

پیش‌بینی نرخ رسوب آسفالتین در سیستم‌های جریان با استفاده از مدل‌های رسوب‌گذاری در مبدل‌ها

فرهاد سلیمی*

گروه مهندسی شیمی، دانشکده علوم پایه، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

دریافت: ۹۴/۲/۱۰ پذیرش: ۹۴/۸/۲۶

چکیده

رسوب آسفالتین پدیده پیچیده‌ای است که تقریباً در تمام چاه‌های نفت، تاسیسات سرچاهی و انتقال نفت‌های آسفالتینی دیده می‌شود. هدف از این کار ارائه مدلی برای پیش‌بینی نرخ رسوب آسفالتین در خطوط جریانی است. مدل ارائه شده باید قادر باشد تاثیر سرعت و دما را روی پدیده رسوب پیش‌بینی کند. برای این منظور نیاز به دستگاهی است که بتوان شرایط دینامیک را با آن شبیه‌سازی کرد. مدل‌هایی که برای اندازه‌گیری نرخ رسوب استفاده شده‌اند مدل‌های استفاده شده برای پیش‌بینی رسوب‌گذاری در مبدل‌ها هستند. این مدل‌ها دارای دو ترم تشکیل رسوب و دفع رسوب هستند. ترم تشکیل رسوب در همه مدل‌ها تقریباً یکسان است ولی ترم دفع رسوب به دو شکل ارائه می‌شود که عبارتند از (۱) عبارت وابسته به تنش برشی روی دیواره (۲) عبارت وابسته به انتقال جرم. نتایج برازش مدل‌ها بر داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل‌ها به خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق می‌باشند.

کلمات کلیدی: آسفالتین، نرخ رسوب، معادله رسوب‌گذاری، سیستم‌های جریانی

مقدمه

مهندسی ایمنی جریان به توانایی سیستم تولیدی چند فاز جهت انتقال سیالات تولید شده از مخزن به تجهیزات تولیدی و بازار مصرفاز طریق لوله گفته می‌شود. در این سیستم رفتار سیال پیش‌بینی شده و مشکلات احتمالی که منجر به بسته شدن مسیر سیال می‌گردد، شناسایی می‌شود و با راهکار مناسب از به وجود آمدن این مشکلات جلوگیری به عمل می‌آید [۱]. مهندسی ایمنی جریان شامل مواردی مانند رسوب آسفالتین و واکس، تشکیل هیدرات، خوردگی و غیره می‌شود.

*f.salimi@iauksh.ac.ir

آسفالتین‌ها دارای ظاهر قهوه‌ای رنگ هستند که به صورت شیمیایی شامل مخلوطی از آروماتیک‌های قطبی و مولکول‌های نفتنیک بوده که در ساختار آن‌ها تک اتم‌های نیتروژن، سولفور و اکسیژن وجود دارد. این مواد با افزودن نرمال آلکان‌ها با عدد کربنی پایین (مثل پروپان) شروع به لخته شدن می‌کنند. آسفالتین موجود در نفت خام در شرایط معمولی در نفت خام محلول است و تحت شرایط ترمودینامیک خاصی از جمله تغییر در فشار، دما، ترکیب اجزای نفت، اثر الکتروسینتیک، تنش برشی، تاثیر مواد شیمیایی و فرآیندهای الکتریکی یا شیمیایی (که قادر به همزدن پایداری ذرات کلوئیدی هستند) از نفت جدا شده و در نهایت لخته می‌شود [۲]. آسفالتین جدا شده از نفت می‌تواند درون مخزن، در نزدیکی دهانه چاه، ستون چاه و یا تسهیلات رو زمینی رسوب کند. در این میان صدمه ناشی از رسوب آسفالتین در درون مخزن و ستون چاه دارای اهمیت بیش‌تری می‌باشد.

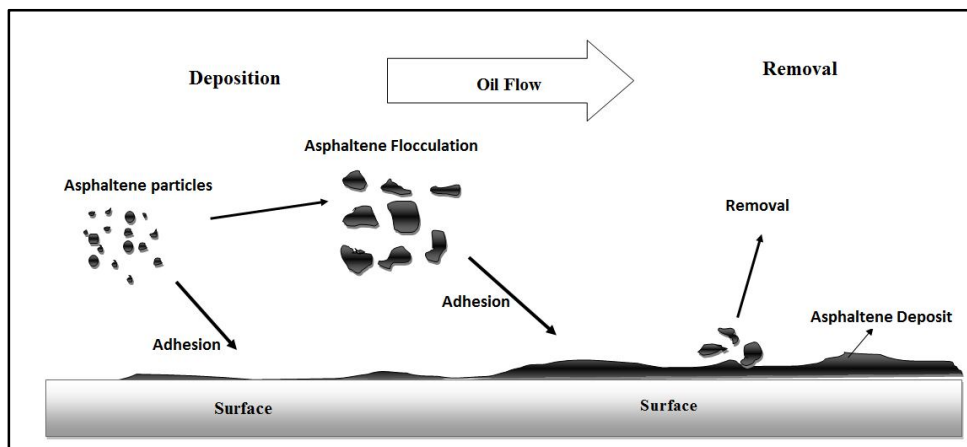
همچنین آسفالتین بر اثر تغییرات بسیار زیاد شرایط دمایی و فشاری در ستون چاه ممکن است رسوب کند. افزایش ضخامت آسفالتین ته‌نشین شده بر دیواره لوله مغزی درون چاه سبب کاهش قطر قابل عبور و در نتیجه کاهش تولید شده که در نهایت با مسدود کردن مسیر جریان باعث صدمه به تولید می‌شود [۳، ۴]. رسوب آسفالتین یکی از مشکلات غیر قابل حل در صنعت نفت است که ممکن است در طول مرحله اولیه برداشت یا در ادامه‌ی روش‌های ازدیاد برداشت اتفاق بیفتد. وجود گرادیان غلظت همراه با پرفایل‌های دما و فشار در طول مخزن (به خصوص در نزدیکی دهانه پایینی چاه‌های تولیدی)، لوله چاه و سطح تجهیزات روی پایداری کلوئیدهای آسفالتین تاثیر می‌گذارد و شرایط مطلوبی را برای رسوب این مواد ایجاد می‌کند [۵، ۶]. کاهش تولید و هزینه‌های مرتبط با رسوب ترکیبات آلی ممکن است منجر به کاهش تولید و بسته شدن زودرس مخازن دارای نفت قابل استحصال شود. اگر چه مهندسين مخزن تمام سعی خود را می‌کنند تا این شرایط اتفاق نیفتد اما ته نشینی و پتانسیل تشکیل رسوب جامدات آلی غیرقابل اجتناب می‌باشد. بنابراین اپراتورها با تکیه بر روش‌های شیمیایی و مکانیکی سعی در کاهش تشکیل رسوب دارند [۷-۱۱]. این روش‌ها خیلی گران قیمت و در اکثر مواقع تاثیر ناچیزی دارند. طراحی به منظور افزایش تاثیر عملیات نیاز به فهم بیشتر مکانیزم‌های رسوب مواد جامد دارد که این موارد شامل تاثیر فشار، دما، ترکیب و شرایط جریان است. اهمیت این موارد در تاثیرگذاری افزودنی‌های شیمیایی برای پاک‌سازی این رسوبات بسیار مهم می‌باشند.

استفاده از تکنیک‌های آزمایشگاهی جهت بررسی خواص و مکانیزم رسوب جامدات آلی به ویژه آسفالتین تحت شرایط واقعی خیلی محدود هستند. مرور کارهای انجام شده در زمینه رسوب آسفالتین نشان می‌دهد تنها می‌توان به چند کار محدود روی رسوب آسفالتین در شرایط واقعی اشاره نمود [۱۲-۱۶]. هدف این کار ارائه مدلی مناسب است که بتوان با استفاده از آن نرخ تشکیل رسوب آسفالتین را در شرایط متلاطم در خطوط لوله پیش بینی کرد. برای این منظور از روابط ارائه شده برای اندازه‌گیری رسوب‌گذاری^۱ در مبدل‌ها استفاده شده است. لازم به ذکر است تاکنون از این مدل‌ها به این منظور استفاده نشده است. داده‌های استفاده شده در این کار داده‌های آزمایشگاهی جامی الاحمدی و همکاران [۱۵] در شرایط متلاطم می‌باشد.

^۱Fouling

فرآیند تشکیل رسوب آسفالتین

تشکیل رسوب آسفالتین می‌تواند شامل چندین مرحله باشد که عبارتند از: ته نشینی، تشکیل لخته^۱، جذب سطحی^۲ و چسبیدگی^۳ [۱۲]. امکان دارد ذرات آسفالتین بدون تشکیل لخته به صورت مستقیم به دیواره بچسبند ولی مقدار این رسوب خیلی کم است [۱۷]. بنابراین اولین مرحله در تشکیل رسوب آسفالتین، جدا شدن این ذرات از نفت تحت عنوان ته نشینی می‌باشد. روش‌های مختلفی برای ته نشین کردن آسفالتین از نفت وجود دارد که عبارتند از تغییر در فشار، دما و ترکیب نفت. در این کار جهت ته نشینی آسفالتین از نفت، از روش تغییر در ترکیب استفاده شد برای این منظور به نفت خام، حلال نرمال هپتان اضافه گردید. در روش افزودن حلال، باید یک حداقل مقدار حلال به نفت اضافه شود تا ذرات آسفالتین از نفت جدا شوند. بعد از اضافه کردن حلال نرمال هپتان اولین نقطه ای که ذرات آسفالتین شروع به جدا شدن از نفت می‌کنند را نقطه شروع رسوب گذاری آسفالتین^۴ می‌نامند. از این نقطه به بعد افزایش بیش‌تر حلال منجر به جدا شدن آسفالتین بیش‌تری از نفت می‌شود. بعد از جدا شدن ذرات آسفالتین از نفت این ذرات به هم دیگر چسبیده و شروع به بزرگ شدن و تشکیل لخته‌های آسفالتین می‌کنند. برای تشکیل رسوب، ذرات آسفالتین یا لخته‌ها باید به سطح لوله بچسبند. جذب این ذرات به دلیل وجود نیروهای الکترواستاتیک و جاذبه واندروالس بین سطح و گروه‌های عاملی مختلف آسفالتین‌ها می‌باشد [۱۸، ۱۹]. به‌علاوه این نکته مهم است که وجود نیروهای برشی نزدیک دیواره منجر به کنده شدن قسمتی از ذرات آسفالتین رسوب کرده روی دیواره و وارد شدن دوباره آن‌ها به بالک سیال می‌شود. شکل ۱ مراحل مختلف تشکیل رسوب روی دیواره را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مراحل مختلف تشکیل رسوب آسفالتین روی سطح لوله [۱۲]

^۱Flocculation

^۲Adsorption

^۳Adhesion

^۴Onset

مدل استفاده شده

مهم‌ترین دلیل رسوب آسفالتین، وجود غلظت ذرات آسفالتین نفت در خطوط جریانی می‌باشد. بنابراین با فرض عدم وجود نرخ حذف رسوب و همچنین فرض این‌که کل ذرات آسفالتین که به سطح لوله می‌رسند رسوب می‌کنند، نرخ رسوب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$m_d = k_t (C_{As})^n \quad (1)$$

k_t ضریب انتقال جرم کلی است. در قسمت آزمایش‌های انجام گرفته توان غلظت آسفالتین برابر با ۱ محاسبه شده است [۱۵]. برای محاسبه نرخ رسوب در داخل لوله نیاز به دانستن ضریب انتقال جرم است. برای محاسبه این ترم می‌توان از روابط مربوط به رسوب‌گذاری به صورت زیر استفاده کرد.

$$k_t = \text{Fouling Rate Coefficient}$$

مدل ریاضی مناسبی نیاز است که بتوان با استفاده از آن مقدار رسوب تشکیل شده روی سطح داخلی لوله را به صورت تابعی از پارامترهای عملیاتی پیش‌بینی کرد. مدل‌های نیمه تجربی زیادی برای اندازه‌گیری پدیده رسوب‌گذاری در نفت خام در مقاله‌ها گزارش شده است [۲۰-۲۶]. این مدل‌ها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده‌اند. مدل‌های ارائه شده برای رسوب‌گذاری معمولاً بر اساس ایده شناخته شده کرن و سیتون^۱ می‌باشند [۲۰]. که در تعریف آن نرخ خالص رسوب‌گذاری برابر با تفاوت بین نرخ تشکیل رسوب^۲ و نرخ برداشته شدن^۳ می‌باشد.

$$\text{نرخ برداشته شدن} - \text{نرخ رسوب‌گذاری} = \text{نرخ تشکیل رسوب}$$

اختلاف اساسی بین مدل‌های گوناگون ارائه شده در مقاله‌های مختلف تنها در توضیح ترم‌های نرخ تشکیل رسوب و نرخ برداشته شدن می‌باشد. نرخ رسوب به وسیله مدل‌های انتقال-واکنش یا واکنش تنها بیان می‌شود در حالی که نرخ برداشته شدن، با عبارات وابسته به تنش یا انتقال جرم بیان می‌شود. در کل، مدل‌های انتقال-واکنش دقیق‌تر از مدل‌های واکنش تنها می‌باشند.

مدل انتقال-واکنش توسط کرایتندن و کولازکوسکی^۴ با در نظر گرفتن معادله واکنش شیمیایی و همچنین انتقال ذرات رسوب‌کننده به سمت سطح داغ یا برعکس توسعه داده شد. آنها همچنین یک معادله اصلاح شده که شامل ترم برگشت نفوذ^۵ بود پیشنهاد کردند [۲۱]. اپستین^۶ مشاهده کرد که در زمان صفر توجه کردن غلظت خیلی کم رسوب در سطحی که باید پدیده برگشت نفوذ اتفاق افتد مشکل می‌باشد. بنابراین اپستینیک مدل برای نرخ واکنش شیمیایی رسوب‌گذاری آغازین ارائه کرد که ماندن رسوب نزدیک سطح^۷ متناسب با زمان باقی ماندن سیال در سطح می‌باشد. بزرگی زمان باقی ماندن نزدیک سطح به معنی

^۱Kern and Seaton

^۲rate of deposition

^۳rate of removal

^۴Crittenden and Kolaczowski

^۵back-diffusion

^۶Epstein

^۷attachment

بالا بودن فرصت برای این که واکنش شیمیایی اتفاق افتد می باشد. رابطه بین نرخ رسوب گذاری آغازین و فلاکس جرمی به صورت زیر می باشد:

$$\left[\frac{dR_f}{dt}\right]_{t=0} = m\phi/k_f\rho_f \quad (1)$$

m فاکتور استوکیومتری، ρ دانسیته رسوب، k_f هدایت گرمایی رسوب و ϕ فلاکس جرمی رسوب هستند. نیروی پیش برندگی برای انتقال جرم از بالک سیال به سطح به صورت اختلاف بین غلظت بالک و غلظت در سطح بیان می شود [۲۲]. فلاکس انتقال جرم به صورت زیر بیان می شود:

$$\phi = \frac{c_b}{\left(\frac{k'_s c_s^{\frac{2}{3}}}{u(f)^{\frac{1}{2}}}\right) + k''\rho u^2 f / \mu \exp\left(-\frac{E}{RT_{s0}}\right) C_s^{n-1}} \quad (2)$$

این معادله با نام معادله اپستین معروف است که در آن k' و k'' ثابت هستند، Sc عدد اشمیت، f فاکتور اصطکاک، ρ دانسیته سیال، μ ویسکوزیته سیال و n درجه فرآیند واکنش اضافه شدن می باشند. اولین ترم در مخرج معرف انتقال جرم رسوب به سمت سطح و دومین ترم بیان کننده ترم های واکنش و اضافه شدن گونه های رسوبی می باشد. معادله اپستین به خوبی با داده های کرایتندن و همکاران برای نرخ های رسوب گذاری آغازین پلیمریزاسیون استایرن تطابق داشت [۲۷]. این معادله همچنین قادر به نشان دادن تاثیر پارامترهای دما و سرعت است. اما این معادله قابل استفاده برای اندازه گیری رسوب گذاری نفت خام نمی باشد دلایلی مانند نامشخص بودن درجه ترم واکنش + ماندن رسوب نزدیک دیواره، نامشخص بودن n و Sc برای ماده رسوب کننده نفت خام و همچنین مشکل بودن تفکیک پارامترهای کلیدی مواد تشکیل دهنده رسوب (به دلیل این که نفت خام دارای ترکیبات پیچیده می باشد) منجر به وجود آمدن مشکلاتی در پیدا کردن غلظت دقیق رسوب و نقش آن در رسوب گذاری می شود.

ایپ^۱ و همکاران مدل اپستین را به صورت تابعی از گروهی از پارامترهای بدون بعد A, B, C and D برای شرایط متلاطم با سرعت متوسط u تقلیل دادند که به صورت زیر انتقال جرم با ترم حذف رابطه دارد [۲۸]

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{AC_f u \rho^{\frac{2}{3}} \mu^{-\frac{4}{3}} T_s^{\frac{2}{3}}}{1 + Bu^3 C_f^2 \rho^{-\frac{1}{3}} \mu^{-\frac{1}{3}} T_s^{\frac{2}{3}} \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right)} - Cu^{0.8} \quad (3)$$

آن ها پارامترهای معادله بالا را با استفاده از داده های یکی از واحدهای شیمیایی پالایشگاه UK که نفت های سبک تا متوسط دریای شمال را فرایند می کند تخمین زدند.

مورد جالبی که ارائه شده است، ایده شرایط آستانه رسوب گذاری برای نفت های خام با استفاده از مدل های نیمه تجربی نه چندان سخت است. ابرت و پانچال یک مدل نیمه تجربی برای پیش بینی نرخ خطی رسوب به صورت تابعی از دمای فیلم و سرعت سیال پیشنهاد کردند [۲۳].

¹Yeap

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \quad (۴)$$

ثابت‌های این معادله با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آیند. این مدل در اصل با استفاده از داده‌های جریان تشکیل کک در نفت خام اگزون^۱ توسط اسکاربورگ و همکاران در پروژه مشترک با ساختمان مرکزی ایالات متحده^۲ به‌دست آمده بود. این مدل فرض می‌کند واکنش تشکیل رسوب در لایه مرزی گرمایی در دمای فیلم متوسط T_f اتفاق می‌افتد، رسوب به وسیله نفوذ و گردابه‌های متلاطم از لایه مرزی به بالک جریان منتقل می‌شود و نرخ خالص رسوب برابر تفاوت بین نرخ تشکیل و نرخ حذف می‌باشد. این مدل به استفاده کننده‌ها اجازه می‌دهد تا شرایط عملیاتی را که نرخ رسوب‌گذاری نزدیک صفر است (شرایط رسوب آستانه) تخمین بزنند.

با برابر قرار دادن معاله (۴) با صفر، نمودار آستانه رسوب‌گذاری به‌دست می‌آید و دماهای فیلم برای گسترده وسیعی از تنش‌های برشی روی دیواره محاسبه شد. مشکلی که معادله ابرت و پانچال دارد این است که تاثیر هدایت گرمایی نفت خام و گرمای ویژه را در نظر نگرفته است و تنها تاثیر دانسیته و ویسکوزیته نفت را در نظر گرفته است. پانچال و همکاران معادله ابرت و پانچال^۳ را با در نظر گرفتن عدد پرنتل اصلاح کردند [۲۴] و معادله‌ی به صورت زیر به‌دست آمد:

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{\beta} Pr^{-0.33} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \quad (۵)$$

در این معادله ثابت β برابر با $-۰/۶۶$ در نظر گرفته شده و دمای فیلم با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$T_f = T_b + 0.55(T_s + T_b) \quad (۶)$$

داده آزمایشگاهی به‌دست آمده از رسوب اتوکلاو فشار بالا تحت شرایط عملیاتی مختلف در این مطالعه استفاده شده است.

پلی و همکاران مشاهده کردند که اولاً برای جریان متلاطم داخل لوله‌ها توان عدد رینولدز برابر با $۰/۸$ - خیلی بهتر از $۰/۶۶$ - است. دوماً استفاده از دمای دیواره در ترم آرنیوس بهتر از دمای فیلم است و ثالثاً مکانیزم کنده شدن به وسیله انتقال جرم بیان شود (وابسته بودن انتقال جرم به عدد رینولدز با توان $۰/۸$) ساده‌تر می‌باشد بر اساس این مشاهده‌ها، پلی و همکاران مدل اصلاح شده ساده‌ای را برای مدل ابرت و پانچال به صورت زیر ارائه کردند [۲۵]:

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{-0.8} Pr^{-0.33} \exp\left(-\frac{E}{RT_w}\right) - \gamma Re^{0.8} \quad (۷)$$

^۱Exxon^۲US Department of Energy^۳Ebert and Panchal

پلی^۱ و همکاران مدل خود را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی نادسن^۲ بهبود بخشیدند. ناصر و گیوی^۳ مدل رسوب‌گذاری آستانه را که مستقل از عدد پرنتل بوده به صورت زیر پیشنهاد کردند [۲۹]:

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{-\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.4} \quad (۸)$$

مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صالح و همکاران برای نفت خام استرالیا بهبود داده شده است [۳۰]. انرژی فعال سازی از طریق معاله آرنیوس مشخص می‌شود. در این مدل مقدار β همراه با ثابت‌های α و γ مشخص می‌شود. مقدار β برابر با ۱/۵۴۷- برای نفت خام سبک استرالیا گزارش شده است. آن‌ها ادعا کردند که مدلشان بهتر از مدل‌های قبلی، داده‌ها را توصیف می‌کند. باید توجه داشت که معادله ناصر و گیوی نسبت به معادله‌های قبلی تجربی‌تر است. در معادله مقدار β برابر با ۱/۵۴۷-، هیچ ارزش فیزیکی در مقایسه با سایر مدل‌ها ندارد. نقصی که این مدل دارد این است که ممکن است این معادله را نتوان برای برون‌یابی در شرایط عملیاتی دیگر استفاده کرد.

نتایج مدل

همان‌طور که قبلاً گفته شد داده‌های استفاده شده در این کار داده‌های کار جامی الاحمدی و همکارانشان می‌باشد. در جدول ۱ تاثیر دمای سطح لوله و سرعت نفت بر روی نرخ رسوب تشکیل شده روی دیواره نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند کاهش سرعت و همچنین افزایش دمای دیواره منجر به افزایش نرخ رسوب تشکیل شده بر روی دیواره می‌شود. غلظت آسفالتین در نفت برای همه آزمایشات برابر با ۳/۵ kg/m در نظر گرفته شده است. جهت به‌دست آوردن دمای فیلم از رابطه ارائه شده توسط پانچال و همکاران استفاده شده است و نتایج این اندازه‌گیری در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. داده‌های آزمایشگاهی تاثیر دما و سرعت روی نرخ رسوب در داخل لوله

test	Ca(kg/m ³)	T _{oil} (°C)	T _{wall} (°C)	T _{film} (°C)*	velocity(m/s)	m' (kg/m ² .s)* 10 ⁰⁶
۱	۳/۵	۸۵	۱۲۰	۱۰۲/۵	۰/۳۵	۹/۵۸
۲	۳/۵	۸۵	۱۲۰	۱۰۲/۵	۰/۶۱	۵
۳	۳/۵	۸۵	۱۲۰	۱۰۲/۵	۰/۹۲	۳/۳
۴	۳/۵	۸۵	۱۲۰	۱۰۲/۵	۱/۲۵	۲/۰۸
۵	۳/۵	۸۵	۱۲۰	۱۰۲/۵	۱/۶	۱/۶۶
۶	۳/۵	۸۵	۱۱۱	۹۸	۰/۹۲	۱/۹۵
۷	۳/۵	۸۵	۱۱۵	۱۰۰	۰/۹۲	۲/۴۵
۸	۳/۵	۸۵	۱۲۵/۵	۱۰۵/۳۵	۰/۹۲	۴/۱

*دمای فیلم با استفاده از رابطه به‌دست آمده است.

^۱Polley

^۲Knudsen

^۳Nasr and Givi



همان‌طور که در بالا اشاره شد معادلات رسوب‌گذاری گزارش شده به دو دسته تقسیم می‌شوند که تفاوت این دو دسته در ترم در نظر گرفته شده برای نرخ حذف می‌باشد. برای بعضی از معادلات این ترم وابسته به انتقال جرم و در مابقی این ترم وابسته به تنش برشی می‌باشد.

جدول ۲ نتایج برازش را برای معادلاتی که نرخ دفع آن‌ها وابسته به ترم تنش است نشان می‌دهد. ترم اولیه این معادلات از نوع انتقال- واکنش می‌باشد. معادلات ۵ و ۶ برای دمای فیلم گزارش شده‌اند. در این کار سعی شده، تاثیر دمای دیواره به جای دمای فیلم استفاده شود و بررسی شود که آیا معادلات می‌توانند داده‌های آزمایشگاهی را بهتر برازش کنند؟ که به منظور مقایسه آن‌ها از روش متوسط خطای مطلق استفاده شد. علاوه بر بررسی دمای دیواره تاثیر پارامتر β نیز بررسی شده است. همان‌طور که پلی و همکاران بیان کردند در نظر گرفتن β برابر با -0.8 نتایج دقیق‌تری نسبت به مقدار -0.66 دارد. در این کار تاثیر این دو مقدار β نیز بررسی شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند برای معادله ۵ برای حالتی که دمای دیواره در نظر گرفته شده است نتایج بهتری حاصل شده و متوسط خطای مطلق کاهش پیدا کرده است. اما نتایج حاصل از برازش معادله ۶ برای β برابر با -0.66 نشان می‌دهد که استفاده از دمای فیلم بهتر بوده و نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌کند. اما وقتی که β برابر با -0.8 باشد نتایج متفاوت می‌شود و متوسط خطای مطلق برای زمانی که از دمای دیواره استفاده شده کاهش پیدا کرده، و از حدود $15/56$ به مقدار $7/61$ کاهش پیدا کرده است. بنابراین نتایج به دست آمده به خوبی با نتایج کار پلی و همکاران مطابقت دارند و همان‌طور که ایشان بیان کردند در جریان متلاطم داخل لوله‌ها توان عدد رینولدز برابر با -0.8 - بهتر از -0.66 است. همچنین استفاده از دمای دیواره در ترم آرنیوس بهتر از دمای فیلم می‌باشد [۲۵].

نرخ رسوب برای شرایط دمایی مختلف سطح لوله و سرعت های مختلف نفت با استفاده از معادلات ۵ و ۶ محاسبه شده و در جدول ۳ و شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. محاسبه پارامترهای معادلات رسوب‌گذاری مربوط به در نظر گرفتن ترم تنش در ترم نرخ حذف

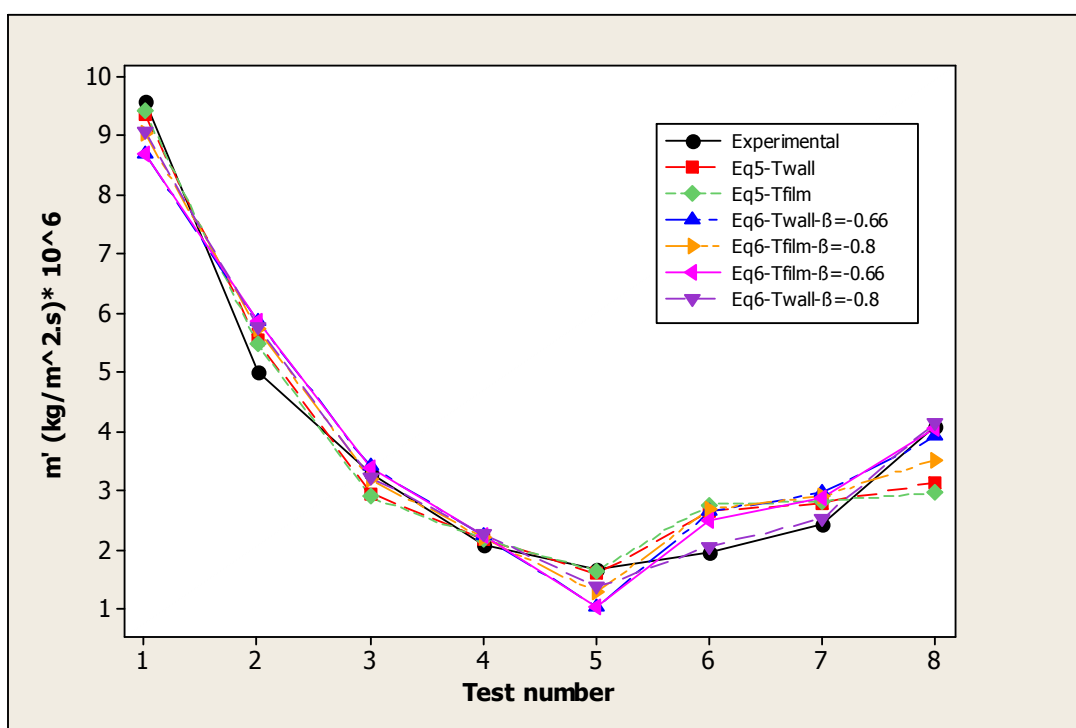
	Eq5-T _{wall}	Eq5-T _{film}	Eq6-T _{wall} $\beta=-0.66$	Eq6-T _{film} $\beta=-0.66$	Eq6-T _{film} $\beta=-0.8$	Eq6-T _w $\beta=-0.8$
α	۰/۹۰۱	۰/۶۱۱	۹/۴۷	۱۲۲۳۵۷۴	۱۰۴۹/۹۹	۹/۴۷
β	-۰/۹۷	-۱/۰۱				
$\gamma \times 10^8$	۲/۵۳	۱/۷۰	۱۰/۴	۱۰/۳	۶/۶۴	۱۰/۴
E/R	۱۶۵۱/۶	۱۲۹۸/۵۸	۳۳۰۱/۱۵	۷۵۷۴/۱۸۵	۴۴۴۸/۵۷	۳۳۰۱/۱۵
R-square	۰/۹۲۵	۰/۹۰۷	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۳۸	۰/۹۷
%AAE*	۱۳/۵	۱۴/۴۲	۱۶/۸۶	۱۴/۸	۱۵/۵۶	۷/۶۱

*Absolute Average Error

جدول ۳. نتایج به دست آمده برای $m' \cdot 10^6$ (kg/m².s) از معادلات مربوط به در نظر گرفتن ترم تنش در ترم نرخ

حذف

test	experimental	Eq5-T _{wall}	Eq5-T _{film}	Eq6-T _{wall} $\beta=-0.66$	Eq6-T _{film} $\beta=-0.8$	Eq6-T _{wall} $\beta=-0.66$	Eq6-T _{wall} $\beta=-0.8$
۱	۹/۵۸	۹/۳۶	۹/۴۱	۸/۶۹	۹/۰۳	۸/۶۸	۹/۰۵
۲	۵	۵/۵۵	۵/۴۸	۵/۸۶	۵/۷۴	۵/۸۵	۵/۷۷
۳	۳/۳۳	۲/۹۶	۲/۹۰	۳/۴۱	۳/۲۰	۳/۴۰	۳/۲۳
۴	۲/۰۸	۲/۲۰	۲/۱۹	۲/۲۴	۲/۲۱	۲/۲۴	۲/۲۷
۵	۱/۶۷	۱/۶۰	۱/۶۵	۱/۰۵	۱/۲۹	۱/۰۶	۱/۳۸
۶	۱/۹۵	۲/۶۶	۲/۷۷	۲/۶۵	۲/۷۰	۲/۴۹	۲/۰۶
۷	۲/۴۵	۲/۷۹	۲/۸۳	۲/۹۷	۲/۹۱	۲/۸۷	۲/۵۴
۸	۴/۱۰	۳/۱۵	۲/۹۷	۳/۹۲	۳/۵۳	۴/۰۷	۴/۱۶



شکل ۲. نتایج به دست آمده برای $m' \cdot 10^6$ (kg/m².s) از معادلات مربوط به در نظر گرفتن ترم تنش در ترم نرخ

حذف

نتایج برازش داده‌ها برای هنگامی که ترم رسوب وابسته به انتقال جرم باشد در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول پارمترهای به دست آمده از برازش داده‌ها نشان داده شده است. برای مقایسه معادلات با هم، ترم های AAE و R-square نیز محاسبه شده اند. دمای به کار رفته در معادله ۸ دمای دیواره است. در این کار برای اندازه‌گیری معادله ۸ از دمای دیواره و دمای فیلم استفاده شده است. چنین روندی برای معادله

(۸) نیز در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نتایج این برازش نشان می‌دهد استفاده از دمای فیلم برای معادله (۷) باعث شده که متوسط خطای مطلق افزایش یابد و از حدود ۵/۵ به حدود ۹ درصد برسد. استفاده کردن از دمای دیواره به جای دمای فیلم منجر به افزایش خطای متوسط مدل شده است ولی با توجه ماهیت معادله ۹ (که بر مبنای استفاده از دمای فیلم می باشد) روندی معکوس برای نتایج به دست آمده که نشان دهنده بهتر بودن استفاده از دمای فیلم در معادله می باشد. همچنین مقایسه نتایج بین معادله ۸ و ۹ (برای دمای دیواره) نشان می دهد که حذف عدد پرانتل از معادله ۸ باعث کاهش انطاف پذیری آن برای منطبق شدن بر داده‌های آزمایشگاهی و در نهایت افزایش خطای نسبی در معادله ۹ شده است. جدول ۵ و شکل ۳ نرخ رسوب را برای شرایط عملیاتی مختلف با استفاده از معادلات (۷) و (۸) نشان می‌دهد.

محاسبه متوسط خطای مطلق دو روش نشان می‌دهند که این مقدار برای معادلات رسوب‌گذاری استفاده شده از تنش برشی (در ترم حذف رسوب از روی دیواره) برابر با ۱۳/۷۹ و برای مدل‌هایی که ترم حذف رسوب از روی دیواره بر پایه انتقال جرم است، برابر با ۸/۲۲ می باشد. با مقایسه متوسط خطای مطلق می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های دسته دوم برای پیش‌بینی نرخ تشکیل رسوب روی دیواره مناسب‌تر می‌باشند.

جدول ۴. محاسبه پارامترهای معادلات رسوب‌گذاری مربوط به در نظر گرفتن ترم انتقال جرم در ترم نرخ حذف

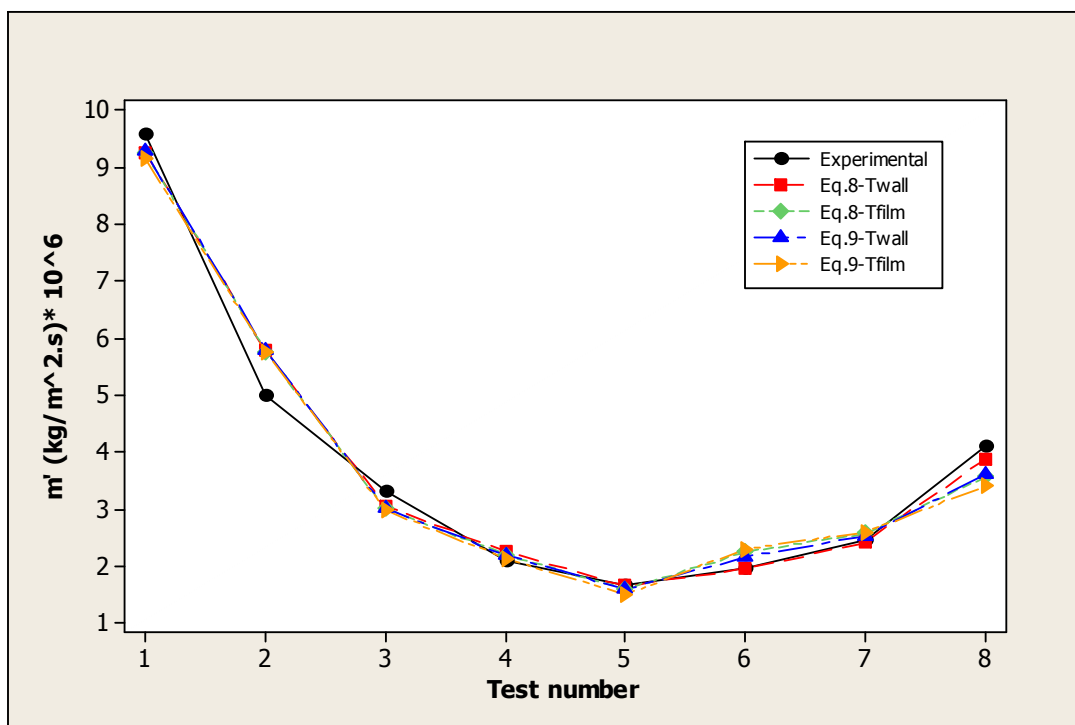
	Eq.8-T _{wall}	Eq.8-T _{film}	Eq.9-T _{wall}	Eq.9-T _{film}
α	۳۸۶۲۹/۸	۵۶۹۲۷۵/۶۶	۰/۸۲۴	۴۴۰۱۲/۴۵
β			۰/۶۸۸	۰/۷۲
$\gamma \times 10^{11}$	۲/۳۷	۹/۳	۹۶۰	۸۲۷
E/R	۱۶۳۹/۷	۶۷۹۲/۶۸	۲۵۵۳/۵	۶۴۱۳/۸۵
R-square	۰/۹۷	۰/۹۶۵	۰/۹۴۳	۰/۹۵۸
%AAE*	۵/۵۵	۸/۹۳	۱۰/۳۷	۸/۰۶

*Absolute Average Error

جدول ۵. نتایج به دست آمده برای $10^{-6} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ از معادلات مربوط به در نظر گرفتن ترم انتقال جرم در ترم

نرخ حذف

test	Experimental	Eq.8-T _{wall}	Eq.8-T _{film}	Eq.9-T _{wall}	Eq.9-T _{film}
۱	۹/۵۸	۹/۲۵	۹/۲۵	۹/۲۶	۹/۱۴
۲	۹	۵/۷۷	۵/۷۶	۵/۷۹	۵/۷۶
۳	۳/۳۳	۳/۰۵	۳/۰۱	۳/۰۱	۲/۹۷
۴	۲/۰۸	۲/۲۵	۲/۲	۲/۱۹	۲/۱۳
۵	۱/۶۷	۱/۶۵	۱/۵۹	۱/۵۹	۱/۵
۶	۱/۹۵	۱/۹۵	۲/۲۴	۲/۱۶	۲/۳
۷	۲/۴۵	۲/۴۱	۲/۵۷	۲/۵۲	۲/۵۹
۸	۴/۱	۳/۸۸	۳/۵۶	۳/۶۱	۳/۴۱



شکل ۳. نتایج به دست آمده برای $m' \times 10^6$ (kg/m².s) از معادلات مربوط به در نظر گرفتن ترم انتقال جرم در ترم

نتیجه گیری

رسوب آسفالتین یکی از مشکلاتی است که تقریباً در تمام چاه‌های نفت، تاسیسات فرایندی و انتقال نفت دیده می‌شود. هزینه مربوط به حذف این مواد به قدری زیاد است (خصوصاً در تسهیلات داخل دریا) که مهندسین طراح در مراحل اولیه طراحی واحد‌های شیمیایی عامل رسوب آسفالتین را به عنوان یکی از پارامترهای طراحی در نظر می‌گیرند. هدف از این کار ارائه مدلی برای پیش‌بینی رسوب آسفالتین در داخل لوله برای رژیم متلاطم می‌باشد. مدل‌هایی که برای اندازه‌گیری نرخ رسوب استفاده شده مدل‌های رسوب‌گذاری در مبدل‌های حرارتی هستند. ترم تشکیل رسوب در همه مدل‌ها تقریباً یکسان است ولی ترم دفع رسوب به دو شکل ارائه شده که در یکسری این ترم به صورت عبارتی وابسته به تنش برشی روی دیواره است و در سری دوم این ترم عبارتی وابسته به انتقال جرم می‌باشد. مدل‌های ارائه شده به خوبی تاثیر پارامترهای عملیاتی مانند سرعت، دمای نفت و دمای سطح لوله بر نرخ رسوب تشکیل شده را نشان داده و مقدار رسوب را پیش‌بینی می‌کند. نتایج برازش مدل‌ها نشان داد که مدل‌ها به خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق هستند. مقایسه متوسط خطای مطلق نتایج نشان می‌دهد که مدل‌هایی که ترم حذف رسوب آن‌ها بر پایه انتقال جرم هستند متوسط خطای مطلق (۸/۲۲) کم‌تری نسبت به معادلاتی که ترم حذف رسوب بر اساس تنش برشی (۱۳/۷۹) است، دارند. بنابراین استفاده از این مدل‌ها پیشنهاد می‌شود.



منابع

- [1]Deepstar, I.P., Flow Assurance Design Guideline. Deepstar IV Project, 2001. DSIV CTR 4203b.
- [2]Kokal, S., et al., Electrokinetic and adsorption properties of asphaltenes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol 94(2-3), 1995, pp. 253-265.
- [3]Kord, S., et al., Asphaltene Deposition in Carbonate Rocks: Experimental Investigation and Numerical Simulation. Energy & Fuels, 2012.
- [4]Zanganeh, P., S. Ayatollahi, and e. al, Asphaltene Deposition during CO₂ Injection and Pressure Depletion: a Visual Study. Energy & Fuels, 26 (2), 2012, pp 1412-1419
- [5]Kabir, C. and A. Jamaluddin, Asphaltene characterization and mitigation in south Kuwait's Marrat reservoir. Old Production & Facilities, vol17(4), 2002, pp 251-258.
- [6]Kokal, S., A. Al-Ghamdi, and D. Krinis, Asphaltene Precipitation in High Gas-Oil Ratio Wells. paper SPE, 2005. 81567.
- [7]Buckly, J S., Asphaltene deposition. Energy & Fuels, vol 26, 2012, pp 4086-4090.
- [8]Zougari M S., et al, Novel organic solid deposition and control device for live oils: design and applications. Energy and Fuels, vol 220, 2006, pp 1656-1663.
- [9]Peramanu, S., P.F. Clarke, and B.B. Pruden, Flow loop apparatus to study the effect of solvent, temperature and additives on asphaltene precipitation. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol 23(2), 1999, pp 133-143.
- [10]Leontaritis, K., Asphaltene Near-well-bore Formation Damage Modeling. Journal of Energy Resources Technology, vol 127, 2005, pp 191-200.
- [11]Soorghali, F., et al. Effect of resins on asphaltene deposition and the changes of surface properties at different pressures: A microstructure study. Energy & Fuels, vol 28, 2014, pp 2415-2421.
- [12]Salimi, F., et al., Experimental Investigation of the Effects of Different Parameters on the Rate of Asphaltene Deposition in Laminar Flow and Its Prediction Using Heat Transfer Approach. Journal of Dispersion Science and Technology, 34(12), 2013, pp.1690-1696.
- [13]Wang, J., J.S. ى, and J.L. Creek, Asphaltene deposition on metallic surfaces. Journal of Dispersion Science and Technology, vol 25(3), 2004, pp. 287-298.
- [14]Zougari, M., et al., Novel organic solids deposition and control device for live-oils: Design and applications. Energy Fuels, vol 20(4), 2006, pp 1656-1663.
- [15]Jamialahmadi, M., et al., Measurement and prediction of the rate of deposition of flocculated asphaltene particles from oil. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 52(19-20), 2009, pp 4624-4634.
- [16]Akbarzadeh, K., et al., Asphaltene Deposition Measurement and Modeling for Flow Assurance of Tubings and Flow Lines. Energy & Fuels, vol 26(1), 2011, pp. 495-510.
- [17]Kokal, S., et al., Electrokinetic and adsorption properties of asphaltenes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol 94(2-3), 1995, pp. 253-265.
- [18]Murgich, J., et al., A molecular mechanics-density functional study of the adsorption of fragments of asphaltenes and resins on the (001) surface of Fe₂O₃. Petroleum Science and Technology, vol 19(3-4), 2001, pp. 437-455.



- [19] Abraham, T., et al., Asphaltene- Silica Interactions in Aqueous Solutions: Direct Force Measurements Combined with Electrokinetic Studies. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol 41(9), 2002, pp 2170-2177.
- [20] Kern, D. and R. Seaton, A theoretical analysis of thermal surface fouling. *British Chemical Engineering*, vol 4(5), 1959, pp 258-262.
- [21] Crittenden, B. and S. Kolaczowski. Mass transfer and chemical kinetics in hydrocarbon fouling. in *Conf. on Fouling: Art or Science*. 1979.
- [22] Epstein, N. A model of the initial chemical reaction fouling rate for flow within a heated tube and its verification. in *institution of chemical engineers symposium series*. hemisphere publishing corporation, 1994.
- [23] Ebert, W. and C. Panchal, Analysis of Exxon crude-oil-slip stream coking data, Argonne National Lab., IL (United States). 1995.
- [24] Panchal, C., et al., Threshold conditions for crude oil fouling. *Understanding Heat Exchanger Fouling and its Mitigation*,” UEF/Begell House, New York, NY, 1999, pp 273-281.
- [25] Polley, G.T., et al., Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery pre-heat trains. *Applied Thermal Engineering*,. vol 22(7), 2002, pp 777-788.
- [26] Bott, T.R., *Fouling of heat exchangers*, Elsevier Science, Vol. 26. 1995
- [27] Crittenden, B.D., et al., Crude oil fouling in a pilot-scale parallel tube apparatus. *Heat Transfer Engineering*, vol 30(10-11), 2009, pp 777-785.
- [28] Yeap, B., et al., Retrofitting crude oil refinery heat exchanger networks to minimize fouling while maximizing heat recovery. *Heat transfer engineering*,.vol 26(1), 2005, pp. 23-34.
- [29] Nasr, M.R. and M. Givi, Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units. *Applied thermal engineering*,. vol 26(14), 2006, pp 1572-1577.
- [30] Saleh, Z.S., R. Sheikholeslami, and A. Watkinson, Fouling characteristics of a light Australian crude oil. *Heat transfer engineering*,. vol 26(1), 2005, pp .15-22.