

# بررسی اثر هم افزایی نانوسیالات هیبریدی پراکنده در آب هوشمند اصلاح شده با ماده فعال سطحی سبز بر پایداری، ویسکوزیته و کشش بین سطحی در تماس با نفت میدان جنوب غرب ایران

آذین خواجه کولکی<sup>۱</sup>، سید مجتبی حسینی نسب<sup>۲\*</sup>، فرامرز هرمزی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲. گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

[hosseininasab@iust.ac.ir](mailto:hosseininasab@iust.ac.ir)

## چکیده

روش‌های ترکیبی ازدیاد برداشت نفت شامل دو یا چند روش هستند که نسبت به روش‌های جداگانه و مستقل باعث می‌شوند تا نفت بیشتری جابه‌جا شود. در این مقاله از روش ترکیبی نانوذرات اکسیدفلزی اصلاح شده با ماده فعال سطحی دوست‌دار محیط زیست پراکنده شده در سیالات پایه با شوری متفاوت، استفاده شد. از نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا و نانوهیبرید آن‌ها با نسبت جرمی ۱۰:۹۰، ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰ بکار برده شد. وجود یون‌های کلسیم و منیزیم در آب نمک باعث ایجاد خواص دوخصلتی در نانوسیالات می‌شود که بشدت باعث ناپایداری نانومواد در مجاورت با آب نمک می‌گردد. از این رو به منظور پایداری بیشتر از صمغ عربی به عنوان یک ماده فعال سطحی سبز استفاده شد. پس از ارزیابی مدت زمان پایداری نانوسیالات هیبرید، آزمون بررسی کشش بین سطحی در دماهای  $25^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  و ویسکوزیته در دماهای  $35^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$  و  $55^{\circ}\text{C}$  انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد در نانوسیالات هیبریدی که از صمغ عربی استفاده نشد حدوداً تا دو ساعت پایداری خود را حفظ کردند. از طرفی دیگر نتایج نشان داد که افزایش دما می‌تواند منجر به کاهش کشش بین سطحی و ویسکوزیته برای نانوسیالات هیبریدها شود. کمترین کشش بین سطحی در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  برای نانوهیبرید با نسبت جرمی گاما-آلومینا و سیلیکا ۵۰:۵۰ در آب هوشمند با شوری ۴۱۷۱ ppm بدست آمد. کمترین ویسکوزیته در دمای  $55^{\circ}\text{C}$  برای نانوهیبرید با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ در آب مقطر گزارش شد. به حداقل رسیدن کشش بین سطحی و بهبود رفتار رئولوژی نانوسیالات بهینه به سمت یک سیستم آب‌دوست قوی می‌تواند یک راه‌حل امیدوارکننده در کاربردهای ازدیاد برداشت نفت در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی: روش‌های ترکیبی ازدیاد برداشت، نانوسیال، پایداری، کشش بین سطحی، ویسکوزیته، گرادیان دما

نانوسیال‌های مبتنی بر اکسید فلزی برای هدایت حرارتی و بهبود انتقال حرارت استفاده می‌شوند در حالی که نانوسیال‌های مبتنی بر سیلیکات دوستدار محیط زیست هستند، زیرا اجزای اصلی آن‌ها ماسه‌سنگ است [۱]. بسیاری از کاربردهای پیشنهادی نانوتکنولوژی در میادین نفتی را می‌توان در حوضه‌های تصویربرداری، ازدیاد برداشت نفت، حفاری و تکمیل، کنترل تحرک گاز و استفاده در مخازن شکافدار طبیعی تقسیم‌بندی کرد [۲]. در حوضه‌ی ازدیاد برداشت نفت تکنولوژی نانو قادر است ذخایر نفت بازیافت شده را به حداکثر برساند و عمر میادین نفتی را افزایش دهد [۱]. نانوذرات به دلیل کوچک بودن قطرشان، این توانایی را دارند تا از کوچکترین حفرات بدون اینکه به حفرات آسیب بزنند عبور کنند، به علاوه آنان سطح مخصوص بالایی دارند و بالا بودن سطح مخصوص سبب افزایش انرژی سطح می‌شود تا کارایی برهم کنش آن‌ها را هنگام پراکندگی در حلال‌ها افزایش دهد [۳، ۴]. تحقیقات بسیاری برای استفاده نانوذرات در بهبود بازیافت نفت بر این فرض صورت گرفته است که آنان قابلیت تغییر ترشوندگی به سمت آب‌دوستی، کاهش کشش بین سطحی آب-نفت و افزایش راندمان با بهبود ویسکوزیته را دارا هستند [۲، ۳، ۸-۵].

داردان و همکاران [۹] به بررسی رفتار رئولوژیکی روغن موتور (SAE40) حاوی مقادیر مختلف نانوهیبرید لوله‌ای کربنی چند جداره و آلومینا ( $Al_2O_3$ -MWCNT) در محدوده‌ی دمایی  $^{\circ}C$  (۲۵-۵۰) را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری‌های ویسکوزیته نشان داد که نانوسیال‌های هیبرید رفتار نیوتونی در تمام نسبت‌های حجمی را نشان می‌دهند، همچنین ویسکوزیته نانوسیال هیبرید با افزایش غلظت نانو افزودنی‌ها و کاهش دما، افزایش می‌یابد. در مطالعاتی دیگر [۱۰] از نانوذره آلفا-آلومینا با غلظت‌های ۱-۵ wt% برای بررسی تغییر ترشوندگی سنگ‌های کربناته و زاویه‌ی تماس استفاده شد. نتایج نشان داد که نانوذره آلفا-آلومینا با غلظت ۵ wt% قادر به کاهش زاویه‌ی تماس و تغییر ترشوندگی سنگ از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست می‌باشد. نخعی و همکاران [۱۱] از نانوذرات آلومینا، سیلیکا و منیزیم‌دی اکسید برای کنترل مهاجرت ذرات دانه ریز در طول سیلابزنی آب کم شور استفاده کردند. نتایج آنان نشان داد که نانو ذرات سیلیکا با غلظت ۱ wt% بهترین عملکرد را برای کنترل مهاجرت ریز دانه‌ها در طول سیلابزنی آب کم شور دارد. در تحقیقی دیگر از مواد فعال سطحی ستیل تری متیل آمونیوم برومید (CTAB) و سدیم دود سیل بنزن سولفونات (SDBS) به منظور ایجاد پایداری در نانوذرات آلومینا پراکنده شده در آب مقطر استفاده شد. در این مطالعه اثرات مواد فعال سطحی، غلظت آنان بر روی پتانسیل زتا و قطر هیدرولیکی در مقادیر مختلف PH به عنوان شاخصی از پایداری نانوسیالات مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت ۰/۰۶۴ wt% از SDBS بهترین شرایط پراکندگی را با توجه به مقادیر پتانسیل زتا ارائه می‌کند [۱۲]. بتانکور و همکاران [۱۳] به ارزیابی نحوه آماده‌سازی نانوسیالات بر اساس برهمکنش‌های بین مواد فعال سطحی، نانوذرات و آب نمک به منظور بررسی کشش بین سطحی برای نانو ذرات آلومینا، سیلیکا و نانو ذره آهن با روکش کربن پرداختند. نتایج آنان نشان داد که ترتیب افزودن نمک‌ها، مواد فعال سطحی و نانوذرات باعث کاهش کشش بین‌سطحی می‌شود و کمترین کشش بین سطحی برای نانوذره آلومینا گزارش شد. در تحقیقی دیگر از آب هوشمند و نانو سیال ترکیبی مبتنی بر سیلیکا با مواد فعال سطحی آنیونی و پلیمری برای بررسی بازیافت نهایی در مخازن با نفوذپذیری کم استفاده شد. نتایج نشان داد بازیافت نفت به دلیل حضور نانوسیالات هیبریدی به طور قابل توجهی بالاتر از آب کم شور و آب مقطر است [۱۴].

مکانیسم اصلی که مسئول اثر بخشی آب هوشمند در بهبود بازیافت نفت می‌باشد تغییر ترشوندگی سنگ به سمت آب‌دوستی است، که باعث جدا شدن لایه‌های نفتی از سطح سنگ می‌گردد. تزریق مواد فعال سطحی کشش بین سطحی نفت خام و آب نمک را کاهش می‌دهد و ترشوندگی سنگ را تغییر می‌دهد و نیروهای موینگی که نفت را در محیط متخلخل به دام انداخته‌اند، را کاهش می‌دهد. بنابراین ترکیب آب کم شور و ماده فعال سطحی می‌تواند یک رویکرد کارآمد با ترکیب اثر بی‌ثباتی لایه نفت توسط آب کم شور و کاهش کشش بین سطحی توسط ماده فعال سطحی باشد. این روش ترکیبی بازیافت نفت بیشتری را نسبت به هر دو روش مستقل فراهم می‌آورد [۱۵]. مطالعات زیادی ارزش بازیابی ثالثیه نفت را با تزریق ماده فعال سطحی و آب کم شور گزارش داده‌اند [۱۳، ۱۶-۲۰].

احمدی و همکاران [۱۹] از یک ماده فعال سطحی مشتق شده از گیاهی بنام *Zyzphus spina Christi* با مقادیر مختلف شوری برای بررسی تغییر ترشوندگی و کشش بین سطحی در مخازن نفتی کربناته استفاده کردند. آزمون سیلاب‌زنی برای مطالعه اثر ماده فعال سطحی / شوری برای فاکتور بازیابی و نفوذپذیری نسبی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت ماده فعال سطحی منجر به افزایش قابل توجهی در نفوذپذیری نسبی و در نتیجه بازیافت نفت می‌شود. در پژوهشی دیگر ترکیبی از آب کم شور و دو ماده فعال سطحی طبیعی و غیر یونی بنام Gemini و *Tribulus Terrestris* برای بهبود بازیافت نفت استفاده گردید. نتایج نشان داد که ماده فعال سطحی Gemini در شوری ۱۰۰۰ ppm قادر است مقادیر بیشتری از کشش بین سطحی را کاهش دهد و نتایج مطلوب‌تری را برای کشش بین سطحی و تغییر ترشوندگی ارائه کند [۱۷]. مرادی و همکاران [۱۸] از آب هوشمند و ماده فعال سطحی پایه گیاهی به منظور تولید نفت در مخازن کربناته استفاده کردند. نتایج نشان داد اثر غلظت یون‌های فعال بر تغییر ترشوندگی در مقایسه با اثر کاهش کشش بین سطحی ماده فعال سطحی بیشتر است، همچنین ترکیب آب هوشمند و ماده فعال سطحی باعث افزایش بازیافت نفت تا ۷۲٪ می‌شود.

بر اساس مطالعاتی که تا کنون انجام شده است بیشتر تحقیقات در زمینه‌ی ازدیاد برداشت بر روی یک تا دو روش ازدیاد برداشتی تمرکز دارد اما در این پژوهش برآیندی از سه روش نانو ذرات، آب هوشمند و ماده فعال سطحی مورد مطالعه قرار گرفت. در انتخاب ماده فعال سطحی تلاش شد تا مهم‌ترین اولویت دوستدار محیط زیست بودن آن تلقی گردد. پس از آماده‌سازی نانوسیالات آزمون پایداری بصری صورت پذیرفت. ارزیابی پایداری نانوسیالات بخاطر جلوگیری از تشکیل رسوب کلوخه‌ای صورت گرفت، زیرا رسوب کلوخه‌ای باعث گرفتگی حفرات و آسیب‌سازندی می‌گردد. از این رو نانوسیالاتی که مدت زمان کمتری پایدار گزارش شدند، در آزمون‌های کشش بین‌سطحی و ویسکوزیته شرکت داده نشدند. در آزمون‌های کشش بین‌سطحی و ویسکوزیته علاوه بر اثر افزایش دما به ارزیابی اثر شوری سیال پایه، نسبت جرمی نانوذره گاما-آلومینا به سیلیکا و اثر ماده فعال سطحی بر روی نانوسیالات با بیشترین پایداری پرداخته شد. میزان اثرگذاری شوری، نسبت جرمی متفاوت نانوذرات و غلظت‌های متفاوت صمغ عربی بر ویسکوزیته و کشش بین سطحی نانو سیالات مورد تجزیه و تحلیل واقع شد و نتایج بدست آمده در این مقاله بخوبی بیان شده است.

**مواد و روش‌ها**

**مواد**

صمغ عربی یک ماکرو مولکول بیولوژیکی است که از گیاهی بنام اقاقایای سنگالی بدست می‌آید که به عنوان تثبیت کننده سبز برای ایجاد پراکندگی نانو ذرات در فاز آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱, ۲۲]. بخاطر زیست تخریب پذیر بودن طبیعی صمغ عربی بصورت گسترده در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیقات نشان داده‌اند که صمغ عربی یک تثبیت کننده خوب برای امولسیون‌های نفت در آب است و پایداری خوبی را در محیط اسیدی-بازی، قدرت یونی بالا و دمای بالا نشان می‌دهد. این ماده فعال سطحی به دلیل تفکیک گروه‌های کربوکسیل در زنجیره مولکولی خود دارای بار منفی است [۲۳]. در این پژوهش صمغ عربی از شرکت مرک آلمان مورد استفاده قرار گرفت.

از نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا که از شرکت یو اس ریسرچ متریالز<sup>۱</sup> خریداری شده بود، استفاده گردید. ویژگی این نانوذرات در جدول ۱ نشان داده شده است. نانوذرات سیلیکا و آلومینا در کلاس بندی نانو مواد در گروه اکسیدهای فلزی قرار دارند. نانوذرات اکسید فلزی پایداری و تحمل حرارتی بالایی را در حضور یون‌های تک ظرفیتی و دو ظرفیتی آب نمک نشان می‌دهند [۲۴, ۲۵]. از نظر شیمیایی مولکول‌هایی که اختلاف الکترونگاتیوی بالایی دارند آب دوست هستند که اکسیدهای فلزی معمولا مولکول‌هایی بسیار آب دوست هستند و این ویژگی سبب شده است که در صنعت نفت بویژه فعالیت‌های ازدیاد و برداشتی قابلیت کارآیی بالایی داشته باشند [۲۶].

جدول ۱. ویژگی نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا مورد استفاده قرار گرفته

نام نانوذره	اندازه ذره (nm)	درصد خلوص %	چگالی ( $\frac{gr}{m^3}$ )
سیلیکا	۱۵-۲۰	۹۹/۵	<۰/۱۰
گاما - آلومینا	۲۰	۹۹	۱/۲۳

فاز نفتی بکار رفته، از میدان نفتی واقع در جنوب غربی ایران تهیه شده است که جرم مولکولی برابر با  $(\frac{gr}{mol})$  ۲۵۴ و وزن مخصوص نفت در دمای  $60^{\circ}F$  برابر با ۰/۸۶۸۳ گزارش شد، اجزای تشکیل دهنده فاز نفتی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. از نمک‌های سدیم کلرید، منیزیم کلرید شش آبه، کلسیم کلرید دو آبه، سدیم سولفات، سدیم بی کربنات که از شرکت مرک آلمان خریداری شده بودند، استفاده شد. ترکیب نمک‌های مورد استفاده قرار گرفته در جدول ۳ نشان داده شده است. علاوه بر آب مقطر از آب‌هایی که شوری مشابه و رقیق تر شده نسبت به آب دریا داشتند به عنوان سیالات پایه استفاده شد (آب دریا مصنوعی با شوری ۴۰۷۱۰ ppm، آب دو بار رقیق شده با شوری ۲۰۴۰۰ ppm، آب پنج بار رقیق شده با شوری ۸۱۴۲ ppm و آب ده بار رقیق شده با شوری ۴۰۷۱ ppm).

جدول ۲. اجزای تشکیل دهنده‌ی فاز نفتی واقع در میدان جنوب غربی ایران

اجزا	مول %
CO <sub>2</sub>	۱/۰۰۵
H <sub>2</sub> S	۰/۴۰۶
C <sub>1</sub>	۳۶/۲۹
C <sub>2</sub>	۶/۵۲۳
C <sub>3</sub>	۵/۲۵۵
iC <sub>4</sub>	۱/۰۷
nC <sub>4</sub>	۳/۱۲
iC <sub>5</sub>	۱/۴۰۱
nC <sub>5</sub>	۱/۸۰۵
C <sub>6</sub>	۲/۸۹۶
C <sub>7</sub> <sup>+</sup>	۴۰/۲۱

جدول ۳. غلظت نمک‌های مورد استفاده قرار گرفته بر حسب (ppm)

نمک‌ها / آب‌های هوشمند	آب دریا	آب دریا دو بار رقیق شده	آب دریا پنج بار رقیق شده	آب دریا ده بار رقیق شده
سدیم کلرید	۲۸۴۰۰	۱۴۲۰۰	۵۶۸۰	۲۸۴۰
منیزیم کلرید شش‌آبه	۶۳۴۰	۳۲۱۵	۱۲۶۸	۶۳۴
کلسیم کلرید دوآبه	۱۳۸۰	۶۹۰	۲۷۶	۱۳۸
سدیم سولفات	۴۴۹۰	۲۲۴۵	۸۹۸	۴۴۹
سدیم بی‌کربنات	۱۰۰	۵۰	۲۰	۱۰
کل نمک حل شده	۴۰۷۱۰	۲۰۴۰۰	۸۱۴۲	۴۰۷۱

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات از رئومتر بروکفیلد مدل DV3T استفاده شد. تغییرات ویسکوزیته بر حسب دما در چهار دمای °C (۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵) صورت پذیرفته است. دما به وسیله یک سنسور بصورت پیوسته و مداوم اندازه‌گیری و کنترل شد. از Spindle ULA که برای اندازه‌گیری ویسکوزیته پایین مناسب است، استفاده شد. پس از انتخاب نانوسیالات بهینه (طولانی‌ترین مدت زمان پایداری) ۱۶ml از محلول ۰/۱ wt% نانوسیالات به منظور بررسی ویسکوزیته با نرخ برشی ثابت و برابر با  $(1/s)$  ۷۳ مورد ارزیابی قرار گرفت. قبل از اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات از آب مقطر برای کالیبره کردن دستگاه و کاهش خطای اندازه‌گیری استفاده شد. خطای دقت اندازه‌گیری دستگاه در حدود  $\pm 1\%$  پیش‌بینی شد.

اندازه‌گیری کشش بین سطحی برای نفت خام و نانوسیالاتی که پراکنده شده در فاز آبی با استفاده از روش قطره آویزان و در دماهای °C (۶۰ و ۲۵) انجام شد. این سیستم مجهز به یک دوربین CCD و یک لنز ماکرو کامپیوتری بود. قطرات تشکیل شده توسط نرم‌افزار حرفه‌ای آنالیز شکل قطره (Apex DSA) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در شکل ۱ دستگاه اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی نشان داده شده است. پس از هر آزمایش محفظه اندازه‌گیری کشش بین سطحی نفت خام و نانوسیالات با آب و تولوئن شست و شو داده شد.



شکل ۱. دستگاه اندازه‌گیری کشش بین سطحی نفت و نانوسیالات با روش قطره آویزان

طراحی، تخمین تعداد آزمایش‌ها و انتخاب مشخصه کیفی برای تحلیل نتایج آزمون پایداری با استفاده از نرم‌افزار

### Minitab و روش Taguchi

در گام اول طراحی آزمایش صورت پذیرفت. طراحی آزمایش‌ها بر مبنای ۵ سطح و سه فاکتور صورت گرفت. از نرم‌افزار Minitab و روش Taguchi استفاده شد. روش Taguchi با استفاده از طراحی آزمایش‌ها<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین ابزارهای آماری<sup>۲</sup> برای طراحی سیستم‌های با کیفیت بالا و هزینه کم است. روش Taguchi روشی کارآمد و سیستماتیک برای بهینه‌سازی طرح، عملکرد، کیفیت و هزینه می‌باشد [۲۷]. فاکتورها به ترتیب غلظت شوری، نسبت جرمی سیلیکا به گاما-آلومینا و غلظت صمغ عربی در نظر گرفته شدند. سطوح برای فاکتور شوری و صمغ عربی از کمترین مقدار تا بیشترین مقدار بصورت کمی در نرم‌افزار

1-Design of Experiments (DOE)  
2-Total Quality Management (TQM)

تعریف شد (شوری سیال پایه از مقدار عددی یک تا ۴۰۷۱۰ ppm و غلظت صمغ عربی از مقدار عددی صفر تا ۱۰۰۰ ppm در نظر گرفته شد. از طرفی دیگر سطوح اول تا پنجم برای نسبت جرمی سیلیکا به گاما-آلومینا ( سطح اول سیلیکا، سطوح دوم تا چهارم نانوهیبرید گاما-آلومینا به سیلیکا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ و ۷۰:۳۰، ۹۰:۱۰ و سطح پنجم گاما-آلومینا ) بصورت کیفی در نظر گرفته شد. در جدول ۴ فاکتورها و سطح‌های وارد شده به نرم‌افزار Minitab برای طراحی آزمایش‌ها نشان داده شده است.

جدول ۴. فاکتورها و تعداد سطح‌های داده شده به نرم‌افزار Minitab برای طراحی آزمایش

فاکتور	واحد	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	سطح چهارم	سطح پنجم
غلظت شوری	ppm	۱	۴۰۷۱	۸۱۴۲	۲۰۴۰۰	۴۰۷۱۰
نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا	wt %	سیلیکا	AS <sub>10:90</sub>	AS <sub>30:70</sub>	AS <sub>50:50</sub>	گاما-آلومینا
غلظت صمغ عربی	ppm	۰	۲۵۰	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰

پس از تعیین فاکتورها و سطح‌هایشان آرایش متعامد<sup>۱</sup> L-25 برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد و تعداد آزمایش‌ها ۲۵ آزمایش تخمین زده شد. مدت زمانی که نانوسیالات پایداری قابل قبولی داشتند به عنوان پاسخ<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد. بخاطر تفاوت‌هایی که در مدت زمان پایداری نانوسیالات مشاهده شد (از چند ماه تا چند دقیقه)، تمامی داده وارد شده به عنوان پاسخ به نرم افزار Minitab براساس دقیقه گزارش شد. براساس این که بیشترین مدت زمان پایداری مدنظر بود لذا شاخص کیفیت هرچه بیشتر-بهبتر در نظر گرفته شد. تحلیل نتایج با کمک نمودار سیگنال به نویز صورت پذیرفت که در این صورت نرخ سیگنال به نویز از روی میانگین مربعات از انحراف معیار محاسبه شد که در آن  $Y_i$  نتایج حاصل از  $N$  تعداد تکرار آزمایش‌ها می‌باشد [۲۸، ۲۹]. در این پژوهش آزمایش‌های مربوط به پایداری ۲ مرتبه تکرار شدند و مقدار میانگین آن‌ها به عنوان پاسخ کلی به نرم‌افزار Minitab وارد شد.

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -10 \log(MSD) \quad (1)$$

$$MSD = \left( \frac{\frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \frac{1}{Y_3^2} + \dots + \frac{1}{Y_N^2}}{N} \right) \quad (2)$$

### آماده سازی نانوسیالات

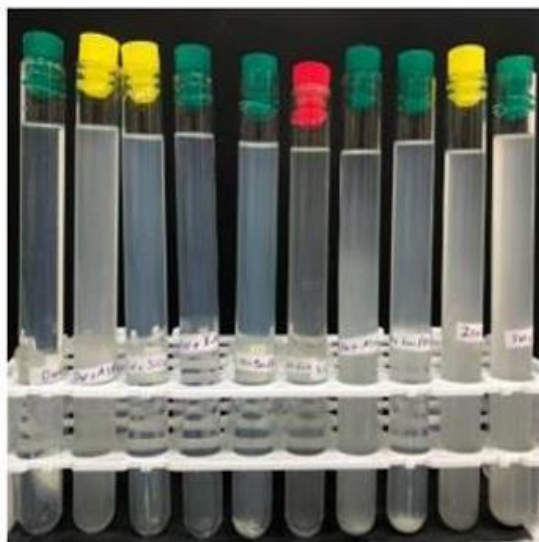
در این پژوهش ابتدا نمک‌ها به آب مقطر افزوده شدند و به مدت ۳۰ min در دمای ۵۵°C بر روی همزن مغناطیسی همگن شدند. سپس بصورت همزمان نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا با غلظت ۰/۱ wt% همراه با صمغ عربی به محلول آب نمک

افزوده شدند. در نهایت نانوسیالات به مدت ۱۵min بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفتند سپس به مدت ۱h با دستگاه هموژنایزر التراسونیک در توان ۷۰ w همگن شدند (همگن سازی نانوسیالات با دستگاه هموژنایزر التراسونیک بصورت دوبازه‌ی زمانی ۳۰min صورت گرفت که در این فاصله وقفه‌ی زمانی ۱۵min صورت پذیرفت).

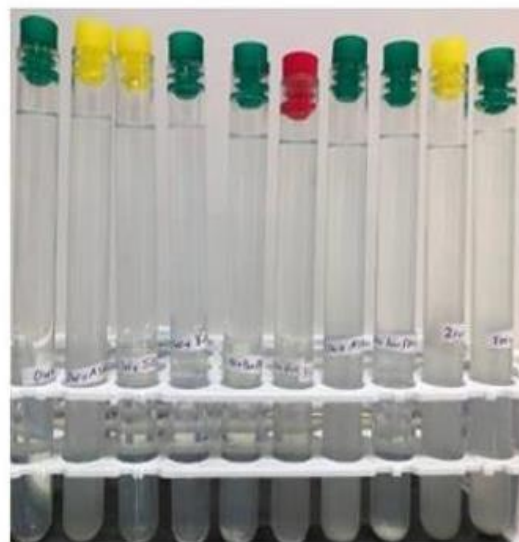
### بررسی پایداری نانوسیالات

پایداری یک عامل مهم است که بر عملکرد نانوسیالات تأثیرگذار است. عدم پایداری خوب می‌تواند خواص ترموفیزیکی نانوسیالات هیبرید را تغییر دهد و تأثیر ویژه‌ای بر کارآمدی آن داشته باشد. روش‌های مختلفی برای بررسی تجزیه و تحلیل پایداری ایجاد شده است که از جمله آن می‌توان به روش سانتریفیوژ، روش رسوبگذاری، آنالیز پتانسیل زتا، روش آنالیز طیفی، میکروسکوپ الکترونی و... اشاره کرد [۳۰]. نانوسیالات پس از آماده‌سازی در لوله‌های آزمایشگاهی و در جایی دور از نور و گرمای خورشیدی قرار گرفتند. تمامی نمونه‌های آماده شده برای آزمون پایداری در شرایط فشار و دمای محیط صورت پذیرفت و مشابه کار برخی از محققان آزمون پایداری بصورت بصری انجام شد [۳۱-۳۴].

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است هنگامی‌که رسوب نانوذرات در انتهای لوله‌ی آزمایشگاهی قرار گرفت به معنای ناپایداری نانو سیال‌ها تلاقی گردید. نانوذرات بدلیل فعالیت‌های سطحی بیش از حد تمایل به تجمع دارند، تجمع نانوذرات باعث ایجاد رسوب و در نتیجه کاهش پایداری می‌شود [۳۵]. محققین بسیاری برای حذف تجمع نانوذرات و تولید یک مخلوط پایدار تغییرات PH، بکاربردن مواد فعال سطحی و استفاده از دستگاه هموژنایزر اولتراسونیک را توصیه کرده‌اند [۳۰، ۳۲، ۳۵-۳۷]. همه‌ی این تکنیک‌ها باعث اصلاح ویژگی نانوذرات و شکستن ساختار خوشه‌ای<sup>۱</sup> نانوذرات برای ایجاد یک سوسپانسیون



(ب)



(ا)



پایدار می‌شوند [۳۵]. در این پژوهش از ماده فعال سطحی و دستگاه هموژنایزر اولتراسونیک برای ایجاد نانومحلول‌های پایدار استفاده شد.

شکل ۲. بررسی رسوب نانوذرات در انتهای لوله‌ی آزمایشگاهی. (آ). بررسی پایداری نانوسیالات پس از دو ساعت. (ب). بررسی پایداری نانوسیالات پس از دو روز.

### غربال‌گری نانوسیالات برای آزمون ویسکوزیته و کشش بین سطحی

از میان نانوسیالات تهیه شده نانوسیالاتی که مدت زمان طولانی‌تر پایدار بودند به عنوان نانوسیالات بهینه انتخاب شده و آزمون ویسکوزیته و کشش بین سطحی بر روی آن‌ها صورت گرفت. ساخت یک نانوسیال پایدار برای بهینه‌سازی ویژگی آن الزامی است. آماده‌سازی نانوسیال از طریق یک مسیر پایدار، به دلیل نیروهای قدرتمند واندروالسی در میان نانوذرات و تمایل آن‌ها به ساخت خوشه یک کار فنی است. بدیهی است که کمبود تعادل باعث ایجاد تشدید در تشکیل خوشه‌ها و سرعت رسوب می‌گردد [۳۵]. از طرفی دیگر در مقیاس عملیاتی تشکیل رسوب در اطراف چاه تزریقی باعث آسیب سازندی، گرفتگی گلوگاه‌ها، کاهش تراوایی محیط متخلخل و در نهایت مقدار بهره‌دهی نفت را به شدت کاهش می‌دهد [۳۸]. مهم‌ترین دلیل بهینه‌سازی نانوسیال‌ها براساس مدت زمان پایداری بخاطر جلوگیری از تشکیل رسوب است.

### بحث و نتایج

#### پایداری نانوسیالات

پس از تخمین تعداد آزمایش‌ها و آماده‌سازی نانوسیالات مدت زمان پایداری آن‌ها بصورت بصری در جای دور از نور خورشید و گرما مورد مطالعه قرار گرفت. از میان ۲۵ نانوسیال آماده شده ۱۵ نانوسیال پایداری مناسبی داشتند که در جدول ۵ با علامت (\*) مشخص شده‌اند و ۱۰ نانوسیال بشدت مدت زمان پایدار کوتاهی داشتند. نتایج بدست آمده از آزمون پایداری بصری به وضوح نشان داد که با افزایش شوری سیال پایه و تشدید شدن حضور یون‌های دو ظرفیتی در آب نمک بشدت از پایداری نانوسیالات کاسته می‌شود.

بر طبق مطالعات متین و همکاران [۳۹] سه مرحله مجزا از تجمع نانوذرات در حضور نمک رخ می‌دهد پراکندگی شفاف، کدورت و تشکیل دو فاز جداگانه این در صورتی است که تجمع نانوذرات ممکن است بصورت بصری در مراحل اولیه مشاهده نشود. در این پژوهش هنگامی که تجمع نانوذرات در انتهای لوله‌ی آزمایشگاهی قرار گرفت و جدایش دو فازی قابل رویت گردید بازه‌ی زمانی ناپایداری نانوسیالات در نظر گرفته شد. بر اساس تئوری<sup>۱</sup> DELVO وقتی ذرات کلونیدی در آب معلق می‌شوند براساس پروفایل‌های انرژی تعامل خواهند داشت هنگامی که پروفایل‌های انرژی بشدت دافعه باشند ذرات یکدیگر را دفع می‌کنند و یک تعلیق پایدار تشکیل می‌شود و هنگامی که پروفایل‌های انرژی جاذب باشند ذرات به یکدیگر نزدیک می‌شوند و به یکدیگر

1- Derjaguin, Landua, Verwey and Overbeek (DELVO) theory

می‌چسبند و همانطور که تجمع ادامه می‌یابد ذرات لخته‌های بزرگتر را تشکیل می‌دهند و با بزرگتر شدن لخته‌ها رسوب ایجاد می‌گردد و سوسپانسیون شفاف می‌شود که در این شرایط تعلیق ناپایدار گشته است [۴۰].

جدول ۵. داده‌های بدست آمده برای مدت زمان پایداری با آزمون بصری

شماره آزمایش	غلظت شوری (ppm)	نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا	غلظت صمغ عربی (ppm)	مدت زمان پایداری بر حسب دقیقه	نانوسیالات با مدت زمان پایداری قابل قبول
۱	۱	سیلیکا	۰	۸۹۲۸۰	*
۲	۱	۱۰:۹۰	۲۵۰	۳۰۲۵	*
۳	۱	۳۰:۷۰	۵۰۰	۱۵۴۰	*
۴	۱	۵۰:۵۰	۷۵۰	۱۳۰۵	*
۵	۱	گاما-آلومینا	۱۰۰۰	۱۰۰۲	*
۶	۴۰۷۱	سیلیکا	۲۵۰	۴۰۵۷۴	*
۷	۴۰۷۱	۱۰:۹۰	۵۰۰	۲۱۳۰	*
۸	۴۰۷۱	۳۰:۷۰	۷۵۰	۳۷۷	*
۹	۴۰۷۱	۵۰:۵۰	۱۰۰۰	۲۹۰	*
۱۰	۴۰۷۱	گاما-آلومینا	۰	۱۰	*
۱۱	۸۱۴۲	سیلیکا	۵۰۰	۲۱۲۶۷	*
۱۲	۸۱۴۲	۱۰:۹۰	۷۵۰	۱۲۳۵	*
۱۳	۸۱۴۲	۳۰:۷۰	۱۰۰۰	۲۷۰	*
۱۴	۸۱۴۲	۵۰:۵۰	۰	۲	*
۱۵	۸۱۴۲	گاما-آلومینا	۲۵۰	۱۴۱	*
۱۶	۲۰۴۰۰	سیلیکا	۷۵۰	۴۱۲۵	*
۱۷	۲۰۴۰۰	۱۰:۹۰	۱۰۰۰	۴۸۵	*
۱۸	۲۰۴۰۰	۳۰:۷۰	۰	۱۷	*
۱۹	۲۰۴۰۰	۵۰:۵۰	۲۵۰	۶۰	*
۲۰	۲۰۴۰۰	گاما-آلومینا	۵۰۰	۵۵	*
۲۱	۴۰۷۱۰	سیلیکا	۱۰۰۰	۳۹۲۳	*

۲۲	۴۰۷۱۰	۱۰:۹۰	۰	۱۴۰
۲۳	۴۰۷۱۰	۳۰:۷۰	۲۵۰	۱۱۷
۲۴	۴۰۷۱۰	۵۰:۵۰	۵۰۰	۲۵
۲۵	۴۰۷۱۰	گاما-آلومینا	۷۵۰	۶۳

نتایج نشان داد تمامی نانوسیالات که در آب مقطر پراکنده شده، پایداری قابل قبولی دارند. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که نانوذره گاما-آلومینا اصلاح شده با صمغ عربی تغییرات کمی در میانگین شعاع هیدرولیکی دارد این در حالی است که شعاع هیدرودینامیکی نانوذرات گاما-آلومینا اصلاح نشده با صمغ عربی با افزایش زمان بیشتر شده است که این موضوع نشان‌دهنده توانایی صمغ عربی در بهبود پایداری نانوذرات گاما-آلومینا است [۴۱]. افزودن مواد فعال سطحی، تکنیک‌های اصلاح سطح، ساز و کارهای مانند دافعه فضایی و دفع الکترواستاتیک از جمله روش‌هایی برای پایداری نانوسیالات هستند اما افزودن مواد فعال سطحی که در این تحقیق نیز از این روش استفاده شد یک روش آسان و اقتصادی برای پایداری نانوسیالات است [۳۷].

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است نانوهیبریدهای گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت‌های جرمی (۱۰:۹۰)، (۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰) پراکنده در آب مقطر مدت زمانی پایداری طولانی‌تری نسبت به آب‌های شور دارند. دلیل این امر می‌تواند بخاطر حضور کاتیون‌های مثل سدیم، کلسیم و منیزیم موجود در آب نمک باشد. این کاتیون‌ها باعث کاهش بارهای سطحی نانوذرات می‌شوند و نیروی جاذبه واندروالسی بین ذرات نانوسیال افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث ناپایداری محلول می‌گردد. در جدول ۵ نشان داده شده است با افزایش شوری سیال پایه از آب مقطر به آب ده برابر رقیق شده (۴۰۷۱ ppm) نانوذره گاما آلومینا تحت تأثیر حضور یون‌های موجود در آب نمک قرار می‌گیرد و ناپایدار می‌گردد. همچنین نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شوری سیال پایه نانو هیبرید با نسبت‌های جرمی گاما-آلومینا بیشتر نسبت به سیلیکا سریعتر پایداری خود را از دست می‌دهند. تحقیقات نشان داده است که نانوذره آلومینا تمایل بالایی به تجمع دارد که این امر به علت نسبت زیاد سطح به حجم باشد. در آب با شوری ۵ برابر رقیق شده (۸۱۴۲ ppm) علاوه بر نانو ذره گاما-آلومینا نانو هیبرید گاما-آلومینا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ به دلیل افزوده نشدن صمغ عربی و بالا بودن نسبت نانو ذره گاما-آلومینا تنها دو دقیقه پس از آماده‌سازی پایدار گزارش شد. با افزودن شوری سیال به آب ۲ برابر رقیق شده (۲۰۴۰۰ ppm) علاوه بر نانو ذره گاما-آلومینا نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰) بشدت از مدت زمان پایداریشان کاسته می‌شود بطوری‌که هر یک از این نانو سیال‌ها کمتر از یک ساعت پایدار هستند. همچنین با افزایش شوری سیال پایه به ۴۰۷۱۰ ppm تنها نانوذره سیلیکا پایدار می‌باشد، نانوذره گاما-آلومینا و نانوهیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰، ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰) بشدت ناپایدار هستند.

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، در سطرهای (۱-۱۰-۱۴-۱۸-۲۲) برای تهیه نانوسیالات از ماده فعال سطحی استفاده نشده است و به جز در سطر یک که فقط نانوذره سیلیکا است و پایداری قابل قبولی دارد سایر نانوسیالاتی که بدون صمغ عربی تهیه شدند مدت زمان پایداریشان بشدت کم است. مواد فعال سطحی این قابلیت را دارا هستند که بر ویژگی‌های سطح یک سیستم در مقادیر کم تاثیر بسزایی بگذارند. مواد فعال سطحی دارای یک قسمت آب‌گریز و یک سر قطبی

آب دوست هستند که برای افزایش تماس دو ماده کارآیی دارند [۳۷]. نانوذرات سیلیکا دارای بار منفی هستند و اکسیژن‌های موجود در آب باعث می‌شوند تا نیروی دافعه الکترواستاتیک بر نیروی جاذبه غلبه کرد و به همین دلیل است که نانوذره سیلیکا پایداری خوبی در آب مقطر دارد [۴۲]. نانوذره سیلیکا پراکنده در آب مقطر بدون ماده فعال سطحی صمغ عربی تا ۶۳ روز پایدار است.

در جدول ۶ مقادیر سطوح برای پارامترهای (شوری سیال پایه، نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا و غلظت صمغ عربی) توسط نرم‌افزار Minitab و روش Taguchi پس از وارد کردن داده‌های مربوط به آزمون پایداری بدست آمد. از آنجایی که شاخص کیفی هرچه بیشتر – بهتر انتخاب شد لذا بیشترین مقدار سطح بدست آمده مطلوبترین حالت برای داده‌ها تلقی می‌شود. در فاکتور بررسی شوری سیال پایه سطح اول که آب مقطر است بیشترین مقدار را دارد و داده‌ها نشان می‌دهند که با افزایش شوری سیال پایه مدت زمان پایداری کاهش می‌یابد. در فاکتور نسبت جرمی گاما – آلومینا به سیلیکا مشاهده شد بیشترین مقدار را نانوسیلیکا سپس نانو هیبریدها با نسبت‌های کمتر گاما-آلومینا و در نهایت نانوذره گاما-آلومینا دارد. مناسب‌ترین سطح برای غلظت صمغ عربی سطح دوم که برابر با ۲۵۰ ppm بدست آمد. همچنین داده‌ها نشان دادند که از میان فاکتورها نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا سپس شوری سیال پایه و در نهایت غلظت صمغ عربی بیشترین تأثیرگذاری را بر روی افزایش مدت زمان پایداری نانوسیالات دارند.

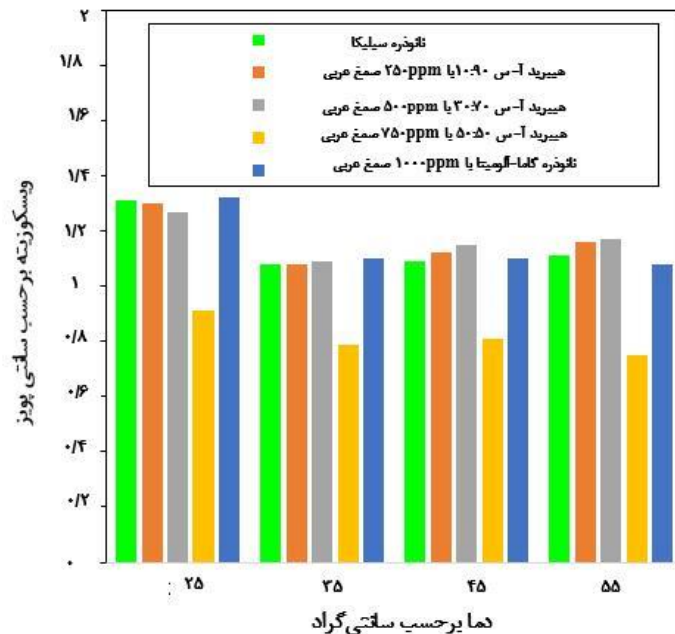
جدول ۶. تأثیرگذاری فاکتورها و مقادیر سطوح بدست آمده برای هر فاکتور با استفاده از داده‌های آزمون پایداری به نرم‌افزار Minitab

سطح	شوری (ppm)	کسر جرمی نانو هیبریدی آلومینا-سیلیکا	غلظت صمغ عربی (ppm)
۱	۸۱/۷۸	۸۴/۳۸	۳۸/۵۱
۲	۵۵/۹۰	۶۴/۲۵	۶۱/۶۵
۳	۴۲/۲۰	۵۱/۵۰	۶۱/۴۵
۴	۴۴/۰۲	۳۶/۲۲	۵۶/۷۹
۵	۳۷/۷۶	۳۸/۷۶	۵۶/۷۰
تأثیرگذاری	۲	۱	۳

### ویسکوزیته نانوسیالات

نتایج رئولوژیکی برگرفته از دستگاه رئومتر در اشکال ۳ آمده است. نانوذرات با چهار ساز و کار اصلی در فرآیندهای ازدیاد و برداشت دخیل می‌شوند که شامل فشار از هم گسیختگی، تغییر ترشوندگی، کاهش کشش بین سطحی و کنترل ویسکوزیته می‌باشد [۳۴، ۴۳-۴۵]. ویسکوزیته نانو سیالات بهینه در آب مقطر و آب شور در دماهای  $^{\circ}\text{C}$  (۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵) مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است نانوسیالات در آب مقطر ویسکوزیته کمتری نسبت به نانو سیالات در آب شور دارند. نتایج هرمزی و همکاران [۴۶] نشان داد که نانو ذره آلومینا و سیلیکا دارای ویسکوزیته نسبتاً یکسانی در

بازه‌ی دمایی  $^{\circ}\text{C}$  (۱۰-۵۵) هستند اما شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد که نانوذره گاما-آلومینا دارای ویسکوزیته بالاتری نسبت به نانوذره سیلیکا است اما با افزایش دما ویسکوزیته گاما-آلومینا نسبت به سیلیکا کاهش قابل توجهی دارد که دلیل این امر

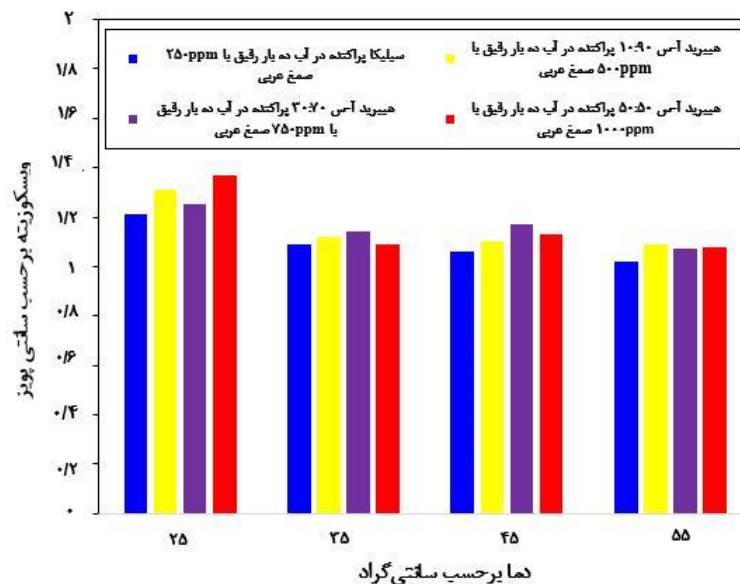


می‌تواند بخاطر حضور صمغ عربی باشد که همراه با نانوذره گاما-آلومینا پراکنده در آب مقطر به نسبت جرمی ۱:۱ مورد استفاده قرار گرفته است اما هیچ گونه ماده فعال سطحی همراه با نانوذره سیلیکا بکار برده نشد. نتایج بدست آمده از اشکال ۳ نشان می‌دهد که ویسکوزیته نانوسیال‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد که این کاهش ویسکوزیته تا حد زیادی به دلیل تضعیف اثرات بین مولکولی یا افزایش فاصله بین مولکولی نانوذرات در نانوسیالات با دمای بالاتر است [۴۶].

شکل ۳ (الف). بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه پراکنده در آب مقطر.

نتایج شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد که نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰) همراه با ppm (۲۵۰ و ۵۰۰) صمغ عربی در دمای  $^{\circ}\text{C}$  ۲۵ ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوذره سیلیکا و گاما-آلومینا دارند اما با افزایش دما با اینکه روندی کاهشی در ویسکوزیته دارند، ویسکوزیته آن‌ها نسبت به نانوذره سیلیکا و گاما-آلومینا بیشتر است. با این حال تحقیقات دیگری به این موضوع ادعان داشته‌اند که ویسکوزیته نانوسیالات هیبرید به نانوذرات انتخابی و ترکیب آن‌ها وابستگی دارد [۴۷]. به صورت کلی ویسکوزیته نانوسیالات هیبرید نسبت به سیالات معمولی و نانوذرات منفرد بالاتر است [۴۶، ۴۷]. نانو هیبرید با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ همراه با ppm ۷۵۰ صمغ عربی در روند افزایش دما ویسکوزیته آن نسبت به نانوذره مفرد سیلیکا و گاما-آلومینا کمتر است. در میان تمام نانوسیالات پراکنده در آب شور و آب مقطر نانو هیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ همراه با ppm ۷۵۰ در دمای  $^{\circ}\text{C}$  ۵۵ کمترین ویسکوزیته و برابر با cp ۰/۷۵ را دارد.

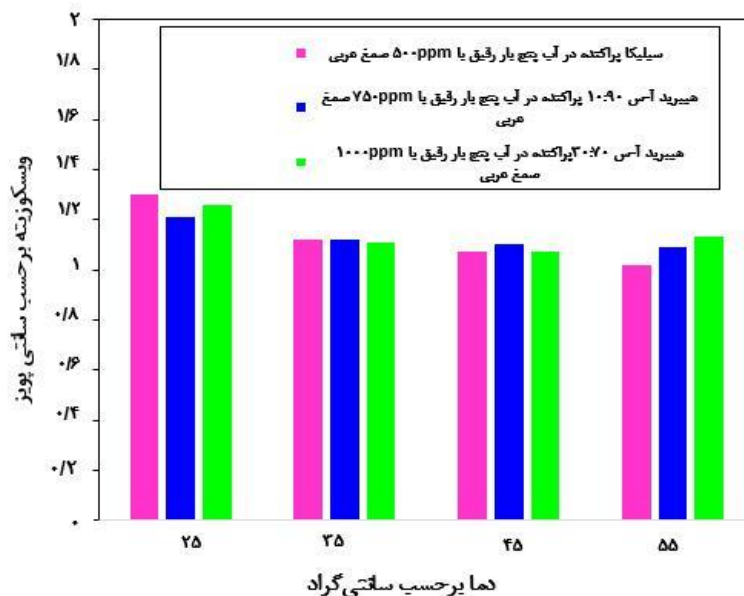
در شکل ۳ (ب) ویسکوزیته نانوذره سیلیکا و نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰، ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰) با (۲۵۰)ppm، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰) صمغ عربی در آب ده برابر رقیق شده نسبت به آب دریا بر حسب افزایش دما نشان داده شده است. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که نانو هیبریدها با نسبت جرمی متفاوت در دماهای  $25^{\circ}\text{C}$ ،  $35^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$  و  $55^{\circ}\text{C}$  ویسکوزیته بیشتری نسبت به نانوذره سیلیکا دارند و کمترین ویسکوزیته برای نانو ذره سیلیکا در دمای  $55^{\circ}\text{C}$  و برابر با (cp)  $1/0.2$  بدست آمد. در میان نانو هیبریدها پراکنده در آب ده بار رقیق شده نانو هیبرید با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  ویسکوزیته بیشتری نسبت به سایر نانو هیبریدها دارد اما با افزایش دما تا  $55^{\circ}\text{C}$  اختلاف ویسکوزیته اندازه‌گیری شده در بین دمای ۲۵ و  $55^{\circ}\text{C}$  برابر با (cp)  $0/29$  است که این اختلاف ویسکوزیته بیشتر از نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰) گزارش شد.



شکل ۳ (ب). بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه در آب ده برابر رقیق شده نسبت به آب دریا با شوری

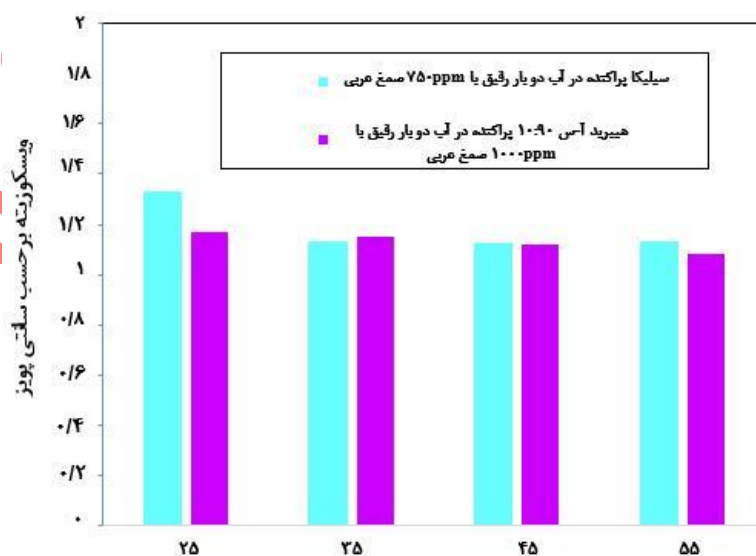
#### ۴۰۷۱ ppm

در شکل ۳ (ج) مشاهده می‌شود که نانوذره سیلیکا پراکنده در آب پنج برابر رقیق شده نسبت به آب دریا با ۵۰۰ ppm صمغ عربی در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  ویسکوزیته بیشتری نسبت به نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰) همراه با ۷۵۰ ppm و ۱۰۰۰ صمغ عربی دارد، اما با افزایش دما به  $35^{\circ}\text{C}$  ویسکوزیته نانوذره سیلیکا و نانو هیبریدها تا حدودی برابر می‌شود. در دماهای بالا ویسکوزیته نانو هیبریدها از ویسکوزیته نانو ذره سیلیکا بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد که نانوذره سیلیکا و نانو هیبرید با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ یک روند کاهشی با افزایش دما را نشان دادند در صورتی که کمترین ویسکوزیته برای نانو هیبرید با نسبت جرمی ۳۰:۷۰ در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  گزارش شد.



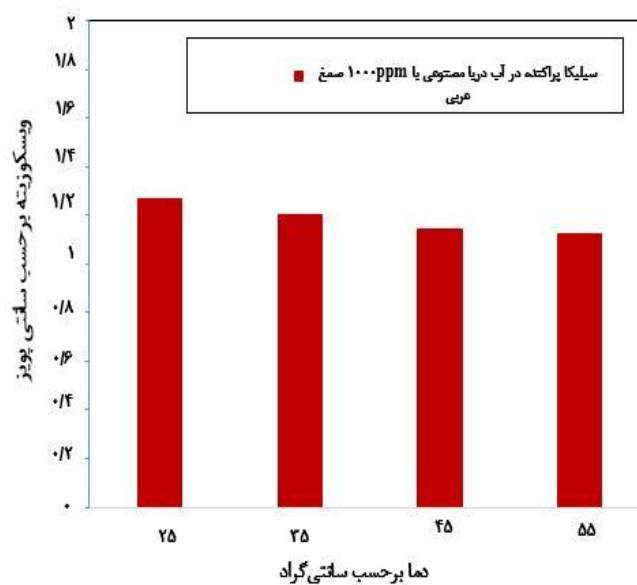
شکل ۳ (ج). بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه پراکنده در آب پنج برابر رقیق شده نسبت به آب دریا با شوری ۸۱۴۲ppm

در شکل ۳ (د) دیده شد که نانوهیبرید با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ با ۱۰۰۰ ppm صمغ عربی پراکنده در آب دو برابر رقیق شده نسبت به آب دریا در دمای ۲۵ و ۵۵ °C ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوذره سیلیکا با ۷۵۰ ppm صمغ عربی دارد و در دمای ۳۵ و ۴۵°C ویسکوزیته نانوهیبرید گاما-آلومینا به سیلیکا با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ و نانوذره سیلیکا با هم برابر هستند. این



شکل ۳ (د). بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه پراکنده در آب دو برابر رقیق شده نسبت به آب دریا با شوری ۲۰۴۰۰ppm

در حالی است که نانوسیالات بهینه پراکنده در آب دو برابر رقیق شده روندی کاهشی در مقادیر ویسکوزیته دارند. در شکل ۳ (ی) نانو ذره سیلیکا پراکنده در آب مصنوعی دریا با افزایش دما روندی کاهشی در ویسکوزیته را نشان می دهد.



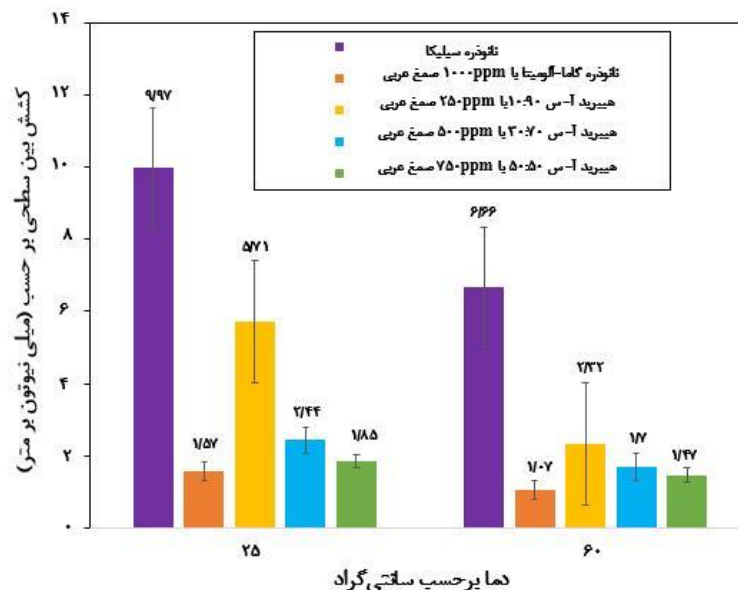
شکل ۳ (ی). بررسی ویسکوزیته بر حسب افزایش دما، برای نانوسیالات بهینه پراکنده در آب دریا مصنوعی با شوری ۴۰۷۱۰ppm کشش بین سطحی نانوسیالات

در ازدیاد و برداشت نانومواد فعال سطحی<sup>۱</sup>، نانوذرات می توانند به افزایش جابه جایی موثر نفت از طریق تغییر ترشوندگی و کاهش کشش بین سطحی کمک کنند. نسبت کم ماده فعال سطحی به نانوذره منجر به نسبت کمی از نانوذرات پوشش داده شده با ماده فعال سطحی می گردد. علاوه بر این نسبت بالای ماده فعال سطحی به نانوذره باعث تشکیل دو لایه ماده فعال سطحی در سطح نانوذرات می شود که در نهایت منجر به بهبود عملکرد نانوذرات اصلاح شده با ماده فعال سطحی می گردد. مطالعات نشان می دهد که سطح نانوذرات پس از جذب ماده فعال سطحی آب گریز می شوند. نانوذرات، مواد فعال سطحی را به سطح مشترک نفت- آب منتقل می کنند و بصورت معمول در سیلاب زنی مواد فعال سطحی مولکول های مواد فعال سطحی در سطح مشترک نفت- آب جذب می شوند نانوذرات باعث جلوگیری از دفع مواد فعال سطحی از سطوح می شوند و در این حالت کاهش کشش بین سطحی بهتر حفظ می گردد [۴۵].

در شکل ۴ (الف) کشش بین سطحی نانوسیالات پراکنده در آب مقطر در دمای محیط و دمای ۶۰°C نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که نانو هیبریدها با نسبت جرمی متفاوت کشش بین سطحی کمتری نسبت به نانوذره سیلیکا دارند، با این حال کشش بین سطحی آنان از نانوذره گاما-آلومینا اصلاح شده با ۱۰۰۰ ppm صمغ عربی بیشتر است. بر طبق نتایج نوروزی و همکاران [۵] نانوذره گاما- آلومینا بخاطر کاهش کشش بین سطحی و ویسکوزیته می تواند باعث بهبودی بازیافت نفت شود.



همچنین نتایج به خوبی با نتایج بدست آمده از تحقیقات زرگر و همکاران [۴۸] انطباق دارد که با افزایش دما کشش بین سطحی کم می‌شود، که دلیل این امر می‌تواند بخاطر افزایش حرکت براونی نانوذرات یا برهم کنش ضعیف بین مولکولی باشد. نانوذره سیلیکا با افزایش دما کشش بین سطحی آن از  $9/97 \text{ (mN/m)}$  به  $6/67 \text{ (mN/m)}$  کاهش یابد. نانوهیبرید با نسبت جرمی  $(۷۰:۳۰، ۹۰:۱۰ و ۵۰:۵۰)$  اصلاح شده با  $۷۵۰، ۵۰۰، ۲۵۰$  ppm صمغ عربی از  $(۵/۷۱، ۲/۴۴ و ۱/۸۵)$  به  $(۲/۳۲، ۱/۷ و ۱/۴۷)$  کاهش کشش بین سطحی را نشان دادند. از طرفی دیگر در میان نانوسیالات پراکنده در آب مقطر کمترین کشش بین سطحی مربوط به نانوذره گاما-آلومینا گزارش شد که با افزایش دما کشش بین سطحی آن از  $(۱/۸۵ \text{ mN/m})$  به  $۱/۵۷ \text{ (mN/m)}$  کاهش یافت. حضور نانوذرات اصلاح شده با ماده فعال سطحی می‌تواند باعث کاهش کشش بین سطحی بین نفت خام و سیالات جابه‌جا کننده گردد. جذب نانوذرات اصلاح شده با صمغ عربی در سطح مشترک نفت و آب نمک بخاطر گروه‌های عاملی آب دوست و آب گریز نانوذرات اصلاح شده صورت می‌گیرد و باعث می‌شود که نانوذرات اصلاح شده مانند یک ماده فعال سطحی دو خصلتی عمل کند. در نهایت گروه‌های عاملی نانوذرات اصلاح شده یک لایه اضافی در سطح مشترک آب نمک و نفت ایجاد می‌کنند تا کشش بین سطحی کاهش یابد [۴۹].



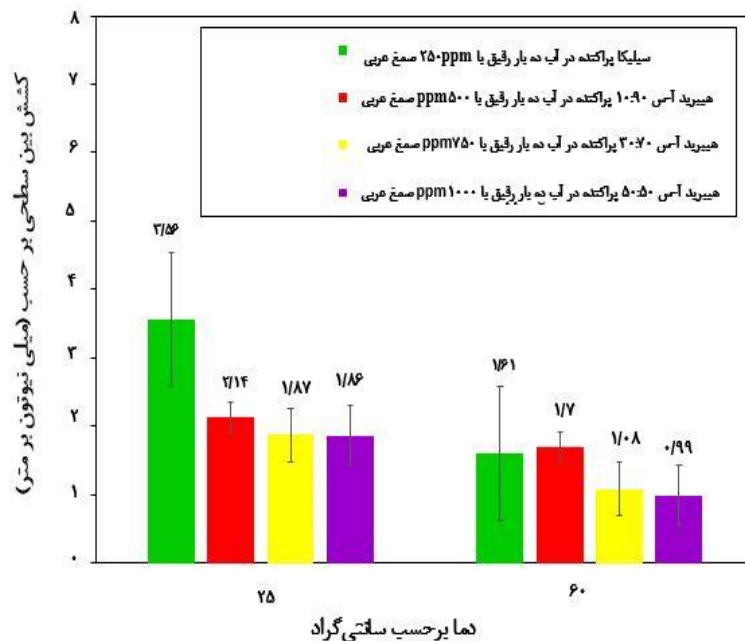
شکل ۴ الف). بررسی کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب مقطر. در دمای محیط و

دما،  $۶۰^{\circ}\text{C}$

تأثیر نمک بر مقادیر کشش بین سطحی در سیستم‌های حاوی آب نمک پیچیده است. امولسیون آب در نفت در حضور ماده فعال سطحی در غلظت‌های کم نمک تشکیل می‌شود. در این سیستم افزایش میزان نمک باعث کاهش کشش بین سطحی می‌شود. جذب کاتیون‌ها در سطح مشترک به دلیل برهم کنش بین کاتیون‌ها و فاز هیدروکربنی اتفاق خواهد افتاد. در غلظت کم آب نمک فصل مشترک بدلیل قرار گرفتن کاتیون‌ها در سطح مشترک مثبت یا افزایش می‌یابد. در نتیجه کشش بین سطحی در غلظت کم آب نمک کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در غلظت‌های بالای نمک، امولسیون نفت در آب ایجاد می‌شود و با افزایش

غلظت نمک، کشش بین سطحی افزایش می‌یابد. در غلظت‌های بالای آب نمک، کاتیون‌ها توسط مولکول‌های آب احاطه می‌شوند بنابراین کاتیون‌ها تمایل کمتری برای انتقال به سطح مشترک دارند. جداسازی کاتیون‌ها از سطح مشترک می‌تواند بار مثبت سطح مشترک را کاهش دهد و در نتیجه در غلظت‌های بالا آب نمک کشش بین‌سطحی افزایش می‌یابد [۵۰، ۵۱].

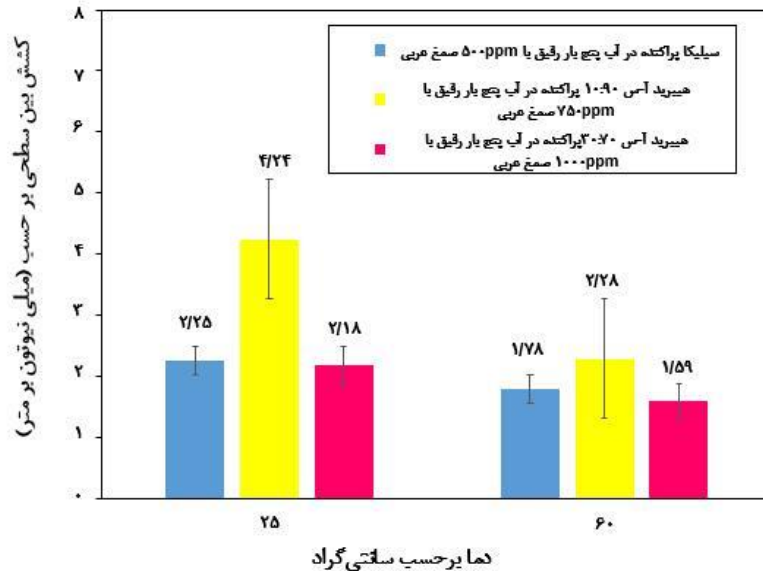
در شکل ۴ (ب) کشش بین‌سطحی نانوسیالات بهینه در آب با ده برابر رقیق شده نسبت به آب در دمای محیط و  $60^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده است نانوسیالات پراکنده در آب ده بار رقیق شده در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  کشش بین‌سطحی کمتری نسبت به نانوسیالات پراکنده در آب مقطر دارند که دلیل این امر همان گونه که در بالا ذکر شد در غلظت‌های کم افزایش میزان نمک باعث کاهش کشش بین سطحی می‌گردد. همچنین نتایج به وضوح نشان می‌دهند که افزایش دما باعث کم شدن کشش بین سطحی می‌گردد. در میان تمام نانوسیالات بهینه نانو هیبرید گاما-آلومینا سیلیکا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ ppm با ۱۰۰۰ صمغ عربی کمترین کشش بین سطحی را در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  دارد. نانوذره سیلیکا و نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰) همراه با (۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰) ppm صمغ عربی به ترتیب با افزایش دما کشش بین سطحی برابر با (۱/۵۷، ۱/۷ و ۱/۰۸) mN/m گزارش شد. همچنین نتایج نشان داد که در بین نانوسیالاتی که مدت زمان طولانی‌تر پایدار بودند، نانوسیالات پراکنده در آب ده بار رقیق شده کمترین کشش بین سطحی را گزارش دادند.



شکل ۴ (ب). بررسی کشش بین‌سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب ده برابر رقیق شده نسبت به آب در دمای محیط و دمای  $60^{\circ}\text{C}$

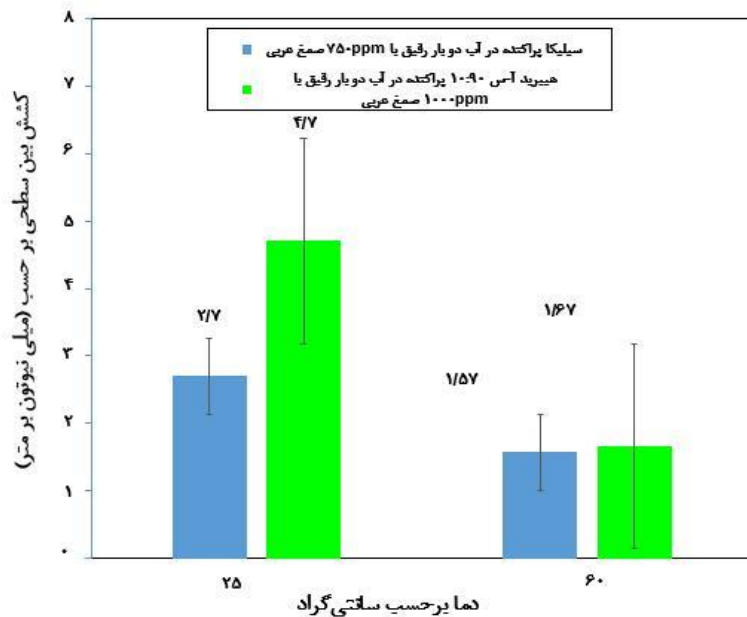
در شکل ۴ (ج) کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه در آب پنج بار رقیق شده نسبت به آب در دمای محیط و دمای  $60^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. نانوذره سیلیکا و نانو هیبریدها با نسبت جرمی (۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰) با (۷۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰) ppm صمغ

عربی کشش بین سطحی آنان در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  به ترتیب از  $(2/25, 4/24, 2/18)$  و  $(2/18)$  به مقادیر  $(1/78, 2/28)$  و  $(1/59)$  در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  کاهش یافته است.

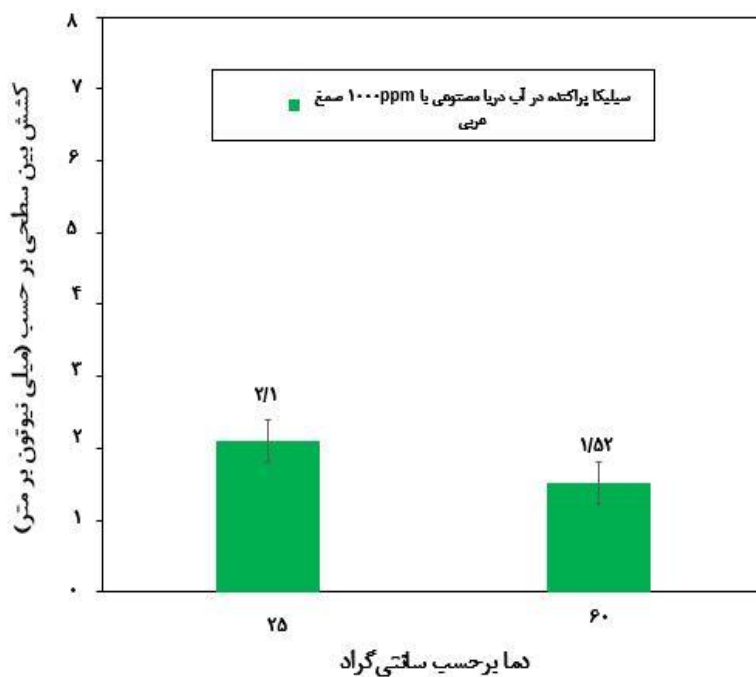


شکل 4 (ج). بررسی کشش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب پنج برابر رقیق شده نسبت به آب دریا در دمای محیط و دمای  $60^{\circ}\text{C}$

در شکل 4 (د) نشان داده شده است که با افزایش شوری سیال پایه کشش بین سطحی نانوذره سیلیکا و نانوهیپید گاما-آلومینا و سیلیکا در دمای محیط نسبت به زمانی که در آب با شوری 5 برابر رقیق شده است افزایش یافت که این افزایش کشش بین سطحی در آب دو برابر رقیق شده می تواند بخاطر غلظت بالای نمک باشد. همان گونه که در بالا ذکر شد افزایش غلظت نمک می تواند جداسازی کاتیون ها را از سطح مشترک کاهش دهد. بطوری که نانوذره سیلیکا و نانوهیپید با نسبت جرمی 10:90 پراکنده در شوری 8142 ppm در دمای محیط کشش بین سطحی برابر با  $(2/25)$  و  $(4/24)$  داشتند اما با افزایش شوری به 20400 ppm به ترتیب کشش بین سطحی آنان به  $(2/7)$  و  $(4/7)$  در همین دما ارتقا پیدا کرد که این اعداد بخوبی اثر افزایش شوری در افزایش کشش سطحی نمایش می دهند. از طرفی دیگر با افزایش دما مشاهده می شود که مقادیر کشش بین سطحی برای نانوسیالات بهینه در آب دو برابر رقیق شده کاهش یافته است. همچنین در شکل 4 (ی) کشش بین سطحی برای نانوذره سیلیکا پراکنده در آب مصنوعی دریا با 1000 ppm صمغ عربی در دمای محیط و دمای  $60^{\circ}\text{C}$  به ترتیب برابر با  $(2/1)$  و  $(1/52)$  گزارش شد.



شکل ۴ (د). بررسی کاهش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب دو برابر رقیق شده نسبت به آب دریا در دمای محیط و ۶۰°C



شکل ۴ (ی). بررسی کاهش بین سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب با شوری دریا مصنوعی در دمای محیط و دمای ۶۰°C

## نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی پایداری، کشش بین سطحی و ویسکوزیته نانوذرات منفرد و نانوهیبریدها پراکنده در آب مقطر و آب‌هایی با شوری مختلف که با کمک ماده فعال سطحی سبز به ثبات رسیده بودند، پرداخته شد. در ادامه برخی از مهمترین نتایجی که از این پژوهش بدست آمد به شرح زیر بیان می‌گردد:

- در میان فاکتور شوری سیال پایه، نسبت جرمی نانوذره گاما-آلومینا به سیلیکا و غلظت صمغ عربی تأثیرگذارترین فاکتور برای بررسی پایداری نانومحلول‌ها نسبت جرمی نانوگاما-آلومینا به سیلیکا معرفی شد. در میان نانوذرات منفرد نانوذره سیلیکا پایدارتر از نانوذره گاما-آلومینا است. از طرفی نانوهیبرید با نسبت جرمی کمتر گاما-آلومینا مدت طولانی‌تر پایدار است. پس از نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا، شوری سیال پایه دومین پارامتر اثرگذار بر پایداری نانومحلول‌ها معرفی شد. به گونه‌ای که هرچه حضور کاتیون‌های موجود در آب کمتر باشد نانومحلول‌ها پایدارتر هستند. در نهایت غلظت صمغ عربی تعیین‌کننده پایداری نانوسیالات معرفی شد. نتایج به وضوح نشان دادند که به جز نانوذره سیلیکا که در عدم حضور صمغ عربی پایداری قابل قبولی دارد نانومحلول‌هایی که از صمغ عربی برای تهیه‌شان استفاده نشد در کمتر از ۲ ساعت ناپایدار می‌شوند.
- اثر دما بر روی کشش بین سطحی نانوسیالات موثر است و باعث کاهش کشش بین سطحی نانوسیالات می‌گردد به طوری که تمامی نانوسیالات با افزایش دما با روند کاهش کشش بین سطحی مواجه شدند. اما با بررسی اثر شوری بر روی رفتار نانوسیالات مشاهده شد ممکن است با افزایش شوری کشش بین سطحی افزایش پیدا کند بطوری که در این پژوهش در شوری ۲۰۴۰ ppm، افزایش کشش بین سطحی مشاهده شد. اما نانوسیالات در شوری ۴۰۷۱ ppm کمترین کشش بین سطحی را نشان دادند و کمترین کشش بین سطحی برای نانوهیبرید با نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا ۵۰:۵۰ گزارش شد.
- دما و شوری سیال پایه تأثیر بسیار زیادی بر روی بررسی ویسکوزیته نانوسیالات دارند. کمترین ویسکوزیته برای نانوسیالات پراکنده در آب مقطر گزارش شد. بطوری که برای نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ ویسکوزیته‌ای برابر با ۰/۷۵cp بدست آمد. بررسی ویسکوزیته نانوهیبریدها در آب مقطر تا حدود زیادی به نسبت جرمی گاما-آلومینا و سیلیکا بستگی داشت. بصورتی که نانو هیبریدها با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰ در دمای پایین ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوذرات سیلیکا و گاما-آلومینا داشتند اما با افزایش دما ویسکوزیته آنها نسبت به نانوذرات منفرد افزایش یافت. نانوهیبرید با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ ویسکوزیته کمتری نسبت به نانو سیالات منفرد داشت و این روند را در تمام دماهای اندازه‌گیری شده نشان داد. بررسی ویسکوزیته نانوسیالات در شوری (۴۰۷۱ و ۸۱۴۲) ppm نشان می‌دهد که با افزایش دما ویسکوزیته نانوهیبریدها نسبت به نانوذره سیلیکا بیشتر است این در حالی است که در شوری ۲۰۴۰ ppm تنها نانوهیبرید پایدار در این شوری ویسکوزیته کمتری نسبت به نانوذره سیلیکا دارد.

## تشکر و قدردانی

از توجه ویژه آقای دکتر محمد نادر لطف الهی و سرکار خانم فاطمه اصغری راد که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه سپاسگذاریم و قدردان زحمات این بزرگواران هستیم.

## مراجع

- [1]. Bahari N, M. Che Mohamed Hussein S N and Othman N H. (2020). "Synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>/water hybrid nanofluids and effects of surfactant toward dispersion and stability". *Particulate Science and Technology*. : (7)39.2020.p.844-858
- [2]. Lau H,C. Yu M and Nguyen Q, P. (2017). " Nanotechnology for oilfield applications: Challenges and impact". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 157: p. 1160-1169.
- [3]. Rahman M, D. Haroun M. Al Kobaisi M. Kim M. Suboyin A. Somra B, Jassim. Ponnambathayil A and Punjabi S. (2022) "Insights into Nanoparticles, Electrokinetics and Hybrid Techniques on Improving Oil Recovered in Carbonate Reservoirs". *Energies*. 15(15).
- [4]. El-Diasty A, I. Aly A. (2015). " Understanding the mechanism of nanoparticles applications in enhanced oil recovery". *Society of Petroleum Engineers*.
- [5]. Nowrouzi I. Manshad A, K and Mohammadi A, H. (2019). "Effects of TiO<sub>2</sub>, MgO, and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in carbonated water on water-oil interfacial tension (IFT) reduction in chemical enhanced oil recovery CEOR process". *Journal of Molecular Liquids*. 292.
- [6]. Adil M. Lee K. Mohd Zaid H and Manaka Adil T. (2020). " Role of Phase-Dependent Dielectric Properties of Alumina Nanoparticles in Electromagnetic-Assisted Enhanced Oil Recovery". *Nanomaterials (Basel)*. 10(10).
- [7]. Mahmoudpour M and Pourafshary P. (2021). "Investigation of the effect of engineered water/nanofluid hybrid injection on enhanced oil recovery mechanisms in carbonate reservoirs". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 196.
- [8]. Hu Y. Zhao Z. Dong H. Vladimirovna Mikhailova M and Davarpanah A. (2021). " Hybrid Application of Nanoparticles and Polymer in Enhanced Oil Recovery Processes". *Polymers (Basel)*. 13(9).
- [9]. Dardan, E. Afrand M and Meghdadi Isfahani A, H. (2016). " Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil and pumping power". *Applied Thermal Engineering*. 109: p. 524-534.
- [10]. Ansari H, R. Riazi M and Samad Sabbaghi S. (2018). "An Experimental Investigation of Wettability Alteration of Carbonated Rock Using Alpha-Alumina Nanofluid ". *Petroleum Research*.
- [11]. Mansouri M. Nakhaee A and Pourafshary P. (2019). " Effect of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on fines stabilization during low salinity water flooding in sandstones". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 174: p.637-648.
- [12]. Cacuaa K. Ordoñezb F. Zapatab C. Herrera B. Pabóna E. Buitrago-Sierra R. (2019). " Surfactant concentration and pH effects on the zeta potential values of alumina nanofluids to inspect stability". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 583.
- [13]. Betancur S. Giraldo L J. Carrasco-Marin F. Riazi M. Manrique E J. Quintero H. Garcia A H. Franco-Ariza C, A and Cortes F, B. (2019). " Importance of the Nanofluid Preparation for Ultra-Low Interfacial Tension in Enhanced Oil Recovery Based on Surfactant-Nanoparticle-Brine System Interaction". *ACS Omega*. 4(14): p. 16171-16180.
- [14]. Behera U, S and Sangwai J, S. (2021). "Nanofluids of silica nanoparticles in low salinity water with surfactant and polymer (SMART LowSal) for enhanced oil recovery". *Journal of Molecular Liquids*. 342
- [15]. Moradpour N. Pourafshary P." Hybrid EOR Methods Utilizing Low-Salinity Water". (2019).
- [16]. Mofrad S,K and Saeedi Dehaghani A,H. (2020)" An experimental investigation into enhancing oil recovery using smart water combined with anionic and cationic surfactants in carbonate reservoir". *Energy Reports*. 6: p. 543-549
- [17]. Dabiri A and Honarvar B. (2020). "Synergic Impacts of Two Non-ionic Natural Surfactants and Low Salinity Water on Interfacial Tension Reduction, Wettability Alteration and Oil Recovery: Experimental Study on Oil Wet Carbonate Core Samples". *Natural Resources Research*. 29(6): p .4003-4016.

- [18]. Moradi S. Isarib A. Bachari Z. Mahmoodi H. (2019). "Combination of a new natural surfactant and smart water injection for enhanced oil recovery in carbonate rock: Synergic impacts of active ions and natural surfactant concentration". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 176: p. 1-10.
- [19]. Ahmadi, M.A. and Shadizadeh S, R. (2018). "Spotlight on the New Natural Surfactant Flooding in Carbonate Rock Samples in Low Salinity Condition". *Sci Rep*, 2018. 8(1): p. 10985.
- [20]. Madani M. Zargara Gh. Takassib M, A. Daryasafara A. Wood D. Zhangd Zh. (2019). "Fundamental investigation of an environmentally-friendly surfactant agent for chemical enhanced oil recovery". *Fuel*. 238: p. 186-197.
- [21]. Dror Y. Cohen Y and Yerushalmi-Rozen R. " Structure of gum arabic in aqueous solution". *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*: p. 3265-3271.
- [22]. Shao H. Chen Zh. Ding W. Yin X. Chen Y. Liu Y and Yang W. (2023). "Gum Arabic-Assisted Polyaniline Nanofillers for Improving Anticorrosion Performance of Waterborne Epoxy Coatings". *ACS Applied Nano Materials*.
- [23]. Han J. Chen F. Gao Ch. Zhang Y. Tang X. (2020). " Environmental stability and curcumin release properties of Pickering emulsion stabilized by chitosan/gum arabic nanoparticles". *Int J Biol Macromol*. 157: p. 202-211.
- [24]. Yu W. France D. L. Routbort J. Choi S. (2008). " Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements". *Heat Transfer Engineering*, 2008. 29(5): p. 432-460.
- [25]. Morrow L. Potter D and Barron A, R. (2014). "Detection of magnetic nanoparticles against proppant and shale reservoir rocks". *Journal of Experimental Nanoscience*. 10(13): p. 1028-1041.
- [26]. Arain, Z., U, A. (2020). " Influence of silica nanoparticles on the surface properties of carbonate reservoirs". Curtin University.
- [27]. Unal R and Dean E.B. (1990). "Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: an Overview". Presented at the 1991 Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts.
- [28]. Daneshvar N. Khataee A, R. Rasoulifard M, H. Pourhassan M. (2007). " Biodegradation of dye solution containing Malachite Green: optimization of effective parameters using Taguchi method". *J Hazard Mater*. 143(1-2): p. 209-214.
- [29]. Kackar R, N. " Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method. (2018). ". *Journal of Quality Technology*. 17(4): p. 176-188.
- [30]. Sidika N, A, C. Jamilb M, M. Aziz Japara W, M, A. Adamua I, M. (2017). " A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80: p. 1112-1122.
- [31]. Witharana S. Palabiyik I. Musina Z. Ding Y. (2013). "Stability of glycol nanofluids — The theory and experiment". *Powder Technology*. 239: p. 72-77.
- [32]. Anushree C and Philip J. (2016). "Assessment of long term stability of aqueous nanofluids using different experimental techniques". *Journal of Molecular Liquids*. 222: p. 350-358.
- [33]. Hendraningrat L. Torsaeter O. (2014). "Unlocking the potential of metal oxides nanoparticles to enhance the oil recovery". *OnePetro*.
- [34]. Rostami P. Sharifi M. Aminshahidy B and Fahimpour J. (2019). " Enhanced oil recovery using silica nanoparticles in the presence of salts for wettability alteration". *Journal of Dispersion Science and Technology*. 41(3): p. 402-413.
- [35]. Eshgarf H. Kalbasi R. Maleki A. Safdari Shadloo M. karimipour A. (2020). "A review on the properties, preparation, models and stability of hybrid nanofluids to optimize energy consumption". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 144(5): p. 1959-1983.
- [36]. Yu W and Xie H. " A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications. (2012). ". *Journal of Nanomaterials*. 2012: p. 1-17.
- [37]. Dhinesh Kumar D and Valan Arasu A. (2018). "A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81: p. 1669-1689.
- [38]. Mahpishanian A, M. Simjoo M. Shahverdi H. Zaeri M. (2021). "Experimental Investigation of Nano Silica on Wettability Alteration and Enhanced Oil Recovery from Carbonate Reservoir Using Low Salinity Water". *Petroleum Research*. 30,99-6: p. 3-20.
- [39]. Metin C, O. Lake L. Miranda C, R. Nguyen Q, P. (2010). "Stability of aqueous silica nanoparticle dispersions". *Journal of Nanoparticle Research*. 13(2): p. 839-850.
- [40]. Trefalt G and Borkovec M. "Overview of DLVO Theory". 2014.

- [41]. Zhang H. Shan G. Liu H. Xing J." Surface modification of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles with gum arabic and its applications in adsorption and biodesulfurization. (2007)". Surface and Coatings Technology. 201(16-17): p. 6917-6921.
- [42]. Habibi S. Jafari A and Fakhroueian Z.(2020)." Wettability alteration analysis of smart water/novel functionalized nanocomposites for enhanced oil recovery". Petroleum Science. 17(5): p. 1318-1328.
- [43]. Hou B. Jia R. Fu M. Wang Y. Jiang Ch. Yang B. Huang Y.(2019)." Wettability alteration of oil-wet carbonate surface induced by self-dispersing silica nanoparticles: Mechanism and monovalent metal ion's effect". Journal of Molecular Liquids. 294.
- [44]. Peng, B. Zhang L. Luo J. Wang P. Ding B. Zeng M. Cheng Zh. (2017). " A review of nanomaterials for nanofluid enhanced oil recovery". RSC Advances. 7(51): p. 32246-32254.
- [45]. El-Masry J, F. Bou-Hamdan K, F. Hashim Abbas A and Martyushev D, A. (2023). "A Comprehensive Review on Utilizing Nanomaterials in Enhanced Oil Recovery Applications". Energies. 16(2).
- [46]. Hashemzadeh Sh. Hormozi F. (2019)."An experimental study on hydraulic and thermal performances of hybrid nanofluids in mini-channel". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.
- [47]. Babar H. Sajid M, U and Ali M. (2019)." Viscosity of hybrid nanofluids: A critical review". Thermal Science. 23(3 Part B): p. 1713-1754.
- [48]. Zargar Gh. Arabpoura T. Khaksar Manshada A. Ali J, A. Sajadi S, M. Keshavarzf A. Mohammadig A, H. (2020)."Experimental investigation of the effect of green TiO<sub>2</sub>/Quartz nanocomposite on interfacial tension reduction, wettability alteration, and oil recovery improvement". Fuel. 263.
- [49]. Hamdi S, S. Al-Kayiem H, H and Muhsan A, S. (2020)." Natural polymer non-covalently grafted graphene nanoplatelets for improved oil recovery process: A micromodel evaluation". Journal of Molecular Liquids. 310.
- [50]. Al-Sahhaf T. Elkamel A. Suttar ahmed A. Khan A, R. (2005)."The Influence of Temperature, Pressure, Salinity, and Surfactant Concentration on the Interfacial Tension of the N-Octane-Water System". Chemical Engineering Communications. 192(5): p. 667-684.
- [51]. Divandari H. Hemmati-Sarapardeha A. Schaffiea M. Ranjbar M. (2020). " Integrating functionalized magnetite nanoparticles with low salinity water and surfactant solution: Interfacial tension study". Fuel. 281.



Accepted Paper