

شبیه‌سازی یکپارچه فرایند تشکیل رسوب آسفالتین در دیواره چاه‌های نفتی

مهدی زینلی حسنونند^{۱،۲*}، سید علی موسوی دهقانی^۱، فرزانه فیضی^۲ و رضا مسیبی بهبهانی^۲

۱- گروه مدل‌سازی و توسعه نرم‌افزار، پردیس بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- گروه ترمودینامیک دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳- گروه گاز، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۳

چکیده

آسفالتین از جمله برش‌های سنگین نفت خام است که رسوب آن در ستون چاه‌های نفت سبب کاهش تولید، افزایش افت فشار و در نهایت توقف جریان نفت می‌شود. تعیین زمان، مکان و مقدار دقیق تشکیل رسوب از جمله نیازهای اصلی برای طراحی برنامه تولید از چاه است. فرایند تشکیل رسوب آسفالتین دارای سه جنبه ترمودینامیکی، سینتیکی و پدیده‌های انتقال است که مدلسازی فرایند رسوب نیازمند شناخت دقیق این سه جنبه است. تغییر فاز آسفالتین تابعی از زمان و شرایط ترمودینامیکی آن است. از سوی دیگر حرکت نفت در ستون چاه با انتقال حرارت و افت فشار همچنین تشکیل فاز گاز همراه است. مدلسازی ترمودینامیکی فرایند رسوب، استفاده صحیح از رابطه سینتیکی و ادغام آنها با معادلات حرکت و حرارت سبب پیچیدگی مدل‌سازی تشکیل رسوب در ستون چاه شده است. در این مطالعه داده‌های تولیدی یک چاه نفتی ایرانی در بازه زمانی ۸ ساله مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا با انجام آزمایش‌های تعادل فاز و مدل ترمودینامیکی جامد، رفتار ترمودینامیکی آسفالتین مدل‌سازی شده است. سپس تغییرات دما و فشار را در چاه با استفاده از معادله حرکت و معادله انتقال حرارت مدل‌سازی شد. در نهایت علاوه بر ادغام معادلات تعادل ترمودینامیکی و انتقال، از رابطه سینتیکی به عنوان رابطه تصحیح کننده برای مدل‌سازی نتایج میدانی استفاده شد. مدل ارائه شده می‌تواند هر سه ویژگی زمان، مکان تشکیل و مقدار رسوب را به خوبی پیش‌بینی کند.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی ترمودینامیکی، ترسیب آسفالتین، ستون چاه، پدیده‌های انتقال، سینتیک ترسیب

مقدمه

می‌تواند وضعیت رسوب در ستون چاه را نشان دهد [۵ و ۶].

رامیرز و همکاران مدل انتقال حرارت، انتقال مومنتوم و تعادل فازی را برای یک سیستم چندجزئی و چندفازی را به منظور مدل‌سازی نشست در ستون چاه ارائه دادند. در این مدل دو عامل نفوذ مولکولی و برش^۵ به ترتیب به عنوان عامل تسهیل کننده و ممانعت کننده ایجاد رسوب در نظر گرفته شده بود. آنها تغییرات مقدار رسوب را نسبت به دبی جریان و قطر چاه بررسی کردند [۷]. سولگانی و همکاران فرآیند ایجاد رسوب در یک سیستم آزمایشگاهی را بررسی کردند. در این دستگاه مقدار رسوب ایجاد شده تابعی از ضریب انتقال حرارت سیال و لوله در نظر گرفته شد [۸]. این گروه با اندکی تفاوت نقطه تشکیل آسفالتین را بین ناحیه ایجاد رسوب و نقطه تعادل شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی می‌داند. در ادامه مطالعه این گروه در سال ۲۰۰۹ اثر سه عامل گرانشی، دمای سطح و غلظت بر روی فرآیند ترسیب در ستون چاه بررسی کردند. در نهایت نتایج این تحقیق در مقیاس میدانی برای یک نمونه از چاه‌های تولیدی بررسی شد که به تخمین زمان ایجاد رسوب و مقدار رسوب در ستون می‌پرداخت [۹].

اسکوبدو و منصوری با بررسی سه عامل نفوذ مولکولی، نفوذ ادی و اینرسی در فرآیند رسوب آسفالتین مدلی برای ترسیب آسفالتین در ستون چاه ارائه دادند. این مدل در محدوده تک فازی و توربولنت چاه که تغییرات چگالی و گرانشی نسبت به طول ناچیز است کاربرد دارد. آنها در این مطالعه اثر قطر ذرات، گرانشی و سرعت تولید نفت را بر تغییر ضریب نشست^۱ بررسی کردند [۲].

تشکیل رسوب در ستون چاه سبب افزایش افت فشار، کاهش دبی نفت و کاهش بهره‌دهی چاه می‌شود. تعیین زمان دقیق تشکیل رسوب، مقدار و مکان آن می‌تواند سبب تولید نفت با سناریوهای کم هزینه‌تر شود. در طول ستون چاه افت دما، فشار و جداسدن گاز از نفت سبب ناپایداری آسفالتین و جداسازی آن از فاز مایع می‌شود. آسفالتین به دلیل خاصیت فعال سطحی^۱ بودن و قطبی بودن مولکول دارای سه مرحله تعلیق^۲، رسوب^۳ و نشست^۴ است [۱-۳].

فرآیند تشکیل رسوب در ستون چاه دارای سه جنبه اصلی است. از دیدگاه ترمودینامیکی نفت خام در ستون چاه تغییرات دما و فشار را تجربه می‌کند که سبب تغییر خواص فیزیکی و در نهایت تغییر فاز می‌شود. از این جنبه با داشتن مقدار ترکیب اولیه نفت و دما و فشار هر نقطه از چاه باید با استفاده از مدل ترمودینامیکی تعداد فازها و مقدار خواص ترمودینامیکی آن را تخمین زد. از جنبه دوم مقدار فشار و دمای سیال در ستون چاه با استفاده از معادلات حرکت و انتقال حرارت مشخص می‌شوند. از جنبه سوم نیز فرآیند تغییر فاز آسفالتین به صورت آبی رخ نمی‌دهد و تابعی از زمان است. لذا نباید انتظار داشت که مکان تشکیل رسوب الزاماً در نقطه‌ای باشد که از جنبه ترمودینامیکی فاز جامد در آن پایدار باشد.

موضوع تشکیل رسوب آسفالتین در ستون چاه‌های تولیدی نفت ابتدا توسط هسکت و ترتا مطرح شد [۴]. وی موضوع تشکیل رسوب در ستون چاه‌های تولیدی میدان حسی مسعود را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که رسوب در ستون چاه بعد از نقطه تشکیل حباب ایجاد نمی‌شود. تئور و همکاران و الکفاف و همکاران به این نتیجه رسیدند که رسوب در ناحیه‌ای بین فشار بالایی تشکیل رسوب و فشار حباب تشکیل می‌شود. این گروه همچنین به این نتیجه رسیدند که داده‌های فشار سرچاهی به خوبی

1. Surface Activated Compounds
2. Fluctuation
3. Precipitation
4. Deposition
5. Shear Removal

مدل‌سازی

در ستون چاه باید سه فرآیند تعادل ترمودینامیکی، تغییرات فشار و دما نسبت به طول و سرعت تشکیل رسوب را همزمان مدل‌سازی کرد.

مدل‌سازی ترمودینامیکی

برای مدل‌سازی ترمودینامیکی آسفالتین چهار دسته مدل انحلال مولکولی، مدل جامد خالص، مدل تئوری سیال تجمعی آماری^۲ و مدل قیاسی پیشنهاد شده است [۱۷-۲۴].

در این مطالعه از مدل جامد اصلاح شده به دلیل سادگی، دقت بالا و سرعت محاسبات استفاده می‌کنیم. در مدل اصلاح شده آسفالتین به صورت یک شبه جزء مستقل در ترکیب نفت تعریف می‌شود. تعادل ترمودینامیکی برابر با کمترین سطح انرژی آزاد گیبس در نظر گرفته می‌شود لذا برای بیان تعادل ترمودینامیکی باید فوگاسیته هر یک از اجزا در فازهای مختلف برابر باشد. رابطه ۱ این مفهوم را بیان می‌کند.

$$f_i^S = f_i^L = f_i^G \quad (1)$$

که در آن G، L و S به ترتیب فوگاسیته جزء i در فازهای مایع، گاز و جامد است. در مدل پیشنهادی مقدار فوگاسیته فازهای مایع و جامد را با استفاده از رابطه ضریب فوگاسیته، به وسیله معادله حالت پنگ-رابینسون اصلاح شده محاسبه می‌کنیم [۲۵]. مقدار فوگاسیته جامد نیز با استفاده از رابطه ۲ نسبت به فوگاسیته مایع در نقطه شروع تشکیل آسفالتین به دست می‌آید [۱۹].

$$f_i^S(P, T) = f_i^L(P_{onset}, T_{onset}) \times \left[\frac{\Delta h_{asp}^{fusion}}{RT_{onset}} \left(1 - \frac{T_{onset}}{T} \right) + \frac{\Delta C_i}{R} \left(\ln \left(\frac{T_{onset}}{T} \right) - T_{triple} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{onset}} \right) \right) \right] + \frac{v_{asp}}{R} \times \left(\frac{P - P_{triple}}{T} - \frac{P_{onset} - P_{triple}}{T_{onset}} \right) \quad (2)$$

محاسبه همزمان مقدار فوگاسیته در هر سه فاز به صورت سعی و خطا انجام می‌شود. به همین

شیردل و همکاران مدل‌های مختلف ترسیب آسفالتین در لوله را با هم مقایسه کرد. آنها مدل‌های فریدلندر و جانسون، بیل، کلیور و یت و اسکوبدو و منصوری را با در نظر گرفتن دو پدیده انتقال مومنتوم و انتقال جرم که به صورت سه پدیده نفوذ مولکولی، بهم چسبیدن و برش خود را نشان می‌دهد بررسی کردند [۱۰-۱۳]. در نهایت آنها مدل‌های بیل و اسکوبدو و منصوری را به دلیل جامعیت بیشتر، برای مدل‌سازی رسوب در ستون چاه پیشنهاد دادند [۱۴].

موسوی دهقانی و همکاران با مدل‌سازی نیروهای موثر بر دیپازیت ذرات آسفالتین موجود در جریان نفت در یک لوله افقی فرآیند دیپازیت را مدل‌سازی کردند. آنها چهار نیروی اصلی حرکت برون، درآگ، گرانش، ترموفوریسیز^۲، بایونسی و برشی را به عنوان نیروهای موثر در دیپازیت آسفالتین تعریف کردند [۱۵]. تبیش مقبول نشان داد که ترسیب آسفالتین تابعی از زمان است. به این معنا که حدود ۱ hr بعد از رسیدن به شرایط ترمودینامیکی مولکول‌های آسفالتین به صورت اجزای با قطر یک میکرومتر از فاز مایع جدا می‌شوند. توزیع اندازه ذرات جامد نیز دارای یک الگوی نرمال است. بنابراین استفاده از مدل‌های ترمودینامیکی در کنار مدل‌های حرکت باید با در نظر گرفتن جنبه سینتیکی فرآیند رسوب آسفالتین در نظر گرفته شود. [۱۶].

در این مطالعه ابتدا آزمایش‌های تعادل ترمودینامیکی بر روی یکی از نفت‌های سبک جنوب غرب ایران صورت گرفت. با استفاده از مدل جامد تعادل ترمودینامیکی جامد-مایع-گاز مدل‌سازی شد. سپس اطلاعات تولید یکی از چاه‌های تولیدی میدانی ایرانی را بررسی شد و مدل ترسیب رسوب را با استفاده از ادغام مدل‌های ترمودینامیکی و انتقال به دست آمد. برای مدل‌سازی حرکت دو فاز از مدل تجربی داس و راس استفاده شده است و برای مدل انتقال جرم و تعیین ضریب نشست از رابطه اسکوبدو و منصوری استفاده شده است.

1. Deposition
2. Thermophoresis
3. The statistical Association Fluid Theory (SAFT)

شده است. برای اطلاع دقیق از شرح روابط به مقاله دانز و راس رجوع شود [۲۹].

ضریب انتقال حرارت کل تابعی از اندازه ضریب انتقال حرارت اجزای تشکیل دهنده لوله، سیال و زمین است. افت حرارت همرفتی در سطح تماس سیال و دیواره داخلی لوله وجود دارد. افت حرارت رسانشی در سطح داخلی لوله و دیواره خارجی آن وجود دارد. و در نهایت انتقال حرارت رسانشی بین سطح خارجی لوله و زمین ایجاد می‌شود (شکل ۱). به صورت کلی مقدار ضریب انتقال حرارت کل برابر با معکوس مجموع مقاومت حرارتی اجزای تشکیل دهنده چاه است.

$$U = \frac{1}{R_g + R_p + R_f} \quad (۶)$$

در این رابطه R_p ، R_g و R_f به ترتیب مقاومت حرارتی رسانش بین لوله و زمین، مقاومت حرارتی رسانش در داخل لوله و مقاومت حرارتی همرفت بین سیال و لوله است [۳۲].

در جریان دوفازی مقاومت گرمایی زمین مهمترین عامل مقاوم در برابر انتقال حرارت است. [۲۸]. لازم به ذکر است که در اینجا انتقال حرارت تنها در جهت شعاعی بررسی شده است و از انتقال حرارت هدایتی سیال در جهت حرکت به دلیل سرعت بالای سیال در ستون چاه صرف نظر شده است.

مدل سازی انتقال جرم

فرآیند تشکیل رسوب آسفالتین در نفت خام به صورت طبیعی چند مرحله دارد. در مرحله اول با رسیدن به تعادل ترمودینامیکی دما و فشار، سیال آمادگی تغییر فاز مولکول‌های آسفالتین از مایع به گاز را ایجاد می‌کند. ابتدا آسفالتین به صورت چند مولکول جامد به هم چسبیده و تولید دانه‌هایی با اندازه چند ده نانومتر می‌کنند. این دانه‌های اولیه به دلیل کوچکی و حضور مولکول‌های رزین در اطراف آنها به صورت معلق در نفت خام قرار دارند. از این مرحله به عنوان مرحله تعلیق رسوب نام می‌برند.

منظور در هر مرحله درصد ترکیب اجزا در فاز گاز و مایع با استفاده از الگوریتم رچفورد-رایس تصحیح می‌شود [۲۶]. به دلیل سه فازی بودن تعادل، رابطه رچفورد-رایس برای تعیین مقدار اجزا در فازهای مایع و گاز به صورت زیر تصحیح می‌شود:

$$x_i = \frac{z_i}{1 - n^s + (K_i - 1)n^G} \quad (۳)$$

$$y_i = \frac{z_i K_i}{1 - n^s + (K_i - 1)n^G} \quad (۴)$$

که در این رابطه‌ها x_i درصد مولی جز i در فاز مایع، y_i درصد مولی جز i در فاز گاز، z_i درصد مولی خوراک، K_i نسبت تعادل جزء i در فازهای گاز و مایع، n^G درصد مولی فاز گاز و n^s درصد مولی فاز جامد است.

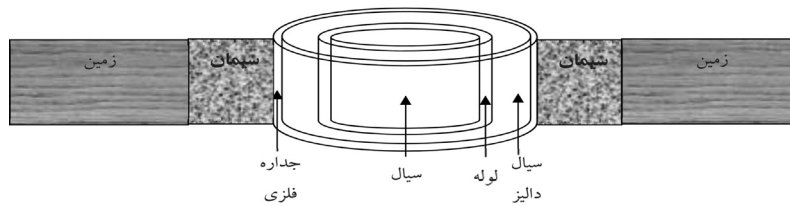
مدل سازی انتقال مومنتوم و حرارت

نفت در مسیر تولید از دو بخش اصلی مخزن و چاه می‌گذرد. حرکت نفت در مخزن از رابطه تجربی دارسی و قانون حرکت سیالات در محیط متخلخل پیروی می‌کند. رابطه دارسی در جهت شعاعی به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۷]:

$$q = \frac{Kh}{\mu} \frac{P_e - P_w}{Ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (۵)$$

در این رابطه K ، μ ، h ، q و P به ترتیب تراوایی سنگ، ضخامت سنگ مخزن، گرانیوی سیال، شعاع، دبی سیال و فشار است. زیروندهای e و w بیانگر مقدار در شعاع خارجی مخزن و شعاع چاه است. در حرکت سیال در ستون چاه با توجه به نسبت حجمی گاز به مایع می‌تواند به یکی از صورت‌های جریان حبابی، لخته‌ای، حلقوی، قطره‌ای و گذرا تبدیل شود. مدل‌های مختلفی برای تخمین افت فشار در جریان دوفازی ارائه شده است از جمله مدل بگز و بریل برای خطوط لوله افقی [۲۸]، مدل داس و راس برای نفت‌های سبک [۲۹]، مدل گری برای چاه‌های گازی، مدل هاگدورن براون برای رژیم جریان لخته‌ای [۳۰] و مدل اورکیزوسکی است [۳۱].

با توجه به سبک بودن نفت مورد مطالعه و نسبت گاز به نفت بالای آن، در این مقاله از مدل داس و راس به عنوان مدل مناسب جریان دوفازی استفاده



شکل ۱ ساختار دیواره چاه و لایه‌های مختلف اطراف آن.

جریان و دیواره، K ، ضریب نفوذ، V_{avg} ، سرعت متوسط جریان، Sc ، عدد بدون بعد اشمیت^۳ و D_i^* ، فاصله بدون بعد دیواره تا نقطه‌ای که دارای سرعت میانگین است. ثابت‌های F_1 و F_2 شاخصی از انتقال جرم در زیر لایه خطی است، F_3 شاخص از حرکت در ناحیه بافتری است و F_5 نیز شاخصی از انتقال جرم ذرات جامد با طول توقف بدون بعد کمتر از ۵ در ناحیه توربولنت است. ثابت‌های ذکر شده به نوبه خود تابعی از طول توقف، عدد اشمیت و خواص فیزیکی و جریانی سیال و ذره هستند. طبق تعریف مقدار ضریب نفوذ، مقدار جامد تشکیل شده در سطح برابر است با:

$$K = \frac{N_p}{C_{avg} - C_{wall}} \quad (8)$$

$$n_s^{deposited} = N_p \times \pi D \times \Delta L \times \Delta t = \pi DK (C_{avg} - C_{wall}) \frac{(\Delta L)^2}{V_{avg}} \quad (9)$$

که در این رابطه N_p شار مولی ذرات جامد، C_{avg} و C_{wall} غلظت مولی آسفالتین در سیال و روی دیواره و $n_s^{deposited}$ مقدار مول آسفالتین چسبیده به دیواره لوله است. حال با توجه به مدل ترمودینامیکی جامد که رسوب آسفالتین را ماده‌ای خالص با جرم مولکولی و چگالی مشخص تعریف می‌کند. مقدار تغییرات قطر در هر مقطع از لوله از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$D_i^2 - D_{i+1}^2 = \frac{\epsilon}{\pi \Delta L} \times \frac{n_s^{deposited} \times Mw_{asp}}{\rho_{asp}} \quad (10)$$

که در این رابطه Mw_{asp} جرم مولکولی آسفالتین، ρ_{asp} چگالی آسفالتین، D_i قطر داخلی لوله قبل از جریان نفت و D_{i+1} قطر داخلی لوله پس از چسبیدن آسفالتین است.

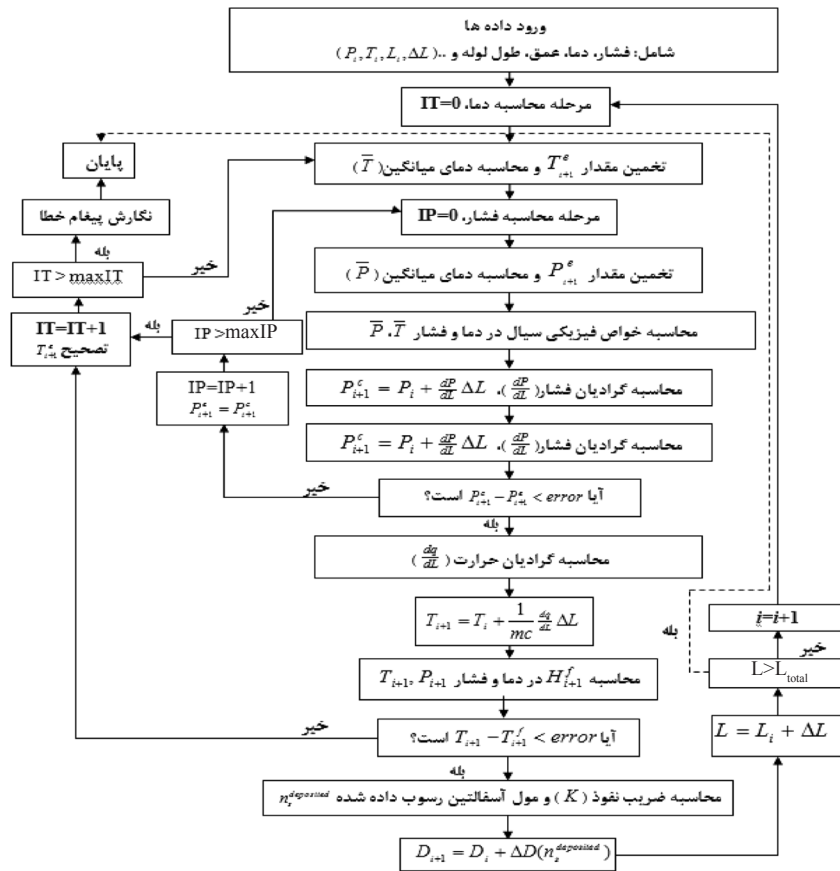
با گذشت زمان و در اثر دو عامل برخورد دانه‌ها و رشد ذرات، اندازه ذرات آسفالتین بزرگ شده و به مقیاس میکرونی می‌رسند. اگر اندازه ذرات به حدی شود که محیط مایع توانایی تعلیق آن را نداشته باشد، ذرات آسفالتین شروع به ته نشینی و نشست^۱ می‌کنند [۳۳]. از سوی دیگر در محیط‌های در حال حرکت مانند خطوط لوله و چاه، مدت زمانی برای انتقال کلوخه‌های آسفالتین از محیط مایع به سمت دیواره و جذب به دیواره لازم است. با توجه به آشفته بودن جریان در ستون چاه کلوخه‌های آسفالتین برای تشکیل رسوب در دیواره باید از سه محیط آشفته، لایه بافتری و زیرلایه خطی گذر کنند. به دست آوردن مقدار ضریب نفوذ جامد در یک سیال با جریان آشفته دارای چالش‌هایی است که افراد مختلفی آن را مطالعه کرده‌اند [۱۰ و ۱۳]. عمده مطالعات انجام شده به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی قابل اعتماد آسفالتین، روی هوا و ذرات جامد فلزی^۲ صورت گرفته است. اسکوبدو مدلی برای تعیین ضریب نفوذ ذرات جامد در جریان آشفته معرفی کردند. این مدل براساس داده‌های مربوط به حرکت ذرات آلومینیوم و آهن در جریان هوا گسترش یافته است [۲ و ۳۴].

این مدل انتقال جرم در هر سه محدوده جریانی توربولنت، لایه بافتری و زیر لایه خطی را محاسبه می‌کند. آنها با انتگرال گیری از رابطه ون کارمن در هر سه زیر لایه اصلی، مقدار نسبت شار جریان به تغییرات غلظت را به صورت رابطه کلی زیر ارائه دادند.

$$K = (V_{avg} \sqrt{f/2}) \times \left[\frac{11.15 Sc^{1/2}}{3} F_1 + \frac{2(11.15)^2 Sc^{1/2}}{3 D_i^*} F_2 + 11.4 \left| \frac{Sc}{1 - 0.1923 Sc} \right|^{0.5} F_3 + F_4 \right]^{-1} \quad (7)$$

که در این رابطه و به ترتیب f ، ضریب اصطکاک

1. Deposition
2. Aerosol
3. Schmidt Number



شکل ۲ الگوریتم محاسبات مربوط به اندازه گیری مقدار رسوب ایجاد شده در ستون چاه.

الگوریتم محاسبات

با توجه به موارد گفته شده به منظور مدل سازی فرآیند ایجاد رسوب در ستون چاه باید معادلات تعادل ترمودینامیکی و معادلات مربوط به سه پدیده انتقال مومنتوم، انتقال حرارت و انتقال جرم حل شود. برای این اساس از الگوریتم موجود در شکل ۲ استفاده شده است. این الگوریتم محاسبات مربوط به یک گام زمانی را نشان می دهد. در گام های زمانی بعدی شرایط اولیه و خواص فیزیکی سیال ورودی به چاه ثابت می ماند اما قطر داخلی لوله با توجه به مقدار آسفالتین چسبیده شده تغییر می کند.

بحث و بررسی

به عنوان مطالعه موردی یکی از چاه های نفتی جنوب غرب ایران که از یک مخزن نفت سبک تولید می کند انتخاب شده است. این مخزن دارای فشار اولیه ۸۰۱۳ psi و دمای اولیه ۲۷۴/۳ °F است.

نفت تولیدی از این میدان دارای سنگینی ۳۸ درجه API است. چاه مورد مطالعه، طی دوران بهره برداری بارها دچار مشکل رسوب آسفالتین در ستون داخلی شده است. پس از هر بار توقف تولید، عملیات شستشوی^۱ چاه با استفاده از لوله مغزی^۲ و تزریق زایلین به عنوان حلال انجام شده است. چاه مورد مطالعه تا عمق ۴۴۱۳ m از سطح، حفاری شده است. ضخامت زمین به طول ۴۳ m است. تراوایی، تخلخل و درصد اشباع آب میانگین در این ناحیه به ترتیب ۲۰، ۱۶/۵ و ۱۹٪ است. چاه در واقع از ۳ بخش اصلی تشکیل شده است که این اجزا به ترتیب در جدول ۱ ارائه شده اند. حجم داخلی کل چاه برابر با ۳/۲۰۱ bbl است.

تهیه مدل ترمودینامیکی سیال

برای انجام مطالعات مربوط به تشکیل رسوب های هیدروکربنی سه دسته آزمایش روی این نفت صورت گرفته است.

1. Workover
2. Coil Tubing

جدول ۱ ناحیه‌های اصلی چاه مورد مطالعه براساس قطر داخلی.

| نوع اتصال | قطر خارجی (اینچ) | قطر داخلی (اینچ) | بازه عمقی (متر) | حجم داخلی ناحیه (بشکه) |
|-----------|------------------|------------------|-----------------|------------------------|
| Tubing | ۵/۵ | ۴/۵ | ۶۳/۲۲-۰ | ۳/۶ |
| Tubing | ۴/۵ | ۳/۸ | ۴۱۲۵-۶۳ | ۱۸۶/۸ |
| Liner | ۵ | ۴/۳ | ۴۳۱۸-۴۱۲۵ | ۱۰/۹ |

درصد وزنی آسفالتین با استفاده از روش آزمایش فیلتراسیون و آزمایش گرانیروی در دمای مخزن در جدول ۴ ارائه شده است. رفتار ترمودینامیکی آسفالتین در نفت خام و تهیه مدل تعادلی جامد-مایع-گاز مراحل زیر انجام شد:

- تعریف آسفالتین به عنوان یک جزء مستقل در اجزای اصلی نفت خام و تصحیح خواص جزء سنگین (C_{12+}) با فرض ایده‌آل بودن انحلال آسفالتین در آن.
- شبیه‌سازی رفتار تعادلی گاز - مایع از طریق تنظیم خواص اجزای سنگین مانند C_{10} , C_{11} , C_{12+} و Asp
- تعیین خواص آسفالتین در نقطه تشکیل رسوب مانند فوگاسیته مبنا و حجم مولی آن
- تنظیم مقدار حجم مولی آسفالتین و ضریب برهمکنش آن با اجزای سبک مانند متان تا بوتان. به منظور تعیین کارایی مدل ابتدا آزمایش‌های انبساط در حجم ثابت و انبساط در جرم ثابت را برای نمونه نفت مدل‌سازی کردیم. برای این کار از بانک داده نرم‌افزار شبیه‌سازی CMG استفاده شد.

این آزمایش‌ها شامل الف-آزمایش‌های شناسایی ترکیبات نفت خام، ب-آزمایش‌های مربوط به تعیین خواص نفت خام، ج-آزمایش‌های مربوط به تعیین خواص رسوب آسفالتین است. به منظور شناسایی نقطه تشکیل آسفالتین از دو روش نور نزدیک به زیرقرمز به وسیله سیستم تشخیص ذرات جامد^۱ و فیلتراسیون ذرات تحت فشار استفاده شد. خلاصه‌ای از نتایج مربوط به آزمایش‌های انبساط نفت زنده شامل انبساط در جرم ثابت و انبساط در حجم ثابت در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج آزمایش تفکیک برش‌های اشباع، آروماتیک، رزین و آسفالتین به تفکیک در جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج نشان‌دهنده شاخص ناپایداری کلوئیدی^۲ [۳۵] بالای مولکول آسفالتین در این نفت است. به منظور تعیین فشار اولیه تشکیل رسوب از سیستم تشخیص جامد استفاده شد. نتایج تغییرات توان نوری گیرنده سیستم تشخیص جامد نسبت به فشار برای نمونه نفت سبک فشار ۴۲/۳۲ Mpa را به عنوان فشار آغاز تغییر فاز از مایع به جامد نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری

جدول ۲ خصوصیات اصلی نفت مورد مطالعه.

| خاصیت | واحد | نفت سبک |
|--------------------------|--------------|-----------|
| دمای مخزن | K | ۴۰.۸/۴ |
| فشار مخزن | MPa | ۶۵/۹۰ |
| فشار حباب | MPa | ۲۵/۶۶ |
| نسبت گاز به نفت | m^3/m^3 | ۲۵۵/۹ |
| ضریب حجمی سازند نفت | Rm^3/Sm^3 | ۱/۹۵ |
| درجه سنگینی نفت مرده | °API | ۳۳/۷۹ |
| ضریب انبساط گرمایی* | $(K)^{-1}$ | ۴-۱۰×۲/۲۳ |
| ضریب تراکم پذیری | $(kPa)^{-1}$ | ۶-۱۰×۲/۰۱ |
| گرانروی نفت در فشار حباب | MPa.S | ۰/۲۴۰۹ |
| گرانروی نفت در فشار مخزن | MPa.S | ۰/۳۵۴۵ |

* برابر با تغییرات حجم، معادل تغییرات حجم نسبت به دما نسبت به حجم اولیه

جدول ۳ نتایج آزمایش تعیین برش‌های اصلی نفت به همراه مقدار ناپایداری کلئیدی روی نمونه نفت.

| نوع نفت | اشباع | آروماتیک | رزین | آسفالتین | شاخص ناپایداری کلئیدی |
|---------|-------|----------|------|----------|-----------------------|
| سیک | ۶۴/۹ | ۲۹/۱ | ۵/۱ | ۰/۹ | ۱/۹۲ |

جدول ۴ تغییرات درصد وزنی آسفالتین رسوب کرده با دو روش فیلتراسیون و گرانیوی سنجی در دمای مخزن

| فشار، MPa | (روش فیلتراسیون)، %wt | فشار، MPa | (روش گرانیوی)، %wt |
|-----------|-----------------------|-----------|--------------------|
| ۴۸/۲۶ | ۰/۰۰ | ۴۲/۹۵ | ۰/۰۰ |
| ۳۷/۹۲ | ۰/۱۱ | ۴۱/۸۸ | ۰/۰۱ |
| ۲۶/۲۰ | ۰/۲۳ | ۳۴/۹۹ | ۰/۱۱ |
| ۲۰/۶۸ | ۰/۱۸ | ۲۱/۵۳ | ۰/۱۸ |
| ۱۳/۷۹ | ۰/۰۷ | ۲۸/۰۶ | ۰/۲۳ |
| | | ۲۵/۷۹ | ۰/۲۹ |

و تراکم‌پذیری بحرانی و ضریب بی‌مرکزی از روابط تجربی لی-کسلر (۱۹۷۶) استفاده شده است [۳۶]. نتایج نهایی مدل‌سازی رفتار فشار-حجم گاز و مایع به همراه مقدار خواص هر یک از برش‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

برای اصلاح نتایج مدل‌سازی و با نتایج آزمایشگاه از حجم مولی و ضریب برهمکنش استفاده می‌شود. مقدار بهینه حجم مولی و ضریب برهمکنش برای تنظیم رفتار آسفالتین مشخص شد که نتایج نهایی آن در جدول ۶ ارائه شده است. برای تعیین خواص جزء سنگین نفت مانند دما، فشار، حجم

جدول ۵ مقدار خواص فیزیکی اجزای نفت پس از انجام رگراسیون.

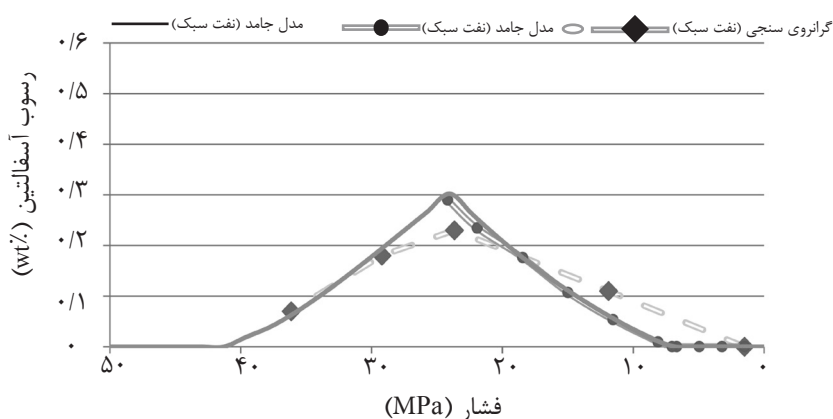
| اجزا | جرم مولکولی (mol) | فشار بحرانی (psia) | دمای بحرانی (°F) | اومگای A | اومگای B | ضریب بی‌مرکزی |
|------------------|-------------------|--------------------|------------------|----------|----------|---------------|
| N ₂ | ۲۸ | ۴۹۲/۳ | -۲۳۲/۵۱ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۰۴۰ |
| H ₂ S | ۳۴/۱ | ۱۲۹۶ | ۲۱۲/۸۱ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۱۰۰ |
| CO ₂ | ۴۴ | ۱۰۷۱ | ۰/۸۸۷۹ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۲۲۵ |
| C ₁ | ۱۶ | ۶۶۷/۸ | -۱۱۶/۵۹ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۰۱۳ |
| C ₂ | ۳۰/۱ | ۷۰۸/۳ | ۹۰/۱۰ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۰۹۸ |
| C ₃ | ۴۴/۱ | ۶۱۵/۸ | ۲۰۵/۹۷ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۱۵۲ |
| IC ₄ | ۵۸/۱ | ۵۲۹/۱ | ۲۷۴/۹۱ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۱۸۴ |
| NC ₄ | ۵۸/۱ | ۵۵۰/۷ | ۳۰۵/۶۹ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۲۰۱ |
| IC ₅ | ۷۲/۲ | ۴۹۱/۶ | ۳۶۹/۰۵ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۲۲۷ |
| NC ₅ | ۷۲/۲ | ۴۸۸/۸ | ۳۸۵/۶۱ | ۰/۴۵۷۲۴ | ۰/۰۷۷۷۹۶ | ۰/۲۵۱ |
| C ₆ | ۸۴ | ۴۳۶/۶ | ۴۵۳/۸۳ | ۰/۵۳۴۱ | ۰/۰۶۷۰۸۴ | ۰/۲۹۹ |
| C ₇ | ۹۶ | ۲۷۸/۴ | ۵۸۲/۶۳ | ۰/۶۱۴۲۸ | ۰/۰۴۹۹۳۳ | ۰/۶۵۸ |
| C ₈ | ۱۰۷ | ۲۷۲/۹ | ۶۳۳/۹۸ | ۰/۶۷۲/۵۸ | ۰/۰۵۴۹۷۸ | ۰/۶۸۴ |
| C ₉ | ۱۲۱ | ۲۴۹/۳ | ۶۸۷/۲۴ | ۰/۵۵۶۰۸ | ۰/۰۵۹۰۷۳ | ۰/۷۶۳ |
| C ₁₀ | ۱۳۴ | ۲۲۹/۳ | ۷۳۰/۹۹ | ۰/۵۱۹۸۵ | ۰/۰۶۵۱۱۹ | ۰/۸۴۴ |
| C ₁₁ | ۱۴۷ | ۲۱۱/۳ | ۷۷۲/۸۳ | ۰/۴۹۴۲۹ | ۰/۰۶۹۵۳۴ | ۰/۹۱۹ |
| C ₁₂₊ | ۳۹۸ | ۷۵/۵ | ۱۲۴۸/۷ | ۰/۳۱۴۹۵ | ۰/۰۶۸۲۲۶ | ۱/۷۷۶ |

جدول ۶ تعریف آسفالتین به عنوان یک جزء مستقل در ترکیب نفت و تصحیح خواص مرتبط با آن.

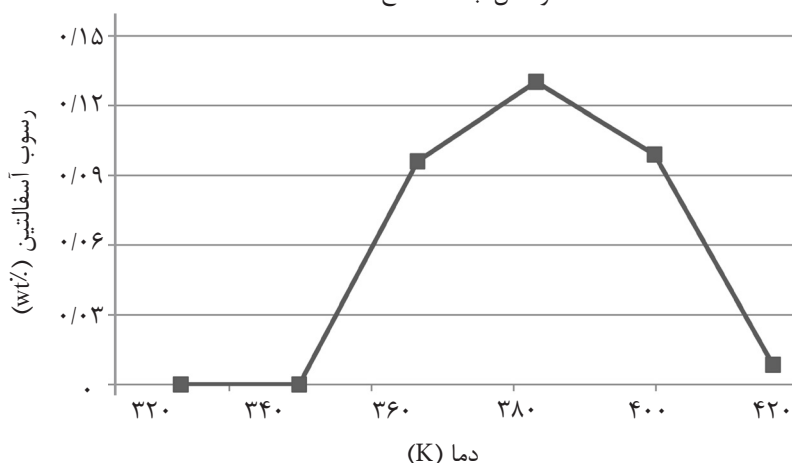
| خاصیت | درصد مولی آسفالتین | حجم مولی آسفالتین | ضریب برهم کنش آسفالتین-متان | ضریب برهم کنش آسفالتین-پوتان | آنتالپی ذوب آسفالتین | اختلاف ظرفیت حرارتی آسفالتین مایع و جامد | جرم مولکولی آسفالتین | دمای نقطه سه-گانه |
|-------|--------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------|--|----------------------|-------------------|
| واحد | % | (L/mol) | - | - | MJ/(kmol) | MJ/(kmol.K) | (g/mol) | (K) |
| مقدار | ۰/۰۵ | ۰/۶۰۵ | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۷۹۵ | ۰ | ۰/۰ | ۲۰۵۱ | ۴۱۸ |

نتایج نهایی مدل‌سازی رفتار آسفالتین نسبت به فشار و دما در نمونه نفت با استفاده از مدل جامد اصلاح شده در شکل ۳ و ۴ ارائه شده است. تهیه مدل انتقال حرارت و حرکت سیال

به منظور مدل‌سازی فرآیند انتقال حرارت و حرکت



شکل ۳ تغییرات درصد وزنی رسوب آسفالتین نسبت به فشار در دمای ۴۰۸ K با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فیلتراسیون و گرانروی و مدل جامد اصلاح شده

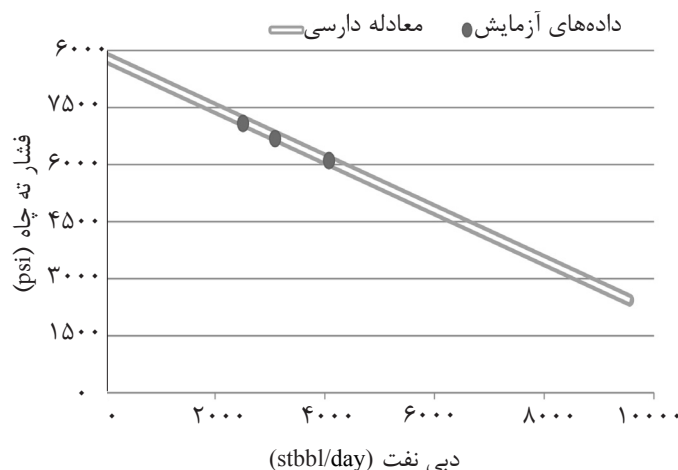


شکل ۴ تغییرات درصد وزنی رسوب آسفالتین نسبت به دما در فشار ۱۳/۷۹ Mpa با استفاده از مدل جامد اصلاح شده. جدول ۷ نتایج تغییرات فشار سرچاه و ته چاه در عملیات چاه‌آزمایی به ازای سه دبی مختلف.

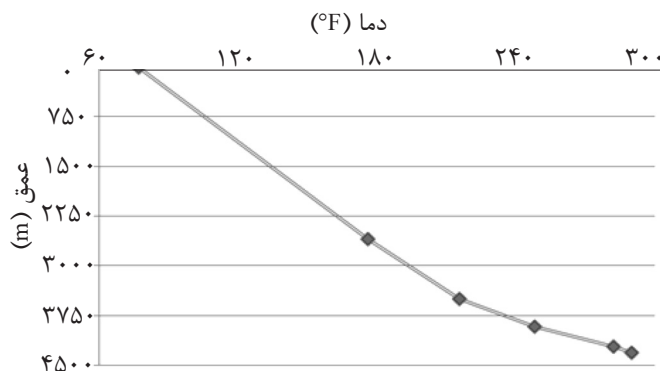
| نسبت گاز به نفت (scf/bbl) | دبی آب (bbl/day) | دبی گاز (mmscf/day) | دبی نفت (stb/day) | فشار ته چاه (psi) | فشار سرچاه (psi) | قطر شیر کاهنده |
|---------------------------|------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|
| ۱۲۱۷ | ۳۳۳ | ۲/۷۸ | ۲۵۰۹ | ۷۰۸۲ | ۳۲۰۱ | ۶۴/۲۴ |
| ۱۲۳۴ | ۴۱۸ | ۳/۴۴ | ۳۰۹۴ | ۶۶۸۵ | ۲۸۴۲ | ۶۴/۲۸ |
| ۱۲۸۰ | ۴۸۰ | ۴/۷۷ | ۴۰۷۶ | ۶۱۰۴ | ۲۱۹۵ | ۶۴/۳۶ |

برای انجام محاسبات ابتدا چاه را به ۶۸ قطعه تقسیم شد. ابتدا داده‌های جدول ۷ مربوط به سه دبی مختلف از چاه را که در ابتدای تولید از چاه طی یک عملیات چاه آزمایشی انجام شده بود را تهیه کردیم. دما و فشار ابتدا و انتهای چاه مشخص است. پروفایل دما زمین نسبت به عمق مشخص است. تنها مقدار نامعلوم مقدار ضریب هدایت حرارتی سیال و زمین (رابطه ۶) است که با استفاده از سعی و خطا برای این سه دبی محاسبه شد. سه ضریب به دست آمده نتایج ضریب انتقال حرارت مقدارهای ۴/۵۳، ۴/۱۴ و ۴/۲۸ بی تی یو در ساعت بر فوت مربع بر درجه فارنهایت است. از این رو مقدار ضریب انتقال حرارت کل از حدس اولیه ۳/۵۹ به ۴/۱۴ بی تی یو در ساعت بر فوت مربع بر درجه فارنهایت تصحیح شد.

با استفاده از رابطه داری رابطه ۵ و به ازای فشار اولیه مخزن معادل ۸۸۱۳ psi داده‌های مربوط به این سه دبی مدل می‌شود. نتایج تغییرات فشار ته چاه نسبت به دبی برای حرکت در محیط متخلخل مخزن در شکل ۵ نشان داده شده است. به منظور شبیه‌سازی انتقال مومنتوم و انتقال حرارت در ستون چاه، اطلاعات مربوط به ساختار چاه و تغییرات دما مشخص شود. تغییرات دما در لایه‌های مختلف زمین نسبت به عمق در شکل ۶ نشان داده شده است. با استفاده از الگوریتم موجود در شکل ۱ و با داشتن داده‌های طول و قطر چاه (جدول ۷) و تغییرات دمای زمین نسبت به عمق (شکل ۶)، افت فشار و افت دمای سیال در ستون چاه اندازه‌گیری شد.



شکل ۵ نمودار تغییرات فشار ته چاهی نسبت به دبی تولیدی نفت در چاه مورد مطالعه با استفاده از رابطه داری به همراه نتایج میدانی.



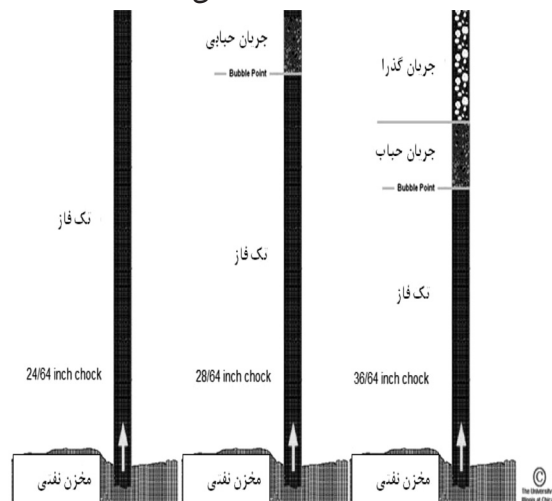
شکل ۶ نمودار تغییرات دمای زمین نسبت به عمق در چاه مورد مطالعه (برگرفته از گزارش‌های حفاری چاه)

براساس گزارش‌های میدانی به ازای تولید ۲۸۹۳ bbl،
 $20/1 \text{ m}^3$ آب تولید شده است. این مقدار کم (برش
 آب کمتر از ۰.۱٪) نیز به صورت یک نسبت عددی در
 دبی تولیدی و خواص فیزیکی نفت مانند چگالی و
 گرانشی در نظر گرفته شده است.

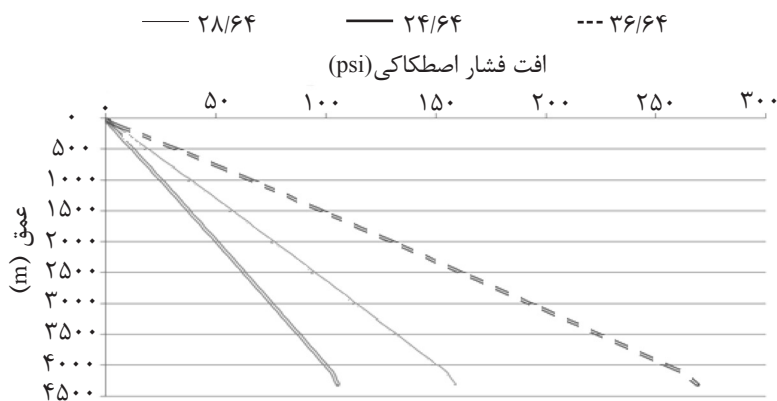
تهیه مدل انتقال جرم آسفالتین

در مدل اسکودو منسوری ضریب انتقال جرم تابعی
 از حرکت برونی و ادی تعریف شده است. بخش
 مربوط به حرکت برونی در زیرلایه خطی موثر
 است و بخش مربوط به حرکت ادی در ناحیه آشفته
 جریان موثر است. سرعت حرکت برونی ذرات تابعی
 از اندازه ذرات است که در مدل اسکودو و منسوری
 این تابعیت به صورت عدد بدون بعد ذره (S_d^*)
 نشان داده شده است.

در چاه مورد مطالعه به ازای فشار مخزن ۸۸۱۳ psi و
 شرایط تولید موجود در جدول ۷، مدل حرکت داس
 و راس با درصد خطای کمتر از ۱٪ فشار سر چاه را
 به ازای هر سه دبی ۲۵۰۹، ۳۰۹۴ و ۴۰۷۶ bbl در روز
 به درستی تخمین می‌زند. تغییرات رژیم جریان به
 ازای سه قطر مختلف شیر کاهنده در شکل ۷ ارائه
 شده است. تغییرات افت فشار در سه جریان مختلف
 نشان می‌دهد که افت فشار مربوط به اصطکاک با
 افزایش دبی به صورت مشخصی افزایش می‌یابد. از
 سوی دیگر افت فشار گرانشی بیش از ۹۰٪ از افت
 فشار را در هر سه جریان تشکیل می‌دهد. در شکل
 ۸ زیر تغییرات افت فشار اصطکاکی نسبت به عمق
 در هر سه دبی نشان داده شده است. در این چاه
 آب به مقدار کمی تولید می‌شود. به عنوان مثال



شکل ۷ نمودار تغییرات فشار جریان نسبت به عمق در چاه مورد مطالعه به ازای نصب شیرهای کاهنده مختلف (طرح شکل برگرفته از منبع [۳۴])



شکل ۸ نمودار تغییرات افت فشار اصطکاکی نسبت به عمق در دبی‌های مختلف.

کوپل معادلات پدیده‌های انتقال و تعادل ترمودینامیک

با استفاده از الگوریتم موجود در شکل ۲ محاسبات انتقال حرکت، حرارت و جرم را با مدل ترمودینامیکی حاصل از تعادل سه فاز جامد-مایع-گاز کوپل می‌کنیم.

با فرض تک فاز بودن سیال افت فشار اصطکاکی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

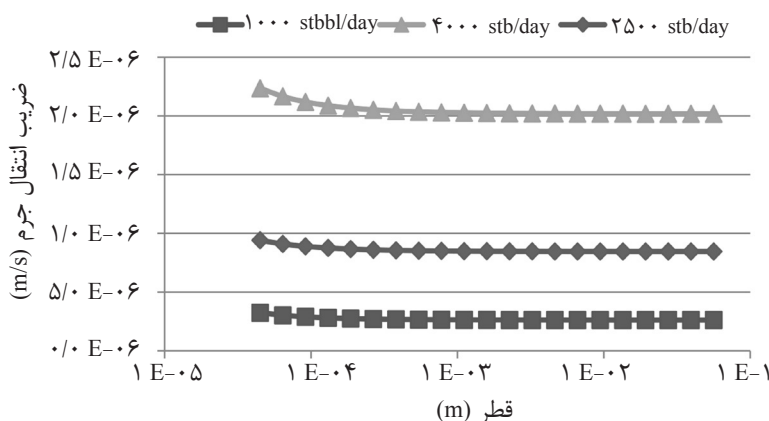
$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{friction}} = \frac{4f\rho V^2}{2g_c D} = \frac{8f\rho Q^2}{g_c D^5} \quad (11)$$

که در این رابطه D قطر لوله، Q دبی، V سرعت جریان و f ضریب تبدیل رابطه است. با توجه به این رابطه تغییر مقدار افت فشار اصطکاکی نسبت به قطر به صورت شدید در قطرهای کوچک اتفاق می‌افتد.

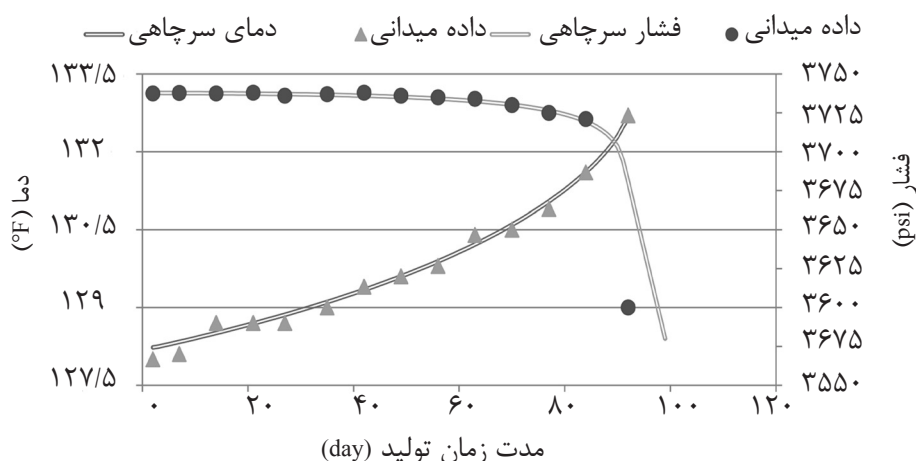
اما تغییرات دمای سرچاه تابعیت مستقیمی با تشکیل رسوب دارد (شکل ۱۰). از زمان‌های ابتدایی تولید به صورت تقریباً خطی با تشکیل رسوب در دیواره لوله مقدار دمای نفت تولیدی سرچاه افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل تشکیل رسوب آسفالتین در دیواره لوله و کاهش ضریب انتقال حرارت سیال و زمین است.

نتایج حاصل از تشکیل رسوب در دیواره لوله نسبت به زمان در شکل ۱۱ ارائه شده است. تمام بلاک‌های موجود در چاه محاسبات ۱ تا ۱۱ را برای روزبرای روز بعد تکرار می‌کنیم.

با افزایش اندازه ذره، نفوذ برونی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر نفوذ ادی تابعیت زیادی از اندازه ذره ندارد. در این مطالعه به منظور محاسبه ضریب نفوذ از رابطه اسکودو و منصوری مقدار اندازه ذرات آسفالتین برابر با یک میکرون در نظر گرفته شده است. در رابطه اسکودو دو ثابت F_1 و F_2 شاخص مقدار ضریب نفوذ حاصل از حرکت برونی و ثابت F_3 شاخص مقدار نفوذ ادی است. مقدار F_3 نیز تغییرات ضریب نفوذ در ناحیه بافری را نشان می‌دهد. با استفاده از مدل اسکودو و منصوری مقدار ضریب نفوذ ذرات در دبی‌های مختلف و به ازای قطرهای مختلف لوله در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است با فرض وجود ذرات هم‌اندازه با قطر 1μ و ثابت بودن خواص فیزیکی نفت مانند چگالی و گرانشی، مقدار ضریب نفوذ با افزایش سرعت حرکت نفت به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقدار ضریب نفوذ چندان تابعی از قطر لوله نیست و تنها در قطرهای بسیار کم (نزدیک به ناحیه بافری) مقدار ضریب نفوذ با کاهش قطر افزایش می‌یابد. البته مشخص است که در واقعیت اندازه ذرات آسفالتین دارای مکانیسم رشد و توزیع مشخصی از اندازه ذرات است. در این جا فرض ثابت بودن اندازه ذرات به دلیل کاهش حجم محاسبات، نبود داده‌های آزمایشگاهی و سادگی مسئله استفاده شده است.



شکل ۹ تغییرات ضریب دیپازیشن به ازای دبی‌های مختلف نسبت به قطر لوله.

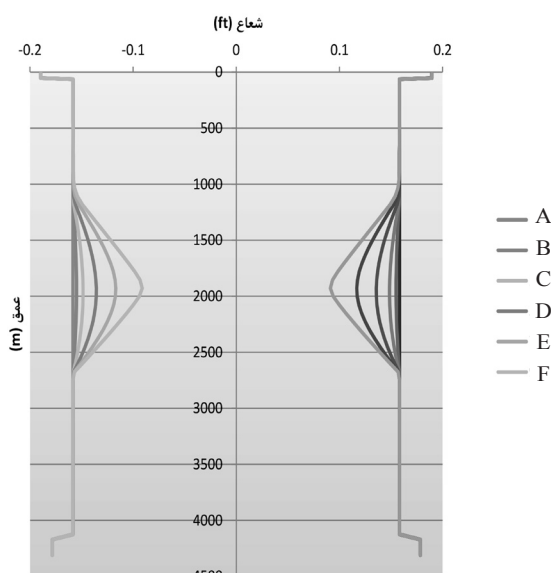


شکل ۱۰ تغییرات دما و فشار سرچاهی به ازای دبی تولیدی ۱۸۲۰ bbl/day و مقایسه آن با الگوریتم ارائه شده.

دبی است. از آنجا که ۹۰٪ افت فشار در ستون چاه در اثر نیروی گرانش اتفاق می‌افتد، سهم اصطکاک سیال و لوله تنها ۱۰٪ خواهد بود. برای آنکه افت فشار اصطکاک خود را نشان دهد قطر چاه باید به اندازه‌ای کاهش یابد که افت فشار اصطکاک در برابر افت فشار گرانشی ملموس شود. گزارش‌های مربوط به شست‌شوی چاه تشکیل آسفالتین در عمق ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ m چاه را تایید می‌کنند. که این موضوع عملکرد مناسب الگوریتم را در تخمین مقدار رسوب، محدوده رسوب و زمان تشکیل رسوب اثبات می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تعادل ترمودینامیکی برش آسفالتینی نفت خام در یک نمونه از نفت‌های سبک جنوب غرب ایران به صورت آزمایشگاهی و نظری مطالعه و بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل اصلاح شده جامد توانایی خوبی در پیش‌بینی رفتار ترمودینامیکی سیستم دارد. به منظور مدل‌سازی حرکت در ستون چاه از مدل تجربی چندفازی داس و راس استفاده شد. همچنین حرکت سیال در محیط متخلخل مخزن با استفاده از رابطه و گل مدل‌سازی گردید. نتایج حاصل از افت فشار و افت دما در ستون چاه به ازای سه دبی متفاوت دقت بالای مدل انتقال حرارت و حرکت را در تخمین تغییرات دما و فشار در طول چاه را اثبات کرد.



شکل ۱۱ رسوب تشکیل شده در دیواره لوله نسبت به زمان به ازای دبی ۱۸۲۰ bbl/day

نتایج تغییرات دمای و فشار سرچاهی به ازای تولید ۱۸۲۰ bbl/day در یک بازه ۱۰۰ روزه که منجر به انسداد چاه شده است در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

مدل توانایی خوبی در تخمین تغییرات دما و فشار سر چاه دارد. از سوی دیگر نشان می‌دهد که تغییرات فشار سرچاهی نسبت به تشکیل رسوب در ستون چاه ناچیز است. این تغییرات تنها در زمان‌های نزدیک به انسداد چاه (زمان‌های پایانی تولید) خود را نشان می‌دهد. گرفتگی با سرعت تقریباً ثابتی در عرض چند ماه رخ می‌دهد. اما نشانه ملموس این گرفتگی در سرچاه شامل افت فشار و افت

از ۱۰٪) تغییرات فشار سرچاهی با تشکیل رسوب محسوس نمی‌باشد. از این رو همان‌طور که در عمل مشاهده می‌شود، تغییرات فشار در اثر انسداد چاه در اثر تشکیل رسوب کمتر از یک هفته رخ می‌دهد. این در حالی است که فرآیند تشکیل در طول چندماه رخ داده است که اثر آن بر افت فشار محسوس نبوده است. اما روند افزایش دما سرچاهی در طول این چند ماه با سرعت تقریباً یکسانی صعودی بوده است. لذا دما به عنوان شاخص برای تعیین تشکیل رسوب در دیواره چاه باید ارزیابی شود. در انتها با توجه به مدل نشست آسفالتین، پروفایل تشکیل رسوب نسبت به زمان در ستون چاه تخمین زده شده است. این پروفایل تطابق مناسبی با گزارش‌های مربوط به شست‌شوی چاه پس از تشکیل رسوب دارد.

از آنجا که تشکیل رسوب در ستون چاه فرآیندی تابع زمان است مدل مربوط به انتقال جرم را نیز به مدل‌های تعادل ترمودینامیکی و انتقال حرارت و حرکت اضافه کردیم. در این زمینه از مدل انتقال جرم اسکوبدو و منصوری (۲۰۱۰) نتایج مدل انتقال جرم نشان داد که ضریب نشست با افزایش سرعت در ستون چاه افزایش می‌یابد.

به منظور حل معادلات تعادل ترمودینامیکی و پدیده‌های انتقال از الگوریتم ارائه شده در شکل ۲ استفاده شد. نتایج مدل‌سازی و مقایسه آنها با داده‌های میدانی نشان داد که دمای سرچاهی تنها شاخصی است که از ابتدا با تشکیل رسوب آسفالتین دچار تغییرات می‌شود. در مقابل به دلیل اثرگذاری تشکیل رسوب بر افت فشار اصطکاکی سیال و سهم کم این بخش از کل افت فشار (کمتر

منابع

- [1]. Escobedo J. and Mansoori G. A., "Prefouling behavior of suspended particles in petroleum fluid flow", Scientia Iranica, Vol. 17, Issue 1, pp. 77-85, 2010.
- [2]. Escobedo J. and Mansoori G. A., "Heavy-organic particle deposition from petroleum fluid flow in oil well sand pipelines", Petroleum Science, Vol. 7, pp. 502-508, 2010.
- [3]. Mansoori G. A., "A unified perspective on the phase behavior of petroleum fluids", International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, Vol. 2, Issue 2, pp. 141-167, 2009.
- [4]. Haskett C. E. and Tareta M. A., "A practical solution to the problem of asphaltene deposits Hassi Messaoud Field, Algeria", Journal of Petroleum Technology, Vol. 17 Issue 4, p. 387, 1965.
- [5]. Thawer R., Nicoll D. C. and Graeme D., "Asphaltene deposition in production facilities", Society of Petroleum Engineering Journal, Vol. 5 Issue 4, p. 475, 1990.
- [6]. Alkafeef S. F., Al-Medhadi F. and Al-Shammari A., "A simplified method to predict and prevent asphaltene deposition in oilwell tubing: field case", Society of Petroleum Engineering Journal, Vol. 20 Issue 2, p. 126, 2005.
- [7]. Ramirez-Jaramillo E., Lira-Galeana C. and Manero O., "Modeling Asphaltene deposition in production pipelines", Energy & Fuels, Vol. 20, pp. 1184-1196, 2006.
- [8]. Soulgani B. S., Tohidi B., Rashtchian D. and Jamialahmadi M., "Modelling of Asphaltene precipitation in well column of Iranian crudes: kuapl case study", Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, 2008.
- [9]. Soulgani B. S., Rashtchian D., Tohidi B. and Jamialahmadi M., "Integrated modelling methods for Asphaltene deposition in wellstring", Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol. 52, Issue 6, pp. 322-331, 2009.

- [10]. Friedlander S. K. and Johnstone H. F., "Deposition of suspended particles from turbulent gas streams", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 49, pp. 1151-1156, 1957.
- [11]. Escobedo J. and Mansoori G. A., "Asphaltene and other heavy-organic particle deposition during transfer and production operation", in Production Operation Symposium, SPE 29488: Oklahoma City, Oklahoma, U.S.A. 1995.
- [12]. Cleaver J. W. and Yates B., "A sub-layer model for the deposition of particles from a turbulent flow", Chemical Engineering Science, Vol. 30, pp. 983-992, 1975.
- [13]. Beal S. K., "Deposition of particles in turbulent flow on channel or pipe walls", Nuclear Science and Engineering, Vol. 40, pp. 1- 11, 1970.
- [14]. Shirdel M., Paes D., Ribeiro P. and Sepehroori K., "Evaluation and comparison of different models for asphaltene particle deposition in flow streams", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 84-85, pp. 57-71, 2012.
- [15]. Mirzayi B., Mousavi-Dehghani S. A., and Behruz-Chakan M., "Modeling of asphaltene deposition in pipelines", Journal of Petroleum Science and Technology, Vol. 3, Issue 2, pp. 15-23, 2013.
- [16]. Maqbool T., "Understanding the kinetics of asphaltene precipitation from crude oils", in Chemical Engineering, Ph.D Thesis, University of Michigan, 2011
- [17]. Mannistu K. D., Yarranton H. W., and Masliyah J. H., "Solubility modeling of Asphaltenes in organic solvents", Energy Fuels, Vol. 11, Issue 3, pp. 615-622, 1997.
- [18]. Mousavi-Dehghani S. A., Mirzayi B., Mousavi S. M. H. and Fasih M., "An applied and efficient model for asphaltene precipitation in production and miscible gas injection processes", Petroleum Science and Technology, Vol. 28, Issue 2, pp. 113-124, 2010.
- [19]. Kohse N. and Maeda O., "Modelling phase behavior including the effect of pressure and temperature on Asphaltene precipitation", in SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, 2000.
- [20]. Agrawal P., Schoeggl F. F., Satyro M. A., Taylor S. D. and Yarranton H. W., "Measurement and modeling of the phase behavior of solvent diluted bitumens", Fluid Phase Equilibria, Vol. 334, pp. 51-64, 2012.
- [21]. Ting P. D., Hirasaki G. J., Chapman W. G., "Modeling of asphaltene phase behavior with the SAFT equation of state", Petroleum Science and Technology, Vol. 21 Issue 3-4, pp. 647-661, 2003.
- [22]. Tavakkoli M., Panuganti S.R., Taghikhani V., Pishvaie M. R., Chapman W. G., "Precipitated asphaltene amount at high-pressure and high-temperature conditions", Energy Fuels, Vol. 28, pp. 1596-1610, 2014.
- [23]. Hu Y. F., Chen G. J., Yang J. T. and Guo T. M., "A study on the application of scaling equation for asphaltene precipitation", Fluid Phase Equilib., Vol. 171, pp. 181-195, 2000.
- [24]. Moradi S., Dabiri M., Dabir B., Rashtchian D., Emadi M. A., "Investigation of asphaltene precipitation in miscible gas injection processes: experimental study and modeling", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 29, Issue 3, 2012.
- [25]. Danesh, A., "PVT properties of petroleum fluids", Journal Wiley Publication: Londen, Amesterdam, 2006.
- [26]. Rachford H. H. and Rice J. D., "Procedure for use of electronic digital computers in calculating flash vaporization hydrocarbon equilibrium", Journal of Petroleum Technology, Vol. 4, Issue 10, pp. 3-19, 1952.
- [27]. Ahmed T., "Reservoir engineering handbook", 2001, Houston, Texas: Gulf Publishing Company.

- [28]. Brill J. P. and Beggs H. D., "Two-Phase flow in pipes", 6th ed, University of Tulsa, 1991.
- [29]. Duns H. J. and Ross N. C., "Vertical flow of gas and liquid mixtures in wells", in 6th World Petroleum Congress, 1963.
- [30]. Hagedorn A. R. and Brown K. E., "Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small diameter vertical conduits", Journal of Petroleum Technology, Vol. 17, Issue 04, pp. 475-484, 1965.
- [31]. Orkiszewski J., "Predicting two-phase pressure drops in vertical pipes", Journal of Petroleum Technology, Vol. 19, Issue 06, pp. 829-838, 1967.
- [32]. Adams J. A. and Rogers D. F., "Computer-aided heat transfer analysis", 1973, New York: McGraw-Hill.
- [33]. Anglea C. W., Long Y., Hamza H. and Lu L., "Precipitation of asphaltenes from solvent-diluted heavy oil and thermodynamic properties of solvent-diluted heavy oilsolutions", Fuel, Vol. 85, Issue 4, pp. 492-506, 2006.
- [34]. Escobedo J. and Mansoori G. A., "Pre-fouling behavior of suspended particles in petroleum fluid flow", Scientia Iranica, Transactions C: Chemistry and Chemical Engineering, Vol. 17, pp. 77-85, 2010.
- [35]. Burke N. E., Hobbs R. E., and Kashou S. F., "Measurement and modeling of asphaltene precipitation", Journal of Petroleum Technology, Vol. 42 Issue 11, pp. 1440-1446, 1990.
- [36]. Lee B. I., Kesler M. G., "Improved predictions of enthalpy of fractions", Hydrocarbon Processing, Vol. 55 Issue 3, pp. 153-158, 1976.