

## بررسی اثربخشی پارامترهای «دما» و «روان کننده با غلظت های مختلف» بر ویسکوزیته و کشش سطحی نفت فوق سنگین میدان نفتی آزادگان

محمد ربیعی<sup>۱</sup>، سید سجاد روان سالار<sup>۲\*</sup>، ابراهیم کرمی<sup>۳</sup>، میلاد شمساری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> رئیس تامین و توزیع، شرکت ملی پخش فرآورده های نفتی ایران، منطقه هرمزگان

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه، شاغل در شرکت ملی پخش فرآورده های نفتی ایران، منطقه هرمزگان

<sup>۳</sup> رئیس مهندسی فرآورده ها، شرکت ملی پخش فرآورده های نفتی ایران، منطقه هرمزگان  
<sup>۴</sup> مسئول سرویس های صنعتی، شرکت ملی پخش فرآورده های نفتی ایران، منطقه هرمزگان

\* ایمیل مسئول مکاتبات: [Ravansalarsajad@gmail.com](mailto:Ravansalarsajad@gmail.com)

### چکیده

در بررسی خواص نفتی، محاسبه دو پارامتر ویسکوزیته و کشش سطحی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. ویسکوزیته، لزجت یا گرانروی یک سیال است که میزان مقاومت سیال در برابر جاری شدن را نشان می دهد. کشش سطحی نیز ویژگی در مایعات است که باعث می شود لایه بیرونی آن ها به صورت ورقه ای کشسان عمل کند. این همان ویژگی است که موجب ربایش دو سطح مایع به یکدیگر می شود. اهمیت استفاده از مواد شیمیایی مختلف به منظور بهبود انتقال نفت های خام فوق سنگین بر کسی پوشیده نیست. این مقاله، اثر روان کننده را بر رفتار ویسکوزیته نفت خام فوق سنگین در امولسیون های تشکیل شده با آب، ارائه می کند. نتایج بدست آمده حاکی از اثربخشی روان کننده با غلظت های مختلف در کاهش ویسکوزیته و ارائه یک رفتار جریان نیوتنی بود.

**کلمات کلیدی:** دما، روان کننده ویسکوزیته، کشش سطحی، نفت خام فوق سنگین.

## ۱- مقدمه

نفت خام مخلوط پیچیده‌ای از هیدروکربن‌ها می باشد که بر اساس ساختار شیمیایی به پارافین ها<sup>۱</sup>، ایزوپارافین ها<sup>۲</sup>، نفتن‌ها، آروماتیک‌ها<sup>۳</sup> و هیدروکربن‌های غیراشباع<sup>۴</sup>، گازهای نیتروژن، سولفور و اکسیژن تقسیم بندی می‌شوند. از طرفی می‌توان این هیدروکربن‌ها را بر اساس میزان حلالیت و قطبی بودن شان به ترکیبات اشباع، آروماتیک، رزین<sup>۵</sup> و آسفالتین<sup>۶</sup> نیز طبقه کرد [۱-۴]. یکی از مشخصه های نفت خام، ویسکوزیته آن است. توجه به این ویژگی در فرآیند تصفیه و مدیریت آن از مخزن به سطح، انتقال آن از طریق خطوط لوله و حمل و نقل آن به تاسیسات پالایشی بسیار مهم است. درجه API مبنای طبقه بندی انواع مختلف نفت خام است. در این روش، چگالی نفت خام بر اساس مقایسه آن با چگالی حجم یکسانی از آب، در شرایط دما و فشار یکسان محاسبه می‌شود [۵]. نفت خام سنگین به نفت‌هایی با درجه API کم و ویسکوزیته بالا گفته می‌شود که علت ویسکوزیته بالای نفت‌های سنگین، میزان بالای رزین، آسفالتین و شبکه ویسکوالاستیک موجود در آن‌ها می باشد. ویسکوزیته بالای نفت‌های سنگین<sup>۷</sup> و فوق سنگین<sup>۸</sup> سبب ایجاد مشکلاتی در فرآیند انتقال آن‌ها از چاه تولیدی و تفکیک‌گرها به مکان ذخیره‌سازی و تاسیسات پالایشگاهی می‌شود. انتقال این نوع نفت های سنگین از طریق خطوط لوله، همواره صنعت نفت را با چالش های بزرگی مواجه کرده است و محیط متخلخل مخزن نیز همیشه نیازمند انرژی اضافی مانند گرما یا استفاده از مواد شیمیایی کاهنده ویسکوزیته و روان کننده‌ها، به منظور روان تر کردن نفت خام موجود می باشد [۶-۹].

تاکنون روش های زیادی به منظور بهبود جریان و کاهش ویسکوزیته نفت خام استفاده شده است. افزودن سورفکتانت‌ها و پلیمر، همچنین استفاده از آب به منظور ایجاد جریان حلقوی یا رقیق‌سازی با استفاده از نفت های خام سبک‌تر و ایجاد امولسیون با استفاده از سورفکتانت ها از جمله روش هایی هستند که به منظور بهبود جریان نفت خام استفاده شده‌اند [۱۰-۱۲]. از سیالات مختلفی مانند، نفت سبک، نفتا، گازوئیل و همچنین گازهایی نظیر کربن دی اکسید به منظور کاهش ویسکوزیته نفت سنگین استفاده می‌شود. با این وجود، افزودن رقیق کننده‌ها ممکن است باعث رسوب آسفالتین و بسته شدن مسیرهای جریان شود. در پژوهش‌های گذشته، موضوعات جالب توجهی درباره کاهش ویسکوزیته نفت‌های خام فوق سنگین گزارش شده است [۱۳-۱۶].

<sup>۱</sup> Paraffins

<sup>۲</sup> Isoparaffins

<sup>۳</sup> Aromatics

<sup>۴</sup> Unsaturated hydrocarbons

<sup>۵</sup> Resin

<sup>۶</sup> Asphaltene

<sup>۷</sup> Heavy Crude Oil (HCO)

<sup>۸</sup> Extra Heavy Crude Oil (EHCO)

دجمیات و همکاران [۱۷] رفتار رئولوژیکی نفت خام را در حالت برشی ثابت و نوسانی، در حضور و عدم حضور سدیم دودسیل بنزن سولفات<sup>۱</sup> گزارش و اثر نرخ برش، دما (۲۰، ۳۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد) و غلظت ماده افزودنی بر پارامترهای رئولوژیکی را بررسی کردند. آنها دریافتند در نرخ های برش کم، نفت رفتار غیرنیوتنی نشان می دهد که رفتار توسط مدل هرشل-بالکلی<sup>۲</sup> قابل توصیف است. همچنین مقادیر بالای نرخ برش، سبب ایجاد رفتار نیوتنی شده که این مسئله بر خصوصیات رئولوژیکی نفت خام حاوی سدیم دودسیل بنزن سولفات تاثیر می گذارد. سوارز و همکاران [۱۸] اثر یک روان کننده فرموله شده توسط بایودیزل به همراه ترکیبات آلی مشتق شده از نفت را بر تغییر نفت فوق سنگین در روسیه را گزارش کردند. آنها دریافتند تغییر در برهمکنش آسفالتین ها و گروه های استری اپوکسی شده به وسیله خاصیت قطبی بودنشان و برهمکنش با ترکیبات غیرقطبی با بخش هایی از ترکیبات شیمیایی اضافه شده و خصوصیت آمفی فیلیک<sup>۳</sup> بوده است. روان کننده خاصیت فعال خود برای کاهش ویسکوزیته را نشان داد. آلومایر و همکاران [۱۹] روش های اختلاطی مختلف کاهش ویسکوزیته نفت خام سنگین را با استفاده از نفت خام سبک یا اجزای سبک نفت خام (نفت سفید یا گازوئیل) در شرایط فشاری اتمسفریک بررسی کردند. آنها دریافتند کاهش ویسکوزیته در حدود ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ mPa s بوده و با این وجود، پدیده رسوب آسفالتین را نیز مشاهده کردند. همچنین دریافتند که افزودن ۱/۲ تا ۲ درصد وزنی هگزانول به تولون، تاثیر آسفالتین ها را در کاهش نانوساختارهای لخته ای، متوقف و یا به تاخیر می اندازد. پرز-سانچز و همکاران [۲۰] در پژوهش خود تاثیر استر بر ویسکوزیته نفت را ارائه کردند. نتایج بدست آمده حاکی از تاثیر مثبت استرها بر کاهش چشمگیر ویسکوزیته نفت خام در دماهای پایین بود. علاوه بر این، نتایج نشان دادند که افزایش میزان آب سازندی مصنوعی در سیستم امولسیون، سبب افزایش ویسکوزیته می شود. دمای ذخیره سازی نیز می تواند بر پایداری امولسیون تاثیرگذار باشد. Naiya و همکاران [۲۱] تاثیر دما بر خواص رئولوژیکی نفت خام را گزارش کردند. آنها دریافتند که نفت بالای ۴۰ درجه سانتیگراد رفتار جریان مناسبی را هنگام گرم شدن نشان می دهد که این رفتار را می توان از طریق میزان وکس پارافین بالا و نسبت میانگین وکس به رزین توجیه کرد. آنتو و همکاران [۲۲] پژوهشی در مورد کاهش ویسکوزیته نفت خام با استفاده از نانوذرات سیلیس و آلومینیوم انجام دادند. آزمایش دینامیک رئولوژی در نرخ برش ( $100 s^{-1}$ ) و دمای نوسانی (۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد) انجام شد و نشان داده شد که افزایش دما، کاهش ویسکوزیته و رفتار نیوتنی نفت خام را به دنبال دارد. رفتار ویسکوزیته شبه پلاستیک یا رقیق شونده در نرخ های برشی کم و با افزایش دما مشاهده شد. در صنعت نفت، عموماً از نرخ های برشی بین  $0.1 s^{-1}$  تا  $100 s^{-1}$  استفاده می شود. این تغییرات نرخ برشی، جابجایی نفت از سنگ منشاء به سنگ مخزن، که به آن مهاجرت نفت گفته و پس از آن انتقال نفت از طریق خطوط لوله و تجهیزات پمپاژ از چاه به بخش جداکننده ها را در بر می گیرد. پس از انتقال نفت خام به سایت های مختلف به منظور پالایش بیشتر، سیال باقی مانده در نهایت به مخازن ذخیره

<sup>۱</sup> Sodium Dodecyl Benzene Sulfate (SDBS)

<sup>۲</sup> Herschel-Bulkley

<sup>۳</sup> Amphiphilic

سازی یک پالایشگاه یا جایگاه حمل و نقل ارسال می شود. بیشتر داده‌های رئولوژیکی نفت خام موجود در مطالعات گذشته، برای توابع برشی پایا مواد به منظور تخمین جریان برشی پایا است.

ال رومی [۲۳] تاثیر روان کننده بر رفتار ویسکوزیته نفت خام فوق سنگین و نیز در امولسیون‌های تشکیل شده با محتوای ۵ و ۱۰٪ آب نشان می‌دهد، زیرا که ویسکوزیته سیال پارامتری مهم در عملیات تولید، انتقال و پالایش نفت خام است. نتایج بدست آمده حاکی از تاثیر مثبت غلظت ۱، ۳ و ۵٪ وزنی از روان کننده، در کاهش ویسکوزیته نفت خام و مشاهده رفتار نیوتنی بود که این مسئله سبب کاهش هزینه‌های درمان حرارتی، در طول فرآیند انتقال نفت خام از طریق خطوط لوله خواهد شد. نفت‌های خام غیرمتعارف نیازمند یک تقاضای اضافی به منظور اطمینان از سیالیت آن در یک نرخ جریان قابل قبول به منظور حمل و نقل است، زیرا که به واسطه پیچیدگی ترکیب این نوع نفت، مصرف آن باعث تحمیل هزینه‌های بالای انرژی می‌شود. استفاده از روان کننده به عنوان راهکاری مناسب به منظور اطمینان از سیالیت نفت خام برای حمل و نقل آن در یک نرخ جریان قابل قبول ارائه شده است.

## ۲- مواد و روش ها

در این پژوهش، از نفت خام فوق سنگین میدان نفتی آزادگان واقع در کشور ایران استفاده شده است. روان کننده یک ماده شیمیایی بیودیزل بر پایه استر بود.

### ۲-۱- خصوصیات نفت خام و مخلوط

درجه API نفت خام، چگالی مخلوط و نمونه نفت در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  با روش پیکنومتر، میزان آسفالتین، کشش سطحی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی خودکار و ویسکوزیته با استفاده از رئومتر تعیین شدند. غلظت بهبود دهنده و آب، از طریق افزودن مقادیر مختلف، مطابق جدول ۱ ارزیابی شد. اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی با انجام سه تکرار، در محدوده نرخ برشی  $100 - 0.1 \text{ s}^{-1}$  و در دمای ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی شد.

### ۲-۲- آماده‌سازی

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، مخلوط‌هایی با نسبت‌های مختلف، به منظور مشخص کردن تاثیر روان کننده و آب بر ویسکوزیته نفت خام فوق سنگین، ساخته شدند. قبل از آغاز اندازه‌گیری‌ها، مخلوط‌های ساخته شده به مدت ۲۰ دقیقه به صورت دستی همزده شدند. پس از هم‌زدن مخلوط‌ها، به منظور ارزیابی خواص رئولوژیکی، نمونه به مدت ۵ دقیقه درون سیلندر رئومتر قرار داده شد.

جدول ۱- نسبت های آب، روان کننده و نفت خام

نمونه	EHCO:FE	نمونه	EHCO:W	نمونه	EHCO:W:FE
EHCO	100	EHCO+5%W	95:5	EHCO+5%W+3%FE	92:5:3
EHCO+1% FE	99:1	EHCO+10%W	99:1	EHCO+5%W+5%FE	90:5:5
EHCO+3% FE	97:3		97:3	EHCO+10%W+3%FE	87:10:3
EHCO+5% FE	95:5		95:5	EHCO+10%W+5%FE	85:10:5

## ۳- نتایج و بحث

خواص نفت خام فوق سنگین استفاده شده به صورت زیر بدست آمد:  
چگالی  $1.021 \text{ g/ml}$ ، درجه API برابر  $6/95$ ، ویسکوزیته  $35282 \text{ mPa s}$  (در دمای  $25^\circ\text{C}$ ) و میزان آسفالتین برابر  $22/5 \%$  بود. مقادیر بدست آمده، این نفت خام را بر اساس مقادیر مرجع، جزو نفت‌های خام فوق سنگین طبقه می‌کند.

کشش سطحی بین روان کننده و نفت خام در جدول ۲ ارائه شده‌است.

جدول ۲- کشش سطحی بین نفت خام فوق سنگین و روان کننده

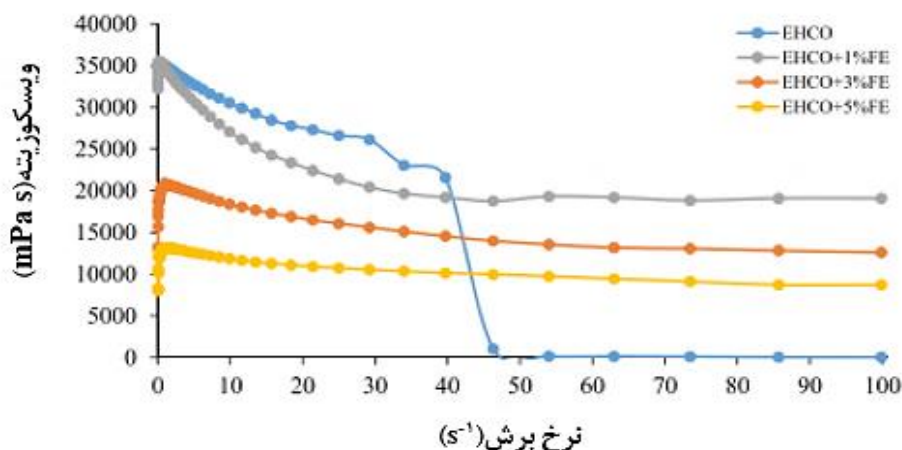
دما ( $^\circ\text{C}$ )	کشش سطحی (mN/m)
۲۵	۸۴/۳۰۸۶
۳۰	۶۵/۸۹۲۶
۴۰	۵۵/۲۱۲۱
۶۰	۴۵/۶۲۹۶

نیروی لازم برای جدا کردن لایه بین سطحی با استفاده از یک حلقه پلاتینی اندازه‌گیری و از غوطه ور شدن کامل حلقه در نفت خام فوق سنگین نیز اطمینان حاصل شد. نیروی لازم برای جدا کردن حلقه معادل کشش سطحی است. کشش سطحی در سطح تماس بین نفت خام و روان کننده، در دمای  $25^\circ\text{C}$  برابر  $84/3086 \text{ mN/m}$  بدست آمد. کشش سطحی با افزایش دما کاهش می‌یابد، به طوری که کشش سطحی برای این دو سیال در دماهای  $30$ ،  $40$  و  $60$  درجه سانتی‌گراد به ترتیب  $65/8926$ ،  $55/2121$  و  $45/6296 \text{ mN/m}$  بدست آمد. این رفتار به دلیل اختلال ایجاد شده توسط بیشتر شدن جنبش مولکولی با افزایش دما است.

علت پدیده کشش سطحی، تفاوت برهمکنش‌های یک مولکول در نواحی نزدیک به سطح تماس سیالات نسبت به برهمکنش‌های یک مولکول یکسان درون سیال نفت خام است. مولکول‌های سورفکتانت عموماً در سطح مشترک سیالات قرار گرفته و کشش سطحی را کاهش می‌دهند. در این نمونه، نفت خام دارای سورفکتانت در اجزای سنگین است. این سورفکتانت‌های طبیعی رزین‌ها، مالتن‌ها و آسفالتین‌ها هستند. افزایش دما جذب سورفکتانت‌های طبیعی را کاهش داده و به تبع آن ویسکوزیته فاز خارجی، سفتی لایه سطحی و کشش سطحی کاهش می‌یابند.

اثر روان کننده و آب بر خواص رئولوژیکی نفت خام فوق سنگین ارزیابی شد. نمونه‌ها در دمای ثابت  $25$ ،  $30$ ،  $40$  و  $60$  درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شدند.

شکل ۱ رئوگرام‌های ECHO را به همراه روان کننده در دمای  $25^\circ\text{C}$  نشان می‌دهد.



شکل ۱- رئوگرام های نفت خام فوق سنگین به همراه روان کننده در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد

رئوگرام بدست آمده ویسکوزیته EHCO را در ابتدا در دمای ۲۵°C، ۳۵۲۸۲ mPa s نشان می دهد. کاهش ویسکوزیته با افزایش نرخ برش نشان دهنده رفتار شبه پلاستیک EHCO است. در نرخ برش بین ۳۹/۸ تا ۴۶/۴ s<sup>-1</sup> یک کاهش چشمگیر در ویسکوزیته مشاهده می شود به طوری که ویسکوزیته در این بازه از مقدار ۲۱۵۸۶ mPa s به مقدار ۱۰۴۱/۱ کاهش پیدا می کند، و این افت در میزان ویسکوزیته تا مقدار ۴۹/۷۵۶ mPa s در نرخ برش ۱۰۰ s<sup>-1</sup> ادامه پیدا می کند. EHCO کاهش ویسکوزیته را نشان می دهد، این روند با رقیق شدن برشی همراه است که رفتار غیر نیوتنی سیالاتی است و ویسکوزیته آنها تحت تنش برشی کاهش می یابد [۲۴-۲۸]. بر اساس گفته های واگنر [۲۹] و کومار [۳۰] می توان آن را معادل با رفتار شبه پلاستیک در نظر گرفت.

نفت های خام سنگین به سبب داشتن مولکول هایی با وزن بالا، ویسکوزیته بالایی دارند. ویژگی فیزیکی ویسکوزیته با نرخ برش مرتبط است، زیرا که با افزایش نرخ برش، به سبب این زنجیره های رزین و آسفالتین در هنگام جداسازی به صورت موازی قرار می گیرند، نفت خام مقاومت کمتری در برابر حرکت از خود نشان می دهد [۳۱].

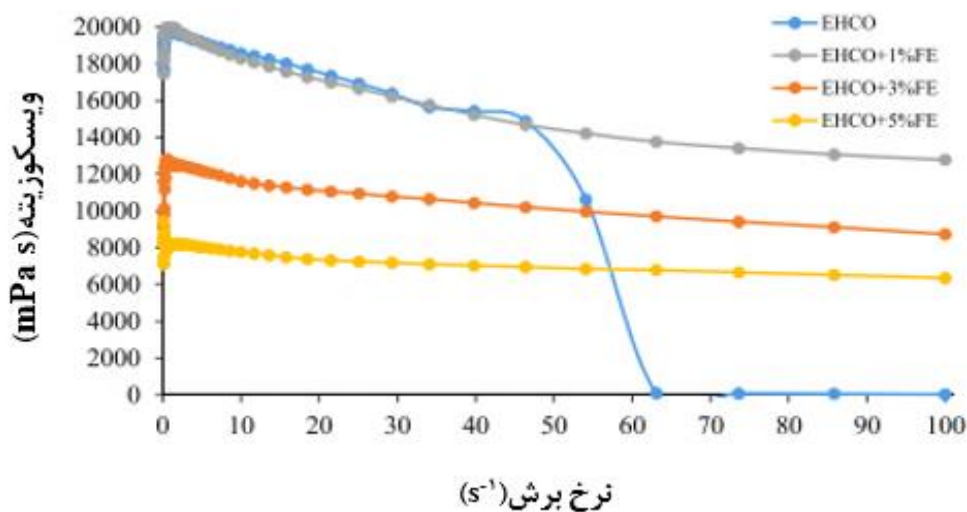
ال وهیبی و همکاران [۳۲] ویسکوزیته امولسیون آب و نفت تثبیت شده با تریتون x-100 را در محدوده دمایی بین ۲۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد با فواصل ۱۰°C، در نرخ های برش بین ۲۷ تا ۲۷۰۰ s<sup>-1</sup> اندازه گیری کردند. نتایج آن ها نشان داد که در همه آزمایش ها، رقیق شونده برشی نفت خام رخ می دهد اما این تأثیر در دمای ۲۰°C، جایی که ویسکوزیته با نرخ برش کمتر ۳۴۹ s<sup>-1</sup>، از ۱۹۲۰ به ۱۱۹۰ mPa s کاهش می یابد، بیشتر است.

در نرخ های برش کم، اجزای سنگین (رزین و آسفالتین) موجود در نفت خام فوق سنگین می توانند برهمکنش میان زنجیره ها و درهم تنیدگی های احتمالی را نشان دهند. این رفتار می تواند به ویسکوزیته سیال مرتبط باشد [۳۳].

با افزایش نرخ برشی وارد شده به سیال، گروه بندی های مولکولی سیال مجدداً آرایش پیدا کرده و برهمکنش هایی بین زنجیره های ماکرومولکول ها رخ می دهد، که این مسئله منجر به تغییرات خاصی در ویسکوزیته سیال می شود. با افزایش تنش برشی، می توان به نوعی از آرایش مولکولی دست یافت که باعث تنظیم دقیق و تراز زنجیره های آسفالتین و رزین می شود. تغییر تراز سبب کاهش شدید در ویسکوزیته سیال همانند سیالات شبه پلاستیک

می‌شود که این مسئله برای EHCO در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  مشاهده شد. این رفتار با نتایج فینگاس و همکاران [۳۴] و سایر اندیشمندان [۳۵، ۳۶] درباره تاثیر نرخ برش بر رئولوژی سوسپانسیون‌های کلئیدی مرتبط و همراستا است، یعنی ذرات می‌توانند به صورت سازماندهی شده درون لایه قرار گرفته و در مسیرهای جریانی با مقاومت کمتر، جریان پیدا کرده و در نتیجه ویسکوزیته سیال را کاهش دهند.

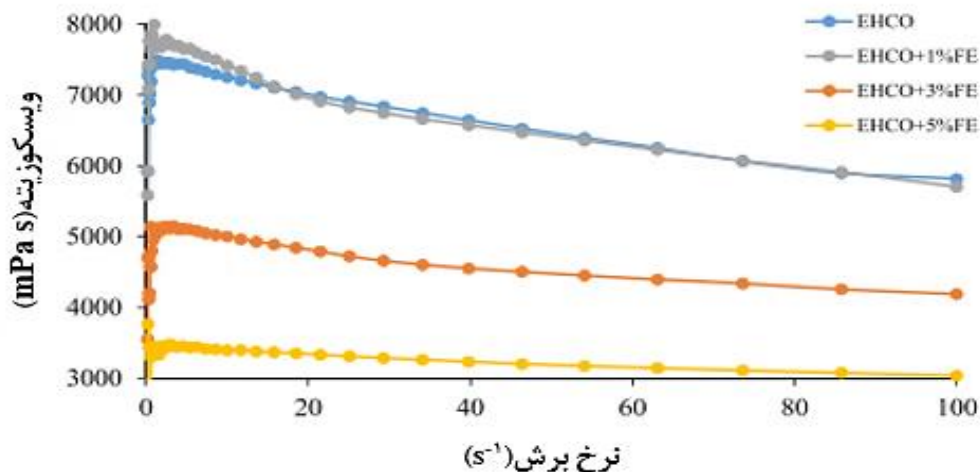
نمونه‌های دارای روان کننده در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  از نرخ برش  $40\text{ s}^{-1}$  اثری مشابه سیال نیوتنی از خود نشان می‌دهند، در این نمونه‌ها تأثیر روان کننده در کاهش ویسکوزیته کاملاً مشهود است. ویسکوزیته نهایی در ۱، ۳ و ۵٪ از روان کننده به ترتیب ۱۹۱۰۲، ۱۲۶۰۶ و  $8734/8\text{ mPa s}$  بدست آمد [۳۷].  
شکل ۲ رئوگرام‌های EHCO با درصد‌های وزنی ۱، ۳ و ۵٪ را در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد.



شکل ۲- رئوگرام‌های نفت خام فوق سنگین به همراه روان کننده در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد

ویسکوزیته EHCO در دمای  $30^{\circ}\text{C}$ ،  $19749\text{ mPa s}$  بدست آمد. ویسکوزیته با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد، پس از کاهش، ویسکوزیته ثابت باقی می‌ماند که این رفتار نشان دهنده یک سیال شبه پلاستیک است، تغییر در ویسکوزیته سیال در محدوده نرخ برش بین  $46/4$  تا  $63/1\text{ s}^{-1}$  مشاهده شد که در این بازه ویسکوزیته به ترتیب از مقدار  $14884\text{ mPa s}$  به مقدار  $101/12\text{ mPa s}$  کاهش یافت و در نهایت مقدار آن در نرخ برش  $100\text{ s}^{-1}$  به مقدار  $36/748\text{ mPa s}$  رسید. نمونه‌های حاوی روان کننده در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  رفتاری مشابه سیال نیوتنی داشتند (از نرخ برش  $40\text{ s}^{-1}$ )، در این نمونه‌ها تأثیر روان کننده بر کاهش ویسکوزیته سیال مشهود بود. در درصد‌های وزنی ۱، ۳ و ۵٪ از روان کننده، ویسکوزیته سیال در نرخ برش  $100\text{ s}^{-1}$ ، به ترتیب،  $12781$ ،  $8731/3$  و  $6357/6\text{ mPa s}$  بدست آمد. همانطور که در شکل های ۱ و ۲ قابل مشاهده است، رفتار کاهشی ویسکوزیته EHCO با افزایش نرخ تزریق، در دمای  $25$  و  $30^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد قابل توجه است. در درصد‌های وزنی مختلف از روان کننده، رئوگرام‌های بدست آمده رفتارهای متفاوتی را نشان دادند.

در شکل ۳ رئوگرام های EHCO در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و در درصدهای وزنی ۱، ۳ و ۵٪ از روان کننده، قابل مشاهده است.

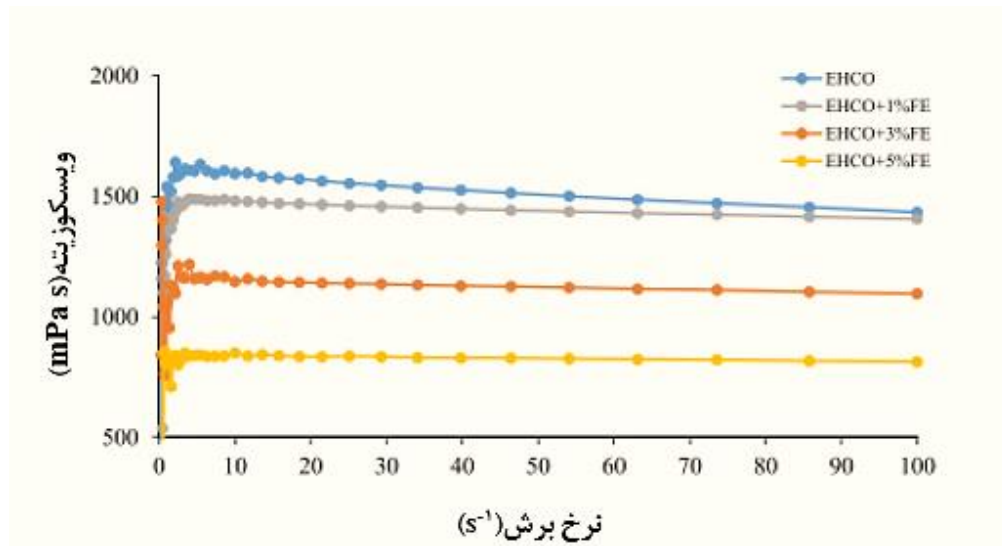


شکل ۳: رئوگرام های نفت خام فوق سنگین به همراه روان کننده در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد

در ابتدا، روند مشابهی در ویسکوزیته EHCO و EHCO به همراه ۱٪ روان کننده مشاهده می شود، که این کاهش در ویسکوزیته می تواند ناشی از تاثیر روان کننده و افزایش دما باشد، در ادامه، روند متفاوتی برای EHCO مشاهده می شود، به طوری که در دمای ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی گراد، ویسکوزیته سیال به دلیل افزایش نرخ برش به شدت کاهش پیدا می کند. روند ویسکوزیته سیال برای ترکیب های EHCO + 3% FE و EHCO + 5% FE نشان دهنده سیال نیوتنی بوده و ویسکوزیته نهایی برای این دو ترکیب به ترتیب  $4188/5 \text{ mPa s}$  و  $3036/6 \text{ mPa s}$  بدست آمد. رئوگرام های ویسکوزیته EHCO به همراه روان کننده، در دمای  $40^{\circ}\text{C}$ ، پایداری عملکردی مناسب تری در کاهش ویسکوزیته نشان دادند.

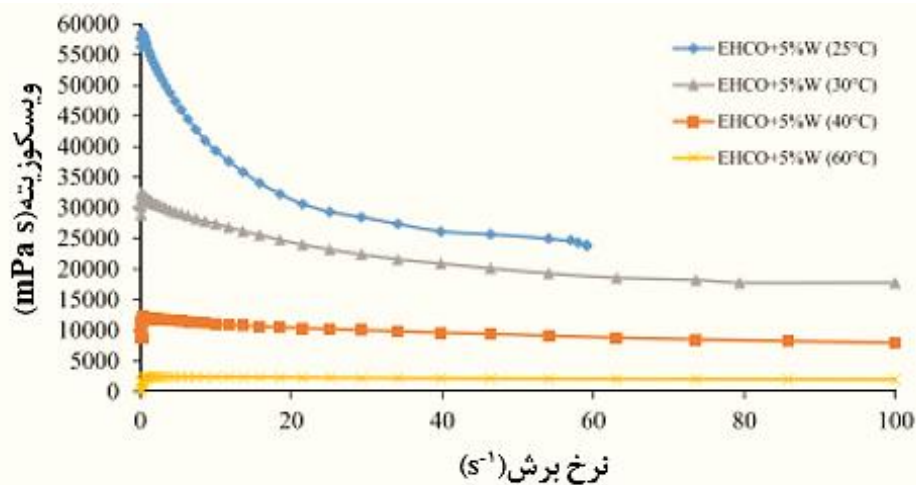
شکل ۴ رئوگرام های نفت خام فوق سنگین به همراه درصدهای ۱، ۳ و ۵٪ از روان کننده را در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  نشان می دهد.





شکل ۴- رئوگرام‌های نفت خام فوق سنگین به همراه روان کننده در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد

ویسکوزیته نهایی برای EHCO (۱۴۳۵ mPa s)، EHCO + 1% FE (۱۴۰۶/۲ mPa s)، EHCO + 3% FE (۱۰۹۶/۶ mPa s)، EHCO + 5% FE (۸۱۴/۴۸ mPa s) بدست آمد. رفتار ویسکوزیته در این نمونه‌ها بسیار شبیه به سیال نیوتنی بوده و ویسکوزیته سیال با افزایش نرخ برش ثابت باقی می‌ماند. رفتار رئوگرام‌های ویسکوزیته نمونه‌های امولسیون‌های آب (۵٪) در نفت خام فوق سنگین (W/EHCO) در شکل ۵ نشان داده شده است.

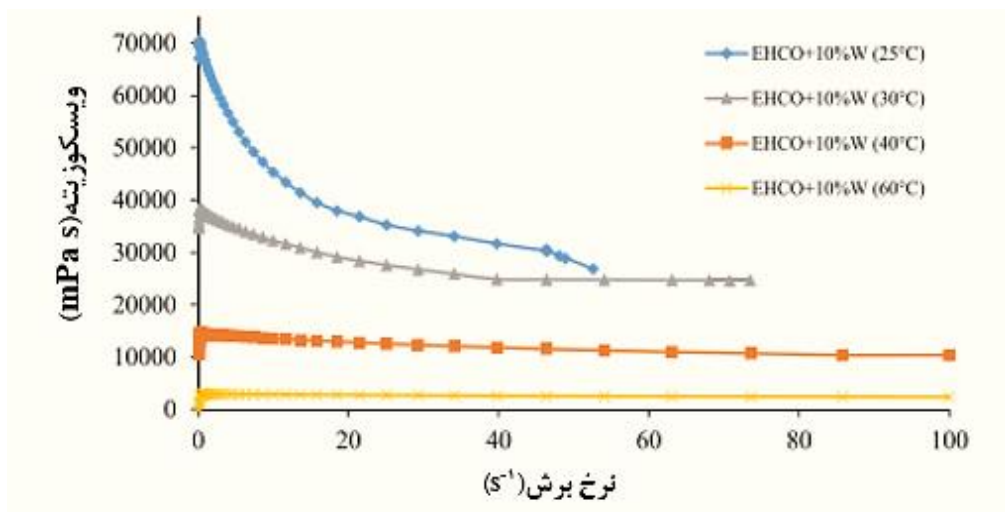


شکل ۵- رئوگرام‌های نفت خام فوق سنگین به همراه آب (۵٪) در دماهای ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۶۰ درجه سانتی گراد

ویسکوزیته امولسیون EHCO + 5% W، در دمای ۲۵°C، نسبت به ویسکوزیته اولیه نفت خام فوق سنگین، ۶۴/۶۳٪ افزایش داشته است. این افزایش در ویسکوزیته، به علت وجود آسفالتین بوده که به عنوان سورفکتانت‌های

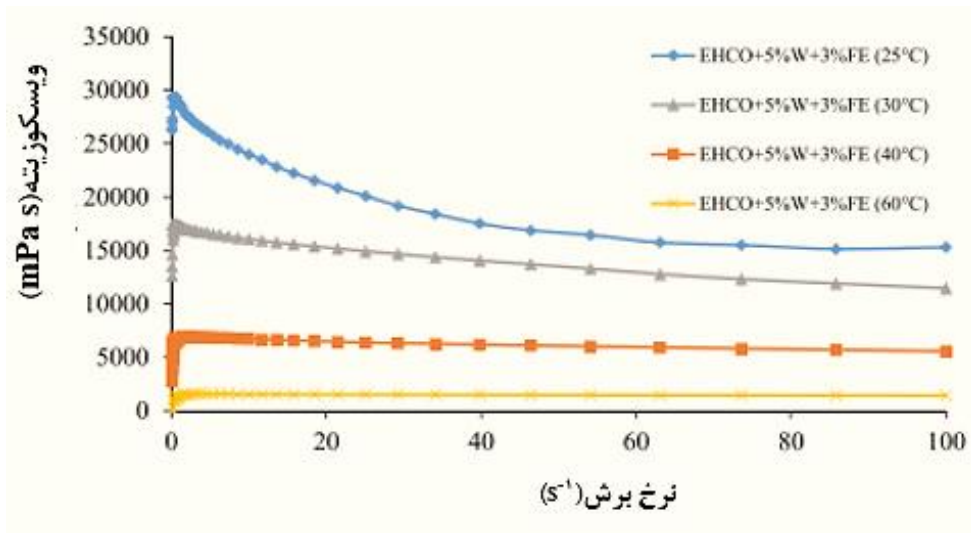
طبیعی در نظر گرفته می‌شوند. امولسیون با تشکیل لایه‌های آسفالتینی در اطراف آب درون قطرات نفت به پایداری می‌رسد. آب از طریق یک سطح متشکل از لایه ویسکوالاستیک آسفالتین که از نظر مکانیکی قوی است، پایدار می‌شود [۳۸]. ویسکوزیته اولیه ECHO + 5% W، ۵۷۷۳۷ mPa s بوده و این عدد تا مقدار ۲۳۸۲۹ mPa s در نرخ برش  $59/2 \text{ s}^{-1}$  کاهش می‌یابد. ویسکوزیته سیال در نرخ برش  $100 \text{ s}^{-1}$ ، به دلیل شرایط و هندسه استفاده شده در این پژوهش بدست نیامد. تاثیر افزایش دما برای کاهش ویسکوزیته امولسیون ECHO + 5% W قابل توجه است، به طوری که در دمای ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد، ویسکوزیته سیال به ترتیب ۱۷۷۸۰، ۷۹۷۲/۵ و ۱۹۶۴/۵ mPa s بدست آمد، این نوع رفتار بسیار مشابه سیالات نیوتنی بوده و به کاهش سختی لایه بین سطحی و کاهش جذب سورفکتانت های طبیعی مانند رزین و آسفالتین موجود در نفت مرتبط می باشد. افزایش مقدار آب امولسیون تا ۱۰٪ در ECHO سبب افزایش ویسکوزیته نمونه‌های بررسی شده شد. ویسکوزیته امولسیون ECHO+10% W، در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  برابر ۷۰۸۴۱ mPa s بدست آمده است. این مقدار تقریباً دو برابر ویسکوزیته مربوط به ECHO در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  است. رزین‌ها و آسفالتین‌ها نقش امولسیفایر طبیعی را ایفا می‌کنند. این مواد یک غشای الاستیک در اطراف قطره تشکیل می‌دهند که این غشا با ایجاد یک جاذبه دو طرفه، مانع از بهم پیوستن قطرات آب و تخریب جاذبه مولکولی شده و در نتیجه سبب افزایش ویسکوزیته سیال می‌شوند.

شکل ۶، روند رئوگرام‌ها را نشان می‌دهد، لازم به ذکر است که ویسکوزیته نهایی امولسیون ECHO + 10% W در دمای ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی گراد به دلیل ویسکوزیته بالا و استفاده از هندسه، در مقادیر نرخ برش ۵۲/۶ و  $70/85 \text{ s}^{-1}$  به ترتیب ۲۶۸۴۷ mPa s و ۲۴۶۰۱ mPa s بدست آمد. تاثیر دما بر روی نمونه‌ها نشان دهنده رفتار یک سیال نیوتنی بود. کاهش جذب سورفکتانت‌های طبیعی در قطرات آب بر کاهش ویسکوزیته سیال موثر بوده و ویسکوزیته سیال به ترتیب ۱۰۳۷۵ و ۲۳۴۹ mPa s بدست آمد.

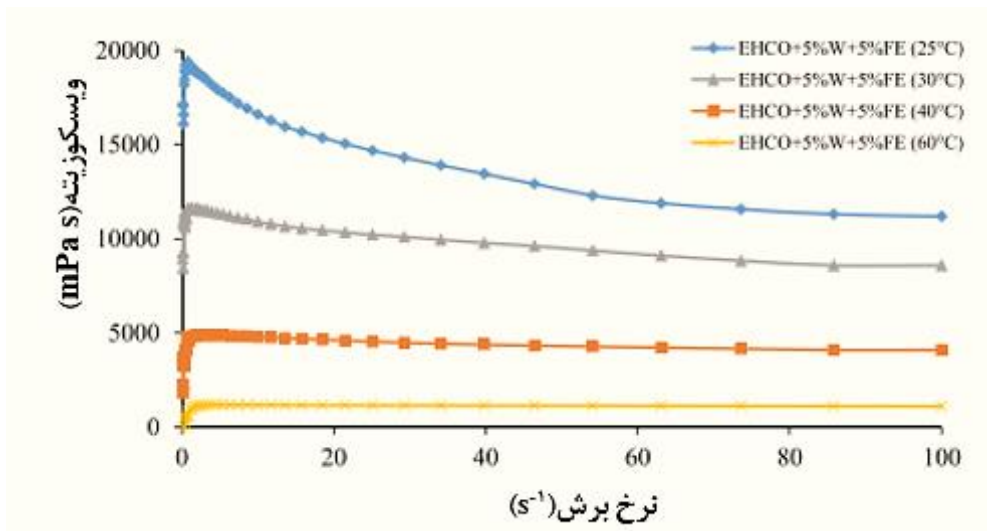


شکل ۶- رئوگرام‌های نفت خام فوق سنگین به همراه آب (۵٪) در دماهای ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۶۰ درجه سانتی گراد

شکل‌های ۷ و ۸، رئوگرام‌های  $\text{EHCO} + 5\% \text{W} + 3\% \text{FE}$ ،  $\text{EHCO} + 5\% \text{W} + 5\% \text{FE}$  را نشان می‌دهد. تاثیر روان کننده در امولسیون‌های  $\text{W/EHCO}$  سبب کاهش ویسکوزیته سیال با افزایش نرخ برش، در دمای  $25^\circ\text{C}$  می شود. برای این امولسیون رفتار شبه پلاستیک مشاهده شد.  $\text{EHCO} + 5\% \text{W} + 3\% \text{FE}$ ،  $\text{EHCO} + 5\% \text{W} + 5\% \text{FE}$  در دمای  $25^\circ\text{C}$  نسبت به  $\text{EHCO} + 5\% \text{W}$  به ترتیب  $49/08\%$  و  $66/65\%$  کاهش ویسکوزیته را نشان دادند. نمونه‌ها در دمای ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد رفتار نیوتنی از خود نشان دادند. تشخیص تاثیر روان کننده بر کاهش ویسکوزیته در تمام نمونه‌های حاوی ۳ و ۵٪ آب ضروری است.

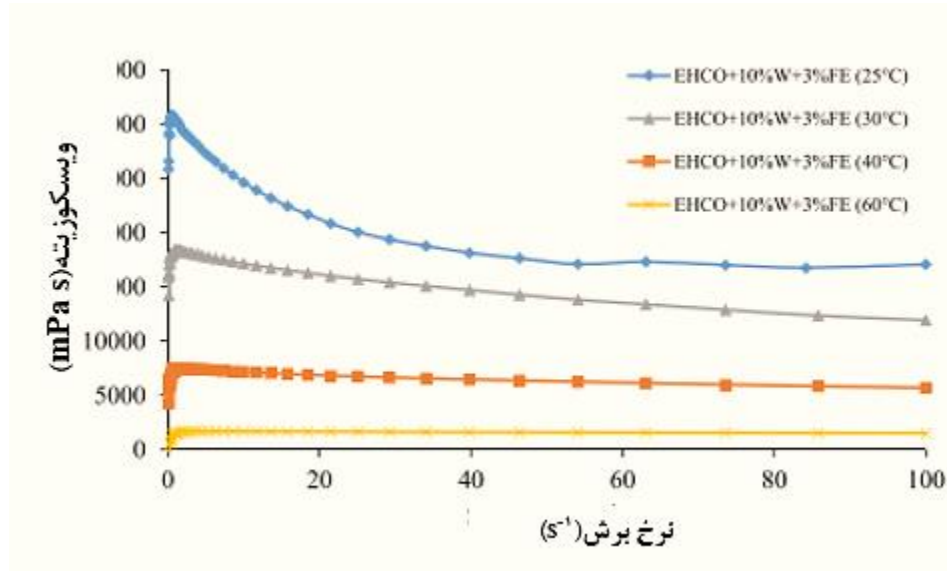


شکل ۷- رئوگرام‌های نفت خام فوق سنگین / آب (۵٪) / روان کننده (۳٪) در دماهای ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۶۰ درجه سانتی گراد

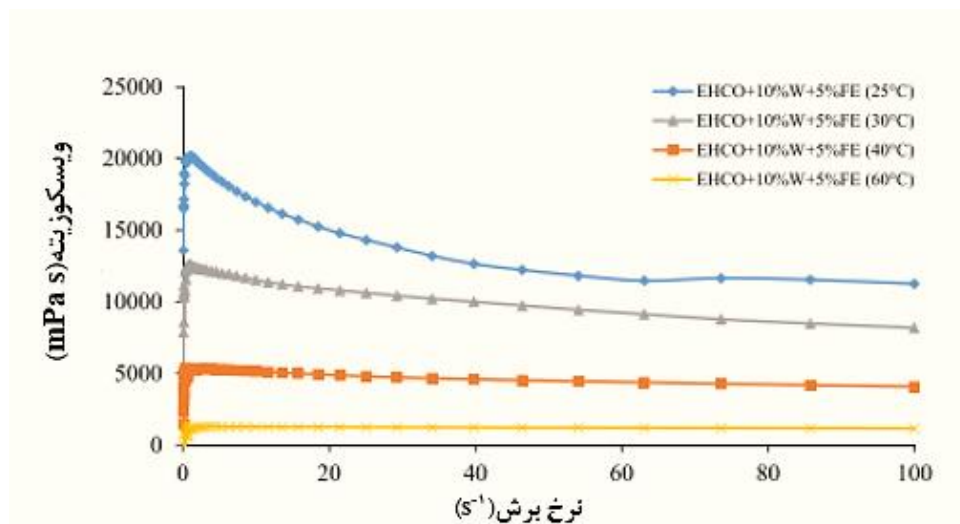


شکل ۸- رئوگرام‌های نفت خام فوق سنگین / آب (۵٪) / روان کننده (۵٪) در دماهای ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۶۰ درجه سانتی گراد

شکل های ۹ و ۱۰، رئوگرام های  $\text{EHCO} + 10\% \text{W} + 3\% \text{FE}$  و  $\text{EHCO} + 10\% \text{W} + 5\% \text{FE}$  را نشان می دهند. روان کننده در امولسیون های  $\text{W/EHCO}$  سبب کاهش ویسکوزیته سیال در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  می شود، برای هر دو نمونه، با افزایش نرخ برش رفتار شبه پلاستیک مشاهده شد. امولسیون های  $\text{EHCO} + 10\% \text{W} + 3\% \text{FE}$  و  $\text{EHCO} + 10\% \text{W} + 5\% \text{FE}$  در دمای  $25^{\circ}\text{C}$ ، به ترتیب  $56/20\%$  و  $71/43\%$  نسبت به  $\text{EHCO} + 10\% \text{W}$  کاهش ویسکوزیته را نشان دادند. برای هر دو نمونه، تاثیر روان کننده و دما سبب ایجاد رفتار نیوتنی در دمای  $40$  و  $60$  درجه سانتی گراد شد.



شکل ۹- رئوگرام های نفت خام فوق سنگین / آب (۱۰٪) / روان کننده (۳٪) در دماهای  $25$ ،  $30$ ،  $40$ ،  $60$  درجه سانتی گراد



شکل ۱۰- رئوگرام های نفت خام فوق سنگین / آب (۱۰٪) / روان کننده (۵٪) در دماهای  $25$ ،  $30$ ،  $40$ ،  $60$  درجه سانتی گراد

ویسکوزیته اولیه و نهایی نمونه‌ها در دماهای ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- ویسکوزیته اولیه و نهایی نمونه‌ها در دماهای ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد

نمونه	ویسکوزیته اولیه (mPa s)				ویسکوزیته نهایی (mPa s)			
	25 °C	30 °C	40 °C	60 °C	25 °C	30 °C	40 °C	60 °C
EHCO	۳۵۲۸۲	۱۹۷۴۹	۷۴۸۰	۱۶۴۲	۴۹/۷۵۶	۳۶/۷۴۸	۵۸۱۶	۱۴۳۵
EHCO+1%FE	۳۵۲۶۲	۱۹۶۵۳	۷۸۲۵/۶	۱۴۹۰/۶	۱۹۱۰۲	۱۲۷۸۱	۵۷۰۴/۲	۱۴۰۶/۲
EHCO+3%FE	۲۰۸۹۱	۱۲۸۱۱	۵۱۴۰/۹	۱۴۷۸/۹	۱۲۶۰۶	۸۷۳۱/۳	۴۱۸۸/۵	۱۰۹۶/۶
EHCO+5%FE	۱۳۲۰۴	۸۶۴۹/۶	۳۴۷۹/۷	۸۵۷/۳۴	۸۷۳۴/۸	۶۳۵۷/۶	۳۰۳۰/۶	۸۱۴/۴۸
EHCO+5%W	۵۷۷۳۷	۳۲۵۴۸	۱۲۳۷۳	۲۴۲۲/۳	۲۳۸۲۹	۱۷۷۸۰	۷۹۷۲/۵	۱۹۶۴/۵
EHCO+10%W	۷۰۴۸۱	۳۸۳۴۹	۱۴۶۶۷	۳۰۷۰/۹	۲۶۸۴۷	۲۴۶۰۱	۱۰۳۷۵	۲۳۴۹
EHCO+5%W+3%FE	۲۹۴۰۰	۱۷۵۰۰	۶۹۰۳/۱	۱۵۸۵/۶	۱۵۲۹۵	۱۱۴۵۳	۵۵۶۷/۵	۱۴۱۸/۵
EHCO+5%W+5%FE	۱۹۲۵۵	۱۱۶۲۵	۴۹۰۵	۱۱۷۲/۴	۱۱۱۹۱	۸۵۷۷/۴	۴۰۸۴/۹	۱۰۸۸/۷
EHCO+10%W+3%FE	۳۰۸۶۷	۱۸۴۳۷	۷۵۰۸/۲	۱۷۰۸/۶	۱۷۰۸۳	۱۱۹۳۷	۵۷۰۸/۲	۱۵۱۰/۲
EHCO+10%W+5%FE	۲۰۱۳۶	۱۲۶۱۸	۵۳۸۴/۸	۱۴۹۳/۶	۱۱۲۶۴	۸۱۸۸	۴۰۹۰/۸	۱۱۶۲/۶

تاثیر غلظت‌های ۱، ۳ و ۵٪ از روان‌کننده بر ویسکوزیته نفت خام فوق سنگین با دمای بین ۲۵ و ۶۰ درجه سانتی گراد نشان دهنده یک رفتار نیوتنی از نرخ برش  $s^{-1}$  ۴۰ بود و ویسکوزیته نهایی سیال نیز در دما  $^{\circ}C$  ۲۵ بین ۴۵ تا ۷۵٪ در دمای  $^{\circ}C$  ۳۰ بین ۶۳ تا ۸۱٪، در دمای  $^{\circ}C$  ۴۰ بین ۸۳ تا ۹۱٪ و در دمای  $^{\circ}C$  ۶۰ بین ۹۶ تا ۹۷٪ نسبت به ویسکوزیته EHCO (۳۵۲۸۲ mPa s) کاهش نشان می‌داد. نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰٪ آب، در دمای  $^{\circ}C$  ۲۵، به ترتیب ۶۳/۶٪ و ۹۹/۷٪ افزایش ویسکوزیته نشان دادند، از طرفی با افزایش دما ویسکوزیته نمونه‌ها کاهش یافت. وجود آب به دلیل تشکیل شدن لایه‌ای از رزین و آسفالتین اطراف قطرات آب، بر پایداری امولسیون تاثیرگذار است و این مسئله سبب افزایش ویسکوزیته امولسیون می‌شود. وقوع نیروی برشی در تجهیزات و دیگر لوازم (پمپ‌ها شیرها، خطوط لوله و زانویی‌ها) سبب تشکیل امولسیون در حین فرآیندهای بالا آمدن، جابه‌جایی و هدایت نفت خام در سطح می‌شود. در همه موارد، نمونه‌های حاوی آب و روان‌کننده، کاهش در ویسکوزیته (< ۵۰٪) را نشان دادند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱. دما بر ویسکوزیته نفت خام تاثیرگذار است. خواص رئولوژیکی جریان در دماهای پایین را می توان با حرارت دادن تا دمایی در حدود ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد و یا استفاده از روان کننده هایی بر پایه استرهای اسیدهای چرب، به طور قابل ملاحظه ای بهبود بخشید.
۲. کاهش ویسکوزیته و رفتار نیوتنی جریان با استفاده از روان کننده در درصدهای ۱، ۳ و ۵٪ از اهداف انجام شده در این مقاله بود که این مسئله سبب کاهش هزینه عملیات حرارتی در طول فرآیند حمل و نقل نفت خام از طریق خط لوله می گردد.
۳. افزودن روان کننده ها می تواند به منظور جابه جایی نفت خام از طریق خطوط لوله بکار گرفته شود. درصدهای وزنی ۱، ۳ و ۵٪ از روان کننده در دمای  $25^{\circ}\text{C}$ ، سبب کاهش ۴۵، ۶۴ و ۷۵٪ در ویسکوزیته نهایی ( $100\text{ s}^{-1}$ ) می شود.
۴. افزودن ۵ و ۱۰٪ وزنی آب به نفت خام فوق سنگین، سبب افزایش ۶۰٪ ویسکوزیته و تشکیل امولسیون آب در نفت خام می شود. مشکل جدی تشکیل امولسیون آب در نفت می تواند در حین فرآیند بازیابی، تصفیه، حمل و نقل و پالایش نفت ایجاد شود. این امولسیون ها با تشکیل یک لایه سخت در سطح تماس بین نفت و آب به پایداری می رسند.
۵. رفتار امولسیون های تشکیل شده به وسیله خواص آسفالتین ها و رزین های موجود در لایه جذب شده کنترل می شوند. پیچیدگی امولسیون آب در نفت به ترکیب نفت وابسته است، زیرا که بیشتر مولکول هایی که در لایه سطحی تشکیل می شوند، مولکول های دوگانه دوست هستند. با این وجود، از طریق استفاده از روان کننده ها و دماهای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد می توان با افزایش ویسکوزیته ناشی از تشکیل امولسیون مقابله کرد.

## منابع

- [1] R. Kumar, S. Mohapatra, A. Mandal, T.K. Naiya, Studies on the effect of surfactants on rheology of synthetic crude, J. Pet. Sci. Res. 3 (2) (2014) 90e99, <https://doi.org/10.14355/jpsr.2014.0302.06>.
- [2] S. Gharfeh, A. Yen, S. Asomaning, D. Blumer, Asphaltene flocculation onset determinations for heavy crude oil and its implications, Petrol. Sci. Technol. 22 (2004) 1055–1072.
- [3] P. Gateau, I. H'enant, L. Barr'e, J.F. Argillier, Heavy oil dilution, Oil Gas Sci. Technol. 59 (5) (2004) 503–509, <https://doi.org/10.2516/ogst:2004035>.
- [4] S.O. Ilyin, M.P. Arinina, M.Y. Polyakova, V.G. Kulichikhin, A.Y. Malkin, Rheological comparison of light and heavy crude oils, Fuel 186 (2016) 157e167, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.072>.
- [5] M.G. Rezk, J. Foroozesh, Phase behavior and fluid interactions of a CO<sub>2</sub>-Light oil system at high pressures and temperatures, Heliyon 5 (7) (2019), e02057, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02>.
- [6] B. Williams, Heavy hydrocarbons playing key role in peak-oil debate, future energy supply, Oil Gas J. 101 (2003) 20–27.
- [7] Schlumberger, Highlighting heavy oil, Oilfield Review Summer 18 (2006) 2.

- [8] R.G. Santos, W. Loh, A.C. Bannwart, O.V. Trevisan, An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods, *Braz. J. Chem. Eng.* 31 (2014)571–590
- [9] K. Guo, H. Li, Z. Yu, In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: a review, *Fuel* 185(2016)886–902.
- [10] Robert H. Perry, *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, sixth ed., McGraw Hill, 1984.
- [11] I.W.R. Widarta, A. Rukmini, U. Santoso, Supriyadi, S. Raharjo, Optimization of oil-in-water emulsion capacity and stability of octenyl succinic anhydridemodified porang glucomannan (*Amorphophallus muelleri* Blume), *Heliyon* 8 (2022), e09523, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09523>.
- [12] F. Zhao, Y. Liu, Z. Fu, X. Zhao, Using hydrogen donor with oil-soluble catalysts for upgrading heavy oil, *Russ. J. Appl. Chem.* 87 (2014) 1498–1506.
- [13] L. Mateus, E.A. Taborda, C. Moreno-Castilla, M.V. Lopez-Ramón, C.A. Franco, F.B. Cortés, Extra-heavy crude oil viscosity reduction using and reusing magnetic copper ferrite nanospheres, *Processes* 9 (2021) 175, <https://doi.org/10.3390/pr9010175>.
- [14] J. Adams, Asphaltene adsorption, a literature review, *Energy Fuel*. 28 (2014) 2831–2856, <https://doi.org/10.1021/ef500282p>.
- [15] F. Souas, A. Safri, A. Benmounah, A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation, *Petroleum Research* (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001>.
- [16] S. Banerjee, R. Kumar, I. Ansari, A. Mandal, T.K. Naiya, Effect of extracted natural surfactant on flow behaviour of heavy crude oil, *Int. J. Oil Gas Coal Technol.* 13 (3) (2016) 260e276, <https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2016.079266>.
- [17] D.E. Djemiat, A. Safri, A. Benmounah, B. Safi, Rheological behavior of an Algerian crude oil containing Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate (SDBS) as a surfactant: flow test and study in dynamic mode, *J. Petrol. Sci. Eng.* 133 (2015) 184–191, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.05.012>.
- [18] E.J. Suarez, J.F. Perez-Sanchez, A. Palacio-Perez, E. Izquierdo-Kulich, S. Gonzalez-Santana, Flow enhancer influence on non-isothermal systems for heavy crude oil production, *Acta Univ.* 30 (2020), e2645.
- [19] O.A. Alomair, A.S. Almusallam, Heavy crude oil viscosity reduction and the impact of asphaltene precipitation, *Energy Fuel*. 27 (12) (2013) 7267–7276, <https://doi.org/10.1021/ef4015636>.
- [20] J.F. Perez-Sanchez, R.R. Gallegos-Villella, J. Gomez-Espinoza, E.J. Suarez-Domínguez, Determining the effect of a viscosity reducer on water-heavy crude oil emulsions, *Int. J. Eng. Adv. Technol.* 8 (2019) 844–848.
- [21] T.K. Naiya, S. Banerjee, R. Kumar, A. Mandal, Heavy crude oil rheology improvement using naturally extracted surfactant, *SPE Oil & Gas India Conference and Exhibition* (2015), <https://doi.org/10.2118/178133-ms>
- [22] Rincy Anto, Sameerjit Deshmukh, Saheli Sanyal, Uttam K. Bhui, Nanoparticles as flow improver of petroleum crudes: study on temperature-dependent steady-state and dynamic rheological behavior of crude oils, *Fuel* 275 (2020), 117873, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117873>.
- [23] Al-Roomi Yousef, Reena George, Elgibaly Ahmed, Elkamel Ali, Use of a Novel Surfactant for Improving the Transportability/transportation of Heavy/viscous Crude Oils, vol. 42, 2004, pp. 235–243, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2003.12.014>, 2-4.

- [24] A.B. Bazyleva, M.A. Hasan, M. Fulem, M. Becerra, J.M. Shaw, Bitumen and heavy oil rheological properties: reconciliation with viscosity measurements, *J.Chem. Eng. Data* 55 (3) (2010) 1389–1397, <https://doi.org/10.1021/je900562u>.
- [25] M.T. Ghannam, S.W. Hasan, B. Abu-Jdayil, N. Esmail, Rheological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flowability, *J. Petrol. Sci. Eng.* 81 (2012) 122e128, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.12.024>.
- [26] P.E. Clark, A. Pilehvari, Characterization of crude oil-in- water emulsions, *J. Pet. Sci. Eng.* 9 (1993) 165–181, [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(93\)90013-5](https://doi.org/10.1016/0920-4105(93)90013-5).
- [27] ASTM D287, Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products, ASTM international, West Conshohocken, PA, USA, 2012.
- [28] ASTM D891, Standard Test Methods for Specific Gravity, Apparent, of Liquid Industrial Chemicals, ASTM international, West Conshohocken, PA, USA, 2009.
- [29] N.J. Wagner, J.F. Brady, Shear thickening in colloidal dispersions, *Phys. Today* 62(10)(2009)27–32, <https://doi.org/10.1063/1.3248476>.
- [30] R. Kumar, G.S. Bora, S. Banerjee, A. Mandal, T.K. Naiya, Application of naturally extracted surfactant from *Madhuca longifolia* to improve the flow properties of heavy crude oil through horizontal pipeline, *J. Pet. Sci. Eng.* 168 (2018) 178–189, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.0>.
- [31] ASTM D2007, Standard Test Method for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils and Other Petroleum-Derived Oils by the Clay-Gel Absorption Chromatographic Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011.
- [32] T. Al-Wahaibi, Y. Al-Wahaibi, A.-A.R. Al-Hashmi, F.S. Mjalli, S. Al-Hatmi, Experimental investigation of the effects of various parameters on viscosity reduction of heavy crude by oil–water emulsion, *Petrol. Sci.* 12 (1) (2015) 170–176, <https://doi.org/10.1007/s12182-014-0009-2>.
- [33] Thomas Mezger, *The Rheology Handbook: for Users Of Rotational And Oscillatory Rheometers* (2<sup>o</sup> Edicion), Vincentz Network, Hannover, 2006, p. 34.
- [34] M. Fingas, B. Fieldhouse, Studies on crude oil and petroleum product emulsions: water resolution and rheology, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 333 (1) (2009) 67–81, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.09.029>.
- [35] Etapa 7 Reporte Final. Noviembre Fondo Sectorial CONACYT-SENER-HIDROCARBUROS, Analisis y optimizacion de un aditivo para disminuir la fricción en ductos Segunda fase: Efecto de biorreductor de Viscosidad (BRV) en mezclas bifasicas, Ejecucion de pruebas de campo en pozos de PEMEX, 2018.
- [36] R. Paul Singh Heldman, *Introduction To Food Engineering* (5<sup>o</sup> Edicion), Elsevier, Amsterdam, 2013, p. 160.
- [37] D.T.N. Chen, Q. Wen, P.A. Janmey, J.C. Crocker, A.G. Yodh, Rheology of Soft Materials. *Annual Review of Condensed Matter Physics* 1 (1) (2010) 301–322, <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-070909-104120>.
- [38] A.P. Sullivan, N.N. Zaki, J. Sjoblom, P.K. Kilpatrick, The stability of water-in-crude and model oil emulsions, *Can. J. Chem. Eng.* 85 (6) (2008) 793–807, <https://doi.org/10.1002/cjce.5450850601>.



