شبیه‌سازی خط لوله انتقال نفت‌خام با استفاده از نرم‌افزار OLGA

ترانه جعفری بهبهانی*

عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکدهٔ توسعهٔ فناوری‌های پالایش و فراورش نفت، تهران، استان تهران، ایران

دریافت: 94/5/13 پذیرش: 96/1/26

چکیده

رفتار نفت‌خام در سیستم خطوط لوله انتقال از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است. رفتار هیدرولیکی غیرنیوتنی آن باعث پیچیده شدن معادلات و در مورد نفت‌خام پارافینی که معمولاً توأم با رسوب گذاری واکسی در طول خط لوله می‌باشد باعث عدم کارآئی معادلات مرسوم تقریبی در منابع علمی می‌شود. نرم‌افزار OLGA 2000 به‌عنوان یک نرم‌افزار تخصصی سیستم‌های انتقال سیالات بر پایه داده‌های یک واحد صنعتی توسعه یافته است. در این مقاله خط لوله انتقال نفت‌خام واکسی شبیه‌سازی شده و پروفایل‌های خط لوله به‌دست آمده‌است. این پروفایل‌ها شامل ضخامت لایه واکس در دیواره خط لوله، دمای ظهور واکس، جرم ویژه واکس در دیواره و پروفایل دما و فشار است. همچنین تغییرات ضریب انتقال حرارت را در طول لوله و در زمان‌های مختلف در این کار پژوهشی به‌دست‌امده است.

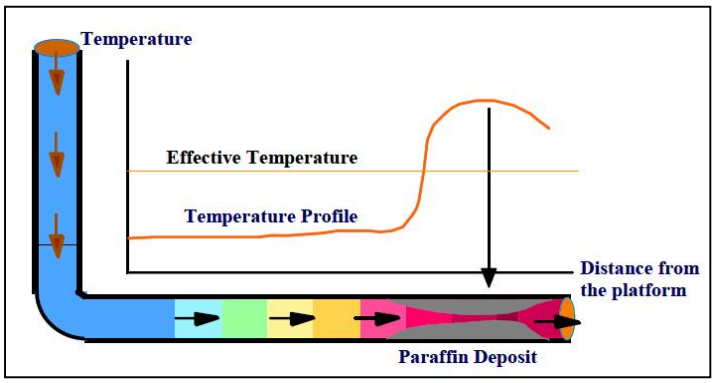
کلمات کلیدی: خط لوله، نرم‌افزار،OLGA، نفت‌خام واکسی

مقدمه

انتقال نفت‌خام واکسی از دیرباز با مشکلاتی مواجه بوده است. تولیدکنندگان نفت از دشواری‌های انتقال نفت‌خام واکسی از طریق خطوط لوله آگاه هستند. در گذشته تلاش می‌شد با گرم کردن نفت‌خام و/یا خط لوله، واکس در نفت محلول باقی بماند و یا با خالی کردن و تمیز کردن مکرر لوله‌ها از ایجاد مشکلات واکسی ممانعت به عمل آید. مشکلات رسوب واکس در شرایط دریایی غالبا شدت بیش‌تری دارد و روش‌های متفاوت و ویژه‌ای نیاز دارد که در حقیقت کمینه کردن ریسک و مخاطرات و چاره‌اندیشی برای ایمنی بیش‌تر در برابر دو مشکل بزرگ تشکیل هیدرات و رسوب واکس است. جریان پیوسته خطوط لوله یک پارامتر اقتصادی مهم

jafarit@ripi.ir

است. این پیوستگی در مواردی از بین می‌رود و منجر به خسارات فراوانی می‌شود. تشکیل واکس یکی از این موارد است.

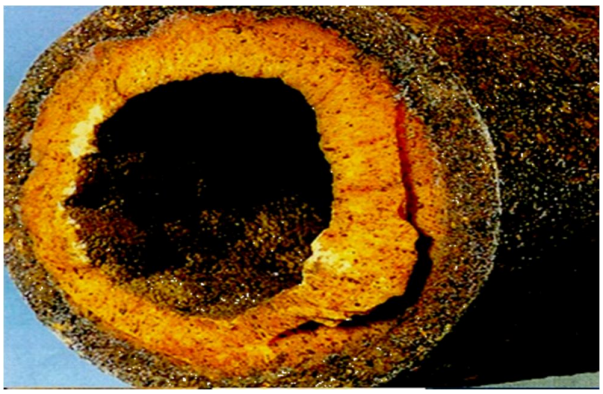


شکل 1. پروفیل دمایی در اثر رسوب واکس در خط لوله[1]

همان‌طور که درشکل (1) مشاهده می‌شود با کاهش دما در امتداد خط لوله ابتدا با دمای پیدایش واکس مواجه می‌شویم. با کاهش دما فاز جامد واکس در خط لوله تشکیل می‌شود. با رسیدن به دمای نقطه ریزش در حالت سکون فاز جامد واکس، تشکیل ژل می‌دهد و شروع مجدد به فشار پمپاژ زیادی نیاز دارد. پیامدهای رسوب واکس در خط لوله را در موارد زیر بر شمرد [1]:

- ✓ زیان‌های وارد بر عملیات انتقال
- ✓ پایین آمدن تولید نفت
- ✓ کاهش فرآورش لوله
- ✓ بسته شدن لوله
- ✓ کاهش عمر مخزن
- ✓ قطع جریان مکرر
- ✓ هزینه بالای عملیات ترمیم لوله

در شکل (2) شمایی از رسوب واکس در خط لوله را برای درک بیش‌تر کاهش قطر لوله و میزان اهمیت این موضوع و نشان داده شده است.



شکل 2. نمونه ای از رسوب واکس در خط لوله [2]

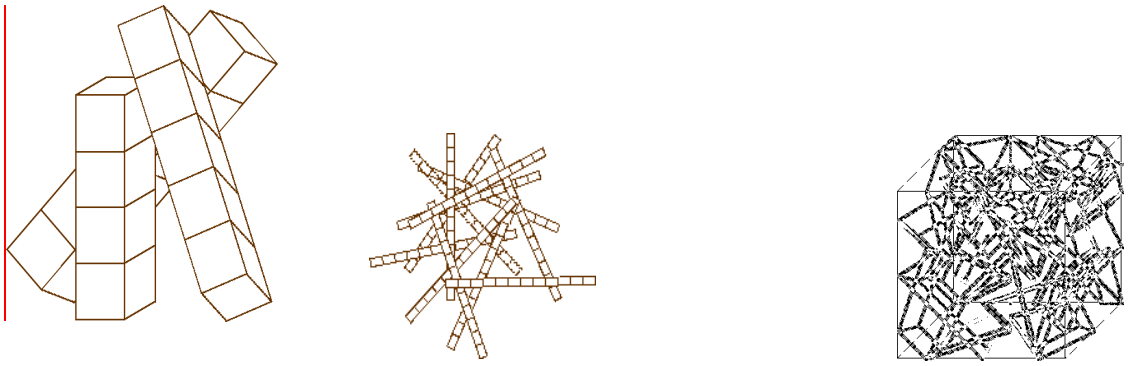
نفت‌خام دارای مقادیر قابل ملاحظه‌ای از واکس، شامل:

1- انواع هیدروکربن‌های سبک و متوسط (پارافین‌ها، آروماتیک‌ها، نفتنیک‌ها و غیره...) می‌باشد.

2- واکس‌ها

3- انواع کمپلکس‌های اورگانیکی سنگین، حتی با غلظت کم مانند رزین‌ها، آسفالتین‌ها و دایموندیودها، مرکاپتان‌ها، اورگانو متالیک‌ها و غیره ... می‌باشد[1].

وقتی دمای یک نفت‌خام واکسی پائین می‌رود، ابتدا برش‌های سنگین‌تر واکس شروع به کریستالیزه شدن می کنند. واکس موجود در نفت‌خام شامل، هیدروکربن‌های نرمال پارافین زنجیره‌ای، از کربن شماره C18 الی C36 (نقطه جوش 316 تا 498 درجه سانتیگراد) به‌عنوان واکس‌های از نوع پارافینی و هیدروکربن‌های نفتنیکی از کربن شماره C30 الی C60 (نقطه جوش 450 الی 620 درجه سانتیگراد) به‌عنوان واکس‌های نفتنیکی و حلقوی اشباع شده شناخته شده‌اند. واکس‌های پارافینی دارای نقطه نرمی پائین‌تر و حدوداً 40 و نوع نفتنیکی سخت‌تر و با نقطه نرمی حدود 73 درجه سانتیگراد می‌باشد. این واکس‌ها بنا به شرایط دما و فشار محیط به حالت‌های گاز، مایع و جامد ظاهر می‌شوند. وقتی واکس یخ می‌زند، به شکل کریستال در می‌آید. این کریستال‌ها را ماکرو کریستالین واکس می‌نامند، و آنهائی که از نوع هیدروکربن‌های نفتنیکی هستند، واکس‌های میکرو کریستالین می‌نامند [2]. در شکل 3، اشکال مختلف واکس‌های ماکرو کریستالین، میکرو کریستالین و شبکه کریستالی رسوب واکس و همچنین در صفحه بعد، نحوه فرم گرفتن و تجمع و به‌هم چسبندگی آنها تا تشکیل توده در اثر کاهش دما نشان داده شده است [3].



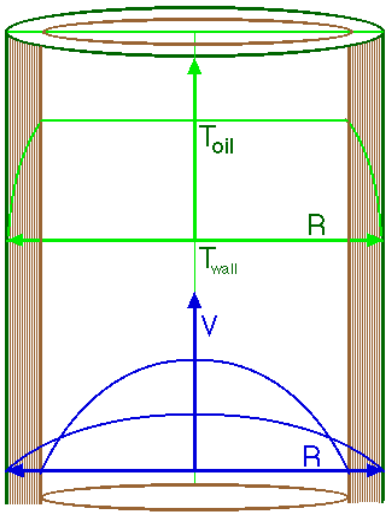
Macrocrystalline Microcrystalline Crystal Deposite Network of Wax

شکل 3. اشکال مختلف واکس‌های ماکرو کریستالین، میکرو کریستالین و شبکه کریستالی رسوب واکس

نفت‌خامی که دارای واکس و دیگر هیدروکربن‌ها بدون آب و رسوبات و نمک است، وقتی در یک خط لوله سرد به دمایی پایین تر از نقطه ابری شدن آن جریان می یابد و دمای بدنه لوله زیر نقطه تشکیل کریستال‌های جامد واکس قرار می گیرد، کریستال‌های فرم گرفته واکس از داخل روی بدنه لوله تشکیل می‌گردد. این کریستال‌ها شروع به رشد و تجمع نموده و نفت لابه‌لای این شبکه‌های واکسی گیر کرده و به سختی عبور می‌نماید. در نتیجه از طرف دیواره به طرف مرکز سطح مقطع لوله، یک لایه ضخیم تشکیل

می‌شود. افت فشار جریان در سراسر خط فزونی یافته، که برای ثابت نگه‌داشتن شدت جریان یکنواخت، فشار خط می‌بایست زیاد شود. در نتیجه، توان (قدرت پمپاژ) مورد نیاز برای انتقال نفت‌خام، باید زیاد گردد [4-5].

لذا، مشکل گرفتگی و بسته شدن کامل شریان نفت واکسی را می‌توان با کنترل دما و حرارت موثر بر خط و در دمای بالای نقطه ریزش آن برطرف نمود. استفاده از این روش در همه جا و مسیرها، به‌خاطر وجود پستی و بلندی‌های فراوان و شرایط خاص مسیر و عملیاتی مقرون به صرفه و امکان‌پذیر نیست. تنها راه باقی‌مانده استفاده از مواد بهبوددهنده کیفیت خواص و کاهش‌دهنده نقطه ریزش مناسب و استفاده از توپک رانی مکرر در زمان‌های حساب شده و لازم می‌باشد [7-9]. شکل 4، تغییرات در دما و سرعت برش عمومی یک جریان نفت‌خام در خط لوله سرد و متأثر از کریستال‌های واکس تشکیل شده را نشان می‌دهد.



شکل 4. تغییرات در دما و سرعت برش عمومی یک جریان نفت‌خام در خط لوله سرد و متاثر از کریستال‌های واکس تشکیل شده

همان‌گونه که در شکل فوق مشخص است، هر چه تجمع و رسوب واکس‌ها در اثر مسیر انتقال حرارت (سرما به طرف گرما) از بدنه به طرف مرکز هدایت می‌شود، پروفیل سرعت و دما نیز به طرف مرکز جریان رانده شده، در نتیجه سوراخی عبوری برای جریان در حال انتقال به‌وجود می‌آید و بقیه پروفیل را کیک واکس تشکیل می‌دهد، که باعث افزایش افت فشار در مسیر شده و وقتی خط متوقف شد، حرارت قسمت وسط لوله نیز از دست رفته و کل خط، حتی قسمت مرکزی هم از واکس پر شده و کاملاً مسدود و جریان متوقف می‌گردد [10-14]. نفت‌های پارافینی یا واکسی زیادی در دنیا وجود دارد و مشکلات زیادی را برای تولید، فرآیند و انتقال به‌وجود می‌آورند. مشکل اساسی آنها فقط کریستالیزه شدن واکس‌های موجود در آنها در دمای پائین و کمیت واکس نبوده، بلکه تشکیل رسوبات دیگر می‌باشد که در اثر گرم شدن و توپک رانی

بـه‌طور کـامـل از مســـیر حذف نمی‌گردند. این نوع نفت ها معمولاً تمیز نبوده و علاوه بر واکس، دارای مواد اورگانیک ســـنگین دیگر مانند، آســـفالتین‌ها، رزین‌ها، نمک و غیره... هســـتند، که معمولاً در اثر کاهش دما کریســتالیزه نشده و بیشترین قسمت‌های آن دارای نقطه ریزش یا انجماد مشخصی نیستند. بسته به طبیعت آنها، دارای اثر متقابل متفاوتی با واکس‌ها بوده و بعضـاً باعث جلوگیری از کریســـتالیزه شـــدن واکس‌ها و یا پیشـرفت کریسـتالیزه شـدن واکس‌ها می‌شـود. تجربیات لازم برای جلوگیری از ماسیدن و بسته شدن کامل جریان خط لوله، که تاکنون در جهان گزارش شده است، نیاز به اقدامات ترتیبی ذیل دارد:

1- ارزیابی کامل و مشخص‌سازی خواص جریان انتقال در خط لوله
2- طرح نقشه جریان‌های تولید و انتقال متناوب
3- تعیین و تخمین رفتارهای غیرعادی و نحوه رسوب‌گذاری جریان خط لوله
4- مطالعه نوع، شروع و نحوه رسوب‌گذاری
5- انتخاب تجهیزات و تاسیسات
6- طراحی و اســـتفاده از مواد افزودنی کاهش دهنده نقطه ریزش یا ضـــدرســـوب و مخلوط ســـازی‌های متناوب
7- برنامه اجراء کارآیی و مشخصات سیستم‌ها و تعمیرات
8- نقل و انتقال، مخازن و مطالعات مخلوط سازی [15-16]

نرم‌افزارهای تجاری شبیه‌سازی انتقال مانند OLGA

کاربرد گســترده و توســعه پر شــتابی پیدا کرده اند که مهم ترین دلیل آن توانایی این شــبیه ســازها درایجاد مدل‌های دقیق بر پایه دینامیک می‌باشد که باعث ساده تر شدن رویه شبیه‌سازی برای مهندسین شده است.

ساختار نرم‌افزار OLGA 2000

نرم‌افزار OLGA 2000 به‌عنوان یک نرم‌افزار تخصـصـی سـیسـتم‌های انتقال سـیالات توسـط شرکت نروژی فن‌آوری نفت Scandpower بر پایه داده‌های یک واحد صـــنعتی توســـعه یافته و به‌خوبی پاســـخگوی نیاز گروه‌های طراحی، عملیاتی و ایمنی خطوط لوله انتقال می‌باشد. پیش‌بینی دقیق رژیم جریان، ردیابی لخته‌ها، تغییرات دما و فشـار، خوردگی و رسـوب‌گذاری واکس از پارامترهای بسـیار مهم در بهره‌برداری بهینه خطوط انتقال نفت‌خام می‌باشـند. همچنین مدل‌سازی تجهیزات فرآیندی خطوط لوله و بررسی رفتار آنها در شرایط عملیاتی مختلف می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های انرژی و فرآیندی گردد. نرم‌افزار اولگا (OLGA) با تکیه بر چنین نیازهایی توســعه یافته اســت و قادر به شــبیه‌ســازی کلیه پارامترهای کلیدی عملیات بهره‌برداری خطوط لوله نفت‌خام برای موقعیت‌های مختلف کاری ذیل می‌باشد:

الف - توقف خط و طول دوره مجاز توقف
ب- راه‌اندازی خط و تعیین استراتژی بهینه برای انجام آن
ج - تعیین رسوب‌گذاری واکس و آسفالتین

د- توپک رانی (Pigging) خطوط لوله

ه - تعیین رژیم جریان نسبت به مکان و زمان

با رسوب‌گذاری واکس در طول خط لوله پارامترهای انتقال حرارت، رفتار رئولوژیکی (در اثر تغییر محتوای واکس‌ها) و رفتار هیدرودینامیکی (در اثر تغییر سطح مقطع عبوری جریان و زبری سطح لوله) نفت‌خام تغییر می‌یابد و این موضوع باعث عدم کارآیی روابط مرسوم تعیین پروفایل دما و فشار خط لوله می‌گردد.

نرم‌افزار اولگا بر پایه حل عددی دو معادله اندازه حرکت، یک معادله انرژی و سه معادله پیوستگی با استفاده از یک روتین غیر صریح ویژه (SITI) قادر به شبیه‌سازی پارامترهای کلیدی عملیات بهره‌برداری خطوط لوله انتقال در حالت پایا و گذرا می‌باشد.

نرم‌افزار اولگا یک نرم‌افزار غیرمجتمع است که اطلاعات متعدد تجهیزات، ترمودینامیکی و روتین اصلی را در قالب فایل‌های متنی دریافت می‌کند و نتایج شبیه‌سازی را برمی‌گرداند. هر فایل متشکل از کلید واژه‌های شناخته شده برای نرم‌افزار و داده‌های مساله خاص می‌باشد. هفت فایل اصلی برای اولگا تعریف شده است که دو فایل آن یعنی فایل روتین اصلی و فایل داده‌های ترمودینامیکی حداقل فایل‌های مورد نیاز هر نوع شبیه‌سازی می‌باشند. پنج فایل دیگر برای ورودی داده‌های پمپ‌ها، کمپرسوها، رسوب‌گذاری واکس، تشکیل هیدرات‌ها و شرایط اولیه حالت گذرا (مثلاً داده‌های حالت پایا) به‌کار گرفته می‌شوند.

اطلاعات پمپ‌ها و کمپرسورها در قالب داده‌های منحنی مشخصه و رسوب‌گذاری واکس و تشکیل هیدرات‌ها در قالب داده‌های ارزیابی و ترمودینامیکی نفت‌خام به نرم‌افزار اولگا وارد می‌شوند. فایل اصلی حاوی داده‌های فیزیکی خط لوله از جمله طول، زاویه، ارتفاع، قطر، جنس، زبری، شرایط جاگذاری و شرایط محیطی لوله می‌باشد و فایل ترمودینامیکی مشتمل بر جداول فشار– دما و سایر پارامترهای ترمودینامیکی در فرآیندهای متعددی از جمله تبخیر آنی، محاسبات نقاط حباب و شبنم می‌باشد. چنین جداولی به‌وسیله نرم‌افزار دیگری تحت عنوان PVTsim تولید می‌شوند. این نرم‌افزار قابلیت تولید فایل‌های رسوب‌گذاری واکس و تشکیل هیدرات‌ها را نیز دارد.

امکانات و ویژگی‌های نرم‌افزار OLGA

– شبیه‌سازی و مدل‌سازی دقیق و پیشرفته‌ی جریان درون لوله‌ها

– قابلیت شبیه‌سازی دینامیک لوله‌های نفت و گاز در شرایط متفاوت

– امکان محاسبه و واردکردن مولفه‌های مختلف مانند انتقال حرارت بین دیواره‌ی خط لوله و محیط، انشعاب لوله‌ها، خوردگی لوله‌ها و...

– انجام محاسبات و تجزیه و تحلیل در حالت پایدار (Steady-State) جهت بررسی مشکلات و چالش‌های جریان

– شبیه‌سازی به‌صورت وابسته به زمان (Time-Dependent) و یا جریان گذرا (Transient Flow) جهت بیشینه‌کردن پتانسیل تولیدی

– امکان ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

– قابلیت شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق از شرایط اصلی و کلیدی عملیات مانند راه‌اندازی، خاموش‌کردن، عملیات Pigging

شبیه‌سازی خط لوله نفت‌خام واکسی

یکی از معضلات انتقال نفت‌های خام پارافینی تشکیل رسوب واکسی در طول خطوط لوله است. با وارد کردن داده‌های ارزیابی نفت‌خام در نرم‌افزار PVTsim که حاوی داده‌های ترمودینامیکی واکس‌ها نیز می‌باشند می‌توان فایل رسوب‌گذاری واکس مورد نیاز شبیه ساز اولگا را تولید کرد. این فایل در کنار دو فایل اصلی اولگا (فایل روتین اصلی و فایل ترمودینامیکی PVTsim) قرار می‌گیرد و در شرایط گذرا قادر به پیشگویی دقیق ضخامت رسوب واکسی، تغییرات زبری لوله و میزان واکس پراکنده شده در نفت می‌باشد. تغییرات میزان واکس پراکنده شده در نفت بر رفتار رئولوژیکی نفت‌خام با تغییر دادن معادلات ویسکوزیته تأثیر بسزائی می گذارد. همچنین رسوب تشکیل شده پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال حرارت خط لوله را تغییر می‌دهد. در مجموع کلیه تغییرات فوق در شرایط راه‌اندازی، توقف و بهره‌برداری ما را به سمت نیاز به آگاهی از رفتار واقعی سیستم برای تصمیم گیری صحیح و تعیین استراتژی عملیاتی سوق می‌دهد.

طرح مساله

مساله شامل خط لوله‌ای افقی به طول 10 کیلومتر و قطر 15 سانتی متر می‌باشد. نفت‌خام واکسی با دمای 80 درجه سانتیگراد با دبی ثابت 500 مترمکعب در روز وارد لوله می‌گردد. داده‌های ترموهیدرولیکی در جدول 1و 2 داده شده است.

جدول 1. داده‌های ورودی به شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی

پارامتر	کمیت
طول خط لوله (کیلومتر)	10
سیال	نفت‌خام
دمای نفت ورودی (C°)	80
دبی حجمی (متر مکعب در روز)	500
دبی جرمی (کیلوگرم در ثانیه)	4/49
ویسکوزیته نفت (متر در ثانیه)	0/34
دانسیته سیال (گرم/ سانتیمترمکعب)	0/7829

داده‌های خط لوله در جدول 3 آمده است.

جدول 2. داده‌های ورودی به شبیه‌سازی

پارامتر	کمیت
مدل نشست واکس	RRR
ضریب نفوذ واکس	1
زبری واکس	0
تخلخل واکس	0/6
ویسکوزیته (واکس/نفت)	CALSEP
دمای ظهور واکس (C°)	32/8
زمان شبیه‌سازی (روز)	70

جدول 3. داده‌های خط لوله

نوع	ضخامت(متر)	هدایت(W/m-k)	دانسیته(kg/m_3)	ظرفیت حرارتی(j/kg-k)
کربن-استیل	0/2362	45	7850	470

نتایج و بحث

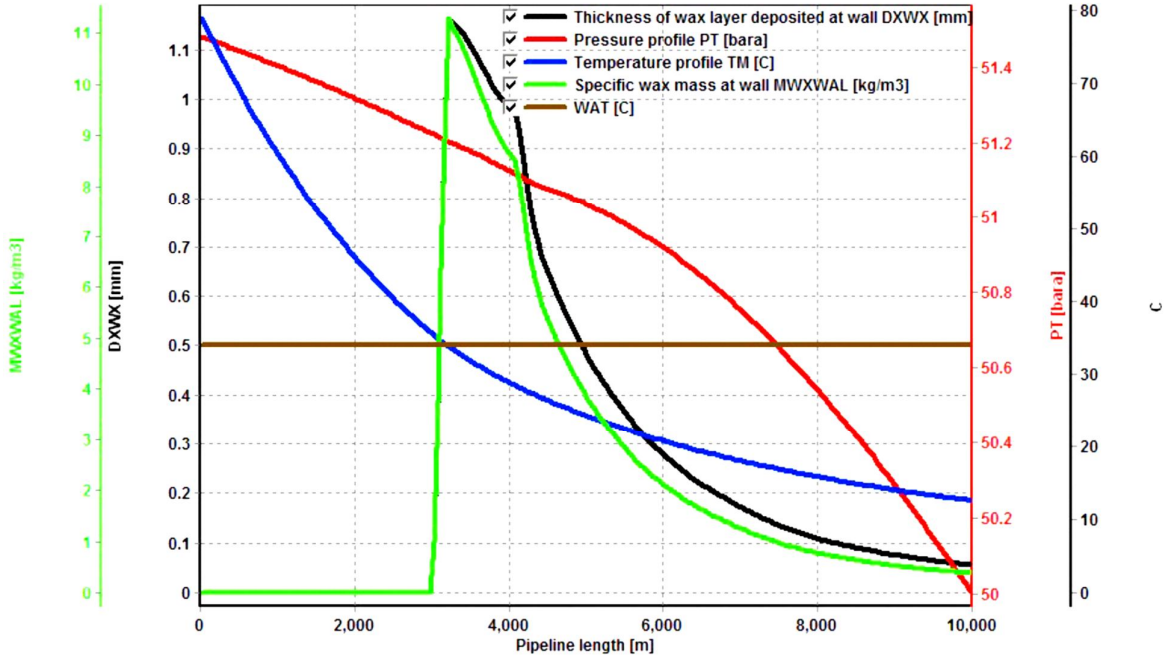
پس از انجام شبیه‌سازی خط لوله مورد نظر پروفایل‌های خط لوله به‌دست آمد. این پروفایل‌ها شامل ضخامت لایه واکس در دیواره خط لوله، دمای ظهور واکس، جرم ویژه واکس در دیواره و پروفایل دما و فشار می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین پروفایل‌های ارائه شده پروفایل ضخامت واکس ایجاد شده در دیواره لوله برحسب زمان است. شکل (5) پروفایل رسوب واکس رادر طول 10 کیلومتر خط لوله در طی 70 روز نشان می‌دهد. همچنین پروفایل‌های ضخامت لایه واکس ایجادشده در دیواره لوله در زمان‌های 0، 2، 30 و 70 روز در شکل 6 داده‌شده‌است.

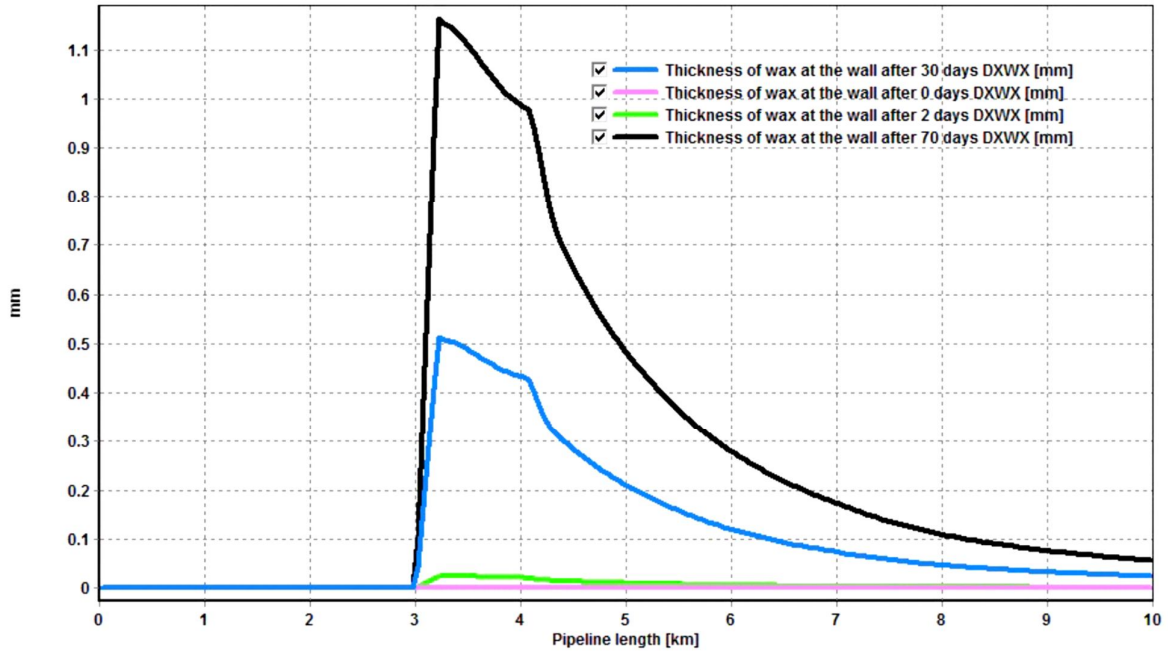
جداره داخلی تثبیت شده و افزایش ضخامت به‌صورت یکنواخت به تدریج افزایش می‌یابد. تحلیل این مساله در طول دوره زمانی نسبتاً طولانی و با استفاده از تغییرات رفتار هیدرولیکی سیستم معیاری از زمان مناسب توپک‌رانی را ارائه می‌دهد.

یکی دیگر از پروفایل‌های به‌دست آمده از این شبیه‌سازی پروفایل فشار است. همان‌گونه از شکل شماره 5 مشخص است افت فشار در طول خط لوله دارای روند کاهشی می‌باشد. محدوده تغییرات افت فشار 50-51/5 بار می‌باشد. به طوریکه در فاصله حدود 6000 متر در حدود 50/9 بار است.

یکی دیگر از پروفایل‌های موجود در شکل (5) تغییرات ضریب انتقال حرارت در طول لوله و در زمان‌های مختلف می‌باشد.

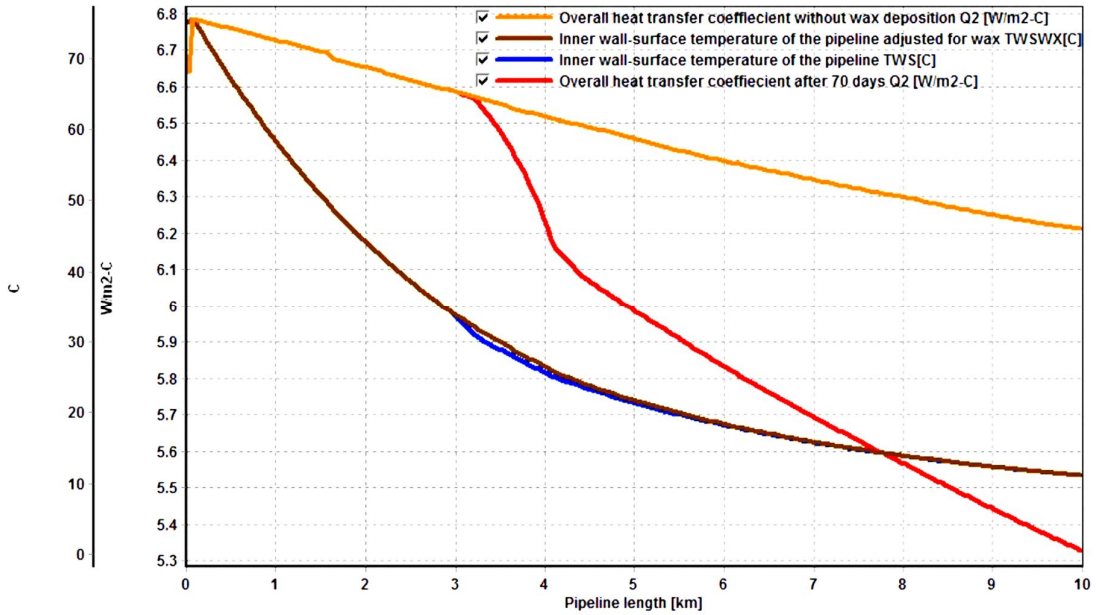


شکل 5. پروفایل خط لوله انتقال نفت‌خام واکسی در طی **70** روز و به طول **10** کیلومتر



شکل 6. تغییرات ضخامت واکس بر روی جداره داخلی و در طول لوله در زمان‌های مختلف

این شکل‌ها نشان می‌دهند که با گذشت زمان ضخامت رسوب افزایش می‌یابد و این افزایش در فاصله حدود 2800 متری از مبداء لوله به حداکثر خود می‌رسد. پس از این نقطه به‌دلیل کاهش محتوای واکس نفت‌خام، ضخامت رسوب واکسی به‌تدریج کاهش می‌یابد. پس از روز دوم تقریباً آهنگ تشکیل رسوب واکس بر روی



شکل 7. تغییرات ضریب انتقال حرارت را در طول لوله و در زمان‌های مختلف

نتایج موجود در شکل 7 نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت در طول خط لوله در فاصله 3 کیلومتری پس از 70 روز دارای روند کاهشی می‌باشد. بدیهی است که با افزایش ضخامت رسوب واکسی بر روی جداره داخلی لوله، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در این شبیه‌سازی، حداقل ضریب انتقال حرارت کلی در روز دهم و در فاصله حدود 2800 متری از مبداء لوله به‌دست آمده است.

یکی دیگر از مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی خط لوله، دمای ظهور واکس (WAT) می‌باشد. همان‌گونه که از شکل 5 مشخص است، دمای ظهور واکس 35درجه سانتی گراد در کل خط لوله می‌باشد.

پروفایل دما در طول خط لوله یکی دیگر از نتایج این شبیه‌سازی است. همان‌گونه که از شکل 5 مشخص است پروفایل دما در طول خط لوله دارای روند کاهشی بوده و از 12 تا 78 درجه سانتی گراد تغییر می‌کند.

نتیجه گیری

1- با گذشت زمان ضخامت رسوب افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار حداکثر خود به‌دلیل کاهش محتوای واکس نفت‌خام، ضخامت رسوب واکسی به‌تدریج کاهش می‌یابد.
2- با افزایش ضخامت رسوب واکسی بر روی جداره داخلی لوله، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.
3- پروفایل دما در طول خط لوله دارای روند کاهشی می‌باشد.
4- پروفایل ضریب انتقال حرارت در طول خط لوله در فاصله 3 کیلومتری پس از 70 روز دارای روند کاهشی می‌باشد.
5- پروفایل افت فشار در طول خط لوله دارای روند کاهشی می‌باشد.

منابع

[1] Aiyejina, A., et al., Wax formation in oil pipelines: A critical review. International Journal of Multiphase Flow, 2011. 37(7): p. 671-694.
[2] Valinejad, R. and A.R. Solaimany Nazar, An experimental design approach for investigating the effects of operating factors on the wax deposition in pipelines. Fuel, 2013. 106(0): p. 843-850.
[3] Huang, Z., et al., The Effect of Operating Temperatures on Wax Deposition. Energy & Fuels,2011. 25(11): p. 5180-5188.
[4] Elsharkawy, A.M., T.A. Al-Sahhaf, and M.A. Fahim, Wax deposition from Middle East crudes. Fuel, 2000. 79(9): p. 1047-1055.
[5] Guozhong, Z. and L. Gang, Study on the wax deposition of waxy crude in pipelines and its application. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010. 70(1–2): p. 1-9.
[6] Hoffmann, R. and L. Amundsen, Single-Phase Wax Deposition Experiments. Energy & Fuels,
2010. 24(2): p. 1069-1080.
[7] Lira-Galeana, C., A. Firoozabadi, and J.M. Prausnitz, Thermodynamics of wax precipitation in petroleum mixtures. AIChE Journal, 1996. 42(1): p. 239-248.
[8] Coutinho, J.A.P., et al., Reliable Wax Predictions for Flow Assurance. Energy & Fuels, 2006.20(3): p. 1081-1088.
[9] Schou, P.K. and P.L. Christensen, Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids2007.

[10] Labes-Carrier, C., et al., Wax Deposition in North Sea Gas Condensate and Oil Systems:Comparison Between Operational Experience and Model Prediction, in SPE AnnualTechnical Conference and Exhibition2002, Copyright 2002, Society of Petroleum Engineers Inc.: San Antonio, Texas.
[11] Coto, B., et al., A New DSC-Based Method to Determine the Wax Porosity of Mixtures Precipitated from Crude Oils. Energy & Fuels, 2011. 25(4): p. 1707-1713.
[12] Brevik, J., Wax control in production systems, 2013, Statoil.
[13] Edmonds, B., et al., Simulating Wax Deposition in Pipelines for Flow Assurance†. Energy &Fuels, 2007. 22(2): p. 729-741.
[14] Pan, S., et al., Case Studies on Simulation of Wax Deposition in Pipelines, in International Petroleum Technology Conference2009, 2009, International Petroleum TechnologyConference: Doha, Qatar.
[15]Burger, E.D., T.K. Perkins, and J.H. Striegler, Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline. SPE Journal of Petroleum Technology, 1981. 33(6): p. 1075-1086.
[16] Azevedo, L.F.A. and A.M. Teixeira, A Critical Review of the Modeling of Wax Deposition Mechanisms. Petroleum Science and Technology, 2003. 21(3-4): p. 393-408.