

دانشگاه صنعتی سهند

دانشکده مهندسی نفت و گاز

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی نفت گرایش بهره‌برداری

عنوان

شبیه سازی رسوب واکس در خط لوله و بررسی تأثیر پارامترها بر روی آن

نگارش

میلاذ رهنما

اساتید راهنما

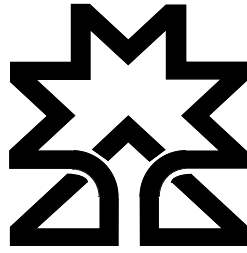
دکتر سید علیرضا طباطبائی نژاد

سرکار خانم دکتر الناز خدا پناه

تایستان ۹۹



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی سهند

دانشکده مهندسی نفت و گاز

پایان نامه کارشناسی ارشد

جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی نفت گرایش بهره برداری

عنوان: شبیه سازی رسوب واکس در خط لوله و بررسی تأثیر پارامترها بر روی آن

نگارش: میلاد رهنما

کمیته ممتحنین:

امضاء.....

استاد راهنمای اول: دکتر سید علیرضا طباطبائی نژاد

امضاء.....

استاد راهنمای دوم: سرکار خانم دکتر الناز خدا پناه

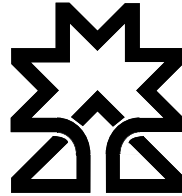
امضاء.....

استاد ممتحن داخلی: دکتر محمد چهاردولی

شهریور ۱۳۹۹



باسمه تعالی



دانشگاه صنعتی سهند

تعهدات در برابر حفظ حقوق مالکیت معنوی

این جانب میلاد رهنما دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت گرایش بهره‌برداری ورودی سال ۱۳۹۵ متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی این جانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی سهند بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادرشده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی سهند است. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی و آگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی سهند ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مأخذ بلامانع است.

این جانب متعهد می‌شوم بدون اجازه استاد راهنما اطلاعات به‌دست‌آمده از پروژه را به هیچ‌وجهی انتشار ندهم و اطلاع دارم که کلیه منابع و حقوق حاصله از این پروژه متعلق به حامی حقیقی یا حقوقی پروژه است و در صورت نداشتن حامی حقیقی یا حقوقی، دانشگاه مالک معنوی است و مجاز نیستم بدون موافقت استاد راهنما اطلاعاتی را در رابطه با پروژه به دیگران واگذار نمایم.

نام و امضا: میلاد رهنما



تقدیم

به زیباترین ترانه‌های هستی، ماه تابان شب‌های سیاه، آنان که تجلی‌دهنده نور عشق در این جهان تاریک‌اند. آنان که فداکاری‌هایشان نشان از سخاوت درونشان دارد و مهربانی‌شان از پاکی سرشت‌شان نشأت می‌گیرد...

خانواده عزیزم



تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات آقای پروفسور علیرضا طباطبائی نژاد و سرکار خانم دکتر الناز خدا پناه به واسطه‌ی راهنمایی این پایان‌نامه و رفتار صبورانه‌ی ایشان تشکر و قدردانی می‌شود و از ایشان نهایت سپاس‌گزاری را دارم موفقیت روزافزون ایشان را از خداوند متعال خواستارم.

میلاذ رهنما



چکیده

یکی از مشکلات مهم در صنعت نفت در زمینه بهره برداری و استخراج نفت و خطوط انتقال نفت خام، ایجاد رسوب توسط ترکیبات سنگین نفت خام مانند واکس (پارافین) می‌باشد. علت ایجاد این رسوبات بر هم خوردن تعادل ترمودینامیکی این ترکیبات در اثر عواملی مانند دما، فشار و تغییر ترکیب نفت خام می‌باشد و در نتیجه باعث تشکیل رسوب در خط لوله می‌گردند. لذا شبیه سازی پیش بینی شرایط تشکیل این رسوب و بررسی عوامل مؤثر بر آن می‌تواند باعث جلوگیری از مشکلات آن در آینده شده و منجر به طراحی دقیق تر سیستم‌های انتقال گردد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از شبیه ساز ترمودینامیکی PVTsim یک سیال هیدروکربنی و شرایط دما و فشاری تشکیل رسوب واکس شبیه سازی می‌شود. سپس از خروجی این شبیه ساز به عنوان ورودی نرم افزار OLGA جهت بررسی شرایط تشکیل این رسوب و عوامل تأثیر گذار بر روی آن در یک خط لوله دریایی استفاده شده است. خط لوله شبیه سازی شده یک خط لوله دریایی می‌باشد که به بررسی شرایط تشکیل رسوب در این خط لوله و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آن مانند قطر لوله، زبری لوله، هندسه خط لوله، نرخ جریان ورودی، دمای نفت ورودی، دمای محیطی که نفت در آن جریان دارد و دیگر پارامترهای موجود پرداخته شد. نتایج نشان دادند که این پارامترها با تأثیر بر روی شرایط دما، فشار و ترکیب سیال می‌توانند بر روی تشکیل رسوب مؤثر باشند. شبیه سازی تغییر ضخامت لایه واکس پس از گذشت ۵۰ روز نشان می‌دهد در فاصله ۴/۵۶۲ کیلومتر افزایش ضخامت رسوب واکس به بیش از ۲ میلیمتر می‌رسد و افت فشار ۷۰ Psia را به همراه دارد که جهت رفع آن بایستی تدابیر مناسب در نظر گرفته شود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی در دبی جریان بیشتر از ۴۰۰۰۰ stb/day شاهد رسوب واکس نخواهیم بود. تغییر دمای محیط از ۴ °C به ۶ °C پس از ۱۲ روز سبب افزایش میزان رسوب به میزان ۰/۳ میلیمتر می‌شود که مقدار قابل توجهی است. بررسی قطرهای ۱۴، ۱۶ و ۱۸ اینچ خط لوله نشان داد که تغییر در قطر خط لوله تأثیری در محل تشکیل رسوب نمی‌گذارد.

کلید واژه‌ها: رسوب واکس، شبیه سازی، نرم‌افزار OLGA، PVTsim، خط لوله



فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل ۱ مقدمه
۲	۱.۱ مقدمه
۳	۲.۱ آسفالتین
۴	۳.۱ واکس
۶	۴.۱ نقطه ابری شدن، نقطه ناپدید شدن و نقطه ریزش نفت
۷	۵.۱ سخت شدن رسوب
۹	۶.۱ ساختار بلورهای پارافینی
۹	۷.۱ دلایل تشکیل رسوب واکس در خطوط لوله نفت
۱۰	۸.۱ عوامل مؤثر در نشست واکس
۱۱	۱.۸.۱ اثر سرعت جریان در نشست واکس
۱۱	۲.۸.۱ اثر خواص سطح بر تشکیل رسوب واکس
۱۲	۳.۸.۱ اثر اختلاف دما و سرعت سرد کردن سیال بر تشکیل رسوب واکس
۱۳	۹.۱ هدف از انجام پژوهش
۱۴	فصل ۲ مروری بر شبیه‌سازی رسوب واکس در خطوط لوله
۱۵	۱.۲ مقدمه
۱۶	۲.۲ مطالعات میکروسکوپی
۱۶	۱.۲.۲ مطالعات میکروسکوپی تحت شرایط استاتیکی



۲۰	۲.۲.۲	مطالعات میکروسکوپی تحت شرایط دینامیکی
۲۵	۳.۲	مطالعات صورت گرفته بر روی بلور ساختارهای تشکیل واکس
۲۸	۴.۲	مکانیسم‌های رسوب واکس در لوله
۲۹	۱.۴.۲	نفوذ مولکولی
۳۲	۲.۴.۲	پراکندگی برشی
۳۳	۳.۴.۲	ته نشینی بر اثر جاذبه زمین
۳۳	۳.۴.۲	اثر براونی
۳۴	۴.۴.۲	اثر وجود آب در مراحل شکل گیری رسوب واکس
۳۴	۵.۲	مروری بر مدل‌های پیش بینی رسوب واکس در خطوط انتقال نفت
۳۸	۶.۲	مدل‌های رسوب واکس در نرم‌افزار OLGA
۳۸	۱.۶.۲	ارائه مدل RRR
۴۳	۲.۶.۲	ارائه مدل Matzain
۴۷		فصل ۳ مدل‌سازی رسوب واکس در خطوط لوله
۴۸	۱.۳	شرح مسأله
۴۸	۲.۳	مدل سازی مسأله
۴۸	۳.۳	ساخت مدل OLGA برای شبیه سازی
۴۸	۱.۳.۳	مقدمه
۴۹	۲.۳.۳	روند شبیه سازی
۴۹		• شرایط ورودی خط لوله



- ۵۰ • تعریف سیال
- ۵۲ • تعریف اصطلاحات در PVTsim
- ۶۱ • شرایط خروجی خط لوله
- ۶۲ • پروفایل خط لوله
- ۶۴ • هندسه خط لوله
- ۶۴ • شرایط مرزی
- ۶۵ • گزینه‌ها و یکپارچه سازی
- ۶۶ • رسوب واکس
- ۶۹ • گزینه‌های خروجی
- ۷۰ • ویژگی‌های PROFILE و TREND
- ۷۰ • تعریف پروژه در OLGA
- ۷۰ • مطالعات پارامتری

فصل ۴ تجزیه و تحلیل نتایج

- ۷۲ ۱.۴ شرح کلیات
- ۷۲ ۲.۴ شبیه سازی ترموهیدرولیک
- ۷۳ ۳.۴ شبیه سازی رسوب واکس
- ۷۷ ۴.۴ مطالعات پارامتری
- ۷۷ ۱.۴.۴ تأثیر دبی در رسوب واکس
- ۷۹ ۲.۴.۴ تأثیر دمای نفت ورودی در رسوب واکس



۸۱	تأثیر دمای محیط در رسوب واکس	۳.۴.۴
۸۲	تأثیر قطر لوله در رسوب واکس	۴.۴.۴
۸۴	تأثیر شیب خط لوله در رسوب واکس	۵.۴.۴
۸۴	تأثیر زبری در رسوب واکس	۶.۴.۴

۸۶ **فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

۸۷	مقدمه	۱.۵
۸۷	نتیجه‌گیری	۲.۵
۸۹	پیشنهادات	۳.۵
۹۰	مراجع	
۹۵	پیوست الف	
۱۰۰	پیوست ب	



فهرست جداول

صفحه	عنوان
۵۰	جدول ۱.۳ اطلاعات لازم برای ورودی لوله
۵۲	جدول ۲.۳ داده‌های ترکیب اجزاء نفت برای نفت خام خاورمیانه
۵۳	جدول ۳.۳ داده‌های آزمایشگاهی سیال مخزن
۵۴	جدول ۴.۳ ترکیب نفت مشخصه‌سازی شده
۵۶	جدول ۵.۳ داده‌های آزمایشگاهی رسوب واکس
۵۸	جدول ۶.۳ ترکیب PT FLASH نفت در شرایط استاندارد
۵۹	جدول ۷.۳ ترکیب EXTENDED PT FLASH نفت در شرایط استاندارد
۶۰	جدول ۸.۳ داده‌های تشکیل واکس
۶۱	جدول ۹.۳ شرایط و تعداد نقاط ترمودینامیکی تشکیل واکس
۶۹	جدول ۱۰.۳ پارامترهای ورودی پیش فرض و تنظیم شده برای مدل MATZAIN



فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۶	شکل ۱.۱ کاهش قطر مؤثر خط لوله به دلیل رسوب واکس [۲]
۱۷	شکل ۱.۲ تصاویر میکروسکوپی استاتیکی مشاهده شده در بزرگ نمایی $100\times$
۱۸	شکل ۲.۲ نسبت ابعاد با دما در سرعت سرد شدن‌های مختلف [۲۶]
۱۹	شکل ۳.۲ توزیع اندازه کریستال در شرایط نهایی تحت سرعت سرد شدن مختلف [۲۶]
۱۹	شکل ۴.۲ توزیع اندازه کریستال تحت سرد شدن $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$
۲۲	شکل ۵.۲ ساختار رشد رسوب واکس در زمان‌های عملیاتی مختلف
۲۵	شکل ۶.۲ سطح جانبی از ته نشینی واکس بعد از یک روز [۳۲]
۴۰	شکل ۷.۲ مدل RRR تعریف ساختار مدل جریان
۵۰	شکل ۱.۳ پنجره مربوط به داده‌های ورودی سیال
۵۰	شکل ۲.۳ پنجره ورودی اطلاعات خواص سیال
۵۳	شکل ۳.۳ نمودار فازی سیال قبل از منطبق‌سازی با داده‌های واقعی
۵۵	شکل ۴.۳ مقایسه نمودار فازی سیال قبل و بعد از منطبق‌سازی با داده‌های واقعی
۵۵	شکل ۵.۳ نمودار فشار دمای واکس قبل از منطبق‌سازی با داده‌های واقعی
۵۶	شکل ۶.۳ نمودار فازی سیال در حضور واکس و نمودار فشار دمای واکس قبل از منطبق‌سازی با داده‌های واقعی
۵۷	شکل ۷.۳ نمودار فشار دمای واکس قبل و بعد از منطبق‌سازی با داده‌های واقعی
۵۷	شکل ۸.۳ نمودار فازی و نمودار فشار دمای واکس پس از منطبق‌سازی
۶۰	شکل ۹.۳ نمودار تشکیل واکس بر اساس فشارهای مختلف



۶۲	شکل ۱۰.۳	پنجره داده‌های سیال خروجی OLGA
۶۲	شکل ۱۱.۳	جزئیات ژئومتری خط لوله
۶۳	شکل ۱۲.۳	خصوصیات فولاد کربن
۶۳	شکل ۱۳.۳	مشخصات دیواره لوله
۶۴	شکل ۱۴.۳	شماتیک خط لوله در مدل OLGA
۶۴	شکل ۱۵.۳	هندسه خط لوله
۶۵	شکل ۱۶.۳	پنجره خصوصیات انتقال حرارت
۶۶	شکل ۱۷.۳	گزینه‌های مدل OLGA
۶۶	شکل ۱۸.۳	یکپارچه سازی مدل OLGA
۶۷	شکل ۱۹.۳	پنجره خصوصیات رسوب واکس
۷۰	شکل ۲۰.۳	ویژگی‌های PROFILE و TREND
۷۳	شکل ۱.۴	نمودار پروفایل شبیه سازی ترموهیدرولیکی
۷۴	شکل ۲.۴	نمودار شبیه سازی رسوب واکس پس از ۵۰ روز
۷۵	شکل ۳.۴	نمودار تکامل ضخامت لایه واکس پس از ۱۰۰ روز
۷۵	شکل ۴.۴	نمودار تأثیر رسوب واکس بر روی افت فشار
۷۶	شکل ۵.۴	مشخصات ضریب انتقال حرارت کلی و دمای دیواره داخلی
۷۸	شکل ۶.۴	تأثیر دبی بر پروفایل ضخامت رسوب واکس در طول خط لوله
۷۹	شکل ۷.۴	حداکثر ضخامت لایه واکس به صورت تابعی از دبی نفت در خط لوله
۸۰	شکل ۸.۴	اثر تغییرات دمای سیال ورودی بر ضریب کلی انتقال حرارت
۸۰	شکل ۹.۴	اثر تغییرات دمای سیال ورودی بر محل رسوب واکس



- | | | |
|----|----------|---|
| ۸۱ | شکل ۱۰.۴ | اثر تغییرات دمای سیال ورودی بر محل رسوب واکس |
| ۸۲ | شکل ۱۱.۴ | اثر دمای محیط بر رسوب واکس |
| ۸۳ | شکل ۱۲.۴ | تأثیر قطر لوله بر حجم رسوب واکس با گذشت زمان |
| ۸۳ | شکل ۱۳.۴ | تأثیر قطر لوله بر پروفایل ضخامت رسوب |
| ۸۴ | شکل ۱۴.۴ | تأثیر شیب خط لوله بر حجم رسوب واکس با گذشت زمان |
| ۸۵ | شکل ۱۵.۴ | تأثیر زبری سطح لوله بر جرم رسوب واکس |



فصل اول

مقدمه

۱.۱. مقدمه

در میان گروه‌های هیدروکربنی نفت خام، واکس‌های با وزن مولکولی بالا (واکس‌ها) به دلیل تمایلی که برای رسوبگذاری روی دیواره سرد خطوط لوله دارند، مشکلات مختلفی را در عملیات انتقال ایجاد می‌کنند. رسوبگذاری واکس‌ها در لوله ناشی از کاهش حلالیت آنها با کاهش دما است. رسوب پارافین‌ها با گذشت زمان رشد یافته و سخت می‌شوند. پیش‌بینی توزیع رسوب واکس در لوله و مقدار جزء جامد در آن از اهمیت قابل ملاحظه‌ای در خطوط انتقال نفت حاوی واکس برخوردار است. در مدل‌های جدید اثر سینتیک فرایند تبلور بعنوان پارامتر اثر گذار در تشکیل رسوب در نظر گرفته شده است، اما در این مدل‌ها اثر سرعت سرمایش در فرایند تبلور در لوله در نظر گرفته نشده است [۱].

یکی از مهمترین معضلات صنعت نفت در زمینه استخراج و بهره برداری، انباشت نفت خام در مخازن سطح الارضی و خطوط انتقال نفت، تشکیل مواد ارگانیک سنگین (آسفالتین و واکس) و به دنبال آن ایجاد رسوب درون سازندهای نفتی، تأسیسات و خطوط انتقال نفت می‌باشد. علت این امر تغییر در شرایط ترمودینامیکی نظیر تغییر در ترکیب نفت خام، درجه حرارت و تغییر در فشار می‌باشد که بر اثر آن تعادل ترمودینامیکی مواد سنگین آلی نظیر واکس و آسفالتین به هم ریخته و در نتیجه این مواد با مکانیزم‌های مختلف تشکیل و در اثر حرکت در محیط متخلخل سازند یا داخل لوله در چاه تولیدی و یا تأسیسات سطح الارضی، رسوب می‌نمایند و زدودن آنها گاهی امکان پذیر است، اما با صرف هزینه‌های زیادی همراه هستند. با توجه به موارد فوق، شناخت مشکل، بررسی رفتار فازی رسوب واکس و آسفالتین و مشخص نمودن این امر که واکس و آسفالتین تحت چه شرایطی رسوب می‌کنند و چه عواملی بر تشکیل

این رسوبات مؤثر هستند، تأثیر بسزایی در تولید مستمر و صرفه‌جویی در هزینه‌ها دارد. در نتیجه در ادامه پژوهش به معرفی رسوبات آسفالتین و واکس در خطوط انتقال نفت خواهیم پرداخت.

۲.۱. آسفالتین

آسفالتین‌ها ترکیبات سنگینی حاوی اتم‌های S، O و N می‌باشند که بعضی از آنها جانشین کربن حلقه آروماتیک می‌شوند. ترکیبات آسفالتین وزن مولکولی بالایی دارند و سنگین‌ترین اجزای تشکیل دهنده نفت‌های خام می‌باشند. عموماً آسفالتین‌ها همراه با نفت‌های خام دارای آروماتیک سنگین یافت می‌شوند. این ترکیبات به دلیل اینکه ماهیت ترکیبی آنها از یک مخزن به مخزن دیگر تغییر می‌کند، دارای وزن مولکولی معینی نمی‌باشند [۱].

مطابق مطالعات انجام شده، وزن مولکولی آن‌ها بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ و اندازه آسفالتین بسته به مرحله تشکیل آن بین ۱۰ تا ۲۰ آنگستروم در مراحل ابتدایی می‌باشد [۲، ۳]. این رسوبات، جامد، ترد، شکننده و به رنگ قهوه‌ای تیره یا مشکی می‌باشند که نقطه ذوب مشخصی ندارند و هنگامی که حرارت داده می‌شوند، معمولاً متورم شده و سپس تجزیه می‌گردند. این رسوبات از افزودن حلال غیر قطبی مانند هیدروکربن‌هایی با کشش سطحی کمتر از ۲۵ dyne/cm در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد به نفت یا قیر طبیعی به دست می‌آیند و در مایعات با کشش سطحی بیش از ۲۵ dyne/cm مانند بنزن قابل حل هستند [۴].

رسوب آسفالتین به صورت توده‌ای با ساختار چند حلقه‌ای می‌باشند که دارای ترکیبات ناهمگن آروماتیکی با جانشین‌های آلیفاتیک می‌باشند و بخش عمده قطبی نفت خام را تشکیل می‌دهند. این رسوبات در نرمال آلکان‌هایی با وزن مولکولی پایین مانند نرمال هگزان و نرمال هپتان غیر قابل حل هستند، ولی در حلال‌های آروماتیکی نظیر بنزن، تولوئن و زایلن حل می‌شوند. آسفالتین‌ها، کلئیدهایی در نفت هستند که توسط

رزینهای نفتی پایدار می‌شوند. رزین‌ها نیز ساختاری شبیه آسفالتین‌ها دارند اما دارای جرم مولکولی پایین‌تری هستند و در حقیقت رزین‌ها سبب پایداری آسفالتین‌ها در نفت خام شده و آنها را به صورت معلق نگه می‌دارند [۷-۵].

مشکل رسوب آسفالتین یکی از موضوعات بسیار مهم و پیچیده در صنعت نفت می‌باشد. براساس نظر محققین، سالانه در اثر تشکیل رسوبات آسفالتین در صنایع نفت میلیون‌ها دلار خسارت به این صنایع وارد می‌شوند [۸]. پدیده رسوب آسفالتین در مخازن موجب کاهش تراوایی و یا تغییر ترشوندگی سنگ مخزن می‌گردد. کاهش تراوایی و تغییر ترشوندگی سنگ مخزن از آب دوست به نفت دوست، منجر به کاهش تولید نفت خام می‌شود [۹]. این رسوبات با ایجاد آسیب سازندی، افزایش هزینه نگهداری، کاهش ظرفیت انتقال و یا حتی انسداد کامل خطوط لوله، خسارت زیادی را به دنبال دارند [۱۰، ۱۱]. رسوب آسفالتین باعث بروز مشکلاتی همچون افزایش ویسکوزیته، ایجاد امولسیون و تولید کک می‌شود. از آنجا که در ترکیب این مولکول‌ها فلزاتی همچون آهن، نیکل و وانادیم وجود دارد این مولکول‌ها عامل کاهش کارایی کاتالیست‌ها در فرایندهای پالایشی بشمار می‌روند [۱۲].

۳.۱. واکس

یکی دیگر از عواملی که باعث ایجاد خسارت زیادی مانند شکستگی و ترکیدن لوله‌های انتقال و همینطور دستگاه‌های موجود در پالایشگاه‌ها می‌شود، ایجاد رسوب واکس^۱ است. شرایط رسوب واکس با آسفالتین متفاوت است به طوری که ممکن است یکی در شرایط کاملاً متضاد با دیگری رسوب کند [۱۳]. بطور کلی واکس ماده جامد سیاه رنگی است که با افزایش فشار و کاهش دما در خطوط انتقال تشکیل می‌شود. این

¹ Wax

ماده سیاه رنگ شامل سه نوع هیدروکربن پارافینی، نفتنی و آروماتیکی می‌باشد و از هیدروکربن‌های سنگین تشکیل می‌شود [۱۴]. مطالعات انجام شده روی این ماده بیشتر روی نفت‌های دریای شمال بوده است [۱۵-۱۸].

تبلور و تشکیل رسوبات واکس پارافینی در طی عملیات‌های انتقال و تولید نفت خام سبب به‌وجود آمدن مسائل و مشکلات فراوانی می‌شود. این مسائل و مشکلات در هر سال سبب هدر رفتن میلیون‌ها دلار می‌شود که این هزینه‌ها شامل خرید و تأمین مواد شیمیایی، کاهش تولید، استفاده کمتر از ظرفیت هر واحد، تعویض خطوط لوله نفتی، تخریب و از کار افتادن تجهیزات، نیرو محرکه اضافی و متوقف کردن عملیات می‌باشد [۱۰].

در آزمایش‌ها مشاهده گردیده است که به طور غالب نرمال پارافین‌ها عامل به‌وجود آمدن این مسأله هستند [۱۰]. در اغلب موارد به جای اصطلاح واکس‌های پارافینی، منحصراً از اصطلاح نرمال پارافین‌ها استفاده می‌شود. علت این موضوع ته نشینی سریع‌تر هیدروکربن‌های راست زنجیر به نسبت اجزا دیگر به علت دمای ذوب پایین‌تر و متعاقباً تشکیل قسمت عمده رسوب توسط نرمال پارافین‌ها (هیدروکربن‌های راست زنجیر) می‌باشد. با توجه به مطالب گفته‌شده، شناخت دقیق آسفالتین، واکس و رفتار شناسی پدیده رسوب آسفالتین و واکس از مهم‌ترین مباحث مهندسی تضمین جریان نفت می‌باشد.

کریستالیزاسیون و رسوب ترکیبات واکس منجر به بروز مشکلات زیادی در مراحل تولید، انتقال، ذخیره‌سازی و انجام فرایندهای مختلف مربوط به نفت خام و یا مشتقات آن می‌شود. تشکیل رسوبات واکس در خطوط انتقال نفت خام، می‌تواند باعث گرفتگی لوله‌ها و افزایش مقاومت در برابر جریان و در نتیجه افت فشار جریان شده و علاوه بر افزایش توان مورد نیاز جهت پمپ نمودن سیال، موجب استهلاک زودرس تأسیسات شود. همچنین تشکیل رسوبات واکس در تجهیزات فرایندی مانند مبدل‌های حرارتی و خطوط لوله باعث

کاهش کارایی این تجهیزات می‌شود [۱۹-۲۲]. شکل ۱.۱ نمونه‌ای از رسوب تشکیل شده در خطوط انتقال نفت خام را نشان می‌دهد.



شکل ۱.۱: کاهش قطر مؤثر خط لوله به دلیل رسوب واکس [۲]

از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش شبیه‌سازی رسوب واکس در خط لوله و بررسی تأثیر پارامترها بر روی آن می‌باشد، در ادامه به دلایل تشکیل رسوب واکس خواهیم پرداخت.

۴.۱. نقطه ابری شدن، نقطه ناپدید شدن و نقطه ریزش نفت

دمایی که در فرایند سرمایش نفت، نخستین بلورهای واکس ظاهر می‌شود را دمای ظاهر شدن واکس (WAT¹) می‌نامند. در این نقطه بلورها به صورت سوسپانسیون در فاز مایع معلق شده و سیال را کدر می‌نمایند، از این رو به این نقطه، نقطه ابری شدن نیز می‌گویند. نقطه ابری شدن از روش‌های مختلفی نظیر اندازه گیری گرانروی، اندازه گیری شفافیت نفت و کالریمتری قابل اندازه گیری است. هر چه سرعت سرمایش کمتر باشد، اندازه گیری WAT دقیق‌تر خواهد بود؛ زیرا فوق اشباع شدن محلول حداقل می‌شود.

¹ Wax Appearance Temperature

بلورهای ایجاد شده در عملیات گرمایش می‌توانند تا دمای ناپدید شدن بلورهای واکس (WDT^1) باقی بمانند و در بیش از این دما از هم گسیخته خواهد شد. کمترین دمایی که در آن محلول به حالت شفاف و بدون بلور باز می‌گردد را دمای ناپدید شدن واکس در محلول می‌نامند. این دما بیشتر از دمای ابری شدن سیال است. نقطه ریزش خاصیت مهم دیگری از نفت خام است. همانند نقطه ابری شدن، نقطه ریزش به مقدار واکس موجود در نفت و خواص جریان نفت بستگی دارد. نقطه ریزش دمایی است که در آن ساختاری ژل مانند در نتیجه تبلور پارافین‌ها در نفت تشکیل می‌شود که منجر به تغییرات شدید در گرانشی و خواص جریان نفت می‌گردد [۲۳].

۵.۱. سخت شدن رسوب

رسوب واکس در لوله با گذشت زمان رشد یافته و سخت می‌شود و به این ترتیب مقدار فاز نفت در رسوب کاهش یافته و جزء جامد واکس افزایش می‌یابد. این پدیده را سخت شدن رسوب واکس یا به بیان بهتر نشست رسوب بر جداره لوله (Deposition) می‌نامند. نظریه متداول درباره سخت شدن رسوب واکس در لوله، نفوذ مولکول‌های واکس به داخل رسوب و اضافه شدن آنها به فاز جامد در رسوب است. در این فرایند به دلیل وجود گرادیان دمایی و به دنبال آن گرادیان غلظت در دو سوی رسوب نفوذ به داخل رسوب انجام می‌شود و در داخل رسوب متبلور می‌شوند که به این ترتیب جزء جامد در رسوب افزایش می‌یابد. خواص مکانیکی رسوب و نیز خواص حرارتی رسوب وابسته به مقدار جزء جامد یا سختی آن است که نقش تعیین کننده‌ای را در انتخاب روش مناسب برای حذف رسوب در لوله ایفا می‌کند. مقدار جزء جامد در رسوب می‌تواند ۵ تا ۵۰ درصد باشد [۲۴]. پدیده سخت شدن رسوب با زمان توسط سینگ بررسی شد. او نفوذ

¹ Wax Disappearance Temperature

ترکیبات سنگین از فاز مایع به داخل رسوب و نفوذ ترکیبات سبک از رسوب به داخل نفت را عامل سخت شدن رسوب عنوان نمود. آزمایش‌های او در دستگاه حلقه جریان‌ی نشان داد که مقدار ترکیبات سنگین پارافینی با گذشت زمان افزایش می‌یابد [۲۲]. این پدیده توسط محققان دیگر با روش‌های متفاوت و شرایط عملیاتی گوناگون تایید شده است [۲۵-۲۸].

سینگ پدیده سخت شدن را با نفوذ ترکیبات سنگین به داخل رسوب توجیه نمود [۲۲]. در این دیدگاه اجزایی از پارافین‌ها که تعداد اتمهای کربن آنها از عدد کربن بحرانی (CCN^۱) بیشتر باشد، از توده نفت به مایع محبوس در لایه رسوب نفوذ می‌کنند که در نهایت رسوب کرده و باعث افزایش میزان واکس جامد در رسوب می‌شود. مشتقاتی از پارافین‌ها که تعداد اتمهای کربن آنها از CCN کمتر باشد، به مرور از رسوب خارج می‌شوند. CCN به محدوده پایین مولکولهای هیدرو کربنی که در سفت شدن لایه رسوب شرکت می‌کنند، وابسته است و کمیت بسیار مفیدی برای تخمین ترکیبات اصلی در رسوب واکس سخت شده است. توجه به مقدار CCN در انتخاب ممانعت کننده‌های شیمیایی در برابر رسوب ضروری است. ممانعت کننده‌های تشکیل رسوب واکس اغلب افزودنی‌های شیمیایی هستند که از سرعت رشد و با تجمع بلورهای پارافین، از تبلور یا جذب سطحی آنها جلوگیری می‌کنند و نقش موثری در کاهش دمای نقطه انجماد و سرعت رسوب دارند. مقدار CCN را می‌توان از طریق ترکیبات رسوب و مایع متناظر با آن به دست آورد که با استفاده از دستگاه‌هایی همچون انگشت سرد^۲ یا دیسکهای گردان امکان پذیر است [۲۹].

^۱ Critical Carbon Number

^۲ Cold finger

۶.۱. ساختار بلورهای پارافینی

ساختار بلورهای پارافینی در تعیین مقاومت رسوب ایجاد شده در خطوط انتقال نفت حاوی واکس نقش مهمی دارد. با قطع جریان نفت در خطوط انتقال نفت واکس که با ساکن شدن نفت و سرد شدن آن به زیر نقطه ریزش همراه است، ژل پارافینی در لوله تشکیل می‌شود. مقاومت ژل ایجاد شده، عامل تعیین کننده‌ای در شرایط راه اندازی مجدد خط لوله و نیز فشار مورد نیاز برای شکستن ساختار ژل دارا می‌باشد. با افزایش اندازه بلورها و تشکیل شبکه محکم‌تر، مقاومت ژل افزایش می‌یابد و به این ترتیب عملیات راه اندازی خط لوله را با مشکلات جدی مواجه می‌سازد و ساختار رسوب نقش تعیین کننده‌ای در نفوذ پذیری رسوب در خطوط انتقال نفت در لوله دارد. در مدل سازی‌ها، افزایش اندازه بلورها را با مقدار جزء جامد در رسوب ارتباط داده و به این ترتیب نفوذپذیری رسوب با افزایش مقدار جزء جامد افزایش می‌یابد و رسوب سخت تر می‌شود. در این مدل‌ها فرض می‌شود که تشکیل بلورهای بزرگ‌تر، ساختار محکم‌تری در رسوب ایجاد می‌کنند. بنابراین، بررسی ساختار رسوب به درک بهتر فرایند سخت شدن رسوب و چگونگی آن کمک می‌نماید [۳۰].

۷.۱. دلایل تشکیل رسوب واکس در خطوط لوله نفت

واکس مانند آسفالتین توسط فرایند تبلور یا کریستالیزاسیون ایجاد رسوب می‌کند. هنگامی که جریان نفت از مخازن نفتی به سمت سطح زمین حرکت می‌کند، دما و فشار سیال کاهش یافته و در نتیجه زمینه برای ایجاد رسوب هیدروکربنی آماده می‌گردد. باید توجه داشت که به محض تشکیل یک لایه نازک از رسوب هیدروکربنی بر روی یک سطح، سرعت تجمع رسوبات بعدی به میزان خیلی زیادی افزایش می‌یابد. با

قدیمی شدن چاه نفتی و کاهش تولید آن، معمولاً مسائل مربوط به پارافین‌ها افزایش می‌یابد. دلایل این پدیده عبارتند از:

- ۱- کیفیت نفت تغییر کرده و میزان اجزای سنگین آن (پارافین و آسفالتین) افزایش می‌یابد.
 - ۲- هم‌چنانکه فشار مخزن کاهش می‌یابد، تولید نفت کمتر شده و بنابراین سرعت جریان پایین می‌آید، این عمل باعث افزایش گرادیان دما در مجرای چاه می‌شود و این عمل نیز به نوبه خود موجب پایین آمدن دما در چاه شده و در نتیجه تجمع هیدروکربنی افزایش می‌یابد.
 - ۳- کاهش تولید منجر به کاهش سرعت جریان نفت و افزایش زمان ماند سیال در خطوط لوله می‌شود و در نتیجه زمان برای تشکیل رسوب، بیشتر می‌شود.
- در بررسی‌هایی که بر روی رسوبات انجام می‌شود علاوه بر شرایط تشکیل رسوبات نکته بسیار مهم و قابل توجه اثر پارامترهای مختلف بر روی این پدیده است. در این مطالعه اثر پارامترهایی مانند دبی، فشار، دما و... بر روی میزان رسوب واکس مورد بررسی قرار می‌گیرد [۳۱].

۸.۱. عوامل مؤثر در نشست واکس

مکانیزم ته نشینی واکس توسط نفوذ مولکولی مولکول‌ها و پراکندگی برشی^۱ (توزیع ذرات ریز تحت اثر نیروی برش) بلورهای واکس کنترل می‌شود. نشست بلورهای واکس ناشی از جاذبه، در شرایط جریانی قابل صرف نظر است. این نشست (ناشی از اثر جاذبه) بیشتر در شرایط ساکن، همانند تانک‌های ذخیره، عامل کنترل کننده است. میزان نشست واکس در سیستم‌های جاری توسط سه فاکتور سرعت جریان، خواص سطحی و اختلاف دما و سرعت سرد کردن سیال تعیین می‌شود.

¹ Shear dispersion

۱.۸.۱. اثر سرعت جریان در نشست واکس

در جریان آرام، میزان نشست واکس با افزایش سرعت جریان، افزایش می‌یابد. دلیل این عمل در دسترس بودن ذرات بیشتری برای ته نشینی بر روی سطح می‌باشد. همچنانکه سرعت جریان به سمت رژیم آشفته (درهم) پیش می‌رود، میزان نشست واکس کاهش می‌یابد که دلیل این پدیده پراکندگی برشی یعنی پراکندگی و توزیع ذرات ریز تحت اثر نیروی برشی ذرات سیال می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نشست واکس، با افزایش در آشفته‌گی جریان و سرعت جریان، به تدریج کاهش می‌یابد. پدیده پراکندگی برشی در جریان آشفته در همه مراحل، عامل غالب می‌باشد، واکسی که در جریان‌هایی با سرعت بالاتر نشست می‌کند، سخت‌تر و متراکم‌تر است [۳۱].

دلیل عمده اثر سرعت جریان در جریان آشفته بر نشست واکس، زمان اقامت بیشتر نفت در لوله‌ها می‌باشد. زمان اقامت بیشتر باعث افت حرارتی بیشتر و در نتیجه رسیدن به دمای پایین‌تر می‌شود که این هم به نوبه خود منجر به رسوب کردن و ته نشینی واکس می‌گردد. کمترین سرعت جریان به منظور جلوگیری از نشست واکس حدود 0.56 ft/s پیشنهاد می‌شود [۳۱].

۲.۸.۱. اثر خواص سطح بر تشکیل رسوب واکس

بدیهی است در حین عمل ته نشینی واکس‌ها به سطح لوله‌ها می‌چسبند. بنابراین ته نشینی واکس می‌تواند تابع خواص سطوح باشد. ثابت شده است که در حضور لایه‌ای از یک ماده خاص بر روی سطح فلز (لوله) چسبندگی پارافین به آن سطح کاهش می‌یابد.

مشاهده شده است که انرژی آزاد سطح و اختلاف دما به طور مستقل از هم بر روی نشست واکس تأثیر می‌گذارد. همچنان که واکس‌های پارافینی بر روی سطح لوله‌ها نشست می‌کنند، به وسیله جذب سطحی

بر روی سطح نگه داشته می‌شوند. این نیروهای جذب سطحی به سطح انرژی پارافین‌ها و سطوح (لوله‌ها و ...) مرتبط می‌باشند.

اثر زبری بر روی نشست پارافین توسط افراد زیادی مطالعه شده است و به این نتیجه رسیده‌اند که بلورهای واکس به سطح خود فلز نمی‌چسبند، بلکه بوسیله زبری‌های سطح نگه داشته می‌شوند. ثابت شده است که میزان واکس رسوب کرده با افزایش زبری سطح افزایش می‌یابد. آنها ثابت کرده‌اند که چسبندگی در روی سطوح تابع کل سطح برخورد (متناسب با کل سطح تماس) می‌باشد و در نتیجه بستگی به زبری سطح دارد. همچنین با انجام آزمایش‌های مختلف مشاهده شده است که میزان واکس رسوب کرده بر روی سطح صیقل شده فولاد کمتر از میزان روی سطح معمولی فولاد است [۳۲، ۳۳].

۳.۸.۱. اثر اختلاف دما و سرعت سرد کردن سیال بر تشکیل رسوب واکس

علاوه بر سرعت سرد کردن سیال، اختلاف دمای بین بالک و سطح سرد عامل دیگری برای ته نشینی واکس است. با افزایش این اختلاف دما، میزان نشست واکس افزایش می‌یابد [۳۲].
نشست واکس فقط هنگامی رخ می‌دهد که دمای سطح سرد از دمای محلول (بالک) و دمای نقطه ابری شدن محلول پایین‌تر باشد [۳۳].

هنگام نشست واکس، در ابتدا سرعت نشست واکس بالاتر است، اما هم چنانکه واکس بر روی سطح لوله نشست می‌کند، این سرعت آهسته‌تر می‌شود. با گذشت زمان ضخامت لایه واکس افزایش می‌یابد و این در حالی است که همانند یک عایق عمل کرده و اختلاف دمای مؤثر (بین محیط و بالک نفت) را کاهش می‌دهد، این عمل باعث کاهش رسوب می‌شود [۳۳].

اندازه و تعداد بلورهای تشکیل شده نیز از عوامل مهمی برای ته نشینی واکس می‌باشند. چرا که نقاطی که عمل تبلور در آنها انجام می‌شود^۱ بیشتر می‌شود.

در سرعت‌های پایین سردسازی، فرایند تبلور یکنواخت‌تر می‌باشد. بنابراین بلورهای یکنواخت‌تری تشکیل می‌شوند که این بلورها مساحت و انرژی آزاد نسبتاً کمتری دارند. اختلاف دما بر روی ترکیب واکس ته نشین شده نیز اثر می‌گذارد.

اگر اختلاف دما زیاد باشد، گرادیان انتقال حرارت شدیدتر بوده و هر دو نوع بلورهای واکس، یعنی بلورهای با نقطه ذوب پایین و یا بالا و به طور همزمان، تشکیل شده و یک ساختمان متخلخل ضعیف با حفره‌های پر شده از نفت می‌سازند.

۹.۱. هدف از انجام پژوهش

رسوب واکس‌ها یک دسته از رسوبات نفتی می‌باشند که در دماهای پایین، می‌توانند با رسوب در خطوط انتقال نفت و تجهیزات، مشکلات چشم‌گیری به وجود بیاورند، لذا اهمیت بررسی رفتار رسوب گذاری واکس، جهت شناخت روش‌های از بین بردن این رسوبات امری ضروری است. در این پژوهش به شبیه‌سازی رسوب واکس، با استفاده از نرم‌افزار OLGA پرداخته می‌شود. در انجام شبیه‌سازی به تحلیل حساسیت پارامترهای تاثیرگذار در پیدایش و رسوب واکس خواهیم پرداخت که از جمله آنها می‌توان به بررسی تأثیر دما، دبی سیال، زبری دیواره خط لوله و شیب خط لوله بر روی میزان رسوب‌گذاری مقدار و مکان تشکیل رسوب به صورت تابعی از زمان اشاره کرد.

¹ Crystallization sites



فصل دوم

مروری بر شبیه‌سازی رسوب واکس در خطوط لوله

مروری بر منابع و تحقیقات انجام گرفته

۱.۲. مقدمه

در این فصل به بررسی مدل‌های موجود برای پیش بینی ضخامت رسوب واکس در لوله پرداخته شده است. از آنجا که ساختار رسوب می‌تواند بر فرایند سخت شدن آن تأثیر گذارد، در ادامه تحقیقات انجام شده بر ساختار بلورهای پارافینی بررسی شده است. نفت خام مخلوط پیچیده‌ای از هیدروکربن‌ها از قبیل پارافین‌ها، آروماتیک‌ها، نفتن‌ها، رزین‌ها و آسفالتن‌ها است. در میان این گروه از هیدروکربن‌ها، پارافین‌هایی با جرم مولکولی بالا (واکس‌ها) و آسفالتن‌ها موجب بروز مشکلاتی در حین انتقال و ذخیره نفت خام می‌گردند و بسته به میزان هر کدام از این ترکیبات، یک نفت خام با نام واکسی یا نفت آسفالتی شناخته می‌شوند. پارافین‌ها شامل آلکان‌ها با عدد کربنی بین ۱۸ تا ۶۵ یا حتی بیشتر می‌باشند. یکی از ویژگی‌های پارافین‌ها با جرم مولکولی بالا، حلالیت پایین در حلال‌های نفتی آروماتیکی و نفتنیکی و غیره در دمای اتاق است [۲۸].

در شرایط دمایی مخازن (دمای ۷۰ الی ۱۵۰ درجه سانتیگرادی) حلالیت این ترکیبات بسیار بالا است بطوریکه این مولکول‌ها به طور کامل در نفت خام محلول می‌باشند و نفت مانند یک سیال نیوتونی با ویسکوزیته پایین رفتار می‌کند. اما وقتی که نفت وارد لوله‌های داخل دریا می‌شوند، به علت افت فشار در داخل لوله و تماس با آب دریا (دمای ۵ الی ۱۰ درجه سانتیگرادی) رسوب واکس تشکیل شده و در بعضی مواقع باعث بسته شدن خط لوله می‌شود. به دلیل چشمگیر بودن هزینه‌هایی که برای عملیات استخراج

نفت از مخازن دریایی خرج می‌شود، ریسک اقتصادی ناشی از بروز مشکلات مربوط به کریستالیزاسیون مولکولهای واکس بسیار زیاد است [۲۸].

بنابراین با درک صحیح از فرایند و ساختار رسوب واکس تحت شرایط عملیاتی مختلف و پیش بینی مکان‌های تشکیل رسوب واکس می‌توان به کمک روش‌های مکانیکی، شیمیایی و یا تغییر شرایط محیطی، برای از بین بردن یا کاهش رسوب واکس اقدام نمود. بر اساس مطالعات انجام شده، ساختار کریستال‌های رسوب واکس را می‌توان در دو شرایط استاتیکی و دینامیکی مورد تحلیل قرارداد. در ادامه به مطالعه ساختار میکروسکوپی کریستال‌های رسوب واکس خواهیم پرداخت [۲۸].

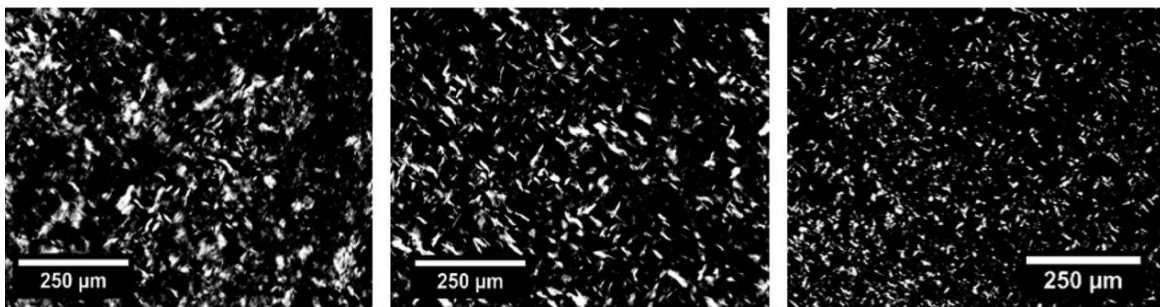
۲.۲. مطالعات میکروسکوپی

۱.۲.۲. مطالعات میکروسکوپی تحت شرایط استاتیکی

ونکاتسانا و همکارانش [۲۷] با استفاده از نفتی با دمای نقطه ابری شدن $28/3^{\circ}\text{C}$ ، کریستال‌های واکس تشکیل شده را تحت سرعت سرد شدن مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش کردند که در سرعت سرد شدن پایین ($1/8^{\circ}\text{F}/\text{min}$) ابعاد متوسط ذرات به طول $19/1\ \mu\text{m}$ ، عرض $15\ \mu\text{m}$ و ضخامت $12/2\ \mu\text{m}$ و نیز در سرعت سرد شدن بالا ($10/8^{\circ}\text{F}/\text{min}$)، متوسط ابعاد ذرات در همان حجم نیز بصورت $12/2\ \mu\text{m}$ طول، $12\ \mu\text{m}$ عرض و $1\ \mu\text{m}$ ضخامت می‌باشد. آنها گزارش کردند که تحت سرعت سرد شدن پایین متوسط اندازه ذرات واکس بزرگ‌تر بوده و نشان دهنده رشد دو بعدی کریستال است. نتایج بالا را می‌توان با توجه به زمان موجود برای رشد شبکه کریستال واکس توضیح داد. چرا که سرعت سرد شدن پایین، زمان زیادی برای رشد کریستال فراهم می‌کند پس کریستال‌های واکس بزرگ‌تری تشکیل می‌شود، کریستال‌های

بزرگ‌تر نیز منجر به تشکیل شبکه مستحکم‌تری می‌گردد. مشاهدات سودارمو و همکارانش (۲۰۱۶) نیز آن نتایج را تایید می‌کند [۲۶].

سودارمو و همکارانش (۲۰۱۶) از مخلوط نفت معدنی و واکس با نسبت وزنی ۹۵ به ۵ استفاده کردند؛ این مخلوط نفتی دارای دمای ظهور واکس ۴۱/۰۵ درجه سلسیوس است. آنها ابتدا نمونه را تا دمای ۵۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۰ دقیقه گرم کردند و بعد نمونه را از دمای ۵۵ به ۳۵ درجه سلسیوس به وسیله ۳ سرعت سرد شدن مختلف سرد کردند (۰/۱، ۰/۵ و $1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$) تعداد کریستال‌های واکس تشکیل شده را مورد بررسی قرار دادند [۲۶].



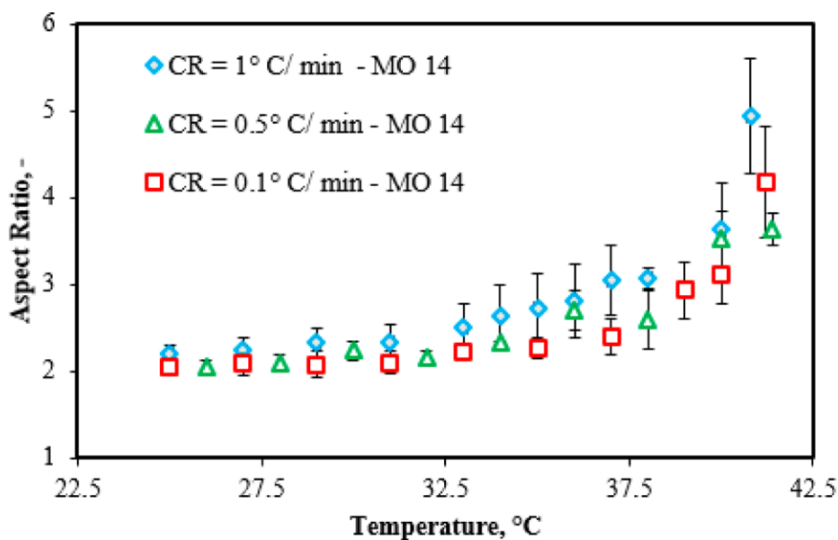
(ج)

(ب)

(الف)

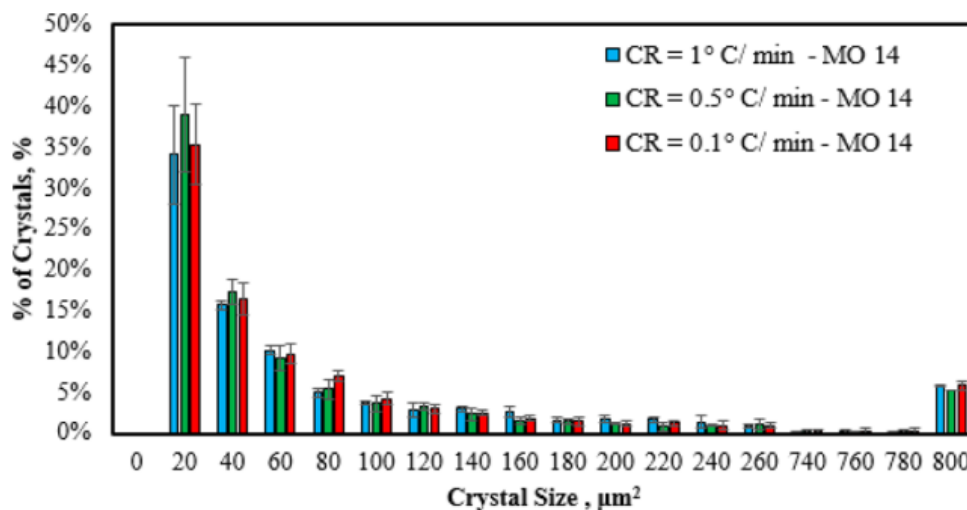
شکل ۱.۲: تصاویر میکروسکوپی استاتیکی مشاهده شده در بزرگ‌نمایی $100 \times$ در دمای ۳۵ درجه سلسیوس تحت سرعت‌های سرد شدن مختلف (الف) ۰/۱، (ب) ۰/۵ و (ج) ۱ درجه سانتی‌گراد در دقیقه [۲۶]

کریستال‌های اولیه رسوب، تمایل به تشکیل شکل سوزنی با متوسط مقدار نسبت ابعاد بالا (۵/۷-۳/۴) دارند. با کاهش دما، متوسط مقدار نسبت ابعاد در نفت خام مورد استفاده به ۲ الی ۲/۳ همگرا شده است. این داده‌ها نشان می‌دهد که راستای رشد کریستال‌ها لزوماً موازی محور اصلی کریستال‌ها نمی‌باشد. شکل ۲.۲ نسبت ابعاد کریستال با کاهش دما تحت سرعت‌های سرد شدن مختلف را نشان می‌دهد.



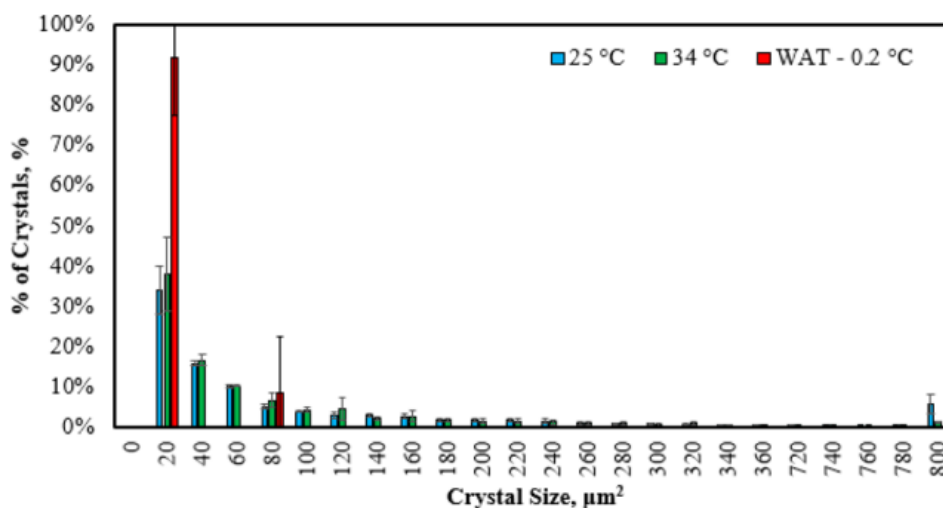
شکل ۲.۲: نسبت ابعاد رسوب بر حسب دما در سرعت‌های سرد شدن مختلف

با افزایش سرعت سرد شدن بلورهای بزرگ‌تری تشکیل می‌شود که نسبت ابعادی بزرگ‌تری دارند. سودارمو و همکارانش (۲۰۱۶) توزیع اندازه کریستال نهایی واکس را با توجه به شرایط آزمایش بالا اندازه‌گیری کردند، تنها با این تفاوت که نمونه را تا دمای ۲۵ درجه سرد کردند، سپس ۲۴ ساعت تحت شرایط هم دما نمونه نفت خام را در ۲۵ درجه نگه‌داشتند. همانطور که در شکل ۳.۲ مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده تحت شرایط نهایی نشان می‌دهد که توزیع اندازه کریستال مستقل از سرعت سرد شدن می‌باشد.



شکل ۳.۲: توزیع اندازه کریستال در شرایط نهایی تحت سرعت سرد شدن مختلف [۲۶]

سودارمو و همکارانش (۲۰۱۶) با توجه به شرایط آزمایش انجام شده توزیع اندازه کریستال در ۳ دمای مختلف، با سرعت سرد شدن ۱ درجه در دقیقه را بررسی کردند که نتایج آن در شکل زیر قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴.۲: توزیع اندازه کریستال تحت سرعت سرد شدن ۱ °C / min

این مشاهدات نشان می‌دهد در حالی که کریستال‌های موجود در حال رشد اندازه هستند، در اثر کاهش دما هسته‌های کوچک‌تر جدیدی نیز در حال تشکیل می‌باشند [۲۶].

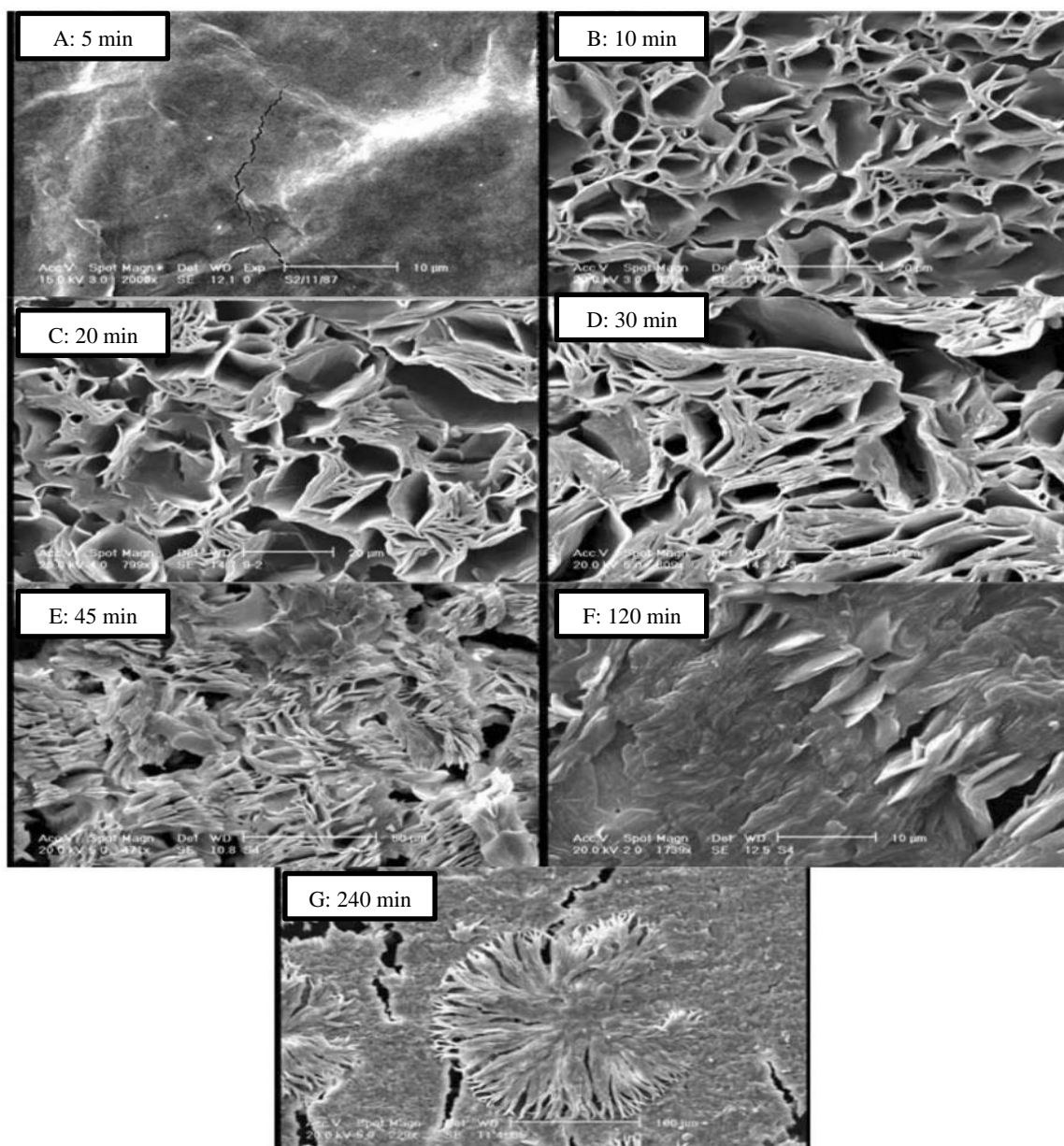
آزودو و همکارانش (۲۰۰۵) در آزمایش‌های خود از مخلوط نفتی که شامل ۱۰٪ حجمی محلول پارافین تصفیه شده با تعداد کربن بین C_{21} تا C_{38} که در نرمال پارافین C_{13} تا C_{16} حل شده است، استفاده کردند. آنها مشاهده کردند که با گذشت زمان کریستال‌های شش ضلعی هم بر روی دیوار سرد لوله و هم نزدیک به دیوار سرد لوله تشکیل می‌شوند. علاوه بر این، کریستال‌های تشکیل شده در مجاورت دیواره سرد لوله تا زمانی که در داخل شبکه کریستالی تشکیل شده به دام نیافتاده‌اند، بصورت آزاد در حال حرکت، چرخش و رشد (چسبیدن به کریستال‌های دیگر) می‌باشند [۲۵].

۲.۲.۲. مطالعات میکروسکوپی تحت شرایط دینامیکی

ونکاتسانا و همکارانش آزمایش‌هایی را نیز تحت تنش‌های برشی مختلف انجام دادند. آنها نمونه نفتی را تحت سرعت تنش برشی مختلف ۱، ۰/۱، $\gamma = 0$ رادیان بر ثانیه مورد مطالعه قرار دادند. میانگین اندازه صفحات کریستال تحت شرایط ساکن جریان ($\gamma = 0$) دارای $6/58 \mu m$ طول، $2/26 \mu m$ عرض و نسبت ابعاد (نسبت طول بر عرض کریستال) $3/13$ بوده است. میانگین اندازه صفحات کریستال تحت سرعت تنش برشی اعمال شده $\gamma = 0/1 \frac{rad}{s}$ دارای طول $8/36 \mu m$ ، $2/15 \mu m$ عرض و نسبت ابعاد ۴ بوده است. تنش برش اعمال شده در طول تشکیل کریستال واکس منجر به تجمع کریستال واکس و در نتیجه تشکیل کریستال‌های بزرگ‌تری می‌شود و از آنجایی که کریستال‌های بزرگ‌تر منجر به تشکیل شبکه قوی‌تری (مستحکم‌تری) می‌شود، از این رو تنش تسلیم رسوب تشکیل شده تحت تنش برشی متوسط، بزرگ‌تر از تنش تسلیم رسوب تشکیل شده تحت شرایط ساکن می‌باشد [۲۷].

علاوه بر این، میانگین اندازه صفحات کریستال تحت سرعت تنش برشی اعمال شده $\gamma = 1 \frac{rad}{s}$ دارای $5/18 \mu m$ طول، $1/85 \mu m$ عرض و نسبت ابعاد $2/94$ می‌باشد. که این کاهش در اندازه کریستال به دلیل دو فرایند رقابتی تجمع و شکست کریستال می‌باشد [۲۷].

با افزایش تنش برشی اعمال شده ابتدا تجمع کریستال‌ها افزایش یافته، در نتیجه اندازه کریستال‌ها افزایش می‌یابد. از یک محدوده‌ای به بعد افزایش تنش برشی باعث شکست کریستال‌های در حال رشد می‌شود، در نتیجه اندازه کریستال‌ها کاهش پیدا می‌کند. همچنین ونکاتسانا و همکارانش (۲۰۰۵) به طور میانگین تعداد ۴۴ کریستال تحت شرایط ساکن، تعداد ۳۸ کریستال تحت سرعت تنش برشی متوسط و تعداد ۷۷ کریستال تحت سرعت تنش برشی بالا مشاهده کردند، چرا که افزایش تنش برشی از یک مقداری بالاتر، باعث می‌شود کریستال‌های در حال تشکیل شکسته شوند و در نتیجه تعداد کریستال‌ها افزایش پیدا کند [۲۷]. این مطالعات توسط سودارمو و همکارانش (۲۰۱۶) نیز انجام شده است و نتایج آن دقیقاً مشابه نتایج تحت شرایط استاتیکی می‌باشد [۲۶].



شکل ۵.۲: ساختار رشد رسوب واکس در زمان‌های عملیاتی مختلف در دقایق: ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۱۲۰ و ۲۴۰ [۳۳]

مسعودی و همکارانش در سال ۲۰۱۰ از مخلوط پارافین واکس تصفیه شده و نفت سفید برای ساخت خوراک نفت واکسی استفاده کردند. آنها مشاهده کردند که دیواره لوله ابتدا از رسوب صاف و یک شکل پوشانده شده است که تقریباً هیچ کریستال ماکرو صفحه‌ای وجود ندارد. سپس کریستال‌های ماکرو صفحه‌ای ($20-1 \mu\text{m}$) شروع به رشد می‌کنند و در هم بافته می‌شوند و ناحیه‌های تو خالی در داخل رسوب ایجاد می‌کنند. با گذشت زمان کریستال‌های جدید کوچک صفحه‌ای ($10-1 \mu\text{m}$) و مال کریستال روی سطح رسوب واکس تشکیل می‌شود و کسر کریستال‌های صفحه‌ای به تدریج کاهش و مال کریستالها به تدریج افزایش پیدا می‌کنند [۳۳].

در نهایت، مال کریستال‌ها^۱ همراه با کریستال‌های نیمه یا کاملاً گوی مانند (کروی) بر روی سطح لوله، رسوب می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت رسوب با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند، ولی سرعت رشد رسوب به دلیل اثر مقاومت حرارتی رسوب و در نتیجه افزایش دمای فصل مشترک کاهش پیدا می‌کند. با گذشت زمان رسوب سخت‌تر می‌شود که این نیز در نتیجه کاهش بیشترین مساحت حفره‌های توخالی ایجاد شده بر روی سطح رسوب و تغییر مورفولوژی کریستال از ماکرو صفحه‌ای به مال کریستال و گوی مانند (کروی) می‌باشد. همچنین کسر جامد واکس اندازه گیری شده در رسوب واکس با گذشت زمان افزایش می‌یابد، چرا که در هم بافته شدن کریستال‌های واکس باعث کاهش حفره‌های توخالی رسوب می‌شود که این نیز منجر به کاهش نفت خام باقی مانده در داخل حفرات رسوب و افزایش کسر جامد واکس می‌شود. شکل ۵.۲ رشد رسوب واکس با گذشت زمان را نشان می‌دهد [۳۳].

مسعودی و همکارانش (۲۰۱۰) مشاهده کردند که در نزدیکی دیواره لوله، کریستال‌های ماکرو صفحه‌ای در هم یافته شده‌اند که دارای حفره‌هایی برای به دام انداختن نفت خام می‌باشد و رسوب دورتر از دیواره لوله

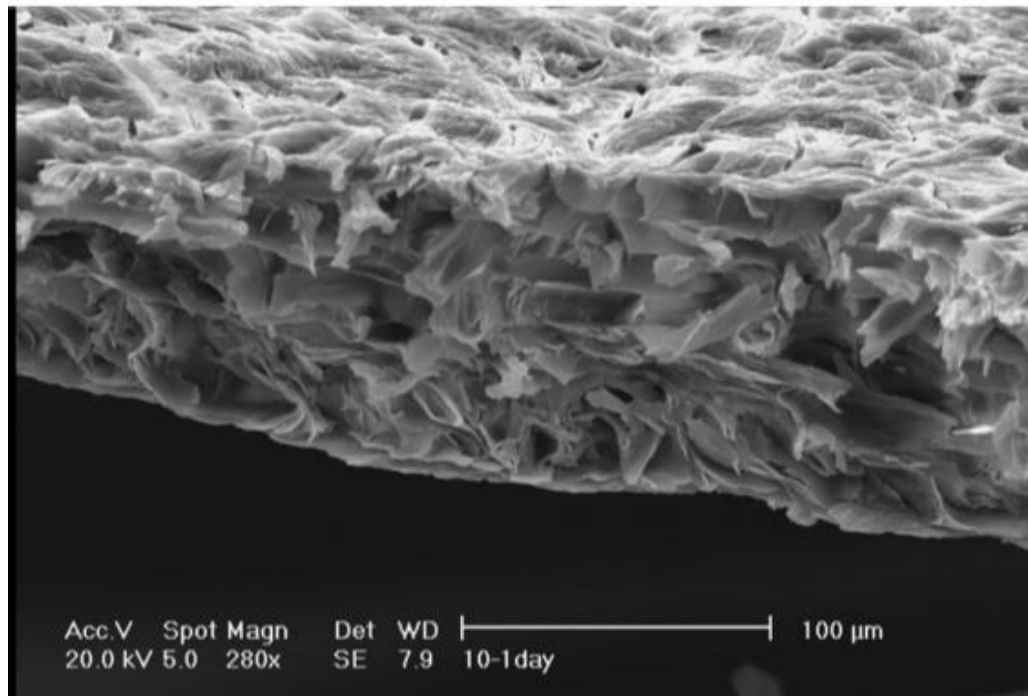
¹ Mal-Crystal

یک ساختار متراکم با مورفولوژی‌های مختلف کریستال‌های کوچک صفحه‌ای، مال کریستال و کریستال‌های کروی را نشان می‌دهد. این تغییر مورفولوژی در نتیجه تغییر و افزایش دمای فصل مشترک به دلیل عایق شدن سطح لوله با گذشت زمان می‌باشد. با این حال ساختار کریستال اولیه نیز با توجه به شرایط عملیاتی می‌تواند تغییر پیدا کند. به عنوان مثال، کاهش گرادیان دما بین فصل مشترک نفت-واکس و نفت باعث می‌شود مورفولوژی رسوب اولیه از کریستال‌های ماکرو صفحه‌ای به کریستال‌های کوچک صفحه‌ای و مال کریستال تغییر پیدا کند [۳۳].

مسعودی و همکارانش نشان دادند که با افزایش سرعت جریان و در نتیجه کاهش گرادیان دما بین فصل مشترک نفت-واکس اولیه و دمای ابری شدن نفت خام، مورفولوژی رسوب اولیه از کریستال‌های ماکرو صفحه‌ای به کریستال‌های کوچک صفحه‌ای و مال کریستال تغییر پیدا کند [۳۳].

در شکل ۶.۲ سطح مقطع از یک واکس جدید ته نشین شده با توزیع تعداد کربن C_{22} - C_{44} و در پیک C_{27} نشان داده شده است. این آزمایش در جریان نفت با نرخ ۲ لیتر در دقیقه و کاهش دمای برابر ۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه با حلال نفتی محتوی ۱/۵ درصد وزنی (wt%) واکس انجام شده است. نمونه برداری بعد از یک روز عملیاتی صورت پذیرفته است. مورفولوژی ته نشینی سطح جانبی اختلاف در ساختار را نشان می‌دهد. آنها مشاهده کردند که در نزدیکی دیواره لوله، ماکروپلیت‌های^۱ کریستالی به هم پیچیده شده به طوری که تعدادی حفره برای به دام انداختن نفت و سطح ته نشینی داشته است و ساختاری با مورفولوژی پیچیده داشته که کاملاً در شکل زیر واضح است.

¹ Macro Plate



شکل ۶.۲: سطح جانبی از ته نشینی واکس بعد از یک روز [۳۲]

۳.۲. مطالعات صورت گرفته بر روی بلور ساختارهای تشکیل واکس

ترنر [۳۴] بیان کرد که سرمایه‌های سریع به تشکیل بلورهای سوزنی و ناقص می‌انجامد در صورتی که سرمایه‌های کند منجر به رشد بلورهای صفحه‌ای می‌شود. بوچلر و گربوز [۳۵] بیان کردند که اجزاء با نقطه ذوب بالاتر به شکل صفحه‌ای، اجزاء با نقطه ذوب پایین به شکل سوزنی و اجزاء با نقطه ذوب متوسط بصورت ناقص می‌باشند. همچنین نرمال آلکان‌ها به شکل صفحه‌ای تبلور یافته و در این حالت شبکه بلور، ساده‌ترین شکل را دارد. بلورهای سوزنی، شامل هیدروکربن‌های آلیفاتیک و حلقوی می‌باشند در حالیکه بلورهای ناقص هیدروکربن‌های شاخه دار بوده و شبکه بلورها در این حالت پیچیده‌تر از حالت سوزنی می‌باشد.

کترا [۳۶] نشان داد که بلورهای صفحه‌ای همیشه به آسانی به بلورهای سوزنی شکل و بلورهای ناقص تبدیل می‌شوند. وی تشکیل صفحات را پیش زمینه لازم برای تشکیل شکل سوزنی دانست. همچنین مفاهیم شدت

تغییر و دمای تغییر را تعریف کرده و اظهار نمود که هر دو تغییر از سمت صفحه‌ای به سوزنی انجام می‌پذیرد و عکس آن غیر ممکن است.

التوق [۳۷] با سرد نمودن نفت خام به بررسی بلورهای واکس توسط میکروسکوپ نوری پرداخت و بلورهایی با اندازه ۱-۳ pm را مشاهده نمود. آن‌ها معتقد بودند که افزایش تعداد بلورها و کوچکی اندازه آن‌ها به علت حضور هسته‌های اولیه، در محلول پیچیده‌ای نظیر نفت خام می‌باشد. وی همچنین ترکیب مشخصی از نفت، گاز و یک ترکیب واکسی را بررسی کرده و مشاهده کرد که با افزایش طول مولکول‌های واکس، طول بلور هم افزایش می‌یابد.

هلدر [۳۸] با استفاده از میکروسکوپ نوری بلورهای واکس حاصل از گازوئیل را بررسی نمود. مشاهدات او نشان داد، بلورها به صورت صفحه‌ای و متداخل با یکدیگر هستند که فضاهای خالی، برای محبوس کردن نفت ایجاد می‌کنند.

گازاکس و همکاران [۳۹] ساختار ژل را با استفاده از XRD و CPM بررسی کردند. گزارش آنها نشان می‌دهد که پارامترهای کلیدی که ساختار ژل واکس را معین می‌کنند شکل بلور (نسبت ابعادی) و تراکم بلورهای واکس می‌باشند که هر دو پارامتر به دما و نرخ سرمایش بستگی دارند. وی بلورهای نوری را مشاهده کرده و نشان داد که با کاهش سرعت سرمایش، بلورهای سوزنی بلندتری تشکیل می‌شود. اندازه بلورها بین ۱۰۱۰pm با ضخامت ۱ μm گزارش گردید [۳۹].

ونکاتسن و همکاران [۲۷] با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به صفحات دوار به بررسی ساختار بلورها تحت نیروی برشی پرداخت. او از یک مخلوط پارافینی با عدد کرین ۲۲ تا ۳۹ در روغن پایه به عنوان خوراک استفاده نمود. مشاهدات او بلورهایی به شکل سکه را گزارش نمود. در این آزمایش‌ها با افزایش زمان

سرمایش، محلول مدت زمان بیشتری تحت نیروی برشی قرار می‌گرفت و این امر موجب شکسته شدن بلورها می‌شود. اما در زمانهای کوتاه، نیروی برشی سبب اتصال دانه‌های اولیه و ایجاد بلورهای بزرگ‌تری از واکس می‌گردد. اندازه بلورها تا ۸ میکرومتر گزارش شد. او نشان داد، تنش تسلیم ژل ایجاد شده با افزایش تنش برشی افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه شروع به کاهش می‌کند. در این آزمایش‌ها با افزایش مقدار واکس اولیه در نمونه نفتی، مقاومت ژل افزایش یافت.

بلورهای ایجاد شده از قیر توسط لو و همکارانش [۴۰] بررسی شد. دستگاه مورد استفاده آنها میکروسکوپ مجهز به لیزر بود که برای بررسی دقیق‌تر نمونه‌های ضخیم‌تر مناسب بود. در این تحقیق ابتدا واکس از نمونه قیر استخراج شده و سپس مورد بررسی قرار گرفت. نمونه در ابتدا تا 120°C گرم شده و سپس در دمای محیط سرد شد. ساختار بلورها در این تحقیق بصورت صفحه‌ای سوزنی و نیز ساختاری که در هیچ یک از این طبقه بندی قرار نمی‌گیرد تقسیم بندی شد. آنها نشان دادند که ساختار بلورها به دمای تبلور و زمان نگهداری نمونه‌ها در دمای محیط و نیز نوع خوراک اولیه وابسته است.

اثر سرعت سرمایش بر تبلور در نفت دارای واکس توسط جنگ [۴۱] بررسی شد. او از یک رئومتر و میکروسکوپ نوری استفاده نمود. او نشان داد در سرعت سرمایش پایین بلورهای بزرگ‌تری رشد می‌کنند و زمان نگاه داشتن نمونه در یک دمای ثابت تاثیری در ساختار بلورها ندارد. او ساختار بلورها را نه صفحه‌ای و نه سوزنی بلکه گویچه‌ای گزارش نمود.

استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی توسط چیچکلی [۴۲] روی نمونه‌های تبخیر شده از محلول نفت دارای واکس انجام شد. او ساختار بلورها را صفحه‌ای به شکل لوزی گزارش نمود که در نقاطی با یکدیگر تداخل دارند.

مطالعات سیرواستاوا [۴۳] درباره تبلور واکس در نفت، بوسیله میکروسکوپ نوری و دستگاه تفرق اشعه ایکس نشان داد که ساختار به صورت صفحه‌ای و سوزنی است و بلورها ساختارهای شش وجهی و چهار وجهی دارند. تمامی آزمایش‌های او در سرعت سرمایش ثابت انجام شد.

ایمایی و همکارانش [۴۴] تبلور محلولی خالص از هپتان را بررسی نمودند. آنها محلول را تا دمای 10°C گرم کرده و سپس به مدت ۶ ساعت در دمای محیط قرار دادند. سپس نمونه را در محلول اتانول قرار داده تا ژل ایجاد شده حذف شود و نهایتاً با قرار دادن نمونه در شرایط خلاء به بررسی بلورها توسط میکروسکوپ الکترونیکی پرداختند. مشاهدات او حضور بلورهای صفحه‌ای را تأیید نمود.

در بررسی‌هایی که توسط کین [۴۵] انجام شد، از محلول‌های مختلفی از نفت حاوی واکس استفاده شد. او نمونه را گرم کرده و سپس در رئومتر و در حالت ساکن سرد کرد. رسوب بدست آمده را در نیتروژن مایع قرار داد و توسط میکروسکوپ پراکنشی الکترونیکی بررسی نمود. تحقیقات او نشان داد که اندازه ذرات اولیه کمتر از ۵۰ نانومتر است و ضخامت هسته‌ها کمتر از اندازه یک مولکول است. شکل این ذرات به صورت بشقاب گزارش شد. او نشان داد با افزایش تنش برشی اندازه هسته‌ها کوچکتر می‌شود.

۴.۲. مکانیسم‌های رسوب واکس در لوله

مکانیسم‌های عمده‌ای که برای رسوب واکس در متون علمی ارائه شده‌اند شامل نفوذ مولکولی، پراکندگی برشی، نفوذ برآونی و ته نشینی ناشی از جاذبه زمین می‌باشد [۱۹، ۲۲، ۲۴، ۴۶، ۴۷] منشأ مکانیسم‌های انتقال جرم در لوله، نیروهای متفاوتی هستند که پارافین حل شده و یا جدا شده از سیال را به دیواره لوله منتقل می‌کنند. در شرایطی که نفت از واکس اشباع شده باشد، وجود گرادیان دمایی (ناشی از انتقال حرارت از سیال به محیط) موجب ایجاد گرادیان غلظت واکس در محلول می‌شود و واکس محلول به سمت دیواره

لوله حرکت می‌کند و در آنجا از فاز مایع جدا می‌شود و لایه‌ای از مواد جامد را تشکیل می‌دهد. بر اساس قانون فیک جریان جرمی مولکول‌های واکس به سمت دیواره (گرادیان شعاعی غلظت واکس) با گرادیان دمایی در سیال متناسب است.

۱.۴.۲. نفوذ مولکولی

حلالیت ترکیبات پارافینی به دمای سیال وابسته است. بنابراین هنگامی که گرادیان دمای شعاعی در خط لوله وجود دارد، متعاقباً گرادیان شعاعی غلظتی نیز وجود خواهد داشت. گرادیان غلظت، نیروی محرکه برای جابجایی مولکول‌های محلول پارافین به سمت دیواره لوله است. یعنی جایی که مقدار واکس محلول کمتر است [۴۸]. در تمام رژیم‌های جریان، ناحیه‌ای در نزدیکی دیواره لوله وجود دارد که رژیم آرام دارد و مکانیسم انتقال جرم در آن ناحیه، نفوذ مولکولی است. در صورتیکه دمای آن کمتر از دمای تشکیل واکس باشد، واکس از نفت جدا شده و به سطح رسوب می‌چسبد که در این حالت مایع و جامد در حال تعادل با یکدیگر خواهند بود.

با استفاده از قانون اول فیک می‌توان سرعت انتقال جرم را با مکانیسم نفوذ مولکولی برای مخلوط‌های دو جزئی نوشت [۴۸]:

$$\frac{dm}{dt} = \rho D_{wo} A_i \frac{\partial w_w}{\partial r} \quad (2.1)$$

که در رابطه (۱.۲)، D_{wo} ضریب نفوذ واکس در نفت $(\frac{m^2}{s})$ ، ρ چگالی مایع $(\frac{kg}{m^3})$ ، A_i مساحت سطح مشترک شعاع تا سطح جامد (m) و w_w جزء جرمی واکس در نفت است (kg) . D_{wo} را می‌توان از رابطه (۲.۲) و (۳.۲) محاسبه کرد:

$$D_{AB} = 7.4 \times 10^{-12} T \frac{(\phi_B M_B)^{0.5}}{\mu_B V_A^{0.6}} \quad (2.2)$$

$$D_{AB} = 13.3 \times 10^{-12} \frac{(T^{1.47} \mu_B^{10.2/V_A^{-0.79}})}{V_A^{0.71}} \quad (3.2)$$

که (ϕ_B) ضریب ثابت وابستگی برای حلال، M_B وزن مولکولی حلال (Kg)، T دمای مایع (K)، μ_B ویسکوزیته حلال (cP) و V حجم مولی حل شونده A است ($\frac{m^3}{mol}$).

اگر داده‌های تجربی در دسترس باشند، می‌توان D_{AB} را از تقسیم یک عدد ثابت بر ویسکوزیته مایع در دمای مشخص به دست آورد و از رابطه (۲.۲) استفاده کرد. در صورت نبود داده‌های تجربی مانند وزن مولکولی حلال می‌توان از رابطه (۳.۲) برای به دست آوردن سرعت انتقال جرم بایستی توجه کرد که پارافین محلول به عنوان یک ترکیب خالص مجازی لحاظ شده است، ولی در حقیقت پارافین‌ها ترکیبی از مشتقات هیدروکربنی هستند [۲۴].

ترمودینامیک برگشت ناپذیر تعریف متفاوتی از نفوذ یا گرادیان دمایی را بیان می‌کند. با رابطه (۴.۲) می‌توان نفوذ مولکولی و نفوذ ناشی از گرادیان دمایی را از ترمودینامیک برگشت ناپذیر به دست آورد [۴۹، ۵۰]

$$J = -c(D^M \nabla x + D^T \nabla T + D^P \nabla P) \quad (4.2)$$

انتقال جرم با استفاده از قانون فیک برای بررسی فرایندهای هم دما و پایدار کاربرد دارد که نفوذ در آن تحت گرادیان غلظت وجود دارد. تحقیقات دانشگاه تالسا [۲۴] روشی را پیشنهاد می‌کند که در آن می‌توان از پارامترهای مشابهی مقدار کل انتقال جرم به سطح را محاسبه کرد.

$$\frac{dm}{dt} = k_m \rho A_i [w_w(T_b) - w_w(T_i)] \quad (5.2)$$

در رابطه (۵.۲) $w_w(T_b)$ جزء جرمی واکس در دمای توده سیال، $w_w(T_i)$ جزء جرمی واکس در دمای سطح مشترک و k_m ضریب انتقال جرم است که k_m را می‌توان از طریق مشابه سازی معادله چیلتون گلبرن و جایگزینی عدد ناسلت برای انتقال حرارت با عدد Sh برای انتقال جرم و از سوی دیگر عدد Pr بجای عدد Sc به دست آورد. این مشابه سازی برای پدیده‌هایی با نرخ انتقال جرم کم کارایی دارند [۲۴].

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f} = \frac{\text{Convective heat transfer coefficient}}{\text{Conductive heat transfer coefficient}} \quad (6.2)$$

L طول مشخصه (m)، k_f رسانندگی گرمایی سیال (W/m.K) و h ضریب انتقال گرمایی همرفت (W/m².K)

$$Sh = \frac{K.L}{D} = \frac{\text{Convective mass transfer coefficient}}{\text{Diffusive mass transfer coefficient}} \quad (7.2)$$

L طول مشخصه (m)، D نفوذپذیری جرمی (m^2/s) و K ضریب انتقال جرم (m/s)

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\text{viscous diffusion rate}}{\text{thermal diffusion rate}} = \frac{c_p \mu}{\kappa} \quad (8.2)$$

ν ویسکوزیته سینماتیک یا (ρ/μ) در SI با واحد (m^2/s) ، α ضریب نفوذ گرمایی (m^2/s) ، μ ویسکوزیته دینامیک $(N\cdot s/m^2)$ ، k ضریب هدایت گرمایی $(W/m\cdot K)$ و c_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت $(J/kg\cdot K)$ و ρ چگالی سیال (kg/m^3) .

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{\text{viscous diffusion rate}}{\text{molecular (mass) diffusion rate}} \quad (9.2)$$

ν ویسکوزیته سینماتیک یا (ρ/μ) در SI با واحد (m^2/s) ، D نفوذپذیری جرمی (m^2/s) ، μ ویسکوزیته دینامیک سیال $(Pa\cdot s)$ یا $(N\cdot s/m^2)$ یا $(kg/m\cdot s)$ و ρ چگالی سیال (kg/m^3) .

۲.۴.۲. پراکندگی برشی

وقتی دمای سیال به زیر دمای WAT می‌رسد ذرات معلق واکس در توده سیال به وجود می‌آید که خود می‌تواند عاملی برای افزایش رسوب باشد. ذرات ریز نامحلول (معلق) در جریان آرام مایع یا سرعت متوسطی در جهت اطرافشان حرکت می‌کنند. رسوب کردن واکس که به علت پراکندگی برشی رخ می‌دهد را می‌توان با رابطه (۱۰.۲) بیان کرد [۵۱، ۵۲].

مطالعات بیانگر این است که ضخامت رسوب در جریان تک فازی در رژیم جریان آرام بیشتر از جریان متلاطم است و با افزایش عدد رینولدز در جریان متلاطم، کاهش می‌یابد. در چنین مواردی تنش برشی که به وسیله جریان مایع بر سطح رسوب وارد می‌شود سبب جدایی رسوبی که به سبب انتقال جرم تشکیل شده است، می‌شود که این فرایند جدایش برشی نامیده می‌شود. تحقیقات کمی برای مدل‌سازی اثر جدایش برشی و مدل‌سازی آن صورت گرفته است. ماتزین [۲۴] تغییرات ضخامت لایه‌های رسوب را به صورت زیر مدل‌سازی کرده است.

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\Pi_1}{1 + \Pi_2} D_{ow} \left[\frac{dw_w}{dt} \frac{dT}{dr} \right] \quad (10.2)$$

$$\pi_1 = \frac{C_1}{1 - \frac{C_{oil}}{100}} \quad (11.2)$$

$$\pi_2 = 1 + C_2 N_{SR}^{C_3} \quad (12.2)$$

که در رابطه (۱۰.۲) به ترتیب π_1 و π_2 مقادیر مربوط به سرعت افزایش ضخامت ناشی از رسوب نفت و به کاهش ناشی از جدایش برشی هستند. C_1 ، C_2 و C_3 مقادیر تجربی هستند و N_{SR} متغیر بدون بعدی است که به رژیم جریان وابسته است.

$$N_{SR} = \frac{\rho_L v_L \delta}{\mu_L} \quad (13.2)$$

برای جریانهای تک فازی در رابطه (۱۳.۲) v_L سرعت مایع و μ_L ویسکوزیته مایع و ρ_L چگالی سیال را نشان می‌دهند.

۳.۴.۲. ته نشینی بر اثر جاذبه زمین

بلورهای واکس نسبت به فاز مایع نفت، چگال‌تر هستند بنابراین اگر ذرات بر هم کنشی نداشته باشند، تحت تأثیر گرانش زمین قرار خواهند گرفت و ممکن است در پایین لوله‌ها و تانکرها رسوب کنند، مطالعات در این زمینه نشان داده است که این بخش کمترین اثر را در رشد رسوب در جریان داخل لوله دارد اما وقتی نفت به صورت ساکن قرار می‌گیرد قابل توجه است [۵۲].

۴.۴.۲. اثر برآونی

بلورهای جامد و کوچک واکس هنگامی که در نفت معلق هستند، با جنبش مولکول‌های نفت به صورت مداوم بمباران می‌شود. این برخوردها به حرکت کوچک و نامنظم برآونی ذرات می‌انجامد. اگر این ذرات در یک گرادیان غلظتی قرار گیرند، حرکت برآونی باعث جابجایی آنها خواهد شد که از نظر ریاضی مشابه مکانیسم نفوذ در نظر گرفته می‌شوند. ضریب نفوذ حرکت برآونی برای ذرات کروی که برهم کنشی با یکدیگر ندارند از رابطه (۱۰.۲) به دست می‌آید [۵۱، ۵۲].

$$D_b = \frac{RT_a}{6 \mu \pi a N} \quad (14.2)$$

N عدد آووگادرو، T_a دمای مطلق (k)، R ثابت جهانی گازها، μ ویسکوزیته دینامیک و a قطر ذره را نشان می‌دهند.

۵.۴.۲. اثر وجود آب در مراحل شکل‌گیری رسوب واکس

مطالعات بسیار کمی‌روی اثر آب خالص یا آب نمک در مراحل شکل‌گیری رسوبات صورت گرفته است. زیرا پیچیدگی مسأله با افزودن فاز آب بیشتر خواهد شد و تطبیق نتایج با مدل دشوارتر خواهد بود. هو و سانتاماریا (۱۹۹۴) برای بررسی اثر آب بر لایه پارافین که تحت جریان متلاطم قرار دارند، آزمایش‌هایی طراحی کردند که در آنها اثر جریان سیال در فشار بالا بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان داد که رسوبات واکس به طور چشم‌گیری با افزودن آب به سیستم کاهش می‌یابد [۴۶].

۵.۲. مروری بر مدل‌های پیش‌بینی رسوب واکس در خطوط انتقال نفت

تحقیقات بسیاری برای پیش‌بینی رسوب واکس در خطوط انتقال انجام شده است که هر یک با لحاظ نمودن برخی فرضیات و مکانیسم‌ها، مدلی برای توزیع رسوب در لوله ارائه کرده‌اند. برگر [۵۲] تحقیقاتی

بر خطوط انتقال نفت در آلاسکا انجام داد و مکانیسم رسوب واکس را مورد بررسی قرار داد. او عوامل رسوب را نفوذ مولکولی، نیروهای برشی و حرکت برآونی در نظر گرفت. در مدل او ضخامت رسوب واکس بصورت تابعی از زمان و فاصله در نظر گرفته شد. او معتقد بود که نفوذ مولکولی در دماهای بالا و انتقال حرارت بالا، پدیده غالب بوده و در دماهای پایین و نرخ انتقال حرارت پایین نیروهای برشی مؤثر هستند. او اثر حرکت برآونی را در مقایسه با بقیه پدیده‌ها ناچیز یافت.

همودا [۴۸] مکانیزم غالب در رسوب پارافین‌ها را نفوذ مولکولی معرفی نمود که با کاهش گرادیان دمایی، نیروی برشی مؤثر خواهد بود. او دریافت که سرعت ته‌نشینی واکس توسط گرادیان دمایی تازمانی صحیح است که نیروی برشی نیز روی سطح بر نیروی چسبندگی بلورهای واکس روی دیواره غلبه نکرده باشد. سودسن [۳۲] یک مدل ریاضی ارائه نمود. این مدل توسط روش‌های تحلیلی و عددی حل شد. در این مدل تعادلات فازها و دینامیک سیال لحاظ شد. او شرط تعادل ترمودینامیکی را در لایه مرزی آرام لحاظ نمود. نتایج مدل نشان داد که با کاهش دمای دیواره لوله مقدار واکس رسوب کرده کمتر پیش بینی می‌شود. در این مدل مقدار جامد در رسوب با زمان ثابت در نظر گرفته شد. هو [۴۶] اثرات دما و دبی سیال را در مقیاس بزرگ مورد بررسی قرار داد. مدل او توزیع رسوب واکس را در طول خط لوله نشان می‌داد. او و همکارانش دریافتند که اثرات رژیم جریان متلاطم بر رسوب واکس بسیار قابل ملاحظه است و با استفاده از مکانیسم جدایش توسط نیروی برشی نتایج را بر مدل منطبق نمود. در این مدل مقدار جزء جامد در رسوب ثابت در نظر گرفته شد. [۴۶]

سلیمانی نظر و همکارانش [۵۳] معادله انرژی را با فرض تعادل ترمودینامیکی در لایه مرزی سیال حل نمودند و مکانیسم نفوذ و پراکندگی برشی را در مدل سازی در نظر گرفتند. این مدل مقدار جزء جامد را پیش بینی نمی‌کرد. او نتایج مدل خود را در جریان متلاطم با نتایج تجربی مقایسه نکرد. سینگ و همکارانش

[۳۹] یک مدل ریاضی برای رسوب واکس در لوله ارائه نمودند. او نفوذ مولکولی را به‌عنوان عاملی برای افزایش مقدار واکس در رسوب در نظر گرفت. این مدل توزیع ضخامت رسوب در لوله و نیز مقدار واکس موجود در رسوب را در جریان آرام به‌خوبی پیش‌بینی می‌نمود. در این مدل از تشابه انتقال جرم و انتقال حرارت استفاده شد و در سطح رسوب، غلظت برابر با مقدار تعادلی آن در نظر گرفته شد. این مدل در دبی‌های بالای نفت نتایج خوبی نداشت. در این مدل از اثر نیروی برشی صرف‌نظر شد و تنها نفوذ مولکولی به‌عنوان پارامتر غالب در نظر گرفته شد. دیدگاه دیگر در مدل سازی رسوب واکس، تفاوت غلظت در سطح مشترک با مقدار تعادلی آن می‌باشد. در این دیدگاه سینتیک تبلور سبب فوق اشباع شدن محلول می‌شود و غلظت در سطح مشترک از نقطه تعادلی دور می‌شود. این بدان معنی است که پروفایل غلظت در لوله، تغییرات کمتری را نسبت به پروفایل غلظت در حالت تعادلی خواهد داشت. در این حالت شار انتقال جرم به سطح رسوب، نسبت به حالت تعادلی کاهش می‌یابد و سبب کاهش نرخ رشد رسوب می‌شود. [۳۹]

این ایده در ابتدا توسط هرناندز و همکارانش در سال ۲۰۰۴ ارائه گردید. در این مدل کل انتقال جرم رسیده به سطح تحت تأثیر سینتیک فرایند تبلور قرار می‌گرفت. در مدل او فرض تعادل در سطح رسوب که توسط سینگ و همکارانش ارائه شده بود، حذف گردید. او ضریب سینتیک تبلور را متناسب با ضریب نفوذ واکس در نفت، در نظر گرفت. این فرض سبب بهبود در پاسخ مدل سینگ در جریان متلاطم گردید. در مدل او جزئی نیز به‌عنوان اثر نیروی برشی در نظر گرفته شد که مانع از رسیدن بخشی از کل انتقال جرم به سطح رسوب می‌شد. او تأثیر پارامترهای مدل خود را بررسی نمود. این پارامترها شامل ضریب سینتیکی تبلور، نسبت ابعادی بلورها و اثر نیروی برشی بود. در این بررسی، مهمترین عامل در پیش‌بینی ضخامت رسوب، ضریب سینتیکی تبلور معرفی شد که سهمی بیش از ۶۰ را به خود اختصاص می‌داد و پس از آن نسبت ابعادی بلورها و سپس نیروی برشی، به ترتیب اهمیت قرار گرفتند. در این مدل گرادیان غلظت در نفت با

گرایان آن در سطح رسوب برابر در نظر گرفته شد که فرض مناسبی نمی‌باشد. مدل او دارای ۴ پارامتر منطبق کننده بود. [۵۴]

در سال ۲۰۰۸ مدل دیگری بر اساس سینتیک تبلور توسط لی و همکارانش برای تصحیح نواقص مدل سینگ ارائه شد. در این تحقیق، دیدگاه هرناندز و همکارانش با وارد نمودن رابطه جدیدی برای سینتیک تبلور اصلاح شد و از اثر نیروی برشی در مدل سازی صرفه نظر شد. او برای یافتن پروفایل غلظت از حل همزمان معادلات انتقال در نفت و رسوب استفاده نمود. او در معادله انتقال جرم، بخشی را به عنوان سینتیک تبلور اضافه نمود. این مدل پیش بینی بهتری برای ضخامت رسوب ارائه نمود. در این مدل اثر سرعت سرمایش در سینتیک تبلور در نظر گرفته نشد. اجرای این روش بسیار زمان‌بر بود و به دو پارامتر منطبق کننده نیاز داشت. [۵۵]

دیدگاه دیگری توسط مهرترا و همکارانش [۵۶، ۵۷] ارائه شده است. در این مدل دمای سطح مشترک برابر با نقطه ابری شدن سیال در نظر گرفته می‌شود و رشد لایه رسوب از تغییر مقاومت حرارتی رسوب با زمان به دست می‌آید. در این مدل فرض می‌شود نیروی برشی سبب فشرده شدن رسوب و کاهش ضخامت آن می‌شود. این مدل پارامترهای تصحیح کننده‌های زیادی دارد و فرض دمای سطح برابر با دمای ابری شدن سیال در تمامی ضخامت‌های رسوب، فرض بحث برانگیزی می‌باشد. هر چند این فرض در لحظات طولانی که رسوب رشد کافی کرده است، قابل قبول می‌باشد. دیدگاه دیگر مدل سازی رسوب با استفاده از ترمودینامیک برگشت ناپذیر می‌باشد که توسط فیروز آبادی و همکارانش [۴۹، ۵۰، ۵۸] ارائه شده است. در این دیدگاه، واکنش به صورت یک ترکیب چند جزئی در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از ترمودینامیک برگشت ناپذیر در حضور انتقال حرارت در لوله، ضخامت رسوب و مقدار جزء جامد محاسبه می‌گردد. در این مدل دمای فصل مشترک با افزایش ضخامت تا دمای ابری شدن افزایش می‌یابد. در این مدل نفوذ مولکولی

به‌عنوان مکانیسم غالب در نظر گرفته شد و ضرایب نفوذ ناشی از گرادیان غلظت و حرارتی به‌صورت جداگانه محاسبه شد. مدل‌های دیگری نیز ارائه شده‌اند که تنها در محدوده یا شرایط خاصی می‌توانند به پیش بینی رسوب واکس بپردازند یا بر روابط تجربی با ساده سازی‌های ریاضی متکی هستند [۵۸].

۶.۲. مدل‌های رسوب واکس در نرم افزار OLGA

نرم‌افزار OLGA توسط شرکت Schlumberger پشتیبانی می‌شود و ابزاری مناسب برای شبیه سازی دینامیکی جریان چند فازی می‌باشد. OLGA یک ماژول رسوب واکس دارد که در آن سه مدل رسوب واکس شامل RRR، Matzain و Heat Analogy وجود دارند که برای شبیه سازی می‌توان از هر یک آنها استفاده کرد. معمولاً، از مدل‌های RRR و Matzain برای شبیه سازی رسوب واکس استفاده می‌شود، بنابراین ما در ادامه به ارائه این دو مدل بسنده خواهیم کرد.

۶.۲.۱. ارائه مدل RRR

مدل RRR (Rygg, Rydahl, Rønningsen)، یک مدل رسوب واکس برای جریان چند فازی است که مقدار رسوب واکس را در چاه‌ها و خطوط لوله پیش بینی می‌کند. باید توجه داشت که مدل RRR برای جریان آرام کاربرد ندارد. در این روش از یک مدل چند فازی حالت پایدار استاندارد برای پیش بینی افت فشار و انباشت مایع در طول خط لوله استفاده می‌شود. اثر رسوب روی افت فشار و دما با گذر زمان محاسبه می‌شود و یک مدل واکس چند جزئی به طور مداوم میزان رسوب واکس در طول خط لوله و ویسکوزیته ترکیب را تخمین می‌زند. رسوب واکس از انتشار کریستال‌های واکس به دلیل گرادیان دما و اثر پراکندگی برشی از قسمت مرکزی خط لوله به سمت دیواره خط لوله، تخمین زده می‌شود. اصطکاک دیواره داخلی لوله به دلیل رسوب واکس متغیر است [۵۹].

این مدل رسوب واکس به مدل‌های فرعی مجزا تقسیم می‌شود که در آن هر مدل فرعی جنبه فنی خاصی در نظر می‌گیرد و هر مدل فرعی به صورت جداگانه اعمال می‌شود.

مدل‌های فرعی:

- مدل جریان

افت فشار و رژیم جریان را محاسبه می‌کند.

- مدل واکس ترمودینامیکی

تعداد و خصوصیات فازهای مختلف را برای هر بخش تعیین می‌کند.

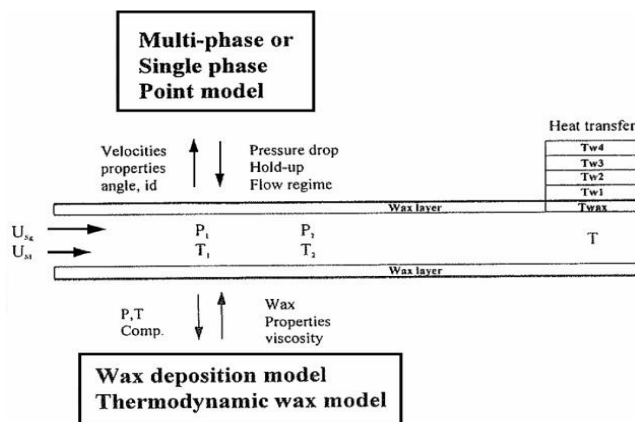
- مدل ویسکوزیته

ویسکوزیته را محاسبه می‌کند.

- مدل رسوب واکس

مقدار واکس موجود در هر بخش از خط لوله را پیش بینی می‌کند [۶۰].

تشکیل رسوب واکس نسبت به اغتشاشات جریان در یک خط لوله روند کندتری دارد. بنابراین، برای پیش بینی رسوب واکس در دوره‌های زمانی طولانی‌تر یک مدل نیمه ساکن^۱ انتخاب شده است. نیمه ساکن به عنوان تغییر در شرایط مرزی مانند نرخ جریان، فشار و دما و همچنین تغییر قطر داخلی لوله توصیف می‌شود. همچنین این مدل ترکیبی است، به این معنا که هر مدل فرعی به طور مجزا عمل می‌کند. موازنه جرم جزء به جزء برای همه اجزا استفاده می‌شود [۶۰]. شکل ۷.۲ ساختار شبیه ساز را نشان می‌دهد. خط لوله به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌شود و فشار و ترکیب در هر بخش ثابت در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷.۲. مدل RRR تعریف ساختار مدل جریانی [۶۰]

گرادیان دما از مرکز خط لوله به سمت دیواره لوله می‌باشد و دمای سیال و دیواره خط لوله با استفاده از موازنه انرژی تعیین می‌شود. در این مدل ابتدا همه بخش‌ها شبیه سازی شده و مجموع افت فشارهای مستقل برای هر بخش افت فشار کلی را نشان می‌دهد [۶۰].

¹ Semi-stationary

واکس رسوب شده در یک بازه زمانی بر نتایج پیش بینی شده در بازه‌های زمانی بعدی تأثیر می‌گذارد. چرا که رسوبات واکس در یک بخش منجر به کاهش قطر و در نتیجه افت فشار بیشتر در خط لوله می‌شود. علاوه بر این، موازنه انرژی تحت تأثیر قرار می‌گیرد، زیرا رسوب واکس دارای اثر عایق کننده در خط لوله است که این منجر به افزایش دما در طول زمان برای بخش واکسی می‌شود.

در مدل RRR تشکیل رسوب براساس انتشار مولکولی و پراکندگی برشی است، که هر دو مکانیسم باعث تقویت رسوب می‌شوند. نرخ حجمی رسوب واکس ناشی از انتشار مولکولی برای جزء واکسی i سازنده، واکس از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Vol_{wax}^{diff} = \sum_{i=1}^{NWAX} \frac{D_i(c_i^b - c_i^w) S_{wet} MW_i}{\delta \rho_i} 2 \pi r L \quad (15.2)$$

جایی که c_i^w و c_i^b غلظت‌های مولی جزء واکسی i است که به ترتیب در فاز نفت و روی دیواره خط لوله قرار دارند (مول / متر مکعب)، S_{wet} کسری از محیط مرطوب شده است، $NWAX$ تعداد اجزای واکسی آن است، MW_i وزن مولی جزء واکسی i (kg / mole)، ρ_i چگالی جزء واکسی i (kg / m³)، r شعاع داخلی خط لوله (m) و L طول خط لوله است (m). D ضریب انتشار است و برای محاسبه ضریب انتشار از ضریب همبستگی هایدوک-مینهایس (m² / s) استفاده می‌شود [۶۱]. δ ضخامت زیر لایه آرام (m) است، Bendixsen و همکاران. [۶۲] δ را با استفاده از معادله (۱۲.۲) محاسبه کردند.

$$\delta = a \times 11.6 \sqrt{2} \frac{D}{Re \sqrt{f}} \quad (16.2)$$

α یک پارامتر تنظیم کننده برای مطابقت دادن ضخامت واکس با داده‌های تجربی است، D قطر لوله است (m)، Re عدد رینولدز است و f ضریب اصطکاک است. و از معادله Blasius برای محاسبه ضخامت زیر لایه

آرام در جریان آشفته استفاده می‌شود. همچنین نرخ حجمی واکس رسوب داده شده ناشی از پراکندگی برشی را می‌توان از رابطه برگر و همکاران تخمین زد [۶۳].

$$Vol_{wax}^{shear} = \frac{k^* C_{wall} \dot{\gamma} A}{\rho_{wax}} \quad (17.2)$$

جایی که k^* ثابت نرخ برشی (kg/m^2) می‌باشد، C_{wall} کسر حجمی واکس رسوب شده در نفت در دمای دیواره داخلی است، $\dot{\gamma}$ نرخ برش در دیواره (s^{-1}) است، A مساحت موجود برای رسوبگذاری (m^2) و ρ_{wax} میانگین چگالی واکس (kg/m^3) است.

برای هر دو مکانیسم، میزان کل افزایش ضخامت لایه واکس به شرح زیر است:

$$l_{wax} = \frac{Vol_{wax}^{diff} + Vol_{wax}^{shear}}{(1-\phi)2\pi rL} \quad (18.2)$$

پارامتر ϕ میزان تخلخل رسوب واکس را نشان می‌دهد. تخلخل معمولاً در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹ قرار دارد. تخلخل لایه واکس یک پارامتر قابل تنظیم در مدل است. باید توجه داشت که ضخامت لایه واکس به طور متوسط در اطراف لوله قرار می‌گیرد، حتی اگر سطح داخلی لوله فقط تا حدی با مایع تر شود. برای جریان چند فازی، سطح داخلی ترشده بستگی به رژیم جریانی موجود و انباشت مایع دارد [۶۰].

مدل RRR در چندین سیستم خط لوله تک فازی و چند فازی به کار گرفته شده است. تشکیل واکس، افت دما و افت فشار با گذشت زمان در دو مورد توسط ریگ و همکاران، شبیه سازی شد. بین افت فشار محاسبه شده و افت فشار مشاهده شده مطابقت خوبی نشان داده شد. پارامترهای مهم تعدیل کننده در این مدل، تخلخل لایه واکسی و زبری رسوب می‌باشند [۶۰].

فرضی که برای این مدل منظور شده این است که نرخ رسوب در دیواره یک عامل محدود کننده نیست و تا زمانی که درجه حرارت زیر WAT باشد تمام اجزاء واکسی منتقل شده به دیواره، به سطح می‌چسبند.

لازم به ذکر است که هیچ مکانیسم برطرف کننده رسوبی در این مدل بحث نشده است. بنابراین، اشکال اساسی در مورد مدل RRR عدم وجود مکانیسم برشی در آن است [۶۴].

این سوال مطرح می‌شود که آیا این یک فرض صحیح است یا خیر. با این حال، این مدل ممکن است برای نرخ‌های جریانی پایین پیش بینی‌های قابل قبولی را ارائه دهد. علاوه بر این، این مدل ممکن است در یک لوله تمیز پیش بینی‌های معقولی را در زمان شروع رشد رسوب داشته باشد، اما به دلیل عدم وجود مکانیسم برشی در مدل، پس از مدتی نتایج کمتر قابل اعتماد می‌شوند [۶۴].

۲.۶.۲. ارائه مدل Matzain

دانشگاه تولسا دارای یک پروژه مرتبط با صنعت است که در حال انجام است (پیش بینی رسوب پارافین در خطوط جریان چند فازی و چاه‌ها). یکی از اهداف این پروژه تهیه یک برنامه رایانه‌ای برای پیش بینی رسوب واکس در خطوط جریان چند فازی و داخل چاه بود. بنابراین، آزمایش‌های تجربی گسترده‌ای برای اندازه گیری رسوب واکس در جریان چند فازی و تک فازی انجام شد [۶۵].

آزمایش‌های انجام شده توسط Matzain و همکاران برای جریان دو فازی نشان داد که رسوب واکس به الگوی جریان بستگی دارد. در سرعت‌های پایین جریان، روند تشکیل رسوب مانند روند مشاهده شده در آزمایش‌های جریان تک فازی آرام دیده شد و روند تشکیل رسوب در سرعت‌های بالای جریان، مانند روند مشاهده شده در آزمایش‌های جریان تک فازی آشفته دیده شد [۶۵].

این مدل سینتیکی نیمه تجربی که ضخامت واکس را پیش بینی می‌کند، به خصوص در سرعت‌های بالا دارای دقت قابل قبولی است. مدل Matzain، همانند مدل RRR، مبتنی بر مکانیسم‌های انتشار مولکولی و

پراکندگی برشی است، اما پراکندگی برشی از اهمیت جزئی برخوردار است. Matzain و همکاران بیان کردند که نرخ رسوب واکس ممکن است تحت تأثیر مکانیسم‌های دیگر نیز باشد [۶۵].

سایش برشی باعث کاهش نرخ رسوبگذاری می‌شود و به تله افتادن نفت و مکانیسم‌های دیگر افزایش سرعت تشکیل رسوب را به همراه دارند. از آنجا که نظریه انتشار جرم Fick، چنین اثراتی در نرخ تشکیل رسوب را به حساب نمی‌آورد، Matzain و همکاران سعی کردند با اصلاح قانون Fick به صورت تجربی این مشکل را برطرف کنند [۶۵].

نرخ کل رسوب واکس به شرح زیر بیان می‌شود [۶۵]:

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{\Pi_1}{1+\Pi_2} D_{ow} \left[\frac{dw_w}{dT} \frac{dT}{dr} \right] \quad (۱۹.۲)$$

جایی که δ ضخامت لایه واکس تشکیل شده بر روی دیواره (m)، w_w غلظت واکس در محلول (weight %) است، r فاصله شعاعی (m) و T دما ($^{\circ}\text{C}$) است. Π_1 یک رابطه تجربی برای افزایش نرخ رسوب ناشی از به تله افتادن نفت در لایه واکس رسوب شده است.

این رابطه همچنین هر نرخ رسوب مثبت را که توسط ثابت انتشار، D_{ow} در نظر گرفته نمی‌شود، به حساب می‌آورد. انتشار جرم آشفته، Π_2 ، رابطه تجربی برای کاهش نرخ تشکیل رسوب ناشی از سایش برشی است. این روابط تجربی به شرح زیر هستند:

$$\Pi_1 = \frac{c_1}{1 - c_{oil}/100} \quad (۲۰.۲)$$

$$\Pi_2 = c_2 N_{SR}^{c_3} \quad (۲۱.۲)$$

ثابت انتشار توسط رابطه Wilke و Chang (۱۹۵۵) محاسبه می‌شود، اما این رابطه انتشار برای نشان دادن ثابت تناسبی که فرایند انتشار را هدایت می‌کند، کافی نیست. C_1 ، C_2 و C_3 سه ثابت تجربی هستند که از

داده‌های جریان تک فازی و دو فازی با یکدیگر مرتبط می‌شوند. مقادیر آنها عبارتند از: $C_1=15$ ، $C_2=0.055$ و $C_3=1/4$ علاوه بر این، C_{oil} درصد نفت گیر افتاده در رسوب واکس است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_{oil} = 100 \left(1 - \frac{N_{RE.f}^{0.15}}{8} \right) \quad (22.2)$$

$$N_{RE.f} = \frac{\rho_o \left(\frac{\vartheta_{sl}}{E} \right) d_w}{\mu_{o.f}} \quad (23.2)$$

جایی که ρ_o چگالی نفت (kg/m^3) است، ϑ_{sl} سرعت ظاهری مایع (m/s) است، E مقدار انباشت مایع است، d_w قطر داخلی خط لوله بعد از ایجاد رسوب واکس (m)، $\mu_{o.f}$ ویسکوزیته نفت (kg/(m s)) است.

N_{SR} یک متغیر بدون بعد است که به صورت عدد رینولدز وابسته به رژیم جریان بیان شده است. این متغیر برای هر الگوی جریان بدست می‌آید.

$$N_{SR} = \frac{\rho_o \vartheta_o}{\mu_{o.f}} \quad (24.2) \quad \bullet \text{ جریان تک فازی}$$

$$N_{SR} = \frac{\sqrt{\rho_m \rho_o} \left(\frac{\vartheta_{sl}}{E} \right) \delta}{\mu_{o.f}} \quad (25.2) \quad \bullet \text{ جریان متناوب / حبایی}$$

$$N_{SR} = \frac{\rho_o \left(\frac{\vartheta_{sl}}{E} \right) \delta}{\mu_{o.f}} \quad (26.2) \quad \bullet \text{ جریان حلقوی}$$

$$N_{SR} = \frac{\rho_m \left(\frac{\vartheta_{sl}}{E} \right) \delta}{\mu_{o.f}} \quad (27.2) \quad \bullet \text{ جریان لایه‌ای صاف / موجی}$$

جایی که ϑ_o سرعت نفت (m/s) است، δ ضخامت لایه واکس (m) و ρ_m چگالی متوسط مخلوط گاز و نفت (kg/m^3) است. [۶۵]

این عبارات نشان می‌دهند که اثر سایش برشی وابسته به ضخامت لایه واکس، شرایط جریان و خواص سیال در حال جریان مدل شده است. سایش برشی به عنوان عامل کاهنده نرخ رسوب واکس، به طور مستقیم به نرخ انتشار وابسته است. [۵۹]

نرخ رسوب مولی برای یک جزء تشکیل دهنده واکس i توسط معادله زیر داده شده است. [۵۹]

$$\dot{n}_i^{dep} = \frac{\Pi_1}{1-\Pi_2} \frac{D_{wi}(c_i^b - c_i^w)}{T_b - T_w} \frac{dT}{dr} \quad (28.2)$$

گرادیان حرارتی زیر لایه آرام توسط رابطه زیر به دست می‌آید. [۵۹]

$$\frac{dT}{dr} = \frac{(T_b - T_w)}{\lambda_o} h_{wall} \quad (29.2)$$

جایی که λ_o هدایت حرارتی نفت ($W/(m.K)$) است، T_b میانگین دمای جریان (K) است، T_w دمای سطح دیواره داخلی (K) و h_{wall} ضریب انتقال حرارت سطح دیواره داخلی ($W/m^2.K$) است.

تبلور کنترل شده با انتشار و اثر به تله افتادن نفت در ساختار رسوب به طور مستقیم مدل نشده است، اما این اثرات ممکن است تا حدی در ثابت‌های تجربی C_2 و C_3 ، که بر اساس داده‌های ضخامت جریان تک فازی و دو فازی اندازه گیری شده‌اند، در نظر گرفته شوند [۵۹].



فصل سوم

مدل سازی رسوب واکس در خطوط لوله

۱.۳. شرح مسأله

طی یک دهه گذشته، برای اینکه بتوان راه‌حلی برای تولید سیالات مخزن با میزان واکس بالا ارائه داد، تلاش‌های چشمگیری صورت گرفته است. بیشتر این تلاش‌ها به سمت ایجاد مدل‌هایی در شبیه‌سازها، که قابلیت پیش‌بینی رسوب واکس در خطوط لوله را دارند، هدایت شده است. این شبیه‌سازها اطلاعات لازم را برای مدیریت یا اصلاح رسوب واکس ارائه می‌دهند. همانطور که در فصل دوم ذکر شد، پارامترهای مختلفی بر رسوب واکس در خطوط انتقال نفت اثرگذار هستند، که توسط محققان مورد بحث قرار گرفته‌اند. برخی از این پارامترها را می‌توان کنترل کرد و با کنترل آن‌ها مقدار رسوب را به حداقل رساند. این پارامترها ممکن است تأثیر مثبت یا منفی بر میزان رسوب واکس داشته باشند. در این پایان‌نامه با استفاده از مطالعات پارامتری تأثیر پارامترهای مختلف بر رسوب واکس پیش‌بینی می‌شود، و در این فصل به مدل‌های رسوب واکس که در نرم‌افزار OLGA تعبیه شده‌اند، پرداخته می‌شود. همچنین چگونگی آماده کردن داده‌های ورودی مناسب برای نرم‌افزار OLGA با استفاده از شبیه‌ساز PVTsim شرح داده می‌شود.

۲.۳. مدل سازی مسأله

یک خط لوله دریایی به طول ۵۰ کیلومتر در خلیج فارس توسط Gooya و همکاران [۶۷] برای بررسی خواص انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. از مدل مذکور برای بررسی اثر برخی پارامترهای عملیاتی در رسوب واکس استفاده شده است.

۳.۳. ساخت مدل OLGA برای شبیه سازی

۱.۳.۳. مقدمه

OLGA یک شبیه ساز برای جریان چند فازی در خطوط لوله است. گروه SPT این نرم افزار تجاری را در اختیار دارد و به طور مداوم آن را بهبود می بخشد. علاوه بر این، OLGA شامل ماژول رسوب واکس است که به کمک آن می توان رسوب و ته نشینی واکس بر روی دیوار لوله را پیش بینی کرد که شامل، مدل Matzain، مدل Heat Analogy و مدل Rygg، Rydahl و Rønningesen (RRR) است. مدل RRR و مدل Matzain به ترتیب در بخش ۱.۶.۲ و ۲.۶.۲ توضیح داده شده اند. از آنجا که معمولاً از مدل های RRR و Matzain برای شبیه سازی رسوب واکس در OLGA استفاده می شود، تمرکز بر روی این دو مدل می باشد. همه شبیه سازی ها در این پایان نامه با استفاده از نسخه OLGA 2017 انجام می شود و ماژول واکس آن یک شبیه ساز در حالت پایدار می باشد. همچنین لازم به ذکر است که روند رسوب واکس کندتر از سایر فرایندهای فعال در خط لوله است.

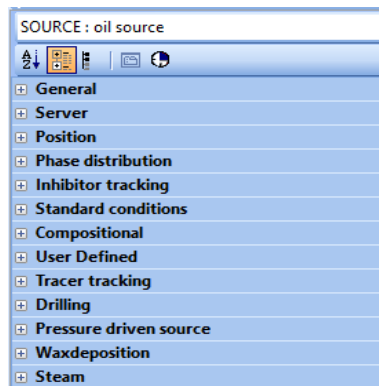
۲.۳.۳. روند شبیه سازی

یک نمونه سیال واقعی از یک خط جریانی دریایی در خاورمیانه که مشکل تشکیل رسوب واکس را دارا می باشد توسط Gooya و همکارانش [۶۷] به تفصیل بیان شده است. این مورد برای مدل سازی در OLGA استفاده شد. جزئیات بیشتر در بخش های بعدی توضیح داده خواهد شد.

• شرایط ورودی خط لوله

برای طراحی ورودی خط لوله، باید از یک منبع جریان جرمی استفاده شود که خصوصیات آن در شکل ۱.۳ نشان داده شده است.

Path: mass flow source → properties



شکل ۱.۳. پنجره مربوط به داده‌های ورودی سیال

دما و دبی سیال در شرایط استاندارد مورد نیاز در این بخش می‌باشند که در جدول ۱.۳ آورده شده است.

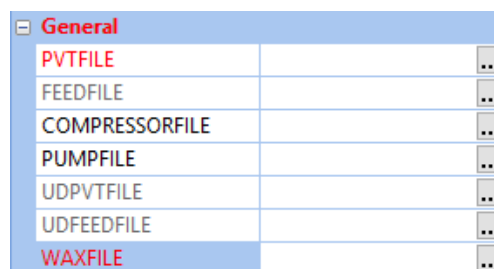
جدول ۱.۳. اطلاعات لازم برای ورودی لوله

Standard flow rate	۳۰۰۰۰ stb/day
temperature	۷۰°C
Phase	Liquid
Position	Pipe-1
	Section-1

• تعریف سیال

برای تعریف خواص سیال باید مسیری که در شکل ۲.۳ بیان شده را دنبال کرد.

Path: Case definition → Files → window properties



شکل ۲.۳. پنجره وارد کردن اطلاعات خواص سیال

در این بخش، فایل‌های PVT و واکس بدست آمده از PVTsim باید فراخوانی شوند. قبل از انجام مراحل شبیه سازی داده‌های PVT و واکس با استفاده از نرم افزار PVTsim تنظیم می‌گردد. سپس فایل‌های سیال و واکس با پسوند مورد نیاز برای OLGA تولید می‌شوند. فایل واکس حاصل شده اطلاعاتی درباره حلالیت واکس به عنوان تابعی از فشار، دما و خصوصیات فیزیکی آن ارائه می‌دهد. نمودار فازی واکس نیز می‌تواند به درک بهتر روابط تعادل فشار و دمای سیال نفتی کمک کند. PVTsim اولین قدم ضروری قبل از استفاده از OLGA است و تأثیر قابل توجهی در نتایج آن دارد. اولین مرحله در فرایند شبیه سازی، انتخاب مدل ترمودینامیکی مناسب می‌باشد که خواص ترمودینامیکی نفت و واکس جامد را در طول مراحل شبیه سازی به طور دقیق پیش بینی می‌کند. مدل Pedersen Wax برای پیش‌بینی خصوصیات ترمودینامیکی رسوب واکس انتخاب شده است، زیرا براساس خصوصیات ترمودینامیکی مخلوط‌های نفت-واکس از قطعات حاوی واکس و اجزای غیر سازنده واکس تشکیل می‌شوند. این مدل از طریق شبیه ساز PVTsim قابل دسترسی و اجرا خواهد بود. جهت توصیف خصوصیات نفت از معادله حالت SRK Peneloux استفاده می‌شود. معادله حالت SRK Peneloux برای توصیف ویژگی‌های سیال انتخاب شده تا بتواند با استفاده از پارامتر تغییر حجم مرتبط با معادله حالت، میزان اصلاح حجم چگالی مایع را محاسبه کند. همچنین لازم به ذکر است که فایل واکس OLGA حاوی ویسکوزیته محاسبه شده توسط گزینه ویسکوزیته غیر نیوتنی در PVTsim نیست، اما گزینه ویسکوزیته در ماژول واکس OLGA یکپارچه است. بنابراین، هر زمان که واکس جامد در فشار و دما معین وجود داشته باشد، ویسکوزیته‌ی سیال موجود محاسبه شده در فایل OLGA توسط مدل ویسکوزیته غیرنیوتنی کنار گذاشته می‌شود. تمامی فایل‌های مورد استفاده برای این پایان‌نامه از معادله حالت SRK Peneloux تولید شده که در شبیه ساز PVTsim موجود است. از معادله حالت PR در PVTsim نیز می‌توان نتایج مشابهی بدست آورد.

• تعریف اصطلاحات در PVTsim

آنالیز ترکیبی نفت خام مخزن از یک میدان نفتی در منطقه خاورمیانه در جدول ۲.۳ آورده شده است.

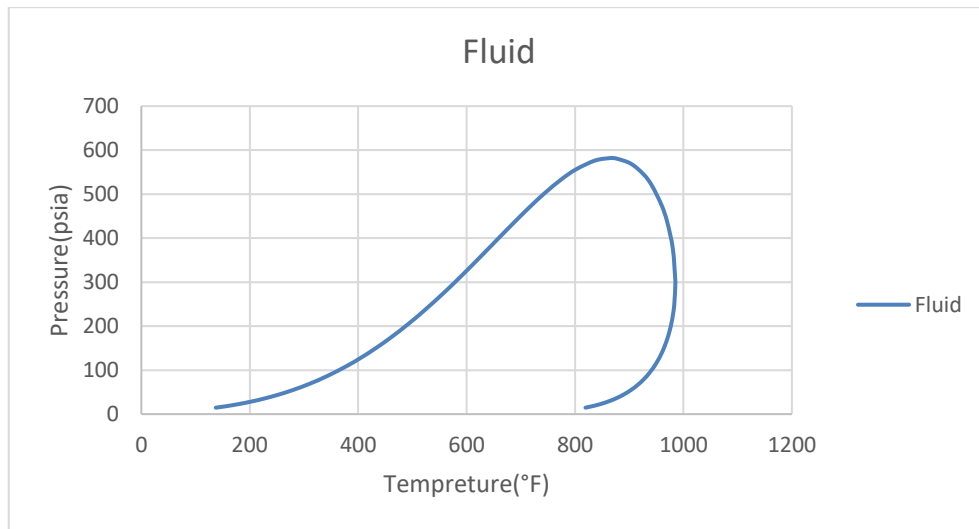
جدول ۲.۳. داده‌های ترکیب اجزاء نفت برای نفت خام خاورمیانه

component	Mol (%)	Mol wt ($ft^3/lbmol$)	Liquid density (lb/ft^3)
CO ₂	۰/۰۳	۴۴/۰۱۰	
H ₂ S	۰/۱۶	۳۸/۰۸۰	
C ₁	۰/۰۲	۱۶/۰۴۳	
C ₂	۰/۳۴	۳۰/۰۷۰	
C ₃	۱/۶۲	۴۴/۰۹۷	
iC ₄	۰/۸۱	۵۸/۱۲۴	
nC ₄	۳/۲۸	۵۸/۱۲۴	
iC ₅	۲/۱۹	۷۲/۱۵۱	
nC ₅	۴/۱	۷۲/۱۵۱	
C ₆	۷/۱۹	۸۶/۱۷۸	۴۱/۴۵۲
C ₇	۶/۲۷	۹۶/۰۰۰	۴۶/۰۷۱
C ₈	۵/۷۸	۱۰۷/۰۰۰	۴۷/۷۵۷
C ₉	۵/۳۳	۱۲۱/۰۰۰	۴۸/۷۵۶
C ₁₀₊	۶۲/۷۱	۲۸۶/۰۰۰	۴۹/۴۴۲
Sp.gravity	۰/۸۸۵		

خصوصیات نفت به کمک نرم افزار PVTsim مشخص می‌شود. از این رو، غلظت مولی سیال مورد نظر بدست می‌آید که در جدول ۳.۳ نشان داده شده است. برای توصیف بخش C₇₊ و همچنین ترکیبات سنگین با استفاده از SRK لازم است که خصوصیات بحرانی و مؤلفه i در مخلوط واکس-نفت به دست آید. اجزای بین C₁₀ تا C₈₀ به عنوان اجزای مخلوط در دسترس هستند.

چگالی متوسط ترکیب نفت، خاصیت پارافینی آن را نشان می‌دهد و بنابراین، هنگامی که دما کمتر از WAT باشد، احتمال رسوب واکس وجود دارد. با توجه به خصوصیات نفت، WAT معادل ۸۱ درجه فارنهایت است و میزان واکس در مخزن نفت ذخیره ۵ درصد وزنی می‌باشد. به نظر می‌رسد چالش‌های مربوط به رسوب واکس در خط لوله‌های دریایی وجود خواهد داشت.

مقدار واکس موجود در نفت در فشار ۱۴/۷ psia و دمای ۶۰°F اندازه گرفته می شود. برای شبیه سازی سیال در نرم افزار PVTsim ابتدا باید اجزاء سیال در جدول مربوطه وارد شود. به همین منظور داده های جدول ۳.۲ در نرم افزار وارد شده و سیال شبیه سازی می شود. در مرحله بعد نمودار فازی سیال بدست می آید. نمودار فازی سیال قبل از منطبق سازی با داده های واقعی به در شکل ۳.۳ آورده شده است:



شکل ۳.۳. نمودار فازی سیال قبل از منطبق سازی

به منظور بررسی و مقایسه و اعتبارسنجی داده های بدست آمده از نرم افزار لازم است که سیال شبیه سازی شده در نرم افزار با داده های سیال واقعی منطبق سازی شود. به همین منظور می توان با استفاده از داده های تست های CME، CVD، DL یا مقدار فشار اشباع محاسبه شده در آزمایشگاه، سیال را با داده های واقعی تطبیق داد. سیال مورد استفاده به علت در دسترس نبودن نتایج آزمایشگاهی تنها با استفاده از دما و فشار نقطه اشباع که در جدول ۳.۳ آمده است منطبق سازی شده است.

جدول ۳.۳. داده های آزمایشگاهی سیال مخزن

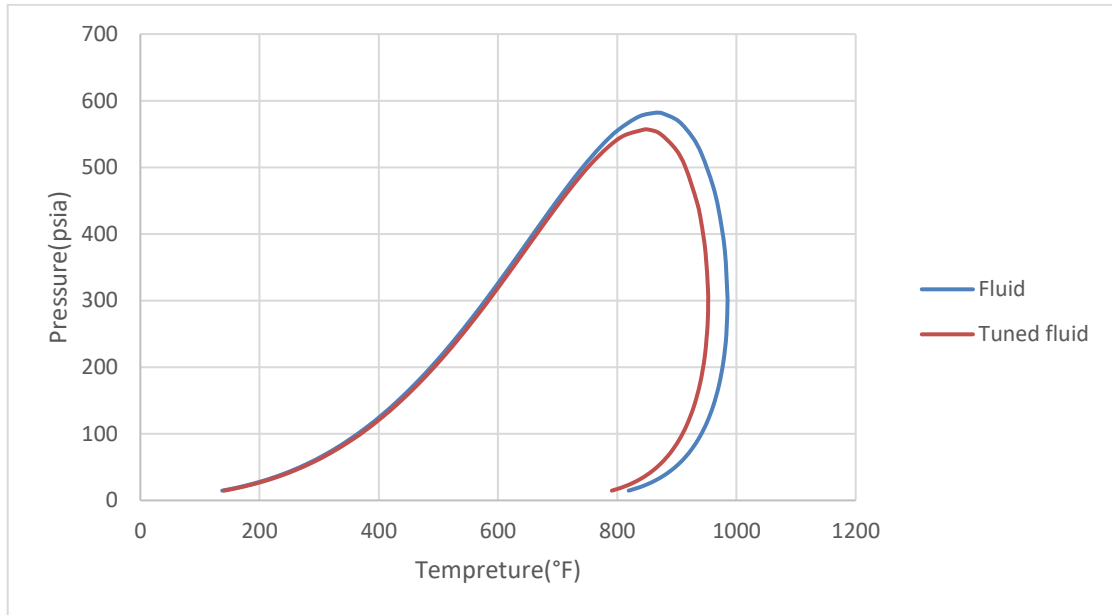
Saturation Pressure	۵۸۱/۲۳	psia
Saturation Temperature	۸۷۵/۲۸	°F

جدول ۴.۳. ترکیب نفت مشخصه‌سازی شده

Component	Mol (%)	Molecular wt	Liquid Density (lb/ft ³)
CO ₂	۰/۰۳	۴۴/۰۱۰	
H ₂ S	۰/۱۶	۳۸/۰۸۰	
C ₁	۰/۰۲۰	۱۶/۰۴۳	
C ₂	۰/۳۴۱	۳۰/۰۷۰	
C ₃	۱/۶۲۳	۴۴/۰۹۷	
iC ₄	۰/۸۱۲	۵۸/۱۹۴	
nC ₄	۳/۲۸۷	۵۸/۱۲۴	
iC ₅	۲/۱۹۴	۷۲/۱۵۱	
nC ₅	۴/۱۰۸	۷۲/۱۵۱	
C ₆	۷/۲۰۴	۸۶/۱۷۸	۴۱/۴۵۲
C ₇	۶/۲۸۳	۹۶/۰۰۰	۴۶/۰۷۱
C ₈	۵/۷۹۲	۱۰۷/۰۰۰	۴۷/۷۵۷
C ₉	۵/۳۴۱	۱۲۱/۰۰۰	۴۸/۷۵۶
C ₁₀ -C ₁₂	۱۴/۵۸۲	۱۴۶/۵۴۴	۴۸/۸۹۸
C ₁₃ -C ₁₅	۱۱/۲۰۵	۱۸۹/۴۲۷	۴۹/۰۷۲
C ₁₆ -C ₁₈	۸/۶۱۰	۲۳۵/۸۱۸	۴۹/۲۱۱
C ₁₉ -C ₂₁	۶/۶۱۵	۲۷۵/۵۱۶	۴۹/۳۲۸
C ₂₂ -C ₂₅	۶/۵۰۱	۳۲۳/۲۹۴	۴۹/۴۴۳
C ₂₆ -C ₃₀	۵/۴۸۹	۳۸۵/۳۱۳	۴۹/۵۶۸
C ₃₁ -C ₃₆	۴/۰۷۸	۴۶۱/۴۳۱	۴۹/۶۹۶
C ₃₇ -C ₄₅	۳/۲۱۲	۵۶۱/۸۸۹	۴۹/۸۳۷
C ₄₆ -C ₈₀	۲/۵۴۴	۷۶۸/۷۵۷	۵۰/۰۶۷

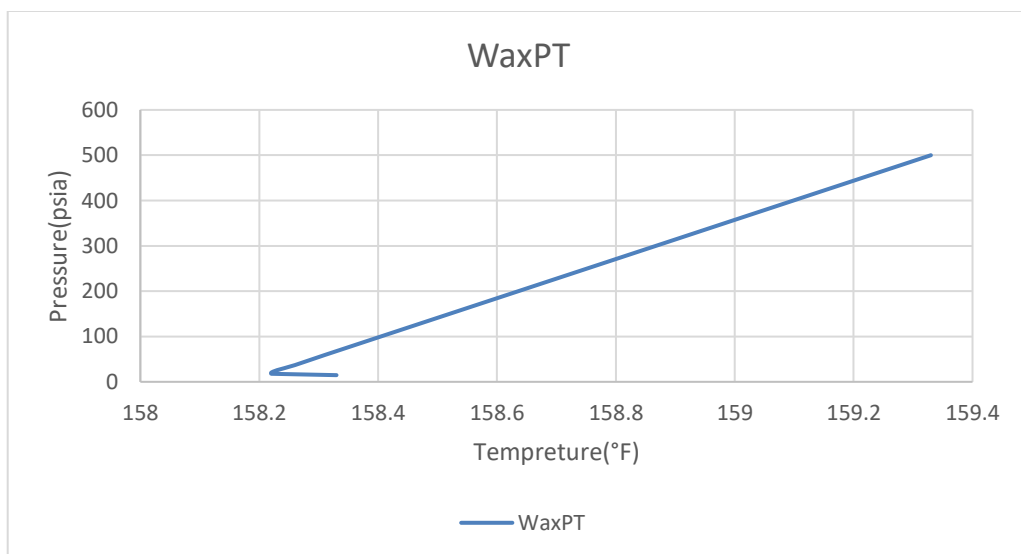
شکل ۴.۳ نمودار فازی نفت قبل و بعد از منطبق‌سازی با داده‌های واقعی را نشان می‌دهد. پس از

منطبق‌سازی سیال با داده‌های جدول ۳.۳ نمودار فازی آن به صورت زیر بدست آمد:

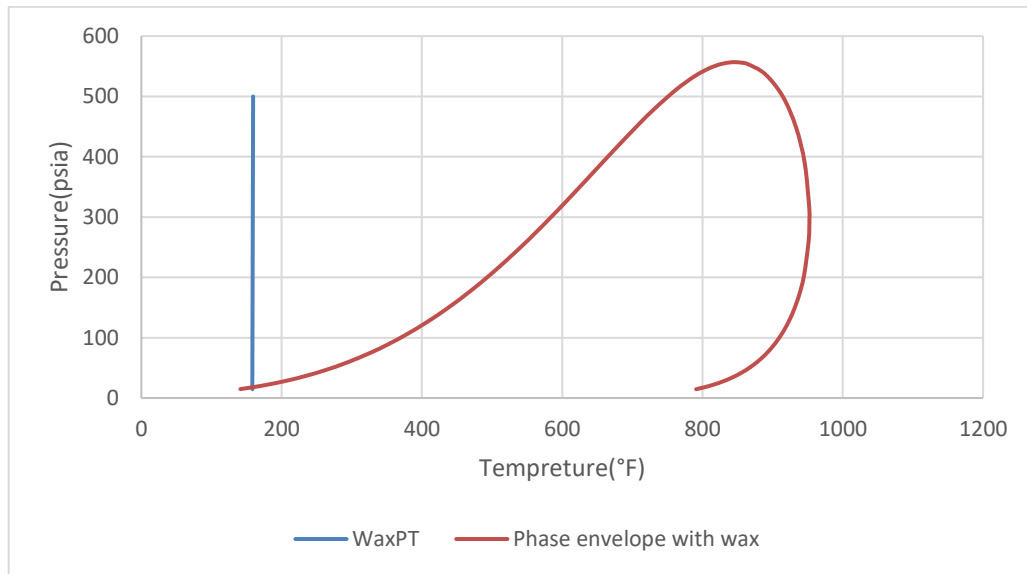


شکل ۴.۳. نمودار فازی سیال قبل و بعد از منطبق سازی با داده های واقعی سیال

پس از منطبق سازی سیال با داده های آزمایشگاهی به منظور شبیه سازی رسوب واکس و تعیین منحنی های فشار بر حسب دما از ماژول wax در نرم افزار PVTsim استفاده کرده و پس از تعیین شرایط حداکثر فشاری و حداقل دمایی شبیه سازی انجام شده و نمودار فشار دمای واکس و نمودار فازی سیال در حضور واکس در شکل های ۶.۳ و ۷.۳ نشان داده شده است:



شکل ۵.۳. نمودار فشار دمای واکس قبل از منطبق سازی با داده های واقعی واکس



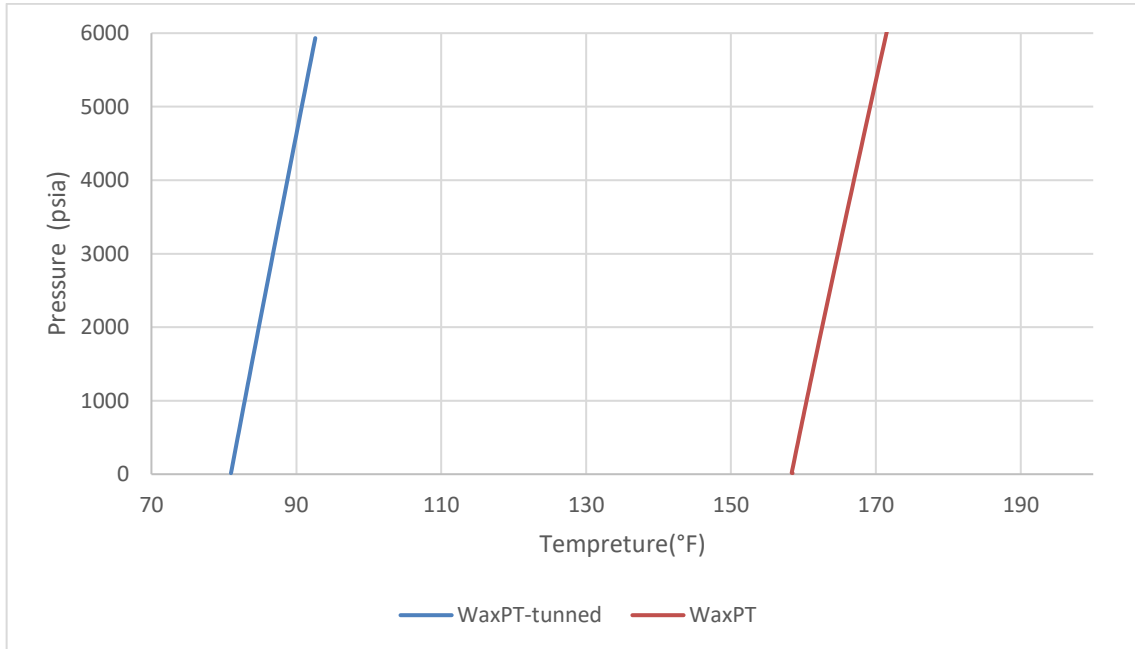
شکل ۶.۳. نمودار فازی سیال در حضور واکس و نمودار فشار دمای واکس

همچنین برای منطبق سازی نتایج شبیه سازی واکس و اعتبار سنجی لازم است داده‌های واقعی واکس موجود باشند. با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول ۵.۳ منطبق سازی با دمای WAT نفت در فشار ۱۴/۷ psia انجام شد.

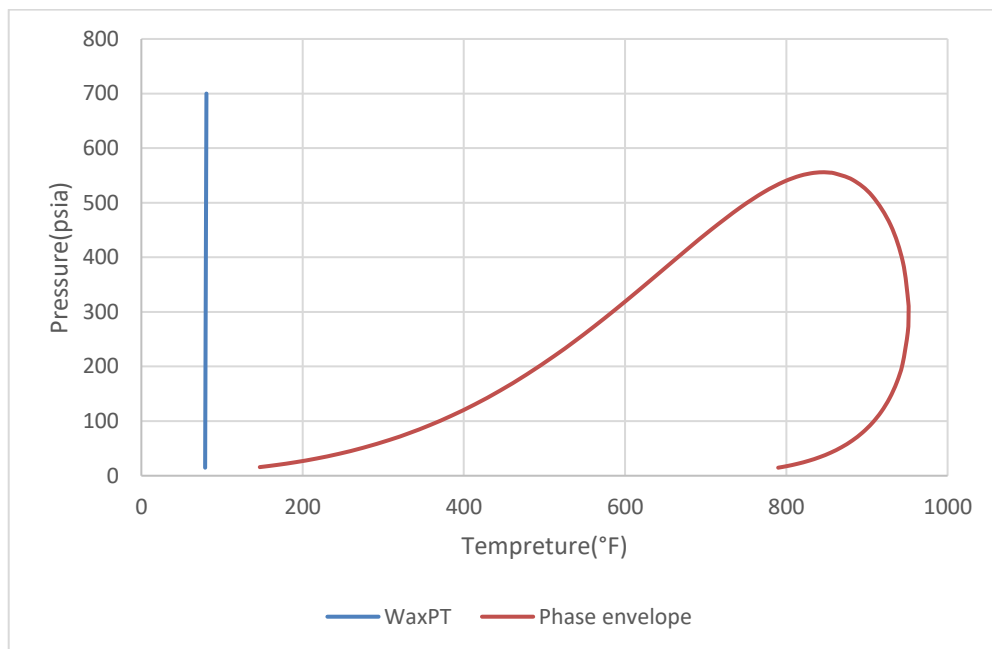
جدول ۵.۳. داده‌های آزمایشگاهی واکس

Wax content	۵	Wt%
WAT	۸۱	°F

نمودارهای مربوطه پس از منطبق‌سازی با داده‌های واقعی به شرح زیر بدست آمدند:



شکل ۷.۳. نمودار فشار دمای واکس قبل و بعد از منطبق‌سازی



شکل ۸.۳. نمودار فازی و نمودار فشار دمای واکس پس از منطبق‌سازی

یک تست PT flash (قبل از مشخصه‌سازی سیال) و یک Extended PT flash (بعد از مشخصه‌سازی

سیال) در شرایط استاندارد برای تعیین مراحل مختلف موجود در مخلوط شبیه‌سازی محاسبه می‌شوند،

که نتایج به ترتیب در جدول ۶.۳ و جدول ۷.۳ ارائه شده است. تست Extended PT flash توزیع میزان واکسی که از هر جزء پس از مشخصه‌سازی سیال ایجاد می‌شود را نشان می‌دهد.

جدول ۶.۳ و جدول ۷.۳ نشان می‌دهد که $C_{31}-C_{36}$ ، $C_{37}-C_{45}$ کسر سنگین در مخلوط را تعیین می‌کنند. همچنین کار تجربی Pedersen و همکاران در سال ۲۰۰۷، نشان می‌دهد که ترکیبات C_{+50} در نفت تأثیر قابل توجهی در شکل‌گیری واکس ندارد.

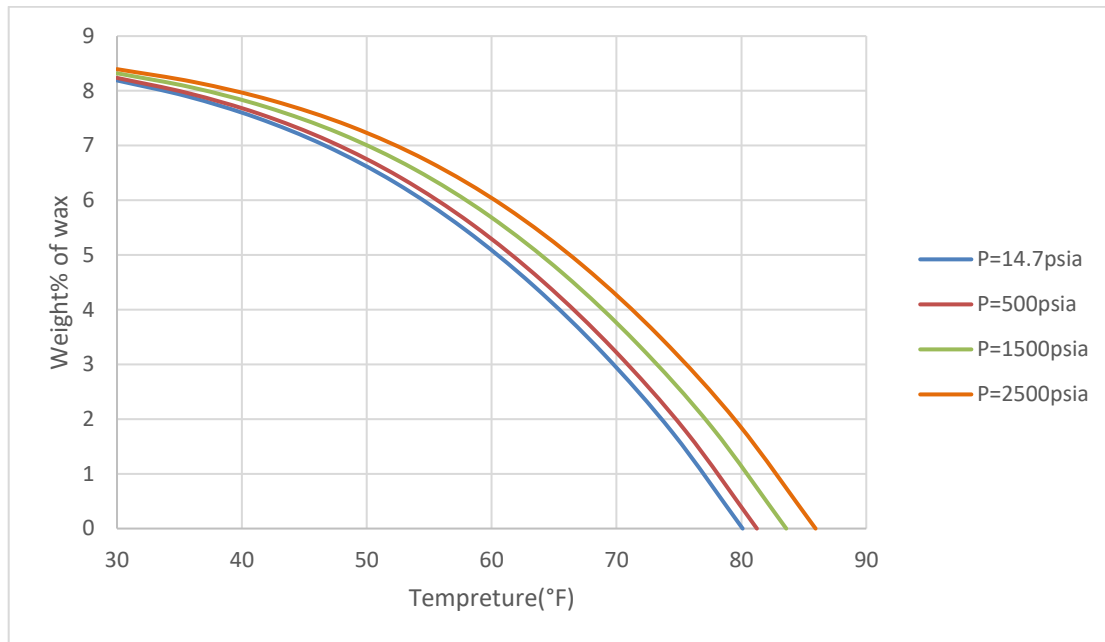
جدول ۶.۳ ترکیب PT Flash نفت در $14/7$ psia و $60^{\circ}F$

Component	Total	Liquid	Wax
CO ₂	۰/۰۳	۰/۰۳۱	۰
H ₂ S	۰/۱۶	۰/۲۰۰	۰
C ₁	۰/۰۲	۰/۰۲۱	۰
C ₂	۰/۳۴۱	۰/۳۴۸	۰
C ₃	۱/۶۲۳	۱/۶۶۰	۰
iC ₄	۰/۸۱۲	۰/۸۳۰	۰
nC ₄	۳/۲۸۷	۳/۳۶۱	۰
iC ₅	۲/۱۹۴	۲/۲۴۴	۰
nC ₅	۴/۱۰۸	۴/۲۰۲	۰
C ₆	۷/۲۰۴	۷/۳۶۸	۰
C ₇	۶/۲۸۳	۶/۴۲۵	۰
C ₈	۵/۷۶۹	۵/۹۲۳	۰
C ₉	۵/۳۴۵	۵/۴۶۲	۰
C ₁₀₊	۶۲/۸۰۹	۶۱/۹۹۱	۱۰۰
C ₁₀₊ Mol wt	۲۸۶/۳۰۰	۲۷۳/۵۰۰	۶۴۸/۶

جدول ۷.۳. ترکیب Extended PT Flash نفت در ۱۴/۷ psia و ۶۰°F

component	Total	Liquid	Wax
CO ₂	۰/۰۳	۰/۰۳۱	۰
H ₂ S	۰/۱۶	۰/۲۰۰	۰
C ₁	۰/۰۲	۰/۰۲۱	۰
C ₂	۰/۳۴۱	۰/۳۴۸	۰
C ₃	۱/۶۲۳	۱/۶۶۰	۰
iC ₄	۰/۸۱۲	۰/۸۳۰	۰
nC ₄	۳/۲۸۷	۳/۳۶۱	۰
iC ₅	۲/۱۹۴	۲/۲۴۴	۰
nC ₅	۴/۱۰۸	۴/۲۰۲	۰
C ₆	۷/۲۰۴	۷/۳۶۸	۰
C ₇	۶/۲۸۳	۶/۴۲۵	۰
C ₈	۵/۷۹۲	۵/۹۲۳	۰
C ₉	۵/۳۴۵	۵/۴۶۲	۰
C ₁₀ -C ₁₂	۱۴/۵۸۲	۱۴/۸۶۸	۰
C ₁₃ -C ₁₅	۱۱/۲۰۵	۱۱/۴۳۱	۰
C ₁₆ -C ₁₈	۸/۶۱۰	۸/۷۸۸	۰
C ₁₉ -C ₂₁	۶/۶۱۵	۶/۷۵۷	۰
C ₂₂ -C ₂₅	۶/۵۰۱	۶/۶۴۵	۰
C ₂₆ -C ₃₀	۵/۴۸۹	۵/۶۱۵	۰
C ₃₁ -C ₃₆	۴/۰۷۸	۳/۸۲۷	۱۵/۹۰۲
C ₃₇ -C ₄₅	۳/۲۱۲	۲/۵۳۵	۸۴/۰۹۸
C ₄₆ -C ₈₀	۲/۵۴۴	۲/۵۶۰	۰

شکل ۱۰.۳ منحنی رسوب واکس در نرم افزار PVTsim را نشان می‌دهد. منحنی تشکیل واکس، درصد وزنی واکس در مقایسه با درجه حرارت در ۴ سناریو با فشارهای به ترتیب ۱۴/۷، ۵۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ را بیان می‌کند. نتایج در جدول ۳.۷ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۹.۳. نمودار تشکیل واکس در فشارهای مختلف

جدول ۸.۳. داده‌های تشکیل واکس

Wax Formation at ۱۴/۷ psia		Wax Formation at ۵۰۰ psia		Wax Formation at ۱۵۰۰ psia		Wax Formation at ۲۵۰۰ psia	
Temperature °F	Weight % of wax	Temperature °F	Weight % of wax	Temperature °F	Weight % of wax	Temperature °F	Weight % of wax
۸۰/۱	۰/۰۰	۸۱/۲۴	۰/۰۰	۸۳/۵۹	۰/۰۰	۸۵/۹۴	۰/۰۰
۷۴/۵۳	۱/۷۴۲	۷۵/۵۵	۱/۷۷۸	۷۷/۶۴	۱/۸۵۱	۷۹/۷۲	۱/۹۲۳
۶۸/۹۷	۳/۱۹۲	۶۹/۸۵	۳/۲۵۳	۷۱/۶۸	۳/۳۷۵	۷۳/۵۱	۳/۴۹۵
۶۳/۴	۴/۴۲۹	۶۴/۱۶	۴/۵۰۵	۶۵/۷۳	۴/۶۵۹	۶۷/۲۹	۴/۸۰۸
۵۷/۸۳	۵/۴۷۱	۵۸/۴۷	۵/۵۵۵	۵۹/۷۷	۵/۷۲۱	۶۱/۰۸	۵/۸۷۹
۵۲/۲۷	۶/۳۲۳	۵۲/۷۷	۶/۴۰۶	۵۳/۸۲	۶/۵۶۸	۵۴/۸۶	۶/۷۲
۴۶/۷	۶/۹۹۶	۴۷/۰۸	۷/۰۷۲	۴۷/۸۶	۷/۲۲	۴۸/۶۵	۷/۳۵۵
۴۱/۱۳	۷/۵۱۳	۴۱/۳۹	۷/۵۸	۴۱/۹۱	۷/۷۰۷	۴۲/۴۳	۷/۸۲۲
۳۵/۵۷	۷/۹۰۲	۳۵/۶۹	۷/۹۵۸	۳۵/۹۵	۸/۰۶۴	۳۶/۲۲	۸/۱۵۸
۳۰/۰۰	۸/۱۹	۳۰/۰۰	۸/۲۳۶	۳۰/۰۰	۸/۳۲۱	۳۰/۰۰	۸/۳۹۶

طبق داده‌های جدول و نمودار بدست آمده، مقدار WAT برابر ۸۰/۱ درجه فارنهایت در فشار ۱۴/۷ psia می‌باشد. با آنالیز حساسیت بر روی مقادیر فشار می‌توان به این نکته پی برد که با افزایش فشار میزان درصد تشکیل واکس افزایش می‌یابد، همچنین منحنی شکل گیری واکس نشان می‌دهد که با افزایش فشار، WAT تقریباً در حال افزایش است، اگرچه این افزایش در محدوده عملیاتی از ۱۴/۷ psia تا ۲۵۰۰ psia در نظر گرفته شده است.

تعیین رفتار فاز واکس در نفت و اجزای غیر تشکیل دهنده واکس در مخلوط نفت-واکس باید با احتیاط زیادی انجام شود. PT flash شبیه سازی شده در ۱۴/۷ psia و ۶۰°F نشان دهنده عدم وجود واکس در اجزای سبک نفت و مقدار بالای آن در جزء C₁₀₊ است. منحنی حلالیت واکس حاصل از PVTsim آنالیز غلظت واکس مورد نظر در مدل OLGA را در فشارهای مختلف ارائه می‌دهد. پس از تجزیه و تحلیل سیال توسط PVTsim، یک فایل به عنوان ورودی برای شبیه سازی رسوب واکس در OLGA ساخته می‌شود.

• شرایط خروجی خط لوله

پس از شبیه سازی سیال در نرم افزار PVTsim برای تشکیل جداول ورودی نرم افزار OLGA، مقدار حداکثر و حداقل دما و فشار برای سیال در جدول ۹.۳ نشان داده شده است:

جدول ۹.۳. شرایط و تعداد نقاط ترمودینامیکی تشکیل واکس

مقدار	فشار (psia)	دما (°F)
حداقل	۱۴.۷	۳۰
حداکثر	۲۰۰۰	۱۵۰
تعداد نقاط ترمودینامیکی	۵۰	۵۰

برای وارد کردن شرایط خروجی خط لوله، باید از نود (گره) فشار استفاده شود که در آن تعریف نوع سیال، فشار و دما ضروری است.

Path: Pressure Node → properties

General
Server
Single phase
Compositional
Pressure conditions
WATERFRACTION [-]
TOTALWATERFRACTION -1 [-]
GASFRACCTION -1 [-]
TEMPERATURE [C]
PRESSURE [bara]
TIME 0 [s]
FLUID
Inhibitor tracking
Standard conditions
User Defined
Drilling
Waxdeposition
Steam

شکل ۱۰.۳. پنجره داده‌های سیال خروجی

• پروفایل خط لوله

در تصویر ۱۱.۳ جزئیات مؤلفه ID (قطر داخلی) خط لوله، بخش‌ها، طول و ارتفاع آورده شده است. وارد کردن این اطلاعات باید مطابق با مسیر زیر انجام گیرد.

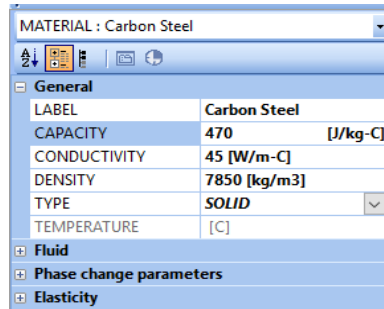
Path: oil flow line → Geometry

Pipe	x [m]	y [m]	Length [m]	Elevation [m]	# Sections	Length of sections (list [m])	Diameter [m]	Roughness [m]	Wall
Start Point	0	0							
PIPE-1	10000	0	10000	0	20	20:500	0.355601	4e-005	pipe
PIPE-2	30000	10	20000	10	40	39:500.139, 494.595	0.355601	4e-005	pipe
PIPE-3	45000	0	15000	-10	31	488.941, 29:483.522, 488.941	0.355601	4e-005	pipe
PIPE-4	50000	5	5000	5	10	495.006, 9:500.555	0.355601	4e-005	pipe

شکل ۱۱.۳. جزئیات ژئومتری خط لوله.

خط لوله شامل یک لایه از فولاد کربن به ضخامت ۴ میلی متر است. خصوصیات جنس لوله در شکل ۳.۱۲، به عنوان مقادیر پیش فرض اختصاص یافته توسط OLGA آورده شده است.

Path: library → material → carbon steel → properties



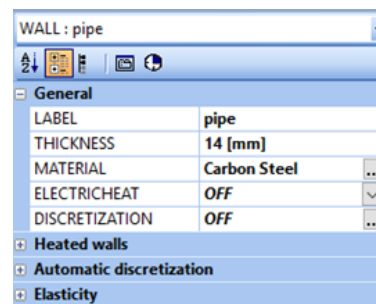
MATERIAL : Carbon Steel	
General	
LABEL	Carbon Steel
CAPACITY	470 [J/kg-C]
CONDUCTIVITY	45 [W/m-C]
DENSITY	7850 [kg/m3]
TYPE	SOLID
TEMPERATURE	[C]
Fluid	
Phase change parameters	
Elasticity	

شکل ۱۲.۳. خصوصیات فولاد کربن

خصوصیات دیواره لوله نیز باید در مسیر زیر وارد شود.

Path: library → wall → pipe → properties

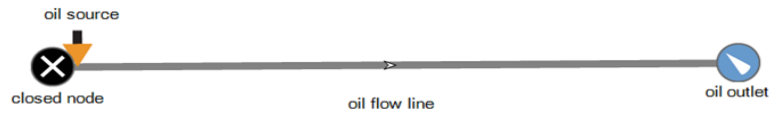
مشخصات دیوار لوله در شکل ۱۳.۳ آورده شده است.



WALL : pipe	
General	
LABEL	pipe
THICKNESS	14 [mm]
MATERIAL	Carbon Steel
ELECTRICHEAT	OFF
DISCRETIZATION	OFF
Heated walls	
Automatic discretization	
Elasticity	

شکل ۱۳.۳ مشخصات دیواره لوله

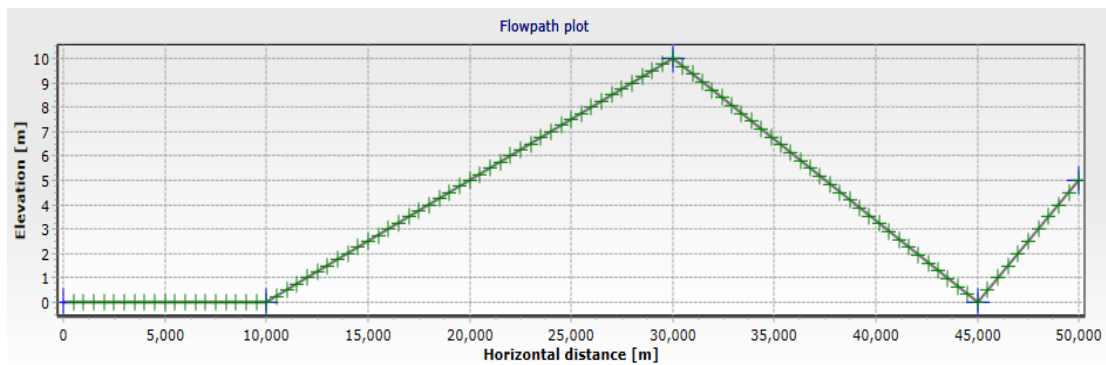
برای انتقال این نفت از سرچاه در زیر دریا به سکو، خط لوله‌ای به قطر ۱۴ اینچ در نظر گرفته شده است. سر چاه به عنوان منبع جریان توده (منبع نفت) عمل می‌کند که در اولین گره PIPE-1 در خط لوله قرار می‌گیرد. این سیال در انتهای خط لوله از طریق یک گره فشار به نام oil outlet جریان می‌یابد که در گره پایانی PIPE-4 قرار دارد. خط لوله همچنین شامل یک گره بسته و بدون انتقال جرم و انرژی در PIPE-1 می‌باشد. شماتیک خط لوله در OLGA در شکل ۱۴.۳ نشان داده شده است، لازم به ذکر است که این شکل هندسه واقعی خط لوله را نشان نمی‌دهد.



شکل ۱۴.۳. شماتیک خط لوله در مدل OLGA

• هندسه خط لوله

برای دقت بیشتر در محاسبات، خط لوله به چند بخش تقسیم می‌شود، طول هر بخش ۵۰۰ متر است. هندسه خط لوله با اجزاء در شکل ۱۵.۳ نشان داده شده است.

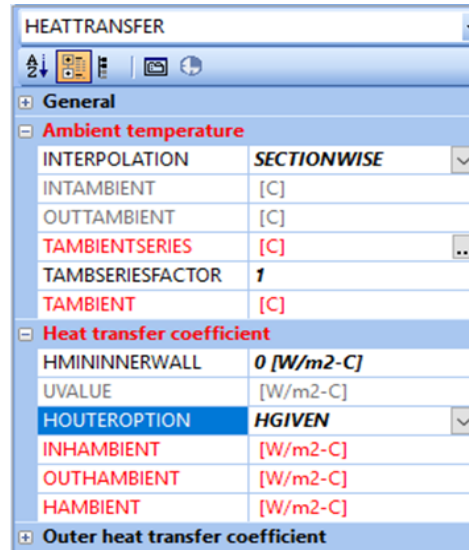


شکل ۱۵.۳. هندسه خط لوله

• شرایط مرزی

در این بخش باید خصوصیات انتقال حرارت محیط تعریف شود.

Path: flow path → boundary and initial conditions → heat transfer → properties

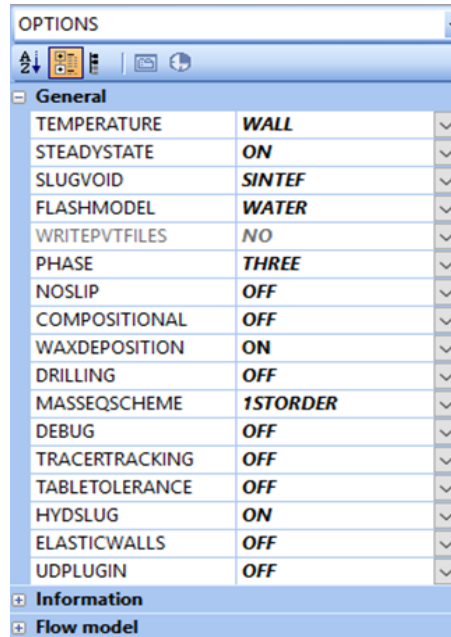


شکل ۱۶.۳. پنجره خصوصیات انتقال حرارت

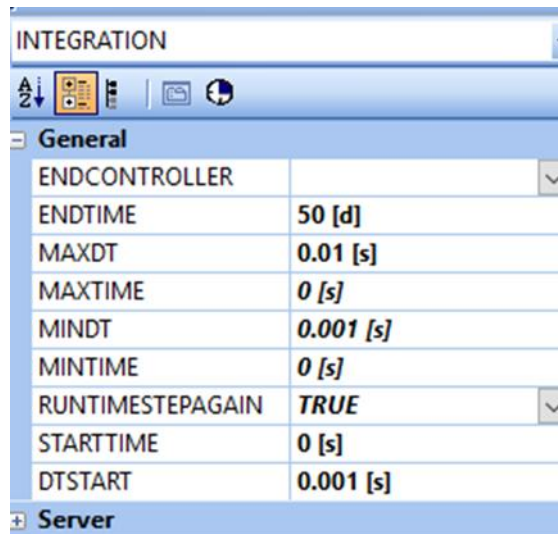
گزینه‌های قرمز رنگ در شکل ۱۶.۳ باید وارد شوند. محیطی که خط لوله در آن قرار دارد، آب دریا با ۴ درجه سانتی‌گراد است. $INH_{AMBIENT}$ و $OUTH_{AMBIENT}$ به ترتیب ضریب انتقال حرارت در ورودی و خروجی سیستم و $H_{AMBIENT}$ ضریب میانگین انتقال حرارت بر روی سطح خارجی لوله می‌باشد که پس از وارد کردن دمای سیال ورودی، دمای محیط و مشخصات خط لوله توسط نرم‌افزار برای هر بخش شبیه‌سازی درون‌یابی می‌شوند و به روش دستی نیز قابل مقداردهی می‌باشند.

• گزینه‌ها و یکپارچه سازی

جهت فعال کردن شبیه‌سازی رسوب واکس در نرم‌افزار OLGA مقدار $WAXDEPOSITION$ بایستی بر روی ON تنظیم شود (شکل ۱۷.۳ و شکل ۱۸.۳). مقادیر دیگر به صورت پیش فرض نگه داشته می‌شوند.



شکل ۱۷.۳. گزینه‌های مدل OLGA



شکل ۱۸.۳. یکپارچه سازی مدل OLGA.

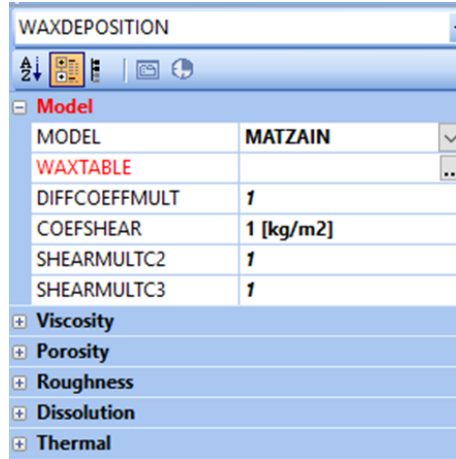
• رسوب واکس

جهت انتخاب مدل شبیه‌سازی رسوب واکس از پنجره WAXDEPOSITION مدل Matzain را انتخاب

می‌کنیم.

Path: flow path → FA-models → wax deposition

شکل ۱۹.۳ پنجره رسوب واکس را نشان می‌دهد.



WAXDEPOSITION	
Model	
MODEL	MATZAIN
WAXTABLE	
DIFFCOEFFMULT	1
COEFSHEAR	1 [kg/m2]
SHEARMULTC2	1
SHEARMULTC3	1
+ Viscosity	
+ Porosity	
+ Roughness	
+ Dissolution	
+ Thermal	

شکل ۱۹.۳. پنجره خصوصیات رسوب واکس

در OLGA هر مدل با مقادیر پیش فرض بر روی پارامترهای نامشخص تنظیم می‌شود. با این حال، در صورت لزوم، می‌توان این پارامترهای نامشخص را تنظیم کرد. در مدل RRR ضریب انتشار پیش فرض برابر با ۱ است که بر اساس رابطه Hayduk-Minhas است. به عنوان پیش فرض، پارامتر زبری واکس مقدار صفر داده می‌شود، بدین معنی که زبری دیوار به دلیل رسوب واکس افزایش نمی‌یابد. این پارامتر را می‌توان تا حداکثر مقدار ۱ تنظیم کرد، به این معنی که زبری واکس با ضخامت لایه واکس افزایش می‌یابد.

مدل RRR تنها مدلی است که پراکندگی برشی را در نظر می‌گیرد. پراکندگی برشی باعث افزایش رسوب واکس در لوله می‌شود. در مدل RRR در OLGA، پراکندگی برشی می‌تواند گنجانده شود. به عنوان یک پارامتر پیش فرض، پراکندگی برشی برابر صفر (kg / m^2) تعیین شده است. انتخاب یک مقدار خوب و معقول برای این پارامتر دشوار است، بنابراین به طور معمول مقدار پیش فرض برای شبیه سازی نگه داشته می‌شود.

برای مدل Matzain ثابت‌های تجربی قابل تنظیم است. به عنوان پیش فرض ثابت‌ها روی ۱ قرار

می‌گیرند، که نشان می‌دهد $C_1 = 15$ ، $C_2 = 0.55$ و $C_3 = 1/4$.

یکی دیگر از پارامترهای مهم تنظیم تخلخل واکس است. به عنوان گزینه‌های پیش فرض، OLGA

به طور خودکار تخلخل واکس را در محدوده ۰/۲ تا ۰/۸ برای هر دو مدل محاسبه می‌کند. این می‌تواند

به روش دستی نیز انجام شود به گونه‌ای که از تخلخل واکس به عنوان پارامتر قابل تنظیم استفاده گردد.

لازم به ذکر است که بین افزایش تخلخل و افزایش ضخامت در لایه رسوب واکس رابطه خطی وجود

ندارد و افزایش تخلخل از ۰/۸۰٪ به ۰/۹۰٪ سبب دو برابر شدن ضخامت واکس باشد. برای شبیه سازی از

پارامترهای زیر برای تنظیم استفاده می‌شود. برای مدل RRR همان طور که در بخش ۱.۸.۲ توضیح

داده شده است، میزان کل افزایش ضخامت لایه واکس به شرح زیر است:

$$I_{wax} = \frac{VOL_{wax}^{diff} + VOL_{wax}^{shear}}{(1 - \phi)2 \pi r L} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{wax}} \frac{D_i (C_i^b - C_i^w) S_{wet} MW_i}{\delta \rho_i} 2 \pi r L + \frac{k^* C_{wall} \dot{\gamma} A}{\rho_{wax}}}{(1 - \phi)2 \pi r L}$$

پارامترها عبارتند از:

- تخلخل واکس
- ضریب انتشار (D)

برای مدل Matzain قبلاً در بخش ۲.۸.۲ به آن اشاره شد که میزان کل رسوب واکس توسط مدل

Matzain به شرح زیر است:

$$\frac{d\delta}{dt} = - \frac{\left(\frac{C_1}{1 - C_{oil}/100} \right)}{1 + C_2 N_{SR}^{C_3}} D_{ow} \left[\frac{dw_w}{dT} \frac{dT}{dr} \right] = - \frac{\Pi_1}{1 + \Pi_2} D_{ow} \left[\frac{dw_w}{dT} \frac{dT}{dr} \right] \quad (2.3)$$

رابطه ۳.۳ نرخ رسوب گذاری را نشان می‌دهد:

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right) = \frac{1}{1 + C_2 N_{SR}^{C_3}} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{diff} \quad (3.3)$$

که در آن $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{diff}$ تغییر نرخ به دلیل انتشار، و اثرات تخلخل. ثابت $C_1 = 15$ در $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{diff}$ برای مدل Matzain گنجانده شده است.

مهم‌ترین مرحله در شبیه سازی انتخاب مدل قابل اعتماد است. همان‌طور که در بخش قبلی بحث شد، شبیه سازی رسوب واکس در شبیه ساز OLGA معمولاً با استفاده از مدل‌های MATZAIN و RRR انجام می‌شود. برای به دست آوردن نتایج قابل قبول، این مدل‌ها باید قبل از شبیه سازی با استفاده از داده‌های آزمایشی یا میدانی تنظیم شوند. به دلیل کمبود امکانات آزمایشی و نبود داده‌های میدانی در همه شبیه سازی‌ها در این پایان‌نامه از مدل MATZAIN استفاده شد و مقادیر ثابت‌های مورد نیاز نیز از مطالعه Gooya و همکاران گرفته شد [۴۹].

در جدول ۱۰.۳ نمایی کلی از مقادیر پیش فرض و تنظیم شده برای پارامترهای مختلف ارائه شده است. این مقادیر تنظیم شده از اثر Gooya و همکارانش [49] که روی نفت خام خاور میانه مطالعه می‌کنند گرفته شده است.

جدول ۱۰.۳. پارامترهای ورودی پیش فرض و تنظیم شده برای مدل MATZAIN [۴۹]

Matzain model		
Status	Default	tuned
Wax porosity	Calc. by OLGA	۰/۶
Wax roughness	۰	۰
Shear dispersion	۰	۰
$C_1=15$	۱	۱
$C_2=.055$	۱	۰/۸
$C_3=1.4$	۱	۰/۹۲

• گزینه‌های خروجی

گزینه‌های خروجی در پنجره OLGA برای نمودارهای Trend و Profile مشخص شده‌اند.

ویژگی‌های Trend و Profile

TREND		PROFILE	
General		General	
DTPLOT	10 [s]	DTPLOT	10 [s]
NPLOT		DTTIME	0 [s]
TIME	0 [s]	TIME	[s]
WRITEFILE	ON	WRITEFILE	ON

شکل ۲۰.۳. ویژگی‌های Trend و Profile

جهت مطالعه تأثیر رسوب‌گذاری بر روی پارامترهای عملیاتی می‌توان تغییر پارامترها را نسبت به زمان (TREND) و نسبت به مسیر عبور جریان (PROFILE) مورد بررسی قرار داد. که پنجره‌های مرتبط در شکل ۲۰.۳ نشان داده شده‌اند.

تعریف پروژه در OLGA

یک مدل OLGA برای پروژه مورد مطالعه ساخته شد. جهت تعریف پروژه مورد نظر، شرایط ورودی و خروجی، فایل PVT سیال و هندسه جریان برای محاسبه پارامترهای اولیه در پنجره OLGA استفاده شد تا مدل رسوب واکس انجام شود. یک نمونه فایل ورودی OLGA در پیوست الف آورده شده است.

مطالعات پارامتری

پس از ساختن مدل OLGA برای پروژه مورد مطالعه، مطالعات پارامتری بر روی پارامترهای دبی ورودی، دمای ورودی و دمای آب، قطر لوله، شیب و زبری خط لوله به مدت ۱۵ روز انجام خواهد شد تا چگونگی تأثیر هر پارامتر بر رسوب واکس نشان داده شود.



فصل چهارم

تجزیه و تحلیل نتایج

۱.۴. شرح کلیات

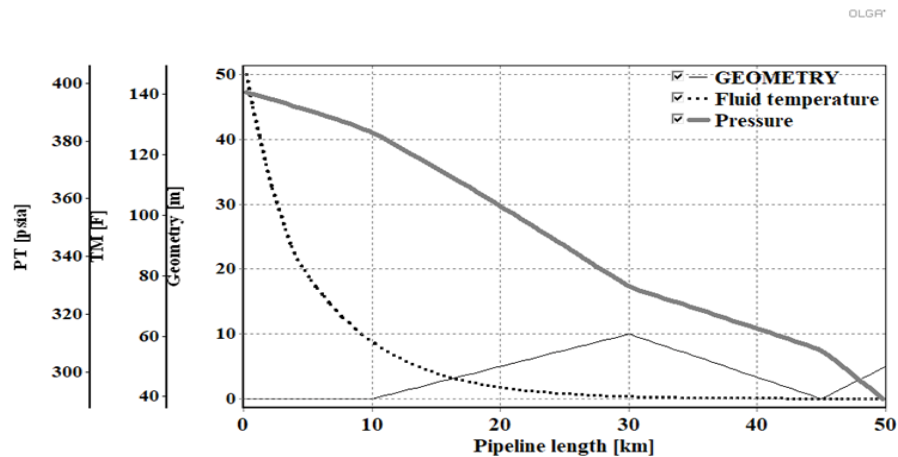
در فصل سوم شبیه سازی بر روی یکی از میداین نفتی خاورمیانه انجام شد. در ابتدا، این سیال به نرم افزار PVTsim معرفی شد تا جدول PVT و فایل واکس لازم برای شبیه ساز OLGA تهیه شود. پس از آنالیز سیال توسط PVTsim و منطبق سازی با داده های آزمایشگاهی، کلیه ورودی های لازم به OLGA معرفی و مدل مناسبی برای پروژه مورد نظر ایجاد شد.

در این فصل، نتایج حاصل از شبیه سازی های پروژه مورد مطالعه توضیح داده می شود. در ابتدا، تجزیه و تحلیل کلی در مورد خواص ترموهیدرولیک خط جریانی ارائه می گردد. در ادامه، مطالعات پارامتری به منظور بررسی تأثیر پارامترهای دبی ورودی، دمای ورودی و دمای آب، قطرلوله، شیب و زبری خط لوله در فرایند رسوب واکس انجام شده است.

۲.۴. شبیه سازی ترموهیدرولیک

قبل از شبیه سازی رسوب واکس، برای بررسی صحت خواص ترموهیدرولیک (حرارتی) خط لوله شبیه سازی در حالت پایدار انجام شد. اجرای مراحل شبیه سازی پس از گذشت ۵۰ روز به اتمام می رسد. حداکثر و حداقل بازه زمانی که مرحله شبیه سازی را کنترل می کند به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ ثانیه می باشد.

بعد انجام شبیه سازی ترموهیدرولیک پروفایل های فشار، دما و ژئومتری (هندسه) خط لوله در شکل ۱.۴ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، به محض ورود سیال به خط لوله، دمای آن کاهش می یابد و در همان ابتدای خط لوله، دمای سیال برابر با دمای محیط می شود و در طول خط لوله کاهش دمایی به میزان ۱۰۰ درجه فارنهایت و افت فشار ۱۰۰ psia دیده می شود.



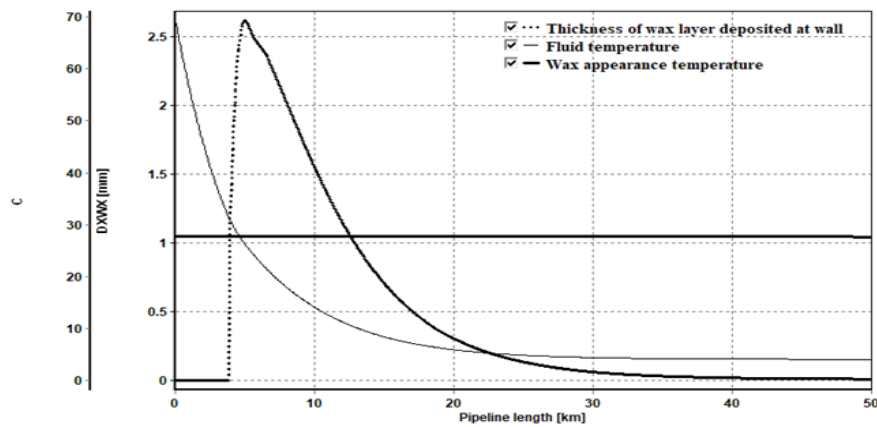
شکل ۱.۴. نمودار پروفایل شبیه سازی ترموهیدرولیکی

۳.۴. شبیه سازی رسوب واکس

برای شبیه سازی رسوب واکس، لازم است شبیه سازی ترموهیدرولیکی که در قسمت قبل انجام شده است اصلاح گردد. بنابراین، باید گزینه‌ی **turn on** را برای رسوب واکس فعال کرد.

شکل ۲.۴، پروفایل‌های دمای سیال، دمای ظهور واکس و ضخامت لایه واکس در طول خط لوله را پس از گذشت ۵۰ روز نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در ابتدای خط لوله، تا زمانی که دمای سیال از WAT فراتر باشد، هیچگونه رسوب واکسی نخواهیم داشت. در حدود فاصله ۴/۵۶۲ کیلومتر و دمای ۸۱ درجه فارنهایت به محض اینکه دمای سیال به کمتر از مقدار WAT کاهش یابد، رسوب واکس رشد خیلی سریع خواهد داشت تا به حداکثر مقدار خود برسد. بخش زیادی از واکس رسوب شده در انتهای PIPE-1 رخ داده است که پس از آن، ضخامت لایه واکس به تدریج کاهش می‌یابد تا اینکه دمای سیال با دمای محیط برابر شود. این موضوع به دلیل کاهش گرادیان دما است که در پایین دست اتفاق می‌افتد.

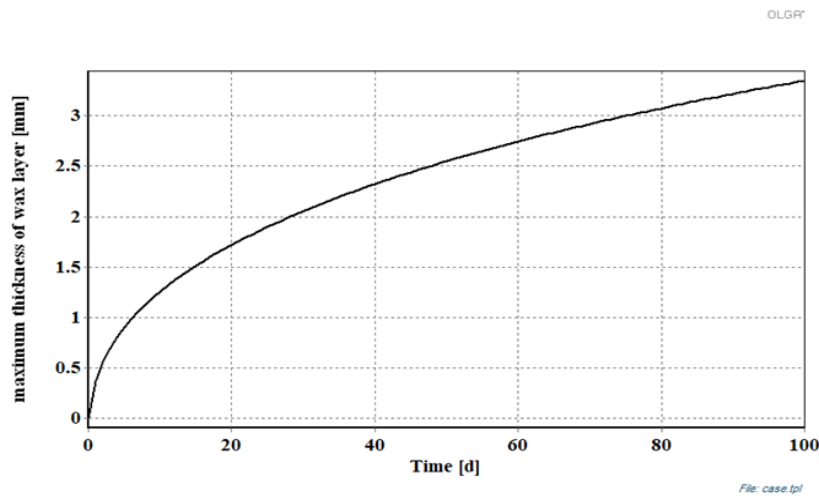
OLGA



شکل ۲.۴. پروفایل شبیه سازی رسوب واکس پس از ۵۰ روز

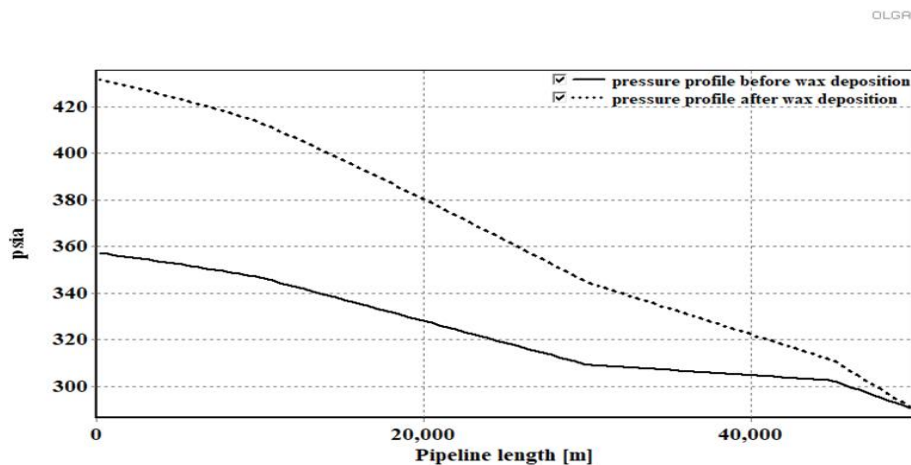
شبیه سازی تغییر ضخامت لایه واکس با توجه به زمان در فاصله ۴/۵۶۲ کیلومتر پس از گذشت ۱۰۰ روز در شکل ۳.۴ آورده شده است. در زمان های اولیه دیده می شود، ضخامت واکسی که رسوب شده به سرعت رشد می کند اما پس از آن سرعت رشد رسوب واکس کاهش می یابد و همچنین این احتمال وجود دارد که در زمان های بعدی ضخامت واکس رسوب شده به مقدار ثابتی برسد.

طبق یک قانون سرانگشتی هنگامی که ضخامت لایه واکس در خط لوله به ۲ میلی متر برسد، لازم است که یک استراتژی برای از بین بردن رسوب انجام شود. [۲۹] بنابراین در پروژه مورد بررسی پس از ۳۰ روز باید عملیات حذف و از بین بردن رسوب واکس ایجاد شده در خط لوله، انجام شود.



شکل ۳.۴. تکامل ضخامت لایه واکس پس از ۱۰۰ روز در ۴/۵۶۲ کیلومتر از ابتدای خط لوله، که در آن حداکثر رسوب واکس اتفاق می‌افتد.

واکس رسوب شده با افزایش زبری دیوار و کاهش قطر مؤثر لوله، افت فشار در خط لوله را افزایش می‌دهد. شبیه سازی یک بار بدون اینکه رسوب واکسی ایجاد شود، انجام گردید و دوباره در حضور رسوب واکس به مدت ۵۰ روز مشاهده شد که واکس باعث افزایش افت فشار ۷۰ psia در طول خط لوله می‌شود. نتایج در شکل ۴.۴ نشان داده شده است.



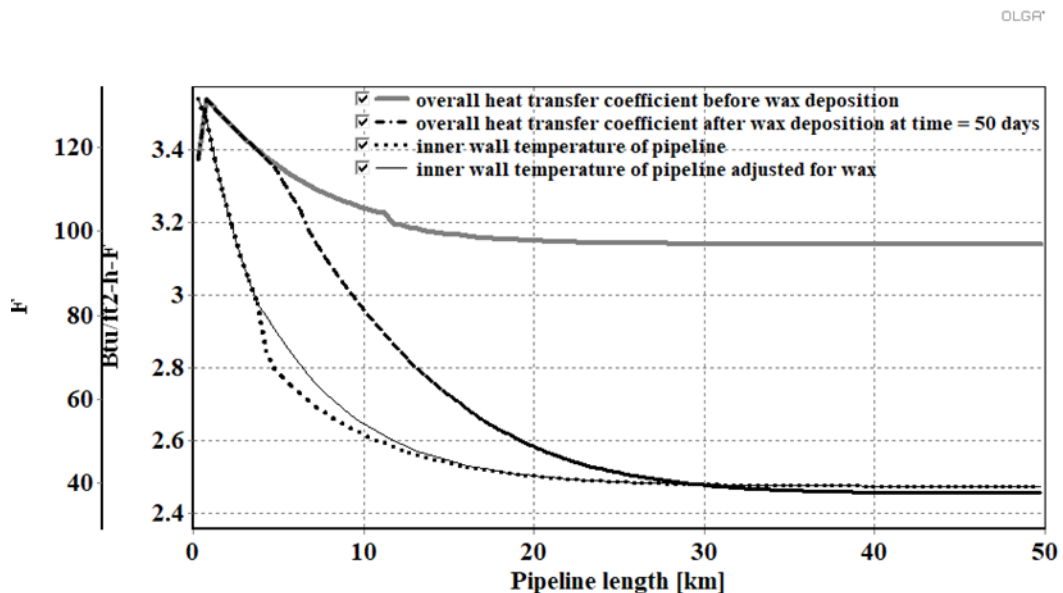
شکل ۴.۴. تأثیر رسوب واکس بر روی افت فشار

شکل ۵.۴ ضریب انتقال حرارت کلی و دمای دیواره داخلی خط لوله قبل و بعد از رسوب واکس را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از افت شدید ضریب انتقال حرارت کلی در نقطه شروع رسوب واکس است. دلیل

کاهش ناگهانی ضریب انتقال حرارت این است که لایه واکس ایجاد شده در سطح لوله مانند عایق عمل می‌کند و از تبادل گرما با محیط اطراف جلوگیری می‌کند و در نتیجه گرادیان دما در جهت شعاعی کاهش می‌یابد و مکانیسم انتشار مولکولی وابسته به شیب دما تضعیف شده و در نتیجه ضخامت لایه واکس در پایین دست کاهش می‌یابد.

با نگاهی به منحنی‌های دمای دیواره داخلی و نمودار اصلاح شده‌ی آن برای لایه واکس در امتداد خط لوله در شکل ۵.۴، مقاومت حرارتی لایه واکس اثبات می‌شود. مشاهده می‌شود در ناحیه‌ای که واکس رسوب کرده است به دلیل مقاومت حرارتی بین سیال و دیواره لوله ایجاد شده، دمای دیواره لوله از دمای سطح رسوب پایین‌تر است.

لازم به ذکر است با توجه به اختلاف دمای زیاد موجود بین سیال و دیواره بیرونی خط لوله، مقاومت حرارتی نمی‌تواند از فرایند رسوب واکس جلوگیری کند.



شکل ۵.۴. مشخصات ضریب انتقال حرارت کلی و دمای دیواره داخلی

۴.۴. مطالعات پارامتری

در این بخش با استفاده از گزینه مطالعه پارامتری در OLGA، مطالعات پارامتری برای ارزیابی اثر کیفی هر یک از پارامترهای دبی ورودی، دمای ورودی و دمای آب، قطر لوله، شیب و زبری خط لوله انجام گردید.

۱.۴.۴. تأثیر دبی در رسوب واکس

به نظر می‌رسد که رژیم جریان تأثیر زیادی در رسوب واکس خواهد داشت. (یعنی افزایش دبی در جریان آرام رسوب واکس را افزایش می‌دهد و در جریان آشفته مکانیسم نیروی برشی غالب است که باعث کاهش رسوب واکس می‌شود).

به طور کلی، پدیده رسوب واکس مطابق با اصول زیر کنترل می‌شود:

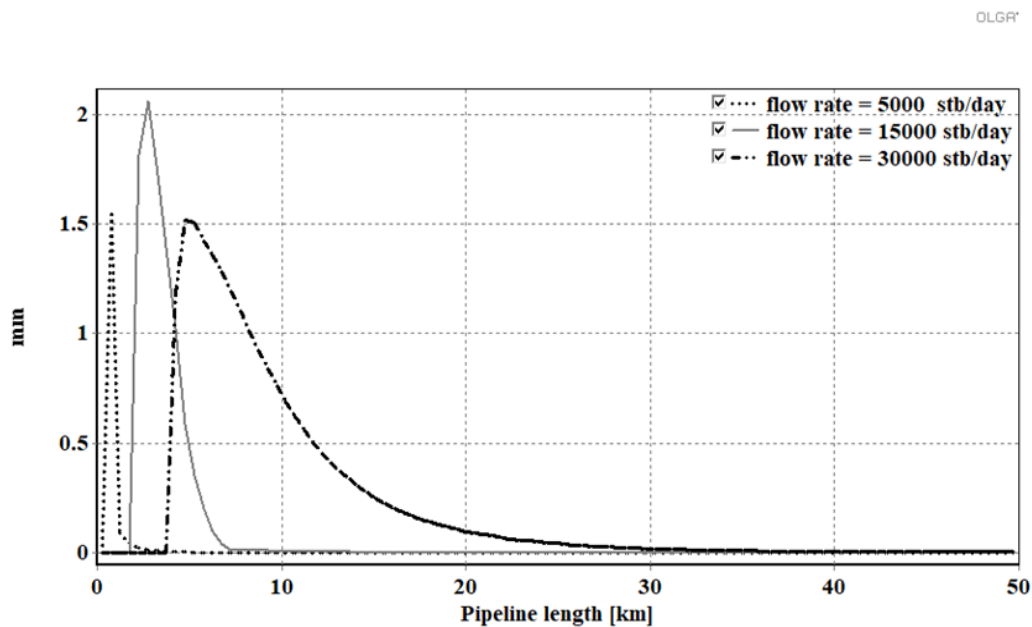
۱. افزایش دبی باعث افزایش تنش برشی بین سیال و رسوب می‌شود و مکانیسم از بین رفتن رسوب در اثر نیروی برشی تقویت می‌گردد. در نتیجه، ضخامت رسوب واکس کاهش می‌یابد.
۲. افزایش دبی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت داخلی و گرادیان دما در جهت شعاعی می‌شود که غلبه شدن مکانیسم نفوذ مولکولی را به دنبال دارد و این باعث افزایش ضخامت رسوب خواهد شد.

بدیهی است که این دو اثر ناشی از سرعت سیال در زمان مشابه است. از این رو، افزایش یا کاهش ضخامت رسوب واکس به این بستگی دارد که کدام یک از این دو اثر در فرایند رسوب واکس غالب خواهد بود.

شبیه سازی برای دبی‌های مختلف انجام شد و نتایج نشان می‌دهد که در نرخ‌های پایین که رژیم جریان به صورت آرام است، افزایش دبی افزایش ضخامت رسوب را به دنبال دارد، زیرا در جریان آرام، نفوذ مولکولی رسوب واکس را کنترل می‌کند اما در دبی‌های بالاتر که رژیم جریان آشفته وجود دارد، افزایش

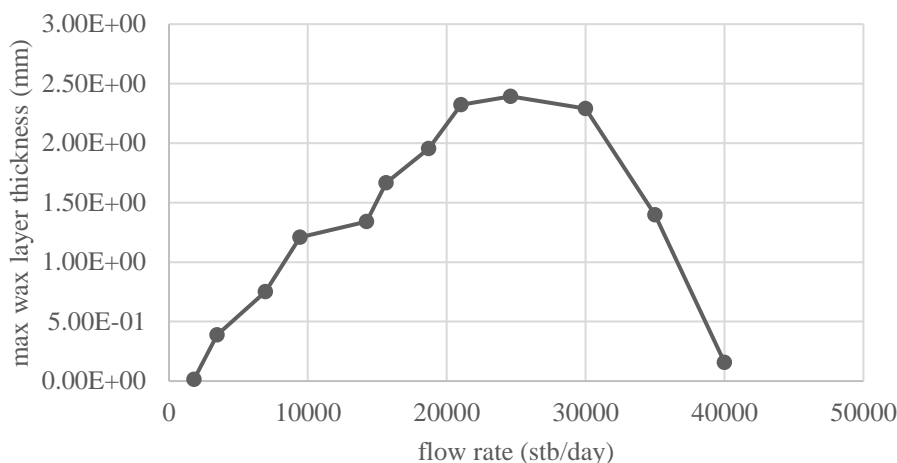
بیشتر سرعت باعث غلبه مکانیسم کاهش رسوب در اثر نیروی برشی می‌شود و در نتیجه، ضخامت رسوب واکس کاهش می‌یابد.

شکل ۶.۴ ضخامت رسوب واکس در طول خط لوله را برای دبی‌های ۵۰۰۰ stb/day، ۱۵۰۰۰ stb/day و ۳۰۰۰۰ stb/day نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی، واکس در فاصله بیشتر از ورودی لوله شروع به رسوب شدن می‌کند، زیرا در سرعت بالاتر، زمان کمتری برای انتقال گرما و کاهش دمای سیال به پایین‌تر از WAT وجود دارد.



شکل ۶.۴. تأثیر دبی بر پروفایل ضخامت رسوب واکس در طول خط لوله

برای بررسی دقیق تأثیر دبی بر روی رسوب واکس، شبیه‌سازی با نرخ‌های مختلف از ۲۰۰۰ stb/day تا ۴۰۰۰۰ stb/day انجام شد. شکل ۷.۴ نشان می‌دهد که حداکثر ضخامت لایه واکس با نرخ نفت افزایش می‌یابد تا اینکه در حدود ۲۵۰۰۰ stb/day به یک قله در نمودار می‌رسد و به دنبال آن افت شدید ایجاد می‌شود. هیچ واکسی برای نرخ‌های بالای ۴۰۰۰۰ stb/day رسوب نمی‌کند.



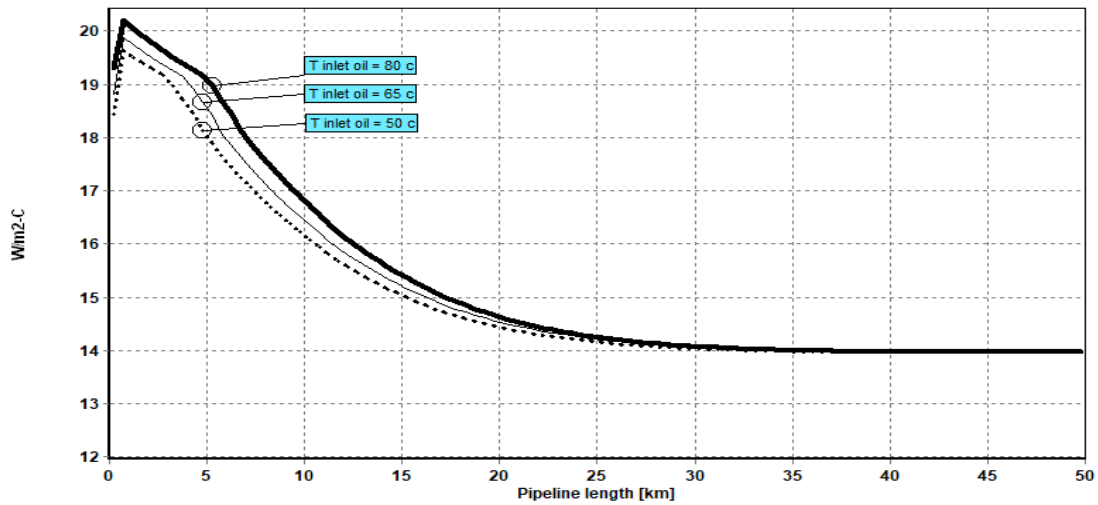
شکل ۷.۴. حداکثر ضخامت لایه واکس به صورت تابعی از دبی نفت در خط لوله

۲.۴.۴. تأثیر دمای نفت ورودی بر رسوب واکس

اختلاف دمای بین نفت خام و محیط بیرون به عنوان نیروی محرکه مورد نیاز برای رسوب واکس پیشنهاد شده است. در کلیه موارد ارائه شده در این بخش، دمای محیط در ۴ درجه سانتیگراد ثابت نگه داشته شده و سه دمای ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتیگراد برای نفت ورودی در نظر گرفته شده است. این موارد به مدت ۱۵ روز شبیه سازی می‌شوند.

تأثیر تغییر دمای سیال ورودی بر ضریب کلی انتقال حرارت در شکل ۸.۴ آورده شده است. در صورت افزایش ضخامت واکس در داخل خط لوله، به دلیل اثر عایق بندی لایه واکس بر روی دیواره مقاومت در برابر انتقال حرارت افزایش می‌یابد، که در نهایت باعث کاهش ضریب کلی انتقال حرارت در سطح مقطع لوله می‌شود. شکل ۸.۴ نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی محل ضریب کلی انتقال حرارت را به مسافت‌های دورتر انتقال می‌دهد.

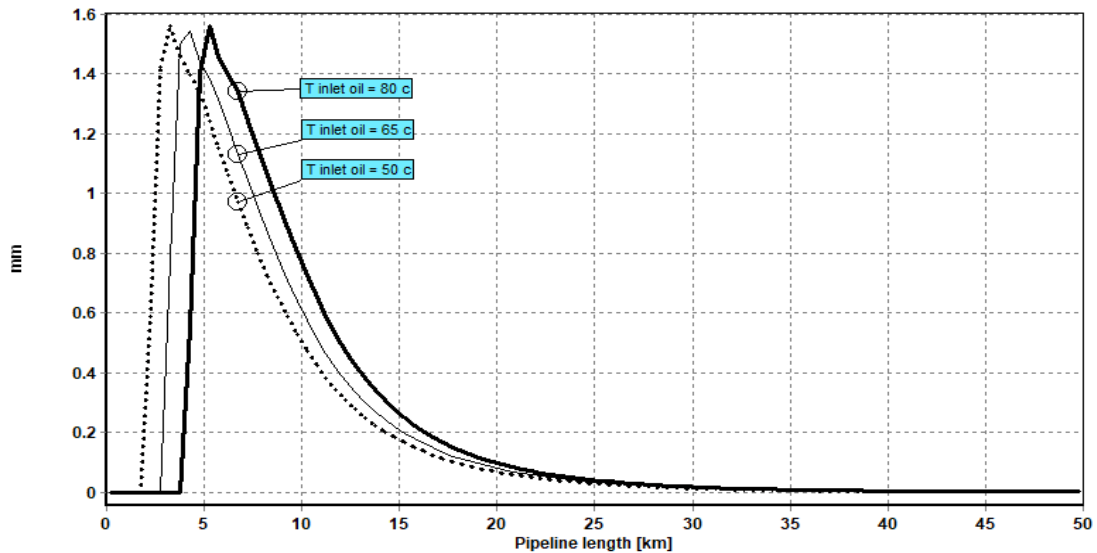
OLGA*



شکل ۸.۴. اثر تغییرات دمای سیال ورودی بر ضریب کلی انتقال حرارت

همان طور که در شکل ۹.۴ مشخص است، در حقیقت، با افزایش دمای ورودی محل رسوب واکس تغییر می کند و باعث تغییر ضریب کلی انتقال حرارت در خط لوله می شود.

OLGA*



شکل ۹.۴. اثر تغییرات دمای سیال ورودی بر محل رسوب واکس

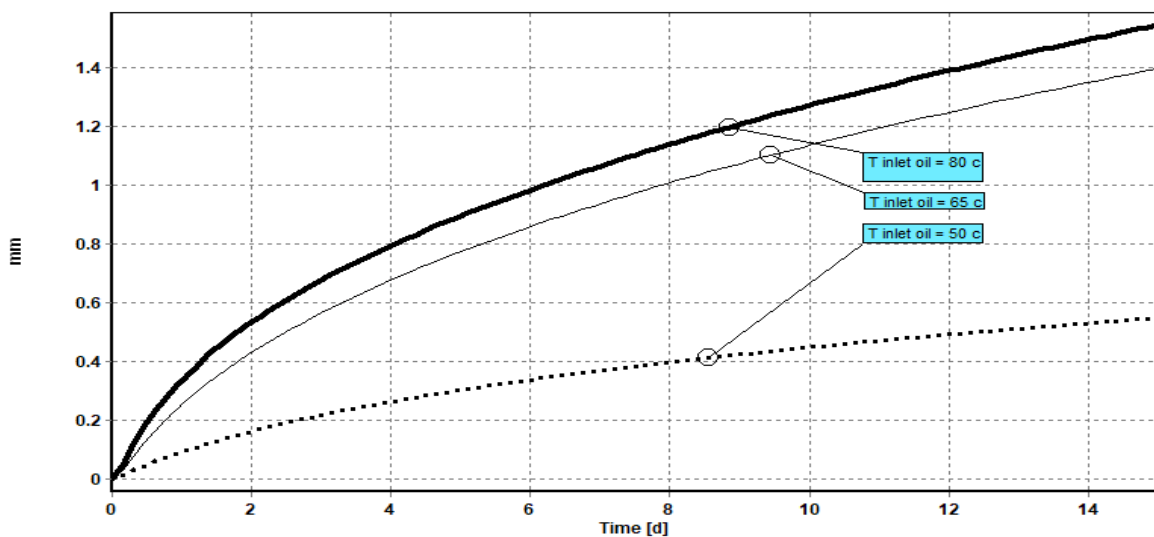
شکل ۱۰.۴ نشان می دهد که فرایند رسوب واکس به شدت اختلاف دما بین دمای محیط و نفت ورودی بستگی دارد. همچنین، مشاهده می شود که ضخامت رسوب در مواردی که ΔT کمتری دارند

(افزایش دمای نفت ورودی در دمای ثابت محیط) به طور قابل توجهی کاهش یافته است. دلیل این امر این است که هرچه اختلاف بین دمای نفت ورودی و دمای محیط کاهش می‌یابد، مقدار (dt/dr) در معادله انتشار مولکولی کاهش می‌یابد و منجر به کاهش ضخامت رسوب می‌شود.

$$\frac{dm_D}{dt} = \rho_w D_m A_i \frac{dC_w}{dr} = \rho_w D_m A_i \left(\frac{dC_w}{dT} \right) \left(\frac{dT}{dr} \right) \quad (1.4)$$

در این معادله، m_D جرم واکس رسوب شده، t زمان، F_w چگالی سیال، D_m ضریب انتشار واکس در نفت، C_w کسر جرمی واکس محلول، A_i ناحیه میان سطحی، r شعاع داخلی لوله و T دما.

DLGA*



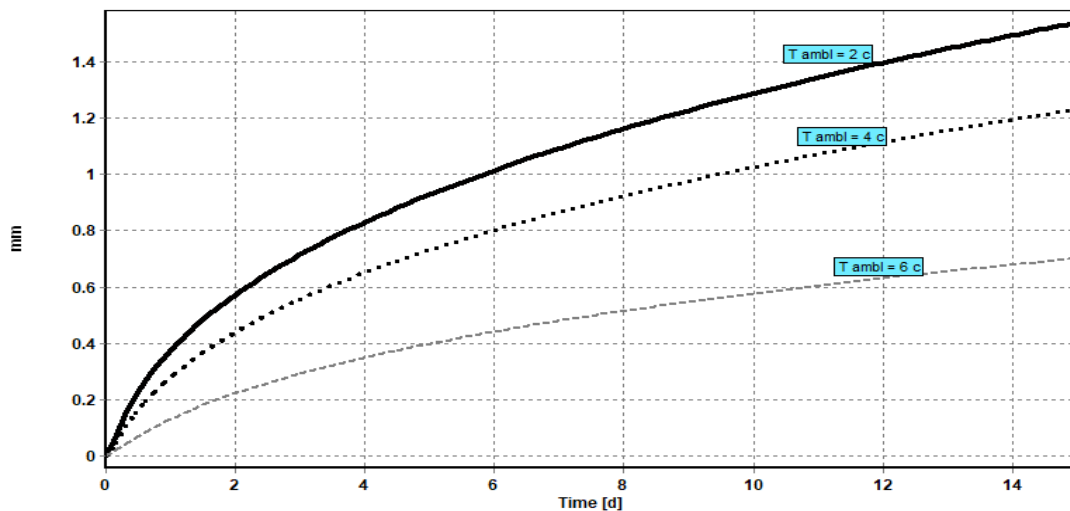
شکل ۱۰.۴. اثر تغییرات دمای سیال ورودی بر محل رسوب واکس

۳.۴.۴. تأثیر دمای محیط بر رسوب واکس

در این بخش، تأثیر دمای محیط بر رسوب واکس مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۱۱.۴ ضخامت رسوب را با گذر زمان نشان می‌دهد. دمای نفت ورودی ۷۰ درجه سانتیگراد و دمای محیط ۲، ۴ و ۶

درجه سانتیگراد می‌باشد. با کاهش دمای محیط، ضخامت رسوب به طور قابل توجهی افزایش یافته است. مشخص شد که ضخامت واکس بسیار وابسته به گرادیان دمایی خط لوله است.

OLGA[®]

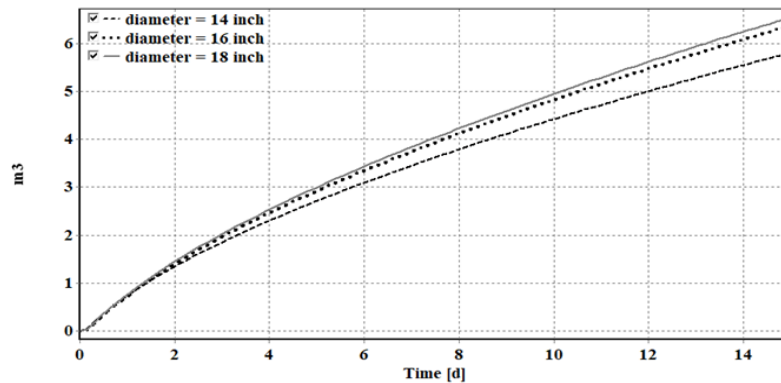


شکل ۱۱.۴. اثر دمای محیط بر رسوب واکس

۴.۴.۴. تأثیر قطر لوله در رسوب واکس

برای بررسی تأثیر تغییرات قطر در فرایند رسوب واکس، لوله‌های مشابه با قطر ۱۴، ۱۶ و ۱۸ اینچ برای شبیه سازی استفاده شدند. همانطور که در شکل ۱۲.۴ نشان داده شده، افزایش قطر لوله میزان رسوب واکس در خط لوله را افزایش می‌دهد. نتایج کاملاً منطقی است، زیرا با افزایش قطر لوله سرعت جریان کاهش می‌یابد و به دنبال آن، زمان ماندگاری افزایش خواهد داشت. علاوه بر این، افزایش قطر با کاهش گرادیان سرعت در نزدیکی سطح رسوب همراه است که باعث کاهش تنش برشی و تأثیر مکانیزم کاهش میزان رسوب بر اثر تنش برشی در سطح رسوب می‌شود. بنابراین میزان رسوب واکس در لوله‌هایی با قطر بزرگ‌تر، بیشتر است.

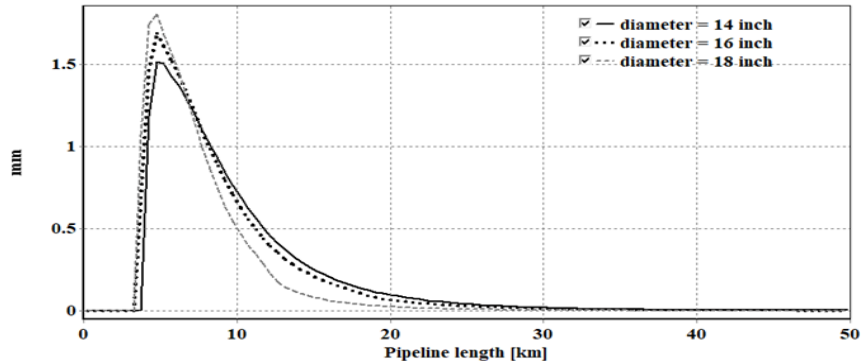
OLGPF



شکل ۱۳.۴. تأثیر قطر لوله بر حجم رسوب واکس با گذشت زمان

شکل ۱۳.۴ نشان می‌دهد که افزایش قطر باعث افزایش ضخامت لایه واکس می‌گردد و روند رسوب، بیشتر در قسمت ابتدایی خط لوله رخ می‌دهد. این در شرایطی است که وقتی دمای سیال به WAT می‌رسد، بیشتر مقدار واکس موجود در نفت بلافاصله از ترکیب آن خارج می‌شود.

OLGPF

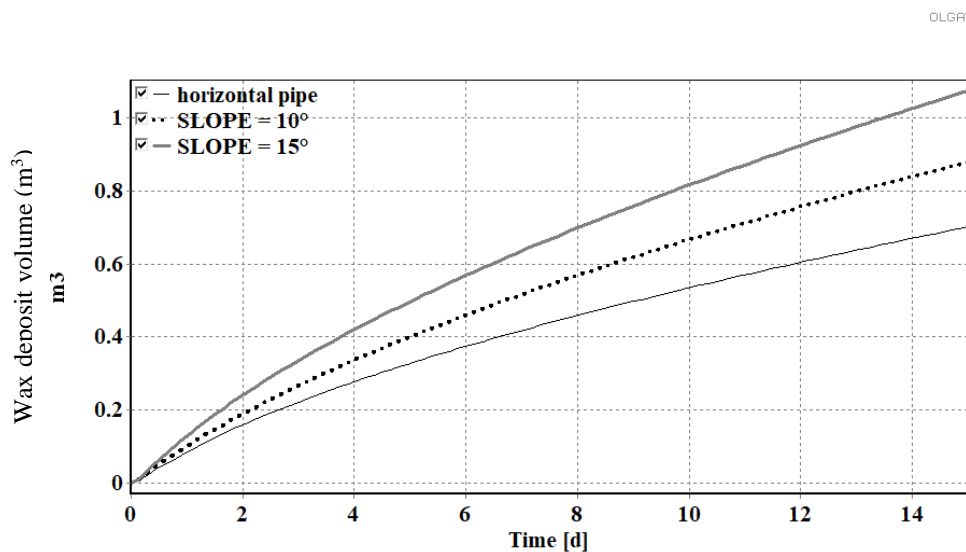


شکل ۱۳.۴. تأثیر قطر لوله در پروفایل ضخامت رسوب واکس

لازم به ذکر است که افزایش قطر لوله ضخامت رسوب واکس را افزایش می‌دهد و ظرفیت انتقال نفت در لوله‌هایی با قطر بزرگ‌تر، بیشتر است زیرا افزایش ضخامت رسوب در برابر افزایش قطر لوله ناچیز است.

۵.۴.۴. تأثیر شیب خط لوله در رسوب واکس

برای مطالعه تأثیر شیب خط لوله بر روی رسوب واکس، در حالت اصلی تغییراتی ایجاد شد، بنابراین می‌توان شبیه سازی را بر روی آن انجام داد. دبی 10000 stb / day و خط لوله به صورت افقی در نظر گرفته شده است. پس از آن، شبیه سازی برای زاویه‌هایی با شیب 0° ، 10° و 15° انجام شد، نتایج در شکل ۱۴.۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شیب لوله از 0° تا 15° ، میزان واکس رسوب شده افزایش می‌یابد و این معقول است، زیرا، افزایش فشار در شرایط دو فاز باعث کاهش WAT می‌شود و کاهش WAT باعث می‌شود که روند رسوب دیرتر شروع شود، بنابراین در مدت زمان مشابه، مقدار رسوب در لوله با شیب بالاتر، بیشتر خواهد بود.

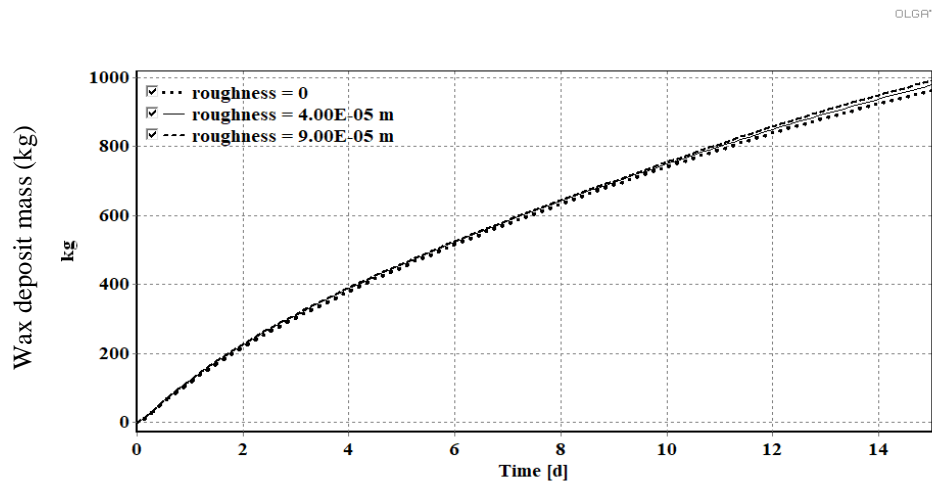


شکل ۱۴.۴. تأثیر شیب خط لوله بر حجم رسوب واکس با گذشت زمان

۶.۴.۴. تأثیر زبری در رسوب واکس

به منظور بررسی تأثیر زبری لوله بر رسوب واکس، سه لوله با زبری متفاوت در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده در شکل ۱۵.۴ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل زیر تغییرات زبری تأثیر کمی در فرایند رسوب واکس دارد، با این حال در لوله‌های با سختی بالاتر، مقدار واکس رسوب شده نسبت به لوله‌های با زبری کمتر، بیشتر خواهد بود.

روی سطوح زیر به دلیل افزایش تماس سیالات، پتانسیل چسبندگی کریستال‌های واکس به سطح فلزی لوله بیشتر است. علاوه بر این، سطوح ناهموار اصطکاک بالایی دارند که باعث می‌شود از پوسته پوسته شدن رسوب به خاطر سرعت برشی یا جریان جلوگیری شود.



شکل ۱۵.۴. تأثیر زبری سطح لوله بر جرم رسوب واکس



فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱.۵. مقدمه

در این بخش به بررسی مهم‌ترین نتایج حاصل از شبیه‌سازی رسوب واکس در خط لوله می‌پردازیم. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رسوب واکس در خط لوله شامل دما، فشار و ترکیب سیال می‌باشد. انتقال حرارت سیال با محیط اطراف لوله نقشی اساسی را در تغییرات دمایی سیال و تشکیل رسوب واکس ایفا می‌کند. در بین این عوامل فشار دارای کمترین تأثیر می‌باشد. در این بررسی بازه دمایی خط لوله از ۳۰ درجه فارنهایت تا ۱۵۰ درجه فارنهایت و بازه فشاری از ۳۰۰۰ psia تا ۱۴/۷ psia بود.

۲.۵. نتیجه‌گیری

✓ با افزایش فشار از ۱۴/۷ psia به ۲۵۰۰ psia دمای ظهور واکس ۷ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد که علت آن تراکم حجم سیال و تأثیر آن بر نقطه ذوب واکس در اثر افزایش فشار می‌باشد.

✓ شبیه‌سازی برای دبی‌های مختلف انجام شد و نتایج نشان می‌دهد که در نرخ‌های کم‌تر از ۲۵۰۰۰ stb/day که رژیم جریان به صورت آرام است، افزایش دبی افزایش ضخامت رسوب را به دنبال دارد، زیرا در جریان آرام، نفوذ مولکولی رسوب واکس را کنترل می‌کند اما در دبی‌های بالاتر از ۲۵۰۰۰ stb/day که رژیم جریان آشفته وجود دارد، افزایش بیشتر سرعت باعث غلبه مکانیسم کاهش رسوب واکس بر اثر نیروی برشی می‌شود و در نتیجه، ضخامت رسوب واکس کاهش می‌یابد.

- ✓ با افزایش ضخامت واکس در داخل خط لوله، به دلیل اثر عایق بندی لایه واکس بر روی دیواره ضریب کلی انتقال حرارت پس از ۵۰ روز تا $0.6 \text{ Btu/ft}^2\text{-h-}^\circ\text{F}$ کاهش می‌یابد و دمای دیواره داخلی خط لوله تا ۵ درجه فارنهایت در بیشینه خود افزایش می‌یابد.
- ✓ با کاهش دمای سیال ورودی از 80°C به 50°C ، تغییری در میزان بیشینه رسوب رویت نشد ولی مکان تشکیل بیشینه رسوب ۲ km کمتر شد. تغییر دمای محیطی تاثیر مشابهی داشت. با کاهش دمای محیط از 6°C به 2°C ، در روز دوازدهم، ضخامت رسوب 0.8 mm افزایش یافت.
- ✓ با افزایش قطر لوله از ۱۴ inch به ۱۸ inch سرعت جریان 0.2 m/s کاهش می‌یابد افزایش قطر با کاهش گرادیان سرعت در نزدیکی سطح رسوب همراه است که باعث کاهش تنش برشی و تأثیر مکانیزم کاهش رسوب در اثر نیروی برشی در سطح رسوب می‌شود. بنابراین میزان رسوب واکس در لوله‌هایی با قطر بزرگ‌تر، بیشتر است.
- ✓ تأثیر شیب خط لوله با بررسی و مقایسه میزان رسوب واکس در دو هندسه، یکی بدون شیب و دیگری شیب دار بررسی گردید. با افزایش شیب خط لوله از 0° به 15° در روز دوازدهم شبیه‌سازی شاهد افزایش 0.3 mm ضخامت رسوب واکس هستیم که علت آن تاثیر ماندگی سیال با افزایش شیب خط لوله می‌باشد.
- ✓ تغییرات زبری تأثیر کمی در فرایند رسوب واکس دارد، با این حال در روز دوازدهم شبیه‌سازی در لوله‌های با سختی 0.0009 m ، مقدار واکس رسوب شده نسبت به لوله‌های با زبری 0.0004 m حدود 30 kg افزایش داشت.



۳.۵. پیشنهادهای پژوهش

- ✓ مدل سازی اثر بازدارنده‌ها و راه‌های ممانعت از تشکیل رسوب واکس
- ✓ بررسی اثر پارامترهای فیزیکی بر روی بهینه سازی عملیات پیگ‌رانی
- ✓ بررسی اثر فاز آب و گاز محلول بر تشکیل رسوب واکس



منابع و ماخذ

مراجع

۱. صفری زاده خ، تبریزی نع، سلحشور ک، موسوی س. شبیه‌سازی میزان رسوب آسفالتین در عملیات از میادین نفتی فلات قاره. .
2. Speight JG, Long RB, Trowbridge TD. Factors influencing the separation of asphaltenes from heavy petroleum feedstocks. *Fuel*. 1984;63(5): 616–20.
3. Ali LH, Al-Ghannam KA. Investigations into asphaltenes in heavy crude oils. I. Effect of temperature on precipitation by alkane solvents. *Fuel*. 1981;60(11): 1043–6.
4. Speight JG, Moschopedis SE. On the molecular nature of petroleum asphaltenes. at ACS Publications; 1981.
5. Vazquez D, Mansoori GA. Identification and measurement of petroleum precipitates. *J Pet Sci Eng*. 2000;26(1–4): 49–55.
6. Trbovich MG, King GE. Asphaltene deposit removal: Long-lasting treatment with a co-solvent. at: SPE international symposium on oilfield chemistry. Society of Petroleum Engineers; 1991.
7. Buenrostro-Gonzalez E, Lira-Galeana C, Gil-Villegas A, Wu J. Asphaltene precipitation in crude oils: Theory and experiments. *AIChE J*. 2004;50(10): 2552–70.
8. Won KW. Continuous thermodynamics for solid-liquid equilibria: Wax formation from heavy hydrocarbon mixtures. at: AIChE Spring National Meeting (March 1986). 1985.
۹. صفوی میر سعید. بررسی رسوب واکس در نفت خام. دهمین کنگره ملی مهندسی شیمی.
10. Sanjay M, Simanta B, Kulwant S. Paraffin problems in crude oil production and transportation: a review. *SPE Prod Facil*. 1995;10(01): 50–4.
11. Towler BF, Rebbapragada S. Mitigation of paraffin wax deposition in cretaceous crude oils of Wyoming. *J Pet Sci Eng*. 2004;45(1–2): 11–9.
12. Marino F. Biodegradation of paraffin wax. McGill University Libraries; 1998.
13. Edmonds B, Moorwood RAS, Szczepanski R. A unified framework for calculating solid deposition from petroleum fluids including waxes, asphaltenes, hydrates and scales. *Fluid Phase Equilib*. 1999;158: 481–9.
14. Lira-Galeana C, Firoozabadi A, Prausnitz JM. Thermodynamics of wax precipitation in petroleum mixtures. *AIChE J*. 1996;42(1): 239–48.
15. Ribeiro FS, Mendes PRS, Braga SL. Obstruction of pipelines due to paraffin deposition during the flow of crude oils. *Int J Heat Mass Transf*. 1997;40(18): 4319–28.
16. Schou Pedersen K, Skovborg P, Roenningsen HP. Wax precipitation from North Sea crude oils. 4. Thermodynamic modeling. *Energy & Fuels*. 1991;5(6): 924–32.
17. Pedersen KS. Prediction of cloud point temperatures and amount of wax precipitation. *SPE Prod Facil*. 1995;10(01): 46–9.
18. Baltzer Hansen A, Larsen E, Batsberg Pedersen W, Nielsen AB, Roenningsen HP. Wax precipitation from North Sea crude oils. 3. Precipitation and dissolution of wax studied by differential scanning calorimetry. *Energy & Fuels*. 1991;5(6): 914–23.
19. Singh P, Venkatesan R, Fogler HS, Nagarajan NR. Morphological evolution of thick wax deposits during aging. *AIChE J*. 2001;47(1): 6–18.

20. Paso KG, Fogler HS. Influence of n-paraffin composition on the aging of wax-oil gel deposits. *AIChE J.* 2003;49(12): 3241–52.
21. Venkatesan R. The deposition and rheology of organic gels. University of Michigan; 2004.
22. Singh P, Venkatesan R, Fogler HS, Nagarajan N. Formation and aging of incipient thin film wax-oil gels. *AIChE J.* 2000;46(5): 1059–74.
23. Lira-Galeana C, Hammami A. Wax precipitation from petroleum fluids: A review. at: *Developments in petroleum science.* Elsevier; 2000. ص 557–608.
24. Sarica C, Volk M. Paraffin Deposition Research and Model Development. DOE Research Report Literature, Final Technical Report; 2004.
25. Leiroz AT, Azevedo LFA. Studies on the mechanisms of wax deposition in pipelines. at: *Offshore Technology Conference.* Offshore Technology Conference; 2005.
26. Soedarmo AA, Daraboina N, Lee HS, Sarica C. Microscopic Study of Wax Precipitation□ Static Conditions. *Energy & Fuels.* 2016;30(2): 954–61.
27. Venkatesan R, Nagarajan NR, Paso K, Yi Y-B, Sastry AM, Fogler HS. The strength of paraffin gels formed under static and flow conditions. *Chem Eng Sci.* 2005;60(13): 3587–98.
28. Hirsch RL, Bezdek RM, Wendling RM. Peaking of world oil production: impacts, mitigation, & risk management. National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, Morgantown, WV ...; 2005.
29. Wu C-H, Creek JL, Wang K-S, Carlson RM, Cheung S, Shuler PJ, . Measurements of wax deposition in paraffin solutions, prepared for presentation at the 2002 Spring National Meeting. New Orleans, March.: 10–4.
30. Plomp M, Van Enckevort WJP, Van Hoof P, Van De Streek CJ. Morphology of and dislocation movement in n-C40H82 paraffin crystals grown from solution. *J Cryst Growth.* 2003;249(3–4): 600–13.
31. Randolph A. Theory of particulate processes: analysis and techniques of continuous crystallization. Elsevier; 2012.
32. Svendsen JA. Mathematical modeling of wax deposition in oil pipeline systems. *AIChE J.* 1993;39(8): 1377–88.
33. Masoudi S, Sefti MV, Jafari H, Modares H. The hardening process and morphology of a wax deposit in a pipe flow. *Pet Sci Technol.* 2010;28(15): 1598–610.
34. Turner WR. Normal alkanes. *Ind Eng Chem Prod Res Dev.* 1971;10(3): 238–60.
35. Buchler CC, Graves GD. The Petroleum Waxes1. *Ind Eng Chem.* 1927;19(6): 718–24.
36. Edwards RT. Crystal habit of paraffin wax. *Ind Eng Chem.* 1957;49(4): 750–7.
37. Letoffe JM, Claudy P, Kok M V, Garcin M, Volle JL. Crude oils: characterization of waxes precipitated on cooling by dsc and thermomicroscopy. *Fuel.* 1995;74(6): 810–7.
38. Holder GA, Winkler J. Wax crystallization from distillate fuels. *J Inst Pet.* 1965;51(499): 228–52.
39. Cazaux G, Barre L, Brucy F. Waxy crude cold start: Assessment through gel structural properties. at: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* Society of Petroleum Engineers; 1998.
40. Lu X, Langton M, Olofsson P, Redelius P. Wax morphology in bitumen. *J Mater Sci.* 2005;40(8): 1893–900.
41. Cheng C, Boger D V, Nguyen QD. Influence of thermal history on the waxy

- structure of statically cooled waxy crude oil. *SPE J.* 2000;5(02): 148–57.
42. Chichakli M, Jessen FW. Crystal morphology in hydrocarbon systems. *Ind Eng Chem.* 1967;59(5): 86–98.
 43. Srivastava SP, Handoo J, Agrawal KM, Joshi GC. Phase-transition studies in n-alkanes and petroleum-related waxes—A review. *J Phys Chem Solids.* 1993;54(6): 639–70.
 44. Imai T, Nakamura K, Shibata M. Relationship between the hardness of an oil–wax gel and the surface structure of the wax crystals. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp.* 2001;194(1–3): 233–7.
 45. Kane M, Djabourov M, Volle J-L, Lechaire J-P, Frebourg G. Morphology of paraffin crystals in waxy crude oils cooled in quiescent conditions and under flow. *Fuel.* 2003;82(2): 127–35.
 46. Hsu JJC, Santamaria MM, Brubaker JP. Wax deposition of waxy live crudes under turbulent flow conditions. at: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* Society of Petroleum Engineers; 1994.
 47. Fong N, Mehrotra AK. Deposition under turbulent flow of wax– solvent mixtures in a bench-scale flow-loop apparatus with heat transfer. *Energy & fuels.* 2007;21(3): 1263–76.
 48. Hamouda AA, Davidsen S. An approach for simulation of paraffin deposition in pipelines as a function of flow characteristics with a reference to Teesside oil pipeline. at: *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry.* Society of Petroleum Engineers; 1995.
 49. Hoteit H, Banki R, Firoozabadi A. Wax deposition and aging in flowlines from irreversible thermodynamics. *Energy & Fuels.* 2008;22(4): 2693–706.
 50. Banki R, Hoteit H, Firoozabadi A. Mathematical formulation and numerical modeling of wax deposition in pipelines from enthalpy–porosity approach and irreversible thermodynamics. *Int J Heat Mass Transf.* 2008;51(13–14): 3387–98.
 51. Merino-Garcia D, Margarone M, Corra S. Kinetics of waxy gel formation from batch experiments. *Energy & fuels.* 2007;21(3): 1287–95.
 52. Burger ED, Perkins TK, Striegler JH. Studies of wax deposition in the trans Alaska pipeline. *J Pet Technol.* 1981;33(06): 1–75.
 53. Nazar ARS, Dabir B, Islam MR. Experimental and mathematical modeling of wax deposition and propagation in pipes transporting crude oil. *Energy sources.* 2005;27(1–2): 185–207.
 54. Hernandez OC, Hensley H, Sarica C, Brill JP, Volk M, Delle-Case E. Improvements in single-phase paraffin deposition modeling. at: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* Society of Petroleum Engineers; 2003.
 55. Lee HS. Computational and Rheological Study of Wax Deposition and Gelation in Subsea Pipelines. 2008;
 56. Bidmus HO, Mehrotra AK. Heat-transfer analogy for wax deposition from paraffinic mixtures. *Ind Eng Chem Res.* 2004;43(3): 791–803.
 57. Parthasarathi P, Mehrotra AK. Solids deposition from multicomponent wax– solvent mixtures in a benchscale flow-loop apparatus with heat transfer. *Energy & fuels.* 2005;19(4): 1387–98.
 58. Banki R, Firoozabadi A. Modeling of wax deposition in pipelines from irreversible thermodynamics. at: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* Society of Petroleum Engineers; 2002.
 59. Hovden, L., Labes-Carrier, C., Rydahl, A., Ronningsen, H., and Xu, Z., 2003, "Pipeline wax deposition models and model for removal of wax by pigging: Comparison

between model predictions and operational experience," Abstracts of Papers of the American Chemical Society, AMER CHEMICAL SOC 1155 16TH ST, NW, WASHINGTON, DC 20036 USA, pp. U936-U936.

60. Rygg, O., Rydahl, A., and Ronningsen, H., 1998, "Wax deposition in offshore pipeline systems," BHR group conference series publication, mechanical engineering publications limited, pp. 193-206.

61. Hayduk, W., and Minhas, B., 1982, "Correlations for prediction of molecular diffusivities in liquids," The Canadian Journal of Chemical Engineering, 60(2), pp. 295-299.

62. Bendiksen, K. H., Maines, D., Moe, R., and Nuland, S., 1991, "The dynamic two-fluid model OLGA: Theory and application," SPE production engineering, 6(02), pp. 171-180.

63. Burger, E., Perkins, T., and Striegler, J., 1981, "Studies of wax deposition in the trans Alaska pipeline," Journal of Petroleum Technology, 33(06), pp. 1,075-071,086.

64. Rosvold, K., 2008, "Wax deposition models," M. Sc. Thesis, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

65. Matzain, A., Zhang, H., Volk, M., Redus, C., Brill, J., Apte, M., and Creek, J., 2000, "Multiphase flow wax deposition modelling," BHR Group Conference Series Publication, Bury St. Edmunds; Professional Engineering Publishing; 1998, pp. 415-444.

66. Gjermundsen, I., 2006, "State of the art: Wax precipitation deposition and aging in flowing hydrocarbon systems," Intern. Hydro report J, Porsgrunn, 9(03), pp.35-50.

67. Gooya, R., Gooya, M., and Dabir, B., 2013, "Effect of flow and physical parameters on the wax deposition of Middle East crude oil under subsea condition: heat transfer viewpoint," Heat and Mass Transfer Journal, 49(8), pp. 1205-1216.

پیوست‌ها

پیوست الف

فایل ورودی OLGA

یک نمونه فایل ورودی نرم‌افزار OLGA در زیر آورده شده است (دمای سیال ورودی ۷۰ درجه سانتیگراد، دمای آب دریا ۴ درجه سانتی گراد و سرعت جریان سیال [stb / day] (۳۰۰۰۰

```
!
!*****
****
****
! CASE
!*****
****
****
CASE AUTHOR="SPT Group", \
PROJECT="OLGA", \
TITLE="wax Case"
!
!*****
****
****
! OPTIONS
!*****
****
****
OPTIONS PHASE=THREE, TEMPERATURE=WALL, STEADYSTATE=ON,
WAXDEPOSITION=ON
!
!*****
****
****
! FILES
!*****
****
****
FILES PVTFILE="./Waxyoil.tab", WAXFILE="./ Waxyoil.wax"
!
!*****
****
****
! INTEGRATION
```

```

!*****
****
*****
INTEGRATION DTSTART=0.1E-01, ENDTIME=15 day, MAXDT=10 M,
MINDT=0.1E-01,
STARTTIME=0
!
!*****
****
*****
! MATERIAL
!*****
****
*****
MATERIAL LABEL=Carbon Steel, CAPACITY=0.5E+03, CONDUCTIVITY=45
W/m-K,
DENSITY=0.785E+04
!
!*****
****
*****
! WALL
!*****
****
*****
WALL LABEL=steel, THICKNESS=0.0039 m, MATERIAL=Steel
!
!*****
****
*****
! GEOMETRY
!*****
****
*****
GEOMETRY LABEL=GEOM-1, XSTART=0 M, YSTART=0 M, ZSTART=0 M
PIPE LABEL=oil flow line, ROUGHNESS= 4e-005 M, WALL=steel, XEND=6 M,
YEND=0
M, DIAMETER= 0.355601 M,\
NSEGMENT=500, LSEGMENT=(1, 1, 1, 1, 1, 1) M
!
!*****
****
*****
! NODE
!*****
****
*****
NODE LABEL=closed node, TYPE=Closed
NODE LABEL=oil outlet, TYPE=Pressure

```

```

!
!*****
****
*****
! BRANCH
!*****
****
*****
BRANCH LABEL=Oil flow line, FROM=CLOSED NODE, TO=OIL OUTLET,
GEOMETRY=GEOM-1, FLUID="Gooya"
!
!*****
****
*****
! BOUNDARY
!*****
****
*****
BOUNDARY NODE=INLET_OIL, TYPE=CLOSED
BOUNDARY NODE=OUTLET_OIL, TYPE=PRESSURE, TIME=0.,
TEMPERATURE=70
C, PRESSURE=20 bara
!
!*****
****
*****
! HEATTRANSFER
!*****
****
*****
HEATTRANSFER BRANCH=Oil flow line, PIPE=PIPE-1, PIPE-2, PIPE-3, PIPE-4
H AMBIENT=6.5 W/M2-C,
T AMBIENT=4 C
!
!*****
****
*****
! WAXDEPOSITION
!*****
****
*****
WAXDEPOSITION BRANCH=Oil flow line, WAXTABLE=" gooyaEOSSRK"
!
!*****
****
*****
! CONTROLLER
!*****
****
*****

```



```

!
!*****
****
*****
! SOURCE
!*****
****
*****
SOURCE LABEL=Oil source, TIME=0 S, TEMPERATURE=70 C, BRANCH=Oil
flow line,
PIPE=PIPE-oil,\SECTION=1, STDFLOWRATE=30000[stb/day], PHASE=OIL!
!*****
****
*****
! OUTPUT
!*****
****
*****
OUTPUT DTOUT=1 M
!
!*****
****
*****
! TREND
!*****
****
*****
TREND DTPLLOT=1 M
TREND VARIABLE=WAXVOLBR
TREND BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE= WAXMASBR
TREND BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=DXWX, PIPE=PIPE-1, SECTION=9
!
!*****
****
*****
! PROFILE
!*****
****
*****
PROFILE DTPLLOT=1 M
PROFILE VARIABLE= DXWX, PT, Q2, TM, TU, TWS, TWSWX, VISHL,
VISHLTAB, WAXAP, WXAVIDC, WXCDIFFC, WXDR
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=TM
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=DXWX
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=WAXAP
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=TWS
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=TU
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=PT
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=Q2

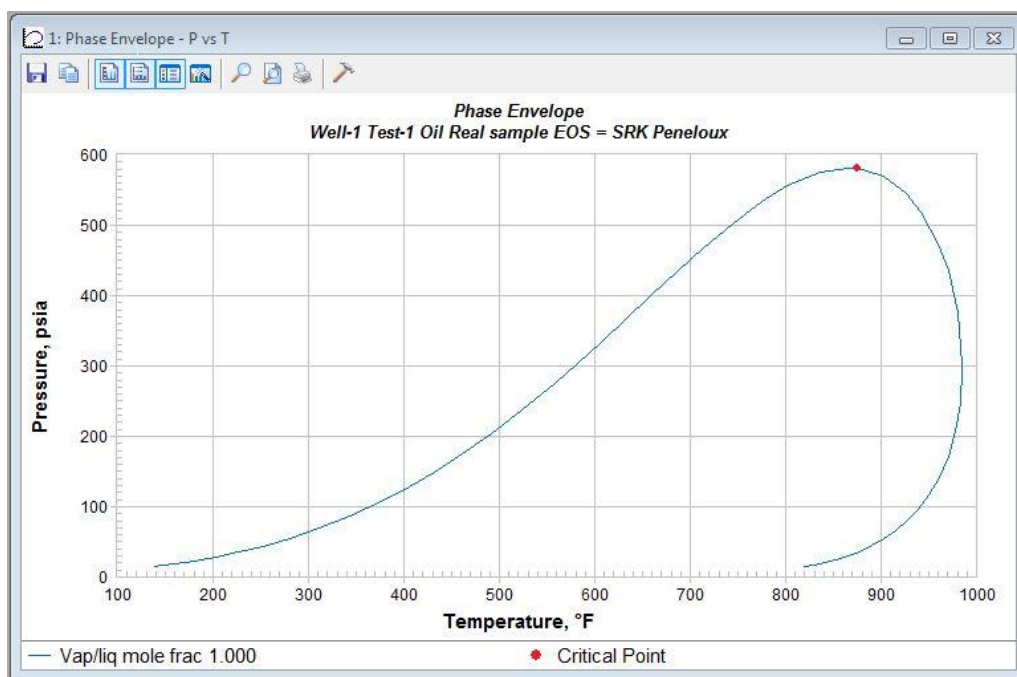
```

PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=TWSWX
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=VISHL
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=VISHLAB
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=WXAADC
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=WXCDFFC
PROFILE BRANCH=Oil Flow Line, VARIABLE=WADR

ENDCASE

پیوست ب

نمودارها و نتایج شبیه ساز pvtsim:
نمودار فازی سیال قبل از منطبق سازی (tunning):

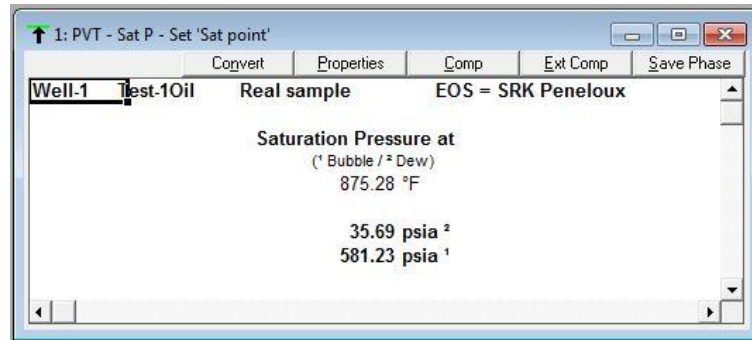


پارامترهای دما و فشار بحرانی:

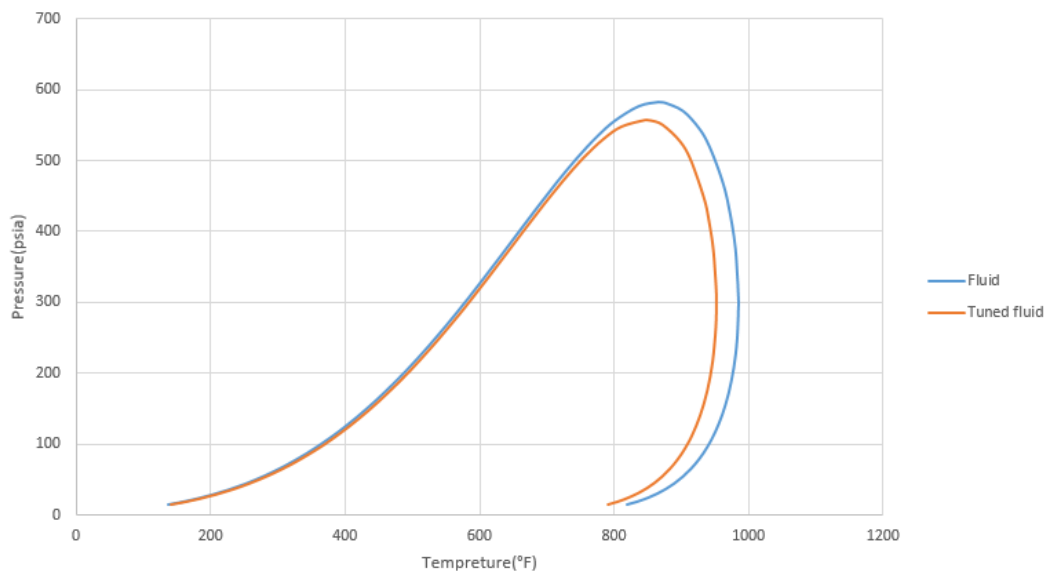
	Temperature, °F	Pressure, psia	Convert
	202.75	28.54	
	180.64	23.09	
	160.10	18.76	
	147.20	16.37	
	137.30	14.70	
Crit Point	875.28	581.23	

فشار حباب و شبنم سیال شبیه سازی شده به کمک ماژول Saturation point نرم افزار:

Pvtsim



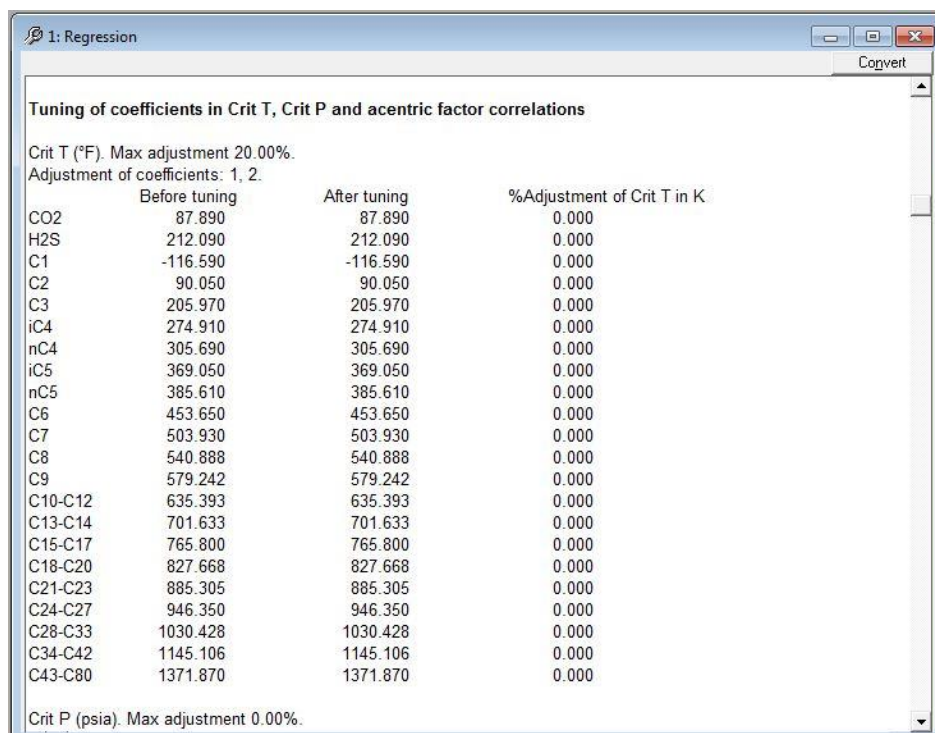
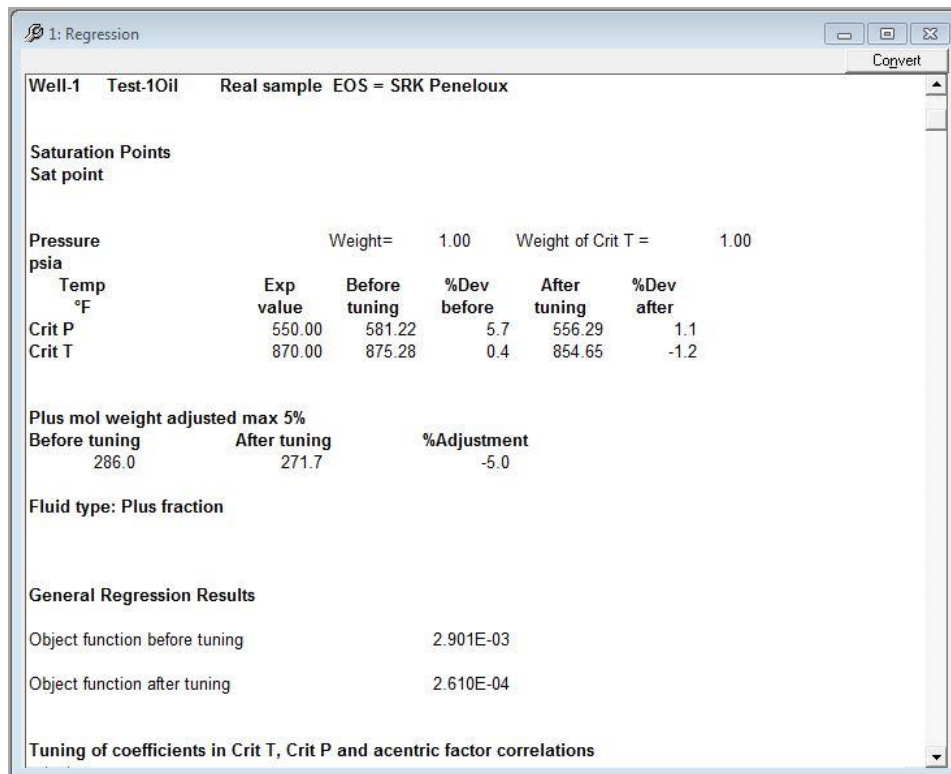
نمودار فازی سیال قبل و بعد از منطبق سازی (tunning) با استفاده از فشار حباب:



پارامترهای دما و فشار بحرانی:

1: Phase Envelope - P vs T		
	379.69	106.58
	354.82	90.87
	320.17	71.71
	288.42	56.79
	259.28	45.16
	232.47	36.06
	207.75	28.92
	184.90	23.30
	163.72	18.85
	150.44	16.40
	140.27	14.70
Crit Point	854.65	556.29

مقایسه پارامترهای مختلف قبل و بعد از منطبق‌سازی سیال:



1: Regression

Convert

Crit P (psia). Max adjustment 0.00%.
Coefficients not adjusted

	Before tuning	After tuning	%Adjustment
CO2	1069.87	1069.87	0.000
H2S	1296.19	1296.19	0.000
C1	667.20	667.20	0.000
C2	708.35	708.35	0.000
C3	615.76	615.76	0.000
iC4	529.06	529.06	0.000
nC4	551.10	551.10	0.000
iC5	490.85	490.85	0.000
nC5	489.38	489.38	0.000
C6	430.59	430.59	0.000
C7	463.46	463.46	0.000
C8	431.56	431.56	0.000
C9	386.82	386.82	0.000
C10-C12	315.09	315.09	0.000
C13-C14	255.87	255.87	0.000
C15-C17	218.88	218.88	0.000
C18-C20	193.93	193.93	0.000
C21-C23	177.32	177.32	0.000
C24-C27	164.31	164.31	0.000
C28-C33	151.36	151.36	0.000
C34-C42	139.52	139.52	0.000
C43-C80	126.88	126.88	0.000

Acentric factor. Max adjustment 0.00%.
Coefficients not adjusted

	Before tuning	After tuning	%Adjustment
CO2	0.2250	0.2250	0.000

1: Regression

Convert

Acentric factor. Max adjustment 0.00%.
Coefficients not adjusted

	Before tuning	After tuning	%Adjustment
CO2	0.2250	0.2250	0.000
H2S	0.1000	0.1000	0.000
C1	0.0080	0.0080	0.000
C2	0.0980	0.0980	0.000
C3	0.1520	0.1520	0.000
iC4	0.1760	0.1760	0.000
nC4	0.1930	0.1930	0.000
iC5	0.2270	0.2270	0.000
nC5	0.2510	0.2510	0.000
C6	0.2960	0.2960	0.000
C7	0.4679	0.4679	0.000
C8	0.4999	0.4999	0.000
C9	0.5399	0.5399	0.000
C10-C12	0.6128	0.6128	0.000
C13-C14	0.7069	0.7069	0.000
C15-C17	0.8053	0.8053	0.000
C18-C20	0.9029	0.9029	0.000
C21-C23	0.9936	0.9936	0.000
C24-C27	1.0857	1.0857	0.000
C28-C33	1.1995	1.1995	0.000
C34-C42	1.3141	1.3141	0.000
C43-C80	1.2930	1.2930	0.000

Peneloux correction factor
Not adjusted

	Before tuning	After tuning	%Adjustment
	1.000	1.000	0.000

1: Regression

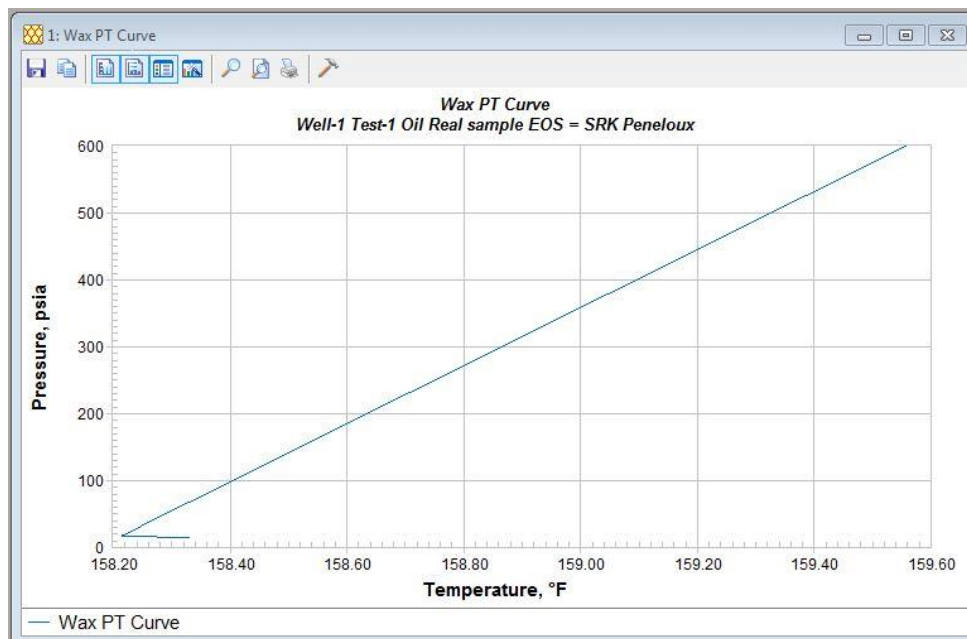
Peneloux correction factor
Not adjusted

Before tuning	After tuning	%Adjustment
1.000	1.000	0.000

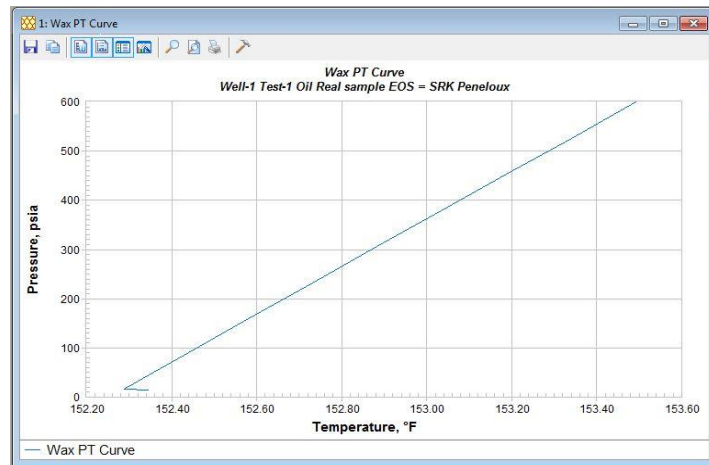
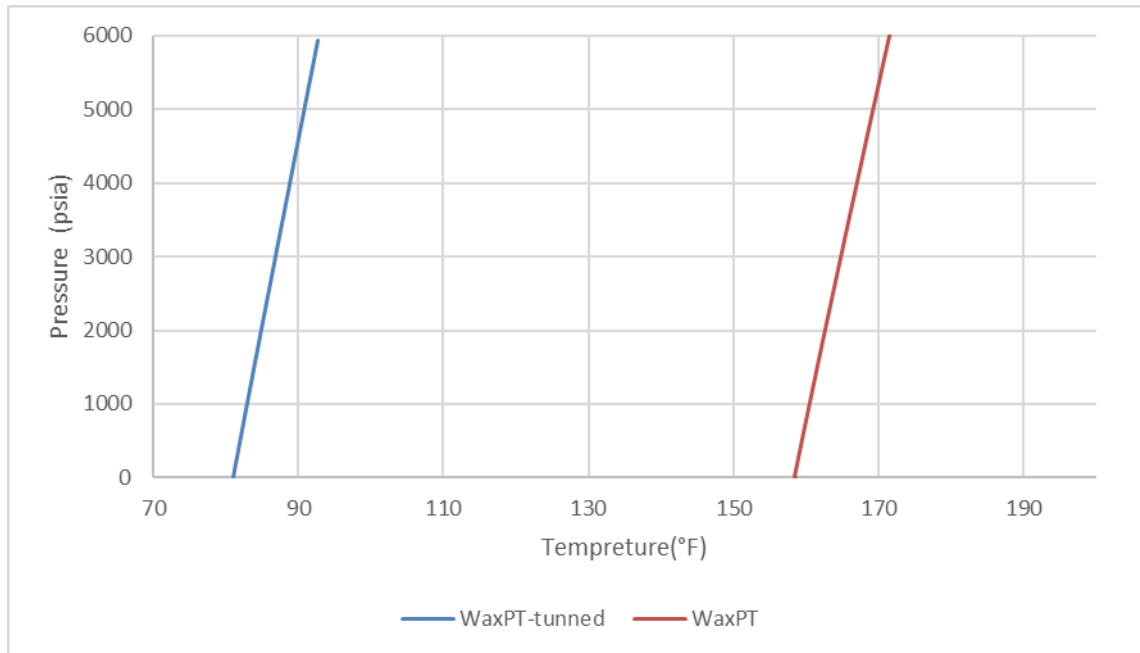
C_{pen} (ft³/lb-mol). Not including Peneloux correction factor.
Adjusted according to plus mol weight adjustment.

	Before tuning	After tuning	%Adjustment
CO2	0.049	0.049	0.000
H2S	0.029	0.029	0.000
C1	0.010	0.010	0.000
C2	0.042	0.042	0.000
C3	0.081	0.081	0.000
iC4	0.117	0.117	0.000
nC4	0.126	0.126	0.000
iC5	0.175	0.175	0.000
nC5	0.195	0.195	0.000
C6	0.288	0.288	0.000
C7	0.155	0.155	0.000
C8	0.223	0.223	0.000
C9	0.336	0.336	0.000
C10-C12	0.593	0.592	-0.237
C13-C14	0.947	0.896	-5.443
C15-C17	1.193	1.125	-5.695
C18-C20	1.298	1.268	-2.339
C21-C23	1.323	1.318	-0.351
C24-C27	1.226	1.288	5.047
C28-C33	0.956	1.114	16.519
C34-C42	0.428	0.662	54.787
C43-C80	-0.949	-0.595	-37.324

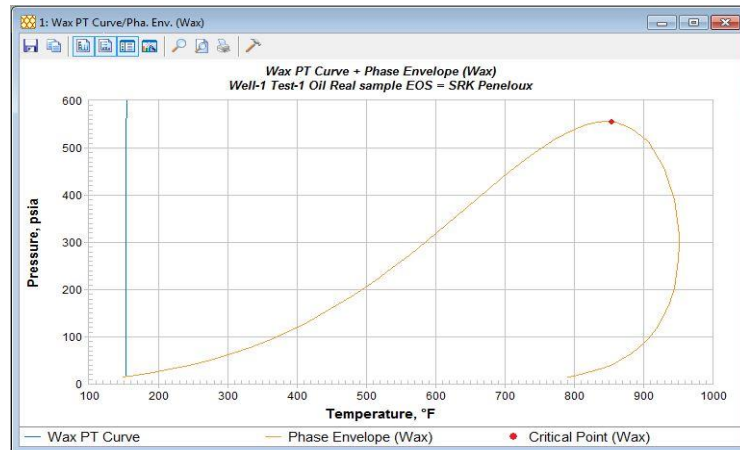
نمودار فشار دمای واكس قبل از منطبق سازی با داده‌های واقعی:



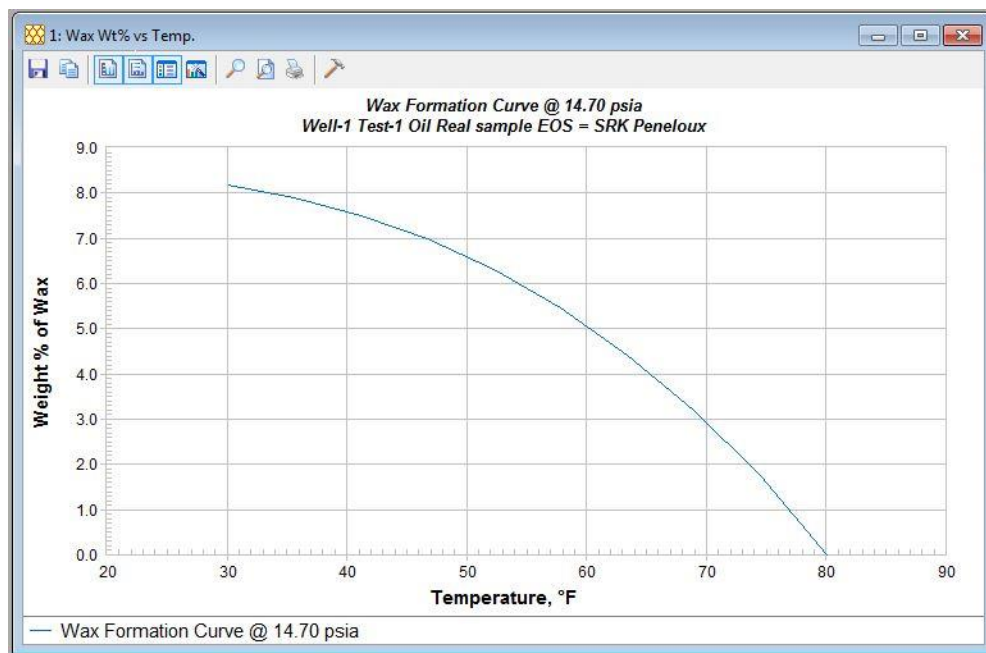
مقایسه نمودار فازی فشار دمای واکس قبل و بعد از منطبق سازی:



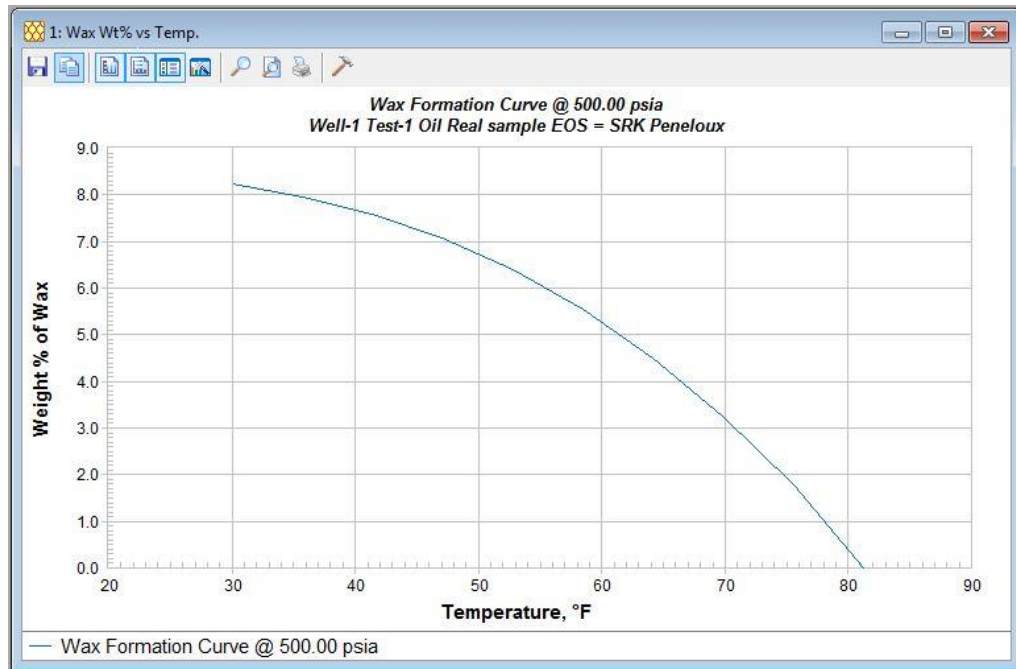
نمودار دو فازی سیال منطبق سازی شده با داده های واقعی واکس، در حضور واکس:



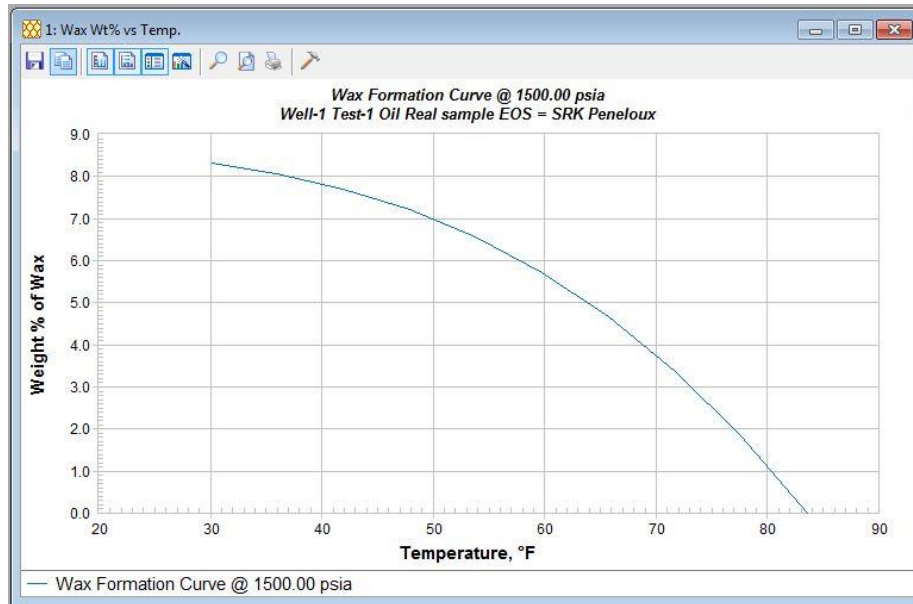
اثر تغییرات دما بر روی تشکیل واکس در فشار 14.7 psia :



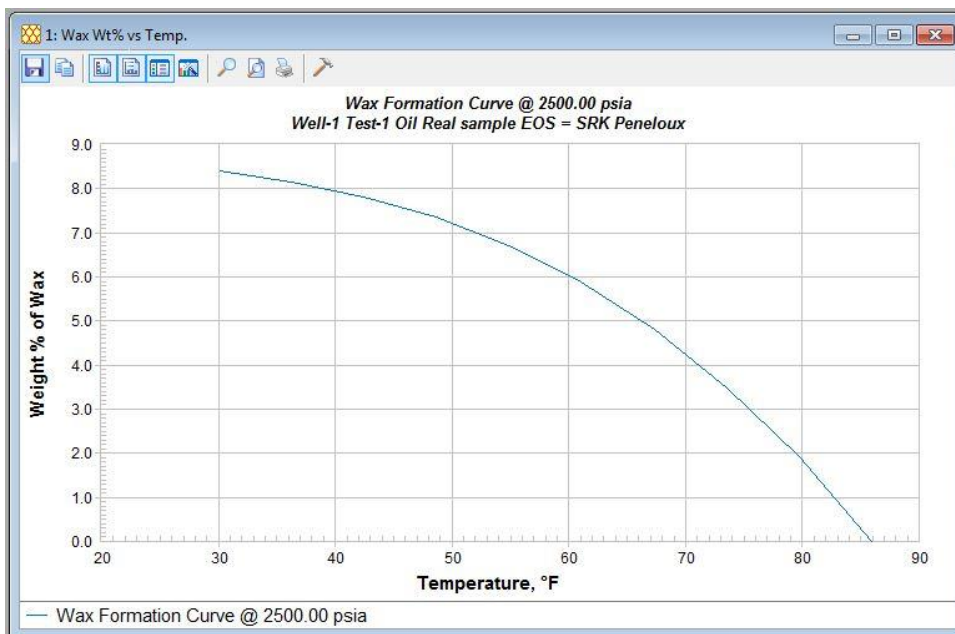
اثر تغییرات دما بر روی تشکیل واکس در فشار 500 psia:



اثر تغییرات دما بر روی تشکیل واکس در فشار: 1500 psia



اثر تغییرات دما بر روی تشکیل واکس در فشار: 2500 psia



تست‌های PTflash و Extended PTflash:

1: Wax PT Flash

Convert Properties Comp Ext Comp Save Phase

Composition in mole% at

14.70 psia
60.00 °F

	Total	Liquid	Wax
CO2	0.030	0.031	0.000
H2S	0.130	0.133	0.000
C1	0.020	0.020	0.000
C2	0.341	0.348	0.000
C3	1.624	1.660	0.000
iC4	0.812	0.830	0.000
nC4	3.289	3.361	0.000
iC5	2.196	2.244	0.000
nC5	4.111	4.202	0.000
C6	7.210	7.368	0.000
C7	6.287	6.425	0.000
C8	5.796	5.923	0.000
C9	5.345	5.462	0.000
C10+	62.809	61.991	100.000
C10+ Molwt	286.3	273.5	648.6

1: Wax PT Flash

Convert Properties Comp Ext Comp Save Phase

Volume, Enthalpy, Cp and Cv are per mole phase

Composition in mole% at

14.70 psia
60.00 °F

	Total	Liquid	Wax
CO2	0.030	0.031	0.000
H2S	0.130	0.133	0.000
C1	0.020	0.020	0.000
C2	0.341	0.348	0.000
C3	1.624	1.660	0.000
iC4	0.812	0.830	0.000
nC4	3.289	3.361	0.000
iC5	2.196	2.244	0.000
nC5	4.111	4.202	0.000
C6	7.210	7.368	0.000
C7	6.287	6.425	0.000
C8	5.796	5.923	0.000
C9	5.345	5.462	0.000
C10-C12	14.548	14.868	0.000
C13-C15	11.185	11.431	0.000
C16-C18	8.599	8.788	0.000
C19-C21	6.612	6.757	0.000
C22-C25	6.502	6.645	0.000
C26-C30	5.495	5.615	0.000
C31-C36	4.086	3.827	15.902
C37-C45	3.223	2.535	34.498
C46-C80	2.560	1.526	0.000

Abstract

One of the major problems in the exploration, production and transmission of crude oil in pipe lines is the heavy organic depositions such as wax (paraffin) and asphaltene. The cause of these depositions is the disruption of the thermodynamic equilibrium of these compounds due to factors such as temperature, pressure, and change in crude oil composition, resulting in the formation of depositions in the pipeline. Therefore, simulation of precipitation and deposition processes and investigation of effective factors can prevent the future problems and lead to more accurate design of transmission systems. In the present study, using a PVTsim thermodynamic simulator, the wax precipitation is simulated. Then, the output of PVTsim is being used as the input for OLGA software to simulate the precipitation and deposition of wax and the factors affecting it in a pipeline. The simulated pipeline is an offshore pipeline that examines the conditions of deposition formation in this pipeline and parameters affecting it, such as pipe diameter, roughness, pipeline geometry, flow rate and insulation. The results showed that these parameters can be effective on the formation of wax deposition by affecting the temperature, pressure, and fluid composition. Simulation of the change in the thickness of the wax layer after 50 days shows that at a distance of 4.562 km, the increase in the thickness of the wax deposit reaches more than 2 mm and causes a pressure drop of 70 psia, which appropriate strategies should be taken to eliminate it. According to the simulation results in the flow rate more than 40,000 stb/day, no wax deposition can be seen. Changing the ambient temperature from 4 °C to 6 °C after 12 days increases the thickness by 0.3 mm, which is a significant amount. Examination of the 14, 16 and 18 inch diameters of the pipeline showed that a change in the diameter of the pipeline had no effect on the location of sediment formation.

Keywords: WAX DEPOSITION, OLGA, PVTsim, SIMULATION, PIPELINE



**Simulation of wax deposition in pipelines and
investigation of effect of different parameters**

**Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the
Requirements for the Degree of Master of Science
(M.Sc.) in Petroleum Engineering**

**Department of Engineering
Faculty of Petroleum Engineering
Sahand University of Technology**

By:

Milad Rahnema

Supervisors:

Dr. Seyyed Alireza Tabatabaei-Nezhad

Dr. Elnaz Khodapanah

2020

۱۱۱