe, N. M., Fleming, N., Mathiasen, A. M. and Ramstad, K.: Smart Mud Filtrate: An Engineered Solution To Minimize Near-Wellbore Formation Damage Due to Kaolinite Mobilization Laboratory and Field Experience-Oseberg Sør. Paper SPE 112455, SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, 13-15 February, 2008.
12. Zwaag, C.H.v.d., H. Olsen, and A. Lohne.: Significance of Selected Setup Parameters in Return Permeability Measurements Used for Laboratory Formation Damage Quantification. Paper SPE 127994, SPE International Symposium and Exhibiton on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, 10-12 February, 2010.
13. RezaeiDoust, A., Puntervold, T., Strand, S. and Austad, T.: Smart Water as Wettability Modifier in Carbonate and Sandstone: A Discussion of Similarities/Differences in the Chemical Mechanisms. Energy & Fuels, 23(9), pp. 4479-4485, 2009.
14. Strand, S., Austad, T., Puntervold, T., HØgnesen, E. J., Olsen, M. and Barstad, S. M. F.: Smart Water for Oil Recovery from Fractured Limestone: A Preliminary Study. Energy & Fuels, 22, pp. 3126-3133, 2008.
15. Frampton, H., Morgan, J.C., Cheung, S. K., Munson, L., Chang, K. T. and Williams, D.: Development of a Novel Waterflood Conformance Control System. Paper SPE 89391, SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma1, 17-21 April, 2004.
16. JPT's Editorial Board.: Particulate Technology Gives Waterfloods a Boost. J. Pet. Technol. (JPT), 6 February, 2008.
17. Knott, T.: Technology in Action: Bright Water. Frontiers, pp. 30-35, 2009.
18. Frampton, H., Morgan, J.C., Cheung, S. K., Munson, L., Chang, K. T. and Williams, D.: Development of a Novel Waterflood Conformance Control System. Paper SPE 89391, SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma1, 17-21 April, 2004.
19. Roussennac, B. and Toschi, C. Brightwater® Trial in Salema Field (Campos Basin, Brazil). SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, 14-17 June, 2010.

www.Reservoir.ir

www.SID.ir