

## مطالعه‌ی مقایسه‌ای و آزمایشگاهی مواد شیمیایی مختلف در ازدیاد برداشت؛ تغییر ترشوندگی مخازن نفتی ماسه‌سنگی

علی صفایی<sup>۱\*</sup>، فریدون اسماعیل‌زاده<sup>۱</sup>، دانشگاه شیراز<sup>۱</sup> ■ محمدرضا اسماعیلی‌نسب<sup>۱</sup>، دانشگاه مرودشت

### چکیده

یکی از مشکلات اکثر مخازن نفتی، نفت‌دوست<sup>۲</sup> بودن آنهاست که باعث شده نفت به سطح سنگ مخزن چسبیده و تولید نشود. در زمینه‌ی ازدیاد برداشت<sup>۴</sup> از مخازن نفتی یکی از راه‌حل‌ها، تغییر ترشوندگی<sup>۵</sup> سنگ است. معمولاً برای تغییر ترشوندگی از روش‌های گرمایی و شیمیایی استفاده می‌شود. در این تحقیق، جهت تغییر ترشوندگی مخازن ماسه‌سنگی<sup>۶</sup> نفتی، اثر مواد شیمیایی اتیلن‌دی‌امین تتراستیک‌اسید (EDTA)، سدیم‌لوریل سولفات (SLS)، سدیم‌دودسیل سولفات (SDS)، پلی‌وینیل‌الکل (PVA) و پلی‌وینیل‌پرولین (PVP) بررسی شده است. همچنین به دلیل تشابه جنس شیشه و ماسه‌سنگ، از شیشه استفاده شده است. از روش‌های اندازه‌گیری ترشوندگی می‌توان به اندازه‌گیری مستقیم زاویه‌ی تماس<sup>۷</sup>، روش Amott، روش Amott-Harvy و روش USBM اشاره کرد. در این پژوهش، ابتدا به روش غوطه‌وری<sup>۸</sup>، پلیمرها بر سطح سنگ پوشش داده شده و سپس توسط اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس شیشه و نفت در حضور آب، تغییر ترشوندگی بررسی شده است. به‌علاوه متغیر شوری<sup>۹</sup> نیز در روند انجام این فرآیند مشاهده گردید و در پایان بهترین مواد شیمیایی و بهترین شرایط برای تغییر ترشوندگی مشخص شد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۲/۱۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۴/۱۵

### واژگان کلیدی:

مخازن نفتی ماسه‌سنگی، ترشوندگی، زاویه‌ی تماس، روش پوشش‌دهی غوطه‌وری

### مقدمه

میان‌شکن شدن جبهه‌ی آب تزریقی زود هنگام بوده و بخش قابل توجهی از نفت پس از زمان میان‌شکنی بازیافت می‌گردد و باعث می‌شود بخش زیادی از نفت باقیمانده توسط نیروهای موئینگی به دام بیافتد. بنابراین تغییر ترشوندگی به سمت آب‌دوستی و همچنین کاهش نیروی موئینگی از طریق کاهش کشش بین‌سطحی باعث بهبود بازیافت نفت می‌گردد که البته در این تحقیق روی تغییر ترشوندگی بحث شده است. مواد شیمیایی مورد استفاده گروه‌های عاملی آب‌دوستی دارند که پس از جذب سطحی روی سنگ، ترشوندگی نفت را از نفت‌دوست به آب‌دوست تغییر می‌دهند. در این تحقیق، ابتدا غلظت بهینه برای هر ماده‌ی شیمیایی جهت تغییر ترشوندگی به‌دست آمده و سپس برای بررسی متغیر شوری از غلظت بهینه استفاده شده است. لازم به‌ذکر است که تغییر زاویه‌ی تماس در تمامی مراحل بر حسب زمان، اندازه‌گیری شده تا سرعت تغییر ترشوندگی نیز به‌دست آید.

حدود ۴۰ درصد مخازن جهان ماسه‌سنگی هستند که ذاتاً آب‌دوست می‌باشند. اما به‌دلیل در تماس بودن نفت و سنگ مخزن در طول سالیان طولانی، ماسه‌سنگ اجزای سنگین نفت را جذب کرده و نفت‌دوست شده است. نتیجه آنکه نفت به سنگ مخزن چسبیده و بازیافت نفت کاهش می‌یابد. البته ترشوندگی سنگ مخزن، بستگی زیادی به ترکیب نفت، شیمی سطح سنگ مخزن و حضور یا عدم حضور یک فاز آبی دارد. به‌علاوه اینکه ترکیب فاز آب، فشار، دما و مدت زمان در تماس بودن سیال و سنگ از جمله متغیرهای مؤثر هستند [۱]. همچنین هرچه ترکیبات نفت مخزن سنگین‌تر و پیچیده‌تر باشند، سنگ مخزن نفت‌دوستی بیشتری خواهد داشت [۲].

### ۱- معرفی

در تحقیقات بسیاری اعم از دانشگاهی و صنعتی، تغییر ترشوندگی سنگ به روش‌های شیمیایی، نقش بسیار مهمی در بازیافت نفت از مخازن دارند [۳-۸]. همان‌گونه که قبلاً گفته شد در تحقیق حاضر جهت تغییر ترشوندگی سنگ از مواد شیمیایی استفاده شده است. مکانیزم‌هایی که در این روش موجب افزایش بازیافت نفت از مخزن می‌شوند تغییر ترشوندگی و کاهش کشش بین‌سطحی<sup>۱۰</sup> فاز آب و نفت است. در سنگ آب‌دوست، فاز آب منافذ ریز را اشغال کرده و منافذ بزرگ با فاز نفت پر می‌شوند. در سنگ آب‌دوست، بیشتر نفت درون منافذ قبل از میان‌شکن شدن جبهه‌ی آب، جایجا می‌شود و پس از میان‌شکن شدن، جریان نفت بسیار کم است. نفت باقیمانده توسط نیروهای موئینگی به دام می‌افتد. اما در مخازن نفت‌دوست،

### ۲- مواد و روش‌ها

#### ۲-۱- مواد

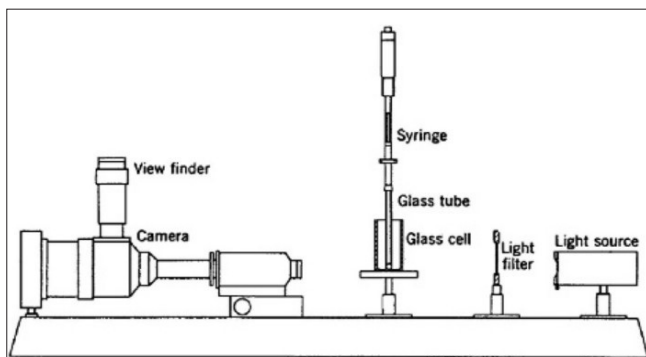
نفت خام آسفالتینی یکی از مخازن جنوب کشور (میدان سروستان) تهیه شده که حاوی ۱۰ درصد وزنی آسفالتین بوده و وزن مخصوص ۰/۸۵ دارد. همچنین به‌دلیل تشابه زیاد ماسه‌سنگ و شیشه، جهت بررسی تغییر ترشوندگی از شیشه استفاده شده که حاوی بیش از ۹۰ درصد سیلیس است. جهت انجام آزمایش‌ها، سطح شیشه‌ها را با بنزن شسته و آنها را به مدت دو ساعت درون کوره‌ای با دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده‌اند. اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس شیشه و نفت در حضور فاز آبی،

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (alisafaei1125@gmail.com)

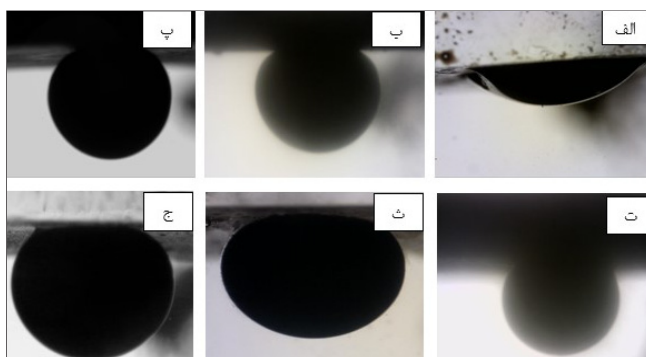
۰/۰۶، ۰/۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۸ گرم SLS در ۲۰ میلی لیتر آب،  
 ۰/۰۶، ۰/۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۸ گرم SDS در ۲۰ میلی لیتر آب،  
 ۰/۰۶، ۰/۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۸ گرم PVA در ۲۰ میلی لیتر آب و  
 ۰/۰۶، ۰/۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۸ گرم PVP در ۲۰ میلی لیتر آب مخلوط شده‌اند.

### ۲-۳- اندازه‌گیری زاویه تماس

برای اندازه‌گیری زاویه تماس از دستگاه نشان داده شده در شکل ۱- استفاده می‌شود. اندازه‌گیری بدین صورت انجام می‌شود که ابتدا نمونه، درون آکواریوم حاوی آب قرار داده می‌شود. سپس نمونه را به نحوی روی دو ضامن نگهدارنده قرار می‌دهند که حداقل یک سطح نمونه درون آب قرار داشته باشد. سپس تزریق توسط سوزنی که در ته آکواریوم به یک پمپ سرنگی متصل است بدین ترتیب انجام می‌شود که قطره‌ی نفت را درون آکواریوم می‌اندازیم. قطره به دلیل کمتر بودن چگالی آن نسبت به آب، شروع به بالا رفتن می‌کند تا به نمونه برسد. سپس شکل قطره‌ی نفت روی سطح نمونه را با دوربینی با کیفیت بالا ثبت کرده و با استفاده از نرم‌افزار آنالیز شکل، زاویه‌ی تماس را اندازه می‌گیریم.



شکل ۱ | شماتیک کلی دستگاه اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس



۲ | الف) قطره‌ی نفت قبل از پوشش‌دهی با مواد شیمیایی (ب) بعد از پوشش‌دهی با EDTA (پ) بعد از پوشش‌دهی با SLS (ت) بعد از پوشش‌دهی با SDS (ث) بعد از پوشش‌دهی با PVA (ج) بعد از پوشش‌دهی با PVP

زاویه‌ی ۴۰-۳۰ درجه را نشان می‌دهد. سپس جهت تغییر ترشوندگی شیشه‌ها به نفت‌دوست، آنها را درون نمونه‌ی نفت گذارده و سپس به مدت چهار روز در کوره‌ای با دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده می‌شوند. پس از آن، زاویه‌ی تماس نفت و شیشه‌ی نفت‌دوست در حضور فاز آبی اندازه‌گیری شده که حدود ۱۶۰-۱۵۰ درجه را نشان می‌دهد. شکل ۱- زاویه‌ی تماس را قبل و بعد از غوطه‌وری در نفت خام نشان می‌دهد. همچنین جهت تغییر ترشوندگی، مواد شیمیایی اتیلیندیامین تتراسلیک‌اسید (EDTA)، سدیم‌لوریل سولفات (SLS)، سدیم‌دودسیل سولفات (SDS)، پلی‌وینیل‌الکل (PVA) و پلی‌وینیل‌پرولیدن (PVP) استفاده شده‌اند. اتیلیندیامین تتراسلیک‌اسید با فرمول  $C_{10}H_{16}N_2O_8$  ماده‌ای شیمیایی است که برای اهداف صنعتی و دارویی استفاده می‌شود. این ماده‌ی جامد یک آمینو کربوکسیلیک اسید بی‌رنگ و محلول در آب است. باز مزدوج این اسید، اتیلن‌دی‌آمین تتراسات است. از این ماده به گستردگی جهت انحلال آهک استفاده می‌شود [۹]. سولفات لاریل سدیم با فرمول  $NaC_{12}H_{25}SO_4$  یا سدیم‌دودسیل سولفات با فرمول  $NaC_{12}H_{25}SO_4$  از پاک‌کننده‌های سنتزی با قدرت زیاد و به‌طور دقیق‌تر جزء سورفاکتانت‌هاست (مواد فعال‌سطحی یا مواد مؤثر). این ماده ترکیب شیمیایی امولسیون‌کننده، پُف‌دهنده، تسریع‌کننده‌ی انحلال و کف‌کنندگی است که از آن در صنایع شیندگی، دترژنت‌ها یا مواد غذایی استفاده می‌شود و مواد فعال‌کننده‌ی سطحی آنیونی در تولید شامپو است [۱۰ و ۱۱]. پلی‌وینیل‌الکل با فرمول شیمیایی  $(C_2H_4O)_n$  پلیمری مصنوعی، سفیدرنگ، فاقد بو و محلول در آبست که از آن در کاغذسازی، منسوجات و انواع پوشش‌ها استفاده می‌شود [۱۲]. پلی‌وینیل‌پرولیدن با فرمول شیمیایی  $(C_6H_9NO)_n$  که به نام‌های پوویدون یا پلی‌ویدون نیز شناخته می‌شود به‌صورت پودر و محلول آبی عرضه می‌گردد. شکل پودری آن سفید یا شیری‌رنگ است که می‌تواند رطوبت محیط را تا ۴۰ درصد وزن خود کند. به دلیل حضور حلقه‌ی آمیدی بسیار قطبی و امکان تشکیل پیوند هیدروژنی، این پلیمر در آب و بسیاری از حلال‌های قطبی دیگر حل می‌شود. پوویدون در PH‌های مختلف پایدار است و پایداری حرارتی خوبی نیز دارد. این پلیمر وینیلی زیست‌تخریب‌پذیر نیست و زیست‌سازگاری خوبی دارد [۱۳].

### ۲-۲- آماده‌سازی محلول‌های مواد شیمیایی

در آغاز جهت به‌دست آوردن غلظت بهینه‌ی مواد شیمیایی، از هر نمونه، غلظت‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد وزنی ساخته شدند. به دلیل حلالیت زیاد مواد شیمیایی در آب، آب مقطر به‌عنوان حلال تمامی مواد استفاده شده است. جهت تهیه‌ی غلظت‌های مذکور:

۰/۰۶، ۰/۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۸ گرم EDTA در ۲۰ میلی لیتر آب،

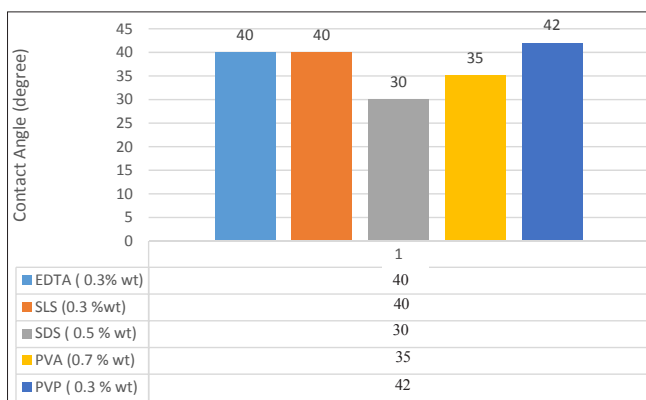
اندازه گیری زاویه تماس، اولین معیار برای ارزیابی میزان ترشوندگی است. همان طور که قبلاً نیز گفته شد ابتدا نمونه ها به مدت چهار روز در گرمکن قرار داده می شوند تا ترشوندگی آنها به نفت دوست تغییر یابد. تمامی فرآیندهای غوطه وری در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد انجام شده اند. سپس نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت درون محلول های تهیه شده از پنج ماده شیمیایی مذکور قرار داده می شوند تا فرآیند جذب مواد شیمیایی روی سطح نمونه ها انجام گردد. برای اندازه گیری زاویه تماس از روش قطره ای خوابیده<sup>۱۱</sup> نفت روی شیشه در حضور فاز آبی استفاده شده است. لازم به ذکر است که تمامی اندازه گیری ها در شرایط استاندارد انجام شده اند. پس از مشخص شدن غلظت بهینه برای هر ماده شیمیایی، جهت آماده سازی محلول های جدید با درجه ی شوری های متفاوت از غلظت بهینه استفاده خواهد شد تا بهترین محلول برای هر ماده شیمیایی مشخص گردد. در پایان نیز عملکرد مواد شیمیایی با یکدیگر مقایسه و ارزیابی خواهند شد.

### ۳- نتایج و بحث

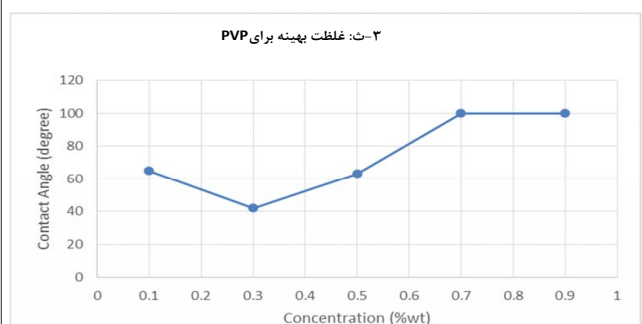
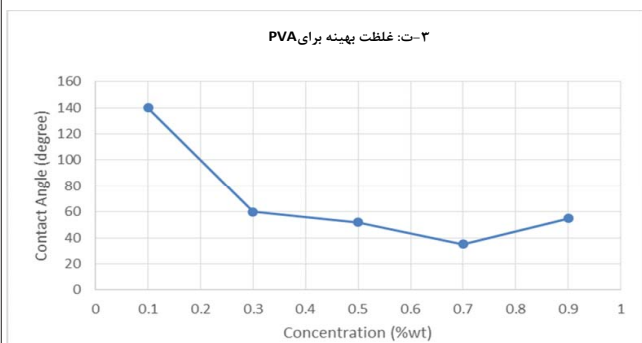
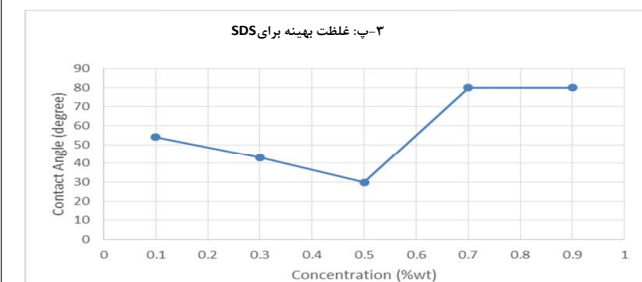
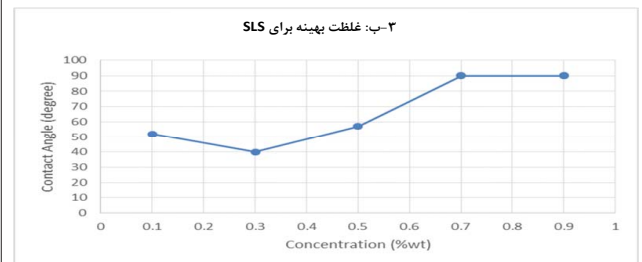
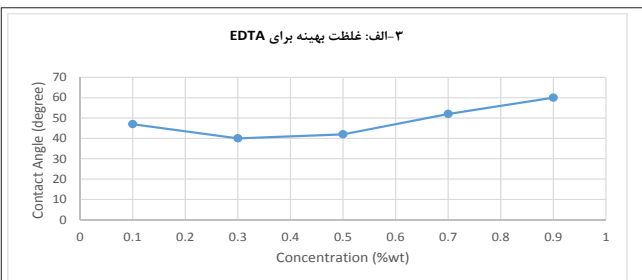
#### ۳-۱- اندازه گیری زاویه تماس برای هر غلظت بهینه

پس از غوطه وری نمونه ها در نفت برای تغییر ترشوندگی از آب دوست به نفت دوست، با اندازه گیری زاویه تماس نفت و شیشه های مختلف در حضور آب، زاویه ای حدود ۱۴۶ درجه اندازه گیری شد. همچنین پس از غوطه وری نمونه ها در محلول مواد شیمیایی مذکور، ترشوندگی تمامی نمونه ها از نفت دوست به آب دوست تغییر کرد. شکل ۲- اندازه گیری زاویه تماس قبل و بعد از پوشش دهی نمونه ها با مواد شیمیایی مورد نظر را به خوبی نشان می دهد.

همان گونه که قبلاً ذکر شد جهت مشخص کردن غلظت بهینه، غلظت های مختلفی بررسی و ارزیابی شدند که در شکل ۲- غلظت های بهینه ی مواد



شکل ۴ | مقایسه ی زاویه تماس ایجاد شده توسط هر ماده در غلظت بهینه ی مربوط به آن



شکل ۳ | به دست آوردن غلظت بهینه برای مواد مختلف الف) EDTA ب) SLS پ) SDS ت) PVA ث) PVP

شیمیایی مشخص شده‌اند. طبق شکل ۳- مشخص است که غلظت بهینه برای EDTA، ۰/۳ برای SLS، ۰/۳ برای SDS، ۰/۵ برای PVP، ۰/۷ و برای PVP نیز ۰/۳ درصد وزنی بوده است.

همچنین می‌توان غلظت‌های بهینه‌ی مواد مختلف را با هم مقایسه و بهترین ماده در تغییر ترشوندگی را هم از لحاظ غلظت کمینه و هم از نظر تغییر ترشوندگی تعیین کرد. در شکل ۴- زاویه‌ی تماس در غلظت بهینه‌ی هر ماده مختلف آورده شده است. مشاهده می‌شود که مواد EDTA، SLS، PVP در غلظت ۰/۳ درصد وزنی بهینه شده، ماده‌ی SDS در غلظت ۰/۵ درصد وزنی و در نهایت PVA در غلظت ۰/۷ درصد وزنی بهترین نتیجه را نشان داده‌اند. بدون در نظر گرفتن غلظت بهینه، SDS بهترین نتیجه را با تغییر زاویه‌ی تماس تا ۳۰ درجه و همچنین PVP با تغییر زاویه تا ۴۲ درجه بدترین نتیجه را در بین مواد مورد بررسی داشته‌اند.

### ۳-۲- تأثیر شوری

با مشخص شدن غلظت‌های بهینه برای هر ماده‌ی شیمیایی می‌توان از آنها در بررسی تأثیر شوری بر ترشوندگی استفاده کرد. جهت این بررسی، غلظت بهینه‌ی هر ماده را در شوری‌های مختلف ۸۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰، ۱۲۰۰۰۰، ۱۴۰۰۰۰ و ۱۶۰۰۰۰ ppm آزمایش کرده و زاویه‌ی تماس پس از غوطه‌وری بعد از ۴۸ ساعت اندازه‌گیری شد که نتیجه‌ی آن در شکل ۵- قابل مشاهده است.

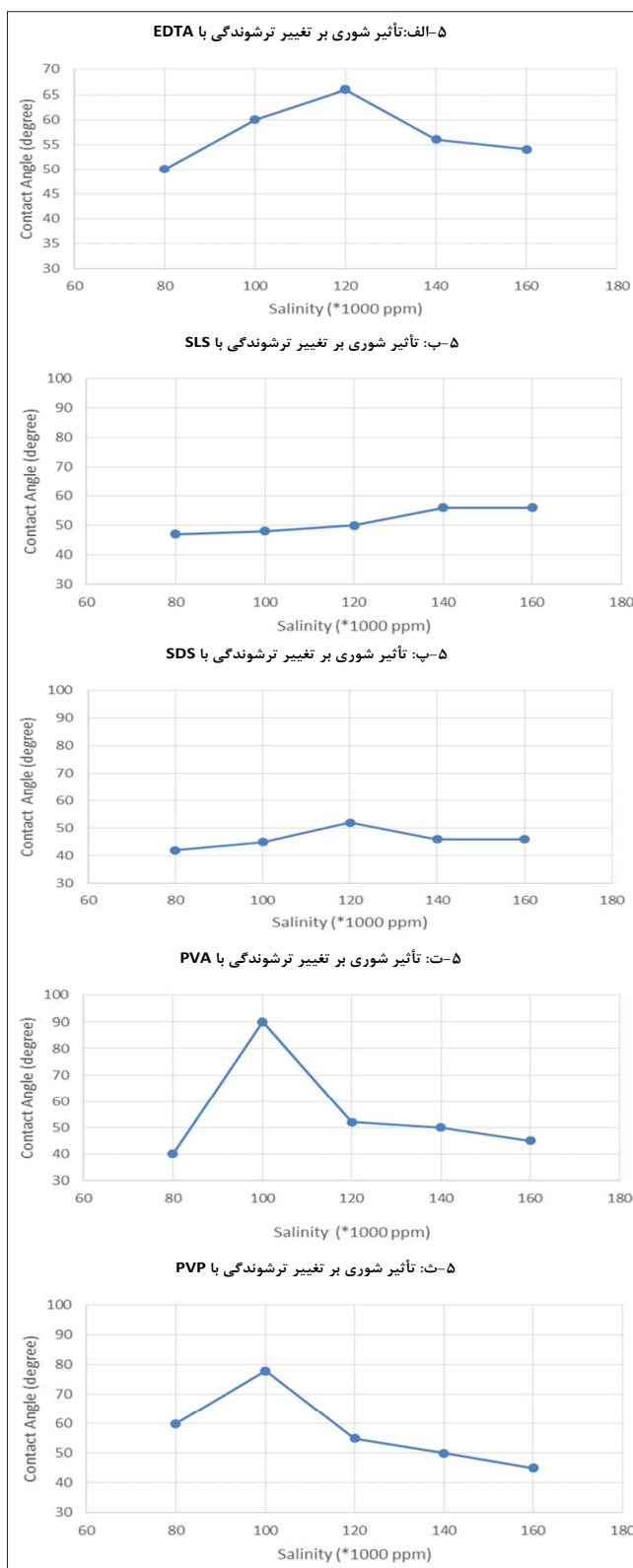
همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود به صورت کلی با افزایش شوری، زاویه‌ی تماس بیشتر شده و عملکرد مواد شیمیایی در تغییر ترشوندگی کمتر خواهد شد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش شوری تا مقداری مشخص برای PVA، EDTA و PVP، زاویه‌ی تماس افزایش یافته و پس از آن با افزایش شوری، زاویه‌ی تماس روندی کاهشی خواهد داشت. لازم به ذکر است که روند کاهشی دوم تا مقداری بیشتر از مقادیر زاویه‌ی تماس در شوری کم خواهد بود. همچنین در مواد SLS و SDS، با افزایش شوری نسبت به حالت آب مقطر، زاویه‌ی تماس افزایش می‌یابد، اما در شوری‌های نزدیک به شوری مخزن، طبق شکل ۵- با تغییرات شوری، زاویه‌ی تماس تغییرات چندانی نداشته است.

### نتیجه‌گیری

بررسی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد:

■ بهترین عملکرد در بین مواد شیمیایی مورد بررسی مربوط به SDS بوده است. ضمن اینکه غلظت بهینه برای SDS، ۰/۵ درصد وزنی بوده که مقداری قابل قبول است.

■ از دیدگاه اقتصادی، ماده‌ای عملکرد بهتری دارد که بتواند در



شکل ۵ | مقایسه‌ی تأثیر شوری بر تغییرات ترشوندگی (الف) EDTA با غلظت ۰/۳ درصد وزنی (ب) SLS با غلظت ۰/۳ درصد وزنی (پ) SDS با غلظت ۰/۵ درصد وزنی (ت) PVA با غلظت ۰/۷ درصد وزنی (ث) PVP با غلظت ۰/۳ درصد وزنی

خواهد بود. همچنین در مواد SLS و SDS با افزایش شوری نسبت به حالت آب مقطر، زاویه تماس افزایش می‌یابد اما در شوری‌های نزدیک به شوری مخزن، طبق شکل ۵- با تغییرات شوری، زاویه تماس تغییرات چندانی نداشته است.

#### پیشنهادها

- می‌توان علاوه بر شوری، تأثیر متغیرهای دیگری از جمله فشار، دما و PH محلول را در تغییر ترشوندگی با استفاده از مواد شیمیایی بررسی کرد.
- در خصوص آزمایش، تنها در حالت استاتیک بحث شد که فقط شامل اندازه‌گیری زاویه تماس بود. می‌توان جهت بررسی تأثیر تغییر ترشوندگی بر بازیافت نفت، آزمایش‌هایی مثل آشام خودبه‌خودی<sup>۱۱</sup>، سیلاب‌زنی مغزه<sup>۱۲</sup> یا سیلاب‌زنی در میکرومدل<sup>۱۳</sup> را انجام داد.
- می‌توان تأثیر مخلوط چندین ماده‌ی شیمیایی در تغییر ترشوندگی را به‌طور همزمان بررسی کرد.

غلظت‌های کم، نتایج بهتری داشته باشد. با توجه به بررسی‌ها، در اندازه‌گیری تغییر ترشوندگی با استفاده از غلظت‌های مختلف و مقایسه‌ی آنها می‌توان دریافت که EDTA و SLS با تغییر زاویه‌ی تماس تا ۴۰ درجه و با غلظت ۰/۳ درصد وزنی عملکرد قابل‌قبولی داشتند. ■ با توجه به شوری بسیار زیاد مخزن، باید به عملکرد مواد شیمیایی در شوری‌های زیاد توجه کرد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش شوری، عملکرد مواد شیمیایی در تغییر ترشوندگی کاهش یافته است. مثلاً PVA در شوری ۱۰۰۰۰ ppm تنها توانسته زاویه‌ی تماس را تا ۹۰ درجه کاهش دهد. با مقایسه‌ی عملکرد مواد در شوری‌های زیاد در می‌یابیم که معمولاً در غلظت‌های ۱۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ ppm بدترین نتایج را خواهیم داشت. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش شوری تا مقداری مشخص برای PVA، EDTA و PVP، زاویه‌ی تماس افزایش یافته و پس از آن با افزایش شوری، زاویه‌ی تماس روندی کاهشی خواهد داشت. ضمن اینکه روند کاهشی دوم تا مقداری بیشتر از مقادیر زاویه‌ی تماس در شوری کم

#### پانویس‌ها

1. Miladesmaili27@gmail.com
2. esmaeilzadeh95@gmail.com
3. Oil wet
4. Enhanced Oil Recovery
5. Wettability alteration
6. Sand-stone oil reservoirs
7. Contact Angle
8. Dip Coating
9. Salinity
10. Interfacial Tension (IFT)
11. Sessile Drop Method
12. Spontaneous Imbibition
13. Core Flooding
14. Micro Model

#### منابع

- [1] M. Alotaibi, R. Nasralla and H. Nasr-El-Din, "Wettability Studies Using Low-Salinity Water in Sanstone Reservoirs," in the Offshore Technology, Houston, 2011.
- [2] S. Basu and M. Sharma, "Investigating the Role of Crude-Oil Components on Wettability Alteration Using Atomic Force Microscopy," in SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, Texas, 1997.
- [3] P. O. Roehl and P. W. Choquette, Carbonate Petroleum Reservoirs, Springer, 1985.
- [4] P. Zhang, M. Tweheyo and T. Austad, "Wettability alteration and improved oil recovery by spontaneous imbibition of seawater into chalk: Impact of the potential determining ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and SO<sub>4</sub>," Colloids Surf., pp. 199,208-2007.
- [5] S. Strand, E. Hognesen and T. Austad, "Wettability alteration of carbonates-Effects of potential determining ions (Ca<sup>2+</sup> and SO<sub>4</sub>) and temperature," Colloids Surf., pp. 12006,10-.
- [6] D. Standnes and T. Austad, "Wettability alteration in chalk. 2. Mechanism for wettability alteration from oil-wet to water-wet using surfactants," J. Pet. Sci. Eng., pp. 1232000,143-.
- [7] V. A. Tabrizy, A. A. Hamouda and R. Denoyel, "Influence of magnesium and sulfate ions on wettability alteration of calcite, quartz, and kaolinite: Surface energy analysis.," Energy Fuels, pp. 16672011,1680-.
- [8] M. Zargartalebi, R. Kharrat and N. Barati, "Enhancement of surfactant flooding performance by the use of silica nanoparticles," Fuel (ELSEVIER), pp. 212015,27-.
- [9] Paolieri, Matteo (December 2017). "Ferdinand Münz: EDTA and 40 years of inventions". Bulletin for the History of Chemistry. ACS. 42 (2): 133-140.
- [10] Kurt Kosswig, "Surfactants" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, 2005, Weinheim.
- [11] P. Mukerjee, P. & Mysels, K. J. (1971), "Critical Micelle Concentration of Aqueous Surfactant Systems," NSRDS-NBS 36, Washington, DC: US. Government Printing Office.
- [12] Manfred L. Hallensleben "Polyvinyl Compounds, Others" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2000, Wiley-VCH, Weinheim.
- [13] Haaf, F.; Sanner, A.; Straub, F. (1985). "Polymers of N-Vinylpyrrolidone: Synthesis, Characterization and Uses". Polymer Journal. 17: 143.