

بررسی روش‌های انتقال نفت خام سنگین و قیر طبیعی با استفاده از خطوط لوله

محمدعلی صفوی*

پژوهنده ارشد، پژوهشکده پالایش، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

دریافت: 94/4/1 پذیرش: 94/10/1

چکیده

تولید نفت خام سنگین و قیر طبیعی¹ به‌طور متوسط دو برابر تولید نفت‌های متعارف نیازمند صرف هزینه و انرژی است. خطوط لوله به عنوان راحت‌ترین ابزار انتقال نفت خام از محل تولید تا پالایشگاه شناخته می‌شوند. با این حال انتقال نفت خام سنگین و قیر طبیعی به دلیل عدم توانایی این ترکیبات در حرکت آزادانه و راحت بسیار پیچیده است. بدون کاهش اولیه در میزان گرانروی نفت خام سنگین و قیر طبیعی، انرژی عظیمی به‌منظور غلبه بر افت فشار زیاد خط لوله به‌واسطه گرانروی بالای این دسته از مواد در شرایط مخزن مورد نیاز خواهد بود. در مطالعه و بررسی حاضر ضمن مرور تکنولوژی‌های متفاوت جهت انتقال نفت خام سنگین، مزایا و معایب هر روش نیز مشخص شده است. هدف از این کار فراهم نمودن مسیری به‌منظور بهبود بخشیدن و توسعه تکنولوژی‌های جدید جهت انتقال نفت خام سنگین و قیر طبیعی از طریق خطوط لوله است.

کلمات کلیدی: نفت سنگین، قیر طبیعی، حمل و نقل

مقدمه

طبق اعلام موسسه انرژی ایالات متحده، آژانس بین‌المللی انرژی² (IEA) و انجمن جهانی انرژی تقاضا برای انرژی همراه با افزایش جمعیت جهان به‌طور سالیانه افزایش می‌یابد. تقاضای جهانی برای نفت خام در طی 20 سال گذشته از 60 میلیون بشکه در روز به 84 میلیون بشکه در روز افزایش یافته است [1]. در گذشته، به دلیل هزینه‌های زیاد استخراج، انتقال، پالایش و قیمت کم در بازار، تولید نفت خام سنگین و قیر طبیعی غیر اقتصادی ارزیابی می‌شد. از سوی دیگر، کاهش منابع نفتی متوسط و سبک همراه با تقاضای روزافزون انرژی در جهان انگیزه‌ای برای استخراج و بهره‌برداری از این منابع هیدروکربنی شده است. در کانادا، حدود

* safavima@ripi.ir

¹ Bitumen

² International Energy Agency

700000 بشکه در روز نفت سنتزی از نفت خام سنگین و شن‌های نفتی تولید شده و از طریق خطوط لوله به پالایشگاه‌هایی در کانادا و آمریکا منتقل می‌شود [2].

استخراج و فرآوری نفت خام‌های سنگین و قیر طبیعی به دلیل گرانی (بعبارت دیگر مقاومت در برابر جریان یافتن) زیاد آن‌ها در شرایط مخزن، که موجب کم شدن قابلیت جابجایی آن‌ها می‌شود، و همچنین نسبت‌های زیاد کربن به هیدروژن، سخت و دشوار است. با این وجود با افزایش قیمت نفت خام، کاهش ذخایر نفت خام متوسط و سبک و فراوانی نفت خام‌های غیر متعارف (یعنی نفت‌های سنگین و شن‌های نفتی یا قیر طبیعی) استخراج و بهره‌برداری از این منابع مورد توجه قرار گرفته است. با این وجود، بهره‌برداری از منابع نفت خام سنگین و قیر طبیعی به لحاظ تکنولوژی در تمامی مراحل از جمله استخراج و تولید از مخزن تا انتقال و پالایش در پالایشگاه با مشکلات متعددی همراه است. به دلیل چگالی و گرانی زیاد نفت خام سنگین و قیر طبیعی (گرانی بیشتر از 1000 cP) و قابلیت جابجایی بسیار کم در دمای مخزن، انتقال آن‌ها از طریق خطوط لوله معمولاً با چالش همراه خواهد بود. انتقال و پالایش این ترکیبات به دلیل حضور رسوب آسفالتین، فلزات سنگین، گوگرد و نمک با استفاده از روش‌های متداول پالایشی و بدون ارتقاء کیفیت اولیه آن‌ها بمنظور رسیدن به خصوصیات معمول نفت خام سبک بسیار دشوار خواهد بود [3و4]. گرانی زیاد (10^3 تا 10^6 cP) و میزان API کم نفت‌های سنگین (در مورد نفت سنگین کمتر از 20 و برای نفت فوق سنگین کمتر از 10) از میزان زیاد آسفالتین و سهم نسبی کم ترکیباتی با جرم مولکولی کم ناشی می‌شود. نفت خام‌های سنگین و فوق سنگین ممکن است حاوی مقادیر زیادی گوگرد، نمک و فلزاتی از قبیل نیکل و وانادیم باشند. انتقال این ترکیبات از طریق خط لوله همراه با مشکلاتی نظیر ناپایداری آسفالتین‌ها، رسوب پارافین و گرانی زیاد که موجب ایجاد جریان چندفازی، گرفتگی لوله‌ها، افت فشارهای زیاد و ایجاد وقفه در مسیر تولید شود. با این وجود، این دسته از مواد نفتی توجه رو به رشدی را از سوی صنعت نفت به خود جلب کرده است. روند موجود در افزایش بهره‌برداری از نفت خام سنگین و قیر طبیعی به علت کاهش ذخایر نفت خام متوسط و سبک، عرضه محدود و افزایش قیمت نفت خام بوده است. در حال حاضر کانادا و ونزوئلا اصلی‌ترین کشورهای هستند که از ذخایر نفت خام سنگین بهره‌برداری می‌کنند. 95% نفت خام سنگین تولید شده در کانادا و ونزوئلا از طریق خطوط لوله انتقال می‌یابد. علت این امر آن است که خط لوله کم هزینه، سازگار با محیط زیست و موثرترین ابزار جهت انتقال نفت خام از میدان بهره‌برداری تا پالایشگاه است [5-7].

روش‌های بازیافت اصلی مانند روش بازیافت اولیه، که به انرژی طبیعی موجود در مخزن برای بیرون فرستادن نفت خام از چاه وابسته است، جهت برداشت نفت خام سنگین و قیر طبیعی ناکافی است که علت این موضوع نیز گرانی بی‌نهایت زیاد و مقاومت سیال در برابر جاری شدن است. بنابراین، بعد از انجام روش‌های اولیه و ثانویه بازیافت جهت تولید و استخراج نفت باقی‌مانده روش‌های ازدیاد برداشت از طریق اعمال انرژی گرمایی یا تزریق یک سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد [4]. روش‌های ازدیاد برداشت به‌طور کلی به روش‌های گرمایی، به‌کارگیری حلال (هیدروکربن‌های سبک، گاز، دی‌اکسید کربن، نیتروژن و ...)، شیمیایی (تزریق مواد سورفکتانت، ترکیبات آلكالین، مواد پلیمری و ...) و روش‌های بیولوژیکی تقسیم



می‌شوند. با این حال، پر کاربردترین روش‌های ازدیاد برداشت روش‌های حرارتی هستند زیرا در این روش‌ها گرانیوی نفت خام سنگین و قیر طبیعی، بر خلاف سایر روش‌های غیر حرارتی که روند کاهش گرانیوی کاملاً آهسته و وابسته به میزان انتشار و پراکندگی مایعات خواهد بود، به سرعت تا چندین مرتبه کاهش می‌یابد. در این میان متداول‌ترین روش حرارتی ازدیاد برداشت که در صنعت نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیل زنی بخار، چرخه تشدید بخار¹ (CSS)، تزریق بخار همراه با جدایش ثقلی² (SAGD)، احتراق درجا³ (ISC)، روش تزریق هوا و ایجاد آتش⁴ (THAI) است. در تمام این موارد هدف افزایش قابلیت حرکت و تحرک نفت خام سنگین و قیر از طریق کاهش گرانیوی بمنظور بهبود بازیابی یا تولید و به دنبال آن بهبود شرایط انتقال از طریق خط لوله است. تمایل موجود به بهره‌برداری از منابع نفت خام سنگین و قیر طبیعی در صنعت نفت منجر شده تا به مرور روش‌ها و تکنولوژی‌های مختلفی جهت انتقال این ترکیبات توسعه یابد. نکته مهم در مورد نفت خام سنگین سهم بالای ترکیباتی با وزن مولکولی بالا از جمله آسفالتین‌ها است. در همین راستا ممکن است مشکلاتی به دلیل ناپایداری آسفالتین از قبیل ایجاد رسوب آسفالتین در اثر کاهش فشار تا زیر فشار شروع رسوب آسفالتین به هنگام انتقال نفت خام سنگین بروز نماید [8]. همچنین بروز گرفتگی در دیواره لوله در نتیجه ته‌نشینی آسفالتین نیز ممکن است رخ داده که موجب کاهش سطح مقطع لوله برای عبور سیال نفتی شده و ضمن کاهش شدت جریان، موجب افزایش افت فشار و ایجاد جریان چندفازی می‌شود [5 و 8].

روش‌های مختلفی به منظور بهبود و تسهیل انتقال نفت سنگین از طریق خط لوله وجود دارد که از آن جمله می‌توان به پیش گرم کردن نفت در کنار گرم نمودن خط لوله، اختلاط و رقیق‌سازی نفت با استفاده از هیدروکربن‌های سبک، تشکیل امولسیون نفت سنگین در آب، ارتقاء کیفیت نسبی و ایجاد جریان حلقوی در مرکز لوله اشاره نمود [9]. در این مقاله سعی شده است تا تکنولوژی‌های مختلف موجود برای انتقال نفت خام سنگین از نظر مزایا و معایب هر روش مورد بررسی شده است با این هدف که بتواند در جهت انجام تحقیقات و آزمایش‌های تکمیلی بمنظور رسیدن به راه حلی عملی برای بهبود انتقال اقتصادی نفت سنگین مورد استفاده قرار گیرد.

انتقال نفت خام سنگین

به منظور انتقال بهینه و اقتصادی نفت خام سنگین، می‌بایست از طریق کم کردن افت فشار خط لوله توان مورد نیاز پمپ جهت پمپاژ نفت در یک مسیر طولانی را به حداقل رساند. با این وجود، به علت گرانیوی بالای این ترکیبات در شرایط مخزن در مقایسه با نفت خام‌های سبک معمول، استفاده از خطوط لوله متداول جهت انجام انتقال نفت خام سنگین و قیر طبیعی به پالایشگاه مناسب نبوده و حتماً می‌بایست ابتدا گرانیوی این ترکیبات کاهش یابد [10]. همانطوری که در شکل 1 نیز نشان داده شده است، به‌طور کلی

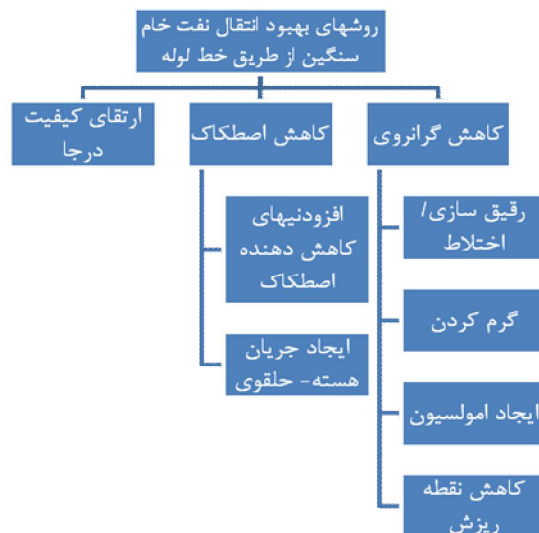
¹ Cyclic Steam Stimulation

² Steam-Assisted Gravity Drainage

³ In Situ Combustion

⁴ Toe-to-Heel Air Injection

روش‌های مورد استفاده جهت بهبود انتقال نفت سنگین و قیر طبیعی از طریق خط لوله را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود:



شکل 1. دسته بندی روش‌های مختلف بهبود انتقال نفت سنگین و قیر طبیعی با استفاده از خط لوله

الف- کاهش گرانروی (برای مثال پیش گرم نمودن نفت خام سنگین و قیر طبیعی و به دنبال آن گرم نمودن خط لوله، اختلاط و رقیق سازی به کمک ترکیبات هیدروکربنی سبک یا حلال، ایجاد امولسیون نفت در آب و کاهش نقطه ریزش نفت به وسیله عامل کاهش دهنده نقطه ریزش¹ (PPD)،
 ب- کاهش اصطکاک (برای مثال روان کاری خط لوله با استفاده از یک جریان مرکزی از افزودنی‌های کاهش دهنده اصطکاک)
 ج- ارتقا و تبدیل درجای² نفت سنگین و تولید یک نفت مصنوعی با گرانروی و درجه API بهبود یافته و با کمترین میزان آسفالتین، گوگرد و فلزات سنگین.

روش‌های کاهش گرانروی

رقیق سازی

رقیق سازی نفت خام سنگین به منظور کاهش گرانروی یکی از ابزارهای بهبوددهنده انتقال از طریق خط لوله است که به عنوان یک روش معمول از دهه 1930 در صنعت نفت استفاده می‌شود. سیال رقیق کننده همیشه نسبت به نفت خام سنگین و قیر طبیعی از گرانروی کمتری برخوردار است. به خوبی مشخص است که هرچه گرانروی سیال رقیق کننده کمتر باشد به همان میزان گرانروی مخلوط حاصل نیز کاهش بیشتری خواهد داشت [11]. عمده ترین رقیق کننده‌های مورد استفاده میعان‌ات گاز طبیعی، نفتا، نفت سفید

¹ Pour Point Depressant

² In situ upgrading

و نفت خام‌های سبک‌تر می‌باشند. با این حال، استفاده از حلال‌های آلی از قبیل الکل، متیل ترشیو بوتیل اتر، ترشیو آمیل متیل اتر نیز مورد بررسی قرار گرفته است [12]. استفاده از این حلال‌های آلی بر اساس کاربرد آن‌ها بعنوان بهبود دهنده عدد اکتان بنزین مورد توجه قرار گرفت. مخلوطی از هیدروکربن‌ها و حلال‌های آلی که دارای گروه قطبی در ساختار مولکولی خود هستند، تاثیرات مثبتی را در جهت کاهش گرانروی نفت خام سنگین در میزان رقیق‌سازی ثابت نشان داده‌اند [11]. با استفاده از رقیق‌سازی امکان انتقال مقادیر زیادی نفت خام سنگین فراهم می‌شود. مخلوط حاصل از اختلاط نفت خام سنگین و عامل رقیق‌کننده گرانروی کمتری داشته و در نتیجه با صرف هزینه کمتری به راحتی توسط پمپ منتقل می‌شود. رقیق‌سازی نفت خام سنگین به منظور بهبود بخشیدن به فرآیند انتقال آن از طریق خط لوله نیازمند دو سری خط لوله است، یکی برای نفت و دیگری جهت انتقال رقیق‌کننده بازیافت شده به ابتدای مسیر انتقال. البته مشخص است که استفاده از رقیق‌کننده جهت بهبود شرایط انتقال نفت خام سنگین تنها در صورتی که عامل رقیق‌سازی نسبتاً ارزان و به راحتی در دسترس باشد، به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود. میزان رقیق‌کننده مورد نیاز برای نفت خام سنگین یا به عبارت دیگر نسبت رقیق‌کننده در مخلوط نهایی از 0 تا 20% متغیر بوده در حالیکه در مورد قیر طبیعی این میزان در بازه 25 تا 50% قرار می‌گیرد.

میعانات سبک گاز طبیعی (ترکیبات C5+) مخلوط از هیدروکربن‌های مایع با چگالی و گرانروی کم است که بعنوان یک محصول جانبی در فرآوری گاز طبیعی بدست می‌آید. این میعانات که از گاز طبیعی بازیابی می‌شود به عنوان عامل رقیق‌سازی نفت خام سنگین و قیر طبیعی در میدان‌های نفتی کانادا و ونزولا با هدف بهبود شرایط انتقال این ترکیبات سنگین از طریق خط لوله مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه از اختلاط نفت خام سنگین و قیر طبیعی با میعانات گازی گرانروی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما رسوب، تفکیک و تجمع آسفالتین موجب بروز ناپایداری در حین انتقال و ذخیره‌سازی خواهد شد [13]. علت این موضوع آن است که آسفالتین موجود در نفت خام سنگین در آلکان‌ها نظیر نرمال پنتان و هپتان‌ها نامحلول بوده و میعانات نیز بعنوان یک نفت سبک غنی از پارافین شناخته می‌شود. همچنین ذرات آسفالتین تمایل دارند با یکدیگر برهمکنش داشته و تجمع یابند. گرانروی مخلوط حاصل از نفت و میعانات به مواردی از جمله خصوصیات نفت خام سنگین یا قیر، خصوصیات میعانات، میزان رقیق‌سازی، نسبت نفت سنگین به میعانات و همچنین دمای عملیاتی بستگی دارد. محدودیت‌هایی که می‌تواند در استفاده از میعانات وجود داشته باشد عبارت است از: در دسترس بودن آن که وابسته به تقاضا برای گاز طبیعی است، به علت تولید در حال رشد نفت خام سنگین و قیر طبیعی تولید میعانات به اندازه‌ای نیست که بتواند پاسخگوی نیاز موجود جهت استفاده بعنوان رقیق‌کننده باشد. همچنین بیشتر اجزای آن نیز حلال‌های خوبی برای آسفالتین نبوده و در نتیجه ممکن است ته نشینی و رسوب افزایش یابد. ناپایداری میعانات در هنگام ذخیره‌سازی نیز از دیگر محدودیت‌های آن است.

در این زمینه استفاده از نفت خام سبک نیز مورد بررسی قرار گرفته اما در مقایسه با میعانات از اثر بخشی کمتری در کاهش گرانروی نفت خام سنگین و قیر طبیعی برخوردار است [14 و 15]. سازگاری نفت سبک در کنار در دسترس بودن آن در مقابل کاهش ذخایر نفت‌های خام سبک معمولی، کاربرد و استفاده آن را

به‌عنوان ترکیب رقیق‌کننده نفت خام سنگین محدود ساخته است. بر اساس مطالعات انجام شده هیدروکربن‌های سبک مانند نفت سفید نیز در بهبود شرایط انتقال نفت خام سنگین و قیر طبیعی از طریق خط لوله موثر هستند. لدرر یک رابطه تجربی مشابه رابطه کلاسیک آرنیوس جهت تخمین گرانروی مخلوط حاصل از اختلاط نفت خام سنگین و مواد رقیق‌کننده ارائه نمود. بر این اساس گرانروی مخلوط حاصل به کمک رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [16]:

$$\log \mu = \left(\frac{\alpha V_o}{\alpha V_o + V_d} \right) \log \mu_o + \left(1 - \frac{\alpha V_o}{\alpha V_o + V_d} \right) \log \mu_d \quad (1)$$

در این رابطه V_o و V_d به ترتیب کسر حجمی نفت خام سنگین و رقیق‌کننده، μ_o و μ_d نیز به ترتیب گرانروی نفت خام سنگین یا قیر و رقیق‌کننده هستند. α نیز یک ثابت تجربی بوده که مقدار آن بین 0 تا 1 متغیر است. شو فرمولی تجربی را جهت تعیین ثابت α برای مخلوط حاصل از اختلاط نفت خام سنگین یا قیر با رقیق‌کننده‌های هیدروکربنی سبک پیشنهاد نمود. رابطه مورد نظر به ترتیب به نسبت گرانروی نفت به رقیق‌کننده (هیدروکربن‌های سبک) و چگالی آن‌ها بستگی دارد [16]:

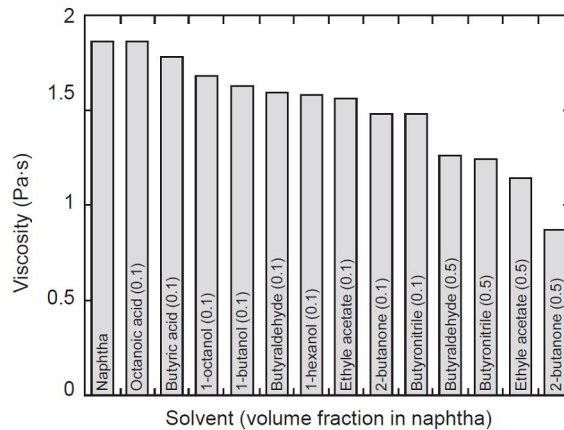
$$\alpha = \frac{17.04(\rho_o - \rho_d)^{0.5227} \rho_o^{2.2745} \rho_d^{1.6316}}{\ln \left(\frac{\mu_o}{\mu_d} \right)} \quad (2)$$

اغلب هیدروکربن‌های سبکی که برای رقیق‌سازی نفت خام سنگین و قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند گران بوده و به آسانی در مقادیر زیاد در دسترس نیستند. به همین دلیل بازیابی رقیق‌کننده‌ها و برگشت آن‌ها جهت استفاده مجدد ضروری خواهد بود. با این حال، جداسازی رقیق‌کننده‌ها از نفت نیازمند نصب و بکارگیری خطوط لوله اضافی است که البته منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. علاوه بر این، به منظور انتقال ساده و راحت نفت خام سنگین و قیر از طریق خطوط لوله گرانروی نفت رقیق‌شده یا مخلوط شده می‌بایست کمتر از 0/2 Pa.s باشد [15]. رقیق‌کننده دیگری که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد یک برش نفتی به نام نفتا است. نفتا از درجه API زیادی برخوردار بوده و سازگاری خوبی با آسفالتین‌ها نشان می‌دهد. گاتو پیشنهاد کرد که مخلوطی از نفتا و حلال آلی می‌تواند میزان رقیق‌کننده مورد نیاز را کاهش دهد. در شکل 2 روند کاهش گرانروی نسبی نفت خام سنگین که توسط مخلوطی از نفتا و یک حلال آلی رقیق شده است به خوبی مشاهده می‌شود. علت این موضوع می‌تواند افزایش قطبیت یا پیوند هیدروژنی حلال‌ها و توانایی حلال قطبی برای اثر گذاری بر ترکیبات آسفالتینی نفت خام سنگین باشد. در این مجموعه آزمایش‌ها نمونه نفت خام با 15 درصد وزنی رقیق‌کننده مخلوط شده و سپس گرانروی آن اندازه‌گیری می‌شود. [11] ویسکوزیته نمونه نفت خام در ابتدا و قبل از افزودن نفتا به عنوان رقیق‌کننده معادل 440 Pa.s گزارش شده است.

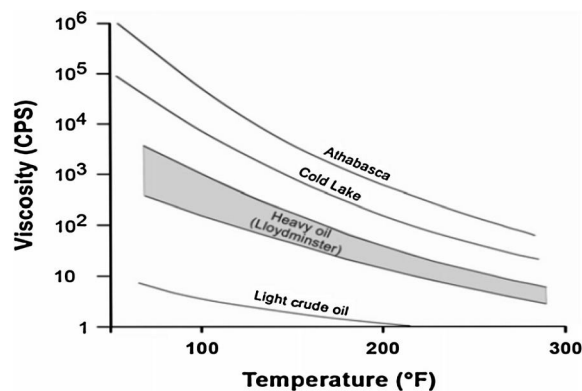
گرم کردن

روش دیگری که معمولاً برای کاستن از گرانروی نفت خام سنگین و قیر و بهبود بخشیدن جریان‌پذیری آن‌ها استفاده می‌شود استفاده از تاثیر دماست. گرم‌کردن خط لوله موجب افت سریع گرانروی و کاهش مقاومت نفت در برابر جاری شدن می‌شود. تاثیر دما بر روی گرانروی چند نمونه نفت خام سنگین در شکل

3 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود می‌توان به خوبی از گرم کردن به عنوان ابزاری جهت کاهش گرانیوی ترکیبات سنگین نفتی استفاده کرد. با افزایش دما گرانیوی نفت‌های سنگین چندین مرتبه کاهش می‌یابد. در این روش از پیش گرم کردن نفت خام سنگین و در ادامه آن گرم کردن خط لوله جهت بهبود جریان استفاده می‌شود.



شکل 2. تاثیر مخلوط نفتا و حلال‌های آلی مختلف بر گرانیوی یک نمونه نفت خام سنگین در دمای 20°C . اعداد داخل پرانتز بیانگر کسر حجمی حلال استفاده شده در مخلوط نفتا و حلال است [11]



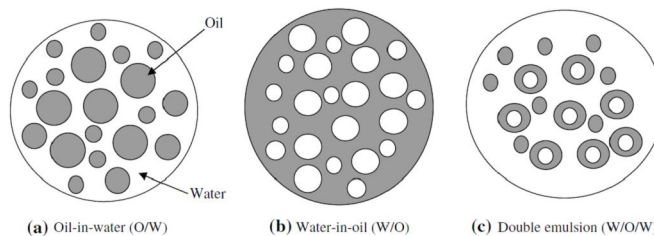
شکل 3. تاثیر دما بر کاهش گرانیوی نمونه‌های مختلف نفت خام [16]

با این وجود گرم کردن با هدف افزایش دمای سیال نیازمند صرف مقادیر زیادی انرژی و هزینه خواهد بود. همچنین در دماهای بالاتر خوردگی داخلی خطوط لوله نیز افزایش می‌یابد. گرم کردن خط لوله ممکن است تغییراتی را در خواص رئولوژیکی نفت خام ایجاد کند که می‌تواند موجب ناپایداری جریان شود. علاوه بر اتلاف حرارت که در طول خط لوله و به دلیل جریان کم نفت اتفاق می‌افتد، تعداد زیادی ایستگاه جهت گرم کردن مورد نیاز بوده که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. البته در اغلب موارد خط لوله عایق شده تا بتواند دمای بالا را حفظ کرده و اتلاف حرارت به محیط اطراف را کاهش دهد. همچنین انبساط و انقباض ناگهانی

در طول خط لوله می‌تواند مشکلاتی را ایجاد نماید. در نتیجه همه این موارد موجب می‌شوند تا هزینه‌های عملیاتی روش گرم کردن در کنار سیستم‌های پمپاژ برای یک فاصله طولانی میان میدان نفتی تا محل ذخیره‌سازی یا پالایشگاه نهایی افزایش یابد. این روش در مورد انتقال نفت خام از طریق خطوط لوله زیر دریا مناسب نبوده و قابل استفاده نیست. باید توجه داشت که اثر خنک‌کنندگی آب و زمین اطراف خط لوله موجب بازدهی این روش می‌شود.

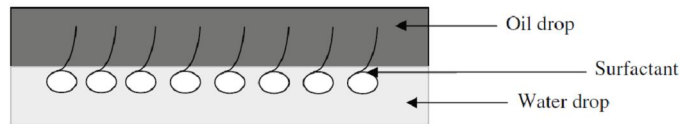
امولسیون نفت خام سنگین در آب

امولسیون نفت خام در آب در مخازن نفتی، درون چاه، هنگام حفاری و حین انتقال حضور دارد. این روش یکی از جدیدترین ابزارها جهت انتقال نفت خام سنگین از طریق خط لوله و بصورت امولسیون نفت در آب (O/W)، آب در نفت (W/O) یا به شکل امولسیون دو گانه مانند نفت در آب در نفت (O/W/O) و آب در نفت در آب (W/O/W) با اندازه ذراتی در حدود میکرون است. ایجاد امولسیون نفت در آب بعنوان یک روش جایگزین جهت بهبود انتقال نفت خام سنگین از طریق خطوط لوله مطرح شده است. در این روش نفت خام سنگین در آب بصورت امولسیون درآمده و به کمک مواد فعال سطحی پایدار می‌شود. نفت به کمک مواد فعال سطحی به شکل قطراتی در آب پراکنده شده و یک امولسیون پایدار نفت در آب با گرانیوی کمتر تولید می‌شود [17]. روش‌هایی که برای ایجاد قطرات نفت استفاده می‌شوند شامل استفاده از ابزاری از قبیل همزن‌های دور بالا، هم زدن با روتور استاتور، آسیاب کلونیدی، دستگاه‌های هموژنایزر فشار بالا، ایجاد امولسیون به کمک غشا و امواج اولتراسونیک می‌باشد [18 و 19]. در شکل 4 نمایی از امولسیون‌های مختلف مشاهده می‌شود.



شکل 4. امولسیون‌های مختلف که برای انتقال نفت خام سنگین استفاده می‌شود [16]

همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، لایه‌ای از مواد فعال سطحی که در فصل مشترک آب-نفت قرار می‌گیرد از رشد قطرات و ایجاد جدایی فاز و تشکیل فازهای نفت و آب مجزا از یکدیگر جلوگیری می‌نماید. مطابق شکل 5، تک لایه ماده فعال سطحی در سطح مشترک امولسیون نفت در آب به گونه‌ای قرار دارد که بخش قطبی آن (سر آب دوست) در تماس با آب و قسمت انتهایی و غیر قطبی آن (بخش آب گریز) در تماس با نفت قرار گرفته است. این ویژگی و خصوصیت لایه ماده فعال سطحی است که موجب پایداری سطح تماس نفت و آب شده و رفتار امولسیون را کنترل می‌نماید [19].



شکل 5. نمایی از امولسیون پایدار شده به کمک مواد فعال سطحی [16]

نفت خام سنگین مخلوطی پیچیده از هزاران ترکیب مختلف است. در این میان آسفالتین‌ها بعنوان امولسیفایرهای طبیعی عمل می‌کنند. سایر ترکیبات فعال سطحی موجود در نفت خام شامل نفتیک اسیدها، رزین‌ها، پرفیرین‌ها و ... می‌باشند [19]. حضور این ترکیبات پیچیدگی امولسیون نفت خام را افزایش می‌دهد. انتقال نفت خام سنگین با استفاده از تکنولوژی امولسیون شامل سه مرحله است ایجاد امولسیون نفت/آب، انتقال امولسیون تشکیل شده و جداسازی فاز نفتی از فاز آبی. البته بازیابی و جداسازی نفت خام مستلزم شکستن امولسیون نفت در آب است. در مرحله جداسازی می‌توان از روش‌هایی مانند امولسیون‌زدایی حرارتی، امولسیون‌زدایی الکتریکی، امولسیون‌زدایی شیمیایی، تغییر pH، افزودن حلال و امولسیون‌زدایی به کمک غشا استفاده نمود [18]. استفاده از مواد فعال سطحی و آب با هدف ایجاد امولسیون پایدار نفت در آب با نفت خام سنگین به منظور بهبود انتقال آن با استفاده از خط لوله موضوع تحقیقات مختلف و پتنت‌های متعددی بوده است. رئولوژی امولسیون ایجاد شده شرط مهمی در بهبود انتقال از طریق خط لوله است. رئولوژی امولسیون بطور عمده به حجم نفت توزیع یافته و توزیع اندازه قطرات بستگی دارد. توزیع اندازه قطرات نیز به نوع مواد فعال سطحی، انرژی اختلاط و فشار بستگی دارد. مواد فعال سطحی که معمولا مورد استفاده قرار می‌گیرند ترکیبات غیر یونی مانند تریتون X-114 بوده که بر اساس توانایی خود از قابلیت‌های مختلفی از قبیل پایداری در برابر شوری آب همراه، ارزان بودن، جداسازی آسان امولسیون ناشی از آن‌ها و عدم تشکیل ترکیبات آلی نامطلوب که موجب تغییر خصوصیات نفت می‌شوند، برخوردار هستند [16]. با این وجود امولسیون نفت خام سنگین هم در تنش‌های برشی بالا رفتار نیوتنی داشته و هم در تنش‌های برشی کم رفتار رقیق‌گردانی برش¹ از خود نشان می‌دهند [20]. خصوصیات جریانی امولسیون ایجاد شده به ویژگی‌های قسمت قطبی آبدوست و انتهای غیر قطبی آبریز مواد فعال سطحی استفاده شده بستگی خواهد داشت.

چالش‌های اساسی مختلفی در ارتباط با به‌کارگیری این تکنولوژی به منظور انتقال نفت خام سنگین وجود دارد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: هزینه و انتخاب ماده فعال سطحی؛ توانایی ماده فعال سطحی به منظور حفظ پایداری امولسیون در حین انتقال از طریق خط لوله؛ سهولت انجام جداسازی مواد فعال سطحی از نفت خام در نقطه پایانی به ویژه با توجه به اینکه چگالی نفت سنگین به چگالی آب نزدیک است؛ ویژگی‌های مختلف امولسیون تشکیل شده از قبیل خصوصیات رئولوژیکی و پایداری که به پارامترهای مختلفی مانند توزیع اندازه ذرات، دما، میزان شوری و pH آب، اجزای موجود در نفت خام سنگین، انرژی صرف شده برای اختلاط و نسبت حجمی نفت/آب بستگی دارد [1]. لازم به ذکر است که حضور ذرات و

¹ Shear thinning

ترکیبات آب دوست طبیعی مانند رس و سیلیکا در نفت خام می‌تواند موجب ناپایداری امولسیون شود [12]. در ارتباط با خصوصیات رئولوژیکی امولسیون‌ها مطالعات مختلفی انجام شده است [29 و 30]. بر اساس یکی از جدیدترین کارهای صورت گرفته در این زمینه عوامل مختلفی شامل دما، میزان غلظت نمک، کسر حجمی نفت و تعداد دور همزن می‌تواند بر رئولوژی امولسیون نفت خام تاثیر گذار باشد [31]. مکانیسم‌های مختلفی که طی آن ممکن است ناپایداری در امولسیون نفت در آب بروز نماید عبارت است از: فرآیند تکاملی اسوالد¹، ته‌نشینی یا خامه‌ای شدن به دلیل اختلاف دانسیته و به هم پیوستگی قطرات. اما لزوم استفاده از ماده فعال سطحی پایدار ساختن امولسیون در برابر برش² و کاهش تنش‌های بین سطحی است. در بعضی زمان‌ها سیستم امولسیون نفت در آب ممکن است حاوی ذرات جامد و گاز باشد که موجب افزایش پیچیدگی فرآیند خواهد شد. بطور کلی، هر میزان که اندازه قطرات کوچکتر باشد، حدود 10 میکرومتر یا کمتر، پایداری امولسیون بهتر خواهد بود [12]. رفتار امولسیون حاصل از نفت خام سنگین در آب به دلیل برهمکنش میان اجزای مختلف موجود در سیستم و بسیاری فاکتورهای دیگر که به آن‌ها اشاره شد پیچیده است. این روش انتقال نفت خام سنگین در فرآیند آرامولسیون³ به کار گرفته شده که توسط شرکت نفت ونزوئلا (PDVSA) در دهه 1980 توسعه یافته است [5]. جزییات بیشتر این فرآیند از سوی افراد و گروه‌های تحقیقاتی مختلفی ارائه شده است [12 و 21].

کاهش نقطه ریزش

نفت خام‌های سنگین به عنوان یک سوسپانسیون کلوئیدی حاوی آسفالتین‌های قابل انحلال و فاز مایعی از مالتن‌ها توصیف می‌شوند [17]. به هم پیوستگی و ترسیب ماکرومولکول‌های آسفالتین در نفت به دلیل گرانروی و دانسیته بالای آن بوده و مقاومت بزرگی را در برابر جریان داخل خط لوله ایجاد می‌نماید. بنابراین، کاهش این اثر از طریق استفاده از کاهش دهنده‌های نقطه ریزش می‌تواند سبب بهبود خصوصیات جریان نفت شود. نقطه ریزش نفت پایین‌ترین دمایی است که در آن جریان سیال متوقف شده و خصوصیات جریان خود را از دست می‌دهد. برای مثال، انتقال نفت خام‌های واکسی در هوای سرد از طریق خط لوله بسیار دشوار است. علت این امر آن است که کاهش دما موجب رشد کریستال‌هایی می‌شود که از جریان یافتن مولکول‌های نفت ممانعت می‌کنند. فرآیند کریستالیزاسیون به آب و هوا، ساختار و ترکیبات نفت، دما و فشار در حین انتقال بستگی دارد. روش‌های مختلفی جهت کمینه ساختن عوامل رسوب واکس و آسفالتین وجود داشته و در این میان استفاده از بازدارنده‌های پلیمری بعنوان یک جایگزین مورد توجه قرار گرفته است. افزودن کو پلیمرهایی مانند پلی اکریلات، پلی متاکریلات، متاکریلات و ... از بروز رسوب ممانعت کرده و موجب پایدار شدن انتقال می‌شود [22 و 23]. ماکادو بر اساس داده‌های اندازه‌گیری گرانروی دریافت کرده که در دمایی کمتر از دمای شروع تشکیل کریستال‌های واکس، کوپلیمر تاثیر زیادی در کاهش گرانروی

¹ Ostwald ripening

² Shear

³ ORIMULSION®



خواهد داشت [22]. به منظور جلوگیری از تشکیل کریستال‌های واکس که می‌توانند موجب گرفتگی خط لوله شوند، از عوامل کاهش دهنده نقطه ریزش، که حاوی گروه آلکیلی با طول زنجیر بلند و محلول در نفت و یک نیمه قطبی در ساختار مولکولی خود است، استفاده می‌شود. گروه آلکیلی زنجیر بلند به درون کریستال واکس نفوذ کرده و بخش قطبی در سطح واکس قرار می‌گیرد و اندازه کریستال واکس را کاهش می‌دهد [24]. در اغلب موارد ترکیبات کاهش دهنده نقطه ریزش دارای گروه‌های عاملی بسیار قطبی است.

روش‌های کاهش اصطکاک

گرانروی زیاد نفت خام موجب بروز مشکلات فراوانی در تولید، پالایش و انتقال آن از میان چاه‌ها و خطوط لوله می‌شود. نیروی درگ، اصطکاک دیواره و افت فشار در خط لوله در مورد نفت خام سنگین در مقایسه با نفت‌های سبک متداول بسیار بیشتر است. درگ در نتیجه تنش‌هایی است که در دیواره بواسطه سیال ایجاد شده و موجب بروز افت فشار سیال می‌شود [5]. این عامل موجب می‌شود تا انتقال نفت از طریق خط لوله به مسافت‌های طولانی با مشکلاتی همراه باشد. بر همین اساس، کاهش درگ یک روش روانکاری بر اساس جریان هسته - حلقوی است تا موجب کاهش افت فشار در انتقال نفت سنگین از طریق خطوط لوله شود. متداول‌ترین روش کاهش اصطکاک به منظور بهبود شرایط انتقال نفت سنگین از طریق خط لوله شامل افزودن مواد کاهشنده درگ و ایجاد جریان هسته - حلقوی است. هر دو روش از طریق تغییر میدان سرعت به عنوان مثال با کاستن از اغتشاشات توربولنت در نزدیکی ناحیه دیواره خط لوله موجب کاهش درگ جریان می‌شوند [25]. با این وجود در بیشتر مطالعات انجام گرفته در مورد کاهش درگ بیشتر به کاهش گرانروی از طریق روش‌های فیزیکی یا شیمیایی پرداخته شده است، اما بر اساس قانون گرانروی نیوتن درگ جریان به گرانروی سیال و پروفایل سرعت وابسته است.

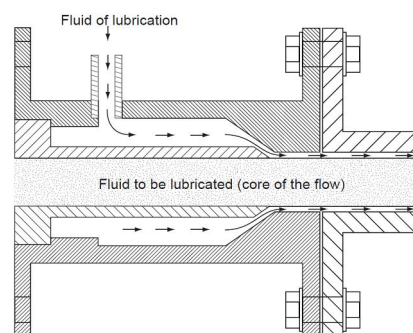
افزودنی‌های کاهش دهنده درگ

افت فشاری که به هنگام انتقال نفت خام سنگین از طریق خط لوله ایجاد می‌شود در مسافت‌های طولانی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و اثر آن شدیدتر خواهد بود. در این حالت استفاده از افزودنی‌های کاهش دهنده درگ به عنوان یک گزینه جهت کاستن از اثرات منفی افت فشار مطرح می‌شود. در انتقال نفت خام از طریق خط لوله جریان اغلب در شرایط متلاطم قرار دارد. همچنین زیاد بودن اتلاف اصطکاک ناشی از گرانروی زیاد موجب اتلاف بخش زیادی از انرژی صرف شده جهت انتقال نفت خام می‌شود. درگ زیاد در جریان متلاطم در پی انتقال شعاعی ممنوم جریان توسط گردابه‌های کوچک سیال ایجاد می‌شود. تکنولوژی کاهش درگ پلیمری در دهه‌های گذشته ارائه شد. بر اساس مشاهدات صورت گرفته افزودن ماده پلیمری (متیل متاکریلات) به خط لوله حاوی جریان متلاطم مونوکلوپنزن، موجب کاهش درگ به میزان 30 تا 40 درصد شده است. بر این اساس، افزودنی‌های کاهش دهنده درگ کمک می‌کنند تا اصطکاک در نزدیکی دیواره‌های خط لوله و درون جریان متلاطم در مرکز جریان سیال کاهش یابد [16]. افزودنی‌های کاهش دهنده درگ به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: پلیمرها، فیبرها و مواد فعال سطحی. نقش اصلی این

افزودنی‌ها کاستن از رشد گردابه‌های جریان متلاطم از طریق جذب انرژی آزاد شده حاصل از شکستن و فرو ریخته شدن لایه‌های جریان آرام است [5]. همچنین این افزودنی‌ها کمک می‌کنند تا اصطکاک نزدیک دیواره‌های خط لوله و درون هسته مرکزی و متلاطم جریان کاهش یافته که این موضوع شدت جریان‌های زیادتری را در یک فشار پمپاژ ثابت در پی خواهد داشت. با توجه به مطالب عنوان شده حلالیت ماده افزودنی کاهش دهنده درگ در نفت خام سنگین یک عامل مهم و اصلی در انتخاب افزودنی مناسب خواهد بود. همچنین یک افزودنی مناسب می‌بایست در برابر تجزیه شدن، عوامل شیمیایی و حرارت مقاوم و پایدار باشد. در ارتباط با مشکلات رایج مربوط به استفاده از این افزودنی‌ها می‌توان به تمایل این ترکیبات به جدا شدن از فاز اصلی به هنگام ذخیره‌سازی، مشکلات مربوط به انحلال این مواد در نفت خام سنگین و مشکل تخریب برشی به هنگام انحلال، اشاره نمود. همچنین تعیین میزان ماده افزودنی مورد نیاز جهت ثابت نگه‌داشتن افت فشار نیز از جمله دشواری‌های این روش است.

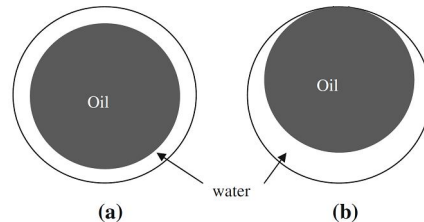
ایجاد جریان هسته - حلقوی

گرانروی بالای قیر و نفت سنگین افت فشار زیادی را در حین انتقال از طریق خط لوله سبب شده و به همین دلیل پمپ کردن نفت خام در شرایط جریان تک‌فاز را با دشواری‌های فراوانی همراه می‌سازد. از دیگر روش‌های کاهش افت فشار ناشی از اصطکاک در خطوط لوله به منظور تسهیل انتقال قیر و نفت خام سنگین، توسعه جریان هسته - حلقوی است. ایده اصلی این روش شامل احاطه کردن هسته و بخش مرکزی نفت خام سنگین به هنگام جریان داشتن درون خط لوله توسط فیلم نازکی از آب یا حلال در نزدیکی دیواره لوله است که به عنوان یک روان‌کننده عمل کرده و موجب می‌شود فشار پمپ تقریباً به اندازه فشار مورد نیاز برای پمپ نمودن آب یا حلال حفظ شود. همانطور که در شکل 6 نمایش داده شده است، در این حالت آب یا حلال مانند یک حلقه جریان داشته و نفت خام سنگین نیز هسته جریان را تشکیل می‌دهد. در این روش آب یا حلال مورد نیاز بین 10 تا 30 درصد جریان نفت می‌باشد [27]. در این شرایط افت فشار در طول خط لوله تابعیت ضعیفی از گرانروی نفت سنگین پیدا کرده و بیشتر تابع گرانروی آب خواهد بود. همچنین در شرایطی که نفت سنگین در مرکز لوله و آب نزدیک سطح دیواره لوله جریان داشته باشند افت فشار به میزان 90 درصد در مقایسه با شرایط بدون روان‌کاری با آب کاهش می‌یابد [26].



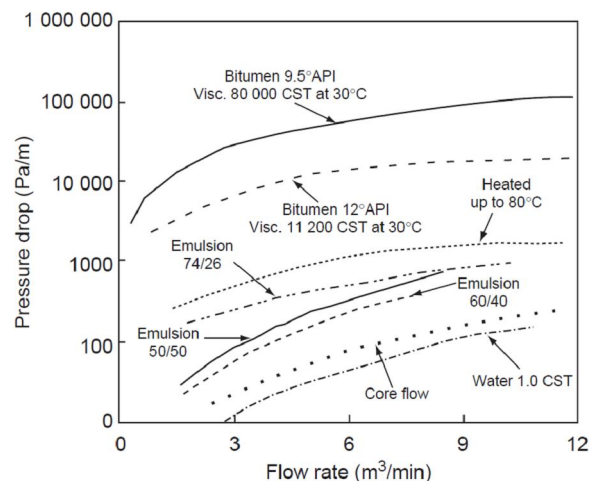
شکل 6. شکل شماتیک ساختار تزریق کننده جریان هسته - حلقوی [26]

جریان هسته - حلقوی یکی از رژیم‌های جریانی است که در جریان دو فازی خطوط لوله مشاهده می‌شود. در این رژیم جریان، حلال در سطح دیواره لوله جاری بوده و نفت سنگین را که در هسته جریان دارد روان کاری می‌کند. در این حالت جریان نفت سنگین در هسته تقریباً یک جریان لوله‌ای است. با این وجود در مورد جریان دو فازی آب و نفت در خط لوله، رژیم‌های جریان مختلفی بسته به خصوصیات نفت از قبیل چگالی، کشش سطحی، نرخ برش جریان و شدت جریان تزریق سیال، ممکن است مشاهده شود.



شکل 7. موقعیت شعاعی هسته نفتی: (a) جریان هسته - حلقوی کامل، (b) جریان هسته - حلقوی در حالتی که چگالی دو سیال با یکدیگر اختلاف دارد [26]

با وجود آنکه با استفاده از این روش امکان کاهش افت فشار جریان تا میزان افت فشار انتقال آب وجود دارد اما رسیدن به جریان هسته - حلقوی کامل به ندرت و تنها برای سیال‌هایی که چگالی آن‌ها به هم نزدیک باشد اتفاق می‌افتد [26]. هنگامی که اختلاف چگالی بین نفت و آب زیاد است، نیروی ارشمیدس موجب ایجاد حرکت شعاعی هسته نفتی می‌شود. این اثر، همانطور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، موجب انتقال هسته به دیواره بالایی خط لوله می‌شود. علاوه بر این، پایداری سیستم جریان همچنان تحت بررسی است. سرعت جریان و ناپایداری مویین ناشی از کشش سطحی موجب شکسته شدن هسته می‌شود. اما افزایش سرعت پایداری هسته را بهبود می‌بخشد [26].



شکل 8. نمودار افت فشار بر حسب شدت جریان برای روش‌های مختلف انتقال نفت خام سنگین [26]

در شکل 8 افت فشار بر حسب شدت جریان برای چندین روش انتقال نفت خام سنگین و قیر طبیعی به منظور مقایسه ارائه شده است.

روش ارتقاء کیفیت درجا

افزایش اکتشاف منابع عظیم نفت سنگین و قیر با هدف رفع تقاضاهای جهانی و نگرانی‌های زیست محیطی منجر به مشارکت و همراهی روش‌های ارتقاء کیفیت درجا همراه با افزایش بازیابی نفت شده است. ارتقاء درجای نفت در زمان به‌کارگیری روش‌های حرارتی بازیافت از قبیل ISC، SAGD، CSS و روش جدید THAI و فرآیند کاتالیستی ارتقاء کیفیت درجای مربوط به آن، امکان پذیر خواهد بود [7]. این فرآیندها بر اساس کاهش گرانشی نفت خام سنگین از طریق گرما به منظور بهبود جریان از مخزن تا چاه تولید استوار هستند. ارتقاء کیفیت بواسطه تفکیک و تجزیه حرارتی مولکول‌های سنگین به مولکول‌های کوچکتر انجام می‌شود. واکنش شکست حرارتی درجا موجب کاهش گرانشی نفت سنگین و قیر شده و در نتیجه جریان و تولید را بهبود می‌بخشد. با این وجود، از میان تمام این فرآیندها، فرآیند THAI یک فرآیند ارتقاء کیفیت کاتالیستی را با روش بازیابی نفت همراه کرده است [28].

نتیجه‌گیری

به منظور افزایش استخراج نفت سنگین و قیر، توسعه تکنولوژی‌هایی در جهت انتقال این ترکیبات از طریق خطوط لوله ضروری است. در مقاله حاضر، روش‌ها و تکنولوژی‌های مختلف جهت انتقال نفت خام‌های سنگین و فوق سنگین از مناطق اکتشاف و تولید به محل فرآوری و پالایش مورد بررسی قرار گرفت. تکنولوژی‌های کاملاً کاربردی به همراه روش‌های جدید جهت انتقال نفت خام‌های سنگین عمدتاً بر مبنای کاهش گرانشی نفت خام، کاهش نیروی درگ در خط لوله و ارتقای کیفیت نسبی نفت‌های خام به نفت‌های سنتزی شکل گرفته‌اند. هر یک از سه دسته اشاره شده در زمینه روش‌های کاهش گرانشی و افت فشار با هدف تسهیل انتقال نفت خام سنگین از طریق خط لوله همراه با مزایا و معایب هر یک بیان گردید. با توجه به مطالعه صورت گرفته، بهبود نحوه عملیات، قابلیت اطمینان، هزینه، ابعاد و اندازه تجهیزات، قابلیت تعمیر و نگهداری، زیر ساخت‌ها و منابع مورد نیاز، نوع نفت خام و تغییرات کیفیت نفت خام را می‌توان به عنوان عوامل مهم و اثر گذار در این زمینه بر شمرد. با افزایش میزان تولید نفت خام‌های سنگین و فوق سنگین در مناطق مختلف دنیا، به منظور دستیابی به راه حل مناسب جهت انتقال نفت خام سنگین نوآوری بیشتری در تکنولوژی و تحقیق و توسعه مورد نیاز خواهد بود. در حقیقت پاسخ‌های موجود و همچنین راه حل‌های آینده می‌بایست در بر گیرنده مواردی از جمله ساختار و خصوصیات فیزیکی شیمیایی نفت‌های تولید شده، انتقال منطقی میان چاه تولید و محل صادرات یا پالایش، زیرساخت موجود و مسایل عملیاتی، مسافت انتقال، کیفیت نفت خام به منظور صادرات یا پالایش، هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگهداری، مسایل زیست محیطی، باشند. در این میان انتقال نفت خام به روش کاهش گرانشی در مناطق عملیاتی که مقادیر کافی از نفت‌های سبک‌تر، میعانات یا آب در دسترس بوده و زیر ساخت‌های لازم برای اختلاط مهیا باشد، مقرون به



صرفه خواهد بود. البته در این ارتباط بررسی و تعیین مشخصات نفت خام‌های رقیق‌سازی شده به منظور دستیابی به راه حل اقتصادی و مناسب نیز می‌بایست در نظر گرفته شود. تحقیق و توسعه در ارتباط با مواد فعال سطحی، بهبود دهنده‌های جریان، ترکیبات کاهنده درگ، کاتالیست‌ها و سایر افزودنی‌های با ارزش از جمله زمینه‌های تحقیقاتی در انتقال ترکیبات نفتی سنگین است. در کنار انجام تحقیقات بنیادی و با هدف ایجاد اطمینان در مخاطبین و کاربران تکنولوژی‌های جدید، توسعه روش‌های انتقال نفت خام می‌بایست بر اساس نتایج بدست آمده از تست‌های پایلوتی و واحدهای نیمه صنعتی همراه باشد. با بررسی روند توسعه روش‌های مختلف این انتظار وجود دارد که در آینده‌ای نزدیک مسیر تکنولوژی‌های انتقال نفت خام از روش‌های خارج از چاه به روش‌های درون چاهی هدایت شده و به عبارت دیگر امولسیون نفت- آب می‌تواند درون مخزن تشکیل شده یا نفت خام داخل مخزن ارتقاء یافته و شرایط مناسب‌تری برای انتقال پیدا کند.

منابع

1. Hasan, S.W.; Ghannam, M.T.; Esmail, N.: "Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation". *Fuel* 89, 1095-1100 (2010).
2. Hsu, C.; Robinson P.: "Practical advances in petroleum processing", vol 1. Springer, New York 1-5, (2006).
3. Zhang, N.; Zhao, S.; Sun, X.; Zhiming, X.; Chunming, X.: "Storage stability of the visbreaking product from Venezuela heavy oil". *Energy Fuels* 24, 3970-3979 (2010).
4. Hart, A.: "The catalytic upgrading of heavy crude oil in situ: the role of hydrogen". *Int. J. Pet. Sci. Technol.* 6(2), 79-96 (2012).
5. Martinez-Palou, R.; Maria de Lourdes, M.; Beatriz, Z-R.; Elizabeth, M-J.; Cesar, B-H.; Juan de la Cruz, C-L.; Jorge, A.: "Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: a review". *J. Pet. Sci. Eng.* 75, 274-282 (2011).
6. OECD/IEA (2005) Resources to reserve: oil and gas technologies for the energy markets of the future, Paris. 22 Sept 2005
7. Hart, A.; Shah, A.; Leeke, G.; Greaves, M.; Wood, J.: "Optimization of the CAPRI process for heavy oil upgrading: effect of hydrogen and guard bed". *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 15394-15406 (2013).
8. Eskin, D.; Ratulowski, J.; Akbarzadeh, K.; Pan, S.: "Modelling asphaltene deposition in turbulent pipeline flows". *Can. J. Chem. Eng.* 89:421-441 (2011).
9. Saniere, A.; Henaut, I.; Argillier, J.F.: "Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge". *Oil Gas Sci. Technol. Rev IFP* 59(5):455-466 (2004).
10. Ahmed, N.S.; Nassar, A.M.; Zaki, N.N.; Gharieb, Kh.H.: "Formation of fluid heavy oil-in-water emulsions for pipeline transportation". *Fuel* 78, 593-600 (1999).
11. Gateau, P.; Henaut, I.; Barre, L.; Argillier, J.F. "Heavy oil dilution". *Oil Gas Sci. Technol. Rev IFP* 59(5):503-509 (2004).
12. Anhorn, J.L.; Badakhshan, A.: "MTBE: a carrier for heavy oil transportation and viscosity mixing rule applicability". *J. Can. Pet. Technol.* 33(4):17-21 (1994).
13. Shigemoto, N.; Al-Maamari, R.S.; Jibril, B.Y.; Hirayama, A.: "A study of the effect of gas condensate on the viscosity and storage stability on Omani heavy crude oil". *Energy Fuels* 20(6):2504-2508 (2006).
14. Urquhart, R.D.: "Heavy oil transportation: present and future". *J. Can. Pet. Technol.* 25(2):68-71 (1986).

15. Kessick, M.A.: "Pipeline transportation of heavy crude oil". US Patent 4,343,323 (1982).
16. Hart, A.: "A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines". *J. Petrol. Explor. Prod. Technol.* 4:327–336 (2014).
17. Saniere, A.; Henaut, I.; Argillier, J.F.: "Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge". *Oil Gas Sci. Technol. Rev IFP* 59(5):455–466 (2004).
18. Ashrafizadeh, S.N.; Kamran, M.: "Emulsification of heavy crude oil in water for pipeline transportation". *J. Pet. Sci. Eng.* 71:205–211 (2010).
19. Langevin, D.; Poteau, S.; Henaut, I.; Argillier, J.F.: "Crude oil emulsion properties and their application to heavy oil transportation". *Oil Gas Sci. Technol. Rev IFP* 59(5):511–521 (2004).
20. Al-Roomi, Y.; George, R.; Elgibaly, A.; Elkamel, A.: "Use of a novel surfactant for improving the transportability/transportation of heavy/viscous crude oil". *J. Pet. Sci. Eng.* 42:235–243 (2004).
21. Salager, J.L.; Briceno, M.I.; Brancho, C.L.: "Heavy hydrocarbon emulsions". In: Sjoblom J (ed) *Encyclopaedic handbook of emulsion technology*. Marcel Dekker, New York (2001).
22. Machado, A.L.C.; Lucas, E.F.; Gonzalez, G.: "Poly (ethylene-co-vinyl acetate) as wax inhibitor of a Brazilian crude oil: oil viscosity, pour point and phase behavior of organic solutions". *J. Pet. Sci. Eng.* 32:159–165 (2001).
23. Soldi, A.R.; Oliveira, A.R.S.; Barbosa, R.V.; Cesar-Oliveira, M.A.F.: "Polymethacrylates: pour point depressants in diesel oil". *Eur. Polym. J.* 43:3671–3678 (2007).
24. Deshmukh, S.; Bharambe, D.P.: "Synthesis of polymeric pour point depressants for Nada crude oil (Gujarat, India) and its impact on oil rheology". *Fuel Process Technol.* 89:227–233 (2008).
25. Chen, Q.; Wang, M.; Pan, N.; Gao, Z-Y.: "Optimization principle for variable viscosity fluid flow and its application to heavy oil flow drag reduction". *Energy Fuels* 23:4470–4478 (2009).
26. Bensakhria, A.; Peysson, Y.; Antonini, G.: "Experimental study of the pipeline lubrication for heavy oil transport". *Oil Gas Sci. Technol. Rev IFP* 59(5):523–533 (2004).
27. Wylde, J.J.; Leinweber, D.; Low, D.; Botthof, G.; Oliveira, A.P.; Royle, C.; Kayser, C.: "Heavy oil transportation: advances in water-continuous emulsion methods". In: *Proceedings of the world heavy oil congress, Aberdeen* (2012).
28. Shah, A.; Fishwick, R.; Wood, J.; Leeke, G.; Rigby, S.; Greaves, M.: "A review of the novel techniques for heavy oil and bitumen extraction and upgrading". *Energy Environ. Sci.* 3:700–714 (2010).
29. Dan, D.; Jing, G.: "Apparent Viscosity Prediction of Non-Newtonian Water-in-Crude Oil Emulsions". *Journal of Petroleum Science and Engineering* 53:113-122 (2006).
30. Farah, M. A.; Oliveira, R. C.; Caldas, J. N.; Rajagopal, K.: "Viscosity of Water-in-Oil Emulsions: Variation with Temperature and Water Volume Fraction". *Journal of Petroleum Science and Engineering* 48:169- 184 (2005).
31. Hoshyargar, V.; Ashrafizadeh, S. N.: "Optimization of Flow Parameters of Heavy Crude Oil-in-Water Emulsions through Pipelines". *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52(4):1600-1611 (2013).