

چکیده

با وجود آنکه تزریق CO₂ یکی از رایج ترین راه های ازدیاد برداشت نفت می باشد می تواند باعث تغییر خواص سیالات نفتی و نیز بروز برخی مشکلات مانند تشکیل آسفالتین شود که خود منجر به کاهش تریق پذیری و قابلیت تولید چاه های نفت و گرفتگی دهانه چاه یا تسهیلات سرچاهی می گردد.

هدف این کار نوشتن تشکیل آسفالتین با استفاده از داده های آزمایشگاهی می باشد. فرایند تزریق CO₂ مطالعه شده و اثر حل شدن CO₂ و خروج آسفالتین روی برداشت نفت، دانسیته و ویسکوزیته نفت و نیز درصد تخلخل و تراوایی مخزن، تحت تزریق امتزاجی و غیر امتزاجی بررسی شده است.

حداکثر مقدار تشکیل آسفالتین در نزدیکی فشار و غلظت اشباع سیال می باشد. در مورد دانسیته، حل شدن CO₂ باعث افزایش دانسیته نفت و خروج آسفالتین سبب کاهش آن می شود. آسفالتین و CO₂ در مورد گرانیوی به موازات هم عمل می کنند؛ حل شدن و خروج آسفالتین باعث کاهش گرانیوی می شود. همچنین مشاهده می شود که تشکیل آسفالتین در تزریق های امتزاجی تشدید می گردد.

تشکیل آسفالتین می تواند باعث ارتقای کیفیت نفت شود که به نفع برداشت است یا احتمالاً باعث کاهش تخلخل و تراوایی گردد که به ضرر تولید است.

بررسی رسوب آسفالتین طی تزریق CO₂

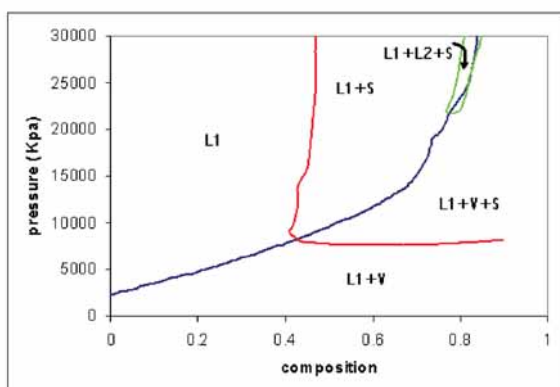
مریم خسروی، بهزاد رستمی، ریاض خراط، دانشکده نفت تهران

مقدمه

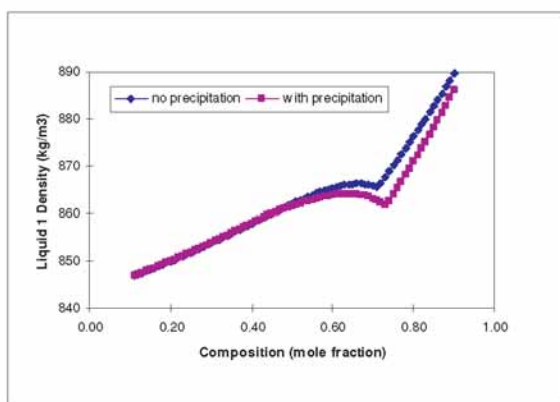
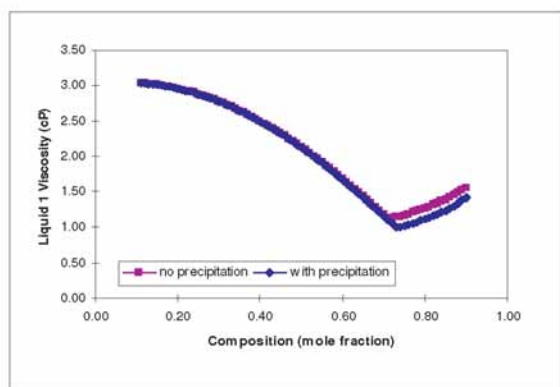
پس از انجام عملیات سیلاب زنی، بسیاری از مخازن نفتی سبک و متوسط ازدیاد برداشت تحت تزریق CO₂ (به صورت امتزاجی یا نزدیک به آن) یا گازهای هیدروکربنی قرار می گیرند. با تزریق CO₂ نفت باقیمانده در تخلخل های کوچک تر متورم و گرانیوی آن کم می شود و به این ترتیب می توان این بخش از نفت را هم تولید کرد. اما به صورت همزمان تزریق CO₂ باعث تشکیل آسفالتین می شود. بنابراین (چه در مدل کردن ها و یا آزمایش ها) باید بدانیم آسفالتین چه موقع و به چه اندازه تولید می شود.^۱

ارزیابی داده ها روی نفت "الف"

در سال ۱۹۹۵ Srivastava et al مطالعه جامعی روی تشکیل آسفالتین طی تزریق CO₂ در نفت و بیرن انجام دادند. در مرحله اول نقاط تشکیل آسفالتین تعیین شده است. در ادامه مقادیر رسوب آسفالتین در محیط متخلخل با استفاده از روش اسکن پروفایل های مختلف مغزه موسوم به CAT-scanning (CAT) -computer aided tomograph x-ray اندازه گیری شده است. خواص فیزیکی و ترکیب درصد عناصر مختلف در نفت الف در جدول ۱ و ۲ مشاهده می شود.^۲



شکل ۱- دیاگرام فازی برای نفت الف

شکل ۲- دانسیته نفت الف با تغییرات غلظت CO₂شکل ۳- دانسیته نفت الف با تغییرات غلظت CO₂

معادلات آسفالتین

آسفالتین تشکیل شده به عنوان یک جامد خالص مدل می شود که در چارچوب معادله حالت با تقسیم کردن سنگین ترین عنصر مجازی نفت (C30+)، به یک بخش غیر رسوبی (non-precipitating or C30+A) و یک بخش رسوبی (precipitating or C30+B) تعریف می گردد. این دو بخش خواص کاملاً یکسانی دارند تنها تفاوت در پارامترهای نیروهای متقابل آنها با اجزای سبک نفت می باشد.^{۳۵۶}

قسمتی از C30+B به عنوان فاز جامد رسوب (precipitate) می کند و از طریق تعادل های ترمودینامیکی، فاز S1 را تشکیل می دهد (معادله ۱). اولین مرحله رسوب آسفالتین را تعرق می نامند. بخشی از S1 از طریق لخته شدن تبدیل به S2 می شود (معادله ۲ و ۳).

مرحله اول رسوب کاملاً برگشت پذیر می باشد لذا این مرحله برای کنترل برگشت پذیری و سایز ذرات رسوب کننده در نظر گرفته شده است. بخشی از آسفالتین لخته شده روی جداره سنگ رسوب می کند (deposited asphaltene) که این بخش از آسفالتین توانایی کاهش تخلخل و تراوایی را دارد. مابقی آسفالتین چه از S1 یا S2 در فاز مایع معلق می ماند و با آن در محیط متخلخل جریان پیدا می کند.

مدل تعرق آسفالتین

هنگامی که آسفالتین در مدل در نظر گرفته می شود C30+ در تعادل ترمودینامیکی با فاز جامد S1 قرار می گیرد. به این منظور فوگاسیته S1 را چنین تعریف می کنیم:

$$\ln f_s = \ln f_s^* + \frac{v_s (p - p^*)}{RT} \quad (1)$$

$$f_{S_1} = \text{فوگاسیته } S1$$

$$f_{S_1} = \text{فوگاسیته مرجع}$$

$$v_{S_1} = \text{حجم مولی فاز جامد}$$

$$p = \text{فشار}$$

$$p^* = \text{فشار مرجع}$$

بدین ترتیب درصد جرمی آسفالتین رسوب کرده با یک سری محاسبات فلش چهار فازی و موازنه جرم ساده به دست می آید.^۲

مدل لخته شدن آسفالتین

تبدیل S1 به S2 از طریق یک واکنش شیمیایی ساده که برگشت پذیر است تعریف می شود:



سرعت این واکنش چنین است:

$$r = k_2 C_{S_1,o} - k_1 C_{S_2,o} \quad (3)$$

که در آن،

$$C_{S_1,o} = \text{غلظت ذرات } S1 \text{ معلق در نفت}$$

$$C_{S_2,o} = \text{غلظت ذرات } S2 \text{ معلق در نفت}$$

و k_1 و k_2 سرعت واکنش رفت و برگشت را کنترل می کنند.

Collins و beck ارائه شده بود. در یک معادله کامل کردند. فرم باز شده این معادله با در نظر گرفتن مراحل مختلف رسوب به این صورت خواهد بود:

$$\frac{V_{S_2}^{n+1} - V_{S_2}^n}{\Delta t} - \alpha C_{S_2}^{n+1} \phi^{n+1} + \beta V_{S_2}^{n+1} (v_o^n - v_{e,o}) - \gamma u_o^n C_{S_2}^{n+1} = 0 \quad (4)$$

که در آن:

$$V_{S_2}^d = \text{حجم آسفالتین رسوب کرده}$$

$$v_o = \text{سرعت سیال در حفرة}$$

$$v_{e,o} = \text{سرعت بحرانی در آستانه کنده شدن}$$

$$u_o = \text{سرعت داریسی}$$

α ضریب سرعت رسوب روی سطح، ثابتی مثبت می باشد که تابع نوع سنگ است. β ضریب سرعت کنده شدن رسوبات بر اثر نیروهای برشی روی دیواره و γ ضریب سرعت بسته شدن گردنه حفرة ها می باشد.

ساختن دیاگرام فازی تشکیل آسفالتین

برای به دست آوردن یک دیاگرام فازی لازم است که در فشارهای ثابت برای غلظت های متفاوت CO₂، محاسبات فلش متعددی انجام گیرد. به این منظور در رنج فشاری ۱۰۰ تا ۷۰,۰۰۰ کیلو پاسکال محاسبات چهار فازی فلش انجام شده است. در بخش خروجی شبیه سازی می توان درصد مولی فازهای مختلف را دید و نقاط آن را در فشارهای مختلف بدست آورد. در آخر با رسم تمام این نقاط دیاگرام فازی نفت حاصل می شود. (شکل ۱)

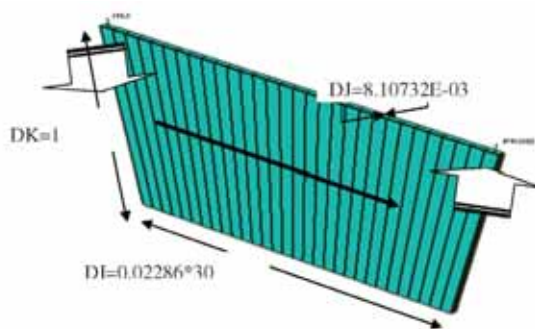
رفتار نفت با تغییر غلظت CO₂

وقتی CO₂ به نفت افزوده می شود دانسیته نفت افزایش می یابد (شکل ۲). در واقع دانسیته از تقسیم جرم مولکولی به حجم مولی بدست می آید. تا قبل از آنکه سیستم دو فازی شود با افزایش غلظت CO₂، جرم مولکولی و حجم مولی هر دو کاهش می یابد (افزایش تعداد مول ها سریعتر از افزایش حجم نفت می باشد) اما حجم مولی سریعتر کم می شود. این رفتار در نفت های تک عنصری (به عنوان مثال C10) هم دیده می شود و نمی توان آن را به تغییرات غلظت عناصر مختلف مربوط کرد. بعد از مدتی از سرعت کاهش حجم مولی کاسته می شود چرا که سیستم در حال اشباع از CO₂ است و بنابراین در منحنی تغییرات دانسیته بر حسب غلظت CO₂ یک مینیمم محلی در نقطه غلظت اشباع دیده می شود.

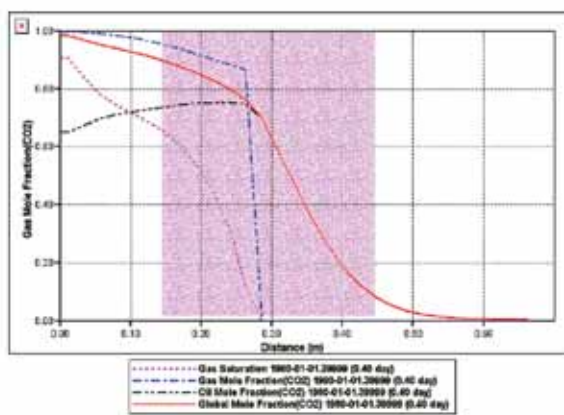
وقتی فاز گاز تشکیل می گردد و حجم مولی هر دو افزایش می یابد (کاهش تعداد مول ها سریعتر از کاهش حجم نفت می باشد) اما جرم مولکولی سریعتر افزایش پیدا می کند. در این بازه CO₂ دانسیته نفت را از طریق گرفتن بخش های سبک فوری افزایش می دهد.

همان طور که در شکل ۳ نمایان است تا وقتی که CO₂ تزریق می شود و فاز گازی تولید نشده گرانیوی نفت کم می گردد اما با ایجاد فاز گاز و کاهش غلظت CO₂ و عناصر سبک در نفت گرانیوی نفت زیاد می شود.

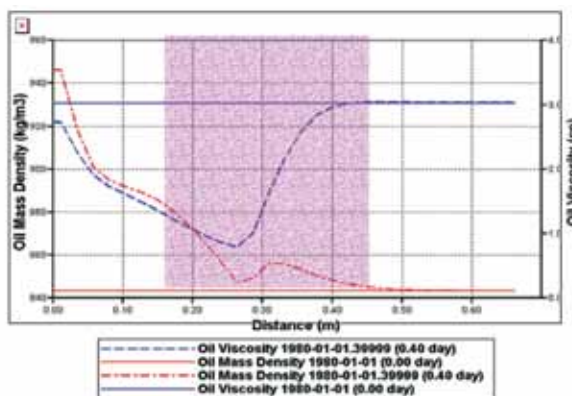
برای درک بهتر اثر تشکیل آسفالتین در فرایند، دانسیته و گرانیوی نفت با



شکل ۴- مدل طراحی شده برای آنالیزهای یک بعدی



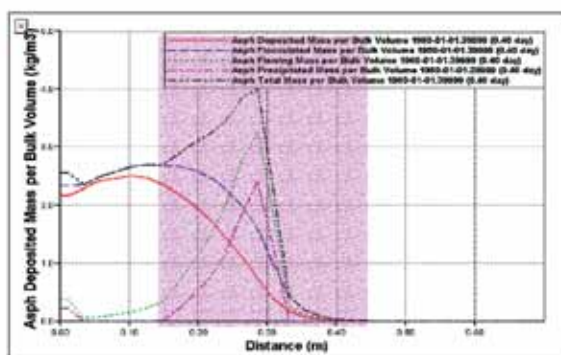
شکل ۵- پروفایل تغییرات غلظت CO₂ و درصد فاز گاز بر حسب فاصله



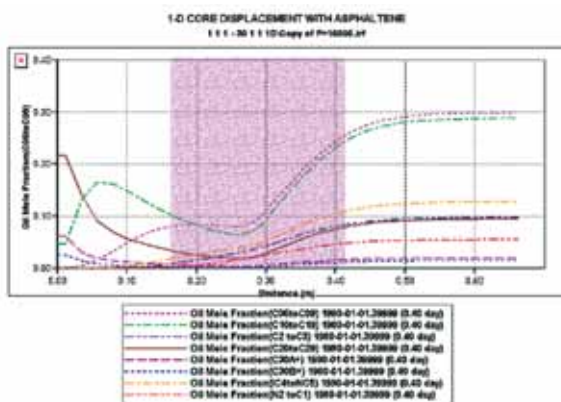
شکل ۶- پروفایل تغییرات دانسیته و گرانیوی نفت بر حسب فاصله

مدل رسوب کردن آسفالتین

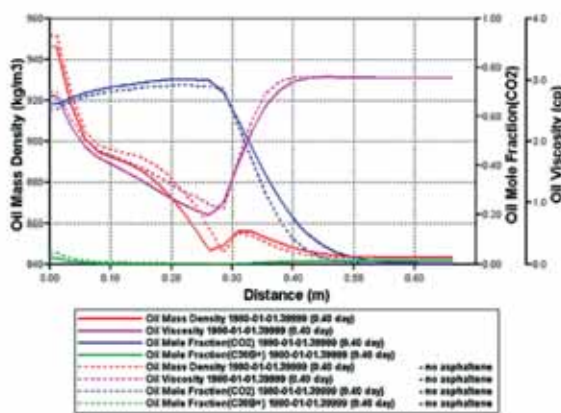
Wang و Civan با ارائه معادله ای رسوب کردن آسفالتین را به خروج نخستین آسفالتین از نفت مربوط کردند [۸] که در آن پدیده های رسوب روی سطح، بسته شدن دهانه های تخلخل و کنده شدن در نظر گرفته شده بود در واقع آنها تئوری plugging and non plugging pores را که در سال ۱۹۸۲ توسط Grues-



شکل ۷- پروفایل تغییرات مقدار آسفالتین در نفت بر حسب فاصله



شکل ۸- پروفایل تغییرات غلظت بخش های مختلف نفت بر حسب فاصله



شکل ۹- پروفایل تغییرات ویسکوزیته و دانسیته نفت بر حسب فاصله با در نظر گرفتن خروج آسفالتین وبدون آن

جدول ۱- خواص فیزیکی نفت الف 7

فشار اشباع، kpa	2300
دانسیته، kg/m ³	833.5
Formation volume factor	1.088
GOR, m ³ /m ³	1.076
°API	19.2

حالتی که در آن آسفالتینی تشکیل نمی شود مقایسه شده است. تشکیل آسفالتین باعث کاهش دانسیته و گرانی می شود که به نفع تولید نفت است.

بررسی فرایند در محیط متخلخل (GEM)

برای بررسی پدیده تعرق و رسوب مدل زیر ساخته شده است. (شکل ۴) در این مرحله برای صرف نظر از نیروهای ثقلی، مدل یک بعدی طراحی گردیده است. ابعاد به صورتی تهیه شده اند که زمان برابر با حجم تزریق شده باشد. مدل از ۳۰ بلوک افقی تشکیل شده است. CO₂ از بلوک اول تزریق و نفت از بلوک آخر تولید می شود. ویژگی های مغزه مدل شده در جدول ۳ آمده است.

CO₂ در فشاری نزدیک MMP تزریق می گردد وقتی که غلظت CO₂ به یک حد اشباع می رسد. فاز گاز شروع به تشکیل می کند. از جهات زیادی رفتار نفت جلو و عقب فرانت گاز متفاوت است بنابراین فرایند در جلو و پشت فرانت حرکت گاز به صورت مجزا بررسی می شود.

در تمام اشکال این قسمت پروفایل های غلظت CO₂ و درصد گاز به صورت همزمان روی نمودار های مختلف نمایش داده شده اند تا درک بهتری از واقعیت فرایند حاصل شود. همچنین منطقه امتزاج روی پروفایل ها مشخص شده است که ناحیه ای تعریف می شود که در آن غلظت CO₂ از ۱۰ درصد تا ۹۰ درصد تغییر می کند.

اثر CO₂ روی خواص نفت

فاز گاز در نزدیکی چاه تزریقی تشکیل می شود (شکل ۵). در نتیجه IFT افزایش می یابد. غلظت CO₂ در فرانت گاز (غلظت تعادلی CO₂ در فشار مغزه) مقدار ثابتی است. همچنان که فرانت گاز جلو می رود CO₂ در نفت دیفیوز می کند، خواص آن را تغییر می دهد و باعث تشکیل آسفالتین در سیستم می شود. جلوی فرانت گاز CO₂ باعث کاهش گرانی و افزایش دانسیته می شود که البته در مقایسه با تغییرات در پشت فرانت گاز ناچیز است. با تشکیل فاز گاز به دلیل تبخیر عناصر سبک از نفت، دانسیته و گرانی نفت به شدت بالا می رود و در نتیجه نفت باقیمانده پشت فرانت نفتی بسیار سنگین و ویسکوز است. (شکل ۶)

همان طور که شکل ۷ نشان می دهد وقتی غلظت CO₂ به یک حد بحرانی می رسد تشکیل فاز جامد آسفالتین آغاز می شود. کل آسفالتین خارج شده از نفت، به عنوان total asphaltene نشان داده می شود که در واقع کل جامد S1 خواهد بود. همان طور که پیشتر عنوان شد بخشی از S1 پس از تبدیل به S2 رسوب می کند و بخش دیگر S1 به صورت معلق در سیستم باقی می ماند که در پروفایل ها به عنوان precipitated asphaltene مشخص شده و در واقع باقیمانده آسفالتین S1 است. S1 و S2 به صورت پیوسته در حال تشکیل و مصرف هستند. در فرانت گاز مقدار تشکیل آسفالتین به حد ماکزیمم می رسد و پشت فرانت S1 گذشته از بازگشت به نفت، صرف رسوب کردن می شود و مقدار آن به صفر می رسد.

شکل ۹ نشان می دهد که چگونه بخش های سبک نفت وارد فاز گاز می شود و فرایند تبخیری است.

آسفالتین از نفت باعث کاهش دانسیته، اما در جلوی فرانت باعث افزایش دانسیته شده است. خواص نفت در جلوی فرانت مهم است زیرا در آنجا مقدار بیشتری نفت وجود دارد. در این ناحیه وقتی آسفالتین از نفت خارج می شود CO₂ بیشتری در نفت حل می گردد و می توان بین آسفالتین و CO₂ برای حل شدن در نفت نوعی رقابت تصور کرد. حل شدن CO₂ و خروج آسفالتین در مورد ویسکوزیته به موازات هم عمل می کنند و هر دو باعث کاهش گرانی می شوند اما در مورد دانسیته عکس هم عمل می کنند و در نهایت اثر CO₂ در افزایش دانسیته غالب خواهد بود. در نتیجه خروج آسفالتین از نفت باعث کاهش تولید شده است. (شکل ۱۰)

توجه شود که این رفتار در نفت های مختلف با محتوای مختلف آسفالتین ممکن است متفاوت باشد.

نتیجه:

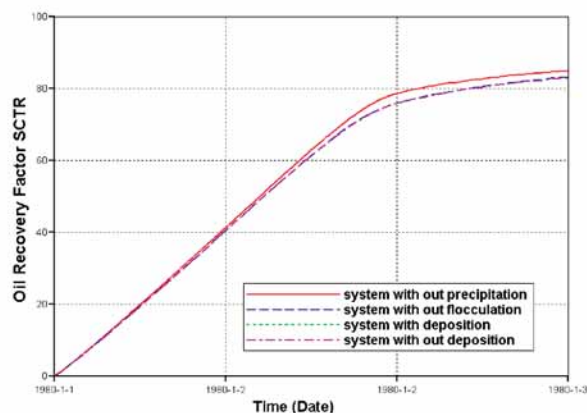
- ۱- رسوب آسفالتین با استفاده از یک شبیه ساز ترکیبی مدل شده است.
- ۲- حل شدن CO₂ و خروج آسفالتین در مورد ویسکوزیته به موازات هم عمل می کنند و هر دو باعث کاهش گرانی می گردند.
- ۳- حل شدن CO₂ و خروج آسفالتین در مورد دانسیته عکس هم عمل می کنند باعث افزایش دانسیته و تشکیل آسفالتین باعث کاهش دانسیته می شود.
- ۴- معمولاً بیشترین مقدار آسفالتین در غلظت اشباع CO₂ (حد تشکیل فاز گاز) اتفاق می افتد. بالای این مقدار خارج شدن گاز سبب افزایش دانسیته نفت می گردد و ملکول های آسفالتین راحت تر در فاز نفت می مانند. این پدیده را می توان به عنوان رقابتی بین آسفالتین و CO₂ برای حل شدن در نفت در نظر گرفت.

منابع:

1. Asghari, SPE, M. Dong, SPE, "Development of a Correlation Between Performance of CO₂ Flooding and the Past Performance of Waterflooding in Weyburn Oil Field", SPE 99789, 2006
2. Bruce F. Kohse and Nghiem, L. X.: "Modelling Asphaltene Precipitation and deposition in a compositional Reservoir," paper SPE 89437, SPE/DOE Fourteenth Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 17-21 April 2004.
3. Kohse, B.F., Nghiem, L. X., Maeda, H., and Ohno, K.: "Modelling Phase Behaviour Including the Effect of Pressure and Temperature on Asphaltene Precipitation," Paper SPE 64465, Proceedings SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, 16-18 October 2000.
4. Long X, Nghiem, Computer Modelling Group Ltd., Personal communication, September, 2006.
5. Nghiem, L. X., and Coombe, D. A., "Modeling Asphaltene Precipitation During Primary Depletion", SPE Journal, Vol. 2, No. 6, 1997, 170-176.
6. Nghiem, L. X., and Coombe, D. A., and Ali, F., "Compositional Simulation of Asphaltene Deposition and Plugging", paper SPE 48996 presented at the SPE 73rd Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, Louisiana, September 27-30, 1998.
7. Srivastava, R.K., Huang, S.S., Dyer, S.B. and Mourits, F.M.: "Quantification of Asphaltene Flocculation During Miscible CO₂ Flooding in the Weyburn Reservoir," J. Can. Petrol Technol., Vol. 34 (October 1995) 31-42.
8. Wang, S. and Civan, F.: "Productivity Decline of Vertical and Horizontal Wells by Asphaltene Deposition in Petroleum Reservoirs," Paper SPE 64991, Proceedings 2001 SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, TX, 13-16 February, 2001.

جدول ۲- ترکیب درصد عناصر مختلف در نفت الف^۷

Component	Composition
N2 to C1	5.50
CO2	0.34
C2 to C3	9.77
IC4 to NC5	12.76
C6 to C9	29.93
C10 to C19	28.85
C20 to C29	9.47
C30A+	1.94
C30B+	1.44
MW C30B+	616.1357
Sg C30B+	1.3121
stock tank در صد وزنی آسفالتین در شرایط	5.3%
در صد وزنی آسفالتین در 53+5 mole% CO ₂ and 59°C MPa	0.93%



شکل ۱۰- تغییرات تولید نفت بر حسب زمان با در نظر گرفتن خروج آسفالتین و بدون آن

جدول ۳- ویژگی های مدل طراحی شده در GEM

Pore volume	1.668E-3 m ³
تخلخل	0.3
تراوایی	500 md
فشار مخزن	16 Mpa
دمای مخزن	59 ^{oc}
فشار چاه تولیدی	16 Mpa
دبی تزرفنی	1.668E-3 m ³

اثر آسفالتین در خواص نفت

برای آنکه مشخص شود اثر نفت در فرایند چیست نتایج با حالتی مقایسه می شوند که در آن هیچ آسفالتینی از نفت خارج نمی گردد. همانطور که انتظار می رود پشت فرانت گاز خروج