

# بررسی نسبت گرانروی سیال تزریقی و سیال مخزنی در پیش‌بینی زمان‌برون‌زد با استفاده از مفاهیم تراوش

سارا شکراله زاده بهبهانی، محسن مسیحی\* و محمدحسین غضنفری

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

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

## چکیده

زمان‌برون‌زد سیال تزریقی در فرآیند تزریق آب یک معیار عملکرد مخزن است که تحت تاثیر موقعیت و عملیات چاه است. پیش‌بینی این زمان‌برون‌زد برای طراحی فرآیند و الگوهای تزریق در توسعه مخزن مفید است. روش متعارف برای این کار شبیه‌سازی مخزن بوده که که وقتی توزیع زمان‌برون‌زد مورد نظر باشد این کار بسیار زمان‌بر است. یک روش جایگزین در تعیین سریع زمان‌برون‌زد استفاده از رویکرد تئوری پرکولاسیون است. در این روش با استفاده از برخی خصوصیات مخزنی موجود مانند نسبت خالص به ناخالص، و ابعاد مخزن، امکان پیش‌بینی سریع نمودار توزیع زمان‌برون‌زد وجود دارد. به هر حال، برخی فرضیات لحاظ شده در توسعه اولیه رابطه مقیاس‌بندی توزیع زمان‌برون‌زد مانند فرض برابری گرانروی دو سیال تزریقی و تولیدی کاربردهای میدانی آنرا محدود نموده است. به منظور بسط کاربرد روابط مقیاس‌بندی زمان‌برون‌زد لازم است اثرات گرانروی متفاوت دو سیال بر روابط مقیاس‌بندی زمان‌برون‌زد دیده شود. به‌طور خاص از یک رویکرد بدون بعدسازی زمان‌برون‌زد بر مبنای زمان مشخصه بی‌بعد استفاده می‌شود. با اجرای شبیه‌سازی‌های مختلف جریان در مخزن تأثیر تغییرات گرانروی فازها بر زمان‌برون‌زد بررسی گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس‌بندی زمان‌برون‌زد وابستگی به درجه اشغال شدگی و نسبت گرانروی دو فاز به فرم یک رابطه توانی با توان  $1/3$  دارد. لذا با تعمیم رابطه توزیع زمان‌برون‌زد با در نظر گرفتن این وابستگی توانی پیش‌بینی زمان‌برون‌زد سیال تزریقی در چاه تولیدی مخزن با دقت قابل قبولی امکان پذیر است. در انتها با پیاده‌سازی این رویکرد در یک مخزن واقعی و مقایسه نتایج زمان‌برون‌زد با نتایج شبیه‌سازی‌های تجاری به اعتبارسنجی رابطه تعمیم داده شده برای زمان‌برون‌زد تعمیم داده شده پرداخته شد.

**کلمات کلیدی:** گرانروی، مفهوم تراوش، تزریق آب، زمان‌برون‌زد، محیط متخلخل مخزن

## مقدمه

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].

تراوش<sup>۱</sup> به عبور سیال از یک فیلتر اطلاق می‌شود.

\*مسئول مکاتبات

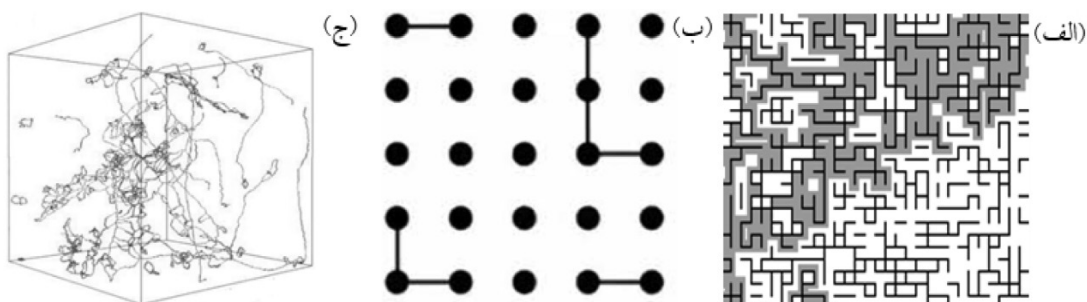
masihi@sharif.edu

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4570.3060)

و ۲. در مسئله این تحقیق، هنگام تزریق یک سیال به محیط متخلخل (مثلاً به منظور بازیافت ثانویه و با هدف نگهداشت فشار مخزن)، هرچه حجم سیال تزریقی بیشتر شود، توزیع اشباع سیال تزریقی در محیط متخلخل بیشتر شده و امکان برقراری ارتباط میان دو سمت سیستم (یعنی چاه تولیدی و چاه تزریقی) از طریق سیال تزریقی بیشتر خواهد شد [۳]. ارزیابی کمی مقدار حد آستانه (یا به عبارتی زمان-برون زد سیال تزریقی) و تعیین رابطه بین میزان برقراری ارتباط (که به آن بهم‌پیوستگی هم گفته می‌شود) درون سیستم با توزیع اشباع سیال تزریقی با استفاده از نظریه پرکولاسیون انجام می‌گیرد [۴]. برای مثال سیال تمایل دارد از مسیر تراواتر عبور نماید و ممکن است مسیرهای باریک‌تر جاروب نشود یا در اثر تغییرات 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 زمان-برون زد سیال تزریقی، بهترین فاصله میان چاهی<sup>۱</sup>، میزان ارتباط استاتیک و دینامیک دو چاه با یکدیگر و رفتار تولیدی بعد از برون زد سیال در صورت تزریق در مخزن (مانند افت تولید نفت و افزایش برش آب در صورت تزریق آب) استفاده کرد [۶]. نمونه‌هایی از مدل‌های مختلف تصادفی پرکولاسیون در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.

جریان سیال در یک محیط متخلخل تحت تأثیر نیروهای وارده بوده و با حرکت در مسیر پیش روی حرکت خود، به مسیرهای مختلف منحرف و منشعب شده و گسترش می‌یابد. کوتاه‌ترین مسیر می‌تواند کنترل‌کننده زمان-برون زد (اولین مشاهده) سیال تزریقی در نقطه هدف باشد. اولین لحظه (با کمترین اندازه خوشه) که در آن ارتباط دو سوی محیط متخلخل توسط سیال تزریقی برقرار می‌گردد، آستانه پرکولاسیون ( $p_c$ ) نامیده می‌شود. در ثوری 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 ( $p < p_c$ ) احتمال وجود چنین خوشه‌ای، صفر است. برای مقادیر پس از حد آستانه ( $p > p_c$ ) احتمال وجود خوشه بی‌نهایت، برابر با یک است. با توجه به تصادفی بودن خصوصیات این چنین سیستمی (مثلاً اندازه حفرات یا مسیر سیال)، حالات بسیاری برای جریان ممکن است وجود داشته باشد. لذا، ابتدا یک جامعه آماری احتمالی از تحقق‌های ممکن (در این جا صدها شبیه‌سازی از مدل‌های تصادفی محیط متخلخل) تهیه می‌شود. سپس تخمین حد آستانه با محاسبه یک متوسط آماری به دست می‌آید که این تخمین با بررسی تعداد بسیار زیادی از حالات ممکن سیستم، تعیین می‌شود [۱].



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

هدف این مطالعه بررسی زمان بررسی زمان برون زد در مقیاس میدانی با استفاده از روابط پرکولاسیون بمنظور نزدیک نمودن پیش‌بینی‌های روش پرکولاسیون به رفتار واقعی مخازن هیدرکروبویری است. به‌طور خاص، تأثیر نسبت گرانروی سیال تزریقی به تولیدی بر این رابطه بررسی می‌شود. در ابتدا با فرض مدل‌های ساده روابط اولیه پرکولاسیون مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در ادامه برای بهبود پیش‌بینی‌ها، متغیرهای مخزنی وارد روابط پرکولاسیون می‌گردند. در هر مرحله مقایسه بر مبنای اجرای تعداد زیادی از شبیه‌سازی‌ها انجام می‌گیرد.

هدف این مطالعه بررسی زمان بررسی زمان برون زد در مقیاس میدانی با استفاده از روابط پرکولاسیون بمنظور نزدیک نمودن پیش‌بینی‌های روش پرکولاسیون به رفتار واقعی مخازن هیدرکروبویری است. به‌طور خاص، تأثیر نسبت گرانروی سیال تزریقی به تولیدی بر این رابطه بررسی می‌شود. در ابتدا با فرض مدل‌های ساده روابط اولیه پرکولاسیون مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در ادامه برای بهبود پیش‌بینی‌ها، متغیرهای مخزنی وارد روابط پرکولاسیون می‌گردند. در هر مرحله مقایسه بر مبنای اجرای تعداد زیادی از شبیه‌سازی‌ها انجام می‌گیرد.

### رویکرد تراوش

اولین مطالعاتی که در آن از پرکولاسیون 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، محیط متخلخل ابتدا توسط یک فاز اشباع شده است که در ادامه توسط فاز تزریقی از حفرات بیرون رانده می‌شود [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 "پرکولاسیون تهاجمی"<sup>۱</sup> استفاده کردند. پرکولاسیون تهاجمی یک روش شبه‌پایا برای مدل‌سازی تزریق غیرامتزاجی تحت تأثیر نیروهای موئینه (نیروهای چسبندگی<sup>۲</sup> قابل اغماض) است [۹]. نتایج Wilkin-son و Willemsen تنها براساس شبیه‌سازی بوده و فرم توانی مدل آن‌ها بدون تعبیر ریاضی ارائه شده بود. اما این روابط پس از انتشار به سرعت توسعه داده شد و بر مبنای قضیه‌های ریاضی به اثبات رسید [۱۰]. Bak و همکاران مطالعه‌ای انجام دادند که مجدداً برقراری رابطه توانی برای سیستم‌های تراوشی دینامیک اثبات شد [۱۱]. گرچه وجود

1. Invasion  
2. Viscous Forces  
3. Self-Organized Criticality

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 فیزیکی 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 تحقیق و رویکرد مدل‌سازی

Andrade و همکاران با در نظر گرفتن اندازه سیستم (L) و میزان اشغال‌شدگی جایگاه‌ها (p) به بررسی ثوابت روابط پرکولاسیون پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها در قالب جدول ثوابت (که دارای مقادیر ثابت و کلی هستند) ارائه شد [۱۶]. در همان سال، King و همکاران در مطالعه دیگری، رابطه‌ای را برای زمان پس از برون‌زد سیال تزریقی در یک مخزن واقعی بررسی نمودند. نتیجه این بررسی رضایت‌بخش بود. در این مطالعه برای پیش‌بینی حجم تولید نفت پس از برون‌زد (V) رابطه ۱ پیشنهاد شد. این رابطه برحسب بعد فرکتالی backbone و زمان تولید نوشته شده است. توان  $\beta$  براساس نتایج شبیه‌سازی حدود  $0.1008 \pm 0.063$  محاسبه شد [۱۷].

$$V(t \rightarrow \infty) \sim \left(\frac{r^{d_B}}{t}\right)^\beta \quad (1)$$

که در آن، t زمان برون‌زد و r فاصله بین دو نقطه تزریق و تولید و  $d_B$  توان فرکتالی است. در مطالعه مذکور، رابطه پرکولاسیون برای مخازن نفتی تحت تزریق آب با فرمولاسیون کلی زیر ارائه شد [۱۷].

$$P(t_{br} | r, L, p) \sim \frac{1}{r^{d_i}} \left(\frac{t_{br}}{r^{d_i}}\right)^{-g_i'} \exp\left(-a\left(\frac{t_{br}}{r^{d_i}}\right)^{-\phi}\right) \exp\left(-b\left(\frac{t_{br}}{L^{d_i}}\right)^\psi\right) \exp\left(\frac{-ct_{br}}{|p - p_c|^{-\nu d_i}}\right) \quad (2)$$

متغیرهای رابطه فوق در جدول ۱ ارائه شده‌اند [۱۷].

از کاربردهای دیگر رویکرد تراوش در مقیاس میدانی، تخمین خصوصیات دینامیک جریان مانند زمان برون‌زد سیال تزریقی در چاه‌های تولیدی است. بررسی‌های اولیه توسط Buldyrev و Andrade و همکاران براساس شبیه‌سازی قدم تصادفی منجر به ارائه تابع توزیع زمان برون‌زد وابسته به درجه اشغال‌شدگی شد [۱۶ و ۱۷]. رویکرد مشابهی توسط گنجه قزوینی و همکاران برای وابستگی توزیع زمان برون‌زد به درجه اشغال‌شدگی محیط متخلخل و مقایسه نتایج آن با شبیه‌سازی جریان صورت گرفت [۱۸].

تعمیم رابطه ارائه زمان برون‌زد به شرایط میدانی نیازمند در نظر گرفتن هندسه جریان در مخزن بود که توسط شکراله زاده و همکاران با معرفی زمان مشخصه وابسته به هندسه جریان ارائه گردید [۱۹]. هم‌چنین صادق نژاد و همکاران به ارائه روش‌هایی برای تعمیم رویکرد پرکولاسیون برای دستیابی به برخی مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی مخازن در مقیاس میدانی مانند بهم پیوستگی بین چاه‌ها یا الگوی چاه‌ها پرداختند [۲۰-۲۲]. به‌طور خاص یکی از مقایسه‌های کاربردی برای تخمین زمان برون‌زد با به‌کارگیری روابط مقیاس‌بندی توزیع زمان برون‌زد 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]. البته مواردی مانند تفاوت گرانروی سیالات تزریقی و تولیدی و تفاوت نمودارهای تراوایی نسبی از نمودار خطی و تعیین استانه‌ای برای باینری‌سازی نقشه تراوایی مخزن از مسائلی است که در تعمیم رابطه مقیاس‌بندی زمان برون‌زد مؤثر است. براساس آنچه مطرح گردید روش پرکولاسیون در مهندسی نفت به صورت محدود استفاده شده است. این روش آماری نسبتاً جدید بوده و بیشتر استفاده آن نیز مربوط به مقیاس حفره است. جالب است که با وارد شدن به مقیاس حفره در عکس‌برداری از آن، محققین به این نتیجه رسیده‌اند که ارائه روابط

جدول ۱ تعریف متغیرهای رابطه ۱ پرکولاسیون [۱۷]

$P_c$	R	p	L	$t_{br}$	P
حد آستانه (۰/۶۶۸)	فاصله بین چاهی (بدون بعد)	ضخامت کل به مفید	طول مخزن (بدون بعد)	زمان برون زد (بدون بعد)	احتمال زمان برون زد برای مخزنی دوبعدی با ابعاد $L^2$ ، میزان ضخامت خالص به ناخالص p و فاصله بین چاهی $t$ ، و زمان برون زد $t_{br}$

و  $P$ ، به ترتیب 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 به عنوان رابطه پایه استفاده شده است (با فرض برقراری این جریان در محیط ماسه‌های تراوای مخزنی حین حرکت سیال از چاه تولیدی به چاه تزریقی). با فرض وجود رابطه دارسی و وجود تعداد زیادی بلوک‌های ماسه‌ای بین مسیر چاه تولیدی و تزریقی در کنار هم مدت زمان لازم برای حرکت،  $t_s$ ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_s = \frac{r_s \mu \ln\left(\frac{r}{r_w}\right)}{1.127 * 5.615 * k_s (p_{Injection} - P_{Production})} \quad (5)$$

رابطه فوق به طریق مشابه برای هندسه جریان خطی مخازن هم می‌تواند محاسبه گردد که نوع دیگری از هندسه جریانی است [۱۷]. در رابطه ۵ با جایگزینی  $\mu$  با مقدار واقعی امکان بدون بعدسازی براساس گرانروی وجود دارد. گرانروی آب در شرایط تزریق نزدیک به cp ۱ گزارش شده و گرانروی نفت دارای بازه بسیار وسیع است که برای نفت سبک نزدیک به گرانروی آب اما بیشتر از آن و برای نفت سنگین تا چند ده هزار سانتی پویز گزارش شده است. در این تحقیق گرانروی آب ثابت حدود cp ۰/۸ فرض شده است و گرانروی نفت متغیر است. با تغییرات گرانروی نفت، نسبت تحرک پذیری فازهای آب و نفت (M) نیز تغییر می‌یابد.

$$M = \frac{M_{water}}{M_{oil}} = \frac{Kk_{rw} / \mu_w}{Kk_{ro} / \mu_o} = \frac{k_{rw} \mu_o}{k_{ro} \mu_w} \quad (6)$$

که در آن  $K_{rw}$  و  $K_{ro}$  تراوایی نسبی آب و نفت و  $K$  تراوایی محیط است. از آنجایی که اثرات تراوایی نسبی فازها در این مطالعه صرف نظر شده است.

میزان اشغال شدگی p در مهندسی نفت معادل با نسبت خالص به ناخالص (NTG) است. حد آستانه یا  $P_c$  برای انواع شبکه پرکولاسیون مقادیر مشخص و ثابت دارد (جدول ۱) در مطالعه حاضر مخزن دوبعدی است و نواحی مخزنی با تعریف مدل مربعی شکل با قابلیت هم‌پوشانی تعریف می‌گردند، مقدار ثابت حد آستانه ( $P_c$ ) برابر ۰/۶۶۸ است. بقیه متغیرهای رابطه ۲ ثوابتی هستند که برای مسائل پرکولاسیونی دو بعد و سه بعد به شرح جدول ۲ هستند.

رابطه اصلی پرکولاسیون (رابطه ۲) یک رابطه کلی 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 نمی‌شود. لذا وارد نمودن تأثیر مشخصات سنگ و سیال (از جمله تراوایی نسبی و گرانروی) باید به نحوی بر مبنای فیزیک مسئله، 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 مخزنی و استفاده در مدل شبیه‌ساز از رابطه زمان بی‌بعد مبتنی بر جریان استفاده شده است. رابطه بی‌بعد پیشنهادی براساس رابطه دارسی برای جریان با هندسه شعاعی و خطی به فرم زیر است [۱۷].

$$t_s^{radial} = \frac{c_2 \phi p \mu r_s^2 \ln(r_s / r_w)}{K \Delta P (r / r_s)} \quad (3)$$

$$t_s^{linear} = \frac{c_1 \phi p \mu r_s^2}{K \Delta P (r / r_s)} \quad (4)$$

در این رابطه،  $t_s$  زمان عبور سیال از یک محیط تراوا و وابسته به هندسه جریان (خطی یا شعاعی) در نظر گرفته شده است. پارامترهای  $K$ ،  $\Delta P$ ،  $r_w$ ،  $r_s$ ،  $\mu$

جدول ۲ ثوابت رابطه اصلی پرکولاسیون

ثوابت رابطه در دو بعد [۲۴]							
متغیر	N	$\varphi_2$	$\varphi_1$	g	$d_i$		
مقدار D ۲	۰/۰۲±۰/۸۸	۴	۷/۳	۰/۱±۲/۲	۰/۰۰۵±۱/۱۳		
ثوابت رابطه برای دو بعد و سه بعد [۱۶]							
مقدار D ۲	C	v	B	$\varphi_2$	a	$\varphi_1$	g
مقدار D ۲	۲/۹ (p<pc)		۲/۳	۲	۲/۵	۱/۶	۰/۱±۲/۱
مقدار D ۳	۲/۶ (p>pc), ۱/۶ (p<pc)	۱/۳۳	۵	۳	۱/۱	۳	۰/۱±۲

این مدل‌ها دوبعدی و متشکل از  $1 \times 200 \times 200$  گرید با اندازه  $10 \text{ m}^3$  هستند. سری‌های مختلف مدل‌های تراوشی با متغیرهای متنوع تهیه شد. با توجه به نیاز به تهیه هزاران مدل، این مرحله به استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار پترل<sup>۲</sup> با استفاده از بخش جریان کارها<sup>۳</sup> نرم افزار، به صورت خودکار اجرا گردید. این مدل‌سازی با اجرای دو حلقه مستقل شبیه‌سازی به دست آمد. مدل‌ها با سه فرض (الف) مدل‌های تصادفی با توزیع نرمال، (ب) امکان برقراری ارتباط بین چاه تزریقی و تولیدی و (ج) برای مقبولیت جامعه آماری تعداد ۱۵۰ مدل برای حالت پایه تهیه شد. شکل ۲ تعدادی از مدل‌های تخلخل و تراوایی مربوط به دو حالت  $p=50\%$  و  $p=70\%$  را در کنار نمودار اشغال‌شدگی نمایش می‌دهد.

در مرحله شبیه‌سازی 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 voidage ratio برابر ۱ در نظر گرفته شد. این حالت برای کلیه مدل‌های استاتیک یکسان فرض شده است. کلیه اطلاعات مربوط به خصوصیات دینامیک در جدول ۴ ارائه شده است.

لذا نسبت تحرک‌پذیری عمدتاً بیانگر نسبت ویسکوزیته دوفاز و با M نشان داده می‌شود. طی مطالعات انجام شده و نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که رابطه تخمین برون‌زد براساس جریان خطی رابطه ۴ برای مدل‌هایی با اشغال‌شدگی (p) پایین دقت مناسبی دارد و رابطه تخمین برون‌زد براساس جریان هندسی رابطه ۳ برای مدل‌هایی با اشغال‌شدگی (p) بالا دقت مناسبی دارد [۱۹]. لذا رابطه پیشنهادی شکراله زاده برای تخمین زمان برون‌زد به صورت زیر است:

$$t_s = x t_s^{radial} + (1-x) t_s^{linear} \quad (7)$$

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 بهینه‌یابی تعیین گردید.

## نتایج و بحث و بررسی

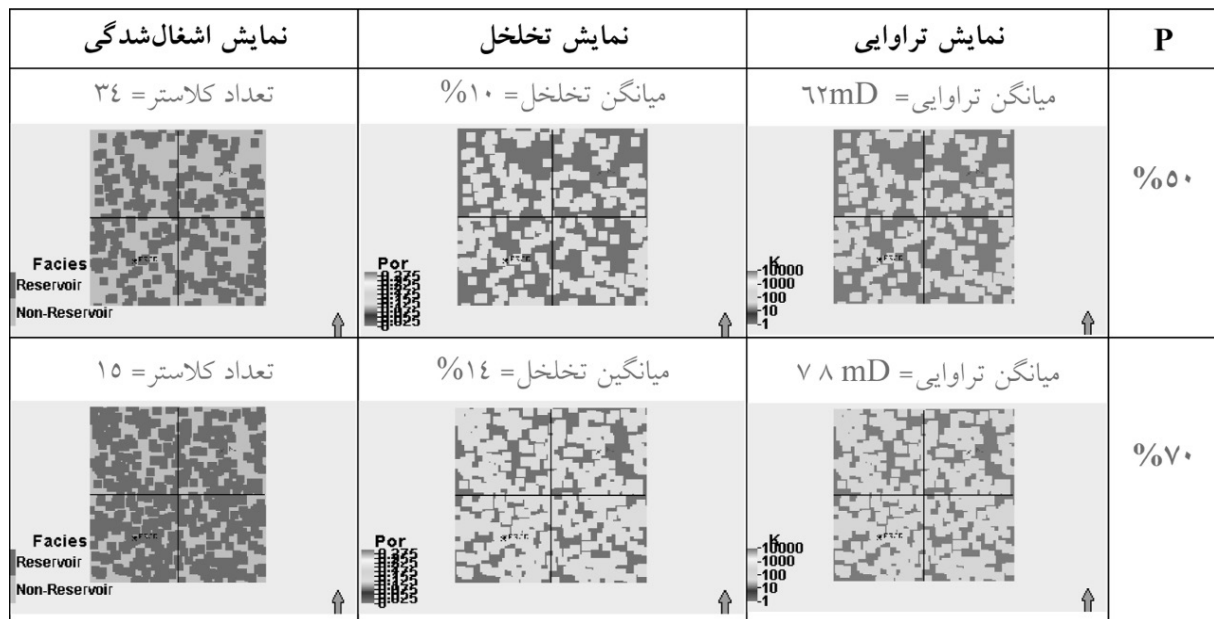
### تهیه مدل استاتیک

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<sup>۱</sup> 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.

1. Net To Gross (NTG)  
2. Petrel  
3. Workflows

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

متغیر	مقدار	واحد	رابطه جهت محاسبه
K	۵۰۰۰ و ۰ به ترتیب در بخش تراوا و غیر تراوا	D	$k = \frac{1e4\phi^3}{(1-\phi)^2}$
$\phi$	۰/۲۵ و ۰ به ترتیب در بخش تراوا و غیر تراوا	%	تخصیص مقدار
NTG	۱	بدون بعد	تخصیص مقدار
گریدبندی	۱×۲۰۰×۲۰۰ گرید به ابعاد ۱۰ <sup>۳</sup>	m <sup>3</sup>	تعریف مدل استاتیک
نمودار k <sub>r</sub>	نمودار خطی تراوایی نسبی آب و نفت بدون اشباع باقی مانده		
حالت	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		



شکل ۲ وضعیت تراوایی و تخلخل در تعدادی از مدل‌های استاتیک

جدول ۴ مقادیر استفاده شده دینامیک در مدل های تراوشی

مقدار	متغیر	واحد	رابطه جهت محاسبه
۴۰۰۰	$P_i$	psi	تخصیص مقدار
۱۷۰	$T_i$	$F^\circ$	تخصیص مقدار
$S_{oil} = 100, S_{gas} = 0, S_{water} = 0$	اشباع اولیه	%	تخصیص مقدار
۲۱۰	$R_s$	scf/stb	رابطه (Lasater 1958)
۲۰۰۰۰۰	شوری آب	ppm	رابطه (McCain 1990)
۱/۱۳	$B_o$	bbl/stb	
۱۱۲۰	$P_b$	psi	تخصیص مقدار
۱/۴۳ - ۰/۸	$\mu_o$	cp	
۰	$P_c$	psi	تخصیص مقدار

۵ ارائه شده است.

جدول ۵ مقادیر به دست آمده در شبیه سازی مدل با نسبت های تحرک پذیری متفاوت بخش غیر مخزنی

P	شرح مدل	زمان برون زد میانگین (سال)	تعداد مدل های شبیه سازی شده
۰/۶	$M = ۰/۵$	۳/۳۸	۹۷
	$M = ۱$	۲/۱۶	۱۳۳
	$M = ۲$	۰/۹۰۱	۸۶
	$M = ۵$	۰/۲۶۴	۱۰۵
	$M = ۱۰$	۰/۰۱۶	۱۱۹

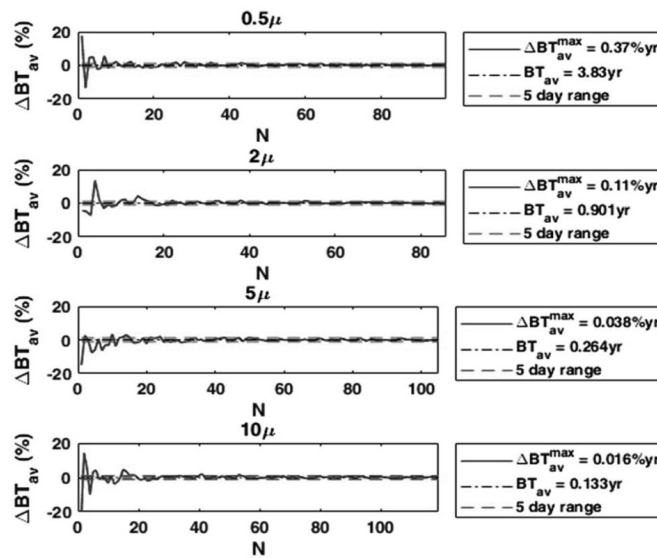
شکل ۳ تغییرات در میانگین زمان برون زد را در حالت های  $M = ۰/۵$  تا  $M = ۱۰$  نمایش می دهد. نمایش بازه ۵ روزه در این نمودارها تنها برای مقایسه است. در واقع این بخش از ۰/۰۵٪ زمان میانگین برون زد کل مجموعه شبیه سازی استفاده شده است. در صورت استفاده از بازه بزرگتر (برای مثال ۵ روز) امکان عدم شناسایی دقیق زمان برون زد وجود دارد. در شکل ۴، سه سری نمودار برای هر کدام از M ها رسم شده است. نمودار اول از سمت چپ هیستوگرام زمان برون زد است. نمودار وسط توزیع تجمعی احتمال زمان برون زد (CDF) و نمودار سمت راست نمودار چندک-چندک متناظر را نشان می دهد.

در ادامه، شبیه سازی عددی بر روی 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 می کند. سپس با فراخوانی نرم افزار Eclipse-E100، روابط جریان در محیط نرم افزار مذکور به صورت Black oil حل می کند. پس از پایان شبیه سازی بر روی یک حالت، صفحه اجرای اکلیپس بسته شده و مراحل ساختن حالت تولیدی جدید و شبیه سازی بر روی مدل استاتیک بعدی به صورت خودکار شروع می شود.

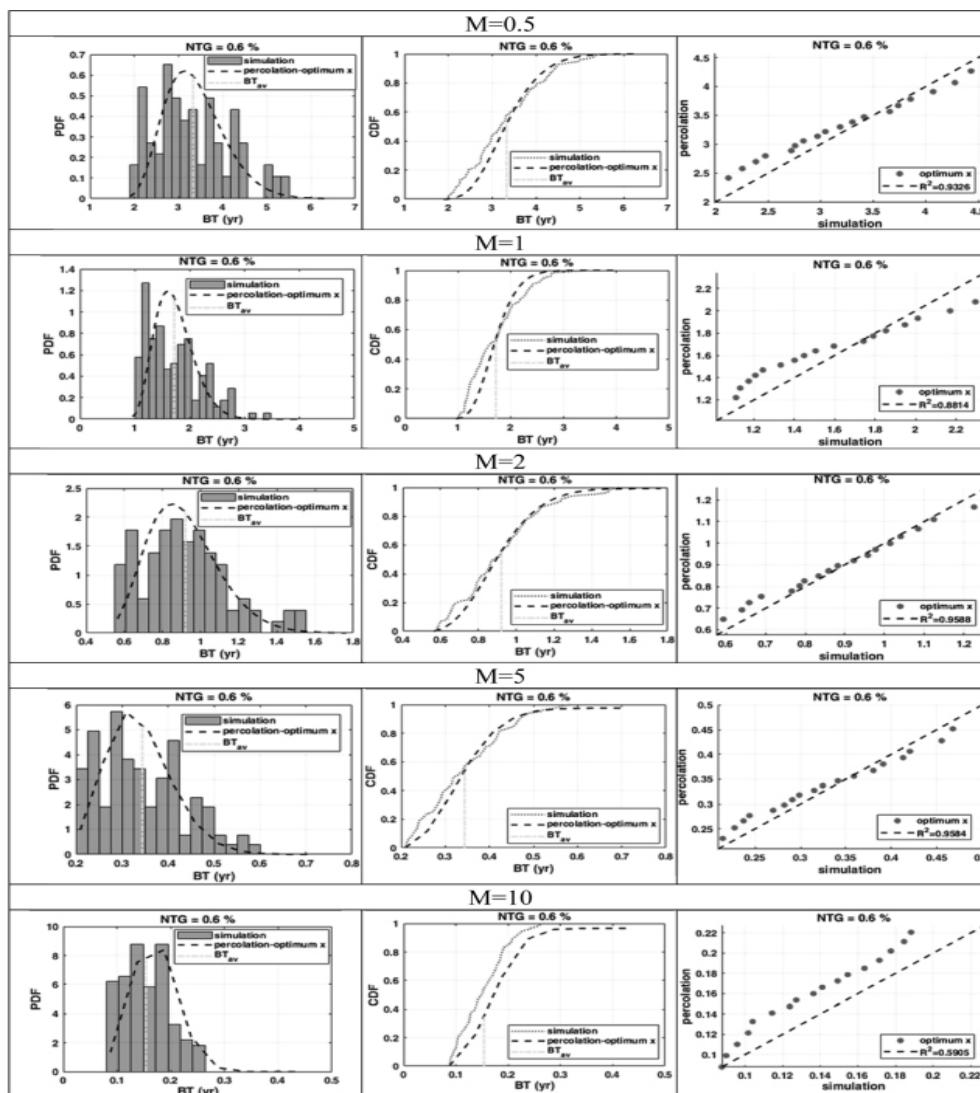
#### اجرای مدل دینامیک و محاسبه زمان برون زد

برای تعیین تعداد کافی مدل استاتیک، تغییرات میانگین زمان برون زد بررسی شد. با در نظر گرفتن شرط های سه گانه ۳۰۰ مدل برای یک مقدار اشغال شدگی مشخص ( $p = ۰/۶$ ) مشخص شبیه سازی شده و میانگین زمان برون زد این ۳۰۰ مدل برابر ۵۰۰ روز است، لذا ۲/۵ روز به عنوان معیار سنجش کفایت تعداد مدل ها انتخاب شد. نتایج تغییرات نسبت گرانروی در این حد اشغال شدگی در جدول





شکل ۳ تغییرات در میانگین زمان برون زد به منظور تعیین تعداد مدل های کافی با تغییر نسبت گرانروی برای  $p=0.06$



شکل ۴ مقایسه زمان برون زد در مدل با درجه اشغال شدگی  $p=0.06$ . با نتایج شبیه سازی و رابطه پرکولاسیون برای زمانی که نسبت گرانروی  $M=0.5, M=1, M=2, M=5$  و  $M=10$  است

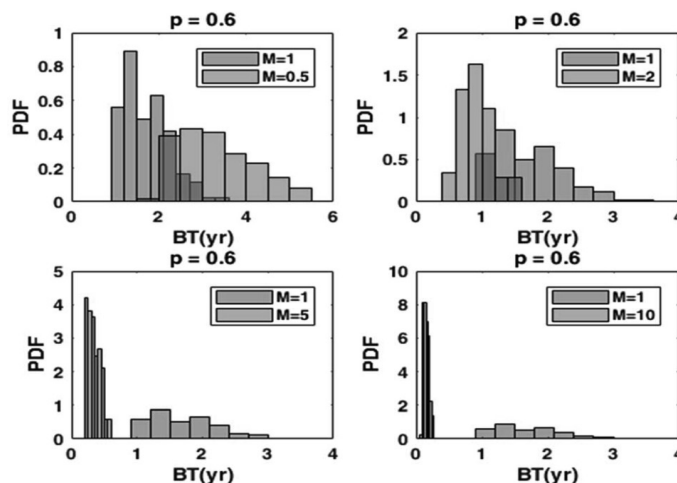
مناسب رابطه پرکولاسیون به دست آمده براساس بدون بعدسازی مناسب را نشان می‌دهد. علاوه بر مقایسه رابطه پرکولاسیون با نتایج شبیه‌سازی عددی، موضوع دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت. این موضوع تغییرات در زمان برونزد برای حالات مختلف  $M$  بود. به این منظور هیستوگرام مربوط به زمان برونزد برای مقادیر متفاوت  $M$  در شکل ۵ رسم شده است. در هر کدام از منحنی‌های این شکل، هیستوگرام حالت  $M \neq 1$  در کنار هیستوگرام حالت  $M=1$  رسم شده است. این منحنی نشان می‌دهد:

۱. هیستوگرام زمان برونزد برای مدل‌های نزدیک به آستانه پرکولاسیون (حالت  $p=0.16$ ) و با گرانی‌های مختلف، با افزایش گرانی نفت، میانگین زمان برونزد کاهش می‌یابد.
۲. نمودار توزیع احتمالی با افزایش  $M$  باریک‌تر و بلندتر شده است که نشان می‌دهد.

در هر کدام، نمودار زمان برونزد حاصل از شبیه‌سازی عددی در کنار پیش‌بینی به دست آمده از رابطه پرکولاسیون رابطه ۲ رسم شده است. در رسم این نمودارها برای بدون بعدسازی از رابطه بهینه رابطه ۷ استفاده شده است. گرانی سیال در قالب  $M$ ، یکی از متغیرهای رابطه ۵ است. لذا، نسبت گرانی در استفاده شده در شبیه‌سازی عددی به این طریق در محاسبات رابطه پرکولاسیون مؤثر بوده است. در واقع اینجا به منظور بدون بعدسازی متغیرهای رابطه ۲، نسبت  $M$  وارد روابط شده است. در این بخش تنها با قرار دادن مقدار گرانی جدید در رابطه ۵ و استفاده از آن با رابطه ۷ برای بدون بعدسازی رابطه ۲، نمودار پرکولاسیون به دست آمده است. مقایسه سطح خطای این دو رویکرد در جدول ۶ خلاصه شده است. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۴ و بررسی مقادیر خطا در جدول ۶ تطابق

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

مقدار $x$	شرح مدل	$P$	خطای پیش‌بینی نمودارهای Quantile-Quantile
۰	$M=0.5$	۰/۶	۰/۹۳۲۶
۰	$M=1$		۰/۸۸۱۴
۰	$M=2$		۰/۹۵۸۸
۰	$M=5$		۰/۹۵۸۴
۰	$M=10$		۰/۵۹۰۵



شکل ۵ مقایسه توزیع زمان برونزد حاصل از شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف  $M$  در مقایسه با حالت  $M=1$  برای شرایط نزدیک به آستانه تراوش  $p=0.16$

تاثیر قرار داده و به رفتار سیستم‌های همگن نزدیک شود. در بقیه حالات روش پرکولاسیون پیش‌بینی مناسبی داشته است. مشابه همین شبیه‌سازی برای حالت اشغال‌شدگی برابر با  $0/8$  انجام شد. که به منظور جلوگیری از طولانی شدن متن از ذکر جزئیات خودداری می‌شود. با رسم نمودارهای لگاریتمی زمان‌بروزد بدون بعد برحسب نسبت گرانروی، امکان برازش خط با تقریب مناسب وجود دارد. اما این خط هم‌تا نبوده و برای  $p = 0/6$  و  $0/8$   $p = 0$  متفاوت است. از آنجا که ارتباط زمان‌بروزد میانگین با توان سوم  $p$  مشخص می‌کند، در اینجا با استفاده از این تقریب نمودارهای مربوطه رسم شد. به این ترتیب، اول زمان‌بروزد به‌دست آمده از شبیه‌سازی با تقسیم بر مقدار  $t_s$  مربوطه نرمالایز شد و در نهایت در  $p^3$  ضرب و براساس  $M$  رسم گردید. براساس شکل ۶ می‌توان نتیجه‌گیری نمود زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس‌بندی زمان‌بروزد علاوه‌بر وابستگی به درجه اشغال‌شدگی به نسبت گرانروی دو سیال تزریقی و تولیدی  $M$  هم وابسته است. رابطه توصیف‌کننده این وابستگی براساس نتایج حاصل شده در نسبت‌های گرانروی مختلف از شکل ۶ رابطه توانی و با توان  $1/3$  را نشان می‌دهد.

$$t_{br} = f(t_s, p^{-3}, M) \quad (8)$$

از رابطه فوق می‌توان برای پیش‌بینی میانگین زمان‌بروزد برای مدل‌هایی با مقادیر غیر از مقادیر گزارش شده در این مطالعه استفاده نمود.

با افزایش نسبت گرانروی ساختار جریان‌ی به مدل همگن نزدیک شده است.

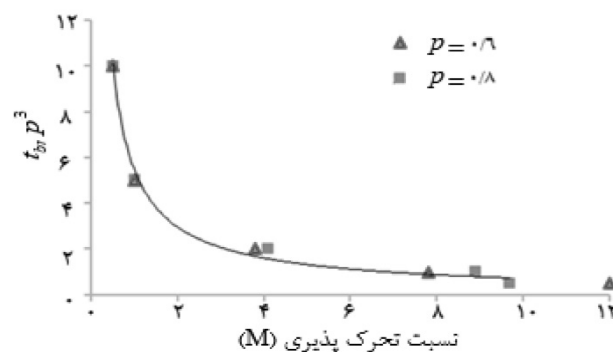
۳. با کاهش گرانروی ساختار جریان‌ی به مدل تصادفی نزدیک‌تر می‌شود. بر این اساس و با توجه به اینکه استفاده از روش پرکولاسیون برای مدل همگن روشی مناسب نیست می‌توان توجیه نمود که خطای پیش‌بینی، زمانی که  $M = 10$  است خطای بالایی ( $R^2 \sim 0/6$ ) دارد. در بقیه حالات روش پرکولاسیون پیش‌بینی مناسبی داشته است.

نتایج فوق برای مدل‌های با درجه اشغال‌شدگی بالاتر از آستانه پرکولاسیون (نزدیک به مدل‌های همگن با مقدار  $p = 0/8$ ) 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 زمان‌بروزد کاهش می‌یابد.

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.

مقادیر خطای پیش‌بینی زمان‌بروزد نسبتاً بالایی در حالت نسبت تحرک‌پذیری بالا ( $M = 10$ ) از جدول ۶ دیده می‌شود ( $R^2 \sim 0/6$ ) که می‌تواند با اثرات انگشتی شده (fingering) رفتار محیط تراوش را تحت



شکل ۶ تغییرات در میانگین زمان‌بروزد با تغییرات در نسبت تحرک‌پذیری سیالات

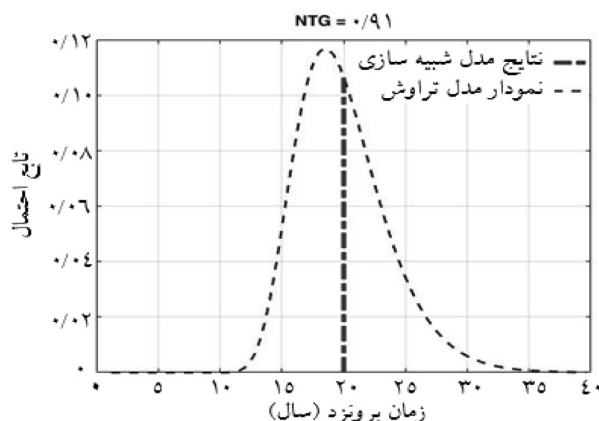
## مطالعه موردی در یک مخزن واقعی

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 شبیه‌سازی با نرم‌افزار جریان زمان‌برونزد محاسبه شد و با مقدار پیش‌بینی شده رابطه تعمیم داده شده زمان‌برونزد بر پایه پرکولاسیون (روابط ۲ و ۸) مقایسه گردید. زمان‌برونزد در مخزن حدود ۲۰ سال است و در بازه قابل قبول پیش‌بینی روش پرکولاسیون براساس **شکل ۷** قرار می‌گیرد.

در ادامه این مطالعه و به‌منظور اعتبارسنجی نتایج رویکرد پیشنهادی در پیش‌بینی زمان‌برونزد یک مخزن واقعی انتخاب و برش‌های دوبعدی از آن در جهت‌های مختلف تهیه گردید. روش تبدیل نقشه مخزنی به مدل تراوش با در نظر گرفتن یک مقدار مناسب آستانه بر داده‌های تراوایی مخزن (به‌طوری‌که اتصال بین چاه‌ها فراهم باشد) در نظر گرفته شد. بدین ترتیب گریدهای با مقدار تراوایی کم‌تر از مقدار آستانه غیرمخزنی (تراوایی صفر) و گریدهای با تراوایی بیشتر گریدهای مخزنی محسوب شده و لذا مدل مخزن به ساختار تراوشی

جدول ۷ اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی مخزن

$\phi$	$p\Delta$	$K_s$	$r_s$	$p_c$	$r$	$p$	$L$	$t_{br}$
%	psi	md	m	-	m	-	m	day
۷	۲۶۰۰	۱۰۰	۴۴۳	۰/۶۳۳	۶۳۵۲	۰/۹۱	۱۱۵۲۵	۷۳۰۵



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

## نتیجه‌گیری

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

در این مطالعه از رویکرد پرکولاسیون برای پیش‌بینی زمان‌برونزد سیال تزریقی به مخازن نفتی استفاده شد. به‌طور خاص با تعمیم رابطه کلی برای تخمین زمان‌برونزد بر پایه پرکولاسیون با استفاده از رویکرد بی‌بعد سازی بر مبنای زمان مشخصه بی‌بعد با استفاده از رابطه داریسی با هدف در نظر گرفتن اثر نسبت گرانیوی فازها استفاده

دو فاز به فرم یک رابطه توانی با توان  $1/3$  دارد. لذا با در نظر گرفتن این وابستگی توانی برای نسبت گرانروی دوفاز و با شبیه‌سازی یک مخزن واقعی و مقایسه نتایج زمان‌برونزد در آن کارآیی تابع توزیع زمان‌برونزد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد زمینه به‌کارگیری رابطه را برای مخازن واقعی میسر نموده است

به مقدار بیشتر و کمتر از یک انجام گرفت و زمان‌برونزد در آنها محاسبه گردید. در ادامه نمودارهای هیستوگرام به‌دست آمده از شبیه‌سازی با رابطه پرکولاسیون مقایسه گردید و رابطه تعمیم داده شده برای پیش‌بینی زمان‌برونزد برای مخازنی با نسبت گرانروی  $0.5$  تا  $1.0$  بررسی شد. نتایج نشان داد زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس‌بندی زمان‌برونزد وابسته به نسبت گرانروی

## 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 dimensional polymers, Journal of the American Chemical Society, 63, 11: 3083-3090.
- [4]. Broadbent S R, Hammersley J M (1957) Percolation processes, 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'étude du drainage avec 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-

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.