

# اندازه‌گیری آزمایشگاهی ضریب نفوذ مؤثر دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) در محیط متخلخل

احسان زمانیان <sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مخازن هیدروکربوری، دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
 دکتر رضای خراط <sup>۲</sup> دکتری مهندسی نفت، دانشیار دانشگاه صنعت نفت اهواز  
 دکتر بیتراه‌ادون <sup>۳</sup> دکتری مهندسی شیمی، استادیار دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

تعیین دقیق ضریب نفوذ دی‌اکسید کربن در هیدروکربن‌های مایع یکی از عوامل مؤثر در تزریق امتزاجی گاز به مخازن نفتی، جهت ازدیاد برداشت و همچنین بهبود پیش‌بینی شبیه‌سازهای ترکیبی مخزن است. در این مقاله یک مطالعه جامع آزمایشگاهی جهت تعیین ضریب نفوذ مؤثر دی‌اکسید کربن در نفت سنگین مخزن یکی از میادین ایران در حضور محیط متخلخل همگن انجام شده است. یک دستگاه آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری ضریب نفوذ مؤثر در دانه‌های شیشه‌ای اشباع شده از نفت ساخته شد. برای یافتن ضریب نفوذ از معادله نفوذ به همراه معادله موازنه جرم برای گاز استفاده گردید. همچنین اثر دما روی ضریب نفوذ نیز بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که ضریب نفوذ در نفت‌های سنگین پایین‌تر از آن چیزی است که به طور متداول برای مخازن معمولی در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر آن وجود محیط متخلخل نیز باعث کاهش ضریب نفوذ می‌شود.

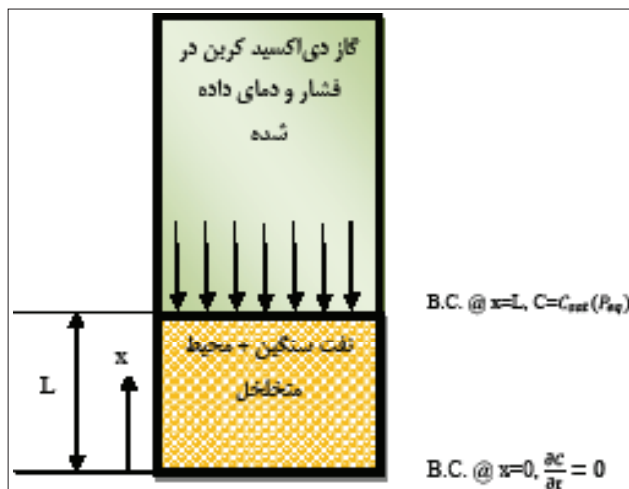
واژه‌های کلیدی: ضریب نفوذ مؤثر، شبیه‌سازهای ترکیبی، محیط متخلخل همگن، دانه‌های شیشه‌ای، روش کاهش فشار، نفت سنگین

مقدمه

بوجود آمده است. مشکل این روش دشوار بودن اندازه‌گیری تغییرات غلظت در جریان به علت کوچک بودن این تغییرات است [۳]. در این مقاله مطالعه جامع آزمایشگاهی جهت تعیین ضریب نفوذ مؤثر سیستم‌های دی‌اکسید کربن-نفت سنگین در محیط متخلخل همگن انجام شده است. بدین منظور از دانه‌های شیشه‌ای با اندازه جور شده (۰/۵۱cm) - (۰/۳۲) و تخلخل (۰/۴۳) استفاده گردید. برای اندازه‌گیری ضریب نفوذ از روش گزارش کردن تغییرات فشار در یک محفظه PVT استفاده

در پروژه‌های بازیافت نفت، گاز به دلایل مختلف از جمله تثبیت فشار مخزن و ازدیاد برداشت به درون مخزن تزریق شده و با حل شدن در نفت، باعث کاهش ویسکوزیته، کشش سطحی و دانسیته آن می‌شود. گاز دی‌اکسید کربن به خاطر داشتن انحلال‌پذیری بالا در نفت‌های سنگین در شرایط متداول مخزنی، باعث کاهش ویسکوزیته نفت تا مقدار قابل توجهی می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که سرعت حل شدن گاز در نفت به ضریب نفوذ بستگی دارد [۱]. با این وجود داده‌های انتشار یافته مربوط به نفوذپذیری گاز در نفت‌های سنگین نسبتاً کمیاب بوده و علاوه بر آن، اندازه‌های منتشر شده با درجه بزرگی متفاوتی تغییر می‌کنند. این امر احتمالاً به خاطر مشکل بودن و زمان‌بر بودن این گونه آزمایش‌ها است [۲]. همچنین اغلب ضرائب بدست آمده توسط محققین در توده سیال بوده در حالی که وجود محیط متخلخل ضریب نفوذ را کاهش می‌دهد. مقدار کاهش، تابع درجه تخلخل و ساختمان داخلی محیط متخلخل است.

نفوذ درون محیط متخلخل از اوایل قرن بیستم، به ویژه در محیط همگن با تخلخل درون دانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. بعضی از کارها روی یافتن رابطه‌ای بین نفوذ مولکولی، درجه پیچش، ضریب مقاومت سازند و ضریب نفوذ مولکولی مؤثر تمرکز کردند و بعضی دیگر به اندازه‌گیری ضریب نفوذ مولکولی مؤثر با استفاده از روش‌های غیر مستقیم علاقه نشان دادند. برای نمونه یک روش متداول، ایجاد یک جریان گاز در یک طرف بلوک متخلخل اشباع شده از مایع و اندازه‌گیری تغییرات غلظت در جریان



شکل ۱ | شماتیکی از محفظه PVT و سیستم نفت سنگین-حلال (گاز) استفاده شده برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر.



پایین تر است (به خاطر اثر باد کردن نفت) فرآیند جابه‌جایی طبیعی در نظر گرفته نشده است. با این حال، مکان سطح مشترک تغییر چندانی نداشته و بنابراین اثر باد کردن نفت را می‌توان نادیده گرفت (ژانگ و همکارانش، ۲۰۰۰). همچنین به خاطر ساکن بودن نفت در هنگام آزمایش، سرعت متوسط مولی،  $u$ ، برابر صفر است. علاوه بر این، به علت غیر فرار بودن نفت سنگین در شرایط آزمایش تنها نفوذ یک طرفه گاز در نفت سنگین در نظر گرفته شد. همچنین باید یاد آور شد که فرآیند نفوذ، هم‌دما فرض شده است.

در هنگام تزریق گاز، فشار درون محفظه ممکن است که با مکان تغییر کند. با این وجود، در زمان‌های بعدی فشار ظرف مستقل از مکان فرض شده و فقط با زمان تغییر می‌کند. به عبارت دیگر:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

قبل از شروع فرآیند نفوذ، غلظت گاز در فاز مایع ناچیز است. بنابراین، شرط اولیه محفظه نفوذ به صورت زیر است:

$$C(x,t)|_{t=0} = 0, 0 \leq x \leq L \quad (3)$$

با فرض اینکه غلظت در سطح مشترک در تمامی زمان‌ها برابر غلظت در فشار تعادلی باشد و به عبارت دیگر شرایط در فصل مشترک برابر شرایط در حالت تعادل باشد، در این صورت شرط مرزی دیریکله زیر را برای فرآیند نفوذ می‌توان نوشت (ژانگ و همکارانش، ۲۰۰۰):

$$C(x,t)|_{x=L} = C_{eq}(P_{eq}), t > 0 \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $C_{sat}(P_{eq})$ ، غلظت اشباع یا انحلال‌پذیری گاز در نفت سنگین

گردید. برای به دست آوردن ضریب نفوذ مؤثر، تغییرات فشار حاصل از نفوذ گاز در محیط متخلخل به قانون دوم فیک برای نفوذ، ارتباط داده شد.

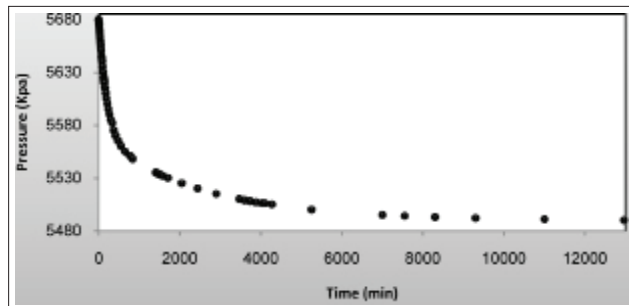
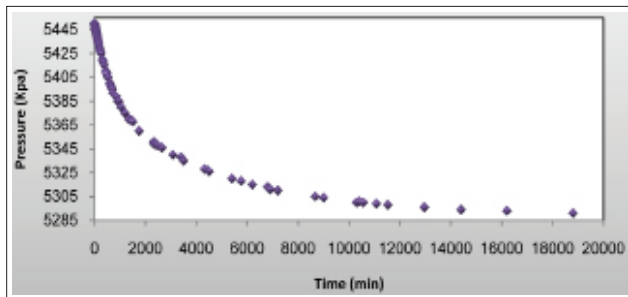
### ۱- مدل ریاضی

یک محفظه PVT استوانه‌ای که حاوی حجم معینی از محیط متخلخل اشباع شده از نفت است را در نظر بگیرید. وقتی یک حلال درون این محفظه تزریق می‌شود، بین حلال تزریقی و نفت سنگین در فصل مشترکشان تماس مستقیم رخ داده و در نتیجه آن حلال به تدریج درون نفت سنگین تا زمان اشباع شدن نفت، حل می‌شود. شکل ۱ نمودار طرح کلی، از یک سیستم نفت سنگین - حلال درون یک محفظه نفوذ بسته را نشان می‌دهد، که سطح مشترک نفت سنگین - حلال در مکان  $x=L$  و ته محفظه نیز در  $x=0$  قرار گرفته است.

با استفاده از معادله پیوستگی و قانون فیک، فرآیند نفوذ مولکولی را می‌توان با یک معادله نفوذ یک بعدی، ناپایدار و بدون انجام واکنش شیمیایی توصیف کرد:

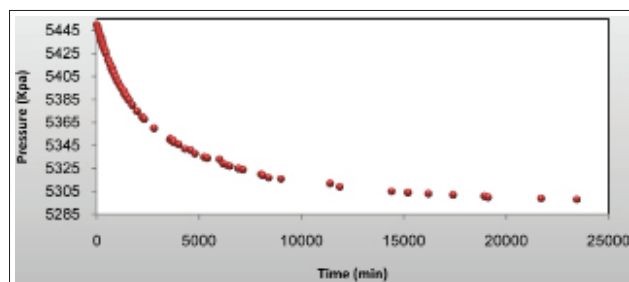
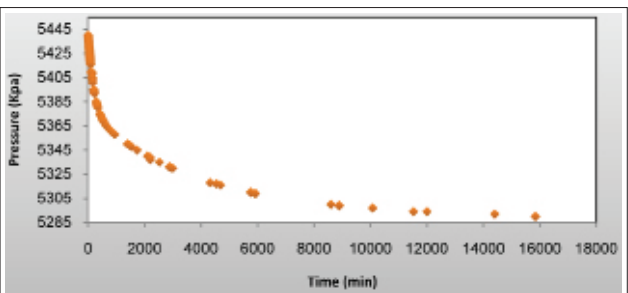
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

در معادله فوق  $C(x,t)$  غلظت مولی حلال در نفت سنگین و  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر متوسط حلال در نفت سنگین است (با فرض اینکه مستقل از غلظت حلال باشد). در معادله بالا، به علت اینکه در طول فرآیند نفوذ، چگالی نفت سنگین در نزدیکی سطح مشترک از چگالی آن در ته ظرف



شکل ۱ | داده‌های فشار - زمان اندازه‌گیری شده برای سیستم دی‌اکسیدکربن - نفت در حضور محیط متخلخل برای  $T=50^{\circ}C$  و  $P=5680$  kPa

شکل ۲ | داده‌های فشار - زمان اندازه‌گیری شده برای سیستم دی‌اکسیدکربن - نفت در حالت توده سیال برای  $T=50^{\circ}C$  و  $P=5680$  kPa



شکل ۳ | داده‌های فشار - زمان اندازه‌گیری شده برای سیستم دی‌اکسیدکربن - نفت در حضور محیط متخلخل برای  $T=50^{\circ}C$  و  $P=5445$  kPa

شکل ۴ | داده‌های فشار - زمان اندازه‌گیری شده برای سیستم دی‌اکسیدکربن - نفت در حضور محیط متخلخل برای  $T=50^{\circ}C$  و  $P=5445$  kPa

با جای گذاری معادله بالا در معادله ۸ و انتگرال گیری از آن خواهیم داشت:

$$P(t) - P_{eq} = \frac{20L^2 \cos(P_{eq})}{\pi^2} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (11)$$

در اندازه‌های بالای t سری بی‌نهایت در معادله بالا به سرعت همگرا شده و می‌توان آن را توسط عبارت اول تقریب زد.

$$P(t) - P_{eq} = \frac{20L^2 \cos(P_{eq})}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (12)$$

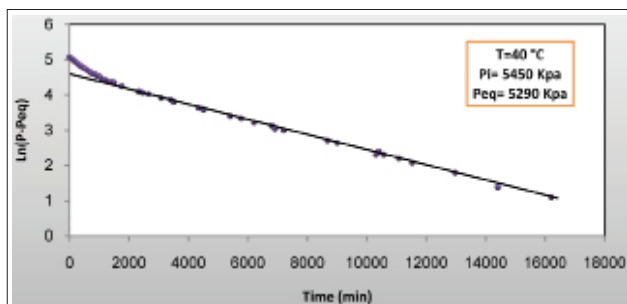
با بازچینی معادله بالا، رابطه زیر را بین فشار و زمان بدست خواهیم آورد:

$$\ln[P(t) - P_{eq}] = \ln\left(\frac{20L^2 \cos(P_{eq})}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (13)$$

با رسم کردن داده‌های آزمایشگاهی مطابق با معادله (۱۳) یک خط راست به دست می‌آید که از شیب و محل برخورد آن، ضریب نفوذ و غلظت مولی تعادلی، را می‌توان محاسبه نمود [۵].

## ۲- آماده‌سازی دستگاه آزمایش

این آزمایش به منظور آشنایی با پدیده نفوذ مولکولی و چگونگی تعیین ضرائب نفوذ گازها در نفت سنگین با استفاده از ثبت کردن افت فشار انجام گرفت. در این کار از دو نوع محفظه PVT یکی پنجره‌دار و دیگری بدون پنجره که حجم‌های آنها به ترتیب ۵۵۹ cc و ۷۳۰ cc بود، استفاده شد. در محفظه پنجره‌دار دو پنجره شیشه‌ای در دو طرف آن قرار داده شد به نحوی که سطح مایع را بتوان تماشا کرد. نزدیک محفظه پنجره‌دار یک سیستم روشنایی قرار داده شد تا به شخص آزمایش کننده امکان مشاهده بهتر سطح مایع درون محفظه داده شود. ارتفاع محفظه پنجره‌دار برابر ۳۶ cm و محفظه بدون پنجره برابر ۲۳/۴ cm بود. هر دو محفظه از جنس فولاد زنگ نزن بودند و توانایی تحمل فشار حدود ۳۰۰۰ psi را داشتند. برای تنظیم دمای سیستم، محفظه و کپسول حاوی گاز درون حمام هوا قرار داده شدند.



۷ | منحنی نیمه لگاریتمی داده‌های اختلاف فشار- زمان برای سیستم دی‌اکسیدکربن-محیط متخلخل اشباع شده از نفت.

تحت فشار تعادلی  $P_{eq}$  است. به علت نفوذناپذیر بودن ته محفظه، انتقال جرم در هر زمانی برابر صفر است (کرنک، ۱۹۵۶). بنابراین شرط مرزی نیومن را می‌توان در ته محفظه به کار برد:

$$\frac{\partial C}{\partial x}\bigg|_{x=L} = 0, \quad t > 0 \quad (5)$$

حل تحلیلی معادله نفوذ (معادله (۱)) با استفاده از شرایط اولیه و مرزی (معادلات (۳)، (۴) و (۵)) به صورت زیر است [۴]:

$$C(x,t) = C_{eq}(P_{eq}) - \frac{C_{eq}(P_{eq})}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \times \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

با استفاده از موازنه جرم می‌توان فشار سیستم را به پیشرفت فرآیند نفوذ ربط داد. موازنه جرم برای مول‌های گاز این گونه بیان می‌شود که تعداد مول‌های دی‌اکسیدکربن که از فاز گاز خارج می‌شوند، برابر با تعداد مول‌هایی هستند (شار نفوذی ضرب در A) که به درون مایع در فصل مشترک وارد می‌شوند. بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -\frac{D_{eff}}{L} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} \quad (7)$$

ضریب تراکم پذیری،  $Z_p$ ، را به علت کوچک بودن تغییرات فشار حاصل از فرآیند نفوذ می‌توان ثابت فرض کرد. از معادله ۷ نسبت به زمان، از t تا بی‌نهایت انتگرال گرفته تا بدست آوریم:

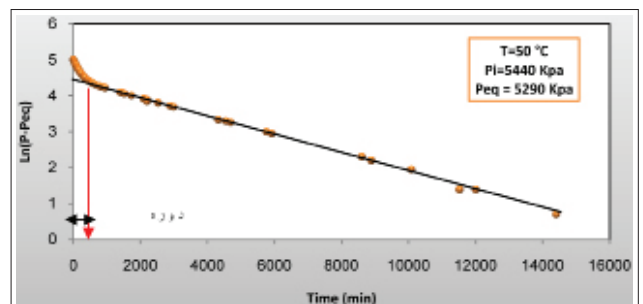
$$\int_{P(t)}^{P_{eq}} dP(t) = -BD_{eff} \int_t^{\infty} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} dt \quad (8)$$

که در آن

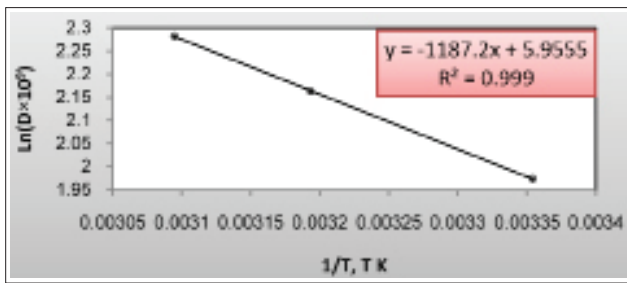
$$B = \frac{Z_p R}{L} = \text{constant} \quad (9)$$

با مشتق گیری از معادله ۶ نسبت به x در x=L می‌توان  $\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L}$  را بدست آورد:

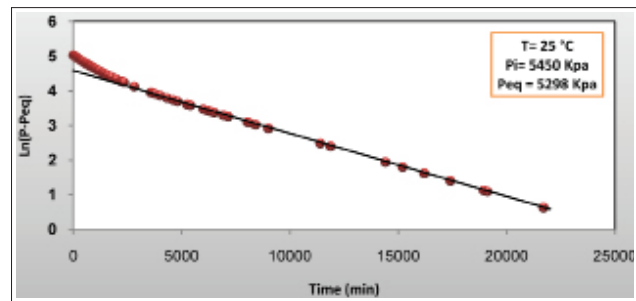
$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} = \frac{20 \cos(P_{eq})}{L} \times \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (10)$$



۶ | منحنی نیمه لگاریتمی داده‌های اختلاف فشار- زمان برای سیستم دی‌اکسیدکربن-محیط متخلخل اشباع شده از نفت.



شکل ۷ | وابستگی دمایی ضریب نفوذ برای سیستم دی اکسید کربن-نفت سنگین.



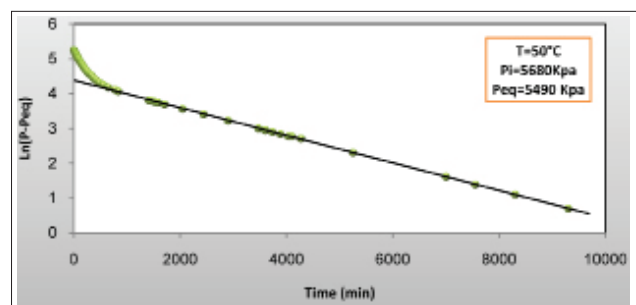
شکل ۸ | منحنی نیمه لگاریتمی داده‌های اختلاف فشار- زمان برای سیستم دی اکسید کربن-محیط متخلخل اشباع شده از نفت.

بخش‌های مختلف محفظه نفوذ و حمام هوا را ثبت می‌کنند. ۲۴ ساعت به سیستم در دمای مورد نظر زمان داده می‌شود تا نفت گاززدایی شده و نسبت به برقراری یکنواختی در سرتاسر سیستم اطمینان حاصل شود. سپس شیر بالایی محفظه توسط یک لوله فلزی به مخزن حاوی گاز متصل می‌گردد. وقتی که فشار درون محفظه به اندازه‌ی دلخواه رسید، شیر بالایی بسته می‌شود. با گذشت زمان گاز به درون نفت نفوذ کرده و فشار گاز درون محفظه شروع به افتادن می‌کند. فشار تا زمان رسیدن به شرایط تعادل (فشار نهایی، که دیگر با زمان تغییر نکند) گزارش می‌شود. ضرایب نفوذ از داده‌های فشار- زمان ثبت شده بدست می‌آیند. دستیابی به یک مجموعه کامل از داده‌های فشار- زمان، معمولاً برای آزمایش توده سیال بین ۶ تا ۷ روز و برای متخلخل دو هفته تا ۲۰ روز زمان می‌برد. در این کار یک آزمایش برای توده سیال و سه آزمایش برای محیط متخلخل (در دماهای متفاوت) انجام شد. برای اطمینان از عدم تغییر سطح مایع نسبت به زمان در اثر نفوذ گاز، آزمایش توده سیال در محفظه پنجره‌دار انجام شد تا سطح مایع را در آن بتوان مشاهده نمود.

### ۳- نتایج آزمایش

شکل‌های ۲ تا ۵ داده‌های آزمایشگاهی فشار- زمان بدست آمده برای سیستم نفت سنگین- دی اکسید کربن در حالت توده سیال و متخلخل را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، در مرحله اولیه‌ی حل شدن گاز در نفت یک انحنا در نمودار رخ می‌دهد. این انحنا نشان‌دهنده یک دوره نهفتگی است که طی آن دی اکسید کربن در سطح مشترک گاز/نفت تا برقراری شرط مرزی در معادله (۴) حل می‌شود. از آنجایی که اثرات دوره نهفتگی با افزایش زمان تماس کاهش می‌یابد، داده‌های مربوط به زمان میانی و پایانی برای تخمین ضریب نفوذ قابل اطمینان تر هستند.

اگر داده‌های بعد از دوره اولیه که در آن فشار به تندی کاهش می‌یابد، روی نمودار نیمه‌لگاریتمی رسم شود، با استفاده از روش حداقل سازی مربعات یک خط راست همانند شکل‌های ۶، ۷، ۸، ۹ بدست خواهد آمد. ضریب نفوذ گاز در نفت سنگین را می‌توان از شیب خط راست محاسبه



شکل ۹ | منحنی نیمه لگاریتمی داده‌های اختلاف فشار- زمان برای سیستم دی اکسید کربن-محیط متخلخل اشباع شده از نفت.

برای مشاهده اثر محیط متخلخل روی فرآیند نفوذ، آزمایش‌ها در دو سیستم متمایز، یکی توده سیال و دیگری متخلخل انجام شدند. به منظور ایجاد یک محیط متخلخل از دانه‌های شیشه‌ای خوب جور شده استفاده گردید. برای اینکه اندازه‌ی دانه‌ها بین ۵۰ تا ۸۰ میکرون (۰/۰۵۱-۰/۰۳۲ cm) باشد، از دو غربال با این اندازه‌ها استفاده شد. در این شرایط تخلخل اندازه‌گیری شده دانه‌های شیشه برابر ۰/۴۴ بود.

فاز مایع استفاده شده در این آزمایش، نفت سنگین یکی از میداین نفتی شرقی ایران است. ویژگی‌های نفت در دمای محیط در جدول زیر نشان داده شده است.

برای شروع آزمایش اصلی نفوذ، ابتدا محفظه تمیز و خشک می‌شود. سپس فاز مایع تا حدود ۳۵٪ حجم محفظه وارد سیلندر می‌گردد. زمانی که بخواهیم آزمایش را در توده سیال انجام دهیم، نفت به تنهایی وارد محفظه می‌شود ولی برای حالت متخلخل، محیط متخلخل اشباع شده از نفت باید وارد محفظه گردد. بدین منظور ابتدا نفت مورد نظر و دانه‌های شیشه‌ای درون یک ظرف به خوبی مخلوط شده و درون اجاق در دمای بالا قرار داده می‌شود تا گرانیوی آن کمتر شده و راحت‌تر بتوان آن را به درون محفظه منتقل کرد. گاز دی اکسید کربن نیز در فشار دلخواه وارد مخزن استوانه‌ای درون حمام هوا می‌شود. سپس در حمام هوا بسته و حمام روشن می‌شود. در این حالت اجازه داده می‌شود تا دمای سیستم به آرامی بالا رفته و به دمای تنظیم شده برسد. چهار ترموکوپل (دو عدد در بدنه اصلی حمام و دو تای دیگر روی محفظه نفوذ) دمای

برون‌یابی اندازه‌های خارج از محدوده داده‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. در حالی که روابط تجربی تنها در محدوده میان داده‌ها قابل استفاده خواهند بود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- در این مطالعه ضریب نفوذ دی‌اکسید کربن در نفت سنگین میدان مورد مطالعه برای توده سیال و محیط متخلخل با استفاده از روش گزارش کردن کاهش فشار در یک محفظه فشار بالا اندازه‌گیری شد.
- ۲- داده‌های مربوط به زمان‌های اولیه به اندازه کافی از مدل ریاضی استفاده شده پیروی نکرده و بنابراین در محاسبه ضریب نفوذ از این داده‌ها صرف‌نظر شد.
- ۳- مقادیر تخمینی از ضرایب نفوذ برای سیستم دی‌اکسید کربن- محیط متخلخل اشباع شده از نفت سنگین در محدوده دمایی  $25-50^{\circ}\text{C}$  و فشار اولیه  $5450\text{ Kpa}$  بین  $7/2 \times 10^{-9}$  تا  $9/8 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه تغییر می‌کنند.
- ۴- ضریب نفوذ برای توده سیال در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  و فشار اولیه  $\text{Kpa}$   $5680$  برابر  $4/0 \times 10^{-8}$  مترمربع بر ثانیه بدست آمد.
- ۵- وجود محیط متخلخل باعث کند شدن فرآیند نفوذ شده و در نتیجه کاهش ضریب نفوذ می‌شود، بنابراین مقادیر بدست آمده در توده سیال نمی‌تواند تخمین درستی از نفوذپذیری گاز تزریقی در مخزن ارائه نماید.
- ۶- با استفاده از رابطه آرسنیک و ضرایب نفوذ بدست آمده در دماهای مختلف، یک رابطه برای تخمین ضریب نفوذ در دماهای گوناگون ارائه گردید.
- ۷- دما اثر مستقیمی روی ضریب نفوذ داشته و باعث تسریع فرآیند نفوذ می‌شود.

کرد. با این وجود به علت اینکه رابطه فشار- زمان در ابتدا خطی نیست، تنها قسمتی از داده‌ها روی مختصات نیمه‌لگاریتمی تشکیل یک خط راست را می‌دهند.

با قرار دادن شیب بدست آمده از نمودارهای نیمه‌لگاریتمی در رابطه ۱۴ که از معادله ۱۳ به دست می‌آید، می‌توان ضریب نفوذ محاسبه را محاسبه کرد.

$$D_{eff} = -\frac{4.2 \times 10^{-10} \times \text{Slope}}{\pi^2} \quad (14)$$

مقادیر محاسبه شده برای ضریب نفوذ در چند دمای مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

همان‌گونه که در جدول ۱ می‌توان دید؛ وجود محیط متخلخل باعث کاهش قابل توجه ضریب نفوذ نسبت به توده سیال شده است. همچنین افزایش دما باعث افزایش ضریب نفوذ دی‌اکسید کربن و کوتاهتر شدن زمان رسیدن به فشار تعادلی شده است. همچنین فشار نهایی پایین‌تری به دست خواهد آمد که این، به معنی حل شدن گاز در نفت به مقدار زیادتر و با سرعت بیشتر است.

با بهره‌گیری از رابطه آرنیوس (۱۹۸۹) رابطه بین  $D$  و دمای مطلق به صورت رابطه ۱۵ به دست می‌آید (شکل ۹) [۶]:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_D}{RT} \quad (15)$$

که در آن  $T$  و  $D$  به ترتیب بر حسب  $^{\circ}\text{K}$  و  $\text{m}^2/\text{s}$  هستند. با توجه به شکل ۹ اندازه  $\ln(D_0) = 5/955$  و  $\ln(10^9 D_0) = 1187/2$  خواهد شد. در معادله ۱۲،  $D_0$  ثابت پیش‌نمایی ( $\text{m}^2/\text{s}$ )، و  $E_D$  انرژی فعال‌سازی لازم برای نفوذ و  $R$  ( $1/987\text{ cal/mol}\cdot\text{K}$ ) ثابت جهانی گازها است. مزیت رابطه آرنیوس نسبت به روابط تجربی این است که از آن می‌توان برای

#### پانویس‌ها

<sup>1</sup> dadvar@aut.ac.ir

<sup>2</sup> Bulk

<sup>3</sup> Tortusity

<sup>4</sup> PVT cell

<sup>5</sup> Solvent

<sup>6</sup> Oil swelling effect

<sup>7</sup> Natural convection

<sup>8</sup> Windowed cell

<sup>9</sup> Blind cell

<sup>10</sup> Incubation period

<sup>11</sup> Least square method

<sup>12</sup> Arrhenius equation

#### منابع

- [1] Butler, R.M., Mokry, I.J., 1991. A new process (Vapex) for recovering heavy oils using hot water and hydrocarbon vapor. *J. Can. Pet. Technol.* 30 (1), 97-106.
- [2] P. Creux, V. Meyer, A. Graciaa, P.R. Cordelier, F. Franco and F. Montel: SPE Paper, vol. 97798 (2005).
- [3] R. Islas-Juárez, F. Samanego-V, and E. Luna, C. Pérez-Rosales, and J. Cruz, Experimental Study of Effective Diffusion in Porous Media. Presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, México, Nov 8-9, 2004; Paper SPE 92196.
- [4] Crank J., The mathematics of diffusion, second edition, Clarendon Press, Oxford Science Publications, (1995), 47.
- [5] Zhang Y. P., Hyndman C. L. and Maini B. B.: Measurement of gas diffusivity in heavy Oils, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (January 2000), 25, 1-2, 37.
- [6] Civan, F.; Rasmussen, M. L. Determination of gas-diffusion and interface-Mass-Transfer Coefficients for Quiescent Reservoir Liquids. Presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, CO, October 5-8, 2005; Paper SPE 84072.