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

ازدیاد برداشت با استفاده از سیلابزنی هوشمند: از مکانیزم‌ها تا شبیه‌سازی

محمد احمدی (شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اداره شیمیایی و آزمایشگاه مرکزی)
Ahmadi.put88@gmail.com
مصیب کمری (شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اداره ارزیابی مخازن)
[1]Mosayyeb.Kamari@gmail.com

چکیده

باتوجه به نزدیک‌شدن به پایان مرحلهٔ تولید طبیعی عمدهٔ مخازن دنیا(از جمله مخازن نفتی جنوب‌غربی ایران)،ضرورت بررسی و اجرای روش‌های ازدیاد برداشت، بیش از پیش احساس می‌شود. در دو دههٔ گذشته، «سیلابزنی هوشمند» به عنوان روشی مؤثر برای ازدیاد برداشت معرفی شده است که مبنای آن بهینه‌سازی شوری و غلظت یون‌های آب تزریقی است. هزینهٔ کم و عملکرد قابل توجه آن در بررسی‌های آزمایشگاهی و مدل‌های پایلوت، بسیار مورد توجه صنعت نفت قرار گرفته است. اما با توجه به جدیدبودن این روش، هنوز جنبه‌های گوناگونی از آن ناشناخته است و نیاز به انجام مطالعات گسترده‌تری دارد. در سال‌های اخیر، علاوه بر محققین دانشگاهی که عمدتاً روی مکانیزم‌های غالباین روشمطالعه می‌کنند، بسیاری از شرکت‌ها نیز به منظوردست‌یابی به این تکنولوژی،مطالعات آزمایشگاهی و میدانی وسیعی انجام داده‌اند.

سؤالات مختلفی دربارهٔتزریق آب‌هوشمند، مکانیزم‌ها، عملکرد و چگونگی شبیه‌سازی آن وجود دارد که در این مطالعه سعی شده است به آنها پاسخ داده شود؛ این رویکرد می‌تواند برخی از چالش‌های موجود را هموار سازد و آغازی برای مطالعه این روش در میادین کشور باشد. در این تحقیق، همچنین به تاریخچهٔ کاربرد میدانی این روش و مبانی شبیه‌سازی آن پرداخته شده است.

کلمات کلیدی:

ازدیاد برداشت، سیلابزنی هوشمند، آب با شوری پایین، مخازن کربناته، تغییر ترشوندگی، تبادل یونی.

www.SID.ir

Archive of SID

۱ مقدمه

ایدهٔ تزریق آب با شوری کم[1]، در سال ۱۹۶۷ پیشنهاد شد، جائیکه برنارد[2] نشان داد که تزریق آب شیرین باعث ازدیاد در برداشت نفت در مراحل دوم و سوم تولید می‌شود. او در این آزمایشات از مغزه‌های ماسه سنگی که حاوی رس بودند، استفاده کرد و به نتایج مهمی رسید. این نظریه در ابتدا مورد توجه قرار نگرفت، تا اینکه در سال ۱۹۹۰ آقای جدهاندان[3] بار دیگر نشان داد که تزریق آب با شوری کم باعث ازدیاد برداشت در مرحلهٔ سوم از مغزه‌های ماسه سنگی می‌شود[۱]. در سال‌های بعد به تدریج، محققان زوایای جدیدی از عملکرد این روش را مطرح کردند که در جدول ۱ نشان داده شده است. از جمله، آقای وب و همکاران[4] در سال ۲۰۰۵ و نیز لاگر و همکاران[5] در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷، ضمن فراهم کردن شرایط مخزن در آزمایشگاه، این روش را ارزیابی و عملکرد آن را مورد تایید قرار دادند[۱و۸]. همچنین آقای لاگر و همکاران در سال۲۰۰۷ آزمایشات سیلابزنی را بر مبنای این روش، روی تعداد۲۰ نمونه مغزه انجام دادند و میزان متوسط افزایش ضریب بازیافت[6] را ۱۴ درصد برآورد کردند که این نتایج در پایلوت‌های میدانی نیز تأیید شد[۷].

حدود چند دهه است که روش تزریق آب با شوری کم به عنوان روشی مؤثر برای ازدیاد برداشت معرفی شده است و به لحاظ جدید بودن و ارزان بودن آن، مورد علاقهٔ محققین دانشگاهی و صنعتی قرار گرفته است. اما با این حال، تاکنون مکانیزم‌های متفاوت و گاه متناقضی برای این روش ارائه شده است. در سال‌های اخیر، تعداد چشمگیری مقاله دربارهٔ این روش به چاپ رسیده است که ابعاد مختلفی از آن را مورد بررسی قرار داده‌اند(از جمله نقش خصوصیات سنگ و سیال، غلظت و نوع یون‌ها و ...).مبنای این تحقیقات، برخورد با دو دسته سؤال است: سؤالات تئوریک و کاربردی؛ عمدهٔ سؤالات تئوریک مذکور عبارتند از:

- آب هوشمند چیست؟
- آیا روش آب هوشمند و تزریق آب با شوری کم (آب نمک رقیق) یکسان هستند؟
- مکانیزم‌های روش تزریق آب با شوری کم کدامند؟
- آیا مکانیزم‌های روش تزریق آب هوشمند در مخازن ماسه سنگی و کربناته یکسان است؟تفاوت‌ها و شباهت‌های آن‌ها کدامند؟
- تأثیر ترکیبات یونی موجود در آب سازند و آب تزریقی، ترکیبات نفت و جنس سنگ روی عملکرد سیلابزنی هوشمند چیست؟

عمدهٔسؤالات کاربردی نیز عبارتند از:

- جایگاه کنونی این تکنولوژیدر دنیا کجاست و در آینده چگونه خواهد بود؟
- آیا تنها مطالعات آزمایشگاهی برای مطالعهٔ این روش کافی می‌باشد؟
- نقش شبیه‌سازی در بررسی عملکرد این روش چیست؟
- چه مخازنی برای این روش می‌توانند، کاندید بهتریباشند؟
- بهتر است در مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، به کدام ابعاد این روش بیشتر پرداخته شود؟

در ادامه سعی می‌شود، بر اساس مطالعات انجام‌شده، به این سؤالات پاسخ داده شود.

جدول ۱. تاریخچهٔ معرفی روش تزریق آب با شوری پایین.

سال	محققین	نتایج

[1] Low salinity water
[2] Bernard
[3] Jadhunandan
[4] Webb et al.
[5] Lager et al.
[6] Recovery factor

www.SID.ir

Archive of SID

۱۹۶۷	برنارد	معرفی ایدهٔ تزریق آب شیرین[۲۱]
۱۹۹۰	جدهاندان	معرفی ایدهٔ تزریق آب با شوری کم[۲۰]
۱۹۹۵	جدهاندان و مورو[1]	تغییر ترشوندگی با تزریق آب نمک رقیق در مخازن نفت‌تر[۱۳]
۱۹۹۶	ایلدیز[2] و مورو	نقش ترکیبات یونی موجود در آب روی راندمان سیلابزنی [۱۴]
۱۹۹۹	تانگ[3] و مورو	بررسی تأثیر رس در موفقیت روش [۲۲]
۲۰۰۲	تانگ و مورو	اهمیت حضور ترکیبات قطبی موجوددر نفت [۱۵]
۲۰۰۶	ژانگ[4] و مورو	موفقیت بیشتر این روش در مخازن ماسه‌سنگی[۱۶]
۲۰۰۷	ژانگ و اوستد[5]	بررسی عملکرد این روش در سازندهای کربناته[۱۷]

۲ تقسیم‌بندی آب‌ها از لحاظ شوری

آب را می‌توان از لحاظ میزان شوری به چهار دستهٔ شیرین، شوری کم، شوری متوسط و شوری بالا تقسیم‌بندی کرد. آب شیرین دارای شوری کمتر از۱ppm می‌باشد. شوری آب نوشیدنی در حالت ایده‌آل از ۰ تا ۱۰۰ppm می‌باشد، درحالی که آب-های سخت با شوری ۵۰۰ در بعضی از نقاط جهان به عنوان آب آشامیدنی استفاده می‌شود. در دسته‌بندی صنعتی، آب‌های با شوری کم دارای شوری ppm۶۰۰۰-۵۰۰می‌باشند[۶]. آب دریا با شوری در حدود ppm۵۰۰۰۰-۳۰۰۰۰در گروه شوری متوسط قرار می‌گیرد. شوری آب سازند نیز در حدود ۲۰۰۰۰۰ واحد در میلیون می‌باشد که در دسته‌ی آب‌های با شوری زیاد قرار می‌گیرد[۵].

۳تغییرات ترشوندگی[6]

در اغلب مطالعات، موفقیت سیلابزنی هوشمند را مشروط به وجود شرایط نفت‌تری در سنگ مخزن می‌دانند؛ بنابراین ضرورت مطالعات روی ترشوندگی و مکانیزم‌های آن اجتناب‌ناپذیر است. به اعتقاد بسیاری از محققین، ترشوندگی سنگ مخزن از ابتدا آب‌تر بوده است. با جذب شدن برخی از اجزاء خاص موجود در نفت خام(به‌طور عمده، رزین‌ها و آسفالتین‌های سنگین) روی سطح سنگ، ترشوندگی آن تغییر خواهد کرد.تعداد زیادی از محققین در علم خاک‌شناسی، مطالعات گسترده‌ای را روی مکانیزم‌های جذب مواد آلی روی سطوح کانی‌ها انجام داده‌اند. آقای آرنارسون[7] در سال ۲۰۰۰مکانیزم‌های مهمی که تاکنون مطالعه شده بود را جمع‌بندی کرد که در جدول ۲ارائه شده است.

جدول ۲. مکانیزم‌های جذب مواد آلی روی کانی‌ها[۱۱].

گروه مواد آلی شرکت کننده	مکانیزم جذب
آمین‌ها، حلقهٔNH، حلقه آروماتیک	تبادل کاتیونی
آمین‌ها، کربونیل، کربوکسیلات	پروتون‌دهی
کربوکسیلات	تبادل آنیونی
آمین‌ها، کربوکسیلات، کربونیل، OHالکلی	ایجاد پل آبی
آمین‌ها، کربوکسیلات، کربونیل، OHالکلی	ایجاد پل کاتیونی
کربوکسیلات	تبادل لیگاند

[1] Morrow
[2] Yildiz
[3] Tang
[4] Zhang
[5] Austad
[6] Wettability Alteration
[7] Arnarson

www.SID.ir

Archive of SID

آمین‌ها، کربوکسیلات، کربونیل، OHفنلی	پیوند هیدروژنی
واحدهای آلی بدون بار	برهم کنش واندروالس

پل کاتیونی[1] در سال ۱۹۹۸ توسط آقای باکلی[2] به عنوان مکانیزمی برای تغییر ترشوندگی در سنگ مخزن معرفی شد. سایر مکانیزم‌ها در مهندسی نفت چندان مورد توجه قرار نگرفتند، تا اینکه در سال ۲۰۰۶ آقای لاگر، مکانیزم تبادل کاتیونی را ضمن تزریق آب با شوری کم مورد توجه قرار داد که در ادامه توضیح داده خواهد شد[۱۱].

۴مکانیزم‌ها

سال‌های اخیر، مطالعات زیادی روی مکانیزم‌های حاکم بر سیلابزنی هوشمند انجام شده است. هرچند تاکنون مکانیزم‌های زیادی پیشنهاد شده است(جدول۳)، اما هنوز محققان بر سر آن‌ها به اجماع نرسیده‌اند و ابهاماتی وجود دارد.بسیاری از محققین موفقیت این روش را خصوصاً در مخازن ماسه‌سنگی منوط به حضور رس در مخزنو به دنبال آن، تأثیر تزریق آب نمک رقیق را در تغییر ترشوندگی رس می‌دانند[۹].

جدول ۳. مکانیزم‌های پیشنهادی حاکم برسیلابزنی هوشمند.

سال	محققین	نوع سنگ مخزن	مکانیزم پیشنهادی
۱۹۹۹	تانگ و مورو	ماسه سنگ	تغییر ترشوندگی در پی مهاجرت ذرات ریز[۱۵]
۲۰۰۵	مک‌گویر و همکاران[3]	ماسه سنگ	افزایش PH و در پی آن کاهش IFT(تغییر ترشوندگی)[۲۳]
۲۰۰۵	اوستد[4] و ژانگ	چالکی	برهم خوردن تعادل یونی سطح و در پی آن آزاد شدن نفت‌های متصل به سطح[۱۷]
۲۰۰۶	لاگر[5] و همکاران	ماسه سنگ	تبادل یون‌های چند ظرفیتی (تغییر ترشوندگی)[۲۴]
۲۰۰۸	لاگر و همکاران	ماسه سنگ	این محققیق، افزایش PH و مهاجرت ذرات را از تأثیرات مستقیم روش(نه مکانیزمی برای تغییر ترشوندگی) می‌دانند[۷]
۲۰۰۹	رضایی‌دوست ولایتلم[6]	ماسه سنگ	انبساط لایهٔ الکترولیتی دوگانه[7](ساختار یون‌ها در اطراف صفحات باردار رس در یک محلول)[۱۸]
۲۰۰۹	برگ و همکاران[8]	ماسه سنگ	انبساط لایهٔ الکترولیتی دوگانه و تبادل یون‌های چند جزئی به صورت همزمان (او با آزمایش‌های مستقیم این نتایج را به دست آورد.)[۲۵]
۲۰۱۰	هیورث و همکاران[9]	کربناته	برهم خوردن تعادل یونی سطح و در پی آن آزاد شدن نفت‌های متصل به سطح و حل شدن بخشی از سنگ[۱۹]

بسیاری از این مکانیزم‌ها در حد فرضیه باقی مانده‌اند و گاهی مورد تأیید قرار گرفته و بعضاً نیز رد شده‌اند؛مثلاً می‌توان به مهاجرت ذرات رس اشاره کرد که بعضی از محققین، آن را در مطالعات آزمایشگاهی خود مشاهده و برخی نیز آن را شدیداً رد می‌کنند[۱۲]. از بین مکانیزم‌های مذکور، مکانیزم تبادل یون‌های چندظرفیتی[10] بر پایهٔ مستندات علمیبنا شده و تغییر

[1] Cation bridges
[2] Buckley
[3] McGuire et al.
[4] Austad
[5] Lager et al.
[6] Liegthelm
[7] Electrical Double Layer (EDL)
[8] Berg et al.
[9] Hiorth et al.
[10] Divalent ion exchange

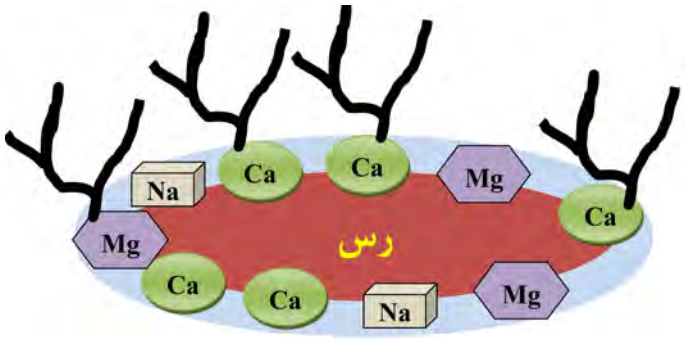
www.SID.ir

Archive of SID

ترشوندگی سنگ مخزن را به خوبی بیان می‌کند. این مکانیزم ابتدا برای ماسه سنگ‌های حاوی رس و بعداً برای مخازن کربناته(البته با تغییراتی در مبنای تئوریو یون‌های درگیر آن) نیز، بیان شد که به لحاظ اهمیت آن در ادامه بررسی می‌شوند.

۴-۱ مکانیزم تبادل یونی در مخازن ماسه سنگی

در کنار ذرات شنی مخازن ماسه‌سنگی ممکن است، درصدهای پراکنده رس هم وجود داشته باشد که در آن، رس‌ها یا به عنوان یک پوشش برای دانه‌های شن و یا به صورت لایه‌های مجزا و مخلوط با شن وجود دارند.مکانیزم جذب مواد قطبی روی سنگ‌های حاوی رس را می‌توان به طور خلاصه بدین صورت بیان کرد که با توجه به تمایل متفاوت یون‌ها به جذب روی سطوح و در نتیجه تبادل یون دوگانه، یون‌هایی مانند Ca^{2+} و Mg^{2+} به شدت روی سطوح رس جذب می شوند تا سطح کاملاً اشباع شود. کاتیون‌های چندگانه روی سطوح رس به ترکیبات قطبی موجود در فاز نفت (رزین و آسفالتین) متصل می‌شوند و ترکیبات پیچیدهٔ آلی- فلزی تشکیل می‌دهند که باعث افزایش خصوصیات نفت‌دوستی‌سطح سنگ می‌شود(شکل ۱)[۱۱].



شکل۱. شماتیک جذب نفت خام از طریق لایهٔ الکتریکی دوگانه.

این تبادل یونی که توسط محققین پیشنهاد شده است،در هنگام تزریق آب نمک رقیق رخ می‌دهد.در این مکانیزم،کاتیون‌های آزاد موجود در آب نمک تزریقی، جایگزین ترکیبات قطبی آلی یا کمپلکس‌های فلزی-آلی موجود در سطح کانی‌هاشده و آنها را آزاد می‌کنند و بدین ترتیب موجب تغییر در ترشوندگی این سطوح به سمت آب‌دوستی و در نتیجه ازدیاد در برداشت می-شود. این فرآیند، اجازهٔ جاروب شدن نفت آزاد شده و خروج آن از فضای حفرات سنگ را می‌دهد. در این مکانیزم، هر چه ذرات رس بیشتری در مخازن ماسه سنگی حضور داشته باشند، این روش بازدهی بیشتری خواهد داشت[۱۱،۱۲و۸].

این واقعیت که رس ها قابلیت تعویض یونی دارد، به خوبی شناخته شده است. قدرت نسبی یون‌ها در این معاوضه متفاوت است و ترتیب آن بدین‌صورت می‌باشد[۸]:

$$Li^{+} \prec Na^{+} \prec K^{+} \prec Mg^{2+} \prec Ca^{2+} \prec H^{+} \qquad (۱)$$

هرچه شوری آب ضمن تعادل کم شود، کاتیون‌ها از سطح رس جدا می‌شوند و همزمان حل‌شوندگی مواد آلی زیاد شده و لذا کربوکسیلیک‌هایی که توسط پل Ca^{+2} به سطح رس متصل شده‌اند، کنده می‌شوند. خروج کاتیون‌ها از سطح رس، PHرا افزایش داده و تعادل جدیدی طبق رابطهٔ(۲)پدید می‌آید[۸].

$$Ca^{2+}\text{–}Clay + H_2O \rightleftarrows H^{+}\text{–}Clay + Ca^{+2} + OH^{-} \qquad (۲)$$

افزایش PH، جذب مواد آلی قطبی روی سطح رس‌ها را کاهش می‌دهد؛ برای مثال افزایش PH از ۵ به ۶، مقدار جذب اسیدهای بنزنی به کائولینیت[1](نوعی کانی رسی) را ۳۰ درصد کاهش می‌دهد.

[1]Kaolinite

www.SID.ir

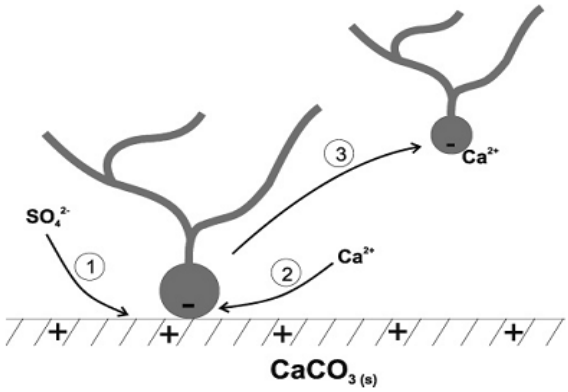
Archive of SID

۲-۴ مکانیزم بر هم خوردن تعادل یونی سطوح کربناته

در مخازن کربناته یا رس وجود ندارد و یا میزان ناچیزیاست که در ماتریکس سنگ به دام افتاده و تماسی با سیالات مخزن ندارد و این به دلیل محیط رسوب‌گذاری آرام آن می‌باشد. بنابراین مکانیزم‌هایی که در مخازن ماسه سنگی برای این روش پیشنهاد شد، را نمی‌توان به این مخازن تعمیم داد، زیرا در مکانیزم‌های مذکور، رس نقش تعیین کننده‌ای دارد.

اثر مواد فعال‌کنندهٔ سطحی در کاهش کشش سطحی[1] و تغییرات ترشوندگی در سنگ‌های کربناته، در مطالعات اخیر اشاره شده است. دربررسی‌های انجام‌شده توسط استرند و همکارانش[2] در سال ۲۰۰۳، استفاده از یون سولفات به عنوان کاتالیزور در فرآیند تغییر ترشوندگی توسط مواد فعال‌کنندهٔ سطحی کاتیونی مؤثر بوده است. پس از آن، آزمایشات انجام شده توسط ژانگ و همکارانش[3] در سال ۲۰۰۵، نشان داد که یون سولفات قادر است به‌تنهایی و بدون حضور مواد فعال سطحی گران قیمت، ترشوندگی سنگ‌های کربناته را بهبود بخشد [۱و ۸].

استرند و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۵، برای به‌دست آوردن مکانیزم آشام خودبخودی آب دریا در سنگ‌های چالکی نفت‌تر، به بررسی اثر یون‌های مؤثر روی پتانسیل سطح موجود در این فرآیند پرداختند. مکانیزم پیشنهادی این محققین برای دفع مواد کربوکسیلیک از سطح سنگ‌های چالکی و تغییرات ترشوندگی این سطوح در شکل۲نشان داده شده است. بر اساس این مکانیزم، در اثر جذب یون‌های سولفات، بار منفی سطح افزایش یافته(مرحلهٔ۱) و موجب افزایش جذب یون کلسیم بر روی سطح سنگ می‌گردد(مرحلهٔ ۲). در نتیجه، جدا شدن مواد کربوکسیلیک از سطح در پی واکنش با یون Ca^{2+}و تشکیل کمپلکس با این یون‌ها، تسهیل می‌یابد(مرحلهٔ ۳)[۸].کمپلکس‌های جدا شده به علت وجود انرژی جنبشی که در محیط است، درون محیط متخلخل به حرکت در می‌آیند.



شکل۲. مکانیزم پیشنهادی تغییر ترشوندگی سطح سنگ چالکی (استرند و همکاران) [۸].

در اینجا یون سولفات به عنوان یک کاتالیزور عمل می‌کند و باعث جذب هر چه بیشتر یون کلسیم روی سطح می‌شود.

از میان یون‌های دو ظرفیتی موجود در آب دریا، یون Mg^{2+} بیشترین غلظت(در حدود دو برابر غلظت یون SO_4^{2-} و تقریبا چهار برابر غلظت یون Ca^{2+})، را دارا می‌باشد. در دمای محیط، یون‌های Ca^{2+}در مقایسه با یون‌های Mg^{2+} تمایل بیشتری نسبت به سطح چالکی دارند، اما در دماهای بالا (در حدود ۱۳۰ درجهٔ سانتیگراد) یون‌های Mg^{2+} طبق واکنش دولومیتی شدن(رابطه ۳) جانشین یون‌های Ca^{2+} می‌شوند[۲۸].

$$Ca-CaCo_3 + Mg^{2+} \rightleftarrows Mg-Ca(Co_3)_2 + Ca^{+2} \quad (۳)$$

[1] Interfacial tension(IFT)
[2] Strand et al.
[3] Zhang et al.

www.SID.ir

Archive of SID

۵ سیلابزنی هوشمند و تزریق آب‌نمک رقیق

در مخازن ماسه سنگی به علت حضور رس‌ها و تبادل یونی آن‌ها با آب سازند، افزایش بازیافت به تزریق آب نمک رقیق نسبت داده می‌شود، زیرا علاوه بر آنچه که قبلاً اشاره شد، در شوری‌های پایین، رس‌ها متورم می شوند و این ناپایداری و فعل و انفعالاتی که در طی این پروسه رخ می‌دهد، به جابجایی نفت‌های در دام رس می‌انجامد. در مخازن کربناته، معمولاًمیزان رس پایین است و اگر هم موجود باشد، در ماتریکس سنگ به دام افتاده است و سطح تماس آن با سیالات مخزن بسیار ناچیز می-باشد؛ بنابراین تزریق آب با شوری کم(آب‌نمک رقیق)در این مخازن مؤثر نمی‌باشد. در این مخازن، روش آب هوشمند را می-توان به انتخاب هوشمندانهٔ غلظت‌های یونی نسبت داد و اکثراً آب‌های با شوری متوسط مانند آب دریا، به عنوان آب‌های تزریقی برای این مخازن کاندید می‌شوند. می‌توان نتیجه گرفت که تزریق آب نمک رقیق، یکی از روش‌های تزریق آب هوشمند می‌باشد و روش تزریق آب هوشمند، گسترهٔ وسیع‌تری از آب‌های تزریقی را شامل می‌شود.

۶ غربالگری تزریق آب هوشمند

برای اثربخشی روش تزریق آب هوشمند، توجه به فاکتورهایی مثلخواص سنگ و سیال مخزن و خصوصیات آب تزریقی ضروری می‌باشد که در مواردی، این خصوصیات برای مخازن ماسه سنگی و کربناته متفاوت می‌باشد. جدول ۴ این پارامترها را بسته به نوع سنگ مخزن تقسیم‌بندی کرده است.

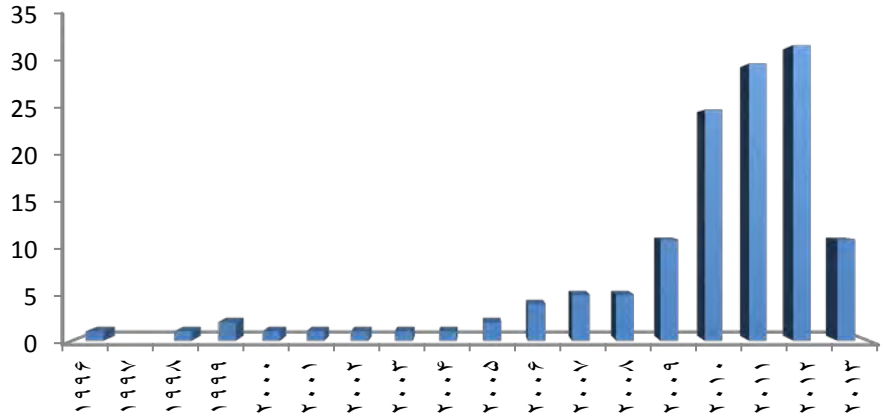
جدول۴. غربالگری روش تزریق آب هوشمند.

	مخازن ماسه سنگی	مخازن کربناته
سنگ	• رس داشته باشد. • نوع کانی رسی حائز اهمیت می‌باشد(هرچه کائولینیت کمتر باشد، بهتر است، چون یک کانی رسی غیرحساس می‌باشد). • در مغزه‌هایی که اسیدکاری شده‌اند، این روش مؤثرنیست.	• تاکنون مطالعات متمرکزی انجام نشده است.
سیال نفتی	• دارای اجزای قطبی مانند (اسیدهای کربوکسیلیک)باشد. • این روش در نفت‌های تصفیه شده، تأثیری ندارد.	• دارای اجزای قطبی مانند (اسیدهای کربوکسیلیک) باشد. • این روش در نفت‌های تصفیه شده، تأثیری ندارد.
آب سازند	• درصد اشباع آب سازند ناچیز نباشد. • آب سازندی باید دارای کاتیون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+}باشد[۲۷].	• درصد اشباع آب سازند ناچیز نباشد. • آب سازندی باید دارای کاتیون‌های Ca^{2+}و Mg^{2+} باشد.
میزان شوری آب تزریقی	• میزان شوری بین۲۰۰۰-۱۰۰۰ppmباشد[۹]. (البته آب‌های تا شوری۵۰۰۰ppm نیز جواب داده‌اند.)	• برای این مخازن، از آب دریاها که دارای شوری متوسطی هستند، استفاده شده است. • میزان شوری:۶۰۰۰۰-۴۰۰۰۰ppm
ترکیبات یونی آب تزریقی	• کاتیون‌های آزاد در آب تزریقی، حائز اهمیت هستند. • تحقیقات نشان داده است که عدم حضور یون Ca^{2+} به ازدیاد برداشت کمک می‌کند[۲].	• یون So_4^{2-}نقش کاتالیزور را ایفا می‌کند. • یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} تأثیر بسزایی در تغییر ترشوندگی دارند. • در مخازن با دمای بالا،یون Mg^{2+}بسیار مؤثر می‌باشد [۱۷].
دما	• به نظر می‌رسد که در این مخازن، دما اهمیت کمتری داشته باشد.	• تأثیر این روش در دماهای بالاتر (بیشتر از ۱۳۰ درجه سانتیگراد) مؤثرتر می‌باشد [۲۶].

www.SID.ir

Archive of SID

مطالعه روی کیفیت آب، مختص به دو دهه گذشته نمی‌باشد و قدمت طولانی دارد. اما در سال‌های اخیر، روش تزریق آب با شوری پایین و آب هوشمند به صنعت ازدیاد برداشت بیشتر معرفی شده‌اند و روز به روز، مطالعه روی این روش‌ها گسترشمی-یابد. شکل۳ آمار مقالات منتشره با تمرکز روی این روش‌ها را نشان می‌دهدو مؤید آن است که مطالعه روی این روش‌ها در سال‌های اخیر گسترش قابل توجهی یافته است. این آمار مربوط به مقالات منتشر شده در مجلات و پایگاه‌های علمی معتبر می‌باشد.



شکل۳.تعداد مقالات منتشر شده با تمرکز بر روش سیلابزنی هوشمند و تزریق آب با شوری کم(از زمان معرفی تا می۲۰۱۳).

سیر تکاملی روش تزریق آب هوشمند تنها به بررسی آزمایشگاهی محدود نشده است؛ بلکه این روش، در چندین میدان به صورت پایلوت و یا کامل اجرا شده است. جدول ۵ اطلاعات تکمیلی این پروژه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول۵. اطلاعات مربوط به اجرای روش سیلابزنی هوشمند در میادین مختلف به صورت پایلوت یا کامل.

نام میدان	شرکت مجری	سال	نوع مخزن	مقیاس	ارزیابی	توضیحات
Alaska Prudhoe Bay	BP	۲۰۰۳	ماسه سنگ	پایلوت (تک چاه)	موفق	بین ۸ تا ۱۶ درصد افزایش برداشت مشاهده شد [۲۹].
Alaska Endicott	BP	۲۰۰۶	ماسه سنگ	پایلوت	موفق	ضریب بازیافت نهایی آن به ۸۰ درصد رسید.
Wyoming	WOGCC[1]	۱۹۸۰-۱۹۷۰	ماسه سنگ	میدان	موفق	در اینجا روش شوری کم به صورت ناخواسته اجرا شد و تحقیقات بعدی نشان داد که تأثیر آب با شوری کم از شوری بالا بیشتر است[۳].
Snorre field	Statoil	۲۰۱۱	ماسه سنگ	پایلوت (تک چاه)	ناموفق	تغییری دراشباع نفت باقیمانده مشاهده نشد. محققین علت را ترشوندگی آب دوستیاین مخزن می‌دانند[۳۰].
Ghawar, Arabestan	Saudi Aramco	۲۰۱۲	کربناته	پایلوت (تک چاه)	موفق	روش آب هوشمند ۷ درصد بیشتر از تزریق آب دریا، بازده را افزایش داد[۴].
Greater Burgan, Kuwait	KOC	۲۰۱۳	آواری	پایلوت	در حال اجرا	این پایلوت بدون مطالعات آزمایشگاهی و در حال اجرا است[۵].

۷ مدل‌سازی و شبیه‌سازی

دو نکتهٔ مهم در شبیه‌سازی تزریق آب هوشمند مهم را باید مدنظر قرار داد:

[1] Wyoming Oil and Gas Conservation Commission

www.SID.ir

Archive of SID

- اطلاع از مکانیزم دقیقآن، اهمیت چندانی در شبیه‌سازی آن ندارد.
- تراوایی‌های نسبی(در شوری‌های کم و شوری زیاد) باید اندازه‌گیری شود.

اساس نرم افزارهای شبیه‌ساز برای پیش بینی عملکرد روش آب هوشمند، محاسبهٔ میزان شوری آب نمک در هر سلول می‌باشد. حل رابطهٔ(۴)که به معادلهٔ نمک[1] مشهور است، میزان شوری آب هر سل را در زمان‌های مختلف می‌دهد:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{VS_wC_s}{B_w}\right)=\sum\left[\frac{Tk_{rw}}{B_w\mu_{s.eff}}\left(\delta P_w-\rho_w gD_z\right)\right]C_s+Q_wC_s \quad (۴)$$

که در آن C_s و μ_{seff} به ترتیب،میزان غلظت نمک در فاز آبی و ویسکوزیتهٔ آن می‌باشد. دیگر علائم نیز،پارامترهای متداول در مهندسی نفت می‌باشند[۶].

نرم افزار اکلیپس اجازه می‌دهد که درصد اشباع‌شدگی، تراوایی‌های نسبی فاز آب و نفت و فشار موئینه به صورت تابعی از میزان شوری، اصلاح و در معادلات اصلی شبیه‌ساز اعمال شوند:

$$S_{wx}=F_1S_{wx}^{L}+(1-F_1)S_{wx}^{H} \quad (۵)$$

$$k_{rw}=F_1k_{rw}^{L}+(1-F_1)k_{rw}^{H} \quad (۶)$$

$$k_{ro}=F_1k_{ro}^{L}+(1-F_1)k_{ro}^{H} \quad (۷)$$

$$P_{cow}=F_2P_{cow}^{L}+(1-F_2)P_{cow}^{H} \quad (۸)$$

F_1 وF_2که توابع وزنه نام دارند، تابعی از میزانغلظت نمک می‌باشند[۶].

علی‌رغم اینکه این روش توسط بسیاری از محققین به عنوان روشی برای ازدیاد برداشت معرفی شده است، اما برخی ازمحققین این روش را مؤثر نمی‌دانند و برای اثبات این ادعا، نتایج مستندی نیز ارائه داده‌اند. از جمله آقای ریوت[2] در سال ۲۰۰۹ گزارش داد که در طییک سری آزمایش‌های سیلابزنی مغزه، استفاده از آب با شوری کم تأثیری روی افزایش ضریب بازیافت در مرحلهٔ سوم برداشت نداشته است. همچنین تحقیقات دیگری مانند شارما[3] و فلیکو در سال۲۰۰۰، فیلیکو و همکاران[4] در سال۲۰۱۰ نیز این روش را رد کرده‌اند و در آزمایشات خود آن را مؤثر ندیدند[۱۰].

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، سؤالاتی در رابطه با ازدیاد برداشت با استفاده از روش تزریق آب هوشمندمطرح شد و تلاش گردید براساس تحقیقات پیشین، پاسخ روشنی به آن‌ها داده شود. مکانیزم‌های مختلف پیشنهاد شده، ناشی از خصوصیات متفاوت سنگ و سیال مخزن می‌باشد. بنابراین مطالعات آزمایشگاهی و طراحی‌های خاصی لازم است تا ابعاد مختلف این روش شناخته شود. به دلیل عدم قطعیت، ضرورت انجام تست‌های آزمایشگاهی قبل از هرگونه عملیات میدانی اجتناب‌ناپذیر است.

تاکنون، نتایج شبیه‌سازیاین روش در مقیاس میدانی اجرا و منتشر نشده است.نتایج اینگونه شبیه‌سازی‌ها و مقایسهٔنتایج آنها با نتایج عملیاتی، می‌تواند جایگاه شبیه‌سازی این روش و مفروضات آن را مشخص کند.

در مورد آینده این روش باید گفت که چندین شرکت بعد از تجربهٔ اجرای چند پایلوتموفقیت‌آمیز در حال طراحی پایلوت‌هایی با مقیاس بزرگتر و اجرای عملیاتی این روش می‌باشند. شرکت BP و آرامکوی عربستان از پیشتازان آن هستند که در آینده نتایج خود را منتشر خوهند کرد.

خصوصیات سنگ و سیال مخازن ایران و همچنین تنوع آب‌های تزریقی(آب دریا و آب‌های کم‌عمق) موجود در منطقه، نشان می‌دهد که این روش برای مخازن کشورمناسب می‌باشد که مطالعات وسیع کشورهای منطقه(عربستان، کویت و امارات) نیز

[1] Brine equation
[2] Rivet
[3] Sharma
[4] Filoco et al.

www.SID.ir

Archive of SID

مؤید آن است. بنابراین در حال حاضر، مطالعات آزمایشگاهی و تولید داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌ساز در الویت می‌باشد و این رویکرد می‌تواند آغاز یک تحول در روش‌های نوین ازدیاد برداشت در کشور باشد.

تقدیر و تشکر

از مجموعه مناطق نفتخیز جنوب علی‌الخصوص دکتر روغنیان ریاست اداره ارزیابی مخازن که فرصت مطالعه این روش را در اختیار ما قرار داده‌اند تشکر می‌کنیم.

منابع

[1] Ali A. Yousef, Salah Al-Saleh, Abdulaziz Al-Kaabi, and Mohammed Al-Jawfi, Saudi Aramco, Laboratory Investigation of the Impact of Injection-Water Salinity and Ionic Content on Oil Recovery From Carbonate Reservoirs, SPE 137634,Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 23 June2011.

[2] Ramez A. Nasralla, SPE, and Hisham A. Nasr-El-Din, SPE, Texas A&M University, Coreflood Study of Low Salinity Water Injection in Sandstone Reservoirs, 149077-MS,SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, 15-18 , Saudi Arabia, 2011.

[3] Eric P. Robertson, Idaho National Laboratory, Low-Salinity Waterflooding To Improve Oil Recovery—Historical Field Evidence, SPE 109965, SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Anaheim, California, U.S.A., 11–14,2007.

[4]Ali A. Yousef, Jim Liu, Guy Blanchard, Salah Al-Saleh, Tareq Al-Zahrani, Rashad Al-Zahrani, Hasan Al-Tammar, and Nayef Al-Mulhim, Saudi Aramco, SmartWater Flooding: Industry's First Field Test in Carbonate Reservoirs, SPE 159526, Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Texas, USA, 8-10 October 2012.

[5]Farida Abdulla, HashemSayedHashem, BadriaAbdulraheem, Meqdad Al-Naqi, Abrar Al-Qattan and Huw John, KOC; First EOR Trial using Low Salinity Water Injection in the Greater Burgan Field, Kuwait, SPE 164341-MS, Bahrain International Exhibition Centre,2013.

[6]Chuck Kossack,SchlumbergerAdvisor,Denver. Colorado, ECLIPSE Black Oil Simulator – Advanced Options:Low Salinity Water Flooding, Schlumberger Private, 2012.

[7] Lager, A., Webb, K.J., and Black, C.J.J.Impact of Brine Chemistry on Oil Recovery. Paper A24 presented at the 14th European Symposium on Improved Oil Recovery, Cairo, 22–24 April2007.

[8] Austad, T. “Smart water” for Enhanced Recovery: A Comparison of Mechanismsin Carbonates and Sandstones. Force RP Work Shop: Low Salinity Water Flooding, theImportance of Salt Content in Injection Water, Stavanger, Norway, 15 May2008.

[9] M.B. Alotaibi, R.M. Azmy, and H.A. Nasr-El-Din, A Comprehensive EOR Study Using Low Salinity Water in Sandstone Reservoirs, SPE 129976,Texas A&M University,2010.

[10] Geoffrey Thyne, SPE, PubuduGamage SPE, Evaluation Of The Effect Of Low Salinity Waterflooding For 26 Fields In Wyoming, SPE 147410-MS, Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, 30 October-2 November 2011.

[11] Boussour S., Cissokho, M., Cordier P., Bertin, H, and Hamon, .G., Oil Recoveryby Low Salinity Brine Injection: Laboratory Results on Outcrop and Reservoir Cores. PaperSPE 124277, SPE Annual Technical Conference and Exhibition heldin New Orleans, Louisiana, USA, 4–7 October 2009.

[12]Alotaibi, M.B., and Nasr-El-Din, H.A., Chemistry of Injection Water and its Impact on Oil Recovery in Carbonate and Clastic Formations. Paper SPE 121565. Presented at the 2009 SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in The Woodlands, Texas, USA, 20–22 April 2009.

[13]Jadhunandan, P.P. and Morrow, N.R..Effect of Wettability on Waterflood Recovery for Crude-Oil/Brine/Rock Systems. SPE Form Eval 10 (1): 40–46. SPE-22597-PA, 1995.

[14] Yildiz, H.O. and Morrow, N.R..Effect of brine composition on recovery of Moutray crude oil by waterflooding. J. Pet. Sci. Eng. 14 (3–4): 159–168, 1996.

[15] Tang, G.-Q. and Morrow, N.R. Injection of Dilute Brine and Crude Oil/Brine/Rock Interactions. In Environmental Mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in the Biosphere, ed. P.A.C. Raats, D. Smiles, and A.W. Warrick, No. 129, 171–179. Washington, DC: Geophysical Monograph, American Geophysical Union, 2002.

[16]Zhang, Y. and Morrow, N.R. Comparison of Secondary and Tertiary Recovery With Change in Injection Brine Composition for Crude Oil/ Sandstone Combinations. Paper SPE 99757 presented at the SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, 22–26 April, 2006.

[17]Zhang, P., Tweheyo, M.T., and Austad, T. Wettability alteration and improved oil recovery by spontaneous imbibition of seawater into chalk: Impact of the potential determining ions Ca^{2+}, Mg^{2+} and SO_4^{2-}. Colloids Surf., A 301 (1–3): 199–208, 2007.

[18]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): 4479–4485, 2009.

[19] Hiorth, A., Cathles, L., and Madland, M. The Impact of Pore Water Chemistry on Carbonate Surface Charge and Oil Wettability. Transport Porous Media 85 (1): 1–21, 2010.

[20] Jadhunandan, P.P. Effects of Brine Composition, Crude Oil and Aging Conditions on Wettability and Oil Recovery. PhD dissertation, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, 1990.

www.SID.ir

Archive of SID

[21] Bernard, G. Effect of Floodwater Salinity on Recovery Of Oil from Cores Containing Clays. Paper SPE 1725 presented at the SPE California Regional Meeting, Los Angeles, California, USA, 26–27 October 1967.
[22] Tang, G.-Q. and Morrow, N.R. Influence of brine composition and fines migration on crude oil/brine/rock interactions and oil recovery.J. Pet. Sci. Eng. 24 (2–4): 99–111, 1999.
[23] McGuire, P.L., Chatam, J.R., Paskvan, F.K., Sommer, D.M., and Carini, F.H. Low Salinity Oil Recovery: An Exciting New EOR Opportunity for Alaska's North Slope. Paper SPE 93903 presented at the SPE Western Regional Meeting, Irvine, California, USA, 30 March–1 April 2005.
[24]Lager, A., Webb, K.J., Black, C.J.J., Singleton, M., and Sorbie, K.S. Low salinity oil recovery—An experimental investigation. Paper presented at the International Symposium of Core Analysts, Trondhiem, Norway, 12–16 September 2006.
[25] Berg, S., Cense, A.W., Jansen, E., and Bakker, K. Direct Experimental Evidence of Wettability Modification by Low Salinity. Paper presented at the 23rd International Symposium of the Society of Core Analysts, Noordwijkaan Zee, The Netherlands, 27–30 September 2009.
[26] S. Strand, T. Puntervold, T. Austad, Effect of Temperature on Enhanced Oil Recovery from Mixed-Wet Chalk Cores by Spontaneous Imbibition and Forced Displacement Using Seawater, Energy & Fuels, Vol. 22, pp 3222-3225, 2008.
[27] Lager, A. et al., LoSalTM Enhanced Oil Recovery: Evidence of Enhanced Oil Recovery at the Reservoir Scale. Paper SPE 113976 presented at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, 19–23 April2008.
[28]Austad, T., Strand, S., Madland, M.V., Puntervold, T., and Korsnes, R.I. Seawater in Chalk: An EOR and Compaction Fluid. SPERes Eval & Eng 11 (4): 648–654. SPE-118431-PA 2008.
[29] McGuire, P.L., Chatam, J.R., Paskvan, F.K., Sommer, D.M., and Carini,F.H. Low Salinity Oil Recovery: An Exciting New EOR Opportunityfor Alaska's North Slope. Paper SPE 93903 presented at the SPEWestern Regional Meeting, Irvine, California, USA, 30 March–1 April2005.
[30]K. Skrettingland, Statoil; T. Holt, SPE, Sintef Petroleum Research; and M.T. Tweheyo , Snorre Low Salinity Water Injection Coreflooding Experiments and Single-Well Field Pilot, SPE 129877-PA, Volume 14, Number 2, 2011.

www.Reservoir.ir

www.SID.ir

Archive of SID

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

Enhanced Oil Recovery by Smart Water flooding: from Mechanisms to Simulation

Ahmadi Mohammad[1], Kamari Mosayyeb[2]

Abstract

Many oil reservoirs in the world come to near end of natural production as well as Iranian oil methods is in schedule of oil)EOR(reservoirs. So investigation for best Enhanced Oil Recovery companies. Smart water flooding has been introduced as EOR method for two decades. Smart water improves oil recovery by impact of salinity and ion composition on oil/brine/rock interaction and draw trapped oil out. Because of low cost and high potential in laboratory tests, oil industry considers this method in future plans. This method is so young, so some aspects of them still are unknown. Recently many researchers have developed their researches extensively about different aspect of this method and published their results. Many companies also begin to investigate with respect to near term field application. Some extensive research has been done in this paper to specify situation of this method in the world.

Different questions exist about this method, for example, what is the exact mechanism? What is its performance? How could simulated it? A lot of efforts have been done to answer them in this paper. Also history of field application of this method has been investigated.

Key Words:
Enhanced Oil Recovery (EOR), Smart Waterflooding, Low Salinity Water, Carbonate Reservoir, Wettability Alteration, Ion Exchange.

[1]National Iranian South Oil Company, Laboratory Studies Department
[2]National Iranian South Oil Company, Petrophysical Engineering Department

www.SID.ir