

## بررسی تئوریک و مطالعه شبیه سازی پدیده رسوب آسفالتین در محیط متخلخل در پروسه تزریق حلال

سید محمد رضا زاهدی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی شیمی (مخازن هیدروکربوری) - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

فرهنگ جلالی فراهانی

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران (ریاست انستیتو مهندسی نفت)

(تاریخ دریافت ۸۳/۶/۲۴، تاریخ تصویب ۸۴/۲/۲۴)

### چکیده

یکی از تکنیک های متداول در پروسه ازدیاد برداشت، تزریق حلال می باشد. تزریق بعضی از حلالها در مخازن، باعث بهم خوردن تعادل ترمودینامیکی و تغییرات ترکیب درصد اجزای نفت مخزن شده و موجبات تشدید رسوب دهی آسفالتین و عواقب ناشی از آن را پدید می آورد. بدلیل اینکه رسوب آلی اجزای سنگین نظیر آسفالتین، باعث افزایش فشار تزریق، کاهش بسیار شدید تراوایی خلل و فرج، گرفتگی و مسدود شدن محیط متخلخل، تغییر خاصیت ترشوندگی سنگ مخزن و در نهایت کاهش تولید شده، بنابراین قبل از شروع پروسه تزریق، مطالعه عمیق و جامع علمی و عملی برای بررسی و پیشگویی تشکیل رسوبات آسفالتین با توجه به شرایط مخزن، نوع حلال تزریقی، نسبت حجمی حلال به نفت و همچنین دبی تزریق امری لازم و ضروری بنظر می رسد.

در این مطالعه، با شبیه سازی یک سری از آزمایشات تزریق نرمال هپتان در یک محیط متخلخل (لوله قلمی) با استفاده از سیال یکی از مخازن جنوبی ایران (اهواز)، رابطه رسوب دهی دینامیک آسفالتین و اثر تغییر پارامترهای آزمایشگاهی (تغییر نسبت حجمی حلال به نفت تزریقی، دبی حجمی تزریق و دما) بر روی افزایش فشار تزریق و کاهش تراوایی مخزن مورد مقایسه قرار گرفته است.

در این مدل با استفاده از شبیه ساز ترکیبی GEM از مجموعه نرم افزاری CMG، مدل تخلخل یگانه مخزن (single) و ساخت مدل سیال مخزن توسط نرم افزار Win Prop، شرایط لوله قلمی برای یک مخزن فرضی مدل شده و نتایج خروجی شبیه ساز در هر سناریوی تعریف شده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه سازی و ثابت بودن همه شرایط مدل، مهمترین پارامتر اثرگذار بر رسوب دهی آسفالتین، تغییر نسبت حجمی هپتان به نفت بود که افزایش آن باعث رسوب دهی شدیدتر آسفالتین و افزایش فشار تزریق و کاهش بیشتر تراوایی مخزن می شد. اثر تغییر دبی حجمی تزریق، در سرعت رسوب گذاری بود و تغییر دما اثر چندانی نداشت. با توجه به نکات ذکر شده در فوق، لازم است در انتخاب بهترین نسبت حجمی حلال به نفت تزریقی، نهایت مطالعه و دقت بکار گرفته شده تا از مشکلات رسوب دهی آسفالتین در مخزن تا حد امکان پیشگیری شود.

**واژه های کلیدی:** آسفالتین، رزین، میسل، رسوب دهی، حالیت، تراوایی، تخلخل، مخازن نفتی، مخزن اهواز، دما

و فشار بحرانی، فوگاسیته

### مقدمه

نفت که توسط رزین های جذب شده بر روی سطحشان در حالت توازن و پایدار می باشند، وجود دارند [۲]. رزین ها مانند یک لایه محافظ، آسفالتین ها را در محلول به حالت تعلیق نگه داشته و از آنها در برابر رسوب محافظت می کنند. با اضافه شدن حلال برای کم کردن ویسکوزیته نفت در پروسه ازدیاد برداشت، با بهم خوردن مشخصات نفت، مولکولهای رزین برای برقراری مجدد حالت تعادلی که در نفت موجود بوده است، از سطح آسفالتین جدا شده و جدا شدن این مولکولها، باعث وارد

یکی از مهمترین مشکلات موجود در تولید مخازن نفتی، خصوصا در ایران، مشکل رسوب دهی آسفالتین می باشد. از مهمترین عوامل مؤثر بر رسوب دهی آسفالتین در مخازن نفتی، تغییر فشار و تزریق حلال می باشد. آسفالتین یکی از اجزای بسیار قطبی نفت، با ساختمان مولکولی پیچیده شامل حلقه های آروماتیک در هسته و اجزای نفتیک در اطراف هسته با جرم مولکولی بالا می باشد [۱]. آسفالتین ها به شکل محلول در نفت و یا بعنوان یک سوسپانسیون کلوئیدی کاملا پخش شده در

می کند، این فاکتور را در هر مرحله زمانی در تراوایی اولیه محیط متخلخل ضرب نموده و عدد حاصل را به عنوان تراوایی محیط متخلخل در آن مرحله زمانی منظور می نماید که همیشه کمتر از تراوایی اولیه خواهد بود. بدین ترتیب با منظور نمودن مقادیر تراوایی های جدید در هر مرحله زمانی، به شبیه سازی افزایش فشار تزریق در مجموعه محیط متخلخل پرداخته شده است. با توجه به نکات ذکر شده، چنین استنباط میشود که افزایش فشار مخزن (فشار تزریق) بهترین دلیل مشخصه برای کاهش تراوایی و به تبع آن کاهش قابلیت حرکت سیال در سنگ مخزن بوده که از بیشترین تبعات ناشی از رسوب دهی آسفالتین در مخزن می باشد [۹].

### شبیه سازی مدل سیال مخزن

سیال مخزن مورد نظر در این کار، سیال مخزن بنگستان اهواز (چاه شماره ۳۴) می باشد. نمونه برداری از عمق ۱۱۹۶۶ فوتی در زیر زمین و سازند سروک انجام شده است. بر روی این نمونه سیال ته چاهی مخزن اهواز، یک آزمایش تبخیر آبی در دمای ۱۶۰ درجه فارنهایت و دو آزمایش تبخیر تفاضلی در دماهای ۲۱۰ و ۲۴۰ درجه فارنهایت صورت گرفته که فشار اشباع آزمایشگاهی در تست تبخیر آبی برابر ۲۱۵۲ psi و در روش تبخیر تفاضلی بترتیب برابر ۲۶۳۸ psi و ۲۴۸۴ psi می باشد. داده ها حاکی از آن است که در عمق نمونه برداری شده، نفت کاملاً زیر اشباع بوده که ترکیب درصد آن با داشتن  $API=24$  به صورت زیر می باشد. لازم به ذکر است که جرم مولکولی های نفت مخزن و برش سنگین آن بترتیب برابر با ۱۲۵/۶۲ و ۲۶۵ می باشد.

جدول ۱: ترکیب درصد جزئی نفت مخزن.

COMPONENT	MOL%	WT %
H <sub>2</sub> S	0.933	0.253
CO <sub>2</sub>	4.823	1.690
C <sub>1</sub>	31.479	4.020
C <sub>2</sub>	7.234	1.732
C <sub>3</sub>	4.808	1.688
i-C <sub>4</sub>	1.072	0.496
n-C <sub>4</sub>	3.182	1.472
i-C <sub>5</sub>	1.650	0.947
n-C <sub>5</sub>	1.933	1.144
C <sub>6</sub>	2.660	1.824
C <sub>7</sub> <sup>+</sup>	40.167	84.733
Gas/Oil Ratio(cuft/bbl)	573.07	

شدن نیرو به میسل های آسفالتین برای تجمع و پیوستگی از مکان های خالی از رزین در سطح آنها، به منظور کاهش سطح انرژی آزاد آنها خواهد شد. اگر مقادیر کافی از یک حلال به نفت اضافه شود، مولکولهای آسفالتین پس از پیوستگی و تراکم و رشد در اندازه، شروع به رسوب دهی می کنند [۳،۴،۵]. در طی این پروسه، بعضی از مولکولهای آسفالتین ممکن است به دلیل اندازه بزرگشان به درون خلل و فرج ریخته و بقیه توسط جریان سیال حمل شوند تا اینکه بطور همزمان به دهانه ای از خلل و فرج رسیده و تراوایی مؤثر را کاهش دهند که میزان این کاهش تراوایی وابسته به طبیعت سنگ و خواص اصلی مغزه می باشد. همچنین ممکن است ذرات آسفالتین، خود را به بارهای منفی و ماسه سنگ های آبدوست چسبانده و خاصیت ترشوندگی ذاتی آنها را به سمت تمایل نفت دوستی بیشتر تغییر دهند (لازم به ذکر است که نوع بار آسفالتین ها، وابسته به منبع نفتی آنها می باشد) و در نهایت باعث کاهش میزان بازیافت نفت شوند [۶،۷].

در این کار با استفاده از شبیه سازی داده های مطالعات آزمایشگاهی بر روی پروسه تزریق نرمال هپتان در لوله قلمی (محیط متخلخل) و با استفاده از نفت یکی از میادین جنوبی ایران، به پیشگویی و مدلسازی رسوب دهی آسفالتین و اثرات آن در افزایش فشار میانگین مخزن (فشار تزریق) و کاهش تراوایی و قابلیت حرکت سیال در سنگ مخزن در سناریوهای مختلف پرداخته شده و در نهایت برای این مدل با بررسی اثر حساسیت سنجی تغییر پارامترهای آزمایشگاهی، به مقایسه این اثرات در افزایش رسوب دهی آسفالتین و فشار تزریق پرداخته شده است [۸].

برای مدل سازی رسوب دهی آسفالتین، ابتدا به شبیه سازی مدل سیال مخزن توسط شبیه ساز Win Prop و سپس به شبیه سازی مدل مخزن توسط شبیه ساز GEM از مجموعه شبیه سازهای گروه CMG پرداخته شده است. توضیح بیشتر اینکه چون این شبیه ساز، تخلخل محیط متخلخل را در طی شبیه سازی ثابت فرض می کند، تنها عامل افزایش فشار با توجه به ثابت بودن دبی تزریق را، کاهش تراوایی محیط متخلخل در اثر رسوب دهی آسفالتین قلمداد می نماید. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن یک فاکتور خسارت که از رابطه خطی پیروی

## آنالیز خواص $C_7^+$ و تقسیم آن به اجزای مجازی<sup>۱</sup>

بعنوان اولین گام با استفاده از رابطه ضریب مشخصه واتسون خواهیم داشت (در رابطه زیر  $T_b$  نقطه جوش نرمال  $C_7^+$  بر حسب درجه رانکین و  $S$  وزن مخصوص آن می باشد

$$K_W = T_b^{1/3} / S \quad (1)$$

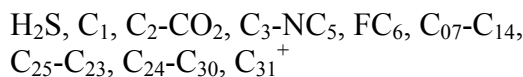
با استفاده از رابطه Riazi-Daubert فرمول فوق به شکل زیر در می آید:

$$K_W = 4.5579 MW^{0.15178} S^{-0.84573} \quad (2)$$

که در آن برای نمونه نفت ما، ضریب مشخصه واتسون برابر با  $11/50.9$  بوده و در نتیجه می توان استنباط کرد که برش سنگین در محدوده نفتها ( زنجیره های هیدروکربنی سیر نشده) می باشد. پس از مشخص شدن ضریب فوق، جزء سنگین نفت مخزن مورد نظر به منظور بالا بردن انعطاف پذیری معادله حالت استفاده شده، به چهار جزء مجازی به صورت  $C_{07}-C_{14}$ ,  $C_{15}-C_{23}$ ,  $C_{24}-C_{30}$ ,  $C_{31}^+$  شکسته شد.

## گروه بندی<sup>۲</sup>

برای کم کردن حجم محاسبات و ساده کردن محاسبات عددی و همچنین کم شدن خطاها در شبیه ساز ترکیبی، اجزای مخلوط هیدروکربنی را می بایست گروه بندی کنیم. این گروه بندی تجربی بوده ولی از لحاظ علمی می بایست اجزایی که بیشترین شباهت را به یکدیگر داشته، با هم گروه بندی شوند. با توجه به گروه بندی صورت گرفته، ترکیب نهایی سیال مخزن برای ورود به مدل به صورت زیر میباشد:



با توجه به گروه بندی فوق، ترکیب سیال شامل ۹ جزء شد. لازم به ذکر است که خواص بحرانی اجزای مجازی با استفاده از قوانین اختلاط Lee-Kasler تخمین زده می شوند.

## معادله حالت

در این کار از معادله حالت (78) Peng-Robinson

بدلیل دارا بودن بهترین دامنه تعریف ضریب بی مرکزی برای سیالات نفتی و بهترین تطابق جوابها، استفاده شد [۱۰].

## انطباق جوابهای معادله حالت با نتایج

### داده های آزمایشگاهی

مهمترین و اساسی ترین مشکل برای تطابق یک معادله حالت درجه سوم با نتایج آزمایشگاهی، تعیین بهترین مجموعه پارامترهای رگرسیون می باشد. برای پیدا کردن این مجموعه، طی یک سری مراحل سعی و خطا اجتناب ناپذیر می باشد. تابع هدف که میزان آن در طول عملیات رگرسیون می بایست می نیمم شود، به صورت زیر می باشد [۱۱]:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{w(i)(Y(i) - y(i))}{y(i)} \right]^2 \quad (3)$$

$w(i)$ : ضریب وزنی خاصیت  $i$

$y(i)$ : مقدار آزمایشگاهی خاصیت  $i$

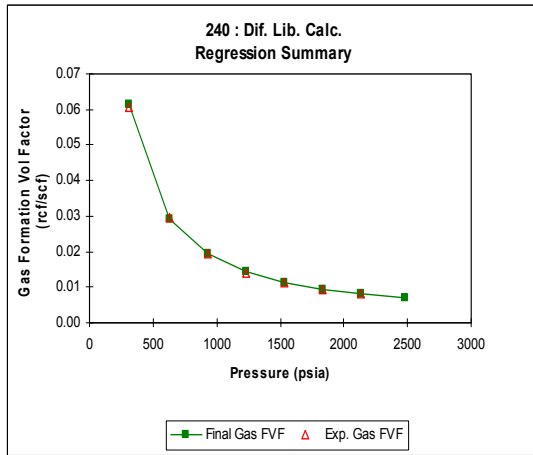
$Y(i)$ : مقدار خاصیت  $i$  به دست آمده از معادله حالت

## انتخاب بهترین پارامترهای رگرسیون

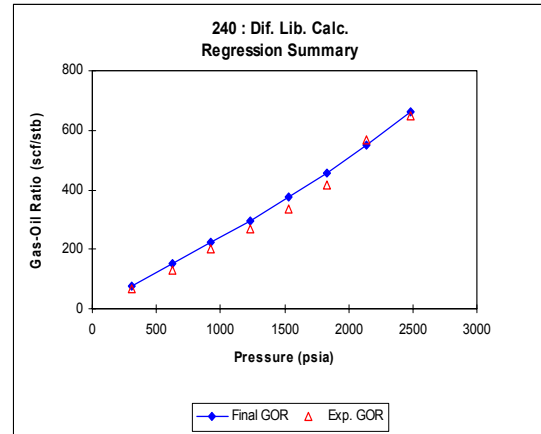
معمولاً با تعیین تعدادی از خواص اجزای تشکیل دهنده سیال مخزن بعنوان پارامترهای رگرسیون، به مدل اجازه داده می شود تا با تغییر این خواص، مقدار تابع هدف، می نیمم شده و در نتیجه بهترین تطابق بین نتایج معادله حالت و داده های آزمایشگاهی را ایجاد کند. در این کار پارامترهایی که در طی فرایند رگرسیون تغییر داده شد، عبارتند از: ضرایب بین مولکولی دوگانه برای تمام اجزاء<sup>۳</sup>، دما و فشار بحرانی و ضریب بی مرکزی اجزای گروه بندی شده و اجزای مجازی حاصل از تقسیم  $C_7^+$ ، ضریب تصحیح حجم<sup>۴</sup> مربوط به  $C_1$ ، اجزای مجازی  $C_7^+$  به جز  $C_{31}^+$  و ضرائب معادله حالت  $(\Omega_A, \Omega_B)$  برای  $C_{24}-C_{30}$ .

نتایج بهترین تطابق داده های آزمایشگاهی حجم نسبی، ضریب تراکم پذیری گاز، ضرایب حجمی نفت و گاز و نسبت گاز محلول در نفت با جوابهای معادله حالت، پس از

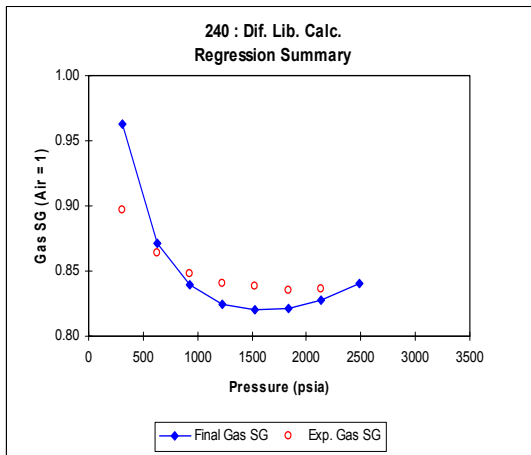
انتخاب بهترین حالت رگرسیون غیر خطی، به شکل زیر می باشند:



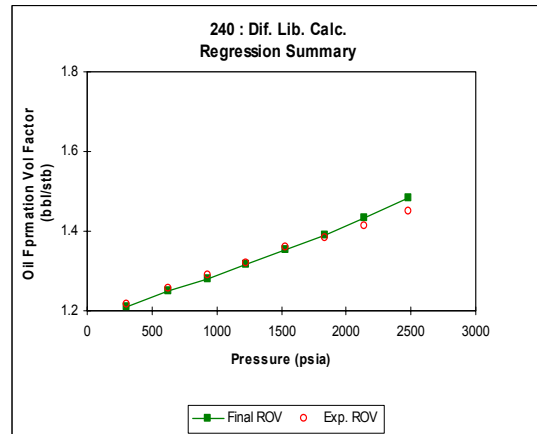
شکل ۴: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی نسبت حجمی گاز و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در  $240^{\circ}\text{F}$ .



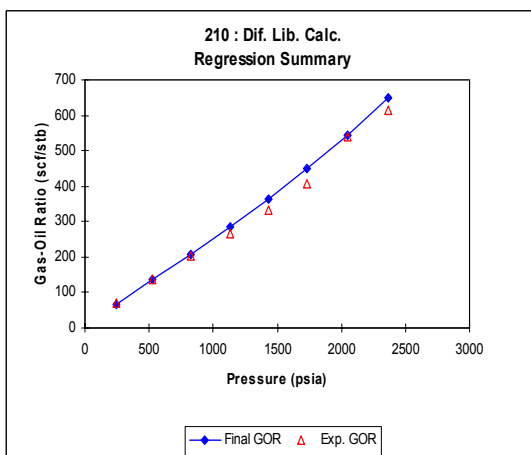
شکل ۱: نتایج انطباق داده های آزمایشگاهی نسبت حجمی گاز به نفت و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در  $240^{\circ}\text{F}$ .



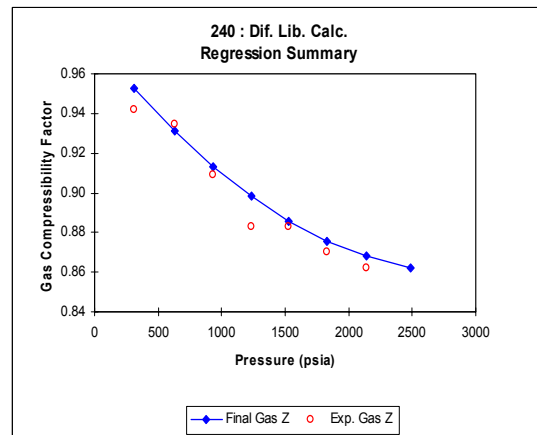
شکل ۵: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی وزن مخصوص گاز و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در  $240^{\circ}\text{F}$ .



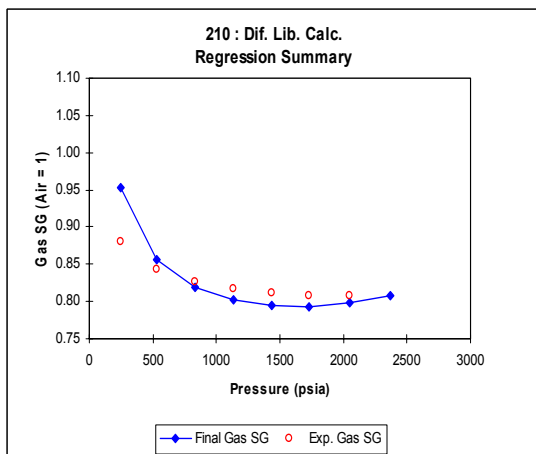
شکل ۲: نتایج انطباق داده های آزمایشگاهی فاکتور نسبت حجمی نفت و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در  $240^{\circ}\text{F}$ .



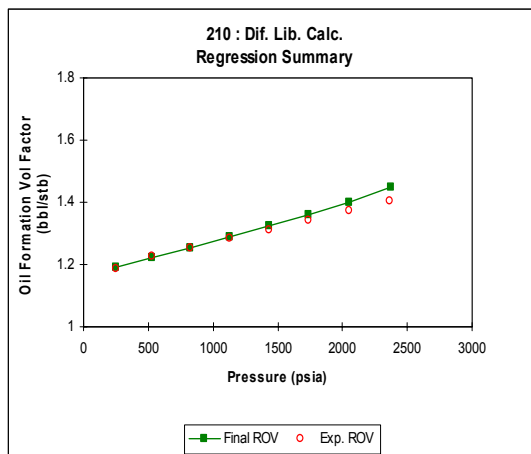
شکل ۶: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی نسبت گاز به نفت و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در  $210^{\circ}\text{F}$ .



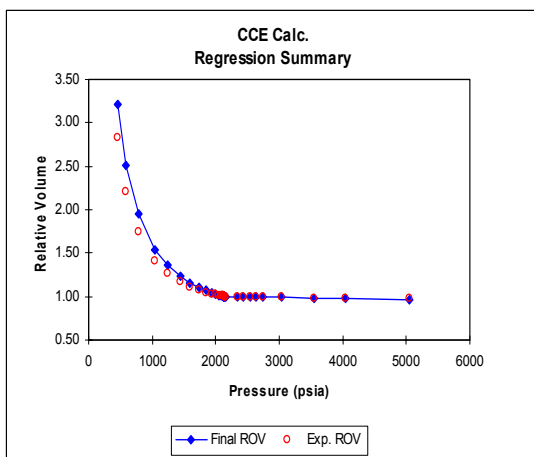
شکل ۳: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی ضریب تراکم پذیری گاز با جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در  $240^{\circ}\text{F}$ .



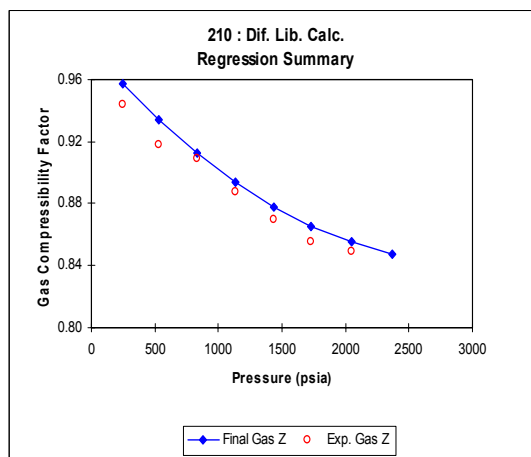
شکل ۶: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی وزن مخصوص گاز و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در ۲۱۰ °F.



شکل ۷: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی فاکتور نسبت حجمی نفت و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در ۲۱۰ °F.



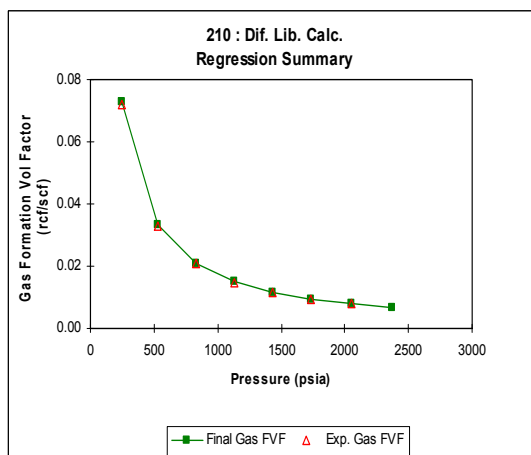
شکل ۸: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی حجم نسبی نفت و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر با ترکیب ثابت.



شکل ۹: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی ضریب تراکم پذیری گاز و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در ۲۱۰ °F.

### تئوری شبیه سازی رسوب دهی آسفالتین

در یک مخلوط شامل  $n_c$  ترکیب، جزء آسفالتین، جزء  $n_c$  ام بوده و بعنوان سنگین ترین عضو در نظر گرفته می شود. برای شناسایی ترکیب آسفالتین، هم در محلول و هم در فاز آسفالتین، سنگین ترین جزء  $(C_{31}^+)$ ، به دو جزء رسوب کننده و غیر رسوب کننده  $(C_{31}^+ A, C_{31}^+ B)$  شکسته شده که این دو جزء دارای خواص بحرانی و ضریب بی مرکزی یکسان بوده ولی ضرائب اثر متقابل با ترکیبات سبک آنها با یکدیگر متفاوت می باشد. اجزای رسوب کننده دارای ضرائب بزرگتر با اجزای سبک بوده و این مطلب نشان دهنده ناسازگاری بیشتر مابین اجزاء و کمک به تشکیل آسفالتین می باشد.



شکل ۱۰: نتایج تطابق داده های آزمایشگاهی فاکتور نسبت حجمی گاز و جوابهای معادله حالت برای آزمایش تبخیر تفاضلی در ۲۱۰ °F.

و بنابراین برای ایجاد سیستم گرید بلوک، از سیستم کارترزین گرید استفاده شد. گریدها مکعب مستطیل با قاعده مربع به طول  $a = \frac{\sqrt{\Pi}}{2} \times d$  بوده که در این رابطه،  $a$  طول ضلع مربع در قاعده مکعب مستطیل و  $d$  قطر داخلی استوانه لوله قلمی می باشد.

با توجه به رابطه فوق و عددگذاری، برای خواص مشخصه گرید بلوک مکعب مستطیل خواهیم داشت:

طول در جهت  $i$ : 18.3m

طول در جهت  $j$ : 0.005459m

طول در جهت  $k$ : 0.005459m

بنابراین تعداد گرید بلوک ها در جهت  $i$  برابر با  $500 \times 0.036$  m و تعداد در جهت  $j$  و  $k$  برابر با  $1 \times 0.005459$  m می باشد. درصد اشباع آب برابر با صفر و ضخامت هر گرید بلوک برابر با  $0.005459$  m به مدل وارد شد. برای مشخص کردن جهت یک بعدی جریان به مدل، تراوایی در جهت  $i$  را همان تراوایی محیط متخلخل لوله قلمی را که  $13000$  mD بود، وارد کرده و برای تراوایی در جهت های  $j$  و  $k$  عدد بسیار ناچیزی منظور شد. همچنین درصد تخلخل محیط متخلخل برابر با ۳۵٪ انتخاب شد.

### ۳- مشخصات اجزای سیال

در این قسمت، مدل ساخته شده سیال مخزن توسط نرم افزار Win Prop را به مدل وارد می کنیم.

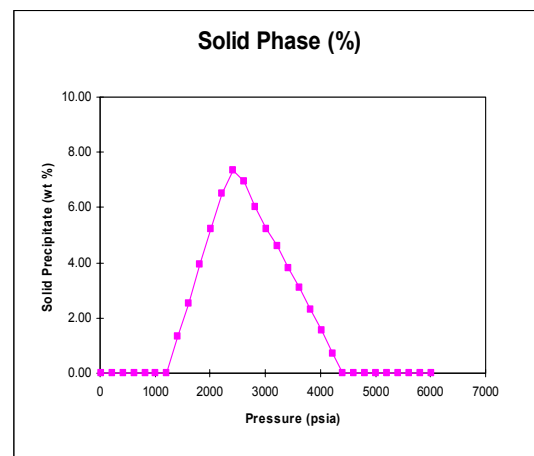
### ۴- داده های سنگ/سیال

در این کار بدلیل در دست نبودن اطلاعات سنگ مخزن (بدلیل محیط متخلخل آزمایشگاهی)، داده های یک نوع ماسه سنگ تمیز از یکی از میداین جنوبی ایران بعنوان تراوایی های نسبی و فشار موئین در ازای درصد اشباع آب و نفت، وارد شد. بدلیل همگونی محیط نیز، از یک نوع سنگ<sup>۵</sup> با مشخصات یکتا، استفاده شد.

### ۵- شرایط اولیه

در این قسمت، درصد اشباع آب برای تمامی گرید بلوک ها، صفر در نظر گرفته شد. فشار اولیه برای تمامی آنها  $1200$  psi و دما برابر  $90^{\circ}\text{C}$  انتخاب شد. برای ترکیب درصد نهایی در شرایط اولیه، برای نرمال هپتان عدد ۱ و برای بقیه ترکیبات، صفر منظور شد که این مطلب نشان دهنده اشباع کامل محیط متخلخل در شرایط اولیه توسط نرمال هپتان می باشد.

پس از شناسایی جزء آسفالتین توسط مدل که همان جزء  $\text{C}_{31}^+\text{B}$  بوده، در هر لحظه زمانی مدل با استفاده از تست پایداری به مقایسه فوگاسیته آسفالت در فاز مایع و جامد پرداخته و اگر این فوگاسیته در فاز جامد کمتر از فاز مایع باشد ( $\ln f_{nc1} \geq \ln f_a$ )، در نتیجه آسفالتین رسوب خواهد کرد. لازم به ذکر این نکته است که پارامترهایی که برگشت پذیری رسوب دهی آسفالتین در Win Prop را کنترل می کنند، حجم مولی جامد و پارامترهای اثر متقابل مابین اجزای رسوب کننده و برشهای سبک نفت می باشند. شکل زنگوله ای زیر این برگشت پذیری را نشان می دهد [۱۲، ۱۳، ۱۴].



شکل ۱۲: گراف زنگوله ای تأیید برگشت پذیری رسوب دهی آسفالتین در نرم افزار Win Prop .

## شبیه سازی مدل مخزن

پس از ساختن مدل سیال مخزن و انطباق قابل قبول داده های آزمایشگاهی و نتایج معادله حالت در WinProp، در این قسمت اطلاعات مخزن به Model Builder وارد شده تا برای اجرا در GEM آماده گردد [۹].

### ۱- قسمت کنترل ورودی و خروجی

در این قسمت واحد داده ها به سیستم SI وارد شد و همچنین نتایج مورد نظر برای بررسی در قسمت نمودار نتایج در خروجی شبیه ساز مشخص شدند.

### ۲- توصیف مشخصات مخزن

در این قسمت از مدل تخلخل یگانه (single) مخزن استفاده شد. بدلیل هم جهت بودن جریان در لوله قلمی و محور استوانه، مدل خطی جریان در مخزن انتخاب شده

## ۶- روشهای کنترل عددی

این قسمت، یکی از مهمترین قسمت ها بوده چرا که در صورت بی دقتی در انتخاب تغییرات، یا شبیه سازی بطور کامل انجام نمی شود و یا بدلیل نرسیدن به همگرایی و یا بیشتر شدن تعداد تکرارها، شبیه سازی متوقف شده و یا زمان اجرا بسیار طولانی خواهد شد. در این قسمت تغییرات به شرح زیر انتخاب شد:

### Normal variation

Pressure: :145psi (default)

Saturations:0.15 (default)

Global composition:0.5

### Maximum change variation

Pressure:14503psi

Saturation:0.9

Global composition:0.9

### Time

Maximum time step allowed:30000 (default)

Maximum time step size:1 day

Minimum time step size:0.001 day

Maximum iterations:100

## ۷- داده های چاه

در این قسمت، سه چاه تعریف شد که شامل دو چاه تزریقی و یک چاه تولیدی بود. چاههای تزریقی شامل نرمال هیتان در گرید (۱و۱) و نفت با مشخصات مورد نظر در گرید (۱و۱) و چاه تولیدی در گرید (۱و۱) (۵۰۰) مشبک شدند. در وارد کردن شرط چاهها، دبی حجمی کل ۳۰ cc/hr با توجه به نسبت حجمی حلال به نفت تزریقی، تقسیم شده و در تمامی مراحل اجرا، ثابت می ماند. شرط اعمال شده دیگر، اعمال فشار ۴۰۰۰ psi برای چاه تزریقی بود که با رسیدن فشار به این حد نهایی تعریف شده، تزریق متوقف شده و به تبع آن لحظاتی بعد نیز، تولید متوقف می گشت.

## بررسی خروجی های شبیه ساز ترکیبی و

## مقایسه اثر تغییر پارامترهای آزمایشگاهی بر

## رسوب دهی آسفالتین

### الف - تغییر پارامتر آزمایشگاهی نسبت حجمی حلال

#### تزریقی به نفت

برای بررسی اثر حساسیت مدل به تغییر نسبت حجمی حلال به نفت، چهار سناریوی نسبت حجمی حلال به نفت شامل ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ برای مدل، تعریف

شد.

در شکل (۱۳)، گرافهای افزایش فشار برای چهار سناریوی مختلف رسم شده است. در لحظات اولیه برای هر سناریو، افزایش فشار میانگین مخزن، بدلیل جذب آسفالتین بر سطح خلل و فرج بسیار شدید بوده و به تبع آن، رسوب دهی آسفالتین و رشد در اندازه تجمعات آن، باعث مسدود شدن تعدادی از خلل و فرج و کاهش قابل توجه تراوایی مجموعه شده و در نتیجه، افزایش فشار با شیب بسیار تندی ادامه خواهد داشت. با توجه به این اشکال هر چه که این نسبت بیشتر می شود، رسوب دهی آسفالتین در محیط متخلخل شدیدتر شده و به تبع آن، شیب افزایش فشار بیشتر خواهد شد. در مرحله زمانی بعد، نوسانات بی نظم در اشکال حاکی از انحراف نرم افزار از مکانیزم های یاد شده و ناپایداری عددی بوده که دلیل این مسأله، تعریف نشدن مکانیزم به تله افتادن رسوب در خلل و فرج برای شبیه ساز می باشد. در واقعیت، انتظار می رود که، افزایش فشار با شیب کمتری در این مرحله ادامه یافته و به یک سطح خاصی برسد که به دلیل مدل نشدن مکانیزم یاد شده برای شبیه ساز، این افزایش فشار انتهایی را در خروجی های شبیه ساز نخواهیم دید.

در مراحل زمانی بعدی، با افزایش زمان رسوب گذاری و اعمال نیروهای عمل کننده بر رسوب آسفالتین، تجمعات آسفالتین در دهانه ورودی خلل و فرج، ممکن است که به یکی از دو صورت زیر جدا شوند:

۱- ممکن است که بدلیل افزایش فشار و اعمال نیروهای هیدرودینامیکی عمل کننده بر رسوب آسفالتین و همچنین اثر جریان ورودی، از دهانه خلل و فرج، جدا شده و در فاز نفت جریان یابند.

۲- ممکن است که بدلیل تماس با نفت خالص<sup>۶</sup> از دیگر نقاط مخزن، درون فاز نفت، حل شوند.

هر دو مکانیزم فوق که از آن به عنوان زایش و میرایش<sup>۷</sup> یاد شده، باعث باز شدن تعدادی از دهانه های خلل و فرج و افزایش تراوایی و در نتیجه، کاهش فشار میانگین مخزن شده که این مطلب نشان میدهد که رسوب دهی به سطح اشباع خود رسیده و حالت تعادل برقرار شده است. شروع نوسانات منظم در مراحل انتهایی شبیه سازی حاکی از اعمال این مکانیزم یاد شده می باشد. لازم به ذکر است که این کاهش تراوایی تا جایی ادامه دارد که نرخ جدا شدن رسوب آسفالتین، بیشتر از نرخ رسوب دهی آن

باشد، در غیر اینصورت، دوباره کاهش تراوایی و افزایش فشار را به شکل رفتار نوسانی، تا انتها ادامه خواهد یافت. در مقام مقایسه این چهار سناریو، همانطور که در شکل مشهود می باشد، با ثابت بودن تمامی شرایط مدل و افزایش نسبت حجمی حلال به نفت، رسوب دهی آسفالتین در محیط متخلخل شدیدتر شده و به تبع آن، کاهش تراوایی و کاهش قابلیت حرکت سیال در سنگ مخزن بیشتر شده و در نتیجه افزایش فشار میانگین مخزن نیز بیشتر خواهد شد. این مطلب در سناریوی ۶۰٪/ نسبت حجمی حلال به نفت که بالاترین نسبت تغییر می باشد، بوضوح قابل مشاهده است. همچنین با افزایش این نسبت، زمان رسیدن رسوب به سطح اشباع و برقراری حالت تعادل و آغاز پروسه زایش و میرایش رسوب دهی، بدلیل افزایش مقدار رسوب دهی آسفالتین، دیرتر خواهد بود.

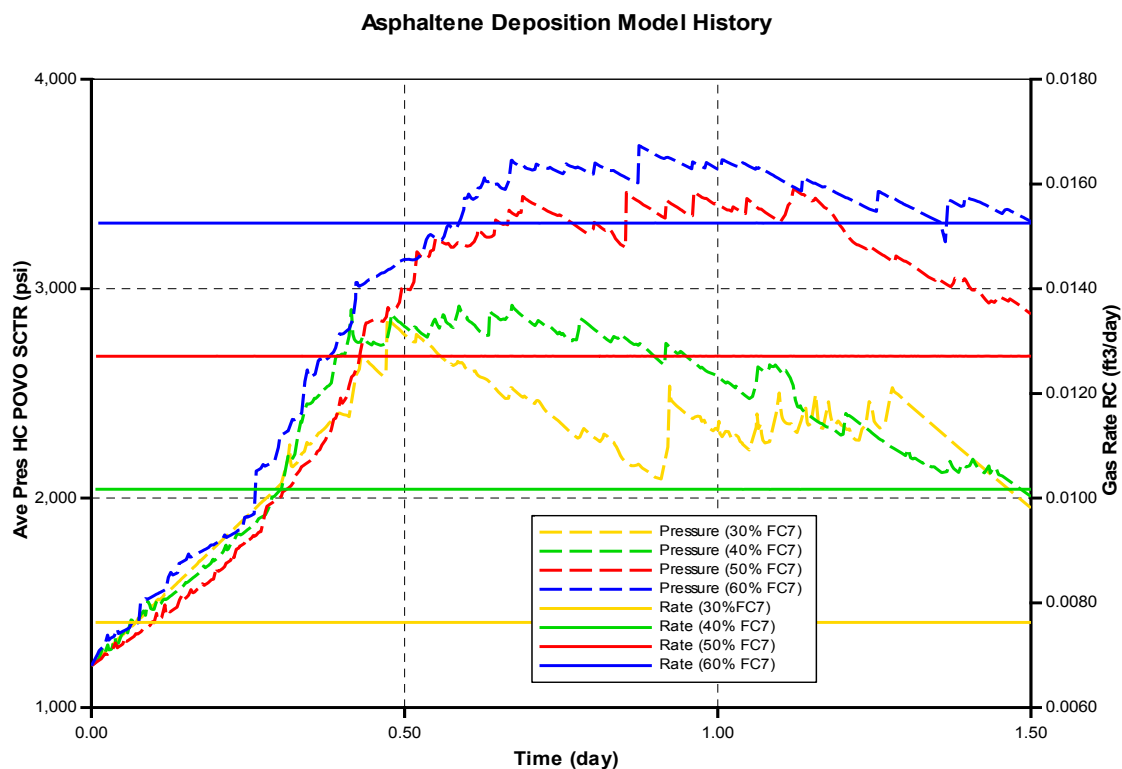
که اثر تغییر دبی حجمی تزریق، در سرعت رسوب گذاری بوده و با افزایش این دبی، عمل رسوب گذاری در لحظات اولیه، سریعتر انجام می گرفت. همچنین برای حالتی که دبی تزریق کاهش می یافت، افزایش فشار در مراحل انتهایی شبیه سازی، بیشتر بود که دلیل این مسأله، کم رنگ شدن اثر مکانیزم زایش و میرایش رسوب دهی در محیط متخلخل بود.

### ج - تغییر پارامتر آزمایشگاهی دما

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در مخازن نفتی، تقریباً دما ثابت فرض می شود ولی چون در شرایط آزمایشگاهی، مطالعه تغییرات این پارامتر بر رسوب دهی آسفالتین انجام شده بود، برای تأیید نتایج آزمایشگاهی در شبیه سازی گنجانده شده و با تعریف سه سناریوی تغییر دمای محیط متخلخل و ثابت بودن تمامی شرایط مدل، در شکل (۱۵) مشاهده شد که تغییر این پارامتر، اثر قابل توجهی در رسوب گذاری و افزایش فشار میانگین مخزن در مقایسه با پارامترهای قبلی نداشت.

### ب - تغییر پارامتر آزمایشگاهی دبی حجمی تزریق

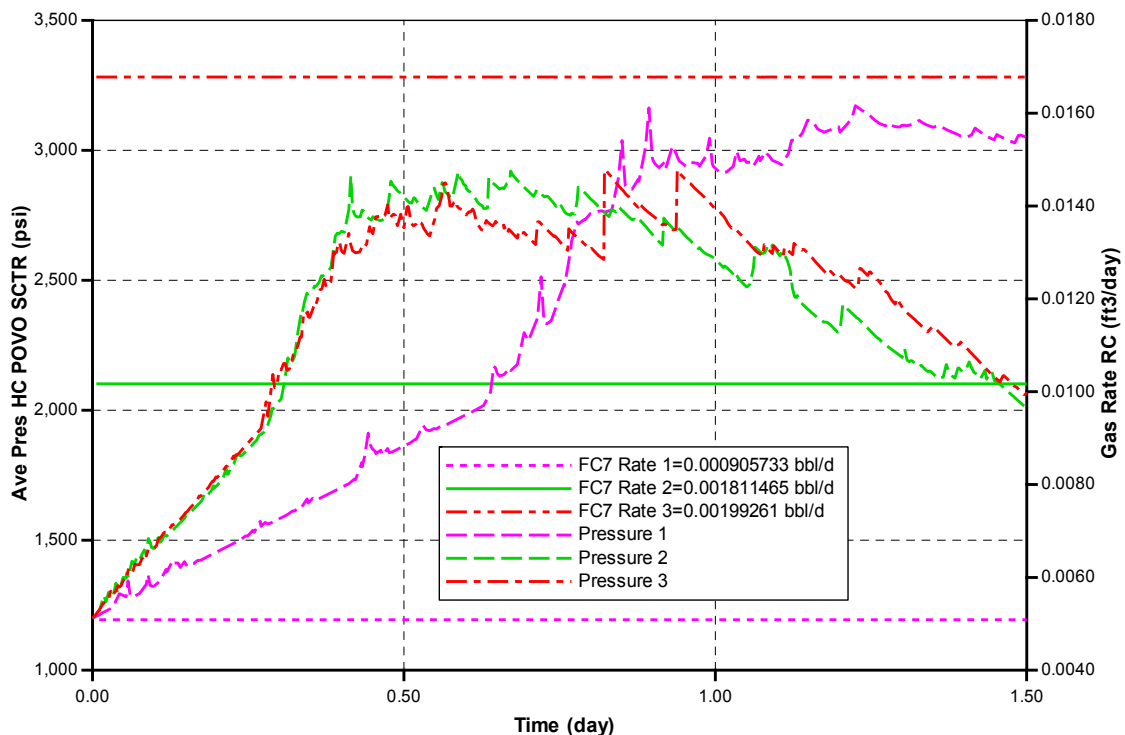
با تعریف سه سناریوی متفاوت دبی حجمی تزریق و ثابت بودن همه شرایط مدل، در شکل (۱۴) مشاهده شد



شکل ۱۳: مقایسه اثر تغییر نسبت حجمی حلال به نفت تزریقی در افزایش فشار میانگین مخزن.

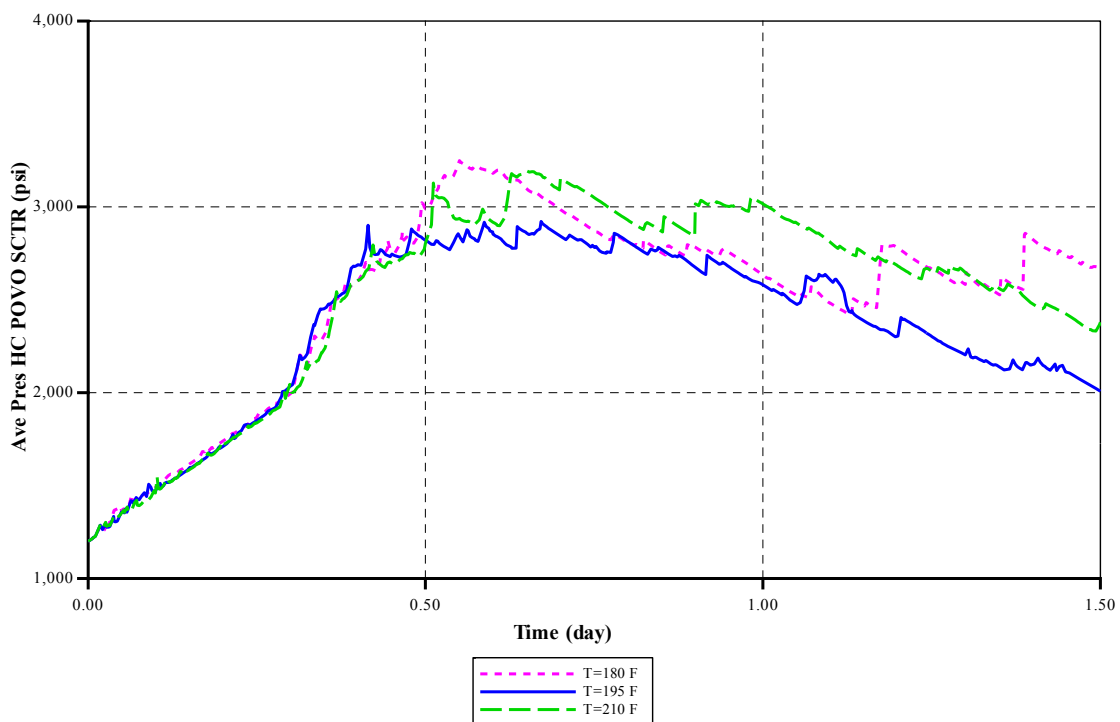


### Sensitivity Analysis Constant Injection Volume Ratio (FC7 40%)



شکل ۱۴: مقایسه اثر تغییر دبی نرمال هپتان تزریقی بر افزایش فشار میانگین مخزن.

### Temperature Sensitivity Analysis Constant Injection Volume Ratio (FC7 40%)



شکل ۱۵: مقایسه اثر تغییر دمای محیط متخلخل در افزایش فشار میانگین مخزن.

## بحث و نتیجه گیری

با توجه به چهار سناریوی تعریف شده نسبت حجمی حلال تزریقی به نفت، مشاهده شد که با افزایش نسبت حجمی حلال تزریقی به نفت و ثابت ماندن دبی تزریق، افزایش فشار بیشتری را در محیط متخلخل خواهیم داشت. در لحظات اولیه زمانی، بدلیل جذب آسفالتین بر سطوح خلل و فرج و رسوب آن در محیط متخلخل، افزایش فشار با شیب بسیار شدید و در مراحل بعد، با انحراف شیب ساز از این مکانیزم ها، نوسانات بی نظم که حاکی از ناپایداری عددی بودند را شاهد بودیم. در این مرحله، بدلیل مدل نشدن مکانیزم به تله افتادن رسوب دهی درون خلل و فرج، ادامه شیب افزایش فشار را در خروجی ها نخواهیم دید. در مراحل پایانی نیز، شروع نوسانات منظم، حاکی از رسیدن رسوب دهی آسفالتین به سطح اشباع خود و حاکم شدن مکانیزم زایش و میرایش آن و در نهایت رفتار نوسانی کاهش و افزایش فشار میانگین مخزن می باشد. همچنین با افزایش این نسبت حجمی حلال به نفت، نوسانات پایانی نسبت به سناریوهای قبلی دیرتر آغاز شده که این مسأله، نشان دهنده افزایش شدیدتر رسوب دهی آسفالتین درون خلل و فرج و دیرتر رسیدن رسوب دهی به سطح اشباع و زایش و میرایش آن می باشد.

با تغییر دبی حجمی تزریق، مشاهده شد که با افزایش این پارامتر، سرعت رسوب گذاری در خلل و فرج بیشتر شده و برای دبی پایین تزریق، فشار انتهایی نیز بیشتر افزایش می یافت که علت این امر، کم رنگ شدن پدیده زایش و میرایش رسوب دهی بود. برای دبی پایین تزریق، شیب

پایین فشار در لحظات اولیه، حاکی از کاهش سرعت رسوب گذاری بود.

با بررسی تغییرات دما بر رسوب دهی آسفالتین، مشاهده شد که تغییر این پارامتر، اثر قابل توجهی بر رسوب دهی آسفالتین و افزایش فشار میانگین مخزن نداشت.

## پیشنهادها

با توجه به نتایج شبیه سازی و مقایسه آن با واقعیت ها، پیشنهادهای زیر برای مطالعه دقیقتر رسوب دهی آسفالتین در مخازن نفتی، لازم و ضروری می باشد:

۱- بدلیل استفاده نشدن از مکانیزم به تله افتادن رسوب در خلل و فرج در شبیه ساز، در مراحل میانی زمانی، ادامه افزایش فشار را در خروجی های شبیه ساز نخواهیم دید. بنابراین پیشنهاد می شود برای پیشگویی دقیق تر شبیه ساز در این مرحله زمانی، این مکانیزم توسط گروه سازندگان شبیه ساز، برای شبیه ساز مدل شود.

۲- جرم مولکولی حلال تزریقی و تغییر اندازه دانه های شیشه ای<sup>۱</sup> اثرات بسیار زیادی در تغییر مشخصات رسوب دهی خواهند گذاشت، بنابراین پیشنهاد می شود برای تکمیل مطالعات مشخصات رسوب دهی، این آزمایشات صورت پذیرد.

۳- برای بدست آمدن نتایج قطعی بهتر، پیشنهاد می شود که از داده های واقعی میدان و از سنگ مخزن های متفاوت، نمونه برداری صورت گرفته تا پیشگویی دقیقتر و برنامه ریزی جامع تری برای پیشگیری از رسوب دهی آسفالتین در مخزن مورد نظر انجام پذیرد.

## مراجع

- ۱ - موسوی دهقانی، س.ع.، وفایی، م.، منصوری، غ. و فصیح، م. "بررسی آزمایشگاهی اثر تغییر فشار بر حلالیت آسفالتین در مخازن نفتی ایران." هفتمین کنگره مهندسی شیمی ایران، شماره ۳، ص ۶۰۲-۶۰۹، (۱۳۸۱).
- 2 - Mansoori, G. A. (1997). "Modeling of asphaltene and other heavy organics depositions." *J. Pet. Sci. Eng.*, Vol. 17, PP. 101-111.
- 3 - Leontaritis, K. J. and Mansoori, G.A. (1987). "Asphaltene flocculation during oil recovery and processing: a thermodynamic-colloidal model." *SPE No.16258. Proceedings of the SPE Symposium on Oil Field Chemistry*. Society of Petroleum Engineering, Richardson, TX.
- 4 - Escobedo, J. and Mansoori, G.A. (1995). "Asphaltene and other heavy organic particles deposition during transfer and production operations." *SPE*, No. 30672.

- 5 - Rassamdana, H., Farhani, M., Dabir, B., Mozaffarian, M. and Sahimi, M. (1999). "Asphaltene flocculation and deposition: V. phase behavior in miscible and immiscible injections." *Energy and Fuel*, Vol. 13, PP. 176-187.
- 6 - Kim, S. T., Boudh-Hir, M. E. and Mansoori, G. A. (1990). "The role of asphaltene in wettability reversal." *SPE*, No. 20700.
- 7 - Al-Maamari, R. S. H. and Buckley, J. S. (2000). "Asphaltene precipitation and alteration of wetting: can wettability change during oil production." *SPE*, No. 59292.
- 8 - Ashoori, S., Jamialahmadi, M., Muller-Steinhagen and Ahmadi, K. (2003). "A new scaling equation for modeling asphaltene precipitation." *SPE*, No. 85576.
- 9 - *Help manual, CMG software*, Computer Modeling Group, Calgary, Canada, V. 2002.
- 10 - Peng, D. Y. and Robinson, D. B. (1976). "A new two-constant equation of state." *Ind. Eng. Chem. Fundam.* Vol. 15, PP. 59-64.
- 11 - Coats, K. H. and Smart, G. T. (1986). "Application of a regression-based EOS PVT program to laboratory data." *SPE*, Vol. 1, No. 3, PP. 277-299.
- 12 - Nghiem, L. X., Kohse, B. F., Farouq Ali, S. M. and Doan, Q. (2000). "Asphaltene precipitation: phase behaviour modelling and compositional simulation." *SPE*, No. 59432.
- 13 - Nghiem, L. X., Hassan, M. S. and Nutakki, R. (1993). "Efficient modeling of asphaltene precipitation." *SPE*, No. 26642.
- 14 - Nghiem, L. X., Coombe, D. A. and Farouq Ali, S. M. (1998). "Compositional simulation of asphaltene deposition and plugging." *SPE*, No. 48996.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Splitting  
4 - Volume Shift  
7 - Birth and Death

2 - Lumping  
5 - Rock Type  
8 - Glass Beads

3 - Binary Interaction Coefficient  
6 - Fresh Oil