مطالعه آزمایشگاهی تزریق آب هوشمند و برگ سدر به‌عنوان ماده فعال سطحی طبیعی به منظور ازدیاد برداشت نفت از مخازن کربناته

صائب احمدی[۱]، محسن وفایی سفتی[۱*]، محمد مهدی شادمان[۱] و سید امید رستگار[۲]

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۲۳

چکیده

در مخازن کربناته شکاف‌دار به دلیل شرایط ترشوندگی سنگ و متراکم بودن شبکه ماتریس سنگ، بازده بازیابی نفت پایین می‌باشد. یکی از روش‌های مناسب برای تغییر ترشوندگی سنگ مخزن کربناته، سیلاب‌زنی با آب هوشمند است. علاوه بر این استفاده از ماده فعال سطحی تهیه شده از عصاره برگ سدر به‌عنوان یک منبع غنی و ارزان، با بهبود خاصیت ترشوندگی منجر به افزایش ازدیاد برداشت نفت می‌شود. در این پژوهش اثر غلظت یون‌های Ca^{+2}، Mg^{+2} و SO_4^{-2} موجود در آب هوشمند و همچنین اثر غلظت بیوسورفکتانت بر میزان تغییر ترشوندگی سنگ کربناته از طریق آزمایش های زاویه تماس و سیلاب‌زنی مغزه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش غلظت یون‌های Ca^{+2} و Mg^{+2}، از ۰/۰۱ تا ۱ مولار، SO_4^{-2} از ۰/۰۰۷ تا ۱ مولار در آب هوشمند و مقدار ماده فعال سطحی حاصل از برگ سدر از ۰/۰۵٪ وزنی تا ۰/۳٪ وزنی در آب هوشمند، حالت ترشوندگی سنگ کربناته را به ترشونده با آب تغییر داده و مقدار برداشت نفت از ۳۵ ٪ به ۵۷٪ افزایش می‌یابد. تغییر زاویه تماس از ۱۶۱ درجه به ۴۱ درجه در غلظت ۰/۳٪ وزنی از بیوسورفکتانت مشاهده می‌شود، که حاکی از تاثیر این محلول بر روی تغییر خاصیت ترشوندگی سنگ کربناته می‌باشد.

کلمات کلیدی: مخازن کربناته، زاویه تماس، آنالیز گرماسنجی وزنی، آب هوشمند، ماده فعال سطحی طبیعی

مقدمه

مخازن کربناته شکاف‌دار، از نظر مدل‌سازی و مدیریت مخزن دارای پیچیدگی‌های قابل توجهی می‌باشند. میزان بازیافت اولیه نفت در این مخازن عمدتاً پایین است، بنابراین از نظر ازدیاد برداشت ظرفیت قابل توجهی دارند[۱] بررسی خاصیت ترشوندگی این مخازن از سرتاسر دنیا نشان می‌دهد، حالت ترشوندگی بیش از ۹۰٪ این مخازن، خنثی یا نفت‌تر می‌باشند و این مخازن تراوایی پایینی دارند، بنابراین ازدیاد برداشت از این مخازن یک چالش بزرگ محسوب می‌شود[۳-۲]. در مخازن کربناته شکاف دار به‌دلیل کم یا منفی بودن فشار موئینگی، آب اغلب وارد شکاف‌ها شده و نمی‌تواند آشام خود به خودی به درون شبکه ماتریسی سنگ؛ که حاوی قسمت اعظم نفت است؛ داشته باشد.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی vafaiesm@modares.ac.ir

لـذا برداشـت نفـت بـا اسـتفاده از تزریـق آب معمولـی، به‌دلیـل حالـت ترشـوندگی ایـن مخـازن پایین‌تـر از مخـازن ماسـه سـنگی می‌باشـد. تغییـر ترشـوندگی سـنگ مخـزن بـه سـمت آب‌تـری بیشـتر، از رویکردهـای نویـن در بهبـود برداشـت نفـت از مخـازن کربناتـه شـکاف دار محسـوب می‌شـود. تغییـر ترشـوندگی سـنگ از حالـت نفـت تـر بـه آب‌تـر، بـا افزایـش نیروهـای مویینگـی از مقادیـر منفـی بـه مثبـت، سـبب آشـام خودبه‌خـودی آب می‌شـود [۴]. بـا پژوهش‌هـای انجـام گرفتـه در ۱۰ سـال اخیـر بـر روی خـواص ترشـوندگی نمونه‌هـای سـنگ/آب/ نفـت مختلـف ثابـت شـد کـه آب تزریقـی اگـر ترکیـب درصـد متفاوتـی بـا آب سـازند داشـته باشـد، می‌توانـد تعـادل شـیمیایی میـان سیسـتم آب/سـنگ/نفت را بـر هـم بزنـد کـه ممکـن اسـت موجـب ازدیـاد برداشـت نفـت شـود. حتـی اگـر ترکیـب آب تزریقـی مشـابه آب سـازند باشـد، تعـادل شـیمیایی مقـدار کمـی تحـت تاثیـر قـرار خواهـد گرفـت و فقـط مقادیـر اشـباع نسـبی تغییـر خواهنـد کـرد. امـا تزریـق آب بـا ترکیـب درصـد متفـاوت بـا آب سـازند، ممکـن اسـت خاصیـت ترشـوندگی سـنگ را تغییـر دهـد و بنابرایـن جـزو روش‌هـای ثالثیـه ازدیـاد برداشـت محسـوب مـی شـود. تزریـق آب بـه مخـازن نفتـی از دیربـاز بـه منظـور افزایـش تولیـد صـورت گرفتـه اسـت، اولیـن مـوارد به‌صـورت اتفاقـی در مخازنـی کـه نزدیـک منابـع غنـی آبـی در حوالـی چاه‌هـای تولیـدی قـرار گرفتـه بودنـد اتفـاق افتـاده اسـت، ایـن روش اولیـن بـار در سـال ۱۸۶۵ در منطقـه پنسـیلوانیای آمریـکا مـورد اسـتفاده قـرار گرفـت [۵]. یکـی از روش‌هـای پیشـنهادی بـرای ازدیـاد برداشـت نفـت از مخـازن نفتـی کـه اخیـرا مطـرح شـده اسـت، تغییـر شـیمی آب تزریقـی می‌باشـد. در واقـع در ایـن روش بـا تغییـر میـزان شـوری آب تزریقی و ترکیـب یونـی آن، سـعی می‌شـود تـا اثـرات متقابـل آب، سـنگ، نفـت را تحـت تاثیـر قـرار داده و راندمـان برداشـت نفـت از مخـازن افزایـش یابـد. پژوهش‌هـای زیـادی بـر روی ازدیـاد برداشـت نفـت بـا تزریـق آب هوشـمند انجـام شـده اسـت. ژانـگ و همـکاران بـا آزمایش‌هـای آشـام خودبخـودی تاثیـر یـون Mg^{+2} را بـر بازیابـی نفـت در سـنگ کربناتـه گچـی بررسـی کردنـد. نتایـج آنهـا نشـان می‌دهـد کـه بـا افزایـش غلظـت یـون Mg^{+2} بـدون حضـور یـون SO_4^{-2} میـزان بازیابـی نفـت کـم اسـت [۶]. نتایـج فتحـی و همـکاران نشـان می‌دهـد کـه بـا کاهـش غلظـت نمـک NaCl در آب تزریقـی مقـدار بازیابـی نفـت افزایـش می‌یابـد [۷]. کازانکاپـو و همـکاران نیـز تاثیـر کاهـش غلظـت NaCl و افزایـش غلظـت یـون SO_4^{-2} در آب هوشـمند را بـر مقـدار بازیابـی نفـت از مغزه‌هـای کربناتـه مربـوط بـه میـدان ژانـاژول قزاقسـتان در دریـای خـزر بررسـی نمودنـد. آنهـا مشـاهده کردنـد کـه بـا افزایـش غلظـت یـون SO_4^{-2} و کاهـش غلظـت نمـک NaCl در آب تزریقـی میـزان بازیابـی نفـت افزایـش می‌یابـد [۸]. از طـرف دیگـر اسـتفاده از مـواد فعـال سـطحی در کاهـش چسـبندگی سـطحی، یکـی از روش‌هـای ازدیـاد برداشـت نفـت می‌باشـد [۹]. امـا بـرای کاربردهـای میدانـی، مقـدار زیـادی از مـواد شـیمیایی گـران قیمـت مـورد نیـاز اسـت. لـذا بـه دلایـل اقتصـادی شـرکت‌های نفتـی تمایـل بـه اجـرای ایـن روش در حوزه‌هـای میدانـی ندارنـد. بنابرایـن اسـتفاده از افزودنی‌هـای شـیمیایی ارزان قیمـت بسـیار مـورد توجـه بـوده و از اهمیـت به‌سـزایی برخـوردار اسـت. در سـال‌های اخیـر اسـتفاده از مـواد فعـال سـطحی طبیعـی اسـتخراج شـده از بـرگ درختـان، به‌دلیـل هزینـه کـم و سـازگار بـودن بـا محیـط زیسـت مـورد توجـه زیـادی قـرار گرفتـه اسـت [۱۰]. پـردل شـهری و همـکاران از بـرگ سـدر به‌عنـوان مـاده فعـال طبیعـی بـه منظـور کاهـش کشـش بیـن سـطحی آب و نفـت اسـتفاده کردنـد. نتایـج آنهـا نشـان می‌دهـد کـه ایـن مـاده به‌خوبـی کشـش بیـن سـطحی بیـن آب و نفـت را کاهـش می‌دهـد [۱۰]. نتایـج رحمتـی و همـکاران نشـان می‌دهـد کـه مـاده فعـال سـطحی اسـتخراج شـده از بـرگ تـوت سـفید نیـز کشـش بیـن سـطحی آب و نفـت را کاهـش می‌دهـد [۱۱]. بنابرایـن بـه دلیـل هزینـه پاییـن و کارایـی خـوب مـواد فعـال سـطحی طبیعـی و تزریـق آب هوشـمند در ازدیـاد برداشـت نفـت، در ایـن پژوهـش تاثیـر دو روش تقریبـاً جدیـد آب هوشـمند و مـواد فعـال سـطحی طبیعـی بـر برداشـت نفـت از مخـازن کربناتـه بررسـی شـده اسـت.

مواد و روش‌ها

مواد

سنگ کربناته

در این پژوهش از سنگ برون زاد[1] کربناته آهکی[2] به‌عنوان فاز جامد استفاده شده است. همچنین از پودر کلسیت به‌دلیل توزیع یکنواخت اندازه ذرات وخلوص بالا، در آزمایش آنالیز گرماسنجی وزنی به‌عنوان نماینده سنگ کربناته استفاده شده است که از شرکت نروژی Norwegian Talc AS تهیه شده است. جدول ۱ مشخصات پودر استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات پودر کلسیت

چگالی	۲/۸۵ g/cm^3
اندازه متوسط ذرات	۷ μ m
سطح ویژه متوسط	۲/۳ m^2/g
درجه خلوص	٪۹۹

نفت مدل

نرمال دکان که اسید استئاریک با غلظت ۰/۰۱ مولار در آن حل شده؛ به‌عنوان فاز نفتی مورد استفاده قرار گرفته است. این دو ماده از شرکت آلمانی مرک با خلوص ۹۹٪ تهیه شده اند. نفت مورد استفاده در دمای محیط دارای ویسکوزیته ۰/۸۷۹ cp و چگالی ۰/۷۳ g/cm^3 می‌باشد.

آب مقطر

در انجام آزمایش‌ها از آب یک بار تقطیر برای ساخت محلول‌های مورد استفاده در تغییر ترشوندگی و شستشوی نمونه‌ها استفاده شده است.

نمک‌ها

از نمک‌های سدیم سولفات، منیزیم کلراید شش آبه و کلسیم کلراید در محلول‌های اصلاح‌گر ترشوندگی استفاده شده است، که همگی از شرکت آلمانی مرک و با خلوص بالای ۹۹٪ تهیه شده اند.

ماده فعال سطحی

ماده فعال سطحی طبیعی از برگ درخت سدر با روش خشک‌کن پاششی به‌دست آمد. پودر به‌دست آمده محلول در آب و به رنگ قهوه‌ای روشن است که حاوی یک نوع سورفکتانت طبیعی به نام ساپونین می‌باشد.

آماده‌سازی نمونه‌ها و روش کار آزمایشگاهی

محلول‌های آب هوشمند و ماده فعال سطحی

از ترکیب نزدیک به غلظت یون‌های آب خلیج فارس به‌عنوان مقادیر پایه در آب هوشمند (محلول ۱) در جدول ۲ در این پژوهش استفاده شد. سپس اثر غلظت یون‌های دوظرفیتی و مقدار ماده فعال طبیعی نیز با آزمایش‌های مختلف بررسی شد. جدول ۲ غلظت یون‌های موجود در آب هوشمند به همراه ماده فعال سطحی را نشان می‌دهد

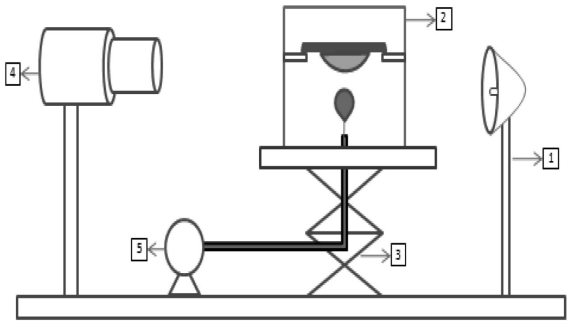
زاویه تماس

دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، در حالت کلی شامل یک منبع نور (۱)، یک محفظه شفاف (۲) که قرص و ماده نفتی و آب در آن قرار می‌گیرند، جک برای تنظیم دقیق ارتفاع (۳)، دوربین با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر (۴) و سیستم تزریق که شامل پمپ تزریق (۵) و سرنگ و سوزن بوده، می‌باشد. جهت اندازه‌گیری زاویه تماس قرص‌هایی به ضخامت ۲ mm از مغزه‌ها تهیه و سطح آنها کاملاً صیقلی و همگن می‌شود. سپس نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و در دمای ۴۰°C به مدت ۲۴ hr خشک می‌گردند. نمونه‌ها در محلول تولوئن به مدت ۲ روز برای حذف اسیدهای چرب جذب شده و ناخالصی حاصل از برش و تماس دست قرار داده شدند. پس از آن نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و خشک می گردند. پس از خیساندن در آب مقطر به مدت ۵ min در نفت مدل در دمای ۸۰°C به مدت ۲ هفته قرار داده شدند. در این مرحله ترشوندگی آن با نفت با آزمایش زاویه تماس با قرار دان قطره هپتان بررسی شده است.

1. Outcrop
2. Limestone

جدول ۲ غلظت یون‌ها و ماده فعال سطحی در محلول‌های آب هوشمند و ماده فعال سطحی طبیعی

محلول‌های آب هوشمند	SO_4^{-2} (mol)	Mg^{+2} (mol)	Ca^{+2} (mol)	ماده فعال سطحی طبیعی(درصد وزنی)
محلول ۱	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰
محلول ۲	۰/۰۰۷	۰/۵	۰/۰۱۰	۰
محلول ۳	۰/۰۰۷	۱	۰/۰۱۰	۰
محلول ۴	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۰/۵	۰
محلول ۵	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۱	۰
محلول ۶	۰/۵	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰
محلول ۷	۱	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰
محلول ۸	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰/۰۵
محلول ۹	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰/۱
محلول ۱۰	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰/۳



شکل ۱ شماتیک دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس

سپس نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و در دمای ۰°C به مدت hr ۲۴ خشک می‌گردند و پس از آن در دمای ۷۰°C، در محلول‌های مورد استفاده جهت تغییر ترشوندگی به مدت hr ۷۲ قرار داده شدند. در انتها نمونه‌ها با آب مقطر شسته و در دمای ۴۰°C به مدت hr ۲۴ خشک شده‌اند و در آخر زاویه تماس در دمای اتاق و فشار اتمسفری اندازه‌گیری می‌شود. هر آزمایش دو بار تکرار شده و نتایج گزارش شده میانگین نتایج دو آزمایش برای هر محلول است. حداکثر میزان خطا نیز در این آزمایش ۲± درجه است.

دستگاه سیلاب‌زنی مغزه

به منظور بررسی تاثیر مواد مختلف بر ازدیاد برداشت نفت در شرایط دما و فشار بالا از دستگاه سیلاب زنی مغزه استفاده می‌شود. در آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه از مغزه‌های تهیه شده از سنگ کربناته استفاده شده است. در این پژوهش به کمک دستگاه سیلاب‌زنی مغزه میزان بازیافت نفت در هنگام تزریق محلول‌های آب هوشمند و مواد فعال سطحی به درون مغزه کربناته به‌دست می‌آید. این دستگاه ساخت شرکت داخلی گدار مبتکر جنوب و متعلق به دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. این دستگاه از دو قسمت بخش تزریق‌کننده و محفظه قرارگیری مغزه تشکیل شده است. قسمت تزریق‌کننده شامل دو پمپ رفت و برگشت، مخزن روغن و سیلندر توخالی است که سیال تزریقی در آن ریخته می شود. بخش دوم مغزه و اتاقک اطراف آن است که دمای محفظه در حدود ۹۰°C می‌ماند تا آزمایش به شرایط واقعی چاه مخزن نزدیک باشد. در خروجی دستگاه یک فشار معکوس تعبیه شده تا فقط در فشارهای بالای ۲۰ bar سیال تزریق شونده اجازه خروج از مغزه را داشته باشد. شکل ۲ شماتیک کلی دستگاه سیلاب‌زنی مغزه را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

زاویه تماس

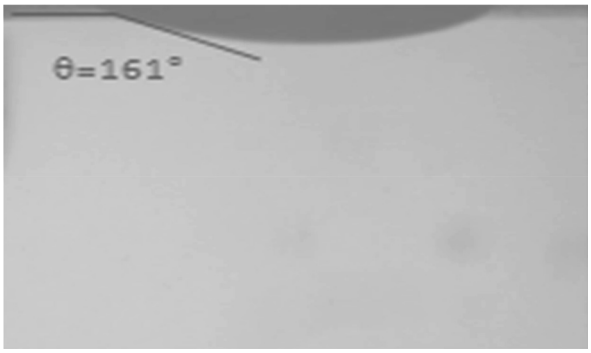
مطالعات پیشین محققان نشان می‌دهد که آب هوشمند به تنهایی بر روی ترشوندگی سنگ کربناته گچی تاثیرگذار است[۱۴-۱۲].

بنابراین به منظور بررسی مقدار تاثیر یون‌های موجود در آب هوشمند همراه با سورفکتانت طبیعی مقادیر زاویه تماس بر روی سطح سنگ برای محلول‌های ۱ تا ۱۰ اندازه‌گیری شد در این پژوهش اندازه‌گیری زاویه تماس با قرار دادن یک قطره هپتان از پایین‌بر سطح سنگ در محیط آبی در دمای اتاق و فشار اتمسفری انجام شده است. شکل ۳ قطره هپتان قرار داده شده بر سطح سنگ کربناته در محیط آبی بعد از قرار دادن سنگ‌ها در نفت مدل به مدت دو هفته را نشان می‌دهد که مقدار زاویه تماس آن ۱۶۱ درجه بوده و نشان‌دهنده نفت تر بودن سنگ‌ها پس از قرار دادن در نفت مدل می‌باشد. سپس تاثیر غلظت یون‌های موجود در آب هوشمند و غلظت سورفکتانت طبیعی برگ سدر بر روی زوایه تماس سطح سنگ کربناته بررسی شد. بدین‌صورت که ابتدا سنگ‌های نفت‌تر شده در داخل محلول‌های ۱ تا ۱۰ که حاوی غلظت‌های متفاوتی از یون‌ها و سورفکتانت می‌باشند قرار داده شدند. سپس سطح سنگ‌ها با روشی که قبلا شرح داده شد جهت اندازه‌گیری زاویه تماس آماده‌سازی شدند. شکل ۴ نتایج زاویه تماس را پس از قرار دادن سنگ نفت‌تر شده در محلول‌های آب هوشمند و سورفکتانت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت یون Mg^{+2} در آب هوشمند از ۰/۰۱ مولار تا ۱ مولار مقدار زاویه تماس را از ۱۲۱ درجه به ۸۹ درجه کاهش می‌یابد. همچنین افزایش غلظت یون Ca^{+2} نیز از ۰/۰۱ مولار تا ۱ مولار مقدار زاویه تماس را از ۱۲۱ به ۹۳ درجه کاهش می‌دهد که نشان‌دهنده تغییر حالت ترشوندگی سطح سنگ است. مشاهده می‌شود که یون Mg^{+2} تاثیر بیشتری بر مقدار زاویه تماس به نسبت یون Ca^{+2} دارد. یون‌های Mg^{+2} و Ca^{+2} با جذب اسیدهای چرب جذب شده برروی سنگ می‌توانند حالت ترشوندگی سنگ را تغییر داده و سبب دفع اسیدهای چرب جذب شده از روی سنگ شوند. تراکم بار یون Mg^{+2} از یون Ca^{+2} بیشتر است، در نتیجه راحت‌تر می‌تواند به سطح سنگ کربناته که بار مثبت دارد نزدیک شده و با جذب اسید چرب موجود که بار منفی دارد، حالت ترشوندگی سنگ را به آب‌تری بیشتر تغییر دهد. همچنین افزایش غلظت یون SO_4^{-2} از ۰/۰۰۷ مولار تا ۱ مولار در آب هوشمند مقدار زاویه تماس را به‌ترتیب از ۱۲۱ به ۸۱ درجه کاهش می‌دهد. تاثیر بیشتر یون SO_4^{-2} نسبت به دو یون Mg^{+2}و Ca^{+2} به این دلیل است یون SO_4^{-2} با بار منفی به سطح سنگ با بار مثبت، نزدیک شده و از بار مثبت سطح سنگ می‌کاهد در نتیجه یون‌های Ca^{+2} و Mg^{+2} موجود به دلیل دافعه الکترواستاتیکی کمتر با سطح سنگ، به آسانی به اسید چرب جذب شده برروی سنگ نزدیک شده و با کندن آن از روی سطح سنگ، حالت ترشوندگی سنگ را تغییر می‌دهند. نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که افزودن ۰/۰۵٪ تا ۰/۳٪ وزنی سورفکتانت طبیعی برگ سدر به آب هوشمند زاویه تماس را از ۱۲۱ درجه به‌ترتیب به ۸۳ و ۴۱ درجه کاهش می‌دهد و کم‌ترین مقدار زاویه تماس مربوط به این حالت است که نشان‌دهنده دفع مقدار زیادی اسید چرب جذب شده از روی سنگ می‌باشد.

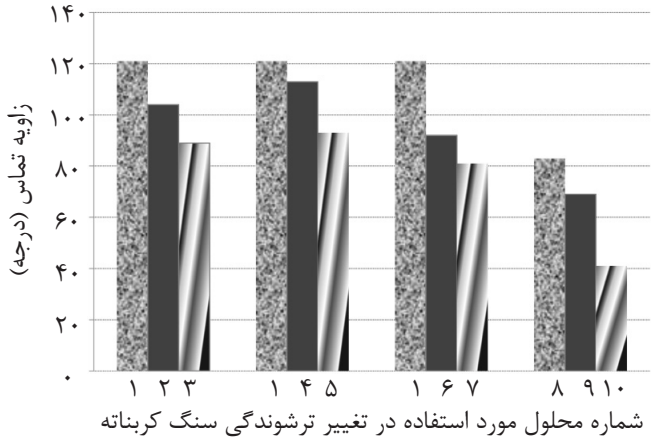
نتایج آزمایش سیلاب‌زنی مغزه

به منظور ارزیابی محلول‌های آب هوشمند و سورفکتانت طبیعی مورد استفاده از آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه شسته و خشک شده ابتدا کاملا تحت خلا قرار گرفت و با آب سازند اشباع گردید. سپس نفت خام را به درون مغزه کربناته با دبی ۰/۲ m/min تا رسیدن به اشباع آب باقی‌مانده تزریق نموده و پس از یک هفته ماندگاری در دمای ۹۰°C و اطمینان از رسیدن به شرایطی مشابه مخزن حدود یک حجم فضای خالی[1]، آب نمک مشابه با آب سازند مخازن نفتی تزریق می‌شود. پس از تزریق آب نمک، نفت خروجی از مغزه را اندازه گرفته و این کار ۳ مرتبه تکرار شد.

1. Pore Volume(P.V.)

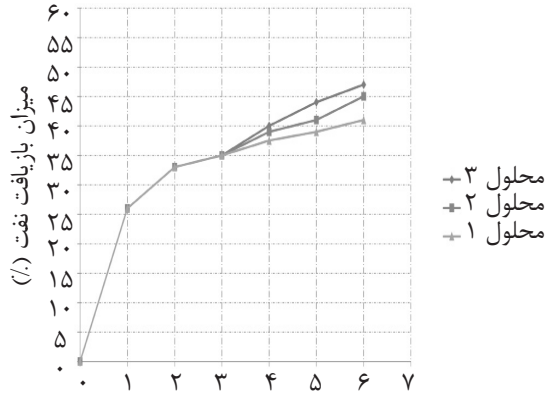


شکل ۳ قطره هپتان قرار داده شده بر سطح سنگ کربناته در محیط آبی بعد از قرار دادن سنگ‌ها در نفت مدل به مدت دو هفته

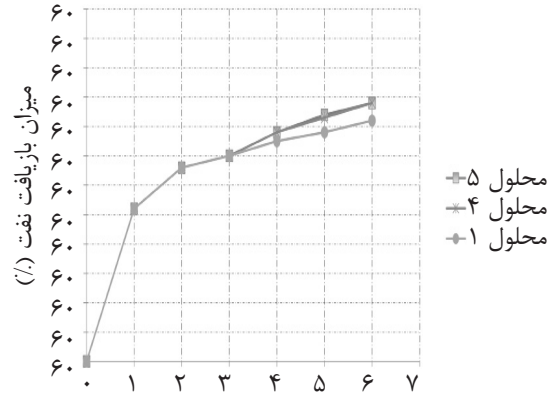


شکل ۴ مقادیر زاویه تماس قطره هپتان بر روی سنگ کربناته پس از تغییر ترشوندگی با محلوهای آب هوشمند و سورفکتانت (محلول‌های ۱ تا ۱۰ هر گروه از ۴ گروه بالا مربوط به تغییر غلظت یک یون در محلول‌های ۱ تا ۱۰ است)

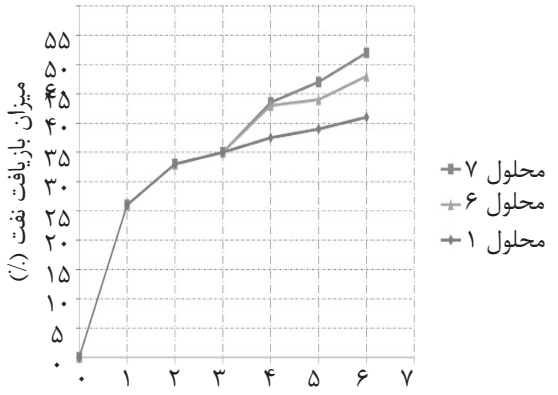
پس از ۳ مرحله تزریق آب سازند میزان نفت خروجی مقدار ناچیزی شد. که این نشان‌دهنده اتمام مرحله ثانویه برداشت نفت می‌باشد. سپس با تزریق محلول های آب هوشمند و سورفکتانت مرحله ازدیاد برداشت ثالثیه نفت آغاز می‌شود. در هر مرحله فرآیند تزریق محلول‌های آب هوشمند و یا سورفکتانت، زمان یکسانی (۱ روز) جهت برهم‌کنش نفت/سنگ/آب اعمال می‌شود. با تزریق ۳ حجم فضای خالی محلول‌های مختلف آب هوشمند و یا سورفکتانت و اندازه‌گیری میزان نفت خروجی تاثیر هر محلول بر میزان ازدیاد برداشت بررسی شده است. نتایج اشکال ۷-۵ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت یون Mg^{+2} و Ca^{+2} در آب هوشمند میزان برداشت نفت افزایش می‌یابد و افزایش غلظت یون SO_4^{-2} بیشتر از یون Mg^{+2}، و یون Mg^{+2} بیشتر از یون Ca^{+2} بر روی میزان برداشت نفت تاثیرگذار است. مقایسه نتایج اشکال ۵ تا ۸ با شکل ۴ نشان می‌دهد که هر چقدر میزان بازیابی نفت در محلول استفاده شده در سیلاب‌زنی بیشتر باشد، زاویه تماس مربوط به آن کوچک‌تر است و می‌توان دلیل اصلی ازدیاد برداشت نفت را به تغییر ترشوندگی سنگ از حالت نفت دوست به آب دوست و افزایش نیروهای مویینگی در شبکه سنگ نسبت داد. همچنین در شکل ۸ مشاهده می‌شود که افزایش غلظت ماده فعال سطحی طبیعی به‌همراه آب هوشمند میزان بازیابی نفت را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد که این افزایش میزان بازیابی نفت می‌تواند به دلیل تغییر خاصیت ترشوندگی سنگ و یا کاهش کشش سطحی میان آب و نفت توسط این ماده فعال سطحی باشد.



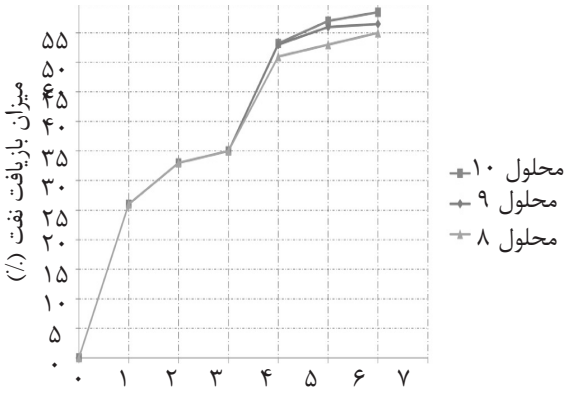
شکل ۵ مقدار بازیابی نفت برای تزریق آب هوشمند با غلظت‌های مختلف از یون‌های Mg^{+2} در دستگاه سیلاب‌زنی مغزه (محلول‌های ۱ تا ۳)



شکل ۶ مقدار بازیابی نفت برای تزریق آب هوشمند با غلظت‌های مختلف از یون‌های Ca^{+2} در دستگاه سیلاب‌زنی مغزه (محلول‌های ۱، ۴، ۵)



شکل ۷ مقدار بازیابی نفت برای تزریق آب هوشمند با غلظت‌های مختلف از یون‌های SO_4^{-2} در دستگاه سیلاب‌زنی مغزه (محلول‌های ۱، ۶، ۷)



شکل ۸ مقدار بازیابی نفت برای تزریق آب هوشمند با غلظت‌های ازسورفکتانت طبیعی در دستگاه سیلاب‌زنی مغزه (محلول‌های ۸ تا ۱۰)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر ترکیب آب هوشمند و استفاده از ماده فعال سطحی طبیعی موجود در برگ سدر بر تغییر خاصیت ترشوندگی سنگ کربناته، میزان کارایی محلول‌ها در دفع اسید چرب از روی سنگ کربناته و میزان ازدیاد بر داشت نفت از مغزه‌های کربناته با استفاده از آزمایش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس و سیلاب‌زنی مغزه بررسی شد. از نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که:

۱- افزایش غلظت یون‌های Mg^{+2} و Ca^{+2} از ۰/۰۱ مولار تا ۱ مولار در آب هوشمند مقادیر زاویه تماس را به‌ترتیب از ۱۲۱ به ۸۹ درجه و از ۱۲۱ به ۹۳ درجه کاهش می‌دهد.

۲- افزایش غلظت یون SO_4^{-2} از ۰/۰۰۷ مولار تا ۱ مولار در آب هوشمند مقادیر زاویه تماس را به‌ترتیب از ۱۲۱ به ۸۱ درجه کاهش می‌دهد.

۳- افزودن ۰/۰۵٪ تا ۰/۳٪ وزنی سورفکتانت طبیعی برگ سدر به آب هوشمند زاویه تماس را از ۱۲۱ درجه به‌ترتیب به ۸۳ و ۴۱ درجه کاهش می‌دهد.

۴- بـا افزایـش غلظـت یون‌هـای Mg^{+2} و Ca^{+2} از ۰/۰۱ مـولار تـا ۱ مـولار در آب هوشـمند، مقـدار برداشـت نهایـی نفـت در آزمایـش سـیلاب‌زنی مغـزه بـه ترتیـب از ۴۱٪ بـه ۴۶٪ افزایـش می‌یابـد

۵- افزایـش غلظـت یـون SO_4^{-2} از ۰/۰۰۷ مـولار تـا ۱ مـولار در آب هوشـمند، مقـدار برداشـت نهایـی نفـت را از ۴۸٪ بـه ۵۳٪ افزایـش می‌دهـد. ۶- افـزودن ۰/۰۵٪ تـا ۰/۳٪ وزنـی سـورفکتانت طبیعـی بـرگ سـدر بـه آب هوشـمند مقـدار بازیابـی نفـت را از ۵۵٪ بـه ۵۸/۵٪ افزایـش می‌دهـد.

مراجع

[1]. Taber J. J., Martin F. D. and Seright R. S., "*Introduction to screening criteria and enhanced recovery field projects EOR screening criteria revisited,"* SPE Reservoir Engineering.,Vol.12, pp.189-198, 1997.

[2]. Awan A. and Kleppe J., *"A survey of North Sea Enhanced-Oil-Recovery Projects initiated during the years 1975 to 2005,"* SPE Reservoir Evaluation & Engineering.,Vol. 11., pp. 497-512, 2008.

[3]. Stran S., Austad T., Puntervold T., Høgnesen E ., Olsen M. and Barstad S. M. F., *"Smart water for oil recovery from fractured limestone: A preliminary study,"* Energy & Fuels., Vol. 22.,pp. 3126-3133, 2008.

[4]. Austad T., Matre B., Milter J., Saevereid A. and Oyno L., *"Chemical flooding of oil reservoirs and spontaneous oil expulsion from oil-and water-wet low permeable chalk material by imbibition of aqueous surfactant solution,"* Colloid Surf. A., Vol. 137., pp. 117-129 ,1997.

[5]. Vladimir A. and Eduardo M., *"Enhanced oil recovery: an update review,"* Energies.,Vol 3., pp. 1529-1575, 2010.

[6]. Zhang P., Tweheyo M. T. and Austad T., *"Wettability ateration 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 and Surfaces A., Vol. 301., pp. 199-208, 2007.

[7]. Fathi S. J., Austad T. and Strand S., *"Smart water as a wettability modifier in chalk: the effect of salinity and ionic composition,"* Energy & Fuels., Vol. 24, pp. 2514-2519, 2010.

[8]. Kazankapov N., *"Enhanced oil recovery in Caspian carbonates with Smart Water,"* SPE, Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia,14-16 October , 2014.

[9]. Salehi M., Johnson S. J. and Lian J. T., *"Mechanistic Study of wettability alteration using surfactants with applications in naturally fractured reservoirs,"* Journal of Langmuir, Vol 24., pp. 14099-14107, 2008.

[10]. Pordel Shahri M., Shadizadeh S. R., and Jamialahmadi M., *"A new type of surfactant for enhanced oil recovery,"* Petroluem Science and Technology, Vol. 30., pp. 585-593, 2012.

[11]. Rahmati M., Mashayekhi M., Songolzadeh R. and Daryasafar A., *"Effect of natural ieaf derived surfactants on wettability alteration and interfacial tension reduction in water-oil system:EOR application,"* Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol. 58, pp. 245-251, 2015.

[12]. Rezaei Gomari K. A., Denoyel R. and Hamouda A. A., *"Wettability of calcite and mica modified by different-Long-Chain fatty acids (C18 Acids),"* Journal Colloid and Interface Science, 297, pp. 470-479., 2006.

[13]. AlQuraishi A. A., AlHussinan N. S. and AlYami Q. H., *"Efficiency and recovery mechanism of low salinity water flooding in sandstone and carbonate reservoirs,"* Ravenna, Italy,.12th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Mar. 25-27., 2015.

[14]. Rezaei Doust A., Puntervold T., Strand S. and Austad T., *"Smart water as wettability modifier in carbonate and sandstone/differences in the chemical mechanisms,"* Energy & Fuels., Vol. 23, p. 4479.