

یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

راه حل تحلیلی معادله ریزش ثقلی اجباری در یک بلوک

مهدی بهاری مقدم (نویسنده مسئول)^۱، حمید ظفری ده کهنه^۲

^۱ دکتری مهندسی نفت، استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران، bahari@put.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت مخازن، گروه مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران،
hamidzafaridehkohneh@yahoo.com

چکیده

مخازن کربناته شکافدار بخش قابل توجهی از ذخایر هیدروکربن جهان را شامل می‌شوند. بطوریکه، حدود ۷۰ درصد از ذخایر نفتی متعارف خاورمیانه، در مخازن کربناته قرار دارند و بیشتر این مخازن کربناته به طور طبیعی شکسته شده‌اند و با نام مخازن کربناته شکافدار شناخته می‌شوند. تصور بر این است که تولید نفت از چنین مخازنی نقش مهمی در آینده مصرف انرژی در حال رشد جهان دارد. بنابراین، مطالعه مکانیسم‌های تولید نفت نقش مهمی در آینده صنعت نفت ایفا می‌کند. مکانیسم ریزش ثقلی یکی از مکانیسم‌های اساسی و اصلی بازیافت نفت در مخازن کربناته شکافدار (در منطقه مورد تهاجم گاز) است. مدل‌های تحلیلی بسیاری برای توصیف این مکانیسم ارائه شده است. مدل‌های تحلیلی ارائه شده برای این مکانیسم براساس اثر دادن نیروهای ویسکوز (گرانروی)، ثقلی (گرانشی) و مویینگی به دو دسته ریزش ثقلی خودبه‌خودی و ریزش ثقلی اجباری تقسیم می‌شوند. مطالعات مروری در مورد ریزش ثقلی نشان می‌دهد که درک اساسی و مدل سازی روند ریزش ثقلی هنوز هم به نظر می‌رسد یک چالش برای مهندسان مخزن است. بنابراین در این مطالعه، یک مدل تحلیلی جدید برای تخمین توزیع اشباع نفت در حالت پایدار با فرض گرادیان فشار گاز ثابت در کل ماتریس ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی

مخازن کربناته شکافدار، مکانیسم ریزش ثقلی، ریزش ثقلی اجباری، حل تحلیلی، گرادیان فشار گاز و تک بلوک.

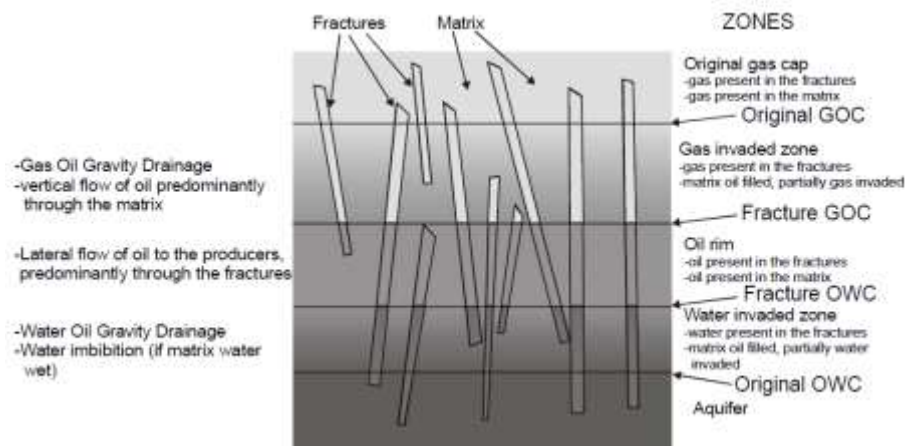
۱. مقدمه

مخازن کربناته شکافدار به صورت مجموعه‌ای شامل ماتریس و شبکه شکاف در نظر گرفته می‌شوند. این گونه از مخازن شامل دو محیط با خصوصیات فیزیکی متفاوت هستند [۱، ۲]:

- محیط ماتریس: با تخلخل نسبتا بالا و تراوایی پایین که قسمت عمده ای از نفت در جای مخزن را در خود جای داده است
- محیط شکاف: با تراوایی نسبتا بالا و تخلخل پایین که باعث حرکت راحت تر سیال به سمت چاه تولیدی می شوند

از آنجا که شکاف ها بسیار نفوذ پذیرند، میانبرهایی برای گاز و آب (تزریق شده) ایجاد می کنند. به طور کلی، همانطور که در شکل ۱ مشخص است سه ناحیه را می توان در تولید مخازن کربناته شکافدار تشخیص داد [۳]:

- (الف) ناحیه مورد تهاجم گاز: که در آن ماتریس ها از نفت پر شده و شکاف ها حاوی گاز هستند
(ب) ناحیه نفتی: که ماتریس ها و شکاف های آن پر از نفت است
(ج) ناحیه مورد تهاجم آب: که در آن ماتریس ها از نفت پر شده و شکاف ها حاوی آب هستند



شکل ۱. ناحیه ها و فرایندها در مخازن کربناته شکافدار تحت ریزش ثقلی: نفت از طریق ماتریس به شکاف تخلیه می شود و سپس از طریق شکاف ها به سمت تولیدکنندگان نفت جریان می یابد [۳].

مکانیسم ریزش ثقلی یکی از مهم ترین فرآیندهای تولید از مخازن کربناته شکافدار و معمولی است که در آن نیروی ثقلی (گرانج) مهمترین نیروی پیشران در تولید است. فرآیند ریزش ثقلی در مراحل اولیه تولید یعنی هنگام توسعه میدان و همچنین هنگام تزریق گاز به منظور افزایش برداشت نفت اتفاق می افتد [۱، ۲]. مکانیسم ریزش ثقلی تاثیر زیادی بر میزان بازیافت نفت از این ستون‌ها دارد [۴]. در مخازن نفتی سه نوع نیروی ویسکوز (گرانروی)، نیروی ثقلی (گرانجی) و نیروی موئینگی وجود دارد. در مدل‌های تحلیلی ارایه شده برای مکانیسم ریزش ثقلی در مخازن کربناته شکافدار براساس اثر دادن نیروهای ویسکوز، ثقلی و موئینگی در آن مدل، دو دسته مکانیسم ریزش ثقلی خودبه‌خودی و ریزش ثقلی اجباری وجود خواهد داشت.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- مکانیسم ریزش ثقلی خودبه خودی: هرگاه در یک مدل تحلیلی، نیروهای ثقلی و موینگی در محاسبات لحاظ گردند، مکانیسم ریزش ثقلی خودبه خودی است.

- مکانیسم ریزش ثقلی اجباری: هرگاه در یک مدل تحلیلی، نیروهای ویسکوز، ثقلی و موینگی در محاسبات لحاظ گردند، مکانیسم ریزش ثقلی اجباری است.

چندین مقاله در مورد توصیف جنبه‌های مختلف مکانیسم ریزش ثقلی در محیط‌های متخلخل از نظر مدل‌سازی تحلیلی، ریاضی و آزمایشگاهی منتشر شده است. با این حال، این روند به ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است. لورت و لویس به بررسی مفاهیم پایه‌ای فرآیند ریزش ثقلی پرداختند [۵، ۶]. کاردول و پارسون توانستند برای اولین بار یک مدل تحلیلی برای بررسی فرآیند ریزش ثقلی ارائه کنند. مدل تحلیلی کاردول و پارسون توسط هرمن داکسترا بهبود یافت [۷]. پاوونه و همکاران به منظور پیش‌بینی توزیع اشباع و میزان بازیافت سیال از یک نمونه، معادله مشتق جزئی فرآیند ریزش ثقلی را به صورت تحلیلی حل کردند [۸]. فیروزآبادی و ایشیموتو با استفاده از روش جداسازی متغیرها معادله خطی شده فرآیند ریزش ثقلی را برای شروط مرزی مختلف حل کردند [۹]. لنگرون و همکاران به بررسی فرآیند ریزش ثقلی از دید محاسبه فشار موینگی پرداختند [۱۰، ۱۱]. کرا و فیروزآبادی معادله ریزش ثقلی را برحسب پتانسیل موینگی بیان و معادله غیر خطی را به صورت عددی حل نمودند. همچنین در آن سال کلانیدو و فیروزآبادی به مطالعه فرآیند ریزش ثقلی در محیط متخلخل لایه ای پرداختند [۱۲]. اسکچتر و ژو در سال ۱۹۹۶ با استفاده از مفهوم جریان سیال و ارتباط دادن آن با قانون داری توانستند یک عبارت جدید برای محاسبه بازیافت نفت طی فرآیند ریزش ثقلی و به صورت تابعی از زمان بیان نمایند [۱۳]. لی و هورن ادعا کردند که مکانیزم بازیافت نفت در فرآیند ریزش ثقلی همانند فرآیند آشام است [۴]. در نهایت آن‌ها توانستند با استفاده از مدل آرنوفسکی که پیشتر برای فرآیند آشام مورد استفاده قرار می‌گرفت، مدلی برای فرآیند ریزش ثقلی ارائه دهند [۱۴]. دوناتو و همکاران برای بررسی فرآیند ریزش ثقلی به آنالیز تحلیلی و عددی بازیافت نفت در یک محیط متخلخل یک بعدی پرداختند [۱۵]. در سال ۲۰۰۸ هوتیت و فیروزآبادی با استفاده از روش المان‌های محدود یک فرمولاسیون جدید را در فضای سه بعدی ارائه کردند که در آن سرعت کل سیال به صورت عبارتی از گرادیان پتانسیل فاز تر و موینگی تعریف می‌شد [۱۶]. داستاری و همکاران در سال ۲۰۰۵ برخی آزمایش‌ها را با استفاده از میکرومدل‌ها برای مقایسه ریزش ثقلی خودبه خودی و ریزش ثقلی اجباری در هر دو محیط متخلخل معمولی و شکافدار انجام داد [۱۷]. نبی پور و همکاران در سال ۲۰۰۷ با انجام برخی آزمایش‌ها در مدل‌های شکافدار در مقیاس مغزه، ریزش ثقلی نفت و گاز با حرارت را مطالعه کرد. آنها اشاره کردند که افزایش فشار گاز تزریقی می‌تواند منجر به بازیافت بیشتر نفت شود [۱۸]. در این مقاله، یک رویکرد نظری جدید برای ریزش ثقلی اجباری در محیط متخلخل شکافدار ارائه شده است. و یک مدل تحلیلی برای تخمین اشباع نفت باقیمانده در حالت پایدار ایجاد شده است که این تجزیه و تحلیل ممکن است به ویژه در طراحی یا کنترل مکانیسم ریزش ثقلی اجباری که در محیط متخلخل اعمال می‌شود، مفید باشد.

۲. روش کار

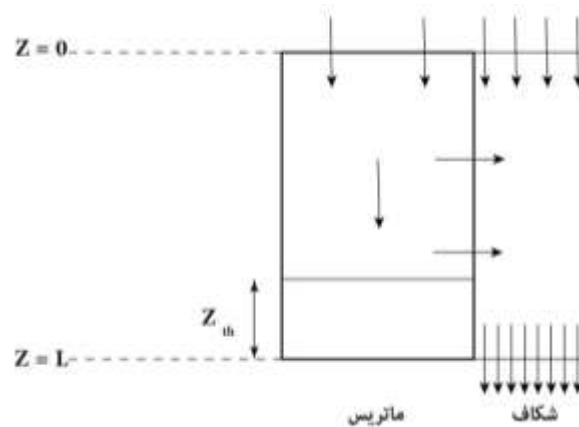
ریزش ثقلی اجباری در محیط متخلخل شکافدار فرآیندی است که در آن گاز از بالای محل تماس ماتریس و شکاف تزریق می‌شود. به دلیل نفوذپذیری زیاد در شکاف‌ها، بیشتر گاز تزریق شده در شکاف جریان می‌یابد درحالی که گاز باقیمانده وارد ماتریس‌ها می‌شود. از آنجا که نیروی موینگی در ماتریس قابل توجه است، گاز تزریق شده نمی‌تواند ارتفاع آستانه موینگی را به طور کامل از بین ببرد. با این حال، کارهای آزمایشی منتشر شده قبلی توسط فیروزآبادی و همکاران در سال ۱۹۹۷ نشان می‌دهد که تزریق گاز در محیط متخلخل شکافدار می‌تواند ارتفاع آستانه موینگی را کاهش دهد [۱۹]. گاز جریان یافته از طریق ماتریس همچنان نفت را جابجا می‌کند تا زمانی

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

که به منطقه نگهدارنده مویبگی برسد. پس از آن، گاز از کناره (پهلوی) ماتریس خارج می‌شود و به گاز جاری در شکاف‌های عمودی می‌پیوندد. به طور کلی، فرض بر این است که در هر سطح مقطع از ماتریس مقداری از گاز همچنان به سمت پایین جریان می‌یابد و بقیه گاز از ماتریس به شکاف‌ها منتقل می‌شود. شکل ۲ شماتیک ساده‌ای از این ایده را به نشان می‌دهد.



شکل ۲. شماتیک ساده نشان دهنده ریزش ثقلی اجباری در محیط متخلخل شکافدار است [۲۰].

به منظور مدل‌سازی این فرآیند، یک مدل تحلیلی جدید برای پیش‌بینی اشباع نفت باقیمانده در حالت پایدار ایجاد شده است. سپس چگونگی استفاده از نتایج فرعی این مدل برای تخمین عملکرد چنین فرآیندی نشان داده شده است. اشباع نفت باقیمانده با مفهوم تعادل فشار مویبگی بهتر درک می‌شود. اشباع نفت در هر نقطه از ماتریس با گذشت زمان کاهش می‌یابد و نیروی مویبگی قویتر می‌شود. ریزش نفت تا زمانی که نیروی مویبگی بر نیروهای محرک (نیروی گرانش و گرانشی) غلبه کند، ادامه دارد. از آنجا که نیروهای گرانش و گرانشی در هر نقطه به ترتیب به ارتفاع و گرادیان (شیب) فشار آن مکان بستگی دارند، اشباع نفت باقیمانده در حالت پایدار از ارتفاعی به ارتفاع دیگر متفاوت است. در ریزش ثقلی خودبه‌خودی، نیروی مویبگی فقط با نیروی گرانش رقابت می‌کند. از این رو، وضعیت نهایی با تعادل نیروی مویبگی و نیروی گرانشی کنترل می‌شود. با این حال، گرادیان فشار (افت فشار) به دلیل جابجایی ویسکوز در ریزش ثقلی اجباری باید به نحوی در محاسبات تعادل فشار مویبگی و گرانشی دخیل باشد.

۱.۲. فرضیات

این مدل تحلیلی پیشنهادی بر اساس دو فرض اصلی است:

۱- گرادیان (شیب) فشار گاز در بالاترین مکان ماتریس ($z = 0$) و در همان مکان شکاف با هم برابر است.

۲- گرادیان (شیب) فشار گاز در تمام ماتریس ثابت است یا تابعی از مکان نیست.

۲.۲. فرمولاسیون ریزش ثقلی اجباری در یک بلوک

در شرایط جریان تراکم ناپذیر، معادله پیوستگی در صورت تزریق گاز در بالاترین مکان ماتریس ($z = 0$) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$q_{g,i} = q_{g,m} + q_{g,f} \quad (1)$$

که در آن $q_{g,m}$ و $q_{g,f}$ دبی گازی است که به ترتیب به ماتریس و شکاف می‌ریزد، و $q_{g,i}$ دبی تزریق گاز کل است. طبق معمول، قانون دارسی می‌تواند برای نشان دادن دبی سیال در محیط متخلخل استفاده شود. این قانون برای فاز گاز به صورت زیر بیان شده است:

$$q_g = -\frac{Kk_{rg}A}{\mu_g} \left(\frac{\partial P_g}{\partial z} - \rho_g g \right) \quad (2)$$

با قرار دادن معادله ۲ در معادله ۱، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$-\frac{Kmk_{rg}^{top}A_m}{\mu_g} \left(\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} \right)_m - \rho_g g \right) - \frac{KfA_f}{\mu_g} \left(\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} \right)_f - \rho_g g \right) = q_{g,i} \quad (3)$$

که در آن K نفوذپذیری مطلق، k_{rg}^{top} نفوذپذیری نسبی گاز در مکان $z=0$ ، A سطح مقطع، μ_g ویسکوزیته (گرانروی) گاز، P_g فشار گاز، ρ_g چگالی گاز، z محور عمودی رو به پایین و g شتاب گرانش است. زیرنویس های m و f به ترتیب به ماتریس و شکاف اشاره دارند.

با استفاده از اولین فرض (برابری گرادیان فشار گاز ماتریس و شکاف در $z=0$)، معادله ۳ به رابطه زیر کاهش می‌یابد:

$$\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} - \rho_g g \right) \left[\frac{Kmk_{rg}^{top}A_m}{\mu_g} + \frac{KfA_f}{\mu_g} \right] = -q_{g,i} \quad (4)$$

در معادله ۴، k_{rg}^{top} که تابعی از اشباع نفت در $z=0$ است و $\partial P_g / \partial z$ مجهول هستند. اگر اشباع نفت در بالاترین مکان ماتریس به نحوی شناخته شود، نفوذ پذیری نسبی گاز آن به راحتی تعیین می‌شود. به منظور برآورد میزان اشباع نفت، قانون دارسی برای فاز نفت به صورت زیر نوشته شده است:

$$u_o = -\frac{Kk_{ro}}{\mu_o} \left(\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} \right)_m - \rho_o g - \left(\frac{\partial P_c}{\partial z} \right)_m \right) \quad (5)$$

که در آن u_o سرعت دارسی، k_{ro} نفوذپذیری نسبی نفت، A سطح مقطع، μ_o ویسکوزیته (گرانروی) نفت، ρ_o چگالی نفت و P_c فشار موینگی است. زیرنویس های m و f به ترتیب به ماتریس و شکاف اشاره دارند. در شرایط پایدار، پتانسیل جریان نفت برای هر مقطع از جمله $z=0$ صفر است. بنابراین، می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{\partial P_g}{\partial z}\right)_m - \rho_o g = \left(\frac{\partial P_c}{\partial z}\right)_m \quad (6)$$

با انتگرال از معادله ۶، اشباع نفت باقی مانده در هر مکان را می توان تعیین کرد. اگر فرض دوم (ثابت بودن گرادیان فشار گاز در تمام نقاط ماتریس) با معادله ۶ ترکیب شود سمت چپ این معادله به یک مقدار ثابت تبدیل خواهد شد. پس از انتگرال گیری، رابطه زیر را بدست می آید:

$$\left[\left(\frac{\partial P_g}{\partial z}\right)_m - \rho_o g\right](z - L) = P_{cm} \quad (7)$$

که در آن L طول محیط متخلخل است.

معادله ۷ یک معادله حاکم برای پیش بینی توزیع اشباع نفت نهایی باقی مانده است زیرا فقط کافی است وابستگی فشار موینگی را به عنوان تابعی از اشباع نفت دانست. سپس با جایگزینی هر مکان دلخواه در معادله ۷، اشباع نفت باقیمانده در آن نقطه را می توان تعیین کرد. به عنوان مثال، برای یافتن میزان اشباع نفت در محل $z = 0$ می توان یکی را بدست آورد:

$$\left[\left(\frac{\partial P_g}{\partial z}\right)_m - \rho_o g\right]L = P_{cm}(S_o) \quad (8)$$

که در آن S_o اشباع نفت است.

معادلات ۴ و ۸ معادلات حاکم برای یافتن گرادیان فشار گاز در ماتریس هستند. حل همزمان این دو معادله غیرخطی هم اشباع نفت در حالت پایدار را در $z = 0$ و هم گرادیان فشار گاز را در ماتریس می دهد به شرط آنکه فشار موینگی به عنوان تابعی از اشباع نفت باشد. اگرچه معادلات فوق به هر شکل مشخص از توابع نفوذپذیری موینگی و نسبی محدود نمی شوند، اما روابط زیر برای فرایند ریزش ثقلی نفت و گاز در نظر گرفته شده است [۲۱]:

$$k_{rg} = k_{rg}^{\max} \left(\frac{1 - S_o}{1 - S_{org}}\right)^{ng} \quad (9)$$

$$P_c = P_{cth} \left(\frac{S_o - S_{org}}{1 - S_{org}}\right)^{-1/\lambda} \quad (10)$$

که در آن k_{rg}^{\max} بیشترین نفوذپذیری نسبی گاز، ng نمای نفوذپذیری نسبی، P_{cth} فشار موینگی آستانه، S_{org} اشباع نفت باقیمانده و λ شاخص توزیع اندازه منافذ است.

ترکیب معادلات ۴، ۸-۱۰ منجر به معادلات حاکم زیر برای تخمین گرادیان فشار گاز می شود:

$$\left[\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} \right)_m - \rho_g g \right] \left[K_m A_m k_{rg}^{\max} \left(\frac{1 - S_o^{\text{top}}}{1 - S_{org}} \right)^{ng} + K_f A_f \right] = -q_{g,i} \mu_g \quad (11)$$

$$\left[\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} \right)_m - \rho_o g \right] L = -P_{cth} \left(\frac{S_o^{\text{top}} - S_{org}}{1 - S_{org}} \right)^{-1/\lambda} \quad (12)$$

که در آن S_o^{top} اشباع نفت در حالت پایدار در $z = 0$ است. به منظور تخمین اشباع نهایی نفت در هر مکان دیگر از ماتریس، با ترکیب معادله ۷ و ۱۰ و پس از چند ساده‌سازی می‌توان نوشت:

$$S_o = S_{org} + (1 - S_{org}) \left[\frac{\left[\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} \right)_m - \rho_o g \right] (z - L)}{P_{cth}} \right]^{-\lambda} \quad (13)$$

معادله ۱۳ نشان می‌دهد که نه تنها اشباع نهایی نفت باقیمانده بلکه ارتفاع آستانه مویبندی در ریزش ثقلی اجباری کمتر از مقادیر مربوطه در ریزش ثقلی خودبه‌خودی می‌شود. پارامتر بعدی در صورتی که سمت چپ معادله ۱۳ برابر با یک در نظر گرفته شود می‌توان تخمین زد. برای پیش‌بینی این پارامتر ممکن است از معادله ۱۴ استفاده شود:

$$\left[\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} \right)_m - \rho_o g \right] z_{th,new} = -P_{cth} = -\Delta \rho g z_{th,old} \quad (14)$$

که در آن $z_{th,old}$ ارتفاع آستانه مویبندی ریزش خودبه‌خودی، $z_{th,new}$ ارتفاع آستانه مویبندی ریزش اجباری و $\Delta \rho$ اختلاف چگالی بین فازهای گاز و نفت است.

معادله ۱۳ همچنین نشان می‌دهد که گرادیان فشار گاز می‌تواند به عنوان یک معیار قابل اعتماد برای در نظر گرفتن یا نادیده گرفتن نیروی گرانشی در نظر گرفته شود. کاملاً مشهود است که در ریزش ثقلی خودبه‌خودی، سرعت تولید نفت تا رسیدن جبهه گاز به منطقه نگهدارنده مویبندی، ثابت است. همین رفتار را می‌توان برای ریزش ثقلی اجباری با دبی تولید نفت متفاوت در نظر گرفت. در این حالت، ممکن است فرض شود که گرادیان فشار گاز یک نیروی محرکه اضافی به فاز نفت وارد می‌کند تا از محیط متخلخل خارج شود. بنابراین، دبی تولید نفت اولیه ماتریس قبل از رسیدن گاز به منطقه جدید نگهدارنده مویبندی ممکن است به صورت زیر تخمین زده شود:

$$q_{oi} = \frac{KA}{\mu} \left(\Delta \rho g \left(1 - \frac{z_{th,old}}{L} \right) + \frac{\partial P_g}{\partial z} \right) \quad (15)$$

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

با توجه به شرایط جریان تراکم ناپذیر، دبی تولید نفت ماتریس باید برابر با دبی گاز ورودی به این محیط باشد. معادله ۱۵ می تواند بخشی از کل گاز تزریق شده را که از طریق ماتریس جریان دارد پیش بینی کند.

۳. نتیجه گیری

در این مقاله حل تحلیلی مدل ریزش ثقلی اجباری با در نظر گرفتن نیروی ثقلی، نیروی موئینگی و نیروی گرانشی و برای یک بلوک مستقل ارائه شده است. مدل تحلیلی پیشنهادی برای پیش بینی اشباع نفت در حالت پایدار در ماتریس نشان می دهد که در حضور گرادیان فشار گازهای بسیار بالا در شکاف ها، بازیافت نهایی نفت بطور قابل توجهی افزایش می یابد. نیروی گرانشی افزایش یافته بوسیله جریان گاز در شکاف ها نه تنها باعث کاهش ارتفاع آستانه موئینگی می شود، بلکه باعث می شود اشباع نفت در حالت پایدار کمتر از حد تعادل گرانشی-موئینگی شود. در ماتریس هایی که طول آنها کمتر از ارتفاع آستانه موئینگی هست، ریزش ثقلی اجباری قادر به تولید مقداری نفت است. و میزان مطلوب تزریق گاز برای مکانیسم ریزش ثقلی اجباری به حجم قابل دسترسی گاز تزریق شده، هدف اصلی فرآیند و همچنین پارامترهای اقتصادی بستگی دارد.

۴. علائم و نشانه ها

z	محور عمودی رو به پایین	A	سطح مقطع
$z_{th,old}$	ارتفاع آستانه موئینگی ریزش خودبه خودی	D	داریسی، یکا
$z_{th,new}$	ارتفاع آستانه موئینگی ریزش اجباری	g	شتاب گرانش
ϕ	تخلخل	K	نفوذپذیری مطلق
λ	شاخص توزیع اندازه منافذ	k_r	نفوذپذیری نسبی
μ	سرعت	L	طول محیط متخلخل
ρ	چگالی	ng	نمای نفوذپذیری نسبی
f	شکاف	$OOIP$	میزان نفت درجا
g	گاز	P	فشار
i	تزریق؛ اولیه	P_c	فشار موئینگی
m	ماتریس	q	دبی
o	نفت	S	اشباع
t	کل	S_{org}	اشباع نفت باقیمانده
top	مکان در $z = 0$	t	زمان
max	بیشترین	u	سرعت داریسی

یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

منابع

- [1] V. Sajadian, A. Danesh, and D. Tehrani, "Laboratory studies of gravity drainage mechanism in fractured carbonate reservoir-capillary continuity," in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, 1998: OnePetro.
- [2] V. Sajadian, A. Danesh, and D. Tehrani, "Laboratory study of gravity drainage mechanism in fractured carbonate reservoir-reinfiltration," in *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, 1999: Society of Petroleum Engineers.
- [3] T. Clemens and K. Wit, "The effect of fracture spacing on gas/oil gravity drainage in naturally fractured reservoirs," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2001: OnePetro.
- [4] K. Li and R. N. Horne, "Modeling of oil production by gravity drainage," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 60, no. 3-4, pp. 161-169, 2008.
- [5] J. O. Lewis, "Gravity drainage in oil fields," *Transactions of the AIME*, vol. 155, no. 01, pp. 133-154, 1944.
- [6] M. Leverett, "Capillary behavior in porous solids," *Transactions of the AIME*, vol. 142, no. 01, pp. 152-169, 1941.
- [7] H. Dykstra, "The prediction of oil recovery by gravity drainage," *Journal of Petroleum Technology*, vol. 30, no. 05, pp. 818-830, 1978.
- [8] D. Pavone, *Gravity drainage at low interfacial tension*. 1989.
- [9] A. Firoozabadi and K. Ishimoto, "Reinfiltration in fractured porous media: part 1-one dimensional model," *SPE Advanced Technology Series*, vol. 2, no. 02, pp. 35-44, 1994.
- [10] D. Longeron, F. Kalaydjian, and C. Bardon, "Gas/oil capillary pressure: measurements at reservoir conditions and effect on gas-gravity drainage," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1994: OnePetro.
- [11] D. Longeron, F. Kalaydjian, and C. Bardon, "Gas-oil capillary pressure measurements at reservoir conditions: effect of interfacial tension and connate water saturation," *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 84, no. 1, pp. 73-80, 1995.
- [12] F. C. Antonio Claudio and A. Firoozabadi, "Concept of gravity drainage in layered porous media," *SPE Journal*, vol. 1, no. 01, pp. 101-111, 1996.
- [13] D. Schechter and B. Guo, "Mathematical modeling of gravity drainage after gas injection into fractured reservoirs," in *Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*, 1996: OnePetro.
- [14] J. S. Aronofsky, L. Masse, and S. G. Natanson, "A model for the mechanism of oil recovery from the porous matrix due to water invasion in fractured reservoirs," *Transactions of the AIME*, vol. 213, no. 01, pp. 17-19, 1958.
- [15] G. Di Donato, Z. Tavassoli, and M. J. Blunt, "Analytical and numerical analysis of oil recovery by gravity drainage," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 54, no. 1-2, pp. 55-69, 2006.
- [16] H. Hoteit and A. Firoozabadi, "Numerical modeling of two-phase flow in heterogeneous permeable media with different capillarity pressures," *Advances in water resources*, vol. 31, no. 1, pp. 56-73, 2008.
- [17] A. Dastyari, B. Bashukooh, S. F. Shariatpanahi, M. Haghighi, and M. Sahimi, "Visualization of gravity drainage in a fractured system during gas injection using glass micromodel," in *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, 2005: OnePetro.

یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [18] M. Nabipour *et al.*, "Laboratory investigation of thermally-assisted gas–oil gravity drainage for secondary and tertiary oil recovery in fractured models," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 55, no. 1-2, pp. 74-82, 2007.
- [19] A. Firoozabadi, T. Markeset, and B. Dindoruk, "Viscous displacement in fractured porous media," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, vol. 36, no. 09, 1997.
- [20] M. G. Ghazvini, R. Kharrat, and M. Masihi, "A new mathematical model for force gravity drainage in fractured porous media," *Transport in porous media*, vol. 83, no. 3, pp. 711-724, 2010.
- [21] A. T. Corey, "The interrelation between gas and oil relative permeabilities," *Producers monthly*, pp. 38-41, 1954.