



بررسی اثر ناخالصی‌ها در فرآیند تزریق امتزاجی گاز دی‌اکسید کربن

سپیده کاشفی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، دکتر محمد نادر لطف‌اللهی^۲، دانشگاه سمنان، شاهین کرد^۳، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب

چکیده

یکی از روش‌های ازدیاد برداشت نفت، تزریق امتزاجی گاز است و حداقل فشار امتزاجی، پارامتر بسیار مهمی در این فرآیند می‌باشد. از این رو در این تحقیق با استفاده از اطلاعات مخزن به‌دست آمده از گزارش‌های شرکت نفت توتال و به‌منظور تعیین حداقل فشار امتزاجی (MMP)، فرآیند تزریق گاز دی‌اکسید کربن به یکی از مخازن، شبیه‌سازی شده و تأثیر ناخالصی‌هایی مانند نیتروژن، متان و سولفید هیدروژن در این گاز بررسی گردیده است. در این مطالعه برای مدل‌سازی سیال مخزن از نرم‌افزار Winprop استفاده شده است؛ هم‌چنین به‌منظور کاهش محاسبات، ترکیبات نفت با استفاده از روش وایتسون گروه‌بندی شده‌اند. در مرحله بعد برای پیش‌بینی بهتر خصوصیات سیال مخزن، معادله حالت به‌کار رفته تنظیم گردیده و برای توسعه مدل شبیه‌ساز لوله قلمی و تعیین حداقل فشار امتزاجی از نرم‌افزار GEM استفاده شده است. مقایسه حداقل فشار امتزاجی حاصل از شبیه‌سازی با نتیجه آزمایش لوله قلمی، نشان‌دهنده دقت بالای مدل کامپیوتری است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش گاز نیتروژن و متان در دی‌اکسید کربن تزریقی باعث بالا رفتن حداقل فشار امتزاجی و افزایش سولفید هیدروژن در دی‌اکسید کربن باعث کاهش این فشار در مخزن می‌شود.

واژه‌های کلیدی | تزریق گاز دی‌اکسید کربن، جابه‌جایی امتزاجی، حداقل فشار امتزاجی، شبیه‌سازی

مقدمه

با توجه به کاهش تدریجی میزان ذخایر مخازن نفتی به‌دلیل بهره‌برداری، به‌کارگیری روش‌های ازدیاد برداشت در مخازن امری ضروری است. تزریق امتزاجی گاز یکی از روش‌های ازدیاد برداشت است. در این فرآیند با توجه به خواص گاز تزریقی، نفت باقیمانده در گاز حل شده یا این‌که گاز در نفت حل می‌گردد و بدین ترتیب کشش سطحی و گرانبوی کاهش می‌یابد؛ کم شدن این دو پارامتر باعث جاری شدن نفت می‌شود [۱]. دمای مخزن، ترکیب سیال مخزن، ترکیب گاز تزریقی و فشار تزریق، پارامترهایی هستند که بر پدیده امتزاج در این فرآیند مؤثرند. در این میان، فشار تزریق متغیری است که به‌وسیله آن می‌توان امکان امتزاجی بودن تزریق را پیش‌بینی کرد. افزایش فشار سبب امتزاج بیشتر می‌شود، اما هزینه عملیات را نیز افزایش می‌دهد؛ بنابراین یافتن حداقل فشار امتزاجی امری بسیار مهم است [۲]. گاز دی‌اکسید کربن یکی از گازهای مناسب برای تزریق است. تزریق دی‌اکسید کربن برای استخراج محدوده وسیعی از نفت‌های سبک تا متوسط به‌کار می‌رود. در فرآیند تزریق گاز دی‌اکسید کربن، راندمان جابه‌جایی بالاست و در مقایسه با تزریق گازهای دیگر، امتزاج‌پذیری در فشارهای پایین‌تری رخ می‌دهد [۳]. با توجه به پیچیده بودن رفتار فازی هیدروکربن‌ها و حرکت سیال در محیط متخلخل، برای توصیف بهتر فرآیند از شبیه‌سازی مخازن استفاده می‌شود [۴]. در این تحقیق برای مدل‌سازی سیال مخزن نفت از نرم‌افزار Winprop و برای توسعه مدل شبیه‌ساز لوله قلمی و تعیین حداقل فشار امتزاجی در فرآیند تزریق ترکیبات مختلف گاز دی‌اکسید کربن از نرم‌افزار GEM استفاده شده است.

۱. ترکیبات سیال مخزن و گازهای تزریقی

در این تحقیق از گزارش‌های شرکت نفت توتال، یک مخزن نفت انتخاب شده و مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. ترکیب نفت مخزن و گازهای تزریقی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۱ | ترکیب نفت مخزن F13 [۵]

اجزای نفت مخزن F13	درصد مولی	اجزای نفت مخزن F13	درصد مولی
H ₂ S	۰	C ₁₀	۲/۱۸۱
N ₂	۱/۲۵۲	C ₁₁	۲/۴۴۷
CO ₂	۰/۸۹۷	C ₁₂	۲/۰۹۲
C ₁	۳۷/۵۴۳	C ₁₃	۱/۷۸۹
C ₂	۵/۴۷۶	C ₁₄	۱/۷۸۹
C ₃	۴/۱۹۶	C ₁₅	۱/۸۸۵
IC ₄	۱/۱۰۴	C ₁₆	۱/۵۶۸
NC ₄	۲/۹۰۲	C ₁₇	۱/۴۱۷
IC ₅	۱/۳۶۰	C ₁₈	۰/۸۶۵
NC ₅	۱/۸۷۵	C ₁₉	۱/۰۹۸
C ₆	۲/۷۳۴	C ₂₀₊	۱۳/۱۶۹
C ₇	۳/۷۴۰	MW C ₂₀₊ = ۶۷۸	
C ₈	۳/۵۵۵	SG C ₂₀₊ = ۰/۸۹۹۹	
C ₉	۳/۰۶۶		

¹ sepideh.kashefi@gmail.com

² mnlotfollahi@semnan.ac.ir

³ kord1.s@nisco.ir



۲ | ترکیب گازهای تزریقی [۵]

گاز تزریقی G1	گاز تزریقی G2	گاز تزریقی G3	گاز تزریقی G4
۱۰۰% CO ₂	۹۰% CO ₂ + ۱۰% N ₂	۹۰% CO ₂ + ۱۰% C ₁	۹۰% CO ₂ + ۱۰% H ₂ S

۲. گروه بندی ترکیبات

از آن جا که در مدل ترکیبی باید تعداد زیادی معادله به صورت هم زمان حل گردد، بنابراین سعی بر این است که تعداد اجزای سیال بهینه شود. این عمل حجم محاسبات را کاهش می دهد. در نرم افزار Winprop، برای گروه بندی ترکیبات مجازی دو روش وجود دارد. در روش اول، خود شبیه ساز عمل گروه بندی را انجام داده و در روش دوم، کاربر با توجه به اجزای تشکیل دهنده، خواص آن ها و جزء مولی هر یک از اجزا، عمل گروه بندی را انجام می دهد [۶]. در این تحقیق از روش دوم استفاده شده است. به این منظور مطابق رابطه ۱، روش وایتسون برای گروه بندی سیالات مخزن به کار رفته است [۷]. جداول ۳ و ۴، ترکیب سیال مخزن و میزان کاهش زمان محاسبات را پس از گروه بندی ارائه می کنند.

$$M_k = M_7 \{ \exp [(1/N_p) \ln (M_N/M_7)] \}^k \quad (1)$$

$$K = 1, 2, \dots, N_p$$

در رابطه ۱، N_p تعداد گروه های کربنی است که از رابطه $N_p = \text{Integer} [1 + 3.3 \log (N - 7)]$

محاسبه می گردد، N شماره آخرین گروه کربنی و $M_7 = 96$ است.

۳ | ترکیب سیال مخزن بعد از گروه بندی

درصد مولی	ترکیب نفت
۰	H ₂ S
۱/۲۵۲	N ₂
۰/۸۹۷	CO ₂
۳۷/۵۴۳	C ₁
۵/۴۷۶	C ₂
۴/۱۹۶	C ₃
۱/۱۰۴	IC ₄
۲/۹۰۲	NC ₄
۱/۳۶۰	IC ₅
۱/۸۷۵	NC ₅
۲/۷۳۴	C ₆
۱۰/۳۶۱	C ₇ to C ₉
۶/۷۲۰	C ₁₀ to C ₁₂
۵/۴۶۳	C ₁₃ to C ₁₅
۱۸/۱۱۷	C ₁₆ to C ₂₀

۴ | CPU Time در شبیه سازی لوله قلمی

مخزن	CPU Time بدون گروه بندی ترکیبات (sec)	CPU Time با گروه بندی ترکیبات (sec)
F13	۱۹۹/۵	۶۳

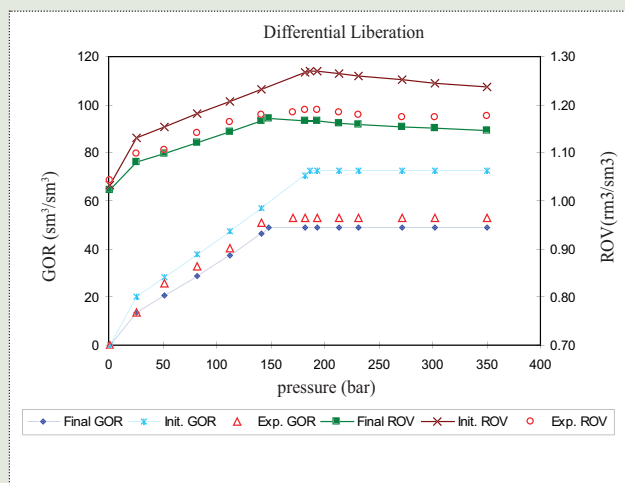
۳. تنظیم معادله حالت

برای این که نتایج به دست آمده از نرم افزار با داده های تجربی تطابق خوبی داشته باشد و از خصوصیات سیال مخزن نیز پیش بینی خوبی حاصل شود، باید پارامترهای معادله حالت به کار رفته، تصحیح و تنظیم گردد؛ چرا که ترکیب سیال مخزن مورد نظر از چندین عنصر متفاوت تشکیل شده است، بنابراین باید در

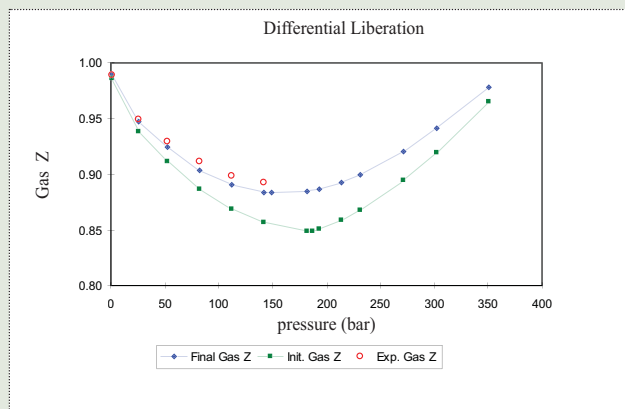
معادله حالت، پارامترهای مربوط به اجزای مجازی را مطابق سیال مورد مطالعه محاسبه کرد. در نتیجه تعیین معادله حالت و پارامترهای رگرسیون، موضوع بسیار مهمی در شبیه سازی است. انتخاب پارامترهای رگرسیون و تغییر آن ها نیازمند کمینه کردن تابع خطای کلی به شکل ذیل می باشد:

$$F(X) = \sum W_i (Y_i - y_i)^2 \quad (2)$$

در این رابطه، $F(X)$ تابع خطا، Y_i مقدار آزمایشگاهی خصوصیت i ، y_i مقدار محاسبه شده خصوصیت i ، X متغیر رگرسیون و W_i ضریب وزنی است. ضریب وزنی در حقیقت مقدار تأثیر هر یک از خواص را در تابع هدف معین می کند. این ضریب معمولاً عدد یک در نظر گرفته می شود. با توجه به رابطه ۲، مقدار خطای هر خصوصیت تعیین شده و کمینه می گردد [۶]. در مورد مخزن مورد مطالعه، معادله پنگ رابینسون سه پارامتری به عنوان معادله حالت انتخاب شده است. پارامترهای رگرسیون به کار رفته در این معادله شامل توان در فرمول ضریب بر هم کنش دوتایی^۲، فشار بحرانی،

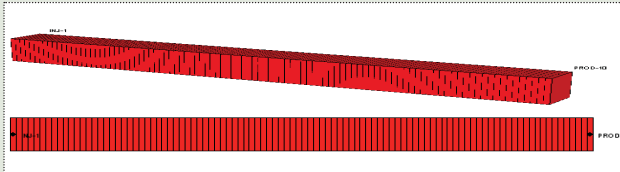


شکل ۱ | تغییرات نسبت گاز به نفت و حجم نسبی نفت بر حسب فشار در آزمایش آزاد سازی جزئی در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد

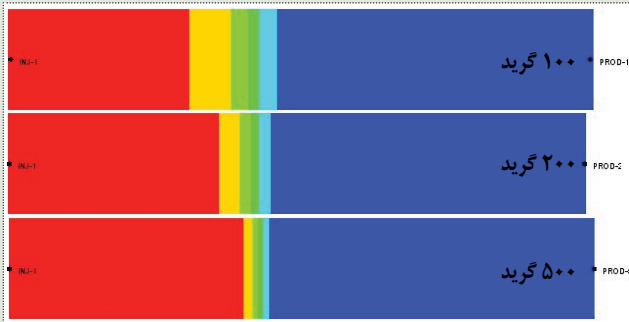


شکل ۲ | تغییرات ضریب تراکم پذیری گاز بر حسب فشار در آزمایش آزاد سازی جزئی در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد

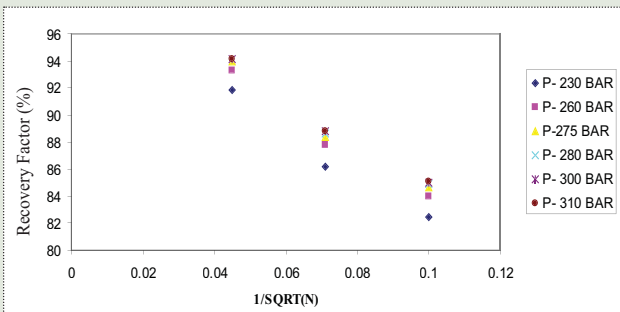
² Binary Interaction Coefficient Exponent



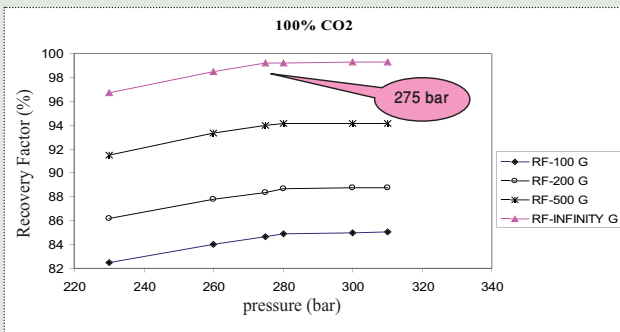
شکل ۴ | نمای دو بعدی و سه بعدی لوله قلمی



شکل ۵ | تصویر لحظه‌ای لوله قلمی در فرآیند تزریق گاز دی‌اکسیدکربن خالص با ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۵۰۰ گرید



شکل ۶ | حذف اثر گرید بندی به وسیله برون‌یابی تا بی‌نهایت



شکل ۷ | ضریب بازیافت نهایی نفت بر حسب فشار برای گرید بندی‌های مختلف در فرآیند تزریق ۱۰۰ درصد گاز دی‌اکسید کربن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد

جدول ۵ | فرآیند تزریق گاز دی‌اکسید کربن خالص به مخزن F13

آزمایشگاهی لوله قلمی MMP (بار)	شبیه سازی لوله قلمی MMP (بار)	گاز تزریقی
۲۷۱	۲۷۵	۱۰۰% CO2 (G1)

دمای بحرانی، جرم مولکولی و ضریب بی‌مرکزی ترکیبات مجازی می‌باشد. شکل‌های ۱ تا ۳ نشان‌دهنده تطابق خوب اطلاعات آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی پس از انجام عمل رگراسیون است.

۴. شبیه‌سازی مدل لوله قلمی

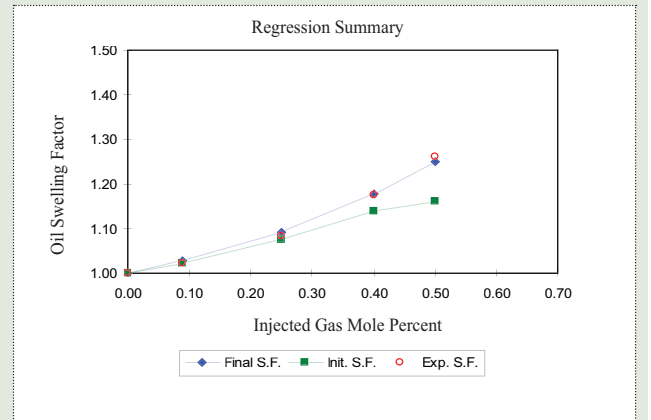
در این تحقیق برای شبیه‌سازی فرآیند تزریق گاز به مخزن و بررسی امتزاج‌پذیری، از مدل لوله قلمی در نرم افزار GEM استفاده شده است. پس از مدل‌سازی خواص سیالات با نرم افزار Winprop، ورودی مدل سیال به شبیه‌ساز GEM نیز توسط نرم‌افزار Winprop ساخته می‌شود. در نرم افزار GEM، لوله قلمی به صورت یک مکعب مستطیل به طول ۶۰ فوت و عرض و ارتفاع ۰/۲۵ فوت انتخاب گردیده است (شکل ۴).

با توجه به این‌که ساختار لوله قلمی واقعی دارای نفوذپذیری بالایی است، بنابراین نفوذپذیری و تخلخل مدل به ترتیب ۲۰۰۰ میلی داری و ۰/۳ در نظر گرفته شده است [۸]. در این مدل، چاه تزریق گاز در اولین گرید و چاه تولید در گرید آخر منظور شده است. در ابتدا مدل توسط نفت در دما و فشار بالای نقطه حباب، اشباع شده و نفت نیز توسط گاز تزریقی جابه‌جا می‌شود. افت فشار، ناچیز بوده بنابراین فرآیند جابه‌جایی در فشار ثابت صورت می‌گیرد. تولید نفت از لوله قلمی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دیگر نفت قابل بازیافتی درون آن باقی نماند. مشکل اصلی در استفاده از این نوع شبیه‌ساز، اثر شدید گرید بندی بر نتایج است (با افزایش تعداد گریدها، طول ناحیه گذرا در فرآیند تزریق گاز کوچک‌تر و در نتیجه پدیده پراکندگی کم‌تر می‌شود). برای حل این مشکل، روشی که توسط استاکاپ پیشنهاد شده است به شرح ذیل به کار می‌رود [۹]:

۱. ابتدا با در نظر گرفتن ابعاد آزمایشگاهی و خواص محیط متخلخل، یک مدل ۱۰۰ گریدی اشباع از نفت در لوله قلمی ساخته می‌شود. گام‌های زمانی باید به گونه‌ای تعریف شوند که جبهه سیال حداقل ۱۰ گام زمانی در یک گرید باقی بماند.

۲. مدل یاد شده برای فشارهای مختلف اجرا گردیده و نتایج آن به صورت نمودار ضریب بازیافت نهایی نفت حاصل از تزریق گاز (معادل ۱/۲ برابر حجم فضاهای خالی) در مقابل فشار ترسیم می‌شود.

۳. مدل یاد شده با تغییر تعداد گریدها از ۱۰۰ به ۲۰۰ و ۵۰۰، مجدداً به ازای فشارهای مختلف در تزریق گاز دی‌اکسیدکربن خالص (G1) اجرا می‌گردد. شکل ۵ تصویر لحظه‌ای ناحیه گذرا در مخزن F13 را در شرایط گرید بندی

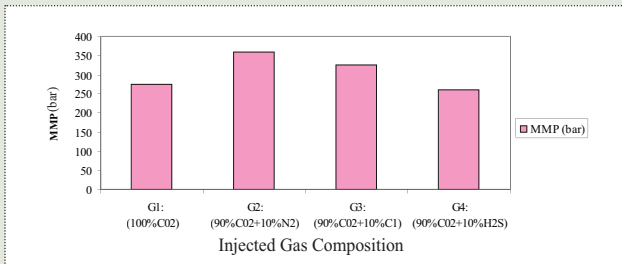


شکل ۸ | تغییرات ضریب تورم نفت بر حسب کسر مولی گاز تزریقی در آزمایش افزایش حجم در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد



جدول ۶ | نتایج MMP در فرآیند تزریق ترکیبات مختلف گاز دی اکسید کربن به همراه ناخالصی

MMP (بار)	ترکیب	گاز تزریقی
۳۶۰	۹۰٪ CO ₂ + ۱۰٪ N ₂	G2
۳۲۵	۹۰٪ CO ₂ + ۱۰٪ C ₁	G3
۲۶۰	۹۰٪ CO ₂ + ۱۰٪ H ₂ S	G4



شکل ۱۱ | مقایسه نتایج MMP حاصل در فرآیند تزریق گازهای G₂, G₁, G₃, G₄ در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد

۵. اثر ناخالصی‌ها در مقدار حداقل فشار امتزاجی در فرآیند تزریق گاز دی اکسید کربن

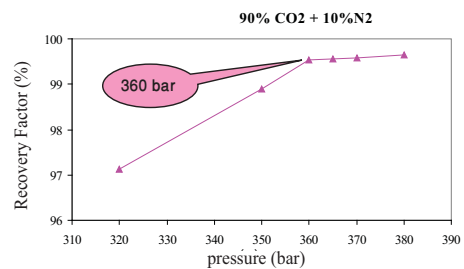
با توجه به دقت بالای مدل شبیه‌ساز لوله قلمی در پیش‌بینی حداقل فشار امتزاجی، از این مدل برای تعیین این پارامتر در فرآیند تزریق گاز دی اکسید کربن به همراه ناخالصی‌هایی مانند نیتروژن، متان و سولفید هیدروژن نیز استفاده شده است (گازهای G₂ و G₃ و G₄). در شکل‌های ۸ تا ۱۰، ضریب بازیافت نهایی نفت بر حسب فشار در فرآیند تزریق گازهای یاد شده در گرید بندی بی‌نهایت ترسیم شده و نتایج MMP حاصل در جدول ۶ گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

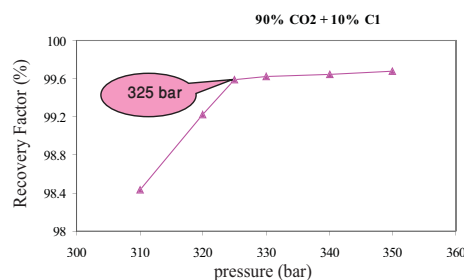
شکل ۱۱ نتایج MMP حاصل از مدل شبیه‌ساز لوله قلمی را در فرآیند تزریق گازهای G₁, G₂, G₃ و G₄ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش گاز نیتروژن و متان در دی اکسید کربن تزریقی باعث بالا رفتن حداقل فشار امتزاجی و افزایش سولفید هیدروژن در دی اکسید کربن باعث کاهش این فشار در مخزن می‌گردد.

منابع

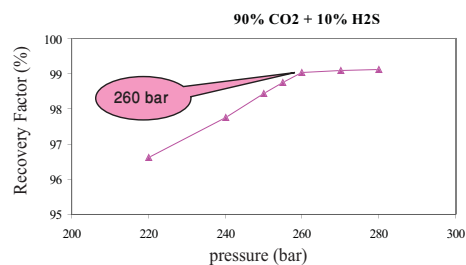
- [1] Al-Jarba.M., "A comparison study of the Co₂-oil properties literature correlations accuracy using visual basic modeling techniques", Oil and Gas Business, 2009.
- [2] Green.D.W., Wilhite.P., "Enhanced Oil Recovery", second edition, 545(6), 2003.
- [3] Tanveer.R., "A Techno-Economical evaluation of miscible flooding", Dalhousie University, June 2006.
- [4] Farzad.I., "Evaluating reservoir production strategies in miscible and immiscible gas injection projects", Texas A&M University, 2004.
- [5] Jean-Noe.L., Jaubert.A., Laurent Avauillee.B., Jean-Franc_ois Souvay.A., "A crude oil data bank containing more than 5000 PVT and gas injection data", petroleum science and engineering, 43, 2001.
- [6] Computer Modeling Group, user manual, 2004.
- [7] Danesh.A., "PVT & Phase behavior of petroleum reservoir fluids", Heriot Watt University Edinburgh, Scotland Elsevier, 1998.
- [8] Egwuenu.A.M., "Improved Fluid Characterization for Miscible Gas Floods thesis", The University of Texas at Austin, Dec. 2004.
- [9] Stalkup.F.I.Jr., "Miscible Displacement", Monograph, SPE, Richardson, TX 8 1984.



شکل ۸ | ضریب بازیافت نهایی نفت بر حسب فشار در گرید بندی بی‌نهایت و فرآیند تزریق ۹۰ درصد دی اکسید کربن با ۱۰ درصد نیتروژن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد



شکل ۹ | ضریب بازیافت نهایی نفت بر حسب فشار در گرید بندی بی‌نهایت و فرآیند تزریق ۹۰ درصد دی اکسید کربن با ۱۰ درصد متان در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد



شکل ۱۰ | ضریب بازیافت نهایی نفت بر حسب فشار در گرید بندی بی‌نهایت و فرآیند تزریق ۹۰ درصد دی اکسید کربن با ۱۰ درصد سولفید هیدروژن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد

مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طول ناحیه گذرا در حالت ۵۰۰ گرید از بقیه حالت‌ها کم‌تر است.

۴. با ترسیم ضریب بازیافت نهایی در مقابل $1/\sqrt{N}$ (تعداد گریدها = N) و برون‌یابی آن برای زمانی که N بی‌نهایت است، مقدار واقعی ضریب بازیافت نهایی به ازای هر فشار تعیین می‌شود (RF_{∞}) (شکل ۶).

۵. ضریب بازیافت نهایی حاصل از مرحله قبل (RF_{∞}) در برابر فشار ترسیم می‌گردد. فشاری که در آن، منحنی تغییر شیب می‌دهد به عنوان حداقل فشار امتزاجی در نظر گرفته می‌شود (نقطه شکستگی در نمودار) [۸] (شکل ۷). در جدول ۵، MMP حاصل از شبیه‌ساز لوله قلمی در فرآیند تزریق گاز دی اکسید کربن خالص گزارش شده است. مقدار گزارش شده در این جدول با MMP حاصل از نتیجه آزمایش تجربی لوله قلمی اختلاف کمی دارد [۵].