

بررسی اثر نرخ تخلیه و ترشوندگی بر مکانیزم ریزش ثقلی در تولید از مخازن شکاف دار طبیعی

مریم حسن زاده، رضا آذین^{۱*}، روح اله فاتحی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر^۲، سهراب زنده بودی، دانشگاه مموریال نیوفاندلند، کانادا^۳

چکیده

با توجه به اینکه بسیاری از مخازن هیدروکربنی ایران از نوع شکاف دار هستند، بررسی مکانیزم های تولید از اینگونه مخازن حائز اهمیت است. تخلیه طبیعی نفت از مخازن هیدروکربنی به سطح تحت مکانیزم ریزش ثقلی در مخازن شکاف دار طبیعی از ضریب بازیافت بالایی برخوردار است. در این مقاله، مطالعات انجام شده در زمینه تولید از مخازن شکاف دار تحت مکانیزم ریزش ثقلی مرور گردیده و اثر پارامترهای مختلف همچون نرخ-تخلیه و ترشوندگی محیط متخلخل بر بازیافت نهایی نفت بررسی شده است. مطالعات انجام شده نشان می دهند که محیط های نفت دوست^۳ قابلیت بازیافت بیشتری در مرحله سوم^۳ تولید خواهند داشت. همچنین بررسی های انجام شده نشان می دهد به دلیل هجوم گاز^۴ ناشی از افزایش نامناسب نرخ تخلیه نفت، میزان بازیافت نفت کاهش می یابد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۲/۰۸

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۶/۰۷

واژگان کلیدی:

مخازن شکاف دار طبیعی، مکانیزم ریزش ثقلی، بازیافت نفت، ترشوندگی، نرخ تخلیه

مقدمه

مخازن شکاف دار طبیعی^۵ از دیدگاه زمین شناسی به مخازنی گفته می شود که دارای ناپیوستگی ساختاری هستند و از دیدگاه مهندسی مخزن به مخازنی اطلاق می شود که دارای ناپیوستگی ساختاری هستند که بر جریان سیال مؤثرند. تولید از مخازن شکاف دار با پیچیدگی ها و عدم قطعیت های بالایی همراه است. مشخصه سازی^۶، مدل سازی و شبیه سازی این مخازن همواره با چالش هایی روبرو بوده است، به طوری که علاوه بر تعیین خصوصیات شکاف و ماتریکس به تنهایی، لازم است ارتباط بین ماتریکس و شکاف نیز به خوبی تعیین و بررسی شود. حدود ۲۷ درصد مخازن جهان و ۷۰ درصد مخازن نفتی ایران از نوع شکاف دار هستند. دسته بندی های مختلفی برای مخازن شکاف دار طبیعی وجود دارد. بر اساس تحقیقات انجام شده بر روی ۱۰۰ میدان هیدروکربنی، ون گلف^۷ مخازن شکاف دار را به ۴ دسته تقسیم کرده است:

۱. مخازنی که در آنها ماتریکس تخلخل و تراوایی پایینی دارد. شکاف ها ظرفیت ذخیره^۸ و مسیر عبور جریان را فراهم می کنند.
 ۲. مخازنی که در آنها ماتریکس تخلخل و تراوایی پایینی دارد. ماتریکس ظرفیت ذخیره و شکاف ها مسیر عبور جریان را فراهم می کنند.
 ۳. در نوع سوم که به میکرو متخلخل^۹ ها هم معروف هستند، ماتریکس دارای تخلخل بالا و تراوایی پایینی می باشد. ماتریکس ظرفیت ذخیره و شکاف مسیر عبور جریان را فراهم می کند.
 ۴. در این دسته از مخازن، ماتریکس تخلخل و تراوایی بالایی دارد. همچنین ظرفیت ذخیره و مسیر عبور جریان توسط ماتریکس فراهم می گردد.
- مکانیزم تولید در مخازن نوع دوم و سوم تقریباً یکسان بوده و بیشتر مخازن ایران از نوع سوم می باشند. در نظر گرفتن میزان مشارکت بین ماتریکس و شکاف در تولید و جریان سیال از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا تخلخل ماتریکس و تراوایی شکاف نقش های متفاوتی در فراهم کردن ذخیره سازی سیال و مسیر جریان سیال برعهده دارند.

۱- ریزش ثقلی در مخازن شکاف دار طبیعی

در انتقال سیال از ماتریکس به شکاف می توان به مکانیزم های انبساط سنگ و سیال، گرانش، موئینگی، نیروی ویسکوز و نفوذ اشاره کرد. در فشارهای زیر فشار نقطه حباب، انبساط^{۱۰} یک مکانیزم انتقال مؤثر می باشد. نیروهای گراویتی تمایل دارند نفت را از ماتریکس خارج کنند. به عبارتی نیروهای گراویتی، نیروهای مؤثر تولید بوده و عامل حرکت سیال از ماتریکس به شکاف می باشند، در حالی که نیروهای موئینگی نیروهای مقاوم تولید بوده و تمایل دارند نفت را درون حفره های محیط متخلخل نگه دارند. نفوذ گاهی دارای اثر مثبت بر انتقال سیال از ماتریکس به شکاف است. مطالعات انجام شده در سال های اخیر نشان داده است که سیلاب زنی در بسیاری از مخازن به خصوص در محیط های شکاف دار آب دوست^{۱۱} بسیار مؤثر بوده و باعث افزایش ضریب بازیافت مطلوب می شود. اما، حتی بعد از فرآیند سیلاب زنی حدود دو تریلیون بشکه نفت در مخازن جهان بصورت غیرقابل تولید باقی می ماند. این مقدار قابل توجه نفت را می توان از طریق روش های مختلفی از جمله تزریق گاز به طور مؤثری بازیافت کرد. در بین روش های متفاوت تزریق گاز به مخازن هیدروکربنی، اثر تزریق غیرامتراجی گاز خنثی در مخازنی با مکانیزم تولید ریزش ثقلی گاز-نفت چشمگیرتر است. مطالعات حاکی از آن است که ریزش ثقلی یک مکانیزم بازیافت مهم در تولید نفت از مخازن شکاف دار و بدون شکاف می باشد. تراوایی عمودی خوب و گرانیروی پایین سیال، ضریب بازیافت بالایی در این فرآیند ایجاد می کند. بازیافت حدود ۸۵ تا ۹۵ درصدی نفت اولیه درجا توسط مکانیزم ریزش ثقلی در میدان گزارش شده است. این میزان بازیافت بالای نفت، ناشی از اختلاف چگالی بین نفت و گاز درون ماتریکس و شکاف است. در واقع، دو عامل اصلی در نرخ تخلیه کلی، اختلاف چگالی بین گاز و مایع، و اختلاف ارتفاع بین سطح تماس گاز-مایع در ماتریکس و شکاف هاست. به طور کلی،

* نویسنده ی عهده دار مکاتبات (razinpgu@gmail.com)

نفتی و کلاهک گازی است تولید نفت اتفاق بیفتد به آن ریزش ثقلی کنترل می گویند. تعامل بین نیروهای موئینگی، گراویتی و ویسکوز بر مکانیزم تولید این فرآیند مؤثر است.

مفهوم ریزش ثقلی آزاد را برای اولین بار کاردول و پارسنر^{۲۴} در سال ۱۹۴۹ مطرح و نظریه‌ای برای تخمین نرخ ریزش ثقلی مایع خارج شده از یک ستون ماسه‌ای ارائه کردند. بعد از آن در سال ۱۹۵۵ بریکس^{۲۵} ریزش-ثقلی اجباری را برای چند مورد خاص مطرح کرد.

۲. اثر نرخ تخلیه در مکانیزم ریزش ثقلی

یکی از مهمترین پارامترها در فرآیند بازیافت نفت، تعیین نرخ بهینه تولید است. ترویلیگر^{۲۶} و همکاران در سال ۱۹۵۱ مکانیزم ریزش ثقلی را بررسی کردند و با ارائه روشی به پیش‌بینی صحیحی از عملکرد سیستم ریزش ثقلی دست یافتند. براساس نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که بازیافت نفت در یک محیط همگن با هجوم گاز، با نرخ تخلیه نسبت عکس دارد [۳]. با تیر^{۲۷} در سال ۱۹۹۲ به مطالعه مکانیزم ریزش ثقلی در چاه‌های افقی و اثرات نرخ تولید پرداخت. در سال ۱۹۹۳ کتریس^{۲۸} و آیت‌اللهی اثر نرخ تولید بر بازده بازیافت نفت را بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در نرخ‌های بالای تولید، بازیافت نهایی قبل و بعد از هجوم گاز بهتر و یا یکسان با بازیافت در نرخ‌های پایین تولید است. همچنین بازیافت نفت در هجوم گاز رابطه خوبی با عدد گراویتی داشت [۴]. ریاضی و همکاران در سال ۲۰۰۶ طی مطالعات خود نرخ بحرانی تزریق گاز برای رسیدن به بیشترین بازیافت در یک سنگ کربناته را ارائه کردند [۵].

زنده‌بودی و همکاران در سال ۲۰۰۸ آزمایشاتی با استفاده از یک مدل غیرقابل انعطاف بسته به شکل مکعب مستطیل که دارای دو شکاف در اطراف مدل بود انجام دادند. آنالیز حساسیت به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف نظیر بازشدگی شکاف، ارتفاع و تراوایی ماتریکس و ویسکوزیته سیال بر نرخ تخلیه سیال انجام شد. نتایج نشان داد که نرخ جریان سیال از ماتریکس به شکاف متناسب با اختلاف ارتفاع سیال در ماتریکس و شکاف می‌باشد. همچنین بازیافت نهایی را می‌توان با استفاده از اعداد بدون بعدی همچون عدد بوند^{۲۹} و زمان بدون بُعد اصلاح کرد. عدد بوند و زمان بدون بُعد استفاده شده در رابطه-۱ و ۲ نشان داده شده‌اند [۶].

$$B_o = \frac{k\Delta\rho g}{\sigma_{gl}} \quad (1)$$

$$t_D = \frac{k_m \Delta\rho g t}{\mu_{gl}} \quad (2)$$

پس از آن زنده‌بودی و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی رفتار سیال در سطح تماس گاز-مایع و عملکرد بازیافت^{۳۰} پرداخته و دو مفهوم جدید به نام نرخ پمپاژ^{۳۱} بحرانی و بیشترین نرخ تخلیه ممکن^{۳۲} را مطرح کردند. نرخ پمپاژ بحرانی نرخ تخلیه‌ای است که در آن، اختلاف ارتفاع سطح

در طی فرآیند ریزش ثقلی، اختلاف چگالی بین سیالات، میزان مقاومت نیروهای موئینگی در برابر نیروهای رانش ثقلی، نرخ جابجایی و ارتفاع عمودی ناحیه مورد هجوم گاز درون شکاف‌ها، پارامترهای اساسی حرکت سیال می‌باشند که اثر آنها به ترشوندگی سنگ و میزان تماس و پخش شدگی^{۳۲} سیال روی سنگ بستگی دارد. پیوستگی موئینگی یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر بر فرآیند ریزش ثقلی است. بازیافت نفت تحت مکانیزم ریزش ثقلی در مخازن شکاف دار به شدت وابسته به ارتفاع کلی پیوستگی موئینگی^{۳۳} می‌باشد. با توجه به ناپیوستگی بلوک‌های ماتریکس، می‌توان فشار موئینگی شکاف را صفر فرض نمود، اما مورد قابل اطمینانی مبنی بر عدم وجود فشار موئینگی در شکاف وجود ندارد و نمی‌توان به طور قطع میزان آن را در شکاف صفر در نظر گرفت.

برای اولین بار کارلسون^{۳۴} در سال ۱۹۸۸ بازیافت نفت به دام افتاده بعد از فرآیند سیلاب‌زنی در میدان هاو کینز^{۳۵} را مطرح کرد. در همان سال کانتزاس^{۳۶} و همکاران بر روی یک محیط ناپیوسته آزمایش‌های ریزش ثقلی انجام دادند و بیشترین بازیافت نفت، با بازیافت ۹۹ درصدی نفت اولیه درجا را گزارش کردند. کتریس^{۳۷} و همکاران نیز با طراحی آزمایش‌های ریزش ثقلی، بیان کردند که ریزش ثقلی نقش مؤثر در تزریق گاز^{۳۸} دارد. این فرآیند، ریزش ثقلی همراه با تزریق گاز نامیده شد. به طور مشابه، در سال ۱۹۹۰ داوگو^{۳۹} بازیافت ۹۴ درصدی نفت اولیه درجا را در میدان وستیم^{۴۰} گزارش کردند. تولید از مخازن شکاف دار تحت مکانیزم ریزش ثقلی توسط دو نیروی گراویتی و موئینگی کنترل می‌شود. این باور وجود دارد که تزریق گاز در تولید براساس مکانیزم ریزش ثقلی در مخازن شکاف دار یکی از مؤثرترین روش‌های بازیافت در جابه‌جایی عمودی نفت است [۱].

براساس مکانیزم‌های تولید، ریزش ثقلی همراه با تزریق گاز به سه دسته تقسیم می‌شود [۲]:

۱. ریزش ثقلی آزاد^{۴۱}: زمانی که تنها نیروی رانشی موجود در مخزن، نیروی گرانش باشد و هیچ نیروی خارجی دیگری وجود نداشته باشد، فرآیند جابه‌جایی، ریزش ثقلی آزاد نامیده می‌شود. در این فرآیند تنها در صورتی که نیروی گراویتی بیشتر از نیروی موئینگی باشد، امکان تولید نفت وجود دارد. گاز به صورت خودبه‌خودی وارد بلوک می‌شود و نفت از پایین بلوک تولید می‌گردد. اشباع آب همزاد، تراوایی نسبی نفت و فشار موئینگی ماتریکس، فاکتورهای مؤثری هستند که نرخ بازیافت و میزان بازیافت نهایی نفت را در این فرآیند کنترل می‌کنند.

۲. ریزش ثقلی اجباری^{۴۲}: در این فرآیند گاز از بالای بلوک به مدل تزریق می‌شود. جابه‌جایی نفت توسط گاز به مقدار نسبی نیروهای ویسکوز و گراویتی با در نظر گرفتن نیروی موئینگی بستگی دارد. در واقع، در ریزش ثقلی، نیروی موئینگی یک نیروی مقاوم و نیروی گراویتی یک نیروی رانشی است.

۳. ریزش ثقلی کنترل^{۴۳}: اگر با نرخ تخلیه ثابت از مخزنی که دارای ناحیه

ترشوندگی را بر روی پارامترهای مختلفی همچون: فشار موئینگی، تراوایی نسبی، اشباع اولیه آب، اشباع باقی مانده نفت، بازیافت نفت و خواص الکتریکی سنگ مخزن بررسی کرده‌اند. تعداد زیادی از پژوهشگران نیز، امکان تغییر ترشوندگی به منظور افزایش قابلیت تحویل دهی نفت و گاز و در نتیجه بهبود بازیافت را بررسی کرده‌اند.

پژوهشگران مختلفی اثر ترشوندگی در مکانیزم ریزش ثقلی را مطالعه نمودند. گراتونی^{۳۶} و همکاران در سال ۲۰۰۱ به بررسی آزمایشگاهی نفوذ گاز در شرایط ریزش ثقلی پرداختند و اثرات ترشوندگی و اشباع آب را در جریان سه فازی بررسی کردند [۷]. شهیدزاده و همکاران در سال ۲۰۰۳ به منظور بررسی اثر ترشوندگی بر جریان در محیط متخلخل، آزمایش‌هایی طراحی کردند. اثر ترشوندگی بر روی تخلیه از محیط متخلخل بررسی شد و نتایج نشان داد که بازیافت در ترشوندگی جزئی^{۳۷} بیشتر از ترشوندگی کامل است [۸].

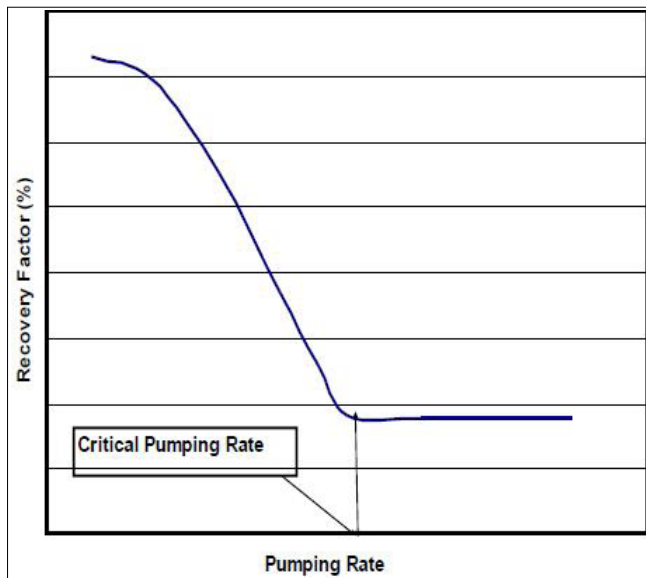
در صورتی که محیط متخلخل آب دوست باشد، سنگ توسط فیلمی از آب پوشیده می‌شود. در این حالت زاویه تماس بین نفت و گاز، پارامتر مهمی است. پژوهشگران مختلفی با بررسی محیط‌هایی که در آنها مکانیزم تخلیه غالب بوده است، بر اهمیت رفتار جریان فیلم تأکید کرده‌اند. با مقایسه مشاهدات تجربی می‌توان دریافت که در یک محیط متخلخل همگن، بازیافت نفت باقیمانده بعد از فرآیند سیلاب زنی توسط مکانیزم ریزش ثقلی در محیط نفت دوست و آب دوست تفاوت چندانی نداشته و نتیجه یکسانی حاصل می‌شود. دلیل این پدیده تغییرات یکسان در اشباع باقیمانده با نفوذ گاز به درون محیط متخلخل و غالب بودن مکانیزم جریان فیلم می‌باشد. در حالی که آزمایش‌های تجربی برتری محیط نفت دوست را در محیط‌های شکاف دار ناپیوسته نشان می‌دهند. نبی پور و همکاران

تماس گاز-نفت، بین ماتریکس و شکاف‌ها ثابت می‌ماند و با افزایش نرخ تخلیه به مقادیر بالاتر از نرخ پمپاژ بحرانی، تغییری در این اختلاف ارتفاع مشاهده نمی‌شود. شماتیکی از نرخ پمپاژ بحرانی در شکل‌های ۱- و ۲ نشان داده شده است.

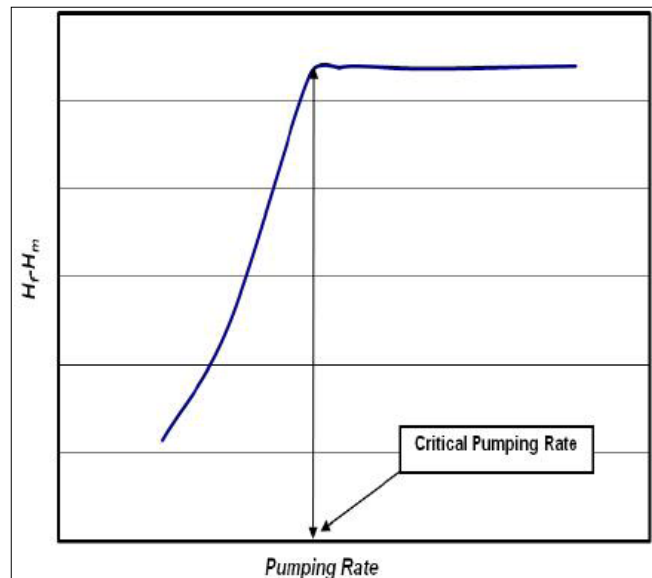
بیشترین نرخ تخلیه ممکن به خواص پتروفیزیکی ماتریکس و شکاف، ابعاد مدل و خواص سیالات استفاده شده بستگی دارد. در واقع، بعد از رسیدن به بیشترین نرخ تخلیه ممکن، دیگر امکان افزایش نرخ تخلیه وجود ندارد. در این بررسی بر روی پارامترهایی چون میزان بازشدگی شکاف^{۳۸}، ارتفاع ماتریکس، تراوایی، گرانروی و بازه‌ی چاه نسبت به نرخ پمپاژ بحرانی، بیشترین نرخ برداشت ممکن و سطح تماس گاز نفت برای ماتریکس و شکاف آنالیز حساسیت انجام شد. نتایج نشان داد که در طول آزمایش‌های ریزش ثقلی کنترل‌لی، اگر نرخ تخلیه ثابت بماند نرخ انتقال سیال بین ماتریکس و شکاف نیز تغییری نخواهد کرد. علاوه بر نرخ انتقال سیال بین ماتریکس و شکاف، رژیم‌های جریان سیال، فشار و جابجایی سطح تماس گاز-سیال در ماتریکس و شکاف نیز به نرخ پمپاژ بستگی دارد [۲].

۳- اثر ترشوندگی^{۳۹} در مکانیزم ریزش ثقلی

ترشوندگی از مهمترین خواص کنترل کننده توزیع و جابه‌جایی سیالات در یک محیط متخلخل بوده و اهمیت آن در تولید نفت به طور مکرر بیان شده است. فاز ترکننده تمایل دارد که درون حفره‌ها و گلوگاه‌های ریز باقی بماند و به همین خاطر جابه‌جایی این فاز به دلیل وجود مسیرهای باریک و مقاوم در برابر جریان، سخت و دشوار است. مطالعات بسیاری اثر



شکل ۱ | شماتیکی از رابطه بین نرخ تزریق بحرانی و میزان بازیافت قبل از میان‌شکن گاز در تولید در طول فرآیند ریزش ثقلی کنترل‌لی [۲]



شکل ۲ | شماتیکی از رابطه بین نرخ پمپاژ بحرانی و اختلاف ارتفاع بین سطح تماس گاز-نفت در ماتریکس و شکاف [۲]

و محیط متخلخل همگن در طول شرایط ریزش ثقلی آزاد و ریزش ثقلی کنترل‌ی پرداختند. سیالات آزمایش، در شرایط کاملاً آب‌دوست، کاملاً نفت‌دوست و ترشوندگی کسری بررسی شدند. نتایج نشان داد که خصوصیات فیزیکی سیالات آزمایش و ترشوندگی کسری محیط متخلخل، مکانیزم بازیافت سیال را در طول فرآیندهای ریزش ثقلی آزاد و ریزش ثقلی کنترل‌ی، کنترل می‌کند. نرخ تولید نفت بوسیله جریان فیلم^{۴۳} سیال، زمانی که محیط متخلخل به صورت تصادفی (رندوم) مخلوطی از نفت دوست و آب دوست باشند، به صورت قابل توجهی تحت تاثیر ترکیب محیط متخلخل است. زمانی که جریان فیلم، مکانیزم بازیافت غالب باشد، آستانه نفوذ^{۴۴} در حالت نفت دوست، حدود ۶۳ درصد به دست آمده و بعد از آن هیچ افزایشی در اندازه نرخ تولید مشاهده نمی‌شود. در شرایط آب‌دوست، حالت مطلوب بازیافت نفت در هر دو فرآیند ریزش ثقلی آزاد و کنترل‌ی بود و در شرایط نفت دوست، نرخ جریان و حرکت فیلم سیال و نرخ انتقال سیال از ماتریکس به شکاف بزرگتری ایجاد می‌کرد[۱۴].

کتزیز و آیت‌اللهی مکانیزم ریزش ثقلی همراه با تزریق گاز خنثی^{۴۵} را مطالعه کردند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در محیط متخلخل آب‌دوست با ضریب پخش شدگی مثبت، بازده تولید نفت ۸۰ درصد یا بیشتر از ۸۰ درصد نفت در جا در شرایط پس از سیلاب زنی بوده است. همچنین آنها به توسعه مدل ریاضی فرآیند ریزش ثقلی همراه با تزریق گاز-خنثی پرداختند که می‌تواند برای پیش‌بینی میزان تولید و پروفایل اشباع نفت برای محیط‌های متخلخل همگن با تراوایی مختلف در فرآیند ریزش ثقلی قابل استفاده می‌باشد[۱۵].

معروفی و همکاران در سال ۲۰۱۱ در یک مدل آزمایشگاهی به بررسی بازیافت بهینه نفت در طول فرآیند ریزش ثقلی کنترل‌ی پرداختند و اثر ترشوندگی ماتریکس بر نرخ بهینه تولید نفت را در شرایط شدیداً آب‌دوست، شدیداً نفت دوست، ترشوندگی کسری و ترشوندگی مخلوط بررسی کردند. نتایج نشان داد که در ترشوندگی کسری، در نرخ‌های پایین و متوسط تولید نفت، بیشترین بازیافت ثالثیه نفت در هجوم گاز اتفاق می‌افتد. همچنین اثر نرخ تولید نفت بر جابه‌جایی عمودی سطح گاز-نفت در ماتریکس و شکاف، و ارتفاع موئینگی نفت بررسی شد. علاوه بر این مشاهده شد که نیروهای گراویتی در نرخ‌های پایین تولید نیروهای غالب هستند[۱۶].

مطالعات دیگری نیز بر روی مکانیزم ریزش ثقلی در مخازن شکاف دار انجام شده است. زنده‌بودی و همکاران یک مدل دو بعدی برای شبیه‌سازی عددی حرکت سطح تماس گاز-نفت و نرخ بازیافت نفت در شرایط یکسان با آزمایش‌های انجام شده، طراحی کردند. بازیافت نهایی سیال با اعداد بدون بعدی همچون عدد بوند همبستگی داشت. مدل ارائه شده برای پیش‌بینی نرخ انتقال مایع بین ماتریکس-شکاف در طول فرآیند ریزش ثقلی آزاد استفاده شد. نتایج نشان داد که نرخ انتقال مایع بین ماتریکس-شکاف

به بررسی مکانیزم ریزش ثقلی گاز نفت همراه با گرما^{۴۸} در یک مدل شکاف دار آزمایشگاهی پرداختند و از جمله نتایجی که از آزمایش‌های آنها حاصل شد می‌توان به بازیافت بیشتر نفت در مکانیزم ریزش ثقلی گاز-نفت ثالثیه از محیط نفت دوست اشاره کرد[۹]. پایدان و رائو^{۴۹} به ارزیابی اثر ترشوندگی در یک محیط متخلخل دارای شکاف عمودی در مکانیزم ریزش ثقلی همراه با تزریق گاز پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در محیط نفت دوست بازیافت نفت افزایش می‌یابد[۱۰].

هاگن^{۴۰} و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی اثر ترشوندگی و نقش شکاف‌ها بر بازیافت نفت پرداختند و تغییرات در میزان بازیافت نفت با تغییر ترشوندگی را در هر دو مدل شکاف دار و بدون شکاف مشاهده کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در طول فرآیند سیلاب زنی چگونه شکاف‌ها الگوهای جابه‌جایی سیال را بسته به ترشوندگی ماتریکس تعیین می‌کنند. در شرایط آب‌دوست شدید، شکاف‌ها اثر ناچیزی در بازیافت نهایی داشتند اما به‌طور قابل توجه بر روی تغییرات جبهه آب اثرگذار بودند. در شرایط نفت دوست، آشام موئینگی آب از شکاف به ماتریکس کاهش یافته و شکاف نقش مهمی در بازیافت نهایی و زمان هجوم آب داشت[۱۱].

وجود مخازنی با ترشوندگی یکنواخت هنوز مورد بحث می‌باشد و ترشوندگی ناهمگن در سنگ مخازن هیدروکربنی طبیعی بیشتر رخ می‌دهد. بنابراین بررسی بازیافت نفت در محیط‌های همگن با ترشوندگی یکنواخت برای توصیف بازیافت نفت توسط مکانیزم ریزش ثقلی کافی نیست. آزمایش‌های ژو و بلانت^{۴۱} در سال ۱۹۹۸ نشان داد که در یک مخلوط ماسه‌ای با ترشوندگی مخلوط، با افزایش نسبت ماسه‌های نفت دوست، اشباع نفت باقی مانده بعد از تزریق گاز ثانویه نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد[۱۲].

رضاوایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی آزمایشگاهی ریزش ثقلی گاز-نفت در مخازن شکاف دار در ترشوندگی‌های مختلف پرداختند. در مخازنی که تحت مکانیزم رانش آب قرار گرفتند، مکانیزم ریزش ثقلی گاز نفت به عنوان بازیافت ثالثیه^{۴۲} نفت عمل می‌کند. نتایج این مطالعه نشان داد که بازده جریان نفت در ریزش-ثقلی ثالثیه به میزان اشباع نفت باقیمانده از سیلاب زنی قبلی و ترشوندگی محیط متخلخل بستگی دارد، همچنین هرچه میزان اشباع نفت باقیمانده، بعد از فرآیند سیلاب زنی در محیط متخلخل بیشتر باشد، میزان بازیافت نفت، تحت مکانیزم ریزش ثقلی گاز نفت ثالثیه بیشتر است. در این پژوهش، عدد بدون بعد زمان که توسط هاگورت در سال ۱۹۸۰ ارائه شده بود جهت تغییر مقیاس اطلاعات آزمایشگاهی بازیافت نفت توسط ریزش ثقلی ثالثیه استفاده شد. رابطه زیر نشان‌دهنده زمان بدون بعد هاگورت است[۱۳]:

$$t_D = \frac{k\Delta\rho_{og}gt}{\mu_o\phi(1-S_{wc}-S_{org})^2} \quad (3)$$

زنده‌بودی و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی اثر ترشوندگی بر شکاف

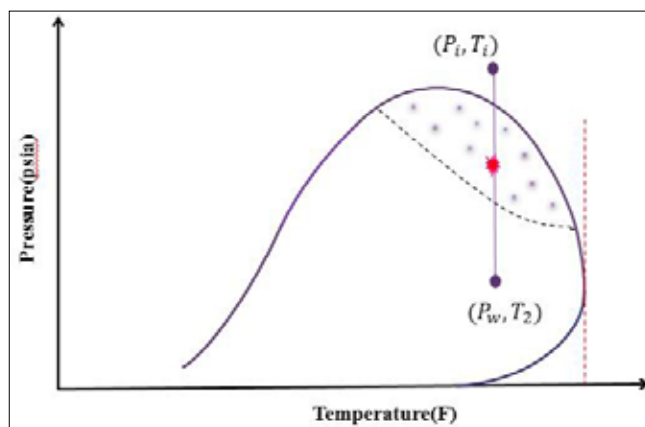
با سطح ارتفاع سیال در ماتریکس و شکاف متناسب است [۱۷]. زنده بودی و همکاران در سال ۲۰۱۱ جابه‌جایی غیرامتزاجی در محیط متخلخل شکاف دار تحت مکانیزم ریزش-ثقلی کنترلی را بررسی کردند. تحلیل‌های ابعادی براساس فرآیند ریزش ثقلی کنترلی و نتایج آزمایشگاهی انجام شد. با استفاده از تئوری پای باکینگ‌هام^{۴۶} گروه‌های ابعادی سیستم یافت شد و مدلی تجربی براساس این گروه اعداد برای بررسی فرآیند ریزش ثقلی در محیط‌های متخلخل شکاف دار ارائه شد. نتایج، پیش‌بینی قابل قبول مدل از سیستم تخلیه گاز-نفت را نشان داد [۱۸].

معروفی و همکاران در سال ۲۰۱۳ اثر تراوایی، نرخ تولید و خواص نفت را بر بازده بازیافت نفت در طول فرآیندهای ریزش ثقلی کنترلی و ریزش ثقلی آزاد با استفاده از یک هندسه استوانه‌ای احاطه شده با شکاف بررسی کردند. در طول فرآیند بازیافت ثانویه، کاهش تراوایی و افزایش ویسکوزیته نفت سبب کاهش بازده بازیافت در تمامی نرخ‌های تولید شد، در حالی که همین پدیده سبب افزایش تولید نفت برای همه نرخ‌های تولید در بازیافت ثالثیه گردید [۱].

میری و همکاران ریزش ثقلی همراه با تزریق گاز را با در نظر گرفتن اثر رسوب آسفالتین بررسی کردند. آزمایشات در دما و فشار بالا (۳۷-۱۵ MPa و ۱۰۲°C) و با استفاده سیالات واقعی مخزن و سنگ کربناته انجام شدند. با فشار ۲۸،۳ MPa و حجم گاز تزریقی ۱،۲ PV، برای یک مغزه نسبتاً بلند در شرایط جابه‌جایی امتزاج‌ناپذیر، بازیافت نهایی ۵۲ درصد نفت اولیه درجا مشاهده شد. در تمامی آزمایشات کاهش قابل توجه‌ای در تراوایی مشاهده نشد و رسوب آسفالتین کمتر از ۲ درصد وزنی نفت اولیه بود. همچنین یک شبیه‌ساز عددی گاز-نفت برای بررسی بازیافت نهایی ارائه شد. تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی مشاهده شد و میزان خطا کمتر از ۵ درصد بود [۱۹].

۴- ریزش ثقلی در مخازن گازمیعانی

به مخازنی که دمای آنها بین دمای بحرانی و نقطه حداکثر دماست،



شکل ۳ | نمودار فازی سیال گازمیعانی

مخازن گازمیعانی می‌گویند. با کاهش فشار به زیر نقطه شبنم کاهش چشم‌گیری در تولید بسیاری از چاه‌های تولیدی مخازن گاز میعانی مشاهده می‌شود. این مخازن به دلیل جریان هم‌زمان فاز گاز و مایع رفتار پیچیده‌ای دارند. در واقع با کاهش فشار به زیر نقطه شبنم، سیال میعانی در حفره‌ها تولید می‌گردد. ایجاد میعانات هیدروکربنی در اطراف دهانه چاه سبب کاهش تراوایی نسبی گاز و همچنین کاهش تولید گاز می‌گردد. به دلیل اینکه میعانات از ترکیبات با ارزش و سنگین موجود در سیال گاز میعانی ایجاد می‌شوند، تشکیل آنها در اطراف چاه از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست. بنابراین در مخازن گاز میعانی ارائه راهکاری که بتواند شرایط تولید میعانات در سطح را ایجاد نماید، از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل-۳ نمودار فازی سیال گازمیعانی را نشان می‌دهد.

برخلاف مخازن نفتی، تاکنون مقالات کمی در رابطه با مکانیزم‌های بازیافت میعانات در مخازن شکاف دار گاز-میعانی منتشر شده است. ریزش ثقلی، نفوذ مولکولی، تراکم‌پذیری، نیروهای موئینه و ویسکوز از جمله مکانیزم‌های تولیدی مهمی هستند که باید در تولید و ازدیادبرداشت از مخازن شکاف دار گازمیعانی مورد توجه قرار گیرند. در سال ۱۹۸۱ کستیلنز^{۴۸} یک مدل ترکیبی^{۴۹} برای محاسبه میعانات قابل بازیافت با استفاده از مکانیزم ریزش ثقلی ارائه کرد. این مدل، بر روی یکی از مخازن نیجریه اعمال شد و نتایج نشان داد که ریزش ثقلی یکی از پارامترهای مهم در بازیافت میعانات است [۲۰]. بعد از آن در سال ۱۹۸۴ کستیلنز و هاگورت^{۵۰} به بررسی رفتار جریان میعانات برگشت‌پذیر در مخازن شکاف دار گازمیعانی و همچنین امکان بازیافت میعانات با استفاده از فرآیند ریزش ثقلی پرداختند. آنالیزهایی بر روی مخزن واترتون^{۵۱} واقع در آلبرتا انجام شد. نتایج نشان داد که بازیافت میعانات با استفاده از تزریق گاز به خصوص گاز غنی یا گاز نیتروژن به طور قابل توجه سبب افزایش بازیافت میعانات می‌گردد [۲۱].

نتیجه‌گیری

با بررسی مطالعات انجام شده بر روی مکانیزم ریزش ثقلی و عوامل مؤثر بر آن در بازیافت نفت از مخازن شکاف دار طبیعی مشاهده شد که خصوصیات محیط متخلخل و سیالات درگیر، اصلی‌ترین عوامل در بازیافت نهایی هستند. مطالعات حاکی از آن است که در محیط‌های آب‌دوست، بازیافت ثانویه نفت بازده بالاتری دارد، در صورتی که در بازیافت ثالثیه محیط‌های نفت‌دوست دارای بازیافت نفت بیشتری هستند. هر چه میزان اشباع نفت باقیمانده بیشتر باشد بازیافت ثالثیه نفت بیشتر است. بررسی مطالعات انجام شده بر روی اثر نرخ تخلیه در مکانیزم ریزش ثقلی نشان داد که در هجوم گاز با افزایش نرخ تخلیه، بازیافت نفت کاهش می‌یابد. همچنین هر چه اختلاف ارتفاع سیال در ماتریکس و شکاف بیشتر باشد، نرخ جریان سیال از ماتریکس به شکاف بیشتر بوده و میزان نفت تولیدی بیشتر است. ■

پانویس‌ها

- | | | |
|-----------------------------------|--|--|
| 1. Recovery factor | 18. Gas-assisted gravity drainage | 35. wettability |
| 2. Oil wet | 19. Da and Guo | 36. Grattoni |
| 3. Tertiary recovery | 20. Westpem | 37. Partial wetting |
| 4. Gas breakthrough | 21. Free fall gravity drainage(FFGD) | 38. Thermally assisted- gas-oil gravity drainage |
| 5. Naturally fractured reservoirs | 22. Forced gravity drainage(FGD) | 39. Paidin and Rao |
| 6. Characterization | 23. Control gravity drainage(CGD) | 40. Haugen |
| 7. Van Golf | 24. Cardwell and Parsons | 41. Zhou and Blunt |
| 8. Storage capacity | 25. Briks | 42. Tertiary recovery |
| 9. Micro porous | 26. Terwilliger | 43. Film flow |
| 10. expansion | 27. Butler | 44. Percolation threshold |
| 11. Water wet | 28. Chatzis | 45. Gravity assisted inert gas injection(GAIGI) |
| 12. Spreading phenomena | 29. Bond number | 46. Buckingham π theorem |
| 13. Capillary continuity | 30. Recovery performance | 47. Cricondentherm |
| 14. Carlson | 31. Critical Pumping Rate(CPR) | 78. Castelijns |
| 15. Hawkins | 32. Maximum Possible Withdrawal Rate(MPWR) | 49. Compositional |
| 16. Kantzas | 33. Fracture aperture | 50. Hagoort |
| 17. Chatzis | 34. Well spacing | 51. Waterton |

منابع

- [1] Maroufi, P., et al., Experimental investigation of secondary and tertiary oil recovery from fractured porous media. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2013. 3(3): p. 179188-.
- [2] drainage in fractured porous media. in *Canadian International Petroleum Conference*. 2009. Petroleum Society of Canada.
- [3] Terwilliger, P., et al., An experimental and theoretical investigation of gravity drainage performance. *Journal of Petroleum Technology*, 1951. 3(11): p. 285296-.
- [4] Chatzis, I. and S. Ayatollahi. The effect of gas injection rate on the recovery of waterflood residual oil under gravity assisted inert gas injection. in *Technical Meeting/Petroleum Conference of The South Saskatchewan Section*. 1993. Petroleum Society of Canada.
- [5] Riazi, M., A. Alizadeh, and M. Haghghi. Experimental study of gravity drainage during gas injection in carbonate rocks. in *Canadian International Petroleum Conference*. 2006. Petroleum Society of Canada.
- [6] Zendejboudi, S., O. Mohammadzadeh, and I. Chatzis. Investigation of gravity drainage in fractured porous media using rectangular macromodels. in *Canadian International Petroleum Conference*. 2008. Petroleum Society of Canada.
- [7] Grattoni, C., X. Jing, and R. Dawe, Dimensionless groups for three-phase gravity drainage flow in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2001. 29(1): p. 5365-.
- [8] Shahidzadeh-Bonn, N., et al., Gravity drainage in porous media: the effect of wetting. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003. 39(34-): p. 409416-.
- [9] Nabipour, M., 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*, 2007. 55(1): p. 7482-.
- [10] Paidin, W.R. and D.N. Rao. Physical Model Experiments to Evaluate the Effect of Wettability and Fractures on the Performance of the Gas-assisted Gravity Drainage (GAGD) Process. in *Paper reviewed and accepted for proceedings of the Society of Core Analysts 21st Symposium*, Calgary, Canada. 2007.
- [11] Haugen, Å., et al., Wettability impacts on oil displacement in large fractured carbonate blocks. *Energy & Fuels*, 2010. 24(5): p. 30203027-.
- [12] Zhou, D. and M. Blunt, Wettability effects in three-phase gravity drainage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1998. 20(3): p. 203211-.
- [13] Rezaveisi, M., et al., Experimental investigation of tertiary oil gravity drainage in fractured porous media. *Special Topics & Reviews in Porous Media: An International Journal*, 2010. 1(2).
- [14] Zendejboudi, S., N. Rezaei, and I. Chatzis, Effect of wettability in free-fall and controlled gravity drainage in fractionally wet porous media with fractures. *Energy & Fuels*, 2011. 25(10): p. 44524468-.
- [15] Chatzis, L. and S. Ayalollahi. Investigation of the GAIGI process in stratified porous media for the recovery of waterflood residual oil. in *Technical Meeting/Petroleum Conference of The South Saskatchewan Section*. 1995. Petroleum Society of Canada.
- [16] Maroufi, P., et al. Experimental Investigation of the Effect of Wettability and Drainage Rate on Tertiary Oil Recovery in Fractured Media. in *IOR 201116-th European Symposium on Improved Oil Recovery*. 2011.
- [17] Zendejboudi, S., et al., Empirical modeling of gravity drainage in fractured porous media. *Energy & Fuels*, 2011. 25(3): p. 12291241-.
- [18] Zendejboudi, S., et al., Dimensional analysis and scale-up of immiscible two-phase flow displacement in fractured porous media under controlled gravity drainage. *Energy & Fuels*, 2011. 25(4): p. 17311750-.
- [19] Miri, R., et al., Experimental and numerical modeling study of gravity drainage considering asphaltene deposition. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014. 53(28): p. 11512-11526.
- [20] Castelijns, J. Recovery of retrograde condensed liquid by gravity drainage. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 1981. Society of Petroleum Engineers.
- [21] Castelijns, J. and J. Hagoort, Recovery of retrograde condensate from naturally fractured gas-condensate reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1984. 24(06): p. 707717-.