



مدلسازی تاثیر تزریق گاز امتزاجی بر ناپایداری رسوبات آسفالتین در

مخازن نفتی

بهنام محمودی^۱

پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی نفت

Behnam_mahmoudi@yahoo.com Mahmoudib@ripi.ir

چکیده

برهم خوردن تعادل اجزای موجود در ترکیبات نفتی در اثر عوامل متعدد محیطی و عملیاتی مشکلات و مسائل فراوانی را در بر خواهد داشت. از مهمترین پیامدهای این نوع ناپایداری در سیستم تعادلی ترکیبات نفتی میتوان به تشکیل، رشد و رسوب اجزای آلی سنگین اشاره کرد. از مهمترین این رسوبات که معضلات زیادی را نیز با خود به همراه دارد میتوان به اجزای آسفالتینی اشاره کرد. تشکیل مواد ارگانیک سنگین و به دنبال آن ایجاد رسوب در روی سازند های نفتی، در تجهیزات بهره برداری، استخراج، ذخیره نفت در مخازن سطحی و خطوط لوله انتقال نفت خام، یکی از مهمترین معضلات صنعت نفت در بخش بالا دستی می باشد. در گزارشهای مختلف از مناطق نفتی کشور ما وجود رسوبات آسفالتینی و نیز مشکلات ناشی از آنها عنوان شده است. بر اساس این گزارشها و نیز با در نظر گرفتن برنامه های آتی صنعت در این کار دو میدان نفتی کاندید گردید و مدلسازی نرم افزاری برای درک بهتر مسائل و مشکلات ناشی از این پدیده با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی دو نوع گاز تزریقی بصورت امتزاجی انجام گرفت. در این مقاله ابتدا معادله ای که اثر دما و فشار را بر روی مدل جامد توصیف می کند و روش استفاده شده برای بدست آوردن فوگاسیته آسفالتین در دما و فشار مخزن بیان شده است. سپس مراحل مورد نیاز برای مدل سازی رسوب آسفالتین از نفت زنده مخزن در اثر کاهش فشار ذکر شده است. در نهایت پارامترهای موثر در تطابق مدل پیشبینی رسوبات آسفالتین با داده های آزمایشگاهی توضیح داده شده است. اثر مقادیر مختلف حجم مولی جامد (VS) و ضرایب بر هم کنش (σ) جزء آسفالتین با اجزاء سبک نفت بر روی تطابق مدل مورد بررسی قرار گرفته و بهترین مقدار ارائه شده است. شرح کاملی از مطالعات انجام شده در این زمینه در این ارائه آورده شده است.

کلید واژه: رسوب آسفالتین، تزریق گاز، تزریق امتزاجی، مدلسازی، معادله حالت.

^۱ مسئول پروژه گروه پژوهش و فناوریهای سنگ و سیال مخزن



۱- مقدمه

آسفالتین یکی از اجزاء تشکیل دهنده نفت با ساختمان ملکولی پیچیده شامل حلقه های آروماتیک در هسته و اجزاء نفتنیک در اطراف هسته می باشد. ملکولهای آسفالتین در اثر عواملی مثل تغییر در توزیع وزن ملکولی نفت و همچنین تغییر عوامل ترمودینامیکی مانند تغییر دما، فشار و ترکیب اجزاء هیدرو کربوری توسط مکانیزم های مختلف ریزش می کنند. در چند دهه گذشته یکی از مهمترین معضلات صنعت نفت در زمینه بهره برداری، استخراج، ذخیره نفت در مخازن سطحی و خطوط لوله انتقال نفت خام و مواد سنگین هیدروکربوری، تشکیل مواد ارگانیک سنگین و به دنبال آن ایجاد رسوب در روی سازند های نفتی و تاسیسات خطوط انتقال می باشد [1]. در مراحل استحصال اولیه و ثانویه بعثت تغییر در شرایط ترمودینامیک نظیر تغییر در ترکیب نفت خام (بعثت تزریق یا تولید)، درجه حرارت (درجهای تولید) و تغییر در فشار (بعثت تزریق یا تولید) تعادل ظرفیت ترمودینامیکی مواد سنگین آلی نظیر آسفالت و آسفالتین به هم ریخته و در نتیجه مواد جامد با مکانیزم های مختلف تشکیل و در اثر حرکت در محیط متخلخل سازند یا داخل لوله چاه تولید رسوب می نمایند. از بین بردن این رسوب در این شرایط بعضی مواقع غیر ممکن یا اینکه هزینه بر و طاقت فرسا می باشد. موارد فوق و اثرات فنی، اقتصادی آن سبب می گردد پدیده تشکیل آسفالت و آسفالتین در صنعت بصورت حاد مطرح و تلاشهای تحقیقی گسترده و فشرده ای را در این زمینه ایجاد می نماید [2]. معرفی آسفالتین به ابهامات زیادی منجر شده است چرا که بعد از گذشت سالها هنوز، ساختمان ترکیب مواد تشکیل دهنده، وزن ملکولی و خواص شیمیایی فیزیکی کاملاً شناخته نشده است. در این پروژه رسوبات آسفالتین، مکانیزم ها و مدلسازی رسوب آسفالتین، انجام آزمایشات و داده های آزمایشگاهی سپس مدلسازی آسفالتین مورد بحث و نتیجه گیری قرار میگیرد.

۲- مدلسازی آسفالتین

در این بخش معادله ای که اثر دما و فشار را بر روی مدل جامد توصیف می کند و روش استفاده شده برای بدست آوردن فوگاسیته آسفالتین در دما و فشار مخزن بیان شده است. رفتار فازی سیالات مخزن در فرآیندهای تزریق گاز در برگزیده انتقال جرم و تغییر پیوسته ترکیب سیال می باشد. معادلات حالت می توانند رفتار فازی این فرآیندهای پیچیده را پیش بینی کنند. در این مطالعه معادله حالت Peng-Robinson برای مدلسازی سیال مخزن استفاده شده است.

جزء سنگین تا جزء C36+ شکسته شده است و خصوصیات ترمودینامیکی جزء های جدید توسط روابط تجربی موجود در نرم افزار محاسبه شده است. در مدل ساخته شده توسط نرم افزار شبیه سازی سیال (WinProb) از رگراسیون استفاده شده تا معادله حالت را بوسیله مقادیر فشار اشباع، دانسیته نفت مرده در تست تفکیک تحت فشار تنظیم نمود. در نهایت بر روی پارامترهایی که در مدل رسوبات جامد این پدیده را کنترل می کنند مثل حجم مولی جامد (VS) وضرایب بر هم کنش (σ) بین جزء آسفالتین و اجزاء سبک نفت، نوع گاز تزریقی و فرایند حساسیت سنجی انجام گردید.

۲-۱- معادله حالت



شبهه سازی های ترکیبی به شرط تنظیم و تعریف دقیق و متناسب معادلات حالت می توانند رفتار فازی این فرآیندهای پیچیده را پیش بینی کنند. در تزریق امتزاجی، شرایط تعادلی فازها نقش قابل توجهی در میزان بازیافت هیدروکربورها ایفا می کند و پیش بینی دقیق حجم و ترکیب تعادلی فازهای مختلف بایستی مورد توجه قرار گیرد. ناکارآمد بودن معادلات حالت بدان معناست که بواسطه تجربی بودن ضرایب، اغلب درپیش بینی دقیق رفتار فازی یک سیال هیدروکربوری موفق نیستند. دقت این معادلات را با تیونینگ آنها به یک سری اطلاعات اندازه گیری شده سیال می توان بهبود بخشید. این اطلاعات معمولاً داده های آزمایشگاهی PVT شامل تراکم پذیری و چگالی در بالای فشار اشباع، میزان فشار اشباع و میزان تشکیل مایع در فشارهای پایین تر (اندازه گیری های حجمی) می باشند [3].

رابطه بین فشار، دما و حجم مولی یک جزء می تواند به وسیله یک معادله درجه سه بیان شود ولی ارائه یک رابطه کلی برای کل مواد بسیار ایده آل است. به کار گیری یک معادله خاص برای چند جزء که با هم یک مخلوط را تشکیل می دهند هم اوضاع را وخیم تر می کند علی الخصوص اگر این ترکیب، یک سیال هیدروکربوری باشد که در آن با شکستن جزء سنگین و مشخصه سازی شبه جزءها هم مواجه باشیم. به همین دلیل در محاسبات فازی برای سیالات دارای اجزاء سنگین همواره با یک تقریب مواجه ایم. با وجودیکه ارائه یک معادله جدید موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران بوده است ولی معادله Peng-Robinson همچنان به طور وسیع در محاسبات تعادل فازی برای سیالات هیدروکربوری مورد استفاده قرار می گیرد [3]. معادله حالت Peng-Robinson برای مدلسازی سیال مخزن استفاده شده است [4].

۲-۲- ساخت مدل ترمودینامیکی

این بخش روش مدل سازی رسوب آسفالتین از نفت زنده مخزن در اثر کاهش فشار را توصیف می کند. مراحل مورد نیاز برای توسعه رسوب آسفالتین بشرح زیر میباشد: ۱- معرفی خصوصیات (Fluid characterization)، ۲- رگراسیون مدل سیال مخزن، ۳- نمودار دو فازی سیال، ۴- مشخص کردن پارامترهای مدل جامد، ۵- پیش بینی رفتار رسوب آسفالتین. در این مقاله داده های واقعی آزمایشگاهی برای استفاده در نرم افزار بکار گرفته شده است. اطلاعات مربوط به سیالات مخزن و داده های رسوب آسفالتین از دو میدان نفتی ایران گرفته شده اند. لازم به توضیح است که هر دو این میادین با مشکل شدید رسوبات آسفالتین درون مخزن و تاسیسات سرچاهی مواجه هستند و نتایج بدست آمده از این مطالعه در صنعت نفت ایران قابل بکارگیری و استفاده می باشد. اجزاء سازنده سیال مخزن میدان A و B و فشار اشباع در دمای مخزن در جدول (۱) و (۲) نمایش داده شده است. با استفاده از داده های آزمایشگاهی، ترکیب درصد اجزاء نفت تا C11 وارد نرم افزار گردید و خصوصیات C12+ با استفاده از وزن مولکولی و وزن مخصوص محاسبه شده است. جزء سنگین به ۵ شبه جزء تقسیم گردید و خصوصیات هر جزء با استفاده از معادله Lee-Kesler تعیین گردید. سپس ترکیب درصد اجزاء وارد میشود و عملیات رگراسیون برای بهتر مدل کردن خصوصیات سیال مخزن با استفاده از مقادیر فشار اشباع در دمای مخزن و API تفکیک تحت فشار انجام میگردد [5]. جزء آسفالتین به وسیله تقسیم کردن سنگین ترین جزء از نفت به اجزای رسوب کننده و غیر رسوب کننده مشخص می گردد. این دو جزء دارای خواص بحرانی و Acentric Factor یکسانی میباشد ولی جزء آسفالتین رسوب کننده دارای BIC بزرگتری با اجزاء سبک تر میباشد. در این مرحله خصوصیات جزء سنگین محاسبه می گردد. کسر مولی جزء آسفالتین را می توان از رابطه زیر مشخص نمود:



$$X_{Asph} * MW_{Asph} = W_{Asph} * MW_{Oil} \quad (1)$$

که در این معادله x_{Asph} : درصد مولی جزء آسفالتین رسوب کننده، MW_{Asph} : وزن مولکولی جزء آسفالتین رسوب کننده، w_{Asph} : درصد وزنی جزء آسفالتین رسوب کننده و MW_{Oil} : وزن مولکولی نفت می باشند. با توجه با این که جزء سنگین به اجزای رسوب کننده و غیر رسوب کننده تقسیم گردید و مقادیر BIC برای جزء آسفالتین رسوب کننده تغییر داده شد، پیشبینی مدل برای رفتار فازی سیال تحت تاثیر قرار می گیرد. به همین دلیل، دوباره باید رگراسیون انجام شود تا از صحت پیشبینی مدل در فاز مایع و جامد اطمینان حاصل شود. در این شیوه مدلسازی ما با اضافه کردن مقدار دانسیته سیال حاصل از تفکیک اتمسفریک بر حسب درجه API به مدل از رفتار مدل اطمینان حاصل می کنیم. پارامترهای انتخابی در فرایند رگراسیون در مخزن A، وزن مولکولی، Volume Shift اجزاء از C12 تا C36+ و BIC Exponent و در مخزن B، Volume Shift اجزاء از C12 تا C36+ و BIC Exponent می باشد.

جدول (1): ترکیب سیال مخزن

ترکیب سیال مخزن (درصد مولی)		اجزای متشکله
مخزن A	مخزن B	
۲,۷۰	0.18	H2S
۰,۲۱	1.11	N2
۵,۱۴	1.68	CO2
۲۲,۰۰	37.61	C1
۷,۱۰	6.28	C2
۵,۳۴	4.72	C3
۰,۹۹	0.96	iC4
۲,۷۸	2.75	nC4
۱,۱۲	0.98	iC5
۱,۴۱	1.05	nC5
۵,۵۵	4.56	C6
۳,۸۴	4.03	C7
۴,۰۲	2.51	C8
۲,۸۵	2.80	C9
۲,۸۳	2.88	C10
۲,۵۸	2.22	C11
۲۹,۵۴	23.68	C12+
۲۸۳	251	جرم مولکولی نفت
۴۱۸	374	جرم مولکولی جزء C12+
۱۴۹	124	جرم مولکولی نفت مخزن

جدول (۲): فشار اشباع در دمای مخزن

مخزن	دما (درجه فارنهایت)	فشار اشباع (پام)	
		قبل از تزریق گاز	بعد از تزریق گاز
A	180	1465	4779
	۲۵۵	1722	5511
B	۱۸۵	2750	7258 4685

۳- معادله مدلسازی آسفالتین



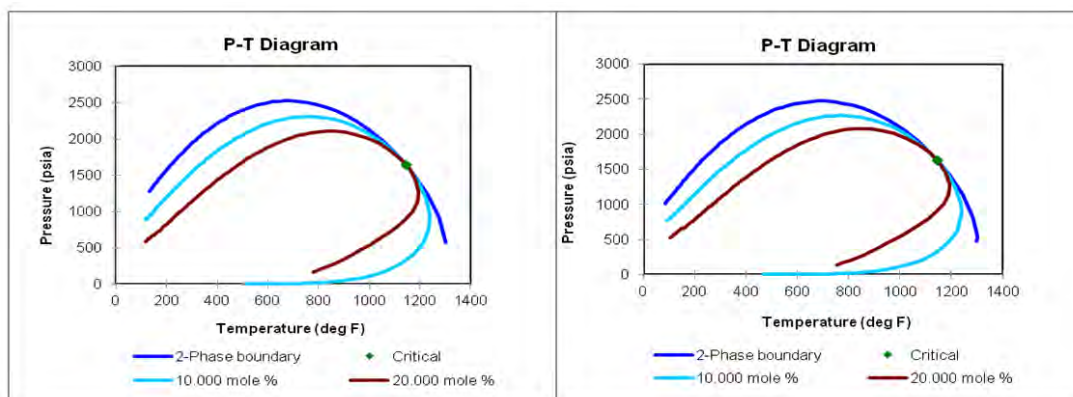
مدل حلالیتی که برای جزء خالص، فوگاسیته جامد را به فوگاسیته مایع مربوط می سازد یک مدل تک جزیی جامد می باشد که توسط Gupta and Thomas و همکارانشان مورد آزمایش قرار گرفت. آسفالتین رسوب کرده بعنوان جزء خالص جامد است در حالیکه فاز نفت و گاز با استفاده از معادله حالت سه پارامتری مدلسازی می شوند. Thomas و همکارانشان گزارش کرده اند که مدل جامد نیاز به داده های تجربی برای محاسبه پارامترهای تجربی مدل، مثل فوگاسیته جامد و ضرایب بر همکنش دارد. بر همین اساس این مدل بسیار تجربی است و کار کردن با آن مشکل می باشد. معادله (۱) بعنوان معادله اصلی برای محاسبه کردن فوگاسیته آسفالتین در شرایط دما ثابت می باشد. برای جزء خالص، فوگاسیته جامد را به فوگاسیته مایع مربوط می سازد [6].

$$Lnf_s = Lnf^* + v_s \left(\frac{P - P^*}{RT} \right) \quad (1)$$

که در این معادله f_s فوگاسیته جامد در شرایط (P,T) و f^* فوگاسیته مرجع در شرایط مرجع (P^* و T^*) و V_s حجم مولی جامد می باشد. معمولاً فوگاسیته مرجع برابر است با فوگاسیته جزء رسوب کننده که توسط معادله حالت در فشار نقطه شروع تشکیل آسفالتین (Onset pressure) در یک دمای مشخص محاسبه شده است. این روش تضمین می کند که این مدل فشار نقطه شروع تشکیل آسفالتین درست پیش بینی کرده است. در دیگر شرایط فشاری، فوگاسیته جزء جامد در فاز جامد با فوگاسیته جزء جامد در فاز مایع که توسط معادلات حالت پیش بینی شده مقایسه می گردد، اگر فوگاسیته جزء جامد در فاز جامد کمتر باشد سپس رسوب آسفالتین تشکیل می شود. با سیستم های تشخیص نقطه شروع تشکیل آسفالتین مدرن، فشار شروع معمولاً می تواند کاملاً به دقت تعیین شود. چنانچه نقطه فشاری شروع تشکیل آسفالتین مشخص نباشد، به جای آن، یک نقطه فشاری بالاتر از فشار اشباع که در آن مقدار کمی از آسفالتین رسوب کرده است، برای بدست آوردن فوگاسیته مرجع در دما و فشار مربوطه مورد استفاده قرار می گیرد. این در حالی است که مقدار آسفالتین رسوب کرده از سیستم خارج می شود. به توجه به اینکه مدل شبیه سازی رسوب گذاری مورد استفاده در نرم افزار WinProp مدل ترمودینامیکی است و با توجه به سینتیک آسفالتین، برگشت پذیری رسوبات آسفالتین امکان پذیر است. در واقع مواد جامد رسوب کرده می توانند دوباره در فاز مایع حل شوند. این پدیده در آزمایشگاه برای حالت هایی که فشار زیر فشار اشباع است، با کاهش فشار مقدار آسفالتین رسوب کرده به فاز مایع برگشته و از میزان رسوبات کاسته می شود. در واقع بیشترین مقدار رسوب نزدیک فشار اشباع اتفاق می افتد [7]. در زیر این فشار، آزاد شدن گاز از نفت باعث تغییر در پارامتر حلالیت فاز مایع شده و اجازه می دهد تا عمل انحلال رسوب آسفالتین در فاز مایع انجام پذیرد. بطور کلی این امکان وجود دارد که همه رسوبات آسفالتین در فشارهای به اندازه کافی کم بطور کامل حل شوند. پارامترهایی که در مدل رسوبات جامد این پدیده را کنترل می کنند؛ حجم مولی جامد (V_s) و ضرایب بر هم کنش (σ) بین جزء آسفالتین و اجزاء سبک نفت می باشند. افزایش حجم مولی جامد (V_s) در فشار اشباع حداکثر مقدار رسوب آسفالتین را افزایش می دهد. افزایش ضرایب برهم کنش (σ) با اجزاء سبک نفت، به حل کردن دوباره آسفالتین در فشارهای پایین تر کمک می کند [8].

۴- نمودار دو فازی سیال

به توجه به اینکه در فرایند شبیه سازی رسوب گذاری در نرم افزار WinProp جزء سنگین به دو جزء رسوب کننده و محلول در نفت تبدیل شد، به منظور اطمینان از صحت مدل قبل و بعد از شکست جزء سنگین نمودار دو فازی سیال رسم گردید و این دو نمودار با هم مقایسه گردید شکل (۱).



شکل (۱): نمودار دو فازی سیال قبل و بعد از شکست جزء سنگین

با مقایسه دو نمودار فازی سیال بدست آمده قبل و بعد از شکست جزء سنگین به این نتیجه می رسیم که فرایند شکست جزء سنگین بر روی خواص ترمودینامیکی سیال اثری ندارد و خواص ترمودینامیکی قبل و بعد از شکست جزء سنگین ثابت می باشد.

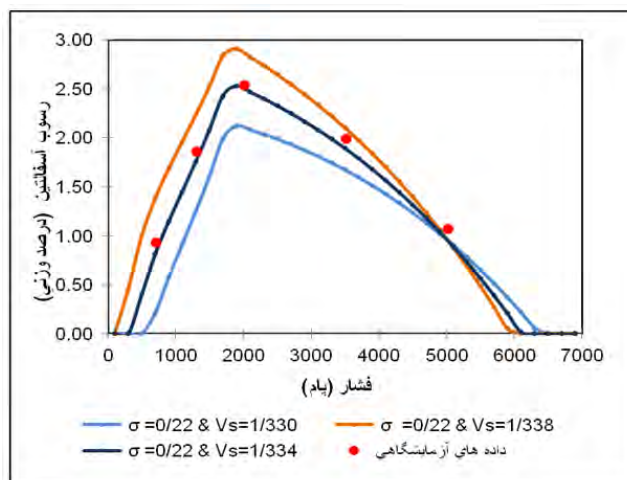
۵- مدل پیشبینی رسوبات آسفالتین در مخزن A قبل از تزریق گاز

پارامترهایی که در تطابق مدل پیشبینی رسوبات آسفالتین با داده های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته اند در این بخش از مطالعه توضیح داده میشوند. پارامترهایی که در مدل رسوبات جامد این پدیده را کنترل می کنند؛ حجم مولی جامد (V_s) و ضرایب بر هم کنش (σ) جزء آسفالتین رسوب کننده (C_{36B+}) با اجزاء سبک نفت (C_1 تا C_6) می باشند. ضرایب بر هم کنش (σ) بین جزء آسفالتین رسوب کننده (C_{36B+}) و مابقی اجزاء سنگین نفت صفر می باشد. داده های آزمایشگاهی استفاده شده در این قسمت از مطالعه در جدول (۳-۶) آورده شده است و دمای استفاده شده برای مدل ۲۵۵ درجه فارنهایت می باشد. با توجه به عوامل کنترل کننده مقدار رسوب آسفالتین که مقدار ضریب بر هم کنش (σ) جزء آسفالتین رسوب کننده (C_{36B+}) با اجزاء سبک نفت (C_1 تا C_6) و حجم مولی جامد (V_s) می باشند، خروجی مدل برای مقادیر مختلف حجم مولی جامد (V_s) و ضریب بر هم کنش (σ) در جدول (۳) نمایش داده شده است:

جدول (۳): عوامل کنترل کننده مقدار رسوب آسفالتین در مدل مخزن A

انتخاب	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم
حجم مولی جامد (V_s)	1/330	1/334	1/334	1/330	1/33۸	1/334
ضریب بر هم کنش (σ) جزء آسفالتین رسوب کننده (C_{36B+}) با اجزاء سبک نفت (C_1 تا C_6)	0/23	0/23	0/2۱	0/22	0/22	0/22

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود مقادیر (σ) و (V_s) انتخاب شده برای شبیه سازی روند رسوب آسفالتین بهترین نتایج ممکن را ایجاد کرده اند. نقطه فشاری شروع آسفالتین فشار ۶۱۰۰ پام می باشد که با کاهش فشار مقدار رسوب آسفالتین نیز افزایش می یابد. بیشترین مقدار رسوب آسفالتین در نزدیکی فشار اشباع نفت به میزان ۲/۵۳ درصد وزنی می باشد که با کاهش بیشتر فشار در نقاط زیر فشار اشباع، مقدار رسوب آسفالتین کاهش یافته و در فشار ۳۰۰ پام صفر می شود.



شکل (۲): مناسبترین مدل برای پیشبینی روند تشکیل رسوبات آسفالتین در مخزن A قبل از تزریق گاز در دمای ۲۵۵ درجه فارنهایت

مقادیر ضریب بر هم کنش (σ) برابر با ۰/۲۲ و حجم مولی جامد (V_s) برابر با 1/334 مناسبترین انتخاب برای شبیه سازی روند رسوب آسفالتین می باشند. جدول (۴) جهت مقایسه مقادیر حاصل از شبیه سازی نرم افزار با مقادیر آزمایشگاهی آورده شده است.

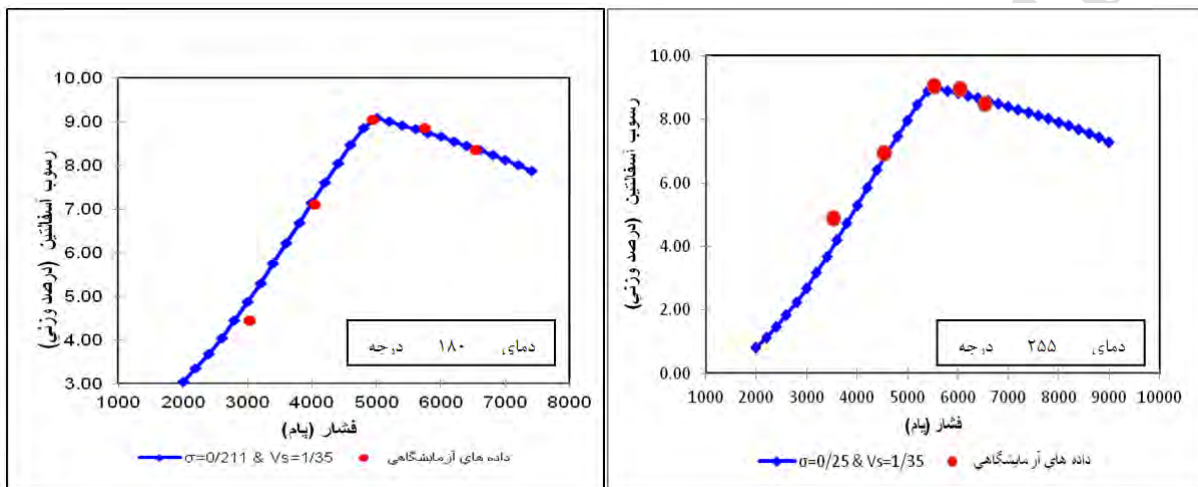
جدول (۴): مقایسه مقادیر حاصل از شبیه سازی نرم افزار با مقادیر آزمایشگاهی

فشار (پام)	آسفالتین رسوب یافته (wt %)	آسفالتین رسوب یافته نرم افزار (wt %)
۵۰۲۱	۱,۰۷	۰,۹۴
۳۵۱۶	۱,۹۹	۱,۸۸
۲۰۱۶	۲,۵۴	۲,۴۹
۱۳۱۵	۱,۸۶	۱,۷۷
۱۰۱۵	۱,۳۸	۱,۳۳
۷۱۵	۰,۹۳	۰,۸۶

۵-۱-مدل پیشبینی رسوبات آسفالتین در مخزن A بعد از تزریق گاز



مقادیر حاصل از شبیه سازی مدل قبل و بعد از فشار اشباع در مقایسه با مقادیر آسفالتین رسوب یافته بر حسب فشارهای مختلف بعد از تزریق گاز متان در دمای ۱۸۰ درجه فارنهایت روند خوبی را نشان میدهد؛ بطوریکه از چهار نقطه از داده های آزمایشگاهی عبور کرده است. با کاهش فشار مقدار رسوب آسفالتین روند صعودی دارد؛ بیشترین مقدار رسوب آسفالتین در فشار ۵۰۰۰ پام به میزان ۹/۰۸ درصد وزنی می باشد که نزدیکترین داده آزمایشگاهی مقدار ۹/۰۵ را در فشار ۴۹۳۷ نشان می دهد. با کاهش بیشتر فشار در نقاط زیر فشار اشباع، مقدار رسوب آسفالتین کاهش یافته و در فشار ۲۰۰۰ پام به میزان ۳/۰۴ درصد وزنی می شود. بطور کلی مقدار ضریب بر هم کنش (σ) بین جزء آسفالتین رسوب کننده ($CB36+$) و اجزاء سبک نفت ($C1$ تا $C6$) برابر با ۰/۲۱۱ و حجم مولی جامد (Vs) برابر با ۱/۳۵ مقادیر مناسبی برای شبیه سازی روند رسوب آسفالتین می باشد شکل (۳).



شکل (۳): مدل برای پیشبینی روند تشکیل رسوبات آسفالتین در مخزن A بعد از تزریق گاز

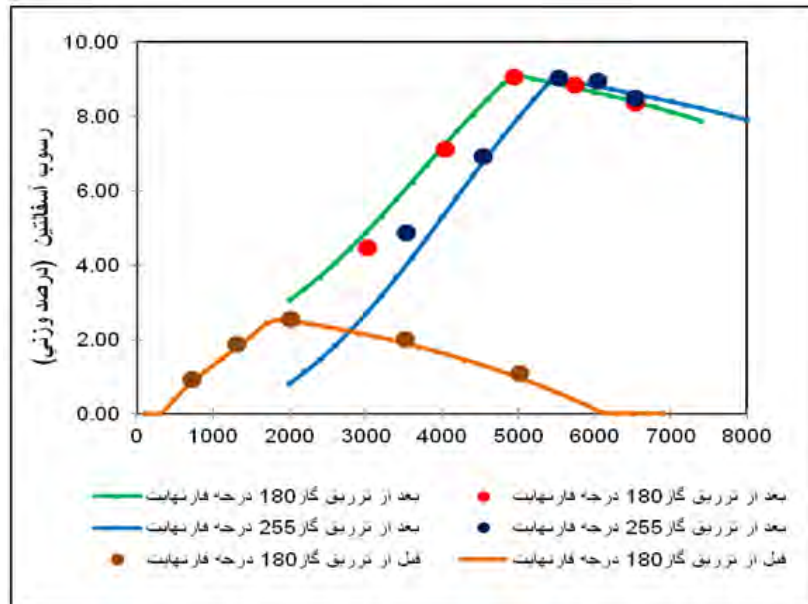
مقادیر حاصل از شبیه سازی مدل ترمودینامیکی در مقایسه با مقادیر آسفالتین رسوب یافته بر حسب فشارهای مختلف مخزن A در دمای ۲۵۵ درجه فارنهایت بعد از تزریق گاز متان روند خیلی خوبی را نشان میدهد؛ بطوریکه تنها از یک نقطه از داده های آزمایشگاهی عبور نکرده است. با کاهش فشار مقدار رسوب آسفالتین روند صعودی دارد؛ بیشترین مقدار رسوب آسفالتین در فشار ۵۶۰۰ پام به میزان ۸/۹۸ درصد وزنی می باشد که نزدیکترین داده آزمایشگاهی مقدار ۹/۰۴ را در فشار ۵۵۳۷ نشان می دهد. با کاهش بیشتر فشار در نقاط زیر فشار اشباع، مقدار رسوب آسفالتین کاهش یافته و در فشار ۲۰۰۰ پام به میزان ۰/۸۲۳ درصد وزنی می شود. بطور کلی مقدار ضریب بر هم کنش (σ) بین جزء آسفالتین رسوب کننده ($CB36+$) و اجزاء سبک نفت ($C1$ تا $C6$) برابر با ۰/۲۵ و حجم مولی جامد (Vs) برابر با ۱/۳۵ مقادیر مناسبی برای شبیه سازی روند رسوب آسفالتین می باشد شکل (۳).

۵-۲- اثر تغییرات فشار، دما و ترکیب سیال بر روند تشکیل رسوبات آسفالتین در مخزن A

در شکل (۴) مقادیر حاصل از شبیه سازی مدل ترمودینامیکی در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی آسفالتین رسوب یافته بر حسب فشارهای مختلف مخزن A در دو دمای ۱۸۰ و ۲۵۵ درجه فارنهایت قبل و بعد از تزریق گاز متان بصورت یکجا نشان داده شده است. در این شکل تغییرات رسوبات آسفالتین بر اثر تغییرات فشار، دما و ترکیب سیال به خوبی قابل مقایسه می باشند. همانطور که در شکل قابل مشاهده است و در بخش قبل هم به آن اشاره شد؛ تزریق گاز یا همان اثر تغییر ترکیب سیال مخزن



بشدت بر روند تشکیل رسوبات آسفالتین اثر می گذارد و انطباق مدل با داده های آزمایشگاه هم شاهدهی بر این ادعا می باشد. همچنین با مقایسه خروجی مدل در دو دمای مختلف این نتیجه حاصل می شود که اثر دما بر روند تشکیل رسوبات آسفالتین کمتر از اثر تغییر ترکیب سیال می باشد.



شکل (۴): اثر تغییرات فشار، دما و ترکیب سیال بر روند تشکیل رسوبات آسفالتین در مخزن A

۶-۱- مدل پیشبینی رسوبات آسفالتین در مخزن B قبل از تزریق گاز

نتایج حاصل از مدل سازی رفتار رسوبات آسفالتین در مخزن B قبل و بعد از تزریق گاز در شرایط مخزن و در دمای ۱۸۵ درجه فارنهایت در این قسمت آورده شده است. در این قسمت از داده های آزمایشگاهی تزریق گاز نیتروژن به نسبت مولی ۱۰ و ۲۰ به سیال مخزن استفاده شده است و نتایج اثر غلظت گاز تزریقی توسط نرم افزار مدل سازی گردید. با توجه به مدل های ساخته شده و مقادیر انتخابی مختلفی که برای ضریب بر هم کنش (σ) و حجم مولی جامد (V_s) بدست آمده است؛ مقدار 0/117 برای ضریب بر هم کنش بسیار مناسب می باشد. در قسمت بعد مقادیر مختلفی برای حجم مولی جامد (V_s) انتخاب گردید و بهترین مقدار مناسب بدست آمد جدول (۵).

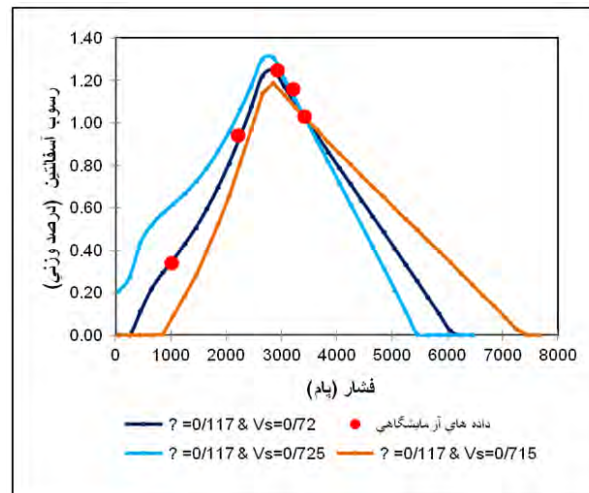
جدول (۵): عوامل کنترل کننده مقدار رسوب آسفالتین در مدل مخزن B

انتخاب	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم
حجم مولی جامد (V_s)	0/72	0/72	0/7	0/715	0/725	0/72۰
ضریب بر هم کنش (σ) جزء آسفالتین رسوب کننده (C_{36B}^+) با اجزاء سبک نفت (C_1 تا C_6)	0/102	0/112	0/122	0/117	0/117	0/117

مقادیر (σ) و (V_s) انتخاب شده برای شبیه سازی روند رسوب آسفالتین بهترین نتایج ممکن را ایجاد کرده اند شکل (۵). نقطه فشاری شروع آسفالتین فشار ۶۲۵۰ پام می باشد که با کاهش فشار مقدار رسوب آسفالتین نیز افزایش می یابد. بیشترین مقدار



رسوب آسفالتین در نزدیکی فشار اشباع نفت به میزان $1/25$ درصد وزنی می باشد که با کاهش بیشتر فشار در نقاط زیر فشار اشباع، مقدار رسوب آسفالتین کاهش یافته و در فشار ۲۵۰ پام صفر می شود. مقادیر ضریب بر هم کنش (σ) برابر با $0/117$ و حجم مولی جامد (V_s) برابر با $0/72$ مناسبترین انتخاب برای شبیه سازی روند رسوب آسفالتین می باشند. جدول (۶) جهت مقایسه مقادیر حاصل از شبیه سازی نرم افزار با مقادیر آزمایشگاهی آورده شده است.



شکل (۵): مناسبترین مدل برای پیشبینی روند تشکیل رسوبات آسفالتین در مخزن B قبل از تزریق گاز در دمای ۱۸۵ درجه فارنهایت

جدول (۶): مقایسه مقادیر حاصل از شبیه سازی نرم افزار با مقادیر آزمایشگاهی

فشار (پام)	آسفالتین رسوب یافته آزمایشگاه (wt.%)	آسفالتین رسوب یافته نرم افزار (wt.%)
3418	1.03	1.03
3218	1.16	1.11
2918	1.25	1.22
2216	0.94	.92
1015	0.34	.35

رسوبات آسفالتین در

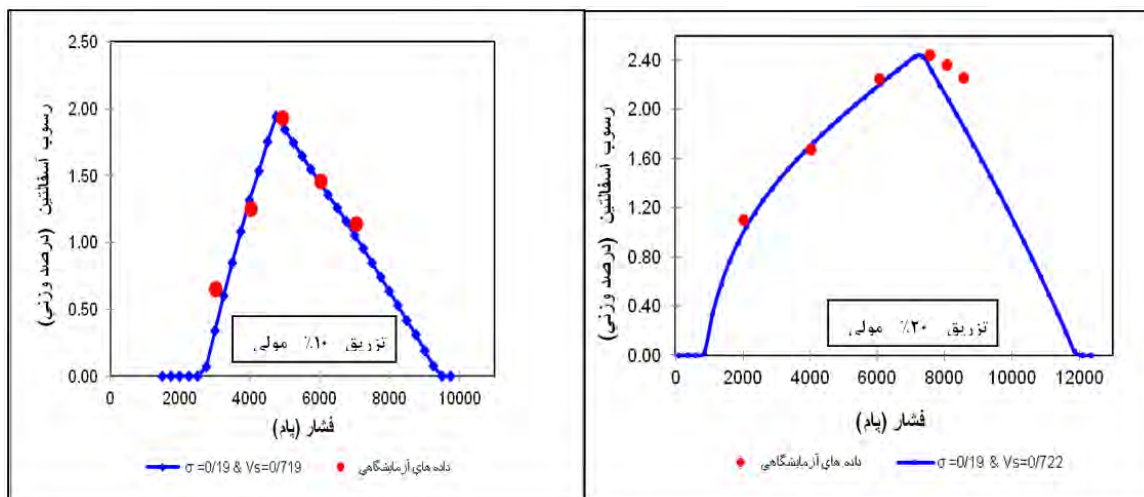
۶-۲-مدل پیشبینی

مخزن B بعد از تزریق ۱۰ درصد مولی گاز

مدلسازی در دمای ۱۸۵ درجه فارنهایت انجام گردید؛ نتایج حاصل از شبیه سازی مدل قبل و بعد از فشار اشباع در مقایسه با مقادیر آسفالتین رسوب یافته بر حسب فشارهای مختلف بعد از تزریق گاز نیتروژن روند خوبی را نشان میدهد و بطور نسبی از همه داده های آزمایشگاهی عبور کرده است. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است با کاهش فشار مقدار رسوب آسفالتین روند صعودی دارد؛ بیشترین مقدار رسوب آسفالتین در فشار ۴۷۵۰ پام به میزان $1/94$ درصد وزنی می باشد که نزدیکترین داده آزمایشگاهی مقدار $1/93$ را در فشار ۴۹۳۳ نشان می دهد. با کاهش بیشتر فشار در نقاط زیر فشار اشباع، مقدار رسوب آسفالتین



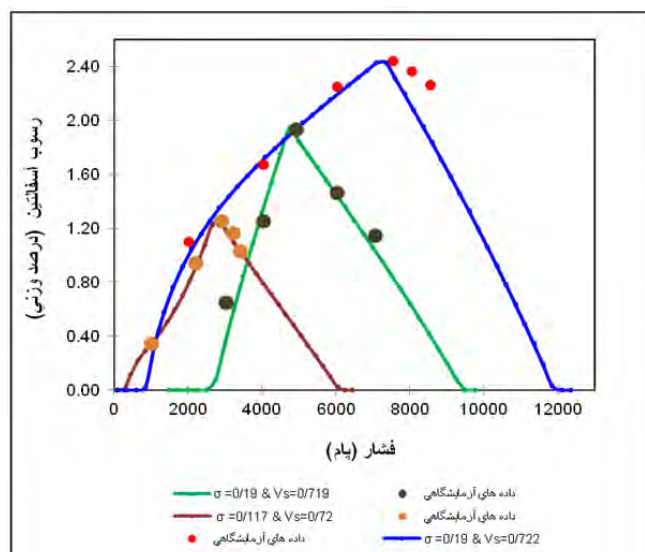
کاهش یافته و در فشار ۲۵۰۰ پام به میزان صفر درصد وزنی می شود. بطور کلی مقدار ضریب بر هم کنش (σ) بین جزء آسفالتین رسوب کننده (CB36+) و اجزاء سبک نفت (C1 تا C6) برابر با ۰/۱۹ و حجم مولی جامد (Vs) برابر با ۰/۷۱۹ مقادیر مناسبی برای شبیه سازی روند رسوب آسفالتین می باشد.



شکل (۶): مقدار آسفالتین رسوب یافته بر حسب فشارهای مختلف مخزن B در دمای ۱۸۵ درجه فارنهایت

نتایج حاصل از شبیه سازی مدل ترمودینامیکی در مقایسه با مقادیر آسفالتین رسوب یافته بر حسب فشارهای مختلف زیر فشار اشباع بعد از تزریق گاز نیتروژن روند خیلی خوبی را نشان میدهد؛ اما در فشارهای بالای فشار اشباع روند خوبی را نشان نمی دهد؛ که می تواند از درست نبودن روند داده های آزمایشگاهی باشد. با توجه به شکل (۶) با کاهش فشار مقدار رسوب آسفالتین روند صعودی دارد؛ بیشترین مقدار رسوب آسفالتین در فشار ۷۳۵۰ پام به میزان ۲/۴۳ درصد وزنی می باشد که نزدیکترین داده آزمایشگاهی مقدار ۲/۴۴ را در فشار ۷۵۵۴ نشان می دهد. با کاهش بیشتر فشار در نقاط زیر فشار اشباع، مقدار رسوب آسفالتین کاهش یافته و در فشار ۶۰۰ پام به میزان صفر درصد وزنی می شود. بطور کلی مقدار ضریب بر هم کنش (σ) بین جزء آسفالتین رسوب کننده (CB36+) و اجزاء سبک نفت (C1 تا C6) برابر با ۰/۱۹ و حجم مولی جامد (Vs) برابر با ۰/۷۲۲ مقادیر مناسبی برای شبیه سازی روند رسوب آسفالتین می باشد.

در شکل (۷) مقادیر حاصل از شبیه سازی مدل ترمودینامیکی در مقایسه با مقادیر آسفالتین رسوب یافته بر حسب فشارهای مختلف مخزن B در دمای ۱۸۵ درجه فارنهایت قبل و بعد از تزریق گاز نیتروژن به دو نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد مولی بصورت یکجا نشان داده شده است. در این شکل تغییرات رسوبات آسفالتین بر اثر تغییرات فشار و ترکیب سیال به خوبی قابل مقایسه می باشند.





شکل (۷): اثر تغییرات فشار و ترکیب سیال بر روند تشکیل رسوبات آسفالتین در مخزن B

۷- نتیجه گیری

در مدلسازی نتایج آزمایشات از مدل جامد خالص استفاده شده است. این مدل در اکثر موارد با رگرسیون مناسب معادله حالت پیش بینی های قابل قبولی ارائه می دهد ولی در درصدهای بالای گاز، محاسبات تعادل فازی دچار خطا شده و این مدل قادر به پیش بینی مناسب داده های آزمایشگاهی نمی باشد. در مدل های ترمودینامیکی، آسفالتین به صورت یک شبه جزء در نظر گرفته می شود و با رگرسیون خواص آن، خروجی مدل با اطلاعات آزمایشگاهی تطابق داده می شود.

باید توجه داشت که این رگرسیون تنها در شرایط آزمایش معتبر است و با هر گونه تغییر در شرایط ترمودینامیکی (تغییرات دما یا غلظت گاز تزریقی) نمی توان انتظار پیش بینی مناسبی از این مدلها داشت. در شرایط مخزن، غلظت گاز تزریقی در نقاط مختلف مخزن یکسان نیست و انجام محاسبات با استفاده از معادلاتی که برای شرایط خاص آزمایشات بهینه شده اند توجیهی نخواهد داشت.

در قسمت مدلسازی، داده های آزمایشگاهی استفاده شد و در این قسمت از مطالعه با توجه به عوامل کنترل کننده مقدار رسوب آسفالتین که مقدار ضریب بر هم کنش (σ) جزء آسفالتین رسوب کننده (+B36 C) با اجزاء سبک نفت (C1 تا C6) و حجم مولی جامد (V_s) می باشند، خروجی مدل برای مقادیر مختلف حجم مولی جامد (V_s) و ضریب بر هم کنش (σ) شبیه سازی گردید.

در فرایند مدلسازی مقادیر حاصل از شبیه سازی مدل ترمودینامیکی در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی آسفالتین رسوب یافته بر حسب فشارهای مختلف مخزن A و B در دو دمای مخزن، قبل و بعد از تزریق گاز متان بصورت یکجا ارائه شد. تغییرات رسوبات آسفالتین بر اثر تغییرات فشار، دما و ترکیب سیال به خوبی مقایسه گردید. بر اساس نتایج حاصل تزریق گاز یا همان اثر تغییر ترکیب سیال مخزن بشدت بر روند تشکیل رسوبات آسفالتین اثر می گذارد و انطباق مدل با داده های آزمایشگاه هم شاهدهی بر این ادعا می باشد. همچنین با مقایسه خروجی مدل در دو دمای مختلف این نتیجه حاصل می شود که اثر دما بر روند تشکیل رسوبات آسفالتین کمتر از اثر تغییر ترکیب سیال می باشد.

۸-مراجع:

1. Mansoori G. A., and Jiang, T.S., "Asphaltene Deposition and its role on Enhanced Oil Recovery, Proc. of the 3rd European Conference on Enhanced Oil recovery", Rome, Italy 1985.
2. Negahban, S., Bahamaish, J.N.M., Joshi, N., Nighswander, J. and Jamaluddin, "An Experimental Study at an Abu Dhabi Reservoir of Asphaltene Precipitation Caused by Gas Injection", SPE Production & Facilities, (May 2005), 115-125.



3. Abrishami Y., Hatamian H., and Dawe R.A. "Tuning of Peng-Robinson Equation of State for Simulation of Compositional Change in Flue Gas Injection Processes", Fluid Phase Equilibria 139 219-254(1997.)
4. Stryjek R. and Vera J.H.," An Improved Peng-Robinson Equation of State for Pure Components and Mixtures", Can. J. Chem.Eng.64 323-333. (1986).
5. Danesh, A. PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids, Elsevier. (1998).
6. Kohse B.F., Nghiem L.X., Maeda, H. and Ohno, K. "Modeling Phase Behavior Including the Effect of Pressure and Temperature on Asphaltene Precipitation", Paper SPE 64465 presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Australia, October 16-18, 2000.
7. Verdier, S. "Experimental Study and Modeling of Asphaltene Precipitation Caused by Gas Injection", PhD Thesis, Technical University of Denmark, 2006.
8. Mullins O.C., Betancourt S.S., Cribbs M.E., Creek J.L., Dubost F.X., Andrews A.B. and Venkatarmanan L. "The Colloidal Structure of Crude Oil and the Structure of Oil Reservoirs", accepted for publication in Energy & Fuels, 2007.