مقاله پژوهشی ۳

شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۵۹-۳۶ **پژهش نفرت** 

بررسے نسبت گرانےروی سےال تزریقے و سیال مخزنے در پیش بینے زمانبرونزد با استفاده از مفاهیم تراوش

سارا شکراله زاده بهبهانی، محسن مسیحی<sup>®</sup> و محمدحسین غضنفری دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

#### چکیدہ

زمان برونزد سیال تزریقی در فرآیند تزریق آب یک معیار عملکرد مخزن است که تحت تاثیر موقعیت و عملیات چاه است. پیش بینی این زمان برونزد برای طراحی فرآیند و الگوهای تزریق در توسعه مخزن مفید است. روش متعارف برای این کار شبیه سازی مخزن بوده که که وقتی توزیع زمان برونزد مورد نظر باشد این کار بسیار زمان بر است. یک روش جایگزین در تعیین سریع زمان برونزد استفاده از رویکرد تشوری پرکولاسیون است. در این روش با استفاده از برخی خصوصیات مخزنی موجود مانند نسبت خالص به ناخالص، و ابعاد مخزن، امکان پیش بینی سریع نمودار توزیع زمان برون زد وجود گرانروی دو سیال تزریقی و تولیدی کاربردهای میدانی آنرا محدود نموده است. به منظور بسط کاربرد روابط مقیاس بندی روان بونزد لازم است اثرات کرانروی متفاوت دو سیال بر روابط مقیاس بندی توزیع زمان برون زد مانند فرض برابری زمان برون زد لازم است اثرات گرانروی متفاوت دو سیال بر روابط مقیاس بندی توزیع زمان برون زد مانند فرض برابری زمان بروی زد لازم است اثرات گرانروی متفاوت دو سیال بر روابط مقیاس بندی زمان برون زد دیده شود. به طور خاص از زمان بروین در لازم است اثرات گرانروی متفاوت دو سیال بر روابط مقیاس بندی زمان برون زد دیده شود. به سازی های زمان برون زد لازم است اثرات گرانروی متفاوت دو سیال بر روابط مقیاس بندی زمان برون زد دیده شود. و این سیه سازی های زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس بندی زمان برون زد بر سی گردید. نتایج این مطالعه نشان می دهد زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس بندی زمان برون زد بر سی گردید. نتایج این مطالعه نشان می دور زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس بندی زمان برون زد و استگی به درجه اشغال شدگی و نسبت گرانروی دو فاز به فرم زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس بندی زمان برون زد و استگی به درجه اشغال شدگی و نسبت گرانروی دو فاز به فرم زمان مرون زد سیال تزریقی در چاه تولیدی مخزن با دقت قابل قبولی امکان پذیر است. در انتها با پیاده سازی این رویکر د در یک مخزن و اقعی و مقیسه نتایج زمان برون زد با نتایج شبیه مازی های تولی بر مان در انتها با پیاده سازی این رویکرد در یک مخزن واقعی و مقیاسه نتایج زمان برون زد با نتایج شیه سرازی های تران بر است. در انتها با پیاده سازی این رویکر د

#### كلمات كليدى: گرانروى، مفهوم تراوش، تزريق آب، زمان برونزد ، محيط متخلخل مخزن

مقدمه

Archive of SID.ir

تراوش به عبور سيال از يک فيلتر اطلاق مي شود.

این سیال میتواند مایع، گاز، جریان برق، حرارت، نور، عامل بیماریزا و غیره باشد. فیلتر نیز میتواند یک محیط متخلخل باشد. این فیلتر سیالات درون مخزن را از خود عبور میدهد [۱].

1. Percolation

<sup>\*</sup>مسؤول مکاتبات آدرس الکترونیکی masihi@sharif.edu شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4570.3060)

مقاله پژوهشی

جریان سال در یک محیط متخلخان تحت تأثیر و ۲]. در مسئله این تحقیق، هنگام تزریق یک سیال نیروهای وارده بوده و با حرکت در مسیر پیش روی حرکت خود، به مسیرهای مختلف منحرف و منشعب شده و گسترش می یابد. کوتاهترین مسیر می تواند کنترل کننده زمان برونزد (اولین مشاهده) سـيال تزريقـي در نقطـه هـدف باشـد. اوليـن لحظـه (با کمترین اندازه خوشه) که در آن ارتباط دو سوی محیط متخلخل توسط سیال تزریقی برقرار می گردد، آستانه پرکولاسیون (p.) نامیده می شود. در تئوری پرکولاسیون؛ این آستانه به شکل بدون بعد گزارش شده و نشان میدهد حداقل چه کسری از حفرات بایستی اشغال شوند تا برای اولین بار جریان در کل سیستم برقرار گردد. لذا اگر احتمال اشغال شدن یک حفره p باشد، قبل از حد آستانه (p<p\_) احتمال وجود چنین خوشه ای، صفر است. برای مقادیر یس از حد آستانه (p>p) احتمال وجود خوشه بینهایت، برابر با یک است. با توجه به تصادفی بودن خصوصیات اینچنین سیستمی (مثلاً اندازه حفرات یا مسیر سیال)، حالات بسیاری برای جريان ممكن است وجود داشته باشد. لذا، ابتدا یک جامعیہ آمیاری احتمالے از تحقیق ہای ممکن (در این جا صدها شبیهسازی از مدلهای تصادفی محيط متخلخل) تهيه مي شود. سپس تخمين حد آستانه با محاسبه یک متوسط آماری بهدست میآید کے این تخمین با بررسی تعداد بسیار زیادی از حالات ممکن سیستم، تعیین میشود [۱

**پژهش نفت** شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

به محيط متخلخل (مثلاً به منظور بازيافت ثانويه و با هـدف نگهداشت فشار مخـزن)، هرچـه حجـم سـيال تزریقی بیشتر شود، توزیع اشباع سیال تزریقی در محيط متخلخل بيشتر شده و امكان برقراري ارتباط میان دو سـمت سیسـتم (یعنـی چـاه تولیـدی و چـاه تزریقے) از طریق سیال تزریقے بیشتر خواہد شد [۳]. ارزیابی کمی مقدار حد آستانه (یا به عبارتی زمان، رونزد سیال تزریقی) و تعیین رابطه بین میزان برقراری ارتباط (کے بے آن بہم پیوستگی هـم گفتـه میشـود) درون سیسـتم بـا توزیـع اشـباع سیال تزریقی با استفاده از نظریه پر کولاسیون انجام می گیرد [۴]. برای مثال سیال تمایل دارد از مسیر تراواتر عبور نماید و ممکن است مسیرهای باریک تر جاروب نشود يا در اثر تغييرات فشار و اشباع سیالات، یک فاز به دام افتاده و مسیرهایی از محیط مسدود گردند. در این حالت، ساختار هندسی جریان و خوشهها آرایش جدیدی پیدا خواهند آورد [۵]. از نظریه پرکولاسیون در مقیاس میدانی، میتوان برای تعیین زمانبرونزد سیال تزریقی، بهترین فاصله میان چاهی، میران ارتباط استاتیک و دینامیک دو چاه با یکدیگر و رفتار تولیدی بعد از برونزد سیال در صورت تزریق در مخزن (مانند افت تولید نفت و افزایـش بـرش آب در صـورت تزریـق آب) اســتفاده کـرد [۶]. نمونههایـی از مدلهـای مختلـف تصادفـی پر کولاسیون در شکل ۱ نمایش داده شدهاند.



**شکل ۱** نمایش انواع مدلهای تراوشی شبکهای شامل مدل های دوبعدی الف) جایگاهی ب) باندی و ج) مدل سهبعدی

1. Inter-Well Spacing

سارا شکراله زاده و همکاران 🔜 🔼

رابطـه توانـی در ایـن بررسـی مشـخص گردیـد امـا در خصوص کلی بودن مقدار توان در این روابط و وابستگی آن به خصوصیات سیستم (از جمله اندازه سیستم) بحثی ارائه نشد. در مطالعه Bak و مطالعات بعدی توسط Dickman و Munoz، نشان داده شد که پدیدههای مختلف در طبیعت که از تعادل خارج می شوند حین تغییر، به صورت خودجوش به سوی ایجاد یک حالت منظم پیش می روند. این تمایل به نظم بدون اعمال نیروی خارجی بوده و به این دلیل محققین دیگری نام این پدیده را حالت بحرانی خودسازمانیافته" نامیدند [۱۲]. از سال ۱۹۸۳ تـا بـه امـروز، لحظـه بـرونزد سـيال تزريقـي (آستانه بحرانی اول) مورد بررسی قرار گرفته است اما لحظه رسيدن به اشباع باقىمانده نفت (آستانه دوم) بسیار کمتر مورد توجه قرار گرفته است [١٣]. (. همچنین به تازگی نحوه تعمیم روابط مقیاس بندی شده بر پایه تئوری تراوش در مقیاس حفرہ برای نمونے ہای تصاویر سے تے پیادہسازی گردیـد [۱۴]. کـه تـا حـد قابـل قبولـی پیشبینیهـای ایــن رویکــرد را تأییــد میکنــد. نظریــه پرکولاســیون برای بررسی عملیات تحریک چاه از طریق ایجاد شـکافهای هیدرولیکـی کاربـرد دارد. در مطالعـه Rui و همکاران، حد آستانه فشار که در آن، سیال تزریقی وارد سنگ متخلخل می شود مورد ارزیابی قرار گرفت. آن ها نشان دادند که آستانه ورود سیال به درون منافذ سنگ بستگی به تخلخل و تراوایی دارد و دو نوع سنگ با تخلخل یکسان و تراوایی متفاوت دارای حـدود آسـتانه متفاوتنـد. در ایـن بررسـی، یـک مخـزن متراکـم دوبعـدی (بـا تخلخـل ۸٪) کـه در آن عملیات تحریک چاہ با تزریق آب انجام شدہ برای شبیهسازی (با نرمافزار تجاری CMG) شبیهسازی شد و نمودار دبی تولید نفت و تولید تجمعی نفت برحسب زمان مورد تحليل قرار گرفت [1۵]. بررسی نسبت گرانروی ...

هـدف ايـن مطالعـه بررسـی زمانبررسـی زمانبرونزد در مقیاس میدانی با استفاده از روابط پر کولاسیون بمنظور نزديک نمودن پيشبينيهاي روش پرکولاسیون به رفتار واقعی مخازن هیدرکروبوری است. به طور خاص، تأثير نسبت گرانروی سیال تزریقے بے تولیدی بر این رابطے بررسے مے شود. در ابتـدا بـا فـرض مدلهـای سـاده روابـط اوليـه پرکولاسیون مورد ارزیابی قرار می گیرند. در ادامه برای بهبود پیشبینیها، متغیرهای مخزنی وارد روابط پر کولاسیون می گردند. در هر مرحله مقایسه بـر مبنـای اجـرای تعـداد زیـادی از شبیهسـازیها انجام مي گيرد.

#### رویکرد تراوش

اولین مطالعاتی کے در آن از پرکولاسےون دینامیک برای مدلسازی جریان در محیط متخلخل استفاده شد مربوط به اوایل دهه هشتاد است که توسط دو گروه مستقل از هم انجام گرفت. در این مطالعات، محيط متخلخل ابتدا توسط يك فاز اشباع شده است کـه در ادامـه توسـط فـاز تزریقـی از حفـرات بیرون رانده می شود [۷ و ۸]. دو محقق با بازنگری در شرایط مرزی مسئله و در نظر گرفتن به دام افتادن سیالات، قدم بزرگی در حوزه استفاده از تئوری پرکولاسیون در مهندسی نفت برداشتند. آنها برای روش پیشنهادی خود برای نخستین بار، از نام "پركولاسيون تهاجمي'" استفاده كردند. پركولاسيون تهاجمی یک روش شبهپایا برای مدلسازی تزریق غیرامتزاجی تحت تأثیر نیروهای مویینه (نیروهای چسبندگی ٔ قابل اغماض) است [۹]. نتایج -Wilkin son و Willemsen تنها براساس شبیهسازی بوده و فرم توانی مدل آن ها بدون تعبیر ریاضی ارائه شده بود. اما این روابط پس از انتشار به سرعت توسعه داده شد و بر مبنای قضیه های ریاضی به اثبات رسید [۱۰]. Bak و همکاران مطالعهای انجام دادند کے مجداداً برقراری رابطے توانے برای سیستمھای تراوشی دینامیک اثبات شد [۱۱]. گرچه وجود

<sup>1.</sup> Invasion

<sup>2.</sup> Viscous Forces

<sup>3.</sup> Self-Organized Criticality

ح مقاله پژوهشی

از کاربردهای دیگر رویکرد تراوش در مقیاس میدانی، تخمین خصوصیات دینامیک جریان مانند زمانبرونـزد سـیال تزریقـی در چاههای تولیدی است. بررسیهای اولیه توسط Andrade و Buldyrev و همکاران براساس شبیهسازی قدم تصادفی منجر به ارائه تابع توزيع زمان برونزد وابسته به درجه اشغال شدگی شد [۱۶ و ۱۷]. رویکرد مشابهی توسط گنجه قزوینے و همکاران برای وابستگی توزیع زمانبرونزد به درجه اشغال شدگی محیط متخلخل و مقایسه نتایج آن با شبیه سازی جریان صورت گرفت [۱۸]. تعميم رابطه ارائه زمانبرونزد به شرايط ميداني نیازمند در نظر گرفتن هندسه جریان در مخزن بود کے توسط شکرالہ زادہ و ہمکاران با معرفی زمان مشخصه وابسته به هندسه جريان ارائه گرديد [۱۹]. همچنین صادق نژاد و همکاران به ارائه روشهایی برای تعمیم رویکرد پرکولاسیون برای دستیابی به برخی مشخصه های استاتیکی و دینامیکی مخازن در مقیاس میدانی مانند بہم پیوستگی بین چاہھا یا الگوی چاہ ہا پرداختنہ [۲۰-۲۲]. به طور خاص یکی از مقایسههای کاربردی برای تخمین زمانبرونزد با بەكارگىرى روابط مقياسبندى توزىع زمانبرونزد سیال تزریقی در چاه تولیدی و مقایسه با نتایج حاصل از شبیهسازی جریان با نرمافزارهای تجاری در فرآیند سیلابزنی توسط صادق نژاد و مسیحی ارائه گردید که تطابق نسبتاً خوبی را نشان میداد [۲۳]. البتـه مـواردی ماننـد تفاوت گرانـروی سـيالات تزریقی و تولیدی و تفاوت نمودارهای تراوایی نسبی از نمودار خطی و تعیین استانه ای برای باینریسازی نقشه تراوایی مخرن از مسائلی است که در تعمیم رابطـه مقياسبنـدى زمانبرونـزد مؤثـر اسـت. براسـاس آنچـه مطـرح گردیـد روش پرکولاسـیون در مهندسـی نفت بهصورت محدود استفاده شده است. این روش آماری نسبتاً جدید بوده و بیشتر استفاده آن نیز مربوط به مقياس حفره است. جالب است كه با وارد شدن به مقياس حفره در عکسبرداری از آن، محققین به این نتیجه رسیدهاند که ارائه روابط

پر و شرفت شماره ۱۲۵ مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

برای پیشبینی در مقیاس حفره (برای مثال در رابطه با تراوایی، اشباع سیالات و غیره) ساختاری تصادفی دارد که به صورت قطعی قابل تعیین نیست و تنها با استفاده از روابط فیزیک آماری و استفاده از احتمالات میتوان رابطه کلی برای بررسی رفتار دینامیک محیط متخلخل ارائه کرد. یکی از موارد جدید در این کار تحقیقاتی استفاده از مقیاس میدانی برای مطالعه است و از مدلهایی با مقیاس میدان و چاه تزریقی و تولیدی برای تهیه جامعه آماری استفاده شده است.

#### روش تحقيق و رويكرد مدلسازى

Andrade و همکاران با در نظر گرفتن اندازه سیستم (L) و میرزان اشغال شدگی جایگاه ها (p) به بررسی ثوابت روابط پر كولاسيون پرداختند. نتيجه مطالعه آنها در قالب جدول ثوابت (که دارای مقادیر ثابت و کلے هستند) ارائـه شـد [۱۶]. در همـان سـال، King و هم کاران در مطالعه دیگری، رابطهای را برای زمان پس از برونزد سیال تزریقی در یک مخزن واقعی بررسے نمودند. نتیجے ایے بررسے رضایت بخے ش بود. در این مطالعه برای پیشبینی حجم تولید نفت پس از برونزد (V) رابطه ۱ پیشنهاد شد. این رابطه برحسب بعد فركتالي backbone و زمان توليد نوشته شده است. توان β براساس نتایج شبیهسازی حـدود۸۰۰۰/۰ ± ۰/۶۳ محاسبه شـد [۱۷].  $V(t \to \infty) \sim \left(\frac{r^{d_B}}{t}\right)^{\beta}$ (1) کـه در آن، t زمانبرونـزد و r فاصلـه بیـن دو نقطـه تزريق و توليد و d<sub>B</sub> توان فركتالي است. در مطالعه مذكور، رابطه پركولاسيون براى مخازن نفتى تحت تزريق آب با فرمولاسيون كلى زير ارائه شد [١٧].  $P(t_{br} | r, L, p) \sim \frac{1}{r^{d_t}} (\frac{t_{br}}{r^{d_t}})^{-g_t} \exp(-a(\frac{t_{br}}{r^{d_t}})^{-\varphi})^{(\Upsilon)}$  $\exp(-b(\frac{t_{br}}{L^{d_t}})^{\psi})\exp(\frac{-ct_{br}}{|p-p_{+}|^{-\nu d_t}})$ متغیرهای رابطه فوق در جدول ۱ ارائه شدهاند  $[\gamma\gamma]$ 

سارا شکراله زاده و همکاران ۷

بررسی نسبت گرانروی ...

P <sub>c</sub>	R	р	L	t <sub>br</sub>	Р			
حد آستانه (۰/۶۶۸)	فاصله بین چاهی (بدون بعد)	ضخامت کل به مفید	طول مخزن (بدون بعد)	زمانبرونزد (بدون بعد)	احتمال زمانبرونزد برای مخزنی دوبعدی با ابعاد L <sup>2</sup> ، میزان ضخامت خالص به ناخالص p فاصله بین چاهی r، و زمانبرونزد f <sub>br</sub>			

جدول ۱ تعریف متغیرهای رابطه ۱ پرکولاسیون [۱۷]

و  $\P$ ، بهترتیب ویسکوزیته، اندازه ناحیه تراوا (ماسه سنگ در مدل)، شعاع چاه، افت فشار محیط، تراوایی و تخلخل است. برای تعیین این زمان از فرض رابطه دارسی بهعنوان رابطه پایه استفاده شده است (با فرض برای در محیط ماسههای (با فرض برقی رابا فرض وجود رابطه دارسی و وجود تراوای مخزنی حین حرکت سیال از چاه تولیدی به چاه تزریقی). با فرض وجود رابطه دارسی و وجود تعیداد زیادی بلوکهای ماسهای بین مسیر چاه تولیدی و ترکت،  $_{\rm s}$ ، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$t_{s} = \frac{rr_{s} \mu \ln(\frac{r}{r_{w}})}{1.127 * 5.615 * k_{s} (p_{injection} - P_{\text{Production}})}$$

رابطـه فـوق بـه طریـق مشـابه بـرای هندسـه جریـان خطـی مخـازن هـم میتوانـد محاسـبه گـردد کـه نـوع دیگـری از هندسـه جریانـی اسـت [۱۷]. در رابطـه ۵ بـا جایگزینـی µ بـا مقـدار واقعـی امـکان بـدون بعدسـازی براسـاس گرانـروی وجـود دارد. گرانـروی آب در شـرایط تزریـق نزدیـک بـه ۲ ۱ گـزارش شـده و گرانـروی نفت دارای بـازه بسـیار وسـیع اسـت کـه بـرای نفت سـبک نزدیـک بـه گرانـروی آب امـا بیشـتر از آن و بـرای نفت سـنگین تـا چنـد ده هـزار سـانتی پویـز گـزارش شـده است. در ایـن تحقیـق گرانـروی آب ثابـت حـدود ما ۸/۰ فـرض شـده اسـت و گرانـروی نفت متغیـر اسـت. بـا تغییـرات گرانـروی نفت، نسـبت تحرکپذیـری فازهـای آب و نفـت (M) نیـز تغییـر مییابـد.

$$M = \frac{M_{water}}{M_{oil}} = \frac{Kk_{rw} / \mu_w}{Kk_{ro} / \mu_o} = \frac{k_{rw} \mu_o}{k_{ro} \mu_w}$$
(%)  

$$K = \frac{M_{water}}{M_{oil}} = \frac{K_{rw} / \mu_o}{K_{ro} / \mu_o} = \frac{K_{rw} / \mu_o}{K_{ro} / \mu_o} = \frac{K_{rw} / \mu_o}{K_{ro} / \mu_o} = \frac{K_{rw} / \mu_o}{K_{ro} / \mu_o}$$
(%)

نسبی فازها در این مطالعه صرفنظر شده است.

میران اشغال شدگی p در مهندسی نفت معادل با نسبت خالص به ناخالص (NTG) است. حد آستانه یا p برای انواع شبکه پرکولاسیون مقادیر مشخص و ثابت دارد (جدول ۱) در مطالعه حاضر مخزن دوبعدی است و نواحی مخزنی با تعریف میگردند، مربعی شکل با قابلیت هم پوشانی تعریف میگردند، مقدار ثابت حد آستانه (p) برابر ۱/۶۶۸ است. بقیه متغیرهای رابطه ۲ ثوابتی هستند که برای مسائل پرکلاسیونی دو بعد و سهبعد به شرح جدول ۲ هستند.

رابطـه اصلـی پرکولاسـیون (رابطـه ۲) یـک رابطـه کلـی است که در آن متغیرهای محدود هندسی وجود دارد. به این ترتیب در میدانی که آب تزریق میگردد تأثیر تفاوت گرانروی آب و نفت در این رابطه مشاهده نمى شود. لدا وارد نمودن تأثير مشخصات سنگ و سیال (از جمله تراوایی نسبی و گرانروی) بایــد بــه نحــوی بــر مبنــای فیزیـک مســئله، وارد روابط گردد [۱۷]. یک ایده برای وارد نمودن این متغیرها به رابطه ۲ استفاده از آنها برای بدون بعد سازی پارامترهای رابطه است. برای بدون بعدسازی متغیرهای مخزنے و استفادہ در مدل شبیهساز از رابطـه زمـان بیبعـد مبتنـی بـر جریـان اسـتفاده شدهاست. رابطه بیبعد پیشنهادی براساس رابطه دارسی برای جریان با هندسه شعاعی و خطی به فرم زير است [۱۷].  $t_{s}^{radial} = \frac{c_{2}\phi p \mu r_{s}^{2} \ln(r_{s} / r_{w})}{K \Delta P(r / r_{s})}$ (٣)

$$\int_{s}^{linear} = \frac{c_1 \phi p \,\mu r_s^2}{K \,\Delta P \left( r \,/ \,r_s \right)} \tag{(f)}$$

در این رابطـه، <sub>s</sub> t زمـان عبـور سـیال از یـک محیـط تـراوا و وابسـته بـه هندسـه جریـان (خطـی یـا شـعاعی) در نظـر گرفتـه شـده اسـت. پارامترهـای Κ ،ΔΡ، r<sub>w</sub>، r<sub>s</sub>, μ

پر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۳۵ مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

مقاله پژوهشی

ثوابت رابطه در دو بعد [۲۴]								
d <sub>t</sub>	g	¢	<b>)</b> <sub>1</sub>		φ <sub>2</sub>		Ν	متغير
۰/۰۰۵±۱/۱۳	・/ <b>١</b> ±٢/٢	Y/	14		۴	•/• ¥±•/AA		مقدار T D
	ثوابت رابطه برای دو بعد و سه بعد [۱۶].							
d <sub>t</sub>	g	φ <sub>1</sub>	a	φ2	В	ν	С	
۰/۱±۱/۴۵	・/ <b>١</b> ±٢/ <b>١</b>	۱/۶	۲/۵	۲	٣/٣		(p <pc) td="" ۲="" ۹<=""><td>مقدار T D</td></pc)>	مقدار T D
(p <pc), 1="" td="" ۶<=""></pc),>								
•/•&±1/٣٣	・/ <b>\</b> ±Y	٣	١/١	٣	۵	١/٣٣	(p>pc) ۲/۶	مقدار ۳ D

جدول ۲ ثوابت رابطه اصلی پر کولاسیون

ایـن مدلها دوبعـدی و متشـکل از ۲۰۰×۲۰۰×۱ گریـد بـا انـدازه <sup>د</sup>m ۱۰ هسـتند. سـریهای مختلـف مدلهـای تراوشـی بـا متغیرهـای متنـوع تهیـه شـد. بـا توجـه بـه نیـاز بـه تهیـه هـزاران مـدل، ایـن مرحلـه بـه اسـتفاده از از کدنویسـی در محیـط نرمافـزار پتـرل<sup>۲</sup> بـا اسـتفاده از بخـش جریـان کارهـا<sup>۳</sup> نـرم افـزار، بهصـورت خـودکار اجـرا گردیـد. ایـن مدلسـازی بـا اجـرای دو حلقـه مسـتقل شبیهسـازی بهدسـت آمـد. مدلهـا بـا سـه فـرض (الـف) مدلهـای تصادفـی بـا توزیـع نرمـال، (ب) فـرض (الـف) مدلهـای تصادفـی بـا توزیـع نرمـال، (ب) امـکان برقـراری ارتبـاط بـيـن چـاه تزریقـی و تولیـدی و (چ) بـرای مقبولیـت جامعـه آمـاری تعـداد کادی مدل بـرای حالـت پایـه تهیـه شـد. شـکل ۲ تعـدادی از مدلهـای تخلخـل و تراوایـی مربـوط بـه دو حالـت از مدلهـای تخلخـل و تراوایـی مربـوط بـه دو حالـت نمایـش میدهـد.

در مرحله شبیه سازی جریان، یک حالت تولید-تزریق مشخص تعریف گردید. در این حالت، یک حلقه چاه تولیدی و تزریقی فرض گردید. چاه تولیدی در سلول (۵۰, ۵۰) و چاه تزریقی (۱۵۰, ۱۵۰) با نرخ تولید تزریق ۵۰ بشکه در روز جهت حفظ با نری تولید تزریو ۵۰ بشکه در روز جهت حفظ برای کلیه مدل های استاتیک یکسان فرض شده است. کلیه اطلاعات مربوط به خصوصیات دینامیک در جدول ۴ ارائه شده است. لـذا نسبت تحرك پذيرى عمدتاً بيانگر نسبت ویسےکوزیتہ دوفاز و با M نشان دادہ مے شود. طے مطالعات انجام شده ونتايج شبيهسازي مشخص شـد کـه رابطـه تخميـن بـرونزد براسـاس جريـان خطبی رابط۔ ۴ برای مدل ھاپنی با اشغال شدگی (p) یایین دقت مناسبی دارد و رابطه تخمین برونزد براساس جریان هندسی رابطیه ۳ بیرای مدلهایی بــا اشغالشــدگی (p) بــالا دقــت مناســبی دارد [۱۹]. لـذا رابطـه پیشـنهادی شـکراله زاده بـرای تخمیـن زمانبرونزد بهصورت زیر است:  $t_s = xt_s^{radial} + (1-x)t_s^{linear}$ (Y) در این رابطه، متغیر x یک ضریب وزنی بین صفر و یک است. مقدار دقیق متغیر x در این بررسی برای هر حالت (مقادیر p مختلف) با استفاده از بهينهيابي تعيين گرديد.

#### نتایج و بحث و بررسی تهیه مدل استاتیک

در مرحله اول پیادهسازی رویکرد تراوشی لازم است دهها مدل تصادفی استاتیک مخزن با ساختار تراوشی تهیه شوند. لذا در ابتدا بانک دادهای از مدلهای استاتیک تراوشی تهیه شد. کلیه اطلاعات مربوط به این مدلها در جدول ۳ ارائه شده است. ضخامت خالص به ناخالص ' برای کل مخزن برابر ۱ در نظر گرفته شد و بخشهای مخزنی و غیر مخزنی با تفاوت در تخلخل و تراوایی از هم تفکیک شدند.

<sup>1.</sup> Net To Gross (NTG)

<sup>2.</sup> Petrel

<sup>3.</sup> Workflows

سارا شکراله زاده و همکاران 🔋

بررسی نسبت گرانروی ...

Archive of SID.ir

رابطه جهت محاسبه	واحد	مقدار	متغير				
$k = \frac{1e4\phi^3}{\left(1-\phi\right)^2}$	D	۵۰۰۰ و ۰ بهترتیب در بخش تراوا و غیر تراوا	K	١			
تخصيص مقدار	%	۰/۲۵ و ۰ بهترتیب در بخش تراوا و غیر تراوا	φ	٢			
تخصيص مقدار	بدونبعد	١	NTG	٣			
تعريف مدل استاتيك	m <sup>3</sup>	۱×۲۰۰×۲۰۰ گرید به ابعاد ۱۰۳	گريدبندي	۴			
نمودار خطی تراوایی نسبی آب و نفت بدون اشباع باقیمانده							
یک چاه تولیدی در سلول (۵۰, ۵۰) و یک حلقه چاه تزریقی (۱۵۰, ۱۵۰) با نرخ تولید تزریق ۵۰ بشکه در روز جهت حفظ نسبت تخلیه <sup>۱</sup> برابر ۱							

جدول ۳ مقادیر استفاده شده در مدلهای تراوشی در حالت پایه (استاتیک)



شکل ۲ وضعیت تراوایی و تخلخل در تعدادی از مدلهای استاتیک

1. Voidage Ratio

پر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۵ مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

مقاله پژوهشی

جدول ۴ مقادیر استفاده شده دینامیک در مدلهای تراوشی

رابطه جهت محاسبه	واحد	مقدار	متغير	
تخصيص مقدار	psi	4	P <sub>i</sub>	١
تخصيص مقدار	$F^{\circ}$	14.	T <sub>i</sub>	۲
تخصيص مقدار	%	$S_{oil} = 100, S_{gas} = 0, S_{water} = 0$	اشباع اوليه	٣
Lasater (1958) رابطه	scf/stb	۲۱.	R <sub>s</sub>	۴
رابطه (McCain (1990)	ppm	7	شوری آب	۵
	bbl/stb	١/١٣	B <sub>o</sub>	۶
تخصيص مقدار	psi	117.	P <sub>b</sub>	٧
	ср	١/٤٣• /٨	μ	٨
تخصيص مقدار	psi	•	P <sub>c</sub>	٩

۵ ارائه شده است.

**جــدول ۵** مقادیـر بهدسـت آمـده در شبیهسـازی مـدل بـا نسـبتهای تحرکیذیـری متفـاوت بخــش غیرمخزنــی

	. ,	, .	
تعداد مدلهای شبیهسازی شده	زمانبرونزد میانگین (سال)	شرح مدل	Р
٩٧	۳/۳۸	$M= \cdot / \Delta$	• /9
۱۳۳	۲/۱۶	M= ۱	
٨۶	٠/٩٠١	M= ۲	
١٠۵	•/794	M= ۵	
١١٩	۰/۰ ۱۶	M= ۱۰	

ش کل ۳ تغیی رات در میانگی ن زمان برونزد را در حالت های ۸/۵=M تا ۱۰ = M نمای ش میدهد. نمایش بازه ۵ روزه در این نمودارها تنها برای مقایسه است. در واقع این بخش از ۲۰/۰۵٪ زمان میانگین برونزد کل مجموعه شبیه سازی استفاده شده است. در صورت استفاده از بازه بزرگتر (برای مثال ۵ روز) امکان عدم شناسایی دقیق زمان برونزد وجود دارد. در شکل ۴، سه سری نمودار برای هر کدام از Mها رسم شده است. نمودار اول از سمت چپ هیستوگرام زمان برونزد است. نمودار اول از سمت راست راست زمان برونزد است. نمودار اول از سمت راست راست زمان برونزد است. نمودار اول از سمت راد مت راست زمان برونزد است. نمودار اول از سمت راد مت راست در ادامه، شبیه سازی عددی برروی کلیه مدل های استاتیک اجرا شد. این کار با قابلیت های موجود نرم افزار پیاده سازی شد. این کد برای یک مدل استاتیک مشخص، با تخلخل و تراوایی تعیین شده، نمودارهای تراوایی نسبی و خصوصیات سیال مشخص، شرایط اولیه یکسان و حالت تولید و تزریق از پیش تعیین شده، یک حالت شبیه سازی یا "case" جدید تعریف میکند. سپس با فراخوانی یا یا "case" جدید تعریف میکند. سپس با فراخوانی نرمافزار مذکور به صورت Black oil حل میکند. پس از پایان شبیه سازی برروی یک حالت، صفحه اجرای اکلیپس بسته شده و مراحل ساختن حالت تولیدی جدید و شبیه سازی برروی مدل استاتیک اعدی به صورت خودکار شروع می شود.

برای تعیین تعداد کافی مدل استاتیک، تغییرات میانگین زمانبرونزد بررسی شد. با درنظر گرفتن شرطهای سهگانه ۳۰۰ مدل برای یک مقدار اشغالشدگی مشخص (۲۶=۲) مشخص شبیهسازی شده و میانگین زمانبرونزد این ۳۰۰ مدل برابر م۰۵ روز است، لذا ۲/۵ روز بهعنوان معیار سنجش کفایت تعداد مدل ها انتخاب شد. نتایج تغییرات نسبت گرانروی در این حد اشغال شدگی در جدول

سارا شکراله زاده و همکاران ۱۱

بررسی نسبت گرانروی ...



**شکل ۳** تغییرات در میانگین زمانبرونزد به منظور تعیین تعداد مدلهای کافی با تغییر نسبت گرانروی برای p= ٠/۶



**شکل ۴** مقایسه زمانبرونزد در مدل با درجه اشغالشدگی p=۰/۶ با نتایج شبیهسازی و رابطه پرکولاسیون برای زمانیکه نسبت گرانروی M=۵ ، M=۲ ، M=۱ ، M=۰/۵ و ۱۰ است

مقاله پژوهشی ١٢

**بر وش نفت** شماره ۱۲۵ مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶–۳

مناسب رابطه پرکولاسیون بهدست آمده براساس بدون بعدسازی مناسب را نشان میدهد. علاوه بر مقایسه رابطه پرکولاسیون با نتایج شبیهسازی عددی، موضوع دیگری نیےز مورد بررسے قرار گرفت. این موضوع تغییرات در زمانبرونزد برای حالات مختلف M بود. به این منظور هیستوگرام مربوط به زمانبرونزد برای مقادیر متفاوت M در شکل ۵ رسم شده است. در هر کدام از منحنی های این شکل، هیستوگرام حالت ۱ ≠M در کنار هیستوگرام حالت ۱ =M رســم شــده اســت. ایــن منحنــی نشــان میدهــد: ۱. هیستوگرام زمانبرونزد برای مدلهای نزدیک به آستانه پرکولاسیون (حالت ۶/ p=۰) و با گرانروی های مختلف، با افزایش گرانروی نفت، میانگین زمانبرونزد کاهش می یابد. ۲. نمودار توزيع احتمالي با افزايش M باريك تر و بلندتـ شـده اسـت کـه نشـان میدهـد.

در هرکدام، نمودار زمانبرونزد حاصل از شبیهسازی عــددی در کنــار پیشبینــی بهدســت آمــده از رابطــه پرکولاسیون رابطه ۲ رسم شده است. در رسم این نمودارها برای بدون بعدسازی از رابطه بهینه رابطه ۷ اســتفاده شــده اسـت. گرانـروی ســیال در قالــب M، یکے از متغیر های رابطه ۵ است. لذا، نسبت گرانروی استفاده شده در شبیهسازی عددی به این طریق در محاسبات رابطه یر کولاسیون مؤثر بوده است. در واقع اینجا به منظور بدون بعدسازی متغیرهای رابطـه ۲، نسـبت M وارد روابـط شـده اسـت. در ایـن بخــش تنهــا بــا قــرار دادن مقــدار گرانــروی جدیــد در رابطــه ۵ و اســتفاده از آن بـا رابطــه ۷ بــرای بــدون بعدسازی رابطـه ۲، نمـودار پرکولاسـیون بهدسـت آمـده است. مقایسه سطح خطای این دو رویکرد در جدول ۶ خلاصـه شـده اسـت. نمودارهـای نشـان داده شـده در شکل ۴ و بررسے مقادیہ خطہا در جندول ۶ تطابق

جدول ۶ خطای پیشبینی از رویکرد پرکولاسیون در مقایسه با نتایج شبیهسازی برای مقادیر مختلف M

خطای پیشبینی نمودارهای Quantile-Quantile	مقدار x	شرح مدل	Р
۰/۹۳۲۶	•	M= •/Δ	•  9
۰/۸۸۱۴	•	M= ١	
۰/۹۵۸۸	•	M= ۲	
۰/۹۵۸۴	•	M= ۵	
۰/۵۹۰۵	•	M= ۱ •	



شیکل ۵ مقایسیه توزیع زمانبرونزد حاصل از شبیهسازی برای مقادیر مختلف M در مقایسیه با حالت M=۱ برای شیرایط نزدییک به آسیتانه تیراوش ۶/۶ =p

سارا شکراله زاده و همکاران ۱۳

تاثیر قرار داده و به رفتار سیستمهای همگن نزدیک شـود. در بقيـه حـالات روش پركولاسـيون پيشبينـي مناسبی داشته است. مشابه همین شبیهسازی برای حالت اشغال شدگی برابر با ۰/۸ انجام شد. کے بے منظور جلوگیے کا زطولانے شدن متن از ذکر جزئیات خودداری می شود. با رسم نمودارهای لگاریتمی زمانبرونزد بدون بعد برحسب نسبت گرانروی، امکان برازش خط با تقریب مناسب وجود دارد. امـا ایـن خـط همتـا نبـوده و بـرای ۶/ ۰ =p و ۸/ • = متفاوت است. از أنجا كه ارتباط زمان برون زد میانگین با توان سوم p مشخص میکند، در اینجا با استفاده از این تقریب نمودارهای مربوطه رسم شد. به این ترتیب، اول زمانبرونزد بهدست آمده از شبیهسازی با تقسیم بر مقدار t مربوطه نرمالایز شد و در نهایت در p<sup>3</sup> ضرب و براساس M رسم گردید. براساس شکل ۶ می توان نتیجه گیری نمود زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس بندی زمان برونزد علاوهبر وابستگی به درجه اشغال شدگی به نسبت گرانروی دو سیال تزریقی و تولیدی M هم وابسته است. رابطه توصيف كننده اين وابستكي براساس نتایج حاصل شده در نسبت های گرانروی مختلف از شکل ۶ رابطه توانی و با توان ۱/۳ را نشان میدهد.  $t_{br} = f(t_s, p^{-3}, M)$ (λ) از رابطــه فـوق مىتـوان بـراى پيشبينــى ميانگيــن زمان، رونزد برای مدل هایی با مقادیر غیر از مقادیـ گـزارش شـده در ایـن مطالعـه اسـتفاده نمـود. بررسی نسبت گرانروی ...

با افزایش نسبت گرانروی ساختار جریانی به مدل همگن نزدیک شده است. ۳. با کاهش گرانروی ساختار جریانی به مدل تصادفی نزدیکتر میشود. بر این اساس و با توجه به اینکه استفاده از روش پرکولاسیون برای مدل همگن روشی مناسب نیست میتوان توجیه نمود که خطای پیشبینی، زمانی که ۱۰ = M است خطای بالایی (۲/۶-۹۲) دارد. در بقیه حالات روش پرکولاسیون پیشبینی مناسبی داشته است.

نتایج فوق برای مدلهای با درجه اشغال شدگی بالاتر از آستانه پر کولاسیون (نزدیک به مدلهای همگن با مقدار ۸/۰ =p) نیز تکرار شد. این نتایج نشان داد یافتههای مربوط به قبل از حد آستانه برای مقادیر بالای p نیز قابل قبول هستند. یعنی: ۱. با افزایش گرانروی نفت، میانگین زمان برون زد کاهش می یابد.

۲. نمودار توزیع احتمالی با افزایش M باریکتر و بلندتر شده است. این موضوع برای p بالاتر از حد آستانه شدیدتر است. با افزایش نسبت گرانروی ساختار جریانی به مدل همگن نزدیک شده است. با کاهش گرانروی ساختار جریانی به مدل تصادفی نزدیکتر میشود.

مقادیـر خطـای پیشبینـی زمانبرونـزد نسـبتاً بالایـی در حالـت نسـبت تحرکپذیـری بـالا (M= ۱۰) از جـدول ۶ دیـده میشـود (R<sup>2</sup>~۰/۶) کـه میتوانـد بـا اثـرات انگشـتی شـده (fingering) رفتـار محیـط تـراوش را تحت



شکل ۶ تغییرات در میانگین زمانبرونزد با تغییرات در نسبت تحرک پذیری سیالات

پر و ابان ۱۴۰۱، صفحه ۱۳۵ مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

تبدیل گردید. از بین چاههای موجود، دو چاه بهعنوان چاههای تزریقی و تولیدی در نظر گرفته

و فعال شد. سایر اطلاعات مربوط به شبیهسازی

مخزن مانند افت فشار بین دوچاه و ابعاد ناحیه

شبیهسازی شده و فاصله بین دو چاه در جدول ۷

خلاصه شده است. سپس با اجرای شبیه سازی با

نرمافزار جریان زمانبرونزد محاسبه شد و با مقدار

ییش بینے شدہ رابط۔ معمیے دادہ شدہ زمان برونے د

بر پایه پرکولاسیون (روابط ۲ و ۸) مقایسه گردید.

زمانبرونزد در مخـزن حـدود ۲۰ سـال اسـت و در بـازه قابــل قبــول پیشبینــی روش پرکولاســیون براسـاس

شکل ۷ قـرار می گیـرد.

۱۴ مقاله پژوهشی

مطالعه موردی در یک مخزن واقعی

در ادامه این مطالعه و به منظور اعتبارسنجی نتایج رویکرد پیشنهادی در پیش بینی زمان برونزد یک مخزن واقعی انتخاب و برش های دوبعدی از آن در جهتهای مختلف تهیه گردید. روش تبدیا نقشه مخزنی به مدل تراوش با در نظر گرفتن یک مقدار مناسب آستانه بر دادههای تراوایی مخزن (به طوری که اتصال بین چاهها فراهم باشد) در نظر گرفته شد. بدین ترتیب گریدهای با مقدار تراوایی کمتر از مقدار آستانه غیر مخزنی (تراوایی صفر) و گریدهای با تراوایی بیشتر گرید مخزنی

جدول ۷ اطلاعات مربوط به شبیه سازی مخزن

φ	pΔ	K	r	p <sub>c</sub>	r	р	L	t <sub>br</sub>
%	psi	md	m	-	m	-	m	day
٧	75	۱۰۰	444	•/977	9327	٠/٩١	11070	۷۳۰۵



شکل ۷ مقایسه زمانبرونزد در مخزن واقعی با نمودار توزیع زمانبرونزد براساس روابط ۸ و ۲

نتيجهگيرى

شد. در این کار برای ۳۰۰ مدل مختلف مخزن بهعنوان مدلهای تراوشی با سیالات با گرانروی مختلف شبیهسازی جریان انجام شد. در رابطه اولیه زمانبرونزد بر پایه پرکولاسیون فرض برابر بودن گرانروی سیال درجا و سیال تزریقی وجود داشت که بهعنوان مدل پایه در این مطالعه در نظر گرفته شد. به منظور بررسی اثر نسبت گرانروی دو فاز، تعدادی از شبیهسازیها با تغییر این نسبت

در این مطالعه از رویکرد پرکولاسیون برای پیش بینی زمان برون زد سیال تزریقی به مخازن نفتی استفاده شد. به طور خاص با تعمیم رابطه کلی برای تخمین زمان برون زد بر پایه پرکولاسیون با استفاده از رویکرد بی بعد سازی بر مبنای زمان مشخصه بی بعد با استفاده از رابطه دارسی با هدف در نظر گرفتن اثر نسبت گرانروی فازها استفاده

سارا شکراله زاده و همکاران 🛛 ۱۵

بررسی نسبت گرانروی ...

دو فاز به فرم یک رابطه توانی با توان ۱/۳ دارد. لذا با در نظر گرفتن این وابستگی توانی برای نسبت گرانروی دوفاز و با شبیهسازی یک مخزن واقعی و مقایسه نتایج زمان رونزد در آن کارآیی تابع توزیع زمان برونزد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که این رویکرد زمینه به کارگیری رابطه را برای مخازن واقعی میسر نموده است

بــه مقـدار بیشــتر و کمتــر از یـک انجـام گرفــت و زمانبرونــزد در آنهــا محاســبه گردیــد. در ادامــه نمودارهـای هیســتوگرام بهدســت آمــده از شبیهسـازی با رابطه پرکولاسیون مقایسه گردید و رابطه تعمیم دادہ شــدہ بــرای پیشبینــی زمانبـرونزد بــرای مخازنے با نسبت گرانے وی ۵/۰ تا ۱۰ بررسے شد. نتایے نشان داد زمان مشخصه مناسب در رابطه مقياس بندي زمان يرونـزد وابسـته بـه نسـبت گرانـروي

مراجع

[1]. Sahimi M (1994) Applications of Percolation Theory, CRC Press.

[2]. King P, Masihi M (2018) Percolation theory in reservoir engineering, Published by World Scientific, 300, 978-1-78634-523-3.

[3]. Flory P J (1941) Molecular size distribution in three dimensinal polymerrs, Journal of the American Chemical Society, 63, 11: 3083-3090.

[4]. Broadbent S R, Hammersley J M (1957) Percolation processess, Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 629-641.

[5]. Selyakov V I, Kadet V V (1996) Percolation models for transport in porous media with applications to reservoir engineering, Springer.

[6] King P R, Buldyrev S V, Dokholyan N V, Havlin S, Lopez E, Paul G, Stanley H E (2002) Using percolation theory to predict oil field performance, Physica, A314: 103-108.

[7]. Chandler R, Koplik J, Lerman K, Willemsen J F (1982) Capillary displacement and percolation in porous media, Journal of Fluid Mechanics, 119: 249-267.

[8]. Lenormand R, Bories S (1980) Description d'un mécanisme de connexion de liaison destiné à l'étudedu drainageavec piégeage en milieu poreux, Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances De (L)Académie Des Sciences, 279-291.

[9]. Wilkinson D, Willemsen J F (1983). Invasion percolation: a new form of percolation theory, Journal of Physics A: Mathematical and General, 16: 3365-3376.

[10]. Chayes J T, Chayes L, Newman C M (1985) The stochastic geometry of invasion percolation, Communications in Mathematical Physics, 101: 383-407.

[11]. Bak P, Tang C, Wiesenfeld K (1987) Self-Organized Criticality: an explanation of 1/f noise, Physical Review Letters, 59, 4: 381-384.

[12]. Dickman R, Munoz M A, Vespignani A, Zapperi S (2000), Paths to self-organized Criticality, Brazilian Journal of Physics, 30, 1: 27-39.

[13]. Dhar D (2017) Self-tuning to the critical point: invasion percolation, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical.

[14]. Masihi M, R Shams, PR King (2022) Pore level characterization of Micro-CT images using percolation theory, Journal of Petroleum Science and Engineering, 110113.

[15]. Rui G, Xin W, Mingguang C, Bo C, Chunming H (2017) The fractures optimization method with the threshold pressure of multistage fracturing in tight oil reservoir, In SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition. OnePetro.

[16]. Andrade J S, Buldyrev S V, Dokholyan N V, Havlin S, King P R, Lee Y, Paul G, Stanley H E (2000) Flow between two sites on a percolation cluster, Physical Review, E 62, 6: 1-31.

[17]. King P R, Buldyrev S V, Dokholyan N V, Havlin S, Lopez E, Paul G, Stanley H E (2002) Percolation Theory, London Petrophysical Society.

[18] Ganjeh-Ghazvini M, Masihi M, Ghaedi M (2014) Random walk-percolation based modeling of two phase flow in porous media: breakthrough time and net to gross ratio estimation, Physica A, 406: 214-221.

[19]. Shokrollahzadeh S, Masihi M, M Ghazanfari H, King P (2019) Effect of characteristic time on scaling of breakthrough time distribution for two-phase displacement in percolation porous media, Transport in Porous Media, 130, 3: 889-902.

[20]. Sadeghnejad S, Masihi M, Pishvaei M, Shojaei A, King P R (2014) Estimating connected volume of hy-



پر و شرفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

مقاله پژوهشی 18

drocarbon during early reservoir life by percolation theory, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 36, 3: 301-308.

[21]. Sadeghnejad S, Masihi M (2016) Point to point continuum percolation in two dimensions, Journal of Statistical Mechanics, Theory and Experiment, 10: 103210.

[22]. Sadeghnejad S, Masihi M (2017) Analysis of a more realistic well representation during secondary recovery in 3-D continuum models, Computational Geosciences, 21, 5-6: 1035-1048.

[23]. Sadeghnejad S, Masihi M (2011) Water flooding performance evaluation using percolation theory, Iranian Journal of Petroleum Science and Technology, 2: 19-23.

[24]. Dokholyan N V, Lee Y, Buldyrev S V, Havlin S, King P R, Stanley H E (1999) Scaling of the distribution of shortest paths in percolation, Journal of Statistical Physics, 93, 3: 603-613.





Petroleum Research Petroleum Research, 2022(October-November), Vol. 32, No. 125, 1-3 DOI:10.22078/PR.2022.4570.3060

# Effect of Viscosity Ratio of Injection Fluid and Reservoir Fluid on Prediction of Breakthrough Time Using Percolation Concepts

Sara Shokrollahzadeh Behbahani, Mohsen Masihi\* and Mohammad Hossein Ghazanfari Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran masihi@sharif.edu DOI:10.22078/PR.2022.4570.3060

Received: July/31/2021

Accepted: February/23/2022

#### Introduction

In this paper, we use percolation theory approach as an appropriate model of connectivity and dynamics in complex geometries [1,2]. This approach provides some simple power laws from which likely outcomes can be predicted by simple algebraic transformations [3].To briefly describe this approach, let starts with a very simple porous medium. The medium is assumed to be a lattice with a fraction p of randomly occupied (or permeable) sites and the fraction 1-pof non permeable sites. Clusters are formed when neighbouring sites are occupied. At one particular p (called percolation threshold,  $p_c$ ) for the first time one large cluster can connect the two sides of the medium (so called spanning or percolating cluster).

From field-scale application of percolation theory, it is possible to estimate the breakthrough time of injected fluid, a suitable well spacing, the fraction of sands connected between two wells and the post breakthrough behavior e.g., rate of oil production decline [4].

The regular percolation models can be formed on the lattice of sites (e.g., square, triangle, honeycomb) or network of bonds. The bond network model consists of pores and throats. The more applicable network model used in petroleum engineering made of sandbodies with different shape, diameter and lengths that are connected together in a form of a network of pores and throats. In such continuum models, the occupancy p is defined as the area fraction covered by the good sands

(discounting the overlapping).

The aim of this study is to determine the breakthrough time of an injected fluid into the production well at field scale by using percolation scaling relations. However, the simple assumptions such as passive tracer injection in the primary percolation scaling relations questionable, hence, in this study we present a method to extend the applicability of the predictions of the percolation method to the cases with different mobility ratios.

#### **Theoretical Backgrounds**

The application of dynamic percolation to model flow in a porous medium started in 1980s. Some details for percolating systems can be found in references [3,5]. However, some assumptions used in percolation theory limits the application of it for realistic field models. For example, the scaling ansatz of percolation properties such as breakthrough time was originally developed by using random Walk and Monte Carlo simulation on regular lattices. However, more realistic porous media can be made of overlapping sands, and the physics of two phase displacement is needed. In this study, we used the breakthrough scaling equation (Equation 1) [4]. The occupancy p in percolation terminology is equivalent to the net to gross (NtG) in petroleum engineering. As said before, the threshold value  $(p_{a})$  depends on types of percolation network used in the model.

Petroleum Research, 2022(October-November), Vol. 32, No. 125

$$P(t_{br} | r, L, p) \sim \frac{1}{r^{d_{t}}} (\frac{t_{br}}{r^{d_{t}}})^{-g_{t}'} \exp(-a(\frac{t_{br}}{r^{d_{t}}})^{-\varphi_{t}})$$
$$\exp(-b(\frac{t_{br}}{L^{d_{t}}})^{\psi_{t}}) \exp(\frac{-ct_{br}}{|p-p_{c}|^{-\nu d_{t}}})$$
(1)

where,  $P(t_{br})|r$ , *L*, *p*) stands for breakthrough time distribution  $t_{br}$  for a 2D system of size L with occupancy p and well spacing r and *a*, *b*, *c*, *d*<sub>*i*</sub>, *g*<sub>*i*</sub>,  $\varphi$ ,  $\psi$  are coefficients and exponents with numerical values in Table 1.

In a simple 2D model, the reservoir is made of randomly distributed sands (as square objects) with possibility of overlapping to each other. The numerical values for the variables and constants in Equation 1 obtained from simulations of 2D and 3D problems can be found in References [6,7]. The application of the scaling equation (Equation 1) for the breakthrough time in the real field where injected fluid (e.g., water) has different properties than displaced fluid (e.g., oil) or needs some modifications [3]. As emphasized by References [7,8], the time variables in Equation 1 should then be normalized with an appropriate reference time based on flow geometry in the system. Also, another correction is needed to consider the effect of mobility ratio M.

	Variable	Value	Unit
1	φ	Reservoir: $\phi$ =0.25, Non reservoir: $\phi$ =0	fraction
1	K	Reservoir: $k=104 \phi 3/(1-\phi)$ , Non reservoir: K=0	Darcy
3	NtG	1	-
4	Grid	Number= $10^3$ cells, (Size= $200 \times 100 \times 1$ )	No., (m <sup>3</sup> )
5	Kr	Linear curves (or x-shape curves) with no residual saturations	• •
6	Scenario	Production well in cell (50,50), Injection well in cell (150,150), rate of 50 bbl/ ratio=1	day for voidage

Table 1 Assumptions used to build static models.

#### **Model Buildup**

To build the reservoir model, it is first necessary to have a static reservoir model with percolation structure. A summary of assumptions used for building static models is given in Table 1.

We performed a sufficient number of realizations for later statistical analysis of the breakthrough time and its dependency on the mobility ratio. For the reservoir base model, the average breakthrough times were determined in the range of 2 to 5 years. To get reasonable simulation results, we first need to set an appropriate simulation time steps to get reports for later analysis which based on a sensitivity study it is set to 5 days.

For simulation purposes, a production well in the cell (50, 50) and an injection well in the cell (150, 150) were defined as a base scenario. The rate of 50 barrels per day was considered to maintain the voidage ratio of 1. The other reservoir rock and fluid data used to perform the flow simulations is presented in Table 2.

Table 2 Reservoir rock and fluid data considered for the flow simulations.

Variable	Value	Unit	Equation
P <sub>i</sub>	4000	psi	-
T <sub>i</sub>	170	f	-
S <sub>wi</sub>	$S_{water} = 0,$ $S_{gas} = 0,$ $S_{oil} = 100$	%	-
R <sub>s</sub>	210	scf/stb	Lasater (1958)
salinity	200000	ppm	McCain (1990)
B <sub>o</sub>	1.13	bbl/stb	-
P <sub>b</sub>	1120	psi	-
μ	0.8 - 1.43	сР	-
P <sub>c</sub>	0	psi	-

As we need to run flow simulations on large number of realizations, this step was performed by coding in the software environment using the workflows section which defines a case for each scenario. Then, the pressure solver software for Black oil model solves the flow equations in the software environment. After simulation of each scenario, the software execution screen closes and the process of creating a new realization and running the simulation on it starts and this will be repeated. The numerical simulation will

#### 2

3

Petroleum Research, 2022(October-November), Vol. 32, No. 125

be continued until the water cut in production well reaches the pre-determined value. Then, the results is read from the simulation output file and recorded consecutively in a .txt file.

Comparison of the histograms of breakthrough time in the simulation models with occupancy close to the threshold p=60% at various mobility ratios M is shown in Figure 1. the breakthrough of injected fluid in the models with a lower mobility ratio M. As emphasized by Shokrollahzadeh et al in 2019, to apply Equation 2 in real two phase flow problems with different fluid viscosities, a correction for the effect of mobility ratio of two phases are needed. Based on the results of simulations performed, Figure 2 shows the dependency of breakthrough on occupancy probability and mobility ratio.

Also, this figure shows a longer time needed for



Fig. 1 Comparison of breakthrough time in the simulation models close to the threshold p = 0.6 for M = 1, 2, 10.



Fig. 2 Illustration of dependency of breakthrough time on mobility ratio at two occupancy probabilities p= 0.6 and 0.8.

#### Conclusions

In this study, percolation theory approach has been used to predict the breakthrough time of injected fluid in oil reservoirs. In particular, the scaling relation for the breakthrough time distribution based on the percolation concepts was used to incorporate the effects of viscosity ratio of injected fluid and displaced fluid. In this study, more than 300 flow simulations was performed, and the breakthrough times are obtained. A clear power law dependency of breakthrough time on Mobility ratio has been found.

2nd Edition, Taylor & Francis, London.

#### References

- Stauffer D and Aharony A (1994) Introduction to Percolation Theory. 2nd Ed., Taylor and Francis, London. 1-192.
- Sahimi M (1994) Applications of Percolation Theory, 1st Ed. CRC Press. London. 1-276.
- King P and Masihi M Percolation (2018) Theory in Reservoir Engineering, World Scientific Europe Ltd., 1- 384.
- King PR Buldyrev SV Dokholyan NV Havlin S Lopez E Paul G and Stanley HE (2002) Using percolation theory to predict oil field performance. Physica A(314): 103-108.
- Blunt MJ (2017) Multiphase Flow in Permeable Media. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 1-500.
- Andrade JS Buldyrev SV Dokholyan NV Havlin S King PR Lee Y Paul G and Stanley HE (2000) Flow Between Two Sites on a Percolation Cluster. Physical Review E 62(6): 1-31.
- King PR Buldyrev SV Dokholyan NV Havlin S Lopez E Paul G and Stanley HE (2002) Percolation Theory. London Petrophysical Society, 1-14.
- Shokrollahzadeh S Masihi M Ghazanfari MH and King PR (2019) Effect of characteristic time on scaling of breakthrough time distribution for twophase displacement in percolation porous media. Transport in Porous Media, 130 (3), 889-902.