

بررسی و مقایسه مدل‌های ریزش ثقلی آزاد به منظور پیش‌بینی نمودار تولید در شرایط مختلف

بنیامین ساعدی*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر • مصطفی گنجه‌قزوینی، غلامرضا بشیری، پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز

چکیده

ریزش ثقلی یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های تولید در مخازن شکافدار می‌باشد. پیش‌بینی نمودار تولید و مدل‌سازی ریزش ثقلی از گذشته مورد توجه محققان بسیاری بوده است. این مطالعات شامل حل تحلیلی با فرضیات ساده‌کننده و یا استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی و عددی برای مدل‌سازی آن بوده است. در صورت وجود دقت کافی در نتایج حل تحلیلی می‌توان از اعداد بدون بعد مرتبط با فیزیک مسئله برای پیش‌بینی نمودار تولید در شرایط مختلف استفاده کرد. در یکی از مطالعات قبلی و جامع ریزش ثقلی یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی عملکرد این مکانیسم و بر اساس زمان بدون بُعد ارائه شده است. در تحقیق حاضر، نتایج مدل تحلیلی مذکور در شرایط مختلف با نتایج مدل‌های عددی ریزش ثقلی که توسط نرم‌افزارهای تجاری اکلیپس و کامسول شبیه‌سازی می‌شوند، مقایسه می‌شود. مقایسه نشان می‌دهد که نتایج مدل تحلیلی و مدل عددی شبیه‌سازی شده توسط اکلیپس تطابق خوبی با یکدیگر دارند، اما نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار کامسول در زمان‌های اولیه خطا دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۲/۲۲
تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۴/۰۱
تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۴/۱۸

واژگان کلیدی:

ریزش ثقلی، نمودار تولید، شبیه‌سازی جریان، مدل‌سازی

مقدمه

استفاده از اعداد بدون بُعد ثقلی و موئینه نوشتند. آنها دریافتند که در زمان‌های اولیه، ضریب برداشت به صورت خطی با زمان بدون بُعد تغییر می‌کند. پس از گذشت زمان اولیه (زمانی که جبهه سیال به ارتفاع آستانه سنگ برسد)، نیز رفتار ضریب برداشت یا به صورت توانی^۱ (غالب بودن نیروی ثقلی) است و یا به صورت نمایی^۲ (غالب بودن نیروی موئینگی) است. بدین ترتیب دو زمان بدون بُعد ثقلی و موئینه را تعریف کردند.

$$t_{Dg} = \frac{Kk_{ro}^{\max} \Delta \rho g}{\phi H \mu_o} t \quad (1)$$

$$t_{Dc} = \frac{\sqrt{\frac{K}{\phi} k_{ro}^{\max} \sigma_J J^*}}{H^2 \mu_o} t \quad (2)$$

در این روابط، t_{Dg} و t_{Dc} به ترتیب زمان بدون بُعد ثقلی و موئینه هستند. همچنین K تراوایی، k_{ro}^{\max} تراوایی نسبی نفت در اشباع نفت بیشینه، ϕ تخلخل، H ارتفاع موثر ماتریکس (یعنی ارتفاع بخشی از بلوک ماتریکس که در آن ریزش ثقلی رخ می‌دهد)، و J^* خاصیت موئینه سنگ هستند. Δp تفاوت چگالی نفت و گاز، γ توان تابع موئینه کوری^۳، گرانیوی نفت، μ_o کشش بین سطحی بین نفت و گاز، و g شتاب گرانش و t زمان است.

بررسی‌های موجود نشان می‌دهد که ریزش ثقلی از مهم‌ترین مکانیزم‌های فعال در ناحیه مورد تهاجم گاز در مخازن شکافدار است. مطالعات متعددی جهت مدل‌سازی ریاضی این فرآیند موجود یافت می‌شود. در اکثر این مطالعات فرضیات ساده‌کننده‌ای انجام شده تا بتوان حل تحلیلی برای آن ارائه کرد و یا اینکه از ابزارهای عددی برای مدل‌سازی آن استفاده شده است. اگرچه حل تحلیلی از مزایای سادگی و سرعت بهره می‌برد، اما با توجه به نیاز به فرضیات ساده‌کننده شاید از دقت کافی برخوردار نباشد.

از طرف دیگر، با توجه به اختلاف در شرایط آزمایشگاهی با شرایط واقعی، نمی‌توان از نتایج یک آزمایش به صورت مستقیم برای پیش‌بینی رفتار واقعی مخزن استفاده کرد. بنابراین نیازمندی‌های برای ارتقای مقیاس و تعمیم نتایج مقیاس آزمایشگاهی و یا نتایج حل تحلیلی به شرایط واقعی مخزن هستیم. در این مطالعه، یکی از جامع‌ترین مطالعات تحلیلی در زمینه ریزش ثقلی آزاد بررسی شده و نتایج آن با نتایج دو مدل عددی کامسول و شبیه‌ساز اکلیپس-نفت سیاه مقایسه می‌شود.

۱- مدل تحلیلی

دی دوناتو و همکاران (۲۰۰۶) تولید نفت با مکانیزم ریزش ثقلی را به صورت تحلیلی و عددی بررسی کردند [۱]. آنان طی این مطالعات در شرایط مختلف، عباراتی را برای نمودار ضریب برداشت نفت با

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (benyamin.saedi@yahoo.com)

کردند [۲]. دی‌دوناتو و همکاران با استفاده از نتایج عددی، ضریب برداشت نفت در شرایط حاکمیت نیروی موئینگی را با معادله ۷- بیان کردند.

$$R = R_{\infty} \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{\alpha}\right) t_{Dg} + (r-1)t_{Dc}} \right) \quad (7)$$

که در این رابطه پارامتر r به صورت نسبت ارتفاع کل بلوک ماتریکس به ارتفاع آستانه آن تعریف شده است. ارتفاع آستانه، ارتفاع بخشی از سنگ است که در آن، اشباع همیشه به مقدار حداکثر باقی می‌ماند و در این رابطه به صورت اختلاف بین ارتفاع کل و ارتفاع موثر بلوک ماتریکس تعریف شده است.

۲- مدل‌های عددی

۲-۱- مدل‌سازی در نرم‌افزار کامسول

برای شبیه‌سازی ریزش ثقلی در کامسول، باید معادلات جریان دوفازی با نیروی ثقلی را بر اساس یک دستگاه معادلات دیفرانسیلی جزئی نوشت، تا با تعیین شرایط اولیه، مرزی و هندسه مسئله، نرم‌افزار آن معادلات را حل کند. این معادلات حاکم برای مدل‌سازی ریزش ثقلی در مطالعه [۳] موجود است.

در این مطالعه ماتریکس به صورت محیطی همگن و متخلخل با تراوایی برابر در همه جهات فرض شد. برای مدل‌سازی محیط ماتریس و شکاف، یک هندسه ساده متشکل از دو استوانه هم‌مرکز در نظر گرفته شد. استوانه داخلی (ماتریس)، خواص فیزیکی متفاوتی از استوانه خارجی (شکاف) دارد. در مرز بین این دو بخش پیوستگی متغیرهای اصلی مطالعه، یعنی فشار فازهای نفت و گاز، در نظر گرفته

این محققان معادلات جریان در زمان‌های اولیه را با صرف‌نظر از فشار موئینگی با کمک تحلیل باکلی-لورت حل کرده و مکان جبهه و توزیع اشباع را در هر زمان یافتند. سپس از مفهوم اشباع میانگین در بخشی از سنگ که شامل ارتفاع آستانه موئینگی نمی‌شود، استفاده کرده و رابطه ۳- را برای ضریب برداشت پیشنهاد کردند.

$$R = t_{Dg} \quad (3)$$

این معادله برای زمان‌های اولیه و قبل از رسیدن جبهه سیال به ارتفاع آستانه کاربرد دارد. نویسندگان با توجه به معادلات، زمان بی‌بعد رابطه ۴- را برای رسیدن جبهه به ارتفاع آستانه به‌دست آوردند.

$$t_{Dg} = \frac{1}{\alpha} \quad (4)$$

که در این رابطه پارامتر α توان تابع تراوایی نسبی نفت است. آنها سپس با توجه به اینکه اثر نیروی موئینه لحاظ نشده بود و در این روابط فرض شده بود ضریب برداشت نهایی به یک خواهد رسید، رابطه ضریب برداشت را به صورت معادله ۵- اصلاح کردند.

$$R = R_{\infty} t_{Dg} \quad (5)$$

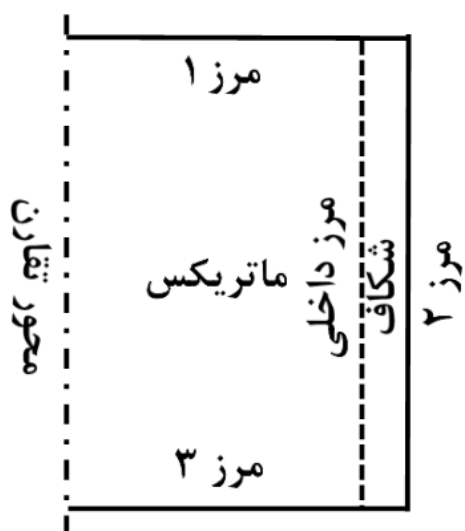
که در این رابطه R_{∞} ، ضریب برداشت نهایی، ضریب برداشت در زمان بسیار طولانی است که بر اساس تعادل نیروهای ثقلی و موئینه به‌دست می‌آید. با توجه به مفهوم این تعادل، توزیع اشباع در زمان بسیار طولانی به صورت رابطه ۶- خواهد بود.

$$S(h) = Pc^{-1}(\Delta\rho gh) \quad (6)$$

که در آن S مقدار اشباع در هر ارتفاع، h ارتفاع از پایین‌ترین نقطه بلوک، و Pc^{-1} تابع معکوس فشار موئینه سنگ است.

در زمان‌های پس از رسیدن جبهه سیال به ارتفاع آستانه، بر اساس نوع نیروی غالب بر حرکت سیال (نیروی ثقلی یا موئینگی) رفتار تابع ضریب برداشت تغییر می‌کند. اگر نیروی ثقلی بر سیستم حاکم باشد، تابع به صورت توانی خواهد بود. البته این محققان، رابطه به‌دست آمده را برای زمان‌های دیگر نیز تعمیم داده و با استفاده از ضریب برداشت نهایی آن را اصلاح کردند.

اگر نیروی موئینه حاکم باشد، رفتار ضریب برداشت نفت از تابع نمایی پیروی می‌کند. آنها برای به‌دست آوردن رابطه موردنظر، از تکنیکی که پیش از این برای آشام استفاده شده بود، استفاده کردند و به رابطه‌ای مشابه آن رسیدند که بعدالی و هورن (۲۰۰۸) نیز مشابه آن را برای ریزش ثقلی معرفی کردند و با مقایسه آن در شرایط مختلفی که در همه موارد نیروی غالب نیروی موئینه بود، آن را تأیید



۱ | شماتیک مدل ریزش ثقلی کامسول [۳]

شرایط بدون جریان فرض شد. مرزهای اصلی سیستم، مرزهای ۱ و ۳ هستند که باعث ریزش ثقلی نفت می شوند. با توجه به محاط شدن سیستم در یک محیط با فشار ثابت، در هر دو مرز بالایی و پایینی (مرزهای ۱ و ۳) فشار گاز برابر با فشار محیط تنظیم شد.

۲-۲- مدل سازی در نرم افزار اکلیپس-نفت سیاه

مدل تعریف شده در اکلیپس از جهاتی مشابه مدل کامسول است اما از طرف دیگر، معادلات جریانی را نرم افزار اکلیپس در نظر می گیرد و صرفاً برخی موارد توسط کاربر می تواند کنترل شود. از آنجایی که می توان ریزش ثقلی در یک محیط متخلخل همگن کاملاً عمودی را به صورت یک بُعدی فرض کرد، بنابراین تفاوتی بین یک مدل استوانه ای و مکعب مستطیلی نخواهد بود. برای مدل سازی در اکلیپس مشابه کامسول یک بلوک عمودی به عنوان ماتریس با یک لایه از محیطی با خواص فیزیکی متفاوت، به عنوان شکاف احاطه می شود. اما با توجه به متفاوت بودن شرایط مرزی و عدم امکان تعریف یک مرز تولیدی، باید یک لایه فرضی اضافه با تراوایی بالا در مرزهای مورد نیاز تعریف کرد و در آن، با استفاده از تعریف چاه تولیدی یا تزریقی با شرایط مشخص در مرکز لایه شرایط مرزی مورد نیاز را اعمال کرد. شرایط مرزی در این مدل هم مشابه مدل کامسول در نظر گرفته شد. در مرز بالایی یک چاه تزریق گاز با فشار ثابت محیطی و در مرز پایینی یک چاه تولیدی با فشار ثابت محیطی تعریف شد. در این مدل در شرایط اولیه ماتریس اشباع از نفت بوده، اما شکاف اشباع از گاز در نظر گرفته شد. همچنین فشار در شرایط اولیه به صورت خطی و بر اساس چگالی سیال فرض شد. شماتیکی از مدل ساخته شده در شکل ۲-۲ قابل مشاهده است.

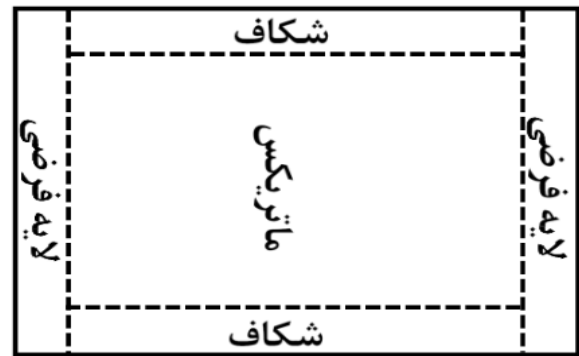
۳- نتایج

با توجه به وابستگی تابعیت ضریب برداشت به نوع نیروی غالب (ثقلی یا موئینگی)، دو حالت فرضی متفاوت در نظر گرفته شده و نتایج مدل های تحلیلی، شبیه ساز کامسول و شبیه ساز اکلیپس-نفت سیاه با یکدیگر مقایسه می شوند. این دو حالت فرضی به گونه ای تولید شدند که در یک حالت، نیروی ثقلی حاکم باشد و در حالت دیگر نیروی موئینگی. نتایج این نمونه ها به همراه بحث آن در ادامه آمده است.

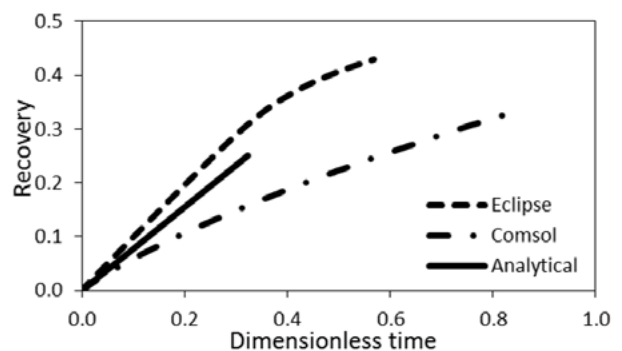
۳-۱- حاکمیت نیروی ثقلی

نمونه ای با پارامتر r برابر ۷۱، و ضریب برداشت نهایی تحلیلی ۷۷ درصد، نمونه ای است که در آن نیروهای ثقلی حاکم هستند. پارامترهای این نمونه به صورت تصادفی و بر اساس روش مونت کارلو به دست آمده اند. در این نمونه، تراوایی ۱۰۵۱ میلی دارسی، تخلخل ۱۴ درصد، اختلاف چگالی نفت و گاز ۸۰۹ کیلوگرم بر متر مکعب،

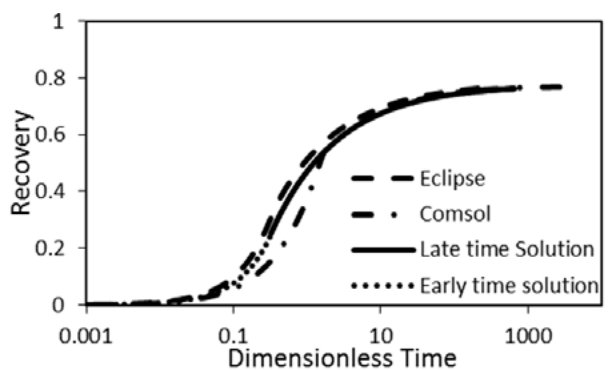
شد. شماتیک هندسه مسئله به صورت شکل ۱-۱ است. در شرایط اولیه اشباع نفت کل محیط در میزان بیشینه $(1-S_w)$ و فشار درون محیط به صورت خطی بر اساس چگالی سیال متغیر در نظر گرفته شد. در شماتیک مسئله، ۵ مرز مشخص است که برای مرز داخلی شرایط پیوستگی فشار در نظر گرفته شد. در مرز محور تقارن هم شرایط تقارن و در مرز ۲، که دیواره عمودی سیستم است،



شکل ۲ | شماتیک مدل ریزش ثقلی تعریف شده در نرم افزار اکلیپس



شکل ۳ | ضریب بازیافت در زمان اولیه نمونه با حاکمیت نیروی ثقلی



شکل ۴ | ضریب بازیافت نمونه با حاکمیت نیروی ثقلی

معناداری داشته و مدت زمان بیشتری طول می کشد تا جبهه نفت به ارتفاع آستانه برسد. این موضوع به دلیل به کارگیری مشتق اشباع نسبت به فشار موئینه در معادلات فشاری است. اشباع در فشار موئینه پایین تر از فشار موئینه آستانه همواره برابر یک است و بنابراین مشتق اشباع به فشار موئینه به طور ناگهانی از مقدار زیادی به صفر می رسد. با توجه به روش های حل نرم افزار کامسول، این تغییرات ناگهانی باعث واگرایی نتایج می شود. بنابراین برای رفع این مشکل، در این مدل مشتق اشباع به فشار موئینه در فشار موئینه کمتر از فشار موئینه آستانه برابر آخرین نقطه آن، یعنی مشتق در فشار موئینه آستانه در نظر گرفته شد [۳].

نتایج مدل ها پس از زمان اولیه همانطور که در شکل ۴- مشخص است از تشابه نسبتاً خوبی برخوردار است. ضریب بازیافت نهایی مدل های کامسول و اکلیپس نیز با دقت مناسبی ضریب بازیافت نهایی حاصل از مدل تحلیلی را بازتولید کرده اند. با توجه به اینکه ضعف موجود در مدل سازی کامسول مربوط به رفتار سیال در اشباع بیشینه است، و اینکه در زمان های پس از زمان اولیه تولید ناشی از حرکت نفت در پشت جبهه می باشد، خطای کمی در نتایج مربوط به مدل کامسول در این بازه زمانی مشاهده می شود.

۳-۲- نمونه با حاکمیت نیروی موئینه

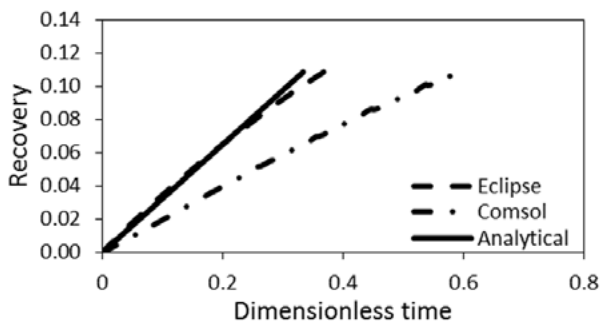
نمونه ای با پارامتر r برابر $2/77$ ، و ضریب برداشت نهایی تحلیلی 33% درصد، نمونه ای است که در آن، نیروهای موئینه حاکم هستند. پارامترهای این نمونه نیز به صورت تصادفی و بر اساس روش مونت کارلو به دست آمده اند. در این نمونه، تراوایی 601 میلی دارسی، تخلخل 29% درصد، اختلاف چگالی نفت و گاز 404 کیلوگرم بر متر مکعب، گرانیوی نفت 10 سانتی پویز، کشش سطحی بین نفت و گاز $9/6$ میلی نیوتون بر متر، ارتفاع بلوک ماتریکس 2 متر، و پارامتر J برابر $0/39$ به دست آمدند. همچنین توان تابع موئینه (ضریب توزیع اندازه حفرات) برابر 2 ، تراوایی نسبی نفت در اشباع حداکثر نفت برابر $0/85$ و توان رابطه تراوایی نسبی نفت برابر 3 در نظر گرفته

گرانیوی نفت 167 سانتی پویز، کشش سطحی بین نفت و گاز 14 میلی نیوتون بر متر، ارتفاع بلوک ماتریکس $10/9$ متر، و پارامتر J برابر $0/24$ به دست آمدند. همچنین توان تابع موئینه (ضریب توزیع اندازه حفرات) برابر 2 ، تراوایی نسبی نفت در اشباع حداکثر نفت برابر $0/43$ و توان رابطه تراوایی نسبی نفت برابر $3/1$ در نظر گرفته شدند. بر اساس این داده ها ارتفاع آستانه برابر $0/15$ متر به دست می آید. در ادامه، ابتدا مقایسه ای از تابع تحلیلی در زمان های اولیه با نتایج کامسول و اکلیپس نشان داده می شود و پس از آن، نمودار کلی به صورت نیمه لگاریتمی نشان داده خواهد شد.

همانطور که در شکل ۲- مشاهده می شود، نتایج اکلیپس و مدل تحلیلی تقریباً مشابه هستند، اما نتایج کامسول تفاوت زیادی با دو مدل دیگر دارد. در زمان اولیه، یعنی قبل از اینکه جبهه نفت به ارتفاع آستانه ی موئینگی برسد، سهم عمده ای از تولید، ناشی از ریزش ستون نفت است و بنابراین، در این بازه، نمودار ضریب بازیافت به صورت خطی با شیب ثابت است. این موضوع به این دلیل اتفاق می افتد که در این بازه زمانی نرخ تولید ثابت است و می توان تخمینی از آن را با استفاده از قانون دارسی به دست آورد. البته اگر بخواهیم به صورت دقیق تر نرخ اولیه ریزش ثقلی را تخمین بزنیم، می توان از رابطه معرفی شده توسط ژو^۴ و بلانت^۵ استفاده کرد که مطابق معادله ۸- است [۴].

$$q = A \frac{K_o}{\mu_o} \frac{L - h_c}{L} \Delta \rho g \quad (8)$$

در این رابطه، L ارتفاع ماتریس و h_c ارتفاع آستانه موئینگی در ماتریس است که اختلاف این دو متغیر برابر پارامتر H خواهد بود. با مقایسه این معادله با معادله های ۱- و ۵ مشخص می شود که پارامتر ضریب برداشت نهایی که بلانت و همکاران از آن برای تصحیح نتایج به علت در نظر گرفتن فرضیات استفاده کرده بودند، در واقع تصحیح دو مورد است. با توجه به اینکه برای ساده سازی عبارت زمان بدون بُعد انتهای زمان اولیه و همچنین عبارت ضریب بازیافت نسبت به زمان در این بازه زمانی، در زمان بدون بُعد معرفی شده، از پارامتر H به جای L در مخرج کسر استفاده شد و همچنین انتگرال اشباع در ارتفاع H به جای ارتفاع کل بلوک محاسبه شد، خطایی در نتایج حاصل شد. رفع این خطا از طریق جابه جایی طول کل بلوک، L ، به جای طول H در عبارت زمان بدون بُعد انجام می شود. اما تصحیح دومی که برای رفع خطای ناشی از در نظر نگرفتن نیروی موئینه است، با توجه به معادله ۸- با در نظر گرفتن ضریبی به صورت نسبت طول موثر H به طول کل بلوک، L ، رفع می شود. البته با توجه به نتایج مشخص در شکل ۲- و بررسی های تحلیلی، پارامتر ضریب بازیافت نهایی نیز تأثیر مشابهی با تأثیر مجموعه این دو اصلاح دارد. شکل ۳- نشان می دهد که نتایج کامسول با مدل تحلیلی اختلاف



۵ | ضریب بازیافت در زمان اولیه نمونه با حاکمیت نیروی موئینه

برداشت نهایی را شبیه‌سازی کند، در حالی که در کامسول مقداری خطا در این زمینه دیده می‌شود که به نظر می‌رسد به دلیل خطای محاسباتی ناشی از روش حل باشد. به جز خطای مشاهده شده در ضریب بازیافت نهایی نتایج کامسول، روند مشابهی بین این نتایج و مدل تحلیلی و اکلیپس مشاهده می‌شود. نتایج مدل تحلیلی و اکلیپس تفاوت اندکی پس از زمان‌های اولیه دارند. از آنجایی که نتایج تحلیلی در زمان اولیه و پس از آن پیوسته نیست و بین آنها نیز اختلاف مشاهده می‌شود، می‌توان دلیل این اختلاف را در این بخش مورد بررسی قرار داد.

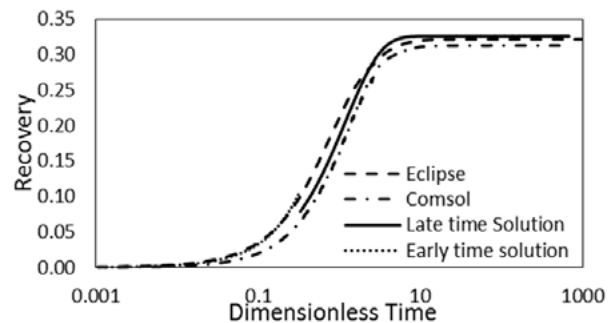
با توجه معادله-۷، از آنجایی که توان تابع به صورت نیمه تجربی و بر اساس نتایج آنالیزهای عددی به دست آمده است، در این بخش مقایسه‌ای بین توان تحلیلی به دست آمده (3tDc) و توان نیمه تجربی انجام می‌شود. همانطور که در معادله-۷ دیده می‌شود، در صورتی که توان تابع را به عنوان یک زمان بدون بُعد جدید در نظر بگیریم، در شرایط و نمونه‌های مختلف در زمان بدون بُعد یکسان نسبت ضریب بازیافت به ضریب بازیافت نهایی یکسان حاصل می‌شود؛ به عبارتی دیگر، نمودار R/R_{∞} بر حسب این زمان بدون بُعد برای همه حالت‌ها یکسان خواهد شد. بنابراین برای بررسی توان‌های تحلیلی و نیمه تجربی می‌توان از این ویژگی استفاده کرد. بدین منظور ۴ نمونه به صورت تصادفی و بر اساس روش مونت کارلو تولید شد، به نحوی که در آن‌ها نیروی مؤثر حاکم باشند؛ پس از آن به وسیله مدل اکلیپس نتایج آنها به دست آمد. از آنجایی که این نمونه‌ها به صورت تصادفی تولید شده‌اند، تمامی پارامترهای آنها با هم تفاوت دارند اما مقدار پارامتر ۲ برای آنها تقریباً یکسان است. سپس زمان رسیدن به ضریب بازیافت برابر ۰/۹ ضریب بازیافت نهایی به دست آمد و بر اساس آن برای هر نمونه توان تحلیلی و نیمه تجربی محاسبه شدند. نتایج این بررسی در شکل-۶ مشاهده می‌شود. در این شکل، برای مشاهده بهتر نتایج و روند تغییرات، داده‌ها بر اساس مقدار عدد بدون بُعد باند رسم شده است. عدد بدون بُعد باند در ریزش ثقلی به صورت معادله-۹ تعریف می‌شود [۵].

$$N_B = \frac{\Delta \rho g L}{\sqrt{\frac{\phi}{k} \sigma}} \quad (9)$$

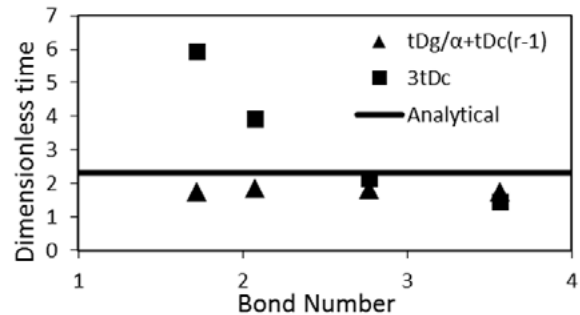
با در نظر گرفتن نسبت ضریب بازیافت ۰/۹ و حل معادله به صورت تحلیلی، توان محاسبه شده باید برای همه نمونه‌ها یکسان و برابر ۲/۳ باشد. همانطور که در شکل-۶ مشخص است، توان تحلیلی در این نسبت ضریب بازیافت تغییرات زیادی بین نمونه‌های مختلف دارد، اما توان نیمه تجربی در نظر گرفته شده تقریباً در همه موارد

شدند. بر اساس این داده‌ها ارتفاع آستانه برابر ۰/۷۲ متر به دست می‌آید. به طور مشابه ابتدا مقایسه‌ای از تابع تحلیلی در زمان‌های اولیه با نتایج کامسول و اکلیپس نشان داده می‌شود و پس از آن، نمودار کلی به صورت نیمه‌لگاریتمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در بخش قبلی گفته شد، در زمان اولیه تمام تولید ناشی از ریزش ستون نفت است و بنابراین، معادله ضریب بازیافت مشابه حالت قبل خواهد بود و تفاوتی بین نمونه‌های با حاکمیت نیروی ثقلی و یا حاکمیت نیروی مؤثر وجود ندارد. این موضوع در شکل-۴ نیز به خوبی مشخص است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل اکلیپس و معادله تحلیلی کاملاً مشابه هستند. نتایج کامسول در این بازه زمانی به طور مشابه بخش قبل دارای خطا می‌باشد.

در این نمونه پس از گذشتن زمان اولیه و رسیدن جبهه نفت به ارتفاع آستانه، نمودار ضریب بازیافت رفتاری نمایی دارد و متفاوت از رفتار نمودار ضریب بازیافت در حالتی است که نیروهای ثقلی حاکم باشند. همان‌طور که در شکل-۵ دیده می‌شود، در این نمونه نیز مشابه نمونه قبل زمان رسیدن جبهه به ارتفاع آستانه در مدل کامسول بیشتر از زمان پیش‌بینی شده توسط مطالعات تحلیلی است. مطالعه انجام شده توسط اکلیپس به خوبی توانسته است که ضریب



شکل ۶ | ضریب بازیافت نمونه با حاکمیت نیروی مؤثر



شکل ۷ | زمان بدون بُعد رسیدن به نسبت ضریب بازیافت ۰/۹ در نمونه‌های مختلف با نیروی حاکم مؤثر

محیط کاربری، می‌تواند گزینه مناسبی برای تحقیق و بررسی باشد اما به دلایل مختلفی از جمله امکان وجود خطا در مدل به دلیل محدودیت‌های مدل‌سازی، امکان همگرا نشدن معادلات و همچنین زمان حل بسیار بالا برای ابعاد بزرگ‌تر نمی‌تواند گزینه مناسبی در صنعت باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یکی از جامع‌ترین مطالعات تحلیلی در زمینه ریزش ثقلی آزاد در کنار مدل‌های عددی کامسول و شبیه‌ساز اکلیپس- نفت سیاه مورد بررسی قرار گرفتند.

۱- معادلات تحلیلی ریزش ثقلی آزاد دارای خطای نسبتاً کمی می‌باشد و می‌توان از آنها با دقت مناسبی برای پیش‌بینی نمودار تولید در مکانیزم ریزش ثقلی آزاد استفاده کرد.

۲- نرم‌افزار کامسول برای تحقیق و بررسی مدل‌های تولید مختلف مناسب می‌باشد، اما نمی‌تواند گزینه مناسبی برای استفاده در صنعت باشد.

۳- تولید نفت در زمان اولیه و قبل از رسیدن جبهه نفت به ارتفاع آستانه با نرخ مشخص و ثابتی انجام می‌شود و در مدت زمان بدون بُعد مشخصی که زمان کوتاهی از کل تولید یک مخزن محسوب می‌شود حدوداً ۳۰ درصد باز یافت نهایی را حاصل می‌کند.

۴- وابسته به اینکه نیروی حاکم بر سیستم چه نیرویی باشد، می‌توان نمودار ضریب باز یافت در نمونه‌های مختلف مشابه را با استفاده از زمان بدون بُعد تعریف شده هم مقیاس کرد و یا به عبارتی، نتایج شرایط مشخصی را با استفاده از نتایج دیگری پیش‌بینی نمود.

یکسان است و می‌توان آن را ثابت فرض کرد؛ اما این مقدار ثابت با مقدار $2/3$ اختلاف داشته و تقریباً برابر $1/8$ به دست آمده است. پژوهش‌های بیشتری برای اصلاح و بهبود مدل تحلیلی موجود نیاز است.

۳-۳- بحث

همان‌طور که مشاهده شد، نتایج تحلیلی بسیار امیدوارکننده بودند و می‌توان از این مدل تحلیلی برای پیش‌بینی نمودار ضریب باز یافت بر اساس زمان بدون بُعد استفاده کرد. البته همان‌طور که گفته شد، با توجه به اینکه این مطالعه کاملاً تحلیلی نبوده و بخشی از پارامترها با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی تعیین شده‌اند، نسبت به نتایج شبیه‌ساز اکلیپس دارای اختلاف می‌باشند. لذا برای کاهش این اختلاف می‌توان تغییراتی در مدل ارائه شده انجام شود.

مدل‌سازی انجام شده توسط کامسول نیز به‌طور کلی روند نمودار ضریب باز یافت را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد، اما این مدل دارای خطا، خصوصاً در زمان اولیه می‌باشد. البته ممکن است با مدل‌سازی پیچیده‌تر توسط نرم‌افزار کامسول این خطا کاهش داده و یا حذف شود. از آنجایی که نرم‌افزار کامسول معادلات را با استفاده از روش‌های مبتنی بر روش المان محدود حل می‌کند، برای مدل‌های دارای جریان سیال دارای خطا خواهد بود و از طرفی ممکن است در شرایط زیادی حل این معادلات همگرا نشده و به نتیجه نرسند. نرم‌افزار کامسول به دلیل داشتن ابزار قوی برای شبیه‌سازی هندسی و همچنین آنالیز نتایج پس از حل معادلات و همچنین ساده بودن

پانویس‌ها

- | | | |
|----------------|----------------|--------|
| 1. Power-law | 4. Zhou | 7. FEM |
| 2. Exponential | 5. Blunt | |
| 3. Corey | 6. Bond number | |

منابع

- [1] Di Donato, Ginevra, Zohreh Tavassoli, and Martin J. Blunt. "Analytical and numerical analysis of oil recovery by gravity drainage." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 54, no. 1 (2006): 55-69.
- [2] Li, Kewen, and Roland N. Horne. "Modeling of oil production by gravity drainage." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 60, no. 3 (2008): 161-169.
- [3] Saedi, Benyamin, Shahab Ayatollahi, and Mohsen Masihi. "Free fall and controlled gravity drainage processes in fractured porous media: Laboratory and modelling investigation." *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 93, no. 12 (2015): 2286-2297.
- [4] Zhou, Dengen, and Martin Blunt. "Wettability effects in three-phase gravity drainage." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 20, no. 3 (1998): 203-211.
- [5] Adibhatla, Bhargaw, and Kishore K. Mohanty. "Oil recovery from fractured carbonates by surfactant-aided gravity drainage: laboratory experiments and mechanistic simulations." *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 11, no. 1 (2008): 119-130.