

مدلسازی ترکیبی فرایند تزریق گاز به مخازن نفتی

عباس شهرآبادی*، مهدی فصیح، مریم سعدی

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز مطالعات اکتشاف و تولید

پیام‌نگار: shahrabadia@ripi.ir

چکیده

در این مقاله، یک مدل ترکیبی عددی جهت شبیه‌سازی فرایند تزریق گاز به مخازن نفتی ارائه شده است. از مدل‌های ترکیبی، در مواردی استفاده می‌شود که انتقال جرم بین فاز گاز و فاز مایع علاوه بر فشار، به ترکیب اجزای موجود در فازها نیز بستگی دارد. همچنین روش حل معادلات حاصل به طور کامل بیان شده است. در این مدل، جهت انجام محاسبات تعادلی بین فازهای هیدروکربنی مایع و بخار از معادله حالت پنگ رابینسون استفاده شده است. برای تنظیم پارامترهای معادله حالت از داده‌های آزمایشگاهی مانند آزمایش‌های تورم و فشار اشباع کمک گرفته شد. در این تحقیق، همچنین تجهیزات آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش‌های تزریق گاز در محیط متخلخل برپا گردید و در فشارهای مختلف مقدار بازیافت نفت در اثر تزریق اندازه‌گیری شد. در انتها، نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. مقایسات، دقت مدل تهیه شده را به خوبی نشان می‌دهند. همچنین جهت تایید صحت مدل تهیه شده نتایج مدل با نرم افزار ترکیبی GEM از شرکت CMG مقایسه گردید و موافقت خوبی حاصل شد.

کلمات کلیدی: مدل، شبیه‌سازی ترکیبی، معادله حالت، لوله قلمی، بازیافت نفت

۱- مقدمه

از ۳۰ به طور معمول به روش نفت سیاه مدل می‌شود. در این حالت رفتار فازی سیال به طور ساده توسط دو پارامتر ضریب حجمی نفت و نسبت گاز به نفت که توابعی از فشار در نظر گرفته می‌شوند، مدل می‌شود و محاسبات تبخیر آبی^۱ مورد نیاز نیست. هر گاه نتوان از مدل نفت سیاه جهت مدلسازی سیستم استفاده نمود، نفت و گاز را باید با بیش از دو شبه جزء نشان داد. در این حالت، رفتار فاز گاز را با استفاده از یک معادله حالت و روابط تعادلی بیان می‌کنند که در این صورت، محاسبات تبخیر آبی مورد نیاز می‌باشند. لازم به ذکر است که در بعضی موارد با وجود صادق بودن مدل نفت سیاه با شرایط سیال

امروزه استفاده از شبیه‌سازهای عددی در حل مشکلات مخازن هیدروکربوری به طور چشمگیری افزایش یافته است. این شبیه‌سازها از تلفیق معادلات حالت، بقای جرم و قانون دارسی بوجود آمده و معادلات دیفرانسیل حاصل به روشهای مختلف حل می‌شوند. دسته‌بندی این گونه شبیه‌سازها تحت عناوین مدل‌های نفت سیاه و مدل‌های ترکیبی صورت می‌گیرد. انتخاب یکی از دو مدل جهت شبیه‌سازی مخزن، بر پایه فراریت سیال مخزن مورد نظر صورت می‌گیرد [۱]. یک نفت با نسبت گاز محلول به نفت کوچکتر از ۷۵۰ scf/STB، ضریب حجمی نفت کوچکتر از ۱/۴ و درجه API کمتر

1. Flash Calculation

مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین لازم است در راستای طراحی این‌گونه شبیه‌سازها در داخل کشور گام برداشته شود. در این مطالعه روش تهیه یک مدل ترکیبی سه فازی به‌طور کامل شرح داده شده و روش حل آن مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل حاضر، یک فرمولاسیون ضمنی در فشار، صریح در ترکیب و صریح در اشباع که در واقع اصلاح شده مدل ترکیبی کاظمی [۱۲] می‌باشد ارائه شده است. در مدل حاضر ماتریس ژاکوبین تشکیل شده در حل معادله فشار از نظر قطری غالب و متقارن است در صورتی که فرمولاسیون معادله فشار در مدل کاظمی، یک چنین ماتریسی را تضمین نمی‌کند. در آنها نیز نتایج حاصل از این مدل با نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمایش‌های لوله قلمی و همچنین نتایج خروجی از مدل شبیه ساز GEM مقایسه شده‌اند و تطابق میان این دو، نشان دهنده دقت مدل است.

۲- معادلات مدل ترکیبی

همان‌گونه که ذکر گردید، در این مدل سه فاز در نظر گرفته شده که عبارتند از: فاز هیدروکربنی مایع (نفت)، فاز هیدروکربنی بخار (گاز) و فاز آب. با نوشتن موازنه مولی در مورد حجم کنترل برای هر جزء m معادله زیر به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot \left[\xi_o x_i \frac{kk_{ro}}{\mu_o} \nabla \Phi_o + \xi_g y_i \frac{kk_{rg}}{\mu_g} \nabla \Phi_g \right] + q_i = \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\xi_o s_o + \xi_g s_g \right) z_i \right], \quad i = 1, \dots, n_c \quad (1)$$

برای آب:

$$\nabla \cdot \left[\xi_w \frac{kk_{ro}}{\mu_w} \nabla \Phi_w \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \xi_w s_w \right) \quad (2)$$

در معادلات بالا Φ که پتانسیل هر فاز می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla \Phi_r = \nabla P_o - \gamma_r \nabla h, \quad r = o, g, w \quad (3)$$

مخزن، جهت شبیه‌سازی فرایندهای ازدیاد برداشت همانند تزریق دی اکسید کربن و نیتروژن باید از مدل‌های ترکیبی استفاده کرد. طراحی این‌گونه فرایندهای تزریق، به پیش‌بینی دقیق تعادلات بخار-مایع میان نفت در جای مخزن و سیال تزریقی نیاز دارد. در سالهای اخیر، محاسبات تعادل بخار - مایع توسط معادلات حالت دو پارامتری که برای هر دو فاز بخار و مایع قابل استفاده هستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲].

دو مدل ترکیبی اصلی که در آنها از معادلات حالت برای محاسبات تعادلی استفاده شده توسط فاسل^۱ [۳] و کوتز^۲ [۴] ارائه شده‌اند. در مدل اول (در صورتی که هر دو فاز گاز و نفت در هر بلوک موجود باشد) تعداد $n_b(n_c + 1)$ معادله ناخطی به صورت همزمان باید حل شود، که n_b تعداد بلوکهای شبکه و n_c تعداد اجزاء در سیستم هیدروکربنی است. ولی در فرمولاسیون کوتز (مدل کاملاً ضمنی) حل همزمان $n_b(2n_c + 4)$ معادله مورد نیاز است. مدل ترکیبی دیگری توسط وانگ و همکارانش [۵] ارائه شده است که در آن، مخزن به تعدادی مخزن کوچکتر تقسیم گردیده و برای هر قسمت شبکه، به طور مجزا تعریف می‌شود و معادلات جریانی در آنها حل شده و ارتباط بین اینها توسط یکسری معادلات دیگر تعریف می‌شود.

مدل دیگر که در واقع اصلاح یافته مدل کوتز می‌باشد و کاملاً ضمنی حل گردیده است، مدل ارائه شده توسط چین^۳ [۶] است. پس از این مدل، تن^۴ [۷] روش جدیدی جهت حل معادلات در مخزن به صورت ترکیبی ارائه کرد که به روش ضمنی تطابقی^۵ موسوم می‌باشد. در این روش، نیازی نیست که تمام بلوکها به صورت ضمنی حل شوند و تعداد اندکی از بلوکها به صورت ضمنی و باقیمانده بلوکها به صورت صریح قابل حل می‌باشند. اخیراً مدل‌های ترکیبی جدیدی موسوم به مدل‌های لوله جریانی^۶ جهت شبیه سازی فرایندهای امتزاجی یا نزدیک به امتزاجی به کار گرفته شده‌اند. محققان زیادی در ایجاد این نوع مدل‌ها نقش داشته‌اند. [۸-۱۱]

در حال حاضر شبیه‌سازهای تجاری بسیاری در حل مشکلات و معضلات موجود در مخازن هیدروکربوری به کار گرفته می‌شود. این شبیه‌سازها در کشور ما با صرف هزینه‌های گزاف خریداری شده و

1. Fussel
2. Coats
3. Chein
4. Tan
5. Adaptive Implicit Method
6. Stream line simulator

$$T_r = \frac{k_r A}{\mu_r \Delta L} \quad (10)$$

که در رابطه فوق ΔL نشان دهنده طول بلوک است.

۳- معادلات تعادل فازی

معادلات تعادل فازی از برابری فوگاسیته‌های هر جزء در فاز گاز و نفت بدست می‌آید:

$$f_{io} = f_{ig} \quad , \quad i=1, \dots, n_c \quad (11)$$

پس از نوشتن موازنه جرمی روی فازهای نفت و گاز، روابط جبری زیر حاصل می‌شود:

$$z_i = Lx_i + Vy_i \quad , \quad i=1, \dots, n_c \quad (12)$$

$$L = \frac{\xi_o s_o}{\xi_o s_o + \xi_g s_g} \quad (13)$$

$$V = \frac{\xi_g s_g}{\xi_o s_o + \xi_g s_g} \quad (14)$$

فوگاسیته و چگالی مولی در فشار P_o محاسبه می‌شوند.

همچنین از روی تعاریف ترکیب درصد مولی و اشباع خواهیم داشت:

$$\sum z_i = \sum x_i = \sum y_i = 1.0 \quad (15)$$

$$L + V = 1.0 \quad (16)$$

$$s_o + s_g + s_w = 1.0 \quad (17)$$

از معادلات فوق جهت انجام محاسبات تعادلی تبخیر آبی کمک گرفته شده است. همانگونه که می‌دانیم قبل از انجام این محاسبات سیستم مورد مطالعه از لحاظ پایداری باید کنترل گردد و برای کنترل پایداری

$$\gamma_r = \rho_r g \quad (4)$$

معادله موازنه مولی برای کل سیستم هیدروکربنی از جمع معادله (۱) بر روی n_c جزء هیدروکربنی بدست می‌آید:

$$\nabla \cdot \left[\xi_o \frac{k_{ro}}{\mu_o} \nabla \Phi_o + \xi_g \frac{k_{rg}}{\mu_g} \nabla \Phi_g \right] + q_h = \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\xi_o s_o + \xi_g s_g \right) \right] \quad (5)$$

در صورت تبدیل معادلات بالا به فرم تفاضل محدود، روابط زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta \left[T_o^n x_i^n \left(\Delta P_o^{n+1} - \gamma_o^n \Delta h \right) + T_g^n y_i^n \left(\Delta P_o^{n+1} + \Delta P_{\alpha g}^n - \gamma_g^n \Delta h \right) \right] + Q_i = \frac{V}{\Delta} \left[\phi^{n+1} \left(\xi_o s_o + \xi_g s_g \right)^{n+1} Z_i^{n+1} - \phi^n \left(\xi_o s_o + \xi_g s_g \right)^n Z_i^n \right], \quad i=1, \dots, n_c \quad (6)$$

$$\Delta T_w^n \left(\Delta P_o^{n+1} - \Delta P_{cow}^n - \gamma_w^n \Delta h \right) + Q_w = \frac{V}{\Delta} \left[\left(\phi_w^n s_w \right)^{n+1} - \left(\phi_w^n s_w \right)^n \right] \quad (7)$$

$$\Delta \left[T_o^n \left(\Delta P_o^{n+1} - \gamma_o^n \Delta h \right) + T_g^n \left(\Delta P_o^{n+1} + \Delta P_{cog}^n - \gamma_g^n \Delta h \right) \right] + Q_h = \frac{V}{\Delta} \left[\phi^{n+1} \left(\xi_o s_o + \xi_g s_g \right)^{n+1} - \phi^n \left(\xi_o s_o + \xi_g s_g \right)^n \right] \quad (8)$$

$$Q_h = \sum_{i=1}^{n_c} Q_i \quad (9)$$

در معادلات بالا T ، عبورپذیری است و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\sum_k J_{jk}^l [P_{o,k}^{l+1} - P_{o,k}^l] = -F_j^l, \quad j=1, \dots, n_b \quad (20)$$

در رابطه بالا J ماتریس ژاکوبین است که به صورت زیر تقریب زده می‌شود و منظور از k شماره بلوکهای همسایه بلوک j می‌باشد:

$$J_{jk}^l = \left(\frac{\partial F_j}{\partial P_{o,k}} \right)^{(l)} = (T_w + T_o + T_g)^n \left(\frac{j+k}{2} \right) \quad (21)$$

$$J_{jj}^l = \left(\frac{\partial F_j}{\partial P_{o,j}} \right)^{(l)} = - \sum (T_w + T_o + T_g)^n \left(\frac{j+k}{2} \right)^l + \left(\frac{\partial Q_w}{\partial P_o} \right)_j + \left(\frac{\partial Q_h}{\partial P_o} \right)_j - \frac{Vb}{\Delta t} \left(\frac{\partial \phi_\alpha}{\partial P_o} \right)_j \quad (22)$$

برای بدست آوردن عبارات $\left(\frac{\partial Q_w}{\partial P_o} \right)$ و $\left(\frac{\partial Q_h}{\partial P_o} \right)$ دو حالت در نظر می‌گیریم:

۱- اگر چاه با دبی حجمی ثابت تولید (یا تزریق) کند $(\tilde{Q}_j = cte)$:

$$Q_w = \xi_w^n \tilde{Q}_w^n \quad (23)$$

$$Q_m = x_m^n \xi_o^n \tilde{Q}_o^n + y_m^n \xi_g^n \tilde{Q}_g^n \quad (24)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{\partial Q_w}{\partial P_o^{n+1}} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q_h}{\partial P_o^{n+1}} = 0 \quad (26)$$

۲- اگر فشار ته‌چاهی چاه تولیدی (یا تزریقی) ثابت باشد:

$$:(P_{bh} = cte)$$

روشهای مختلفی توسط محققین ارائه گردیده است. در این مطالعه از روش آزمایش پایداری میکلسن^۱ [۱۳] استفاده گردید. روش این محقق، مبتنی بر روش تعیین طول صفحه مماس^۲ است و برای یک مخلوط با n_c جزء این طول به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$TPD(x) = \sum_{i=1}^{n_c} x_i (\mu_i(x) - \mu_i(z))$$

که μ_i نشان دهنده پتانسیل شیمیایی جزء می‌باشد. و برای اینکه سیستم پایدار باشد این پارامتر باید برای کلیه مقادیر جزء مولی مقداری مثبت باشد.

۴- معادله فشار

برای دستیابی به معادله فشار، روابط (۷) و (۸) را با هم جمع می‌کنیم:

$$\Delta \left[T_w^n (\Delta P_o^{n+1} - \Delta P_{cow}^n - \gamma_w^n \Delta h) + T_o^n (\Delta P_o^{n+1} - \gamma_o^n \Delta h) \right] + Q_w + Q_h \\ \left[T_g^n (\Delta P_o^{n+1} + \Delta P_{cog}^n - \gamma_g^n \Delta h) \right] - \frac{Vb}{\Delta t} [\phi^{n+1} \alpha^{n+1} - \phi^n \alpha^n] = 0 \quad (18)$$

که در معادله فوق α به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \xi_o S_o + \xi_g S_g + \xi_w S_w \quad (19)$$

و همچنین مقادیر Q_w, Q_h به ترتیب بیانگر دبی حجمی تزریق و یا تولید هیدروکربن و آب می‌باشند.

۵- حل معادله فشار

اگر سمت چپ معادله (۱۸) را به عنوان F_j برای بلوک z در نظر بگیریم، P_o^l به عنوان تکرار مرتبه l پارامتر P_o^{n+1} است، جهت بدست آوردن تکرار مرتبه $(l+1)$ ، از روش تکرار نیوتن به فرم زیر استفاده می‌شود:

1. Michelsen
2. Tangent Plane Distance

دمای هر بلوک انجام می‌دهیم، به این ترتیب، مقادیر $L^{l+1}, V^{l+1}, \xi_g^{l+1}, \xi_o^{l+1}, y_m^{l+1}, x_m^{l+1}$ مشخص می‌گردند و اشباعات به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$s_o^{l+1} = \left[\frac{(1-s_w)L\xi_g}{L\xi_g + V\xi_o} \right]^{l+1} \quad (34)$$

$$s_g^{l+1} = 1 - s_o^{l+1} - s_w^{l+1} \quad (35)$$

لازم به یادآوری است که در این مطالعه جهت انجام محاسبات تبخیری از معادله حالت پنگ رابینسون استفاده شده است.

۸- آزمایشهای تجربی

نمودارهای بازیافت نفت، که در بخش بعد آمده با استفاده از سیستم لوله قلمی به دست آمده است. این سیستم به طور معمول از یک سلول تزریق، لوله قلمی و شیر فشار معکوس تشکیل شده است. مشخصات لوله قلمی مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۱) داده شده است. در ابتدا لوله را از نمونه نفتی یکی از مخازن ایران اشباع کرده و گاز مورد نظر را با شدت جریان ثابت ۱۵ سی سی بر ساعت به داخل لوله تزریق می‌کنیم. آنالیز نفت و گاز مورد آزمایش در این مطالعه در جدول (۲) آمده است. لازم به ذکر است که جرم مولکولی و وزن مخصوص جزء سنگین، به ترتیب، ۱۹۴ و ۰/۸۸۹۷ می‌باشند. در حین تزریق، فشار خروجی با استفاده از شیر فشار معکوس ثابت نگه داشته می‌شود. در هر آزمون، تا ۱/۲ حجم تهی لوله، گاز تزریق می‌شود و مقدار نفت بازیافتی به ازاء حجم گاز تزریقی اندازه گیری می‌گردد. سپس آزمایش را متوقف می‌کنیم. با استفاده از مقادیر فوق، ضریب بازیافت قابل محاسبه است.

جدول ۱- مشخصات لوله قلمی

۴۱/۹۲	طول (فوت)
۰/۱۸	قطر داخلی (اینچ)
۴۳/۷۵	تخلخل %
۴۸۵۰	تراوایی (میلی داریسی)
Glass bead	نوع محیط متخلخل
۱۵	دبی تزریق (سی سی بر ساعت)

$$\tilde{Q}_j^n = I_{wj} (P_{bh} - P_{o,i}^{n+1}) \quad (27)$$

$$I_{wj} = \frac{2\pi khf \lambda}{\ln \left(c \frac{r_{eq}}{r_w} \right) + s} \quad (28)$$

در این حالت:

$$\frac{\partial Q_w}{\partial P_o^{n+1}} = -I_{ww} \xi_w \quad (29)$$

$$\frac{\partial Q_h}{\partial P_o^{n+1}} = -I_{wo} \xi_o - I_{wg} \xi_g \quad (30)$$

جهت محاسبه $\frac{\partial \alpha}{\partial P_o}$ به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial P_o} \right)_j^l = \left(s_w \frac{\partial \xi_w}{\partial P_o} + s_o \frac{\partial \xi_o}{\partial P_o} + s_g \frac{\partial \xi_g}{\partial P_o} \right) \quad (31)$$

۶- معادله ترکیب درصد

ترکیب درصد به صورت صریح در هر تکرار پس از محاسبه P_o^{n+1} از رابطه (۶) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$z_i^{l+1} = \left\{ \Delta [T_o^n x_i^n \Delta \phi_o^{l+1} + T_g^n y_i^n \Delta \phi_g^{l+1}] + q_m + \frac{V_b}{\Delta t} \phi^n (\xi_o s_o + \xi_g s_g)^n Z_i^n \right\} \div \left[\frac{V_b}{\Delta t} \phi^{l+1} (\xi_o s_o + \xi_g s_g)^{l+1} \right] \quad (32)$$

۷- معادله اشباع

اشباع آب در هر تکرار به صورت صریح از معادله موازنه آب (معادله ۷) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$s_w^{l+1} = \frac{\Delta T_w^n \Delta \Phi_w^{l+1} + q_w^n + \frac{V_b}{\Delta t} \phi^n \rho_w^n s_w^n}{\frac{V_b}{\Delta t} \phi^{l+1} \rho_w^{l+1}} \quad (33)$$

برای به دست آوردن اشباع نفت و گاز محاسبات فلش را بر روی z_m^{l+1} که از رابطه (۳۲) به دست آمده است، در فشار و

جدول ۲- مشخصات نفت و گاز مورد استفاده در این مطالعه

جزء	ترکیب نفت	ترکیب گاز
H ₂ S	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۴۷
N ₂	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۴۱۴
CO ₂	۰/۰۱۲۵	۰/۰۲۱۷
C ₁	۰/۲۵۳۰	۰/۸۴۹۰
C ₂	۰/۰۵۷۰	۰/۰۵۱۶
C ₃	۰/۰۴۷۱	۰/۰۱۷۴
IC ₄ +NC ₄	۰/۰۴۴۰	۰/۰۰۸۶
IC ₅ +NC ₅	۰/۰۲۱۷	۰/۰۰۳۰
C ₆	۰/۰۳۹۸	۰/۰۰۱۳
C ₇	۰/۰۳۵۱	۰/۰۰۱۰
C ₈	۰/۰۳۳۰	۰/۰۰۰۳
C ₉₊	۰/۴۵۵۳	۰/۰۰۰۰

۹- نتایج

آزمایش تزریق گاز در پنج فشار ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۶۵۰۰ پوند انجام گرفت. در این مثال از فشار موئین صرفنظر گردیده و لوله قلمی به صورت یک مخزن یک بعدی با ۳۰ گریدبلوک در نظر گرفته شده است. منحنی تراوایی نسبی مطابق زیر جهت شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است:

$$K_{rg} = S_g^2 \quad (39)$$

$$K_m = \left(\frac{S_o - 0.2}{0.8} \right)^{2.5} \quad (40)$$

در روابط فوق مقادیر تراوایی برای زمانی است که جابجایی را به صورت غیر امتزاجی در نظر بگیریم ولی با توجه به این که با افزایش مدت تماس گاز و نفت، کشش سطحی بین این دو فاز کاهش می یابد، بنابراین منحنی های تراوایی نسبی نیز از مقادیر اولیه فاصله می گیرند و ما به ناچار در حین شبیه سازی منحنی تراوایی نسبی را با توجه به کشش بین سطحی نفت و گاز به صورت زیر تصحیح می کنیم:

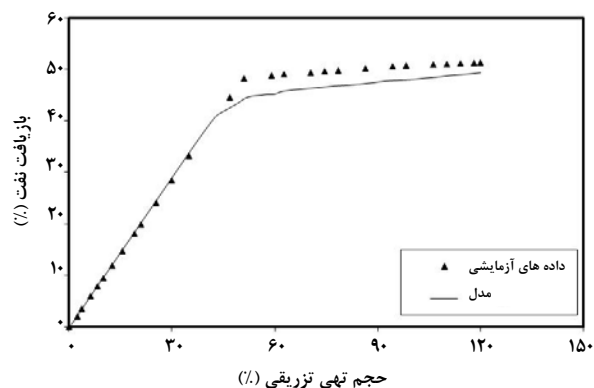
$$\tilde{K}_m = f \times K_m + (1-f) K_m S_o \quad (41)$$

$$\tilde{K}_{rg} = f \times K_{rg} + (1-f) K_m S_g \quad (42)$$

$$f = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (43)$$

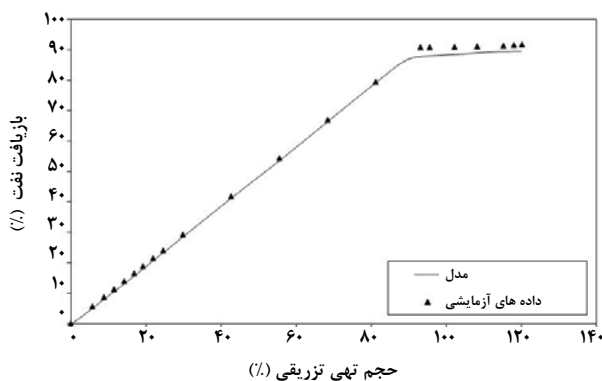
در معادلات فوق σ کشش بین سطحی بین فازها است که با استفاده از رابطه مک لود-ساجن^۱ محاسبه می شود. σ_0 کشش بین سطحی حالت مینا است. در این مطالعه عدد ۳/۱۸ برای σ_0 در نظر گرفته شده که در واقع این عدد عبارت از کشش بین سطحی میان فازهای بخار و مایع در فشار ۱۵۰۰ پوند و دمای ۱۸۱ درجه فارنهایت می باشد و از فلش نمودن نفت در شرایط فوق به دست آمده است.

شکلهای (۱) الی (۵) بازیافت نفت محاسبه شده توسط مدل و داده های آزمایشی را در فشارهای مختلف و دمای ۱۸۱°F نشان می دهند. همانگونه که می دانیم نمودارهای بازیافت در مقابل حجم تزریق گاز، منحنی های شناخته شده ای هستند که جهت توضیح و مقایسه نتایج آزمایشهای تزریق گاز مورد استفاده قرار می گیرند. همانگونه که ملاحظه می شود در مراحل اولیه آزمایش، معادل حجم گاز تزریق، بازیافت نفت خواهیم داشت. این روند تا نقطه میان شکنی ادامه خواهد داشت. با ادامه تزریق، مقدار بازیافت نفت افزایش زیادی ندارد و نهایتاً به یک مقدار ثابتی میرسد که به این مقدار بازیافت نهایی گفته می شود. مقایسه شکلهای (۱) تا (۵) نشان می دهد که با افزایش فشار، بازیافت نفت بیشتری خواهیم داشت. البته قابل توجه است که با افزایش فشار، از یک حد معین، تغییری در بازیافت حاصل نمی شود.

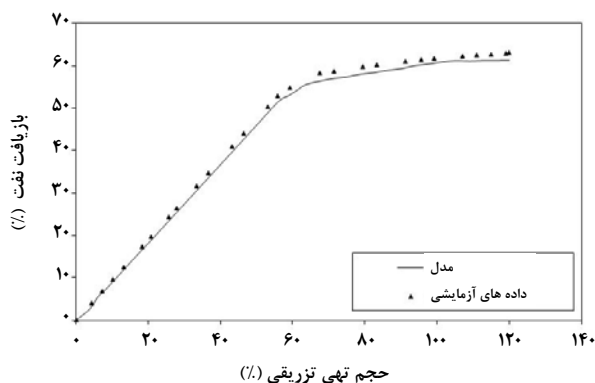


شکل ۱- منحنی بازیافت نفت در فشار ۲۰۰۰ psia

1. Macleod-Sugden

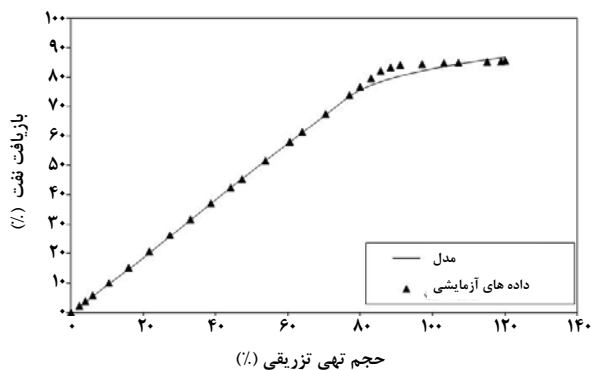


شکل ۵- منحنی بازیافت نفت در فشار ۶۵۰۰ psia

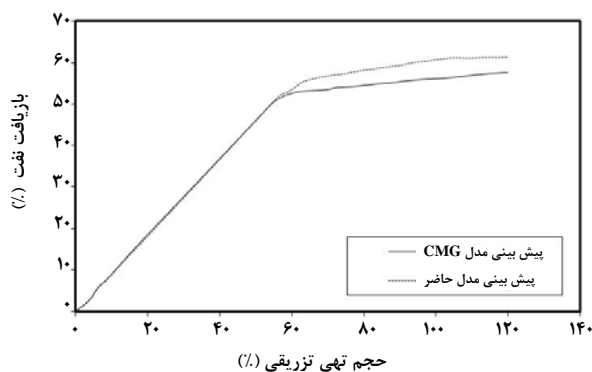


شکل ۲- منحنی بازیافت نفت در فشار ۳۰۰۰ psia

لازم به ذکر است جهت آزمون اعتبار سنجی مدل پیشنهادی نتایج این مدل با نتایج نرم افزار GEM مقایسه گردید که به عنوان نمونه نتیجه این مقایسه در فشار ۳۰۰۰ پوند در شکل (۶) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود موافقت خوبی بین این نتایج وجود دارد که این امر می تواند نشانه قابلیت این مدل در پیش بینی فرایند تزریق گاز در محیطهای متخلخل باشد.

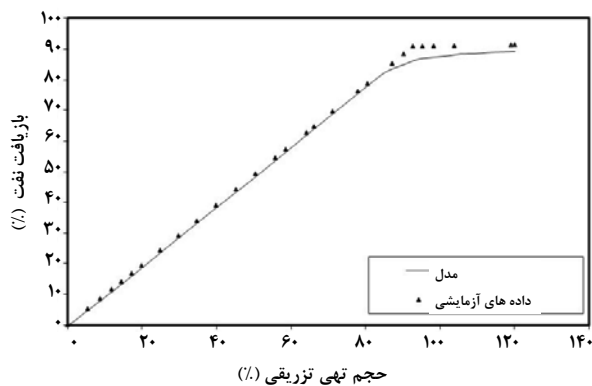


شکل ۳- منحنی بازیافت نفت در فشار ۵۰۰۰ psia

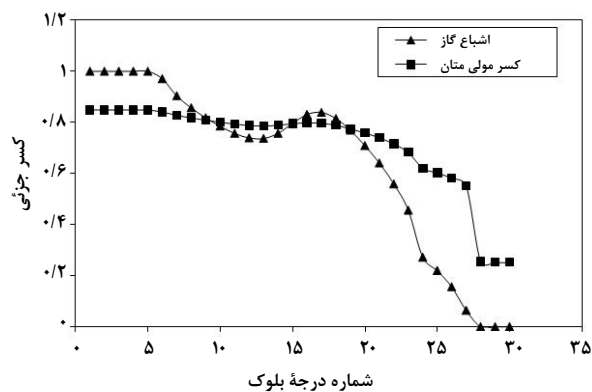


شکل ۶- مقایسه نتایج مدل حاضر و نرم افزار GEM جهت آزمون صحت سنجی مدل

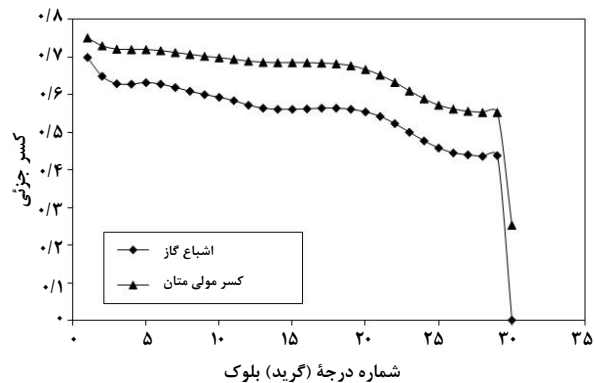
شکل (۷) نشان دهنده توزیع اشباع گاز و ترکیب درصد متان در فشار ۳۰۰۰ psia پس از تزریق PV ۰/۷ گاز می باشد. همانگونه که ملاحظه می شود روند تغییرات هر دو یکسان است. در بلوکهای اولیه اشباع گاز با توجه به نزدیکی مکان تزریق بالا بوده و با دور شدن از این نقطه اشباع گاز کاهش یافته است. طبق انتظار معادلات مدل نیز به گونه ای این روند را نشان می دهند.



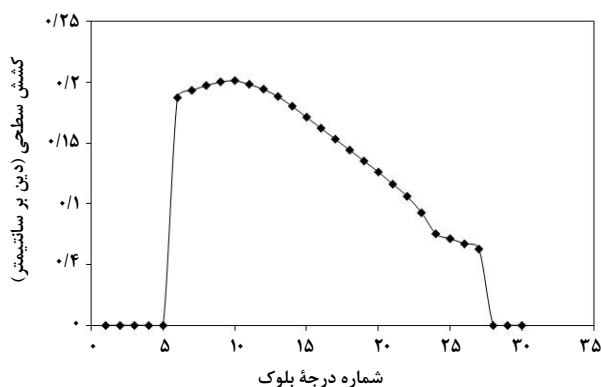
شکل ۴- منحنی بازیافت نفت در فشار ۶۰۰۰ psia



شکل ۹- منحنی توزیع اشباع گاز و ترکیب درصد متان
در فشار ۵۰۰۰ psia و ۰/۷PV



شکل ۷- منحنی توزیع اشباع گاز و ترکیب درصد متان
در فشار ۳۰۰۰ psia و ۰/۷PV



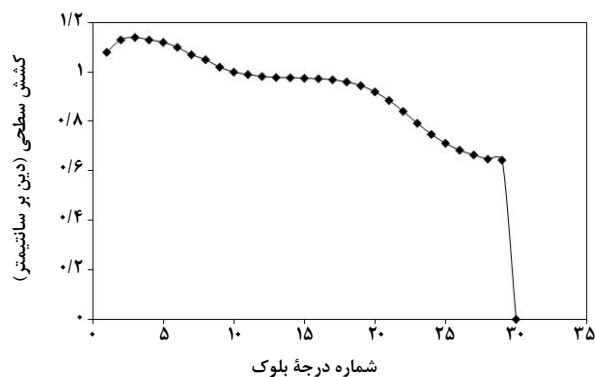
شکل ۱۰- منحنی توزیع فشار و ترکیب درصد متان
در فشار ۵۰۰۰ psia و ۰/۷ PV

همانگونه که در شکل ها مشخص می‌باشد در فشار ۳۰۰۰ پوند هیچ گونه ناحیه امتزاجی مشاهده نمی‌شود. در حالیکه در فشار ۵۰۰۰ پوند ناحیه امتزاجی قابل مشاهده است و متناظرا در همان بلوکها کشش بین سطحی صفر می‌باشد.

۱۰- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مطالعه ارائه یک مدل ریاضی جهت شبیه‌سازی ترکیبی فرایند تزریق گاز در محیط متخلخل بود. جهت رسیدن به این هدف، معادلات جریان در محیط متخلخل با ترکیب معادله پیوستگی و رابطه داری به دست آمد. سپس این معادلات جریانی را به فرم

توزیع کشش بین سطحی در همین فشار در شکل (۸) آمده است. مقدار عددی کشش بین سطحی در ابتدای محیط متخلخل زیاد است و این نشانه آن است که اختلاط بین فازها به خوبی انجام نگرفته و جابجایی به صورت غیرامتزاجی است. رفته رفته با توجه به افزایش مدت تماس، اختلاط بیشتری صورت گرفته و بنابراین کشش بین سطحی کاسته می‌شود. در شکل (۹) توزیع اشباع گاز و ترکیب درصد متان در فشار ۵۰۰۰ پوند دیده می‌شوند. در مقایسه با شکل متناظر در فشار پایین تر دیده می‌شود که در این فشار به نقطه میان شکنی گاز بعد از تزریق ۰/۷ رسیده ایم. در شکل (۱۰) توزیع کشش بین سطحی در فشار ۵۰۰۰ پوند نشان داده شده است.



شکل ۸- منحنی توزیع کشش بین سطحی در
فشار ۳۰۰۰ psia و ۰/۷ PV

حجم بلوک	V_b	تفاضل محدود در آورده و با یکدیگر جمع کردیم و به یک معادله
در فاز مایع آکسر مولی جزء	x_i	ضمنی برای فشار فاز نفت، یک معادله صریح جهت ترکیب درصد هر
در فاز بخار آکسر مولی جزء	y_i	جزء و یک معادله صریح جهت اشباع هر فاز رسیدیم. معادله فشار،
در خوراک آکسر مولی جزء	z_i	ترکیب درصد و معادله اشباع به صورت ترتیبی در یک حلقه تکرار حل
تخلخل	ϕ	شدند. از دیگر اهداف این مقاله انجام آزمایشهای تزریق گاز به یک
وزن مخصوص فاز ز	γ_j	نمونه نفتی بود که با استفاده از سیستم لوله قلمی انجام پذیرفت. در
ویسکوزیته فاز ز	μ_j	آزمایشها دیده شد که با افزایش فشار، بازیافت نهایی نفت نیز افزایش
چگالی وزنی فاز ز	ρ_j	خواهد داشت و این افزایش تا فشار خاصی ادامه می یابد. به این معنی
چگالی مولی فاز ز	ρ_j^G	که تا رسیدن به این فشار افزایش بازیافت نهایی نفت را خواهیم داشت
پتانسیل فاز ز	Φ_j	ولی بعد از این فشار، افزایش فشار هیچ تاثیری بر بازیافت ندارد. در
کشش بین سطحی	σ	نهایت، نتایج آزمایشگاهی با مقادیر به دست آمده از مدل مقایسه
کشش بین سطحی در حالت مبنا	σ_0	گردید و تطابق خوبی حاصل گردید که این نشان دهنده دقت مدل
		ارائه شده می باشد.

مراجع

- [1] Hui Cao, "Development of Techniques for General Purpose Simulators", Ph.D. Dissertation, Stanford University, (2002).
- [2] Peng, D. Y., and Robinson, D. B., "A New Two-Constant Equation of State", Ind. Eng. Chem. Fund. 15, 59-68, (1976).
- [3] Fussell, L.T., and Fussell, D.D. "An Iterative Technique for Compositional Reservoir Models", SPE J. (Aug. 1979), 211-220 (1979).
- [4] Coats, K. H.: "An Equation of State Compositional Model" SPE J. (Oct. 1980) 363-376, (1980).
- [5] Wang, P., Balay, S., Sepehrnoori, K., Wheeler, J., Abate, J., Smith, B., and Pope, G.A., "A Fully Implicit Parallel EOS Compositional Simulator for Large Scale Reservoir Simulation", paper SPE 51885 presented at the 15th Symposium on Reservoir Simulation. Houston, Texas, (1997).
- [6] Chien, M. C. H. and Lee, S. T.: "A New Equilibrium Coefficient Correlation Method for Compositional Simulators", SPE 12243, Paper presented at the Reservoir Simulation Symposium held in San Francisco, CA, November 15-18, (1983).
- [7] Tan, T.B., "Implementation of an Improved Adaptive – Implicit Method in a Thermal Compositional Simulator" SPE Reservoir Engineering, (Nov. 1988), 1123-1136 (1988).
- [8] Jessen, K., Orr Jr., F.M., "Gravity Segregation and Compositional Reservoir Simulation", paper SPE 89448 presented at the 14th symposium on improved oil recovery, Tulsa, Oklahoma, (2004).

فهرست نمادها

سطح عمود بر جریان	A
ضریب حجمی نفت	B_o
زدر فاز آفوگاسیته جزء	f_{ij}
شتاب جاذبه	g
عمق	h
تراوایی	k
(حالت غیر امتزاجی) زتراوایی نسبی فاز	k_{rj}
(حالت امتزاجی) زتراوایی نسبی فاز	\tilde{k}_{rj}
درصد مایع در مخلوط	L
زفشار فاز	P_j
فشار موئین نفت-گاز	P_{cog}
فشار موئین آب-نفت	P_{cow}
نسبت گاز محلول	R_s
زاشباع فاز	S_j
دما	T
زعمورپذیری فاز	T_j
درصد بخار در مخلوط	V

- [9] Crane, M., Bratvedt, F., Bratvedt, K., and, Olufsen, R. "A Fully Compositional Streamline Simulator", paper SPE 63156 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, (2000).
- [10] Ichiro, O., Datta-Gupta, A., and King, M.J., "Time Step Selection During Streamline Simulation Via Transverse Flux Correction", paper SPE 79688 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, (2003).
- [11] Seto, C.J., Jessen, K., and Orr Jr., F.M., "Compositional Streamline Simulation of Field Scale Condensate Vaporization by Gas Injection", paper SPE 79690 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, (2003).
- [12] Kazemi, H., Vestal, C.R., and Shank, G.D. "An Efficient Multicomponent Numerical Simulator", SPE J. (Oct. 1978), 355-368, (1978).
- [13] Michelsen, M., "The Isothermal Flash Problem, Part I Stability" Fluid Phase Equilibria, vol 6, (1), (1982).