

## بررسی آزمایشگاهی تزریق دی‌اکسید کربن در مدل کربناته شکاف‌دار

برپه خسروی<sup>۱</sup>، زوشکده ازادک پناخت از مخازن نفت و گاز

تاریخ دریافت مقاله: ۲۰ شهریور ۱۳۹۳ / تاریخ پذیرش مقاله: ۲۰ شهریور ۱۳۹۳

چکیده

به دلیل تفاوت نفوذپذیری بین ماتریس و شکاف، پتانسیل بازیافت ثانویه در مخازن شکاف‌دار نسبت به مخازن متعارف کمتر است. در این مخازن، سیال تزریقی از طریق شکاف به راحتی به چاه تولیدی رسیده و مقدار زیادی نفت در ماتریس به تله می‌افتد. این نفت به تله افتاده را می‌توان با استفاده از جریان متقاطع / انتقال جرم از ناحیه به تله افتاده به ناحیه جریانی، بازیافت کرد. در این مطالعه، تزریق گاز دی‌اکسید کربن در رژیم‌های مختلف امتزاجی تک‌تماسه، نزدیک امتزاجی و غیرامتزاجی در سیستم ماتریس-شکاف به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، بررسی کارایی تزریق گاز دی‌اکسید کربن در بازیافت نفت به تله افتاده در مخازن کربناته شکاف‌دار است. در تمامی آزمایش‌ها، مغزه با دکان اشباع شده است و دی‌اکسید کربن در شکاف، تزریق می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین بازیافت نفت در تزریق گاز دی‌اکسید کربن به صورت نزدیک امتزاجی به دست می‌آید. در این شرایط، ۶۳ درصد نفت به تله افتاده بازیافت می‌شود، در حالی که ضریب بازیافت نفت برای تزریق امتزاجی تک‌تماسه و تزریق غیرامتزاجی به ترتیب ۳۶ و ۸ درصد است.

واژگان کلیدی: تزریق گاز، نفت به تله افتاده، تزریق نزدیک امتزاجی، جریان متقاطع

مقدمه

موثر به صورت مستقل توسط محققان بررسی شده است. مطالعات تئوری و آزمایشگاهی کمی در مورد بازیافت نفت به تله افتاده در مدل ماتریس-شکاف<sup>۲</sup> انجام شده است. مورل<sup>۳</sup> و همکاران<sup>۲</sup>، اثر نوع گاز تزریقی (متان، نیتروژن)، نرخ تزریق گاز به درون شکاف و اشباع اولیه گاز درون مغزه را در آزمایش‌های نفوذ بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که فرایند فقط توسط مکانیزم نفوذ کنترل نمی‌شود و تزریق گاز نیتروژن باعث تجمع مایع در نزدیکی سطح شکاف می‌شود. لرومنسر<sup>۵</sup> و همکاران<sup>۳</sup> آزمایش‌هایی شبیه به مورل را در حضور آب انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که تجمع مایع در نزدیکی شکاف، در ارتباط با گرادیان تنش میان‌رویه<sup>۶</sup> درگیر در سیستم سیال سه‌جزئی (پنتان، متان، نیتروژن) است. برگر<sup>۷</sup> و همکاران<sup>۴</sup> انتقال جرم از ناحیه به تله افتاده را به صورت تابعی از رفتار فازی حلال بررسی کردند. آن‌ها گازهای هیدروکربنی با ترکیب درصد متفاوت را در شکاف تزریق می‌کردند و نشان دادند که انتقال جرم با افزایش غنای حلال افزایش می‌یابد. خسروی<sup>۸</sup> و همکاران<sup>۵</sup> اهمیت نسبی نیروهای فعال در جریان متقاطع از ناحیه به تله افتاده به ناحیه جریانی را در سیستم ماتریس-شکاف بررسی کردند.

طی بازیافت اولیه از مخازن شکاف‌دار، بیشتر نفت از شکاف تولید می‌شود و ماتریس در اشباع بالای نفت، باقی می‌ماند. در این مخازن، سیال تزریقی از طریق شکاف به راحتی به چاه تولیدی رسیده و مقدار زیادی نفت در ماتریس به تله می‌افتد. میزان به تله افتادن نفت در ماتریس به پارامترهای زیادی از قبیل: ناهمگنی، ترشوندگی محیط و غنای سیال تزریقی بستگی دارد<sup>۱</sup>. یک راه حل برای بازیافت نفت ماتریس، تزریق گاز خشک است. در این حالت، میزان قابل توجهی از نفت به تله افتاده<sup>۱</sup> را می‌توان با استفاده از جریان متقاطع<sup>۲</sup> / انتقال جرم از ناحیه به دام افتاده به ناحیه جریانی، بازیافت کرد. برای به حداکثر رساندن بازیافت به روش تزریق گاز، درک مکانیزم‌های موثر بر تولید و تأثیر کمی پارامترهای عملیاتی، ضروری است. با شناخت بهتر از ذات پدیده‌های محتمل در طول تزریق، می‌توان امیدوار بود که با استفاده از تجهیزات کمتر و منابع مالی محدودتر، نتایج بهتری حاصل شود. با شناسایی موثرترین پارامترها در تولید، می‌توان مدل تزریق و تولید را به سمتی تغییر داد که با غالب شدن مکانیزم‌های دلخواه، نفت کمتری در مخزن به جا ماند. تأثیر برخی از پارامترهای

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (khosravi.inbox@gmail.com)



نزدیک امتزاجی و تزریق غیرامتزاجی است (جدول ۲-)

### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

در این مطالعه، از مجموعه دستگاه آزمایشگاهی تزریق گاز در دما و فشار بالا استفاده شده است (شکل ۱-).  
برای انجام آزمایش‌ها از یک مغزه‌ی نگه‌دار مخصوص استفاده شده است. شکل ۲- شماتیک این مغزه‌ی نگه‌دار را نشان می‌دهد. این نگه‌دارنده شامل یک فضای خالی در یک طرف مغزه می‌باشد که بیانگر شکاف است. سیال تزریقی از یک طرف وارد فضای خالی شده، از روی سطح مغزه عبور کرده و از سمت مخالف خارج می‌شود. در این روش، سیال تزریقی فقط روی سطح مغزه جریان می‌یابد.

### ۲- نتایج و بحث

در این قسمت، به مقایسه و تحلیل نتایج حاصل از تزریق گاز پرداخته می‌شود. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی کارایی تزریق گاز دی‌اکسید کربن در بازیافت نفت به تله افتاده در مخازن کربناته شکاف‌دار است. خلاصه نتایج شامل رژیم تزریق، ضریب بازیافت نفت بعد از تزریق دو حجم فضای حفرات و ضریب بازیافت نفت<sup>۱۲</sup>

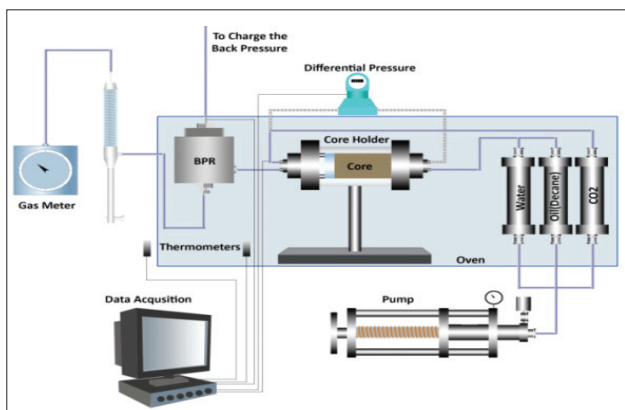
و نشان دادند که در تزریق نزدیک‌امتزاجی<sup>۹</sup> گاز دی‌اکسید کربن، بازیافت بیشینه است. آن‌ها بیان کردند که تبخیر، مکانیزم غالب در بازیافت نفت است که در حالت نزدیک‌امتزاجی سرعت می‌گیرد. مطالعات آزمایشگاهی تزریق امتزاجی<sup>۱۰</sup> و غیرامتزاجی گاز دی‌اکسید کربن نسبتاً کم است. در این تحقیق، تزریق گاز دی‌اکسید کربن در رژیم‌های مختلف امتزاجی تک‌تماسه<sup>۱۱</sup>، نزدیک‌امتزاجی و غیرامتزاجی در سیستم ماتریس-شکاف به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۱- بخش تجربی

#### ۱-۱- مواد

در آزمایش‌ها از مغزه‌ی کربناته به عنوان ماتریس استفاده شده است. این مغزه از یکی از مخازن جنوب ایران نمونه‌گیری شده و مشخصات آن در جدول ۱- آورده شده است.

در تمام آزمایش‌ها از دکان به عنوان نفت مصنوعی استفاده شده و دی‌اکسید کربن به عنوان گاز در شکاف، تزریق می‌شود. آزمایش‌ها در دمای ثابت ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شوند. بر اساس مطالعات قبلی [۵] و [۶]، فشار بحرانی سیستم دی‌اکسید کربن و دکان در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۱۴/۲۴ مگاپاسکال است. بنابراین، آزمایش‌ها در سه فشار ۱۵/۸۶، ۱۳/۷۹ و ۱۳/۱ مگاپاسکال انجام می‌شوند که به ترتیب بیانگر تزریق امتزاجی تک‌تماسه، تزریق



شکل ۱ | دستگاه آزمایشگاهی برای تزریق دی‌اکسید کربن در شکاف

جدول ۱ | مشخصات مغزه کربناته

کربناته	جنس
۳/۸	قطر (سانتیمتر)
۸	طول (سانتیمتر)
۲۲/۱۳	تخلخل (%)
۸/۲۶	تراوایی (میلی داریسی)
۲۰/۰۷	حجم حفرات (سی سی)

جدول ۲ | خواص مینا سیستم سیال دکان/دی-اکسید کربن [۵]

فشار (مگاپاسکال)	چگالی گاز (kg/m <sup>3</sup> )	گرانروی گاز (سانتی پوز)	چگالی نفت (kg/m <sup>3</sup> )	گرانروی گاز (سانتی پوز)	تنش میان رویه (mN/m)
۱۳/۱	۳۴۰/۴	۰/۰۲۶	۷۰۴/۴	۰/۵۱۸۶	۰/۳۳۱
۱۳/۷۹	۳۶۷/۲	۰/۰۲۷	۷۰۵/۱	۰/۵۲۷۱	۰/۰۵۶
۱۵/۸۶	۴۴۳/۹	۰/۰۳۲	۷۰۷	۰/۵۵۳	۰

طبق معادله ۱- کاهش یابد، درحالی که نرخ تولید نفت برای تزریق نزدیک امتزاجی به صورت قابل ملاحظه‌ای از تزریق غیرامتزاجی و امتزاجی بیشتر است.

$$v_{driange} = \frac{k \Delta \rho g}{\mu_o \varphi \Delta S_o}$$

در تزریق نزدیک امتزاجی، علاوه بر نیروهای ثقلی، مکانیزم دیگری در تولید نفت مشارکت می‌کند؛ در تزریق نزدیک امتزاجی، در اثر پدیده ترشوندگی نزدیک بحرانی<sup>۱۵</sup> [۷] دو فاز گاز و نفت، نفت روی

بعد از تزریق سی و پنج حجم فضای حفرات<sup>۱۳</sup> برای هر آزمایش، در جدول ۳- نشان داده شده است.

شکل ۳- نتایج ضریب بازیافت نفت بر حسب میزان حجم حفرات تزریقی را برای آزمایش‌های ماتریس-شکاف نشان می‌دهد. بیشترین بازیافت نفت طی تزریق نزدیک امتزاجی گاز دی‌اکسید کربن به دست آمده است. برای مغزه کربناته، تزریق گاز به صورت غیرامتزاجی، بازیافت کمی را به دنبال دارد که می‌تواند ناشی از افزایش نیروهای مؤئنه به دلیل کاهش تراوایی ماتریس باشد.

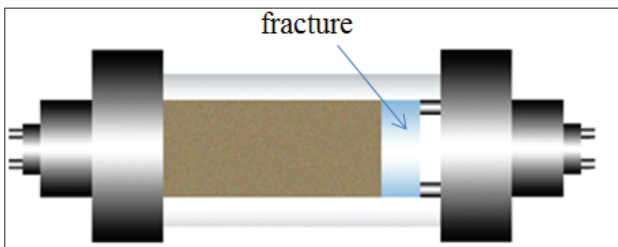
در شکل ۴- دو حالت حدی برای انتقال جرم/ جریان متقاطع در مدل ماتریس-شکاف به طور شماتیک نشان داده شده است؛ حالت الف بیانگر شرایطی است که گاز با عبور از سطح سنگ، نفت را بخار می‌کند و با تولید نفت، سطح تماس گاز و نفت از شکاف فاصله گرفته و سرعت تولید نفت پیوسته کاهش می‌یابد. در حالت ب، سطح تماس گاز و نفت در شکاف ثابت نگه داشته شده است. در این حالت، تا زمانی که نفت وجود داشته باشد، سرعت تولید نفت ثابت است و به میزان توانایی گاز در تبخیر نفت از سطح سنگ بستگی دارد.

شکل ۵- نرخ تولید نفت بر حسب ضریب بازیافت را برای آزمایش‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است نتایج آزمایش‌ها ترکیبی از دو حالت حدی در نظر گرفته شده در بالاست. در ادامه، با تحلیل این نمودار، مکانیزم‌های غالب در هر رژیم تزریقی مشخص می‌شود. در زمان‌های ابتدایی، نرخ تولید نفت طی تزریق نزدیک امتزاجی و امتزاجی تک تماسه ثابت است، درحالی که برای تزریق غیرامتزاجی، نرخ تولید نفت، پیوسته کاهش می‌یابد. در شرایط امتزاجی و نزدیک امتزاجی، نیروهای مؤئنه ناچیز بوده و رانش گرانش<sup>۱۴</sup> در تولید نفت مشارکت می‌کند. رانش گرانش باعث کشیده شدن نفت به سمت شکاف می‌شود و به تولید نفت کمک می‌کند و باعث می‌شود در زمان‌های ابتدایی، نرخ تولید نفت ثابت بماند، درحالی که طی تزریق غیرامتزاجی، به دلیل پایین بودن تراوایی سنگ، نیروهای مؤئنه قوی بوده و رانش گرانش بی‌اثر شده است. در این شرایط، مشابه حالت الف، دکان فقط در اثر تبخیر از سطح تماس گاز و نفت تولید می‌شود.

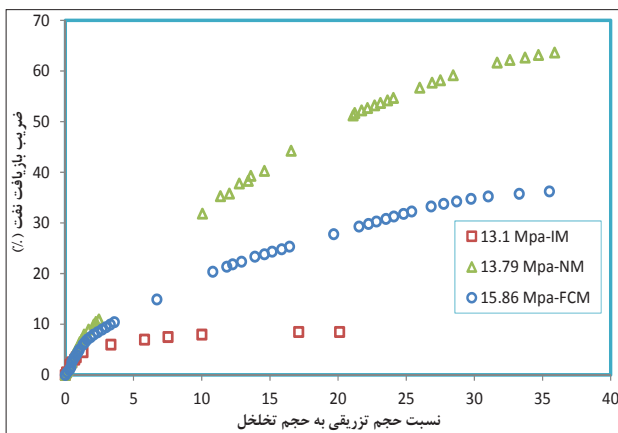
نکته دیگری که در این نمودار اهمیت دارد این است که با افزایش فشار و نزدیک شدن به نقطه بحرانی، اختلاف چگالی بین فازها کم می‌شود و گرانش روی نفت افزایش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود سرعت تولید نفت (ناشی از برهم کنش نیروهای ثقلی و ویسکوز)

۳ | مشخصات آزمایش‌ها همراه با ضریب بازیافت نفت بعد از تزریق ۲ و ۳۵ حجم فضای متخلخل

شماره آزمایش	رژیم تزریق	ضریب بازیافت نفت بعد از تزریق ۲ حجم فضای متخلخل	ضریب بازیافت نفت بعد از تزریق ۳۵ حجم فضای متخلخل
۱	غیرامتزاجی	۵	۸/۵
۲	نزدیک امتزاجی	۹/۷	۶۳/۷
۳	امتزاجی	۷/۷	۳۶/۲



۲ | مغزه نگاهدار



۳ | ضریب بازیافت نفت بر حسب میزان حجم حفرات تزریقی برای مغزه کربناته

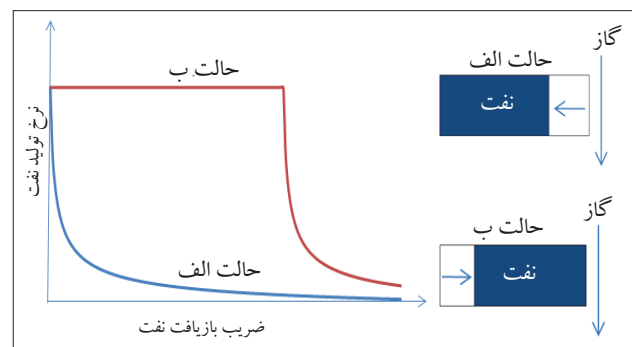
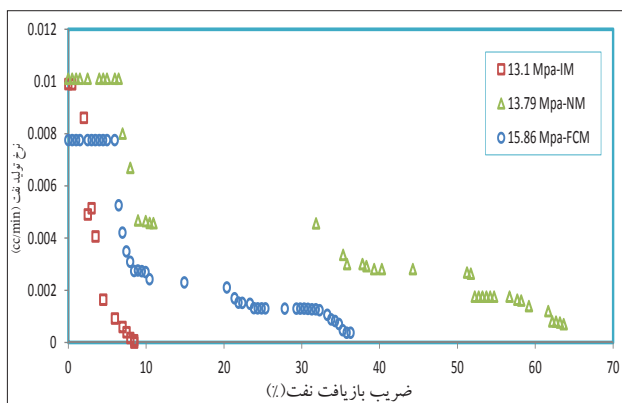


می‌دهد که بیشترین بازیافت نفت در تزریق گاز دی‌اکسید کربن، به صورت نزدیک‌امتزاجی به دست می‌آید. تزریق نزدیک‌امتزاجی گاز به دلیل افزایش سطح تماس گاز و نفت و سرعت گرفتن تبخیر، برای بازیافت نفت به تله افتاده بسیار کارآمد است. تزریق گاز به صورت نزدیک‌امتزاجی علاوه بر اینکه نفت بیشتری نسبت به تزریق امتزاجی تک‌تماسه بازیافت می‌کند، بخشی از هزینه‌های افزایش فشار را نیز کاهش می‌دهد.

سطح سنگ پخش می‌شود، افزایش سطح تماس گاز و نفت باعث افزایش نرخ تبخیر می‌شود و به تولید نفت کمک می‌کند.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، کارایی تزریق گاز دی‌اکسید کربن در بازیافت نفت به تله افتاده در مخازن کربناته شکاف‌دار به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های ارائه شده در این مطالعه نشان



شکل ۴ دو حالت حدی برای انتقال جرم/جریان متقاطع در مدل ماتریس-شکاف؛ الف-با تولید نفت ماتریس، سطح تماس گاز و نفت عقب نشینی می‌کند، ب- سطح تماس گاز و نفت در شکاف ثابت نگه داشته شده است

شکل ۵ نرخ تولید نفت برحسب ضریب بازیافت نفت

### پانویس‌ها

1. Trapped oil
2. Cross flow
3. Matrix-Fracture
4. Morel
5. Le Romancer
6. Interfacial Tension (IFT)
7. Burger
8. Khosravi
9. Near-miscible (NM)
10. Immiscible (IM)
11. First Contact Miscible (FCM)
12. Oil recovery factor
13. Pore volume
14. Gravity drive
15. Critical point wetting

### منابع

- [1] Sohrabi, M., Danesh, A., Tehrani, D. H., & Jamiolahmady, M. (2008). Microscopic mechanisms of oil recovery by near-miscible gas injection. *Transport in Porous Media*, 72(3), 351367-.
- [2] Morel, D., Bourbiaux, B., Latil, M., & Thiebot, B. (1993). Diffusion effects in gasflooded light-oil fractured reservoirs. *SPE Advanced Technology Series*, 1(02), 100109-.
- [3] Le Romancer, J. F., & Fernandes, G. (1994, 1994). Mechanism of oil recovery by gas diffusion in fractured reservoir in presence of water. Paper presented at the SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, USA.
- [4] Burger, J. E., Springate, G. S., & Mohanty, K. K. (1996). Experiments on bypassing during gasfloods in heterogeneous porous media. *SPE Reservoir Engineering*, 11(2), 109115-.
- [5] Khosravi, M., Bahramian, A., Emadi, M., Rostami, B., & Roayaie, E. (2014). Mechanistic investigation of bypassed-oil recovery during CO<sub>2</sub> injection in matrix and fracture. *Fuel*, 117, 4349-.
- [6] Cismondi, M., Rodríguez-Reartes, S. B., Milanésio, J. M., & Zabaloy, M. S. (2012). Phase equilibria of CO<sub>2</sub>+ n-alkane binary systems in wide ranges of conditions: Development of predictive correlations based on cubic mixing rules. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(17), 62326250-.
- [7] Cahn, J. W. (1977). Critical point wetting. *The Journal of Chemical Physics*, 66(8), 36673672-.