



## مطالعه تجربی جریان چندفازی و اثر وجود ترک بر ازدیاد برداشت در بستر متخلخل

کریم جعفریان، محمدحسن کیهانی، محسن نظری<sup>\*</sup>، بهادر قربان‌بخش

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

### کلمات کلیدی:

نفت  
ازدیاد برداشت  
محیط متخلخل  
ترک  
تزریق متناوب

**خلاصه:** راه‌کارهای استخراج نفت باقی‌مانده در مخزن را ازدیاد برداشت می‌نامند. از جمله روش‌های مرسوم ازدیاد برداشت، تزریق متناوب آب و گاز است که بررسی این روش تزریق در بستر متخلخل دوبعدی، کمتر مورد توجه بوده است. در این پژوهش تجربی دو بستر متخلخل، با استفاده از چاپگر سه‌بعدی ساخته شد که یکی ساده و دیگری دارای ترک افقی است. از سیالات گاز نیتروژن و آب، در سه سناریو، به صورت تزریق تنه‌های گاز، آب و تزریق متناوب هر دو، به منظور ازدیاد برداشت استفاده شده است. سپس با پردازش تصویر، میزان برداشت هر کدام از سناریوهای تزریق، محاسبه گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تزریق متناوب، در بستر ساده حدود ۵۵ درصد محیط را جاروب می‌کند که این میزان بیش از ۶ برابر برداشت تزریق تنه‌های گاز و بیش از ۲/۵ برابر برداشت تزریق تنه‌های آب است. همچنین تزریق متناوب در بستر با ترک حدود ۳۸ درصد محیط را جاروب می‌کند که این میزان بیش از ۲/۵ برابر هر کدام از دیگر تزریق‌ها است. علت تفاوت برداشت در دو بستر در تزریق متناوب، تأثیر منفی وجود ترک است. همچنین دلیل تفاوت تزریق متناوب و تزریق‌های تنه‌ها را می‌توان در نمودار افت فشار یافت. بدین صورت که نمودار افت فشار تزریق متناوب، رفتاری مرکب از تزریق گاز و آب مجزا دارد.

مخازن شنی هستند. با توجه به وجود مخازن گازی زیاد در کشور، می‌توان از گاز برای ازدیاد برداشت از چاه‌های نفت سود جست.

محیط متخلخل مخازن نفتی در اثر عوامل مختلف دچار گسستگی موضعی و یا کلی می‌شود. به طوری که ترک‌های ایجاد شده در مخزن رفتار آن را در مقابل جریان چند فازی سیال به طور کلی تحت تأثیر قرار می‌دهد. بسیاری از مخازن عمده تولیدکننده نفت در جهان مخازن ترک‌دار هستند. در چنین محیط‌هایی سیال جابه‌جاکننده از ناحیه با نفوذپذیری بالاتر (ترک‌ها) با سرعت، و از ناحیه با نفوذپذیری پایین‌تر (منافذ کوچک و گلویی‌ها) به آرامی عبور می‌کند. ضخامت و تعداد ترک‌های موجود در بسترهای نفتی و همچنین چگونگی اتصال به یکدیگر، بر روی میزان برداشت تأثیر بسیاری دارد و زمان بریک‌ترو<sup>۱</sup> را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مخزن نفتی به طور ذاتی در زمان کشف دارای فشار است و در اثر این فشار، نفت به راحتی از آن استخراج می‌شود. به این مرحله از برداشت نفت، بازیابی اولیه گفته می‌شود. با کم شدن فشار اولیه مخزن، سرعت تولید نفت

### ۱- مقدمه

علی‌رغم رشد صادرات محصولات غیرنفتی، نفت و گاز هنوز عمده‌ترین منبع درآمد ارزی و تأمین‌کننده بیش از ۹۸ درصد انرژی اولیه مورد نیاز کشور است. با این حال این بخش از نظر امکان تداوم تولید، در بلند مدت با مشکلات و محدودیت‌هایی روبه‌رو است. پس لازم است با توجه به رشد جمعیت و نیازهای توسعه اقتصادی کشور طی سال‌های آینده، در جهت رفع این محدودیت‌ها، از هم‌اکنون اقدامات جدی در خصوص افزایش تولید صورت گیرد. این اقدامات با توجه به افزایش تقاضای جهانی نفت و گاز در آینده می‌تواند جایگاه ایران را در بین کشورهای عضو اوپک و جهان حفظ نماید.

به‌کارگیری روش‌های ازدیاد برداشت نفت در جهان رو به گسترش بوده و از این طریق میانگین بازدهی مخازن نفتی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. حدود ۹۰ درصد از مخازن ایران از نوع شکاف‌دار هستند و استخراج ثانویه از این مخازن کمتر از ۳۰ درصد است. مخازن شکاف‌دار عمدتاً مربوط به خشکی است و برخی از مخازن دریایی مانند جزیره سیری،

1 Breakthrough Time (BTT)

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mnazari@shahroodut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



کاهش یافته و جهت حفظ میزان تولید به مخازن، سیالاتی تزریق می‌شود که فشار آن حفظ شود. چون تزریق این سیالات، در فاز دوم تولید نفت صورت می‌گیرد، این روش‌ها را بازیابی مرحله دوم می‌نامند. روش‌های مرسوم برای بازیابی مرحله دوم عملیات غیرامتزاجی مانند تزریق گاز یا آب را شامل می‌شود. حتی بعد از بازیابی مرحله دوم مقدار زیادی از نفت در مخزن باقی می‌ماند. برای بازیابی نفت‌های باقی‌مانده از مرحله دوم از روش‌های ازدیاد برداشت نظیر تزریق متناوب آب و گاز<sup>۱</sup> استفاده می‌شود.

سهرابی و همکاران [۱] در سال ۲۰۰۴ به تزریق متناوب آب و گاز در یک میکرومدل شیشه‌ای در فشار بالا جهت بازیابی نفت پرداختند و تصاویری باکیفیت بالا از فرآیندهای برداشت را در توالی‌های مختلف تزریق متناوب آب و گاز ثبت کردند. این آزمایش‌ها غالباً در رژیم جریان مویبگی و با دبی  $0.01 \text{ cm}^3/\text{hr}$  تا  $100 \text{ cm}^3/\text{hr}$  انجام شده است. آن‌ها نشان دادند که میزان برداشت نفت در سناریو تزریق متناوب از نفت تولیدی با تزریق گاز یا آب تنها، بیشتر بوده است. جیانگ و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۰ به مطالعه تجربی تأثیر شوری محلول آب نمک بر عملکرد تزریق متناوب با فاز گاز (دی‌اکسیدکربن) امتزاجی پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها در مغزه‌های مختلف از جنس ماسه سنگ به طول  $26/67$  سانتی‌متر و قطر  $2/54$  سانتی‌متر با تخلخل و نفوذپذیری‌های متفاوت انجام شد و عملکرد تزریق متناوب را در بازیابی نفت گزارش کردند. این آزمایش‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در فشاری حداقل ۲۰ درصد بالاتر از فشار امتزاج نفت و گاز انجام شده است. آن‌ها نشان دادند که بازدهی برداشت نفت به دلیل کاهش حلالیت دی‌اکسیدکربن در آب شور، کمی افزایش یافته است.

وهاپکان و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۰ یک محیط متخلخل منظم به ابعاد میکرو به همراه یک ترک افقی بر روی آن ساختند و به پدیده‌شناسی حضور ترک در میزان برداشت روغن در اثر تزریق گاز پرداختند. ژانگ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۱ در یک پژوهش تجربی به جابه‌جایی آب در یک میکرومدل دوبعدی با تراوایی دوگانه با تخلخل ۴۰ درصد به کمک تزریق دی‌اکسیدکربن مایع پرداختند. آن‌ها یافتند که در تزریق با دبی کم، دی‌اکسیدکربن مایع، آب را فقط در ناحیه با نفوذپذیری بالا با مکانیسم مویبگی انگشتی جابه‌جا می‌کند و با افزایش دبی تزریق، مکانیزم جابه‌جایی در آن ناحیه به ویسکوزیته انگشتی تغییر می‌کند. همچنین در تزریق با دبی بالا نیز، فاز جابه‌جا کننده، آب را در ناحیه با نفوذپذیری پایین با مکانیزم غالب مویبگی انگشتی جابه‌جا می‌کند.

ژونگ‌چون و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۲ با شبیه‌سازی آزمایشگاهی فاز چهارم میدان نفتی تاهه<sup>۲</sup> به بررسی انواع حالت‌های مختلف نفت باقی‌مانده در نقاط مختلف مخزن، پس از تزریق آب از پایین پرداختند و پنج مدل متفاوت نفت باقی‌مانده را شناسایی کردند. کانما و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۲ در یک مطالعه تجربی به مقایسه استفاده از فوم جهت هدایت جریان از نواحی با نفوذپذیری بالا به نفوذپذیری پایین در یک محیط متخلخل دوبعدی با تراوایی دوگانه پرداختند. آن‌ها نشان دادند تزریق فوم پایدار در مقایسه با تزریق گاز، به طور مؤثر موجب جابه‌جایی روغن در هر دو منطقه با نفوذپذیری بالا و پایین در میکرومدل متخلخل می‌شود. کان و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ یک بستر متخلخل میکرو و یک ترک افقی به کمک چاپگر سه بعدی ساختند و با تصویربرداری از مراحل تزریق فوم به پدیده‌شناسی اثر حضور ترک در میزان برداشت پرداختند.

ویجراتن و هالورسن [۸] در سال ۲۰۱۵ شکل‌گیری پدیده انگشتی در اثر تزریق آب در یک مخزن روغن سنگین را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها پدیده ایجاد انگشتی و چگونگی تأثیر آن بر بازیابی روغن را به صورت دوبعدی با استفاده از مدل حجم سیال<sup>۳</sup> در نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها به یک سرعت بحرانی برای ناپایداری در تزریق آب دست یافتند. گوتپلاس و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ میکرومدل سیلیکونی تولید کردند که از یک نمونه حقیقی ماسه‌سنگ الگوبرداری شده است. آن‌ها بازده جاروب نفت توسط گاز و فوم در این بستر را بررسی کردند. کاظمی فر و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۵ به مطالعه تجربی برداشت آب در یک میکرومدل دوبعدی متخلخل با میزان تخلخل ۵۰ درصد، به کمک گاز دی‌اکسید کربن پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود پیشروی هر دو فاز را با ارائه تصویر جامع از جریان، در طول حرکت رو به جلو و رشد انگشتی‌ها در میکرومدل متخلخل، نشان دادند. تحقیق آن‌ها جز اولین اندازه‌گیری‌های میدان سرعت محسوب می‌شود که در فشار بالا برای جابه‌جایی آب توسط تزریق گاز در یک میکروساختار متخلخل انجام شده است. ربانی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از نرم افزار این‌فوم<sup>۴</sup> به شبیه‌سازی یک جریان دوفازی در میکروکانال پرداختند. در مدل آن‌ها از آب به عنوان سیال جابه‌جا کننده استفاده شده است. با توجه به اینکه فشار ورودی مویبگی به قابلیت ترشوندگی بستگی دارد، آن‌ها در پژوهش خود تحت شرایط مرزی جریان ثابت در شرایط مختلف ترشوندگی و منافذ دارای زاویه‌های متفاوت، دینامیک

2 Take oil filed  
3 Volume Of Fluid (VOF)  
4 OpenFOAM

1 Water Alternating Gas (WAG) injection

تزریق متناوب را در یک میکرومدل دوبعدی برای تعیین ویژگی‌های جریان و مطالعه ساز و کارهای مؤثر بر گیر افتادن روغن در محیط متخلخل انجام داد. نتایج آنها نشان داد که هندسه گلوبی منافذ، ترشوندگی، و نرخ تزریق بر دینامیک جریان چند فاز در میکرومدل تأثیر می‌گذارد. رضوی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۰ با رویکرد بهبود استخراج نفت، یک مطالعه تجربی درباره پایداری فوم با انواع سورفاکتانت‌ها و تأثیر حضور فاز نفتی بر پایداری آنها انجام داده‌اند. مدل آزمایشگاهی آنها شامل چند ستون برای مطالعه پایداری و یک سلول شفاف هل-شو<sup>۲</sup> برای مطالعه تأثیر فوم بر ازدیاد برداشت است. یانگ و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۱ تزریق متناوب را با نسبت تزریق ۱:۱ در سه هسته مختلف با نفوذپذیری‌های مختلف مورد مطالعه قرار داد. آنها در طول آزمایش تزریق متناوب، در چرخه‌های تزریق گاز، خروجی را بستند تا فشار بالاتری برای لایه با نفوذپذیری کم در طول چرخه تزریق آب، فراهم شود. این روش، برداشت را حدود ۵ تا ۱۰ درصد افزایش داد. لی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۲۲ سه آزمایش تزریق آب، تزریق آب در ادامه تزریق گاز، و سپس تزریق متناوب آب و گاز در یک مدل دوبعدی از دانه‌های شن را انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که گرانش و نیروهای مویرگی به طور قابل توجهی بر کارایی تزریق متناوب تأثیر می‌گذارند و افزایش چرخه‌های تزریق باعث کاهش اشباع روغن باقی‌مانده می‌شود.

پس از بررسی چند نمونه از مطالعات پیشین، چگونگی تأثیر دقیق حضور ترک‌ها و ناهمگونی‌های مختلف بر دینامیک جریان چند فاز در محیط‌های متخلخل، به‌ویژه در طی فرایند تزریق متناوب، به طور کامل درک نشده است. با توجه به اهمیت بازبایی فاز محبوس شده در محیط متخلخل طبیعی و کاربردهای مختلف آن از جمله اصلاح خاک و ازدیاد برداشت نفت، اهداف خاص این مطالعه بررسی تأثیر وجود ترک در محیط متخلخل بر میزان برداشت است. به این منظور دو بستر دوبعدی متخلخل ساده و با ترک با استفاده از یک چاپگر سه‌بعدی ساخته شد و تأثیر تزریق نیتروژن، آب‌شور و همچنین تزریق متناوب آنها بر میزان اشباع نفت بررسی می‌شود. همچنین به مطالعه چگونگی تشکیل انگشتی‌ها درون گلوبی‌ها و درون ترک و نحوه توسعه آنها پرداخته می‌شود.

## ۲- بستر آزمایشگاهی

### ۲-۱- سیالات مورد استفاده

در این مطالعه با توجه به اینکه نفت خام سنگین ایران به طور معمول لزجتی بیش از ۱۰۰ cP دارد (به عنوان مثال نفت میدان سروش لزجت

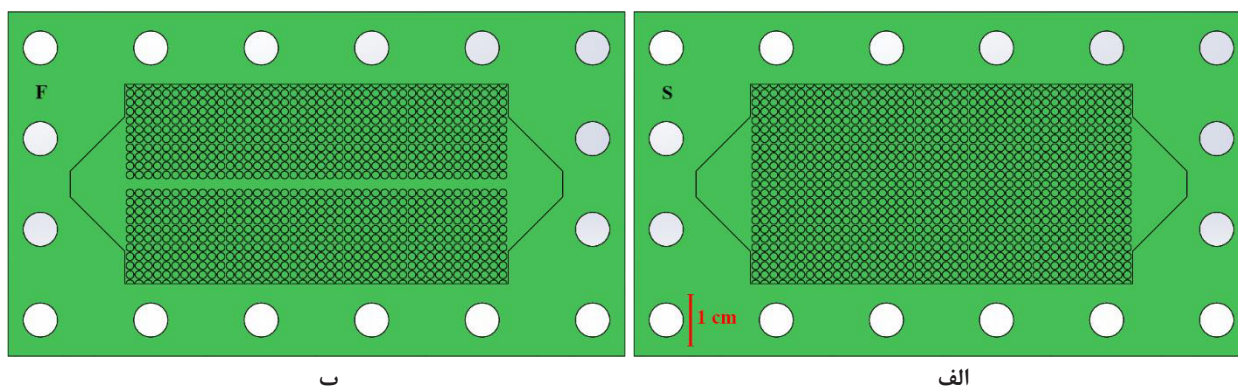
سطح تماس را شبیه‌سازی کردند. فرنو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۶ با تزریق فوم در یک شبکه ترک به بازبایی نفت پرداختند. آنها شرایط تزریق را به طور سیستماتیک تغییر دادند که شامل نسبت گاز، نرخ کل جریان و نرخ مایع بود. آنها با تزریق گاز، تزریق متناوب سورفاکتانک و گاز<sup>۱</sup> و تزریق همزمان در بستر، بازده جاروب محلی را از طریق مشاهده جبهه پیشروی محاسبه کردند. لیو و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۷ در یک کار آزمایشگاهی با تزریق گاز نیتروژن در مجموعه مخازن ترک‌دار-حفره‌دار، بازبایی نفت و عوامل افزایش بازدهی نظیر مقدار تزریق گاز و سرعت تزریق را بررسی کردند. در بستر مورد مطالعه آنها قسمت بدون حفره، تخلخل ۶۰ درصد و نفوذپذیری ۱۵۰۰ میلی داری، و قسمت با حفره، تخلخل ۱۵ درصد و نفوذپذیری ۲۰۰ میلی داری دارد. آنها یافتند که زمان شروع تزریق گاز یک نقطه بهینه است و تزریق بیش از حد زودتر یا دیرتر بر روی بازبایی نفت تأثیر خواهد گذاشت. همچنین مقدار و سرعت تزریق گاز، پارامترهای تأثیرگذاری هستند که میزان تولید یک چاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

شجاعی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ یک محیط متخلخل با پرینت سه‌بعدی تولید کردند و به صورت تجربی به بررسی تأثیر فوم بر جابه‌جایی نفت تحت شرایط مرزی مختلف پرداختند. همچنین آنها اثرات نوع نفت، کیفیت فوم و جریان فوم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که تولید فوم پایدار در حضور نفت سبک نسبت به نفت سنگین در محیط متخلخل به تأخیر می‌افتد. مطالعه آنها درک فیزیکی خوبی از جابه‌جایی نفت توسط فوم در محیط متخلخل ایجاد کرده است. پنگ لوو و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۸ در یک فرآیند آزمایشگاهی با تزریق گاز در یک محیط متخلخل با تراوایی دوگانه همراه با ترک، میزان برداشت نفت را بررسی کردند. آنها نشان دادند محیط‌های متخلخل با تراوایی دوگانه نسبت به محیط‌های متخلخل با تراوایی یگانه، تطابق نزدیک‌تری با مخازن واقعی دارند. رویدا و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش عددی المان محدود، تأثیر ترک‌های بزرگ، متوسط و کوچک، در نفوذپذیری یک محیط متخلخل دارای شبکه ترک را بررسی کردند. آنها از روش تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه برای جریان سیال در محیط متخلخل دارای ترک استفاده کردند. نفوذپذیری شبکه ۰/۱ میلی داری و تخلخل ۲۰ درصد است. نتایج آنها نشان داد که ترک‌های کوچک و متوسط باعث افزایش نفوذپذیری مخازن و تخلیه سریع‌تر سیال جابه‌جا کننده می‌شوند. وانگ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۰ مجموعه‌ای از آزمایش‌های تزریق آب، گاز و

جدول ۱. خواص آب و گاز در حضور روغن

Table 1. Properties of the water and gas in presence of oil

نام	کشش بین سطحی (mN/m)	زاویه تماس (درجه)
آب	۴۶/۲	۷۲/۸
گاز	۳۳/۱	۲۷/۴



شکل ۱. بستریهای متخلخل طراحی شده: الف) بستر متخلخل ساده (S)، ب) بستر متخلخل با ترک (F)

Fig. 1. The designed porous media: a) Single permeable porous medium(S) b) Fractured porous medium(F)

## ۲-۲- ساخت بستر

برای این مطالعه دو بستر دوبعدی متخلخل ساده<sup>۵</sup> و با ترک<sup>۶</sup> طراحی و ساخته شده‌اند. برای طراحی شبکه حفره‌ها، از آرایه‌های دایره‌ای استفاده شده که تراوایی همگن را در هر بخش ایجاد می‌کنند. چون در این مطالعه به بررسی مکانیزم‌های بنیادی برداشت، پرداخته می‌شود لذا همانند مطالعات گذشتگان، بستریهای کاملاً منظم و همگن انتخاب شده‌اند. تصویر هر کدام از این بسترها در شکل ۱ قابل مشاهده است. مشخصات هندسی بسترها نیز در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است جهت ارضای شرط دوبعدی بودن بستریهای مورد مطالعه ارتفاع پیلاها<sup>۷</sup> تا کمترین حد ممکن کوتاه در نظر گرفته شده است. طراحی بستریهای آزمایش به کمک نرم‌افزار سالیدورکس<sup>۸</sup> انجام شده و به کمک چاپگر سه‌بعدی به روش ال‌سی‌دی<sup>۹</sup> تولید شده است.

CP ۶۹۷ و نفت میدان کوروش لزج‌تی در محدوده CP ۱۳۷ (دارد) از روغن سیلیکون جهت تخریب نشدن بستر ساخته به عنوان سیال جایگزین نفت به عنوان فاز جابه‌جا شونده استفاده شده است. این روغن جهت آشکارسازی در مرحله پردازش تصویر با استفاده از سالونت دای<sup>۱</sup> با غلظت ۱/۰٪ وزنی به رنگ قرمز درآمده است. خواص دو مدل روغن رنگ شده و بدون رنگ توسط دستگاه رئومتر<sup>۲</sup> اندازه‌گیری شد که نتایج حاصل نشان داد، حضور رنگ در روغن تغییری در خواص آن ایجاد نکرده است و لزجت آن در محدوده CP ۴۰۶/۹ باقی‌مانده است. همچنین از ترکیب آب مقطر و نمک سدیم کلرید<sup>۳</sup> شرکت مرک<sup>۴</sup> با غلظت ۲٪ وزنی به عنوان آب‌شور استفاده شده است. گاز تزریقی به محیط نیز نیتروژن با خلوص ۹۹٪ است. برای تزریق متناوب آب و گاز نیز از نسبت ۱:۱ استفاده شده است. خواص فیزیکی آب و گاز در حضور روغن در جدول ۱ آورده شده است.

- 5 Single permeable porous medium (S)
- 6 Fractured porous medium (F)
- 7 Pillar
- 8 Solidworks
- 9 LCD

- 1 Solvent Dye
- 2 Rheometer Anton Paar MCR 302e
- 3 NaCl
- 4 Merck

جدول ۲. مشخصات هندسی بسترهای متخلخل

Table 2. Geometric properties of the porous media

نام بستر	طول محیط متخلخل (mm)	عرض محیط متخلخل (mm)	ارتفاع محیط متخلخل (mm)	ضخامت ترک (mm)	گلوبی (mm)	شعاع دایره (mm)	تخلخل (%)	نفوذپذیری (داریسی <sup>۱</sup> )
بستر متخلخل ساده (S)	۷۳/۷۵	۳۸/۵	۰/۴	-	۰/۲۵	۱/۵	۴۲	۲/۴
بستر متخلخل با ترک (F)	۷۳/۷۵	۳۸/۵	۰/۴	۲	۰/۲۵	۱/۵	۴۵	۴/۳

<sup>1</sup> Darcy

۲-۴- پردازش تصویر

برای پردازش تصویر عکس‌های آزمایش‌ها از کتابخانه اوپن‌سی‌وی<sup>۶</sup> استفاده شده است. اوپن‌سی‌وی یکی از قوی‌ترین کتابخانه‌های یادگیری ماشین و پردازش تصویر است که با زبان‌های برنامه‌نویسی زیادی از جمله پایتون<sup>۷</sup> و جاوا<sup>۸</sup> قابل استفاده است. ترکیب این کتابخانه با دیگر کتابخانه‌ها همچون نام‌پای<sup>۹</sup> که در محاسبات عددی بسیار بهینه است، قدرتی مضاعف را برای پردازش تصاویر فراهم می‌کند. با توجه به خروجی پردازش تصویر در شکل ۲، ابتدا عکس به مقیاس خاکستری درمی‌آید و جهت کاهش نویز و جزئیات، عکس بلور<sup>۱۰</sup> می‌شود. سپس با ترش‌هولدینگ<sup>۱۱</sup> عکس باینری<sup>۱۲</sup> می‌شود تا با استفاده از ابزار هاگ‌سیرکل<sup>۱۳</sup> دایره‌ها شناسایی و تعداد پیکسل‌های درون آن‌ها شمرده شوند. دایره‌های شناسایی شده با رنگ آبی در خروجی قابل مشاهده هستند.

در ادامه فضای رنگی از آر‌جی‌بی<sup>۱۴</sup> به اچ‌اس‌وی<sup>۱۵</sup> تغییر می‌کند تا تعداد پیکسل‌های روغن (با رنگ قرمز) بدون اشباع و هیو<sup>۱۶</sup> شناسایی شوند. سپس تعداد پیکسل‌های قابل مشاهده بستر که به رنگ سبز هستند شمارش

چاپگر مورد استفاده ساخت شرکت لانگر<sup>۱</sup> بوده و دارای دقت ساخت ۲۰ μm در محور عمود است.

۲-۳- تجهیزات آزمایش

برای تزریق سیالات به درون بستر متخلخل به صورت تکی و متناوب از دو پمپ سرنگی شرکت لامبدا<sup>۲</sup> و جی‌ام‌اس<sup>۳</sup> استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری افت فشار ورودی و خروجی، سنسور فشار شرکت ال‌وفلو<sup>۴</sup> نصب شده که اطلاعات فشار را به صورت لحظه‌ای در کامپیوتر ثبت می‌کند. به منظور تزریق متناوب آب و گاز، تایمر صنعتی شیوا به همراه دو شیر برقی به کار رفته است. تصویربرداری از محیط توسط دوربین ۱۲ مگاپیکسلی (۵۴ pixel/mm) با لنز ۲۵ mm انجام شده است. جهت اتصال سرنگ به ورودی از شیلنگ و اتصالات پنوماتیک با قطر ۴ mm استفاده شد. اندازه‌گیری‌های وزنی با ترازوی دقیق شرکت رادوگ<sup>۵</sup> انجام شده است. به منظور تعیین عدم قطعیت آزمایش‌ها، عدم قطعیت تجهیزات استفاده شده در این مطالعه، مطابق بازه عملکردی و خطای ذکر شده در کاتالوگ هر دستگاه محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. لذا عدم قطعیت آزمایش‌ها حداکثر برابر ۱٪ است.

- 6 OpenCV
- 7 Python
- 8 Java
- 9 Numpy
- 10 Blur
- 11 Thresholding
- 12 Binary
- 13 HoughCircles
- 14 RGB
- 15 HSV
- 16 Hue

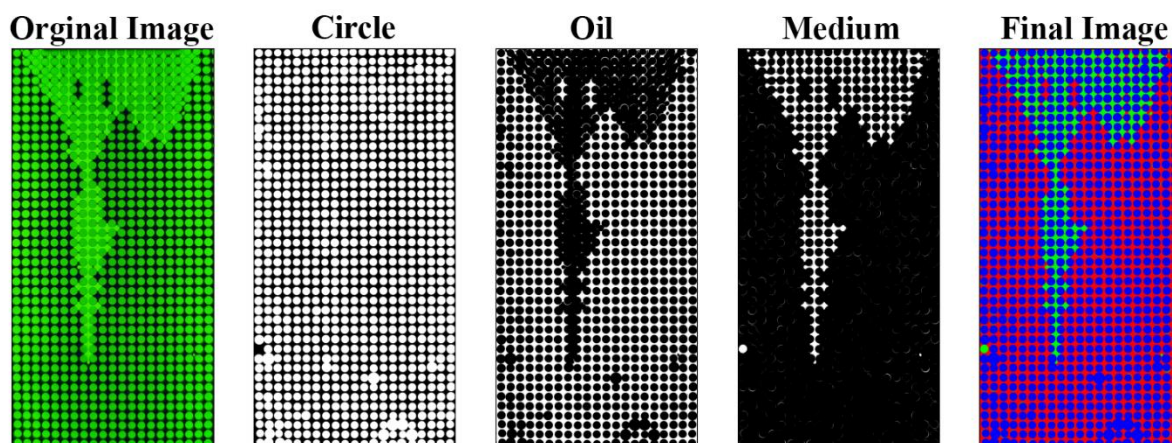
- 1 Longer
- 2 Lambda
- 3 JMS
- 4 Elveflow
- 5 Radwag



جدول ۳. ارزیابی عدم قطعیت تجهیزات

Table 3. Uncertainty assessment of the equipments

ردیف	نام دستگاه	شرکت سازنده	مدل	عدم قطعیت دستگاه
۱	پمپ سرنگی	لامبدا	VIT-FIT	۱ %
۲	پمپ سرنگی	جی ام اس	SP-۵۰۰	۱ %
۳	تایمر دیجیتال	شیوا	MTB-۱۵M	۰/۰۱ %
۴	سنسور فشار	ال و فلو	MPS-۳۰psi	۰/۲ %
۵	ترازو	رادوگ	PS-۵۱۰	۰/۰۰۴ %



شکل ۲. مراحل پردازش تصویر

Fig. 2. Steps of image processing

تزریق گاز، آب و متناوب آب و گاز است. برای این منظور ابتدا بسترها بین دو صفحه از جنس پلکسی گلس<sup>۱</sup> مهار می شوند که حاوی اتصالات پنوماتیک جهت ورود و خروج سیالات هستند. سپس روغن به عنوان فاز جابه جا شونده از محل خروجی با دبی پایین به درون محیط تزریق شده تا جایی که هوای درون محیط به طور کامل خارج شود. مطابق شکل ۳ در تزریق آب، شیر سه راهی خط ۱ باز شده و پمپ سرنگی، آب را با دبی  $0.04 \pm$  ml/hr به محیط تزریق می کند. در این تزریق خط ۲ (خط گاز) بسته است و برای تزریق گاز به طور عکس عمل می شود. همچنین برای تزریق متناوب،

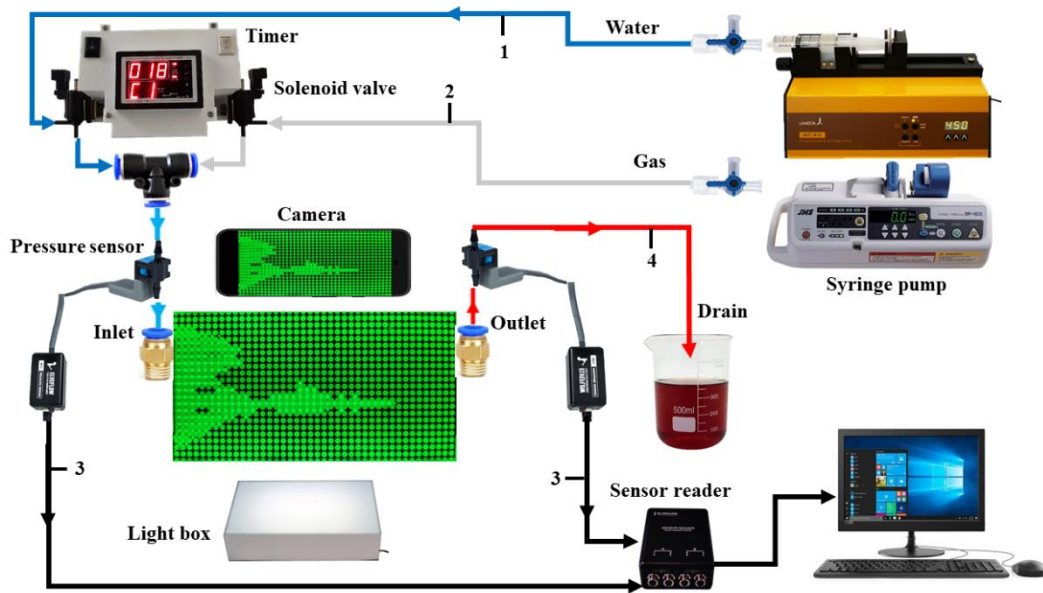
می شوند. برای محاسبه نسبت روغن برداشت شده به کل، طبق معادله (۱) با تقسیم پیکسل های بستر به مجموع پیکسل های بستر و روغن، درصد روغن برداشت شده به دست می آید.

$$\text{recovery}(\%) = \frac{\text{green pixles}}{\text{red pixles} + \text{green pixles}} \times 100 \quad (1)$$

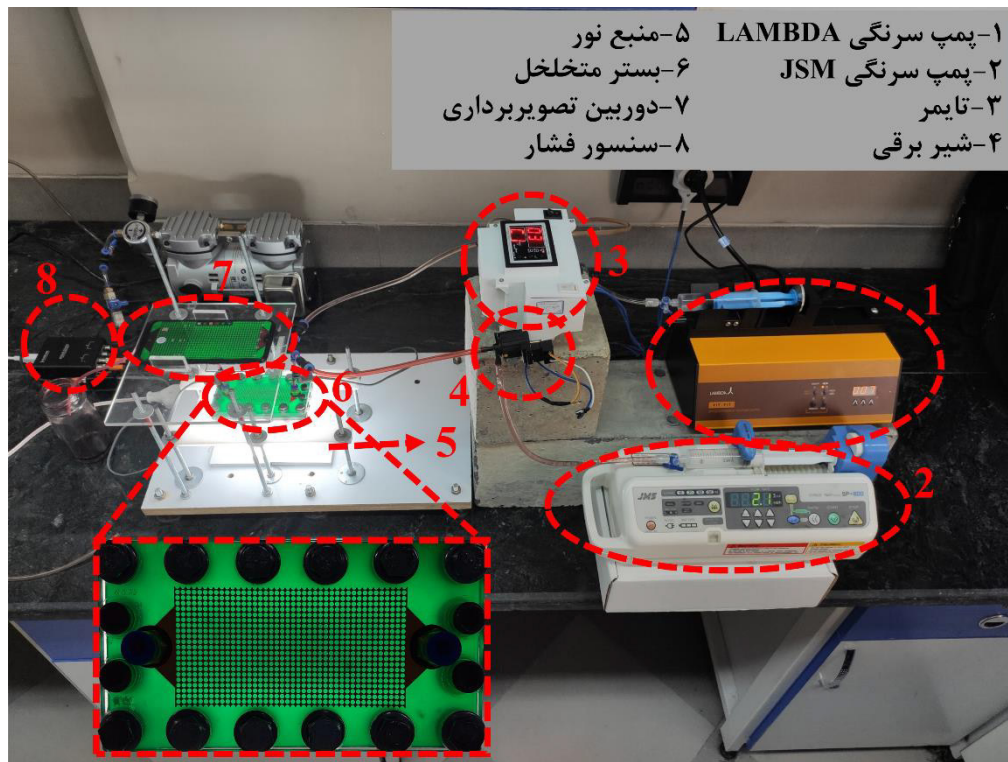
۲-۵- سناریو آزمایش

این مطالعه شامل بررسی دو محیط متخلخل در سه سناریو متفاوت

1 Plexiglass



الف



ب

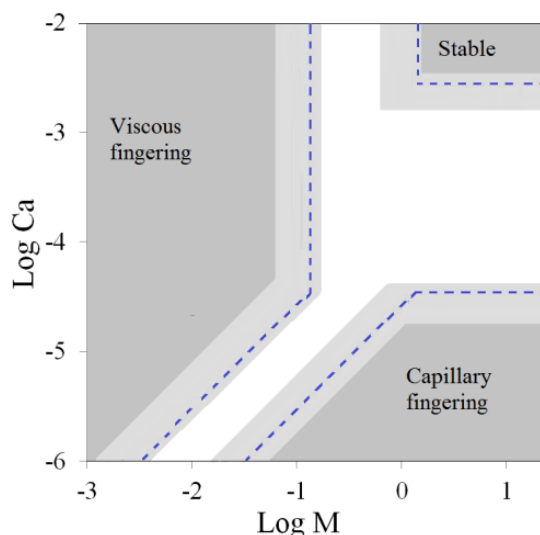
شکل ۳. تجهیزات آزمایشگاهی: الف) شماتیک، ب) ستاپ مورد استفاده

Fig. 3. Labratoar equipments: a) Schematic diagram b) Real setup

جدول ۴. مشخصات تزریق متناوب

Table 4. Specifications of the WAG injection

حجم تزریق آب (PV)	حجم تزریق گاز (PV)	دبی تزریق (ml/hr)	متناوب
۰/۰۳	۰/۰۳	۴/۳	



شکل ۴. دیاگرام فاز لنورمند [۲۱]

Fig. 4. Lenormand phase diagram [21]

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- نوع رژیم جریان مورد مطالعه

لنورمند و همکاران [۲۱] در سال ۱۹۸۸ جابه‌جایی فاز خیس کننده توسط فاز غیرخیس کننده (که هر دو فاز غیرامتزاجی هستند) در یک محیط متخلخل افقی و مسطح را بدون در نظر گرفتن اثر نیروی گرانش بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جابه‌جایی دو سیال مخلوط نشدنی در محیط متخلخل به سه رژیم موینگی<sup>۱</sup>، انگشتی ویسکوز<sup>۲</sup> و رژیم پایدار<sup>۳</sup> دسته بندی می‌شوند. نمایش این سه رژیم را دیاگرام فازی گویند که در شکل ۴ ارائه شده است. محورهای عمودی و افقی این دیاگرام به ترتیب لگاریتم عدد بی‌بعد موینگی ( $Ca$ )<sup>۴</sup> و لگاریتم نسبت ویسکوزیته ( $M$ )<sup>۵</sup> است.

لازم است که حجم‌های مساوی از آب و گاز در زمان‌های مشخص به درون بسترها تزریق شوند، بدین منظور خط ۱ و ۲ به شیرهای برقی وصل می‌شوند که مطابق شکل شیرها از تایمر فرمان می‌گیرند. زمان تزریق هر کدام از فازها ۱۸ S در نظر گرفته شده است. در حین آزمایش، فشار ورودی و خروجی با فرکانس ۰/۵ Hz توسط سنسورهای فشار ثبت می‌شوند (خط ۳). همچنین در طول آزمایش از روند برداشت روغن و الگوهای ایجاد شده تصویربرداری می‌شود. روغن برداشت شده بر اثر تزریق از خط ۴ در ظرف، تخلیه می‌شود. پس از آزمایش، عکس‌های گرفته شده با استفاده از کد پردازش تصویر، مورد بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است تمامی آزمایش‌ها حداقل سه بار تکرار شده‌اند تا از تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود و نتایج قابل تکرار، به عنوان خروجی آن‌ها گزارش شده است. همچنین آزمایش‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر انجام شده است.

- 1 Capillary fingering
- 2 Viscous fingering
- 3 Stable displacement
- 4 Capillary nubmer
- 5 Mobility ratio



### ۳-۲-۱- بررسی شبکه و اثبات همگرایی حل

در مسأله مورد نظر در این پژوهش به دلیل اثرات غیر خطی موجود در معادلات ممتوم به اجبار باید همگرایی حل بدست آمده را بررسی نمود. لذا برای نشان دادن استقلال حل مسأله از تعداد و موقعیت گره‌های شبکه، باید یکی از پارامترهای مهم جریان (به عنوان مثال بریک‌ترو<sup>۳</sup> سیال جابجاکننده برحسب حجم منافذ<sup>۴</sup>) برای شبکه‌های مختلف را محاسبه نمود. بنابراین، برای نشان دادن استقلال حل مسأله از شبکه در نرم افزار کامسول در بستر متخلخل ساده، مش رفته رفته ریز شد و در شکل ۵ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از دامنه محاسباتی با اندازه حدود ۲۵۰ هزار به بعد، اختلاف ناچیزی دارد. به همین جهت دامنه محاسباتی با تعداد ۳۰۰ هزار برای تحلیل در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲-۲- شبیه‌سازی عددی تزریق آب در بستر متخلخل ساده

بعد از مطالعه شبکه و بررسی استقلال حل مسأله از تعداد و موقعیت گره‌های شبکه، به شبیه‌سازی عددی تزریق آب در بستر متخلخل ساده و محاسبه میزان برداشت بعد از ۶ برابر حجم منافذ پرداخته شد. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود این شبیه‌سازی تطابق بسیار خوبی با نتیجه آزمایش تجربی همین تزریق دارد.

### ۳-۳- بررسی نتایج تجربی برداشت

در این پژوهش با سه مدل تزریق گاز، آب و متناوب آب و گاز در دو بستر ذکر شده به میزان ۶ برابر حجم منافذ به مقایسه میزان برداشت پرداخته شد.

### ۳-۳-۱- بستر متخلخل ساده

با انجام سه سناریو ذکر شده در بستر متخلخل ساده، نمودار برداشت<sup>۵</sup> برحسب حجم منافذ مطابق شکل ۷ حاصل می‌شود. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود میزان برداشت روغن در تزریق گاز حدود ۸ درصد و در تزریق آب حدود ۲۰ درصد است. اما میزان برداشت در تزریق متناوب این دو، به مراتب بیشتر بوده و حدود ۵۵ درصد است. میزان برداشت در هر سه سناریو تا بریک‌ترو به صورت خطی و با شیب زیاد، افزایش می‌یابد و بعد از بریک‌ترو شیب نمودار کاهش پیدا می‌کند. میزان برداشت در تزریق متناوب تا قبل از بریک‌ترو بسیار بیشتر از برداشت دیگر سناریوها بوده است. این افت‌ها در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

### جدول ۵. لگاریتم عدد بی‌بعد موینگی و تحرک‌پذیری

Table 5. Logarithm of the Capillary and Mobility number

نام	Log(Ca)	Log(M)
آب	-۵/۲۵	-۲/۶۲
گاز	-۷/۳۵	-۴/۳۸

$$M = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (2)$$

$$Ca = \frac{\mu_2 V_2}{\sigma \cos \theta} \quad (3)$$

در معادله (۲)،  $\mu_1$  ویسکوزیته فاز جابه‌جا شونده و  $\mu_2$  ویسکوزیته فاز جابه‌جا کننده است. در معادله (۳)،  $V_2$  سرعت فاز جابه‌جا کننده،  $\sigma$  کشش بین سطحی دو فاز و  $\theta$  زاویه تماس بین دو فاز است.

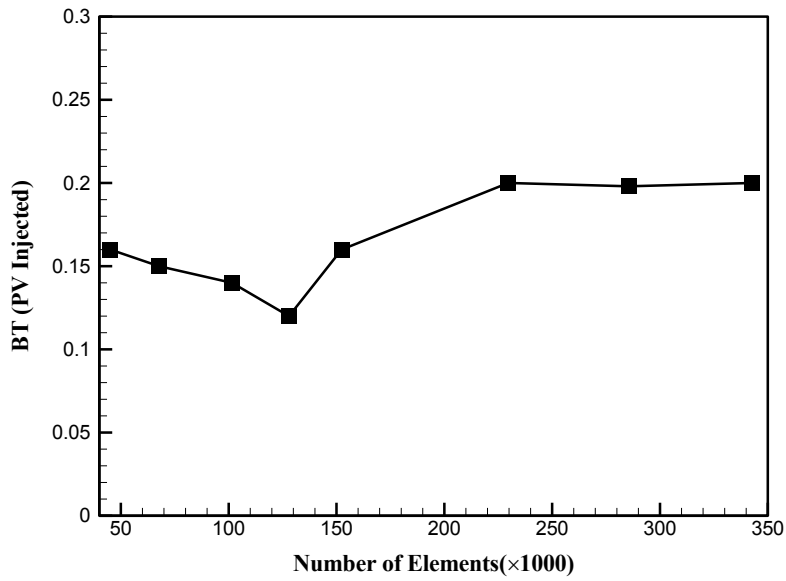
در رژیم انگشتی ویسکوز که در نسبت ویسکوزیته‌های کم قابل مشاهده است، نیروی ویسکوزیته سیال جابه‌جا شونده حاکم است و نیروی موینگی و افت فشار در سیال جابه‌جا کننده قابل نظر کردن هستند. لازم به ذکر است این مطالعه طبق اعداد بی‌بعد موینگی و تحرک‌پذیری (جدول ۵) در ناحیه رژیم انگشتی ویسکوز قرار دارد.

### ۳-۲- شبیه‌سازی عددی

قبل از ارائه نتایج تجربی میزان برداشت، به شبیه‌سازی عددی تزریق آب در بستر متخلخل ساده و مقایسه با نتیجه تجربی این آزمایش پرداخته می‌شود. مدل هندسی بستر متخلخل ساده، جهت تجزیه و تحلیل عددی با استفاده از روش المان محدود در نرم افزار کامسول<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شد که معادلات دیفرانسیل جزئی معادلات حاکم و شرایط مرزی را با استفاده از فرم کلی آن‌ها حل می‌کند. بدین صورت که شرط مرزی دیواره‌ها عدم لغزش<sup>۲</sup> و شرط مرزی ورودی سرعت ثابت (متناسب با دبی ورودی از پمپ سرنگی تنظیم شده است) و شرط مرزی خروجی مشتقی (تغییرات فشار صفر) است.

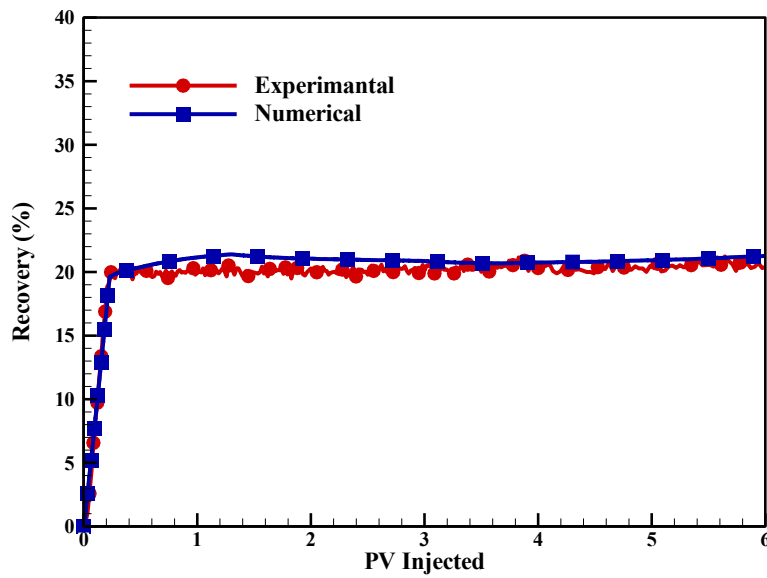
3 Breakthrough  
4 Pore Volume (PV)  
5 Recovery(Rec)

1 COMSOL Multiphysics 5.6  
2 No Slip



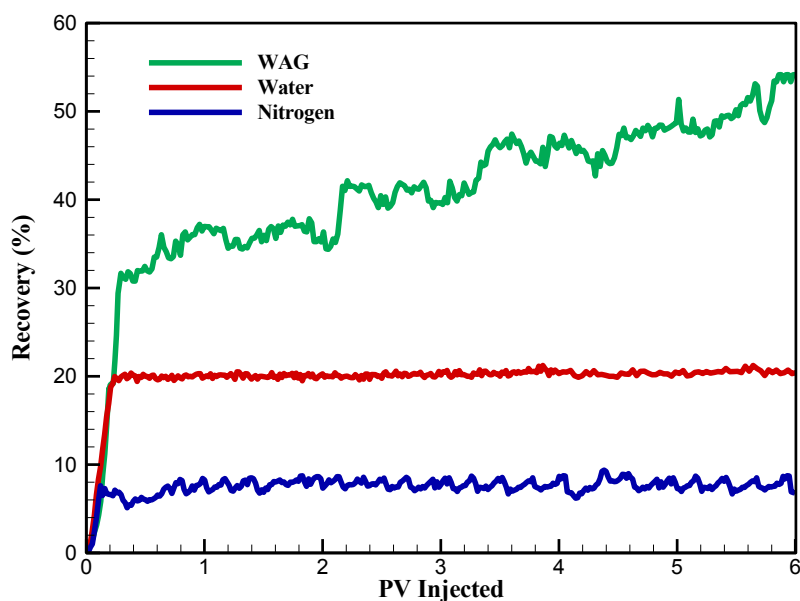
شکل ۵. بررسی استقلال حل از شبکه

Fig. 5. Mesh independence study



شکل ۶. شبیه سازی عددی میزان برداشت در بستر متخلخل ساده بر حسب حجم منافذ آب تزریق شده

Fig. 6. Numerical simulation of Recovery vs PV injected in the S medium



شکل ۷. میزان برداشت در بستر متخلخل ساده بر حسب حجم منافذ تزریق شده

Fig. 7. Recovery vs PV injected in the S medium

بستر مشاهده شد که میزان برداشت، نسبت به تزریق تنهای گاز یا آب به مراتب افزایش داشته است. لازم به ذکر است که تزریق متناوب، با آب شروع می‌شود. تناوب تزریق، باعث ایجاد صف‌های متوالی آب و گاز در ورودی و خروجی می‌شود. به علت اینکه در محیط متخلخل فشار موینگی وجود دارد، فاز گاز مسیر ورودی، فشرده می‌شود. این فشردگی تا جایی پیش می‌رود که بر فشار موینگی محیط غلبه کند و فاز گاز، آب را به درون محیط حرکت می‌دهد. تناوب ورود آب و گاز باعث افزایش افت فشار در بستر بوده که این افزایش (نمودار افت فشار در ادامه ارائه شده است)، میزان برداشت را دچار جهش‌های محلی می‌کند (شکل ۱۰).

این روند فشرده‌سازی و ورود به محیط تکرار می‌شود. همچنین گاز می‌تواند انگشتی‌های جدیدی به صورت عرضی ایجاد نماید (شکل ۱۱) که در نوبت حرکت آب، این انگشتی‌ها گسترش می‌یابند. مجموع این عوامل باعث افزایش برداشت در مقایسه با تزریق مجزای گاز یا آب می‌شود.

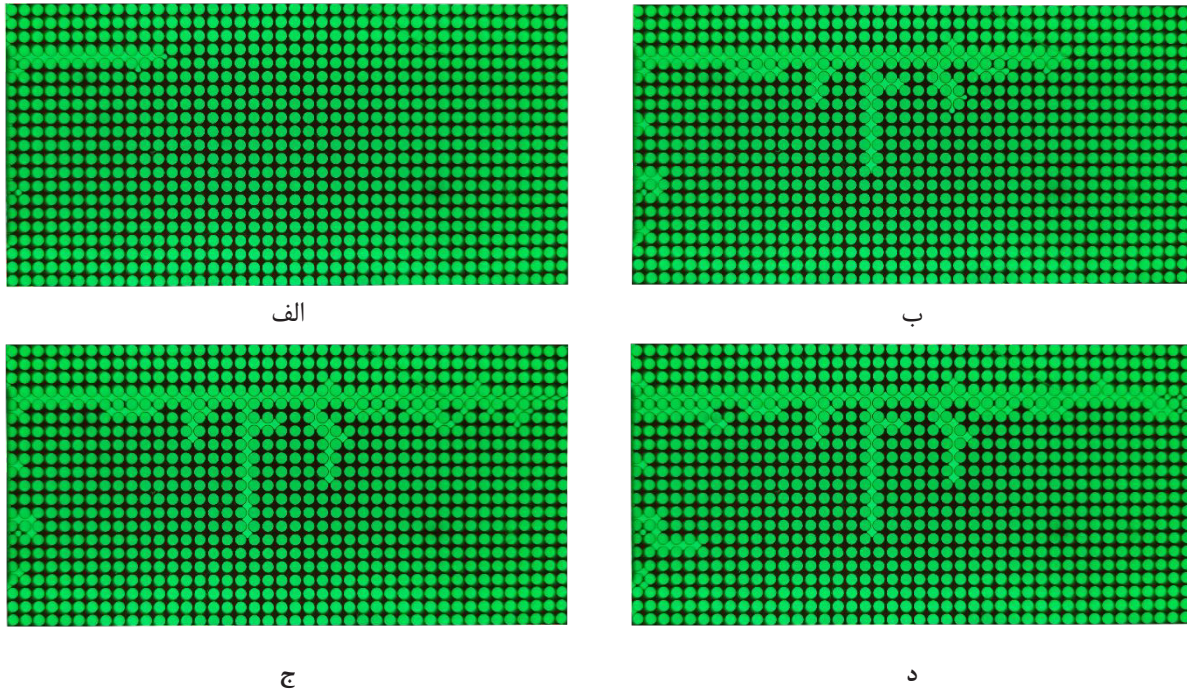
همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص شده است، با ورود مجدد آب به بستر، روغن محصور شده بین دو جبهه به سمت گاز فشار می‌آورد که باعث بریده شدن انگشتی گاز می‌شود که به این پدیده اسنپ-آف<sup>۱</sup> گویند. برای

در تزریق گاز به علت کم بودن گرانی فاز جابه‌جا کننده، نسبت ویسکوزیته‌ها بسیار کم است و این امر مطابق (شکل ۸ الف) باعث تشکیل سریع اولین انگشتی گاز، درون فاز جابه‌جا شونده می‌شود. همان‌طور که در (شکل ۸ ب) مشاهده می‌شود، چون این بستر فاقد ترک است، انگشتی ایجاد شده مجبور به عبور از بین گلوبی‌های محیط است. البته گاز در طول مسیر انگشتی‌های جدید و کوچکی ایجاد می‌کند اما با بریک‌ترو انگشتی ابتدایی، راه برای خروج ادامه فاز تزریقی از بستر فراهم شده و راه جدیدی برای خروج نمی‌سازد، در نتیجه میزان برداشت ثابت می‌ماند (شکل ۸ ج و د).

در تزریق آب به علت بیشتر بودن لزجت فاز جابه‌جا کننده در مقایسه با گاز، تشکیل اولین انگشتی دیرتر اتفاق می‌افتد. بدین صورت که مطابق (شکل ۹ الف) آب در ابتدا به صورت جبهه‌ای گسترده وارد بستر شده و پس از جاروب کردن مقداری از روغن، در اثر ناپایداری جبهه پیش رونده، اولین انگشتی تشکیل می‌شود (شکل ۹ ب). به همین علت بریک‌ترو آب به تأخیر می‌افتد که در نتیجه برداشت بیشتری را در پی دارد (شکل ۹ ج). پس از رسیدن اولین انگشتی آب به خروجی، ادامه تزریق تأثیروری در برداشت نداشته و با عبور آب از مسیر ایجاد شده، مقدار برداشت ثابت می‌ماند (شکل ۹ د).

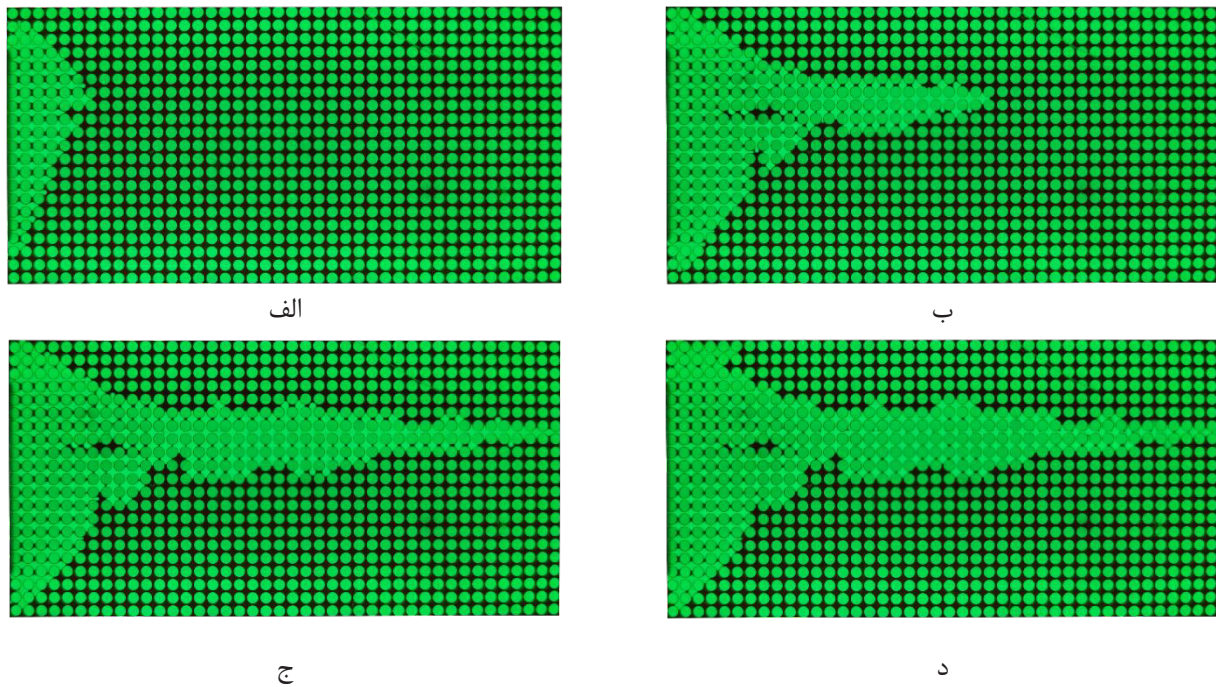
با تزریق متناوب آب و گاز به نسبت ۱:۱ و با دوره زمانی ۱۸ S درون

1 Snap-off



شکل ۸. چند نمونه از تصاویر تزریق گاز در حجم منافذهای مختلف. الف) ۰/۰۵ PV ب) ۰/۱۰ PV ج) ۰/۱۲ PV د) ۲/۵ PV

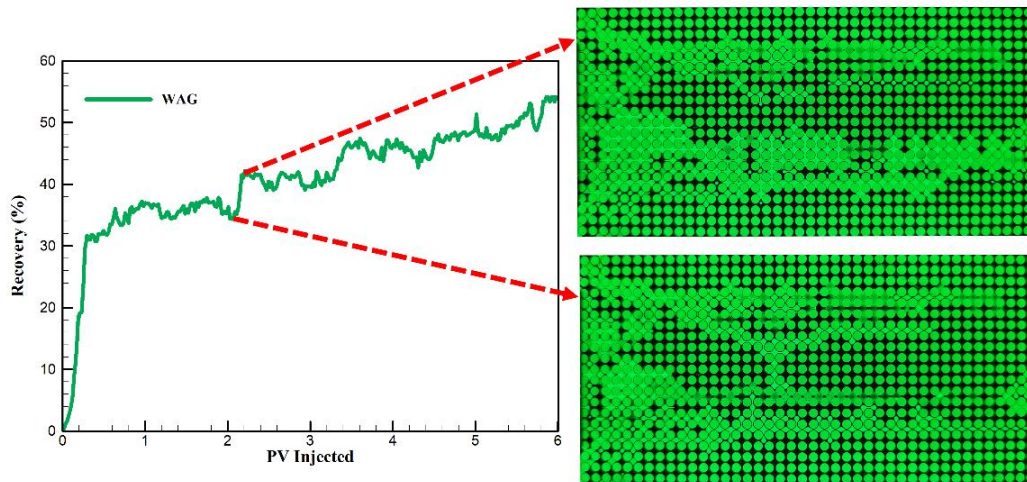
Fig. 8. Samples of gas injection at different PV. a) 0.05 PV b) 0.10 PV c) 0.12 PV d) 2.5 PV



شکل ۹. چند نمونه از تصاویر تزریق آب در حجم منافذهای متفاوت. الف) ۰/۰۷ PV ب) ۰/۱۴ PV ج) ۰/۲۲ PV د) ۲/۵ PV

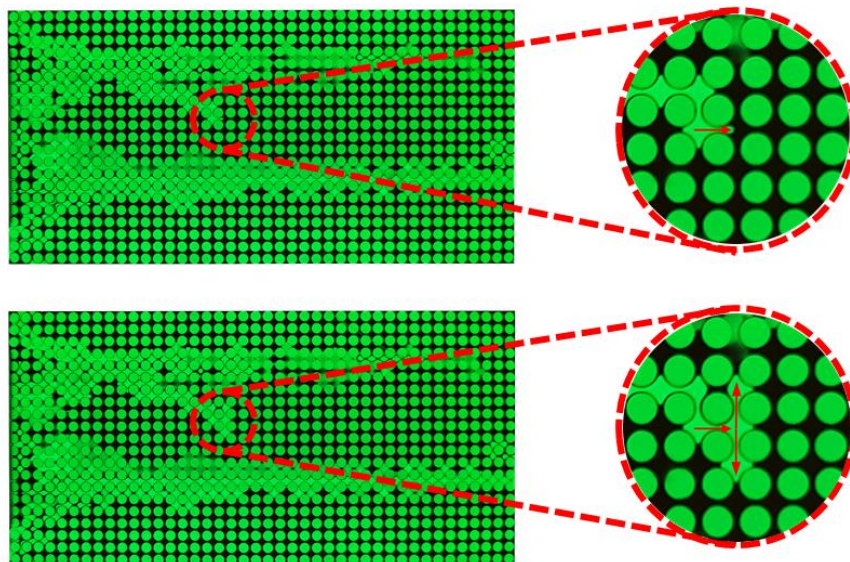
Fig. 9. Samples of water injection in different PV. a) 0.07 PV b) 0.14 PV c) 0.22 PV d) 2.5 PV





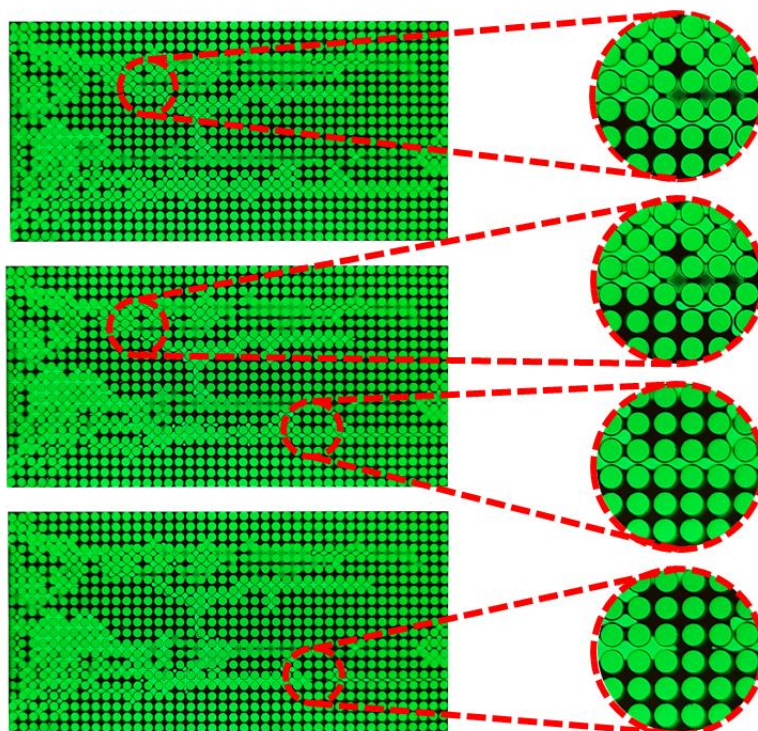
شکل ۱۰. جهش محلی برداشت در اثر تزریق متناوب آب و گاز

Fig. 10. Local jump in the recovery by the WAG injection



شکل ۱۱. حرکت عرضی گاز

Fig. 11. Cross movement of the gas



شکل ۱۲. پدیده اسنپ-آف

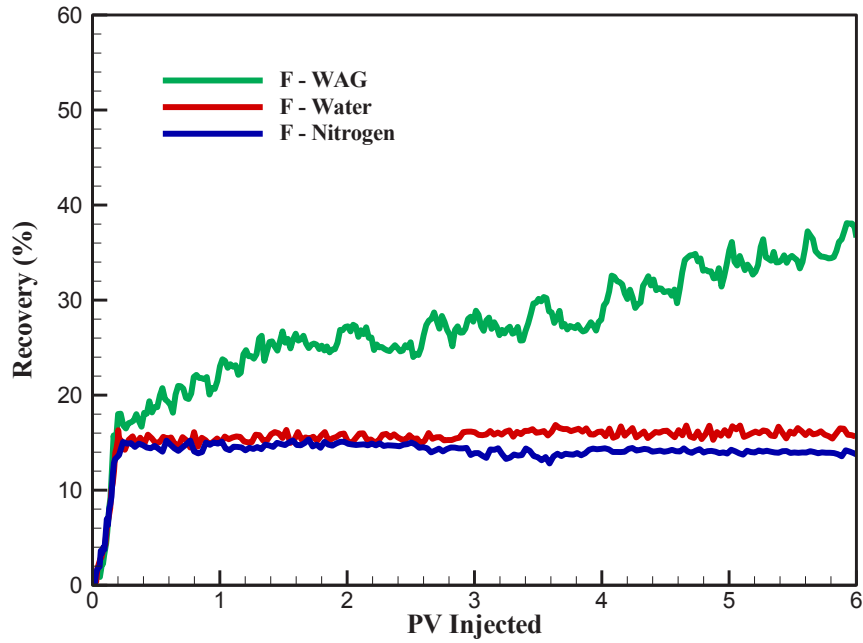
Fig. 12. Snapp-off phenomena

گاز به عنوان اولین فاز جابه‌جا کننده به بستر متخلخل با ترک تزریق شد. در این بستر به علت وجود ترک که مسیری با تراوایی بسیار زیاد نسبت به سایر نواحی بستر است، گاز تمایلی به ورود به نواحی با تراوایی کمتر را ندارد و به محض ورود به محیط، درون ترک جریان می‌یابد (شکل ۱۴ الف). هرچند در مقایسه با بستر متخلخل ساده میزان برداشت افزایش یافته است اما این افزایش تنها به علت وجود ترک بوده و مطابق (شکل ۱۴ ب) حتی بعد از تزریق ۶ برابر حجم منافذ مشاهده می‌شود که گاز تنها ترک را جاروب کرده است و هیچ نفوذی به اطراف نداشته است. نتیجه این آزمایش نشان می‌دهد، در بسترهای متخلخلی که ترک با تراوایی بالاتری نسبت به نواحی اطراف وجود دارد تزریق گاز استراژی مناسبی جهت برداشت بیشتر نیست. در ادامه، تزریق آب نیز مورد مطالعه قرار گرفته که میزان برداشت آن مانند نتیجه تزریق گاز بوده. آب نیز به همان علت ذکر شده برای گاز، تنها توانسته است مسیر ترک را جاروب کند. البته در تزریق آب به علت بالاتر بودن ویسکوزیته نسبت به گاز، چند حرکت عرضی محدود و کوچک ایجاد شده اما در میزان کلی برداشت تأثیر چندانی نداشته است (شکل ۱۵ الف و ب).

این منظور ابتدا گاز باید فشار کافی برای عبور از گلویی را داشته باشد، اما پس از عبور، دچار افت شده و روغن مجدد به گلویی جاروب می‌کند. با ورود بیشتر آب به درون بستر این انگشتی، به سمت خروجی حرکت داده می‌شود.

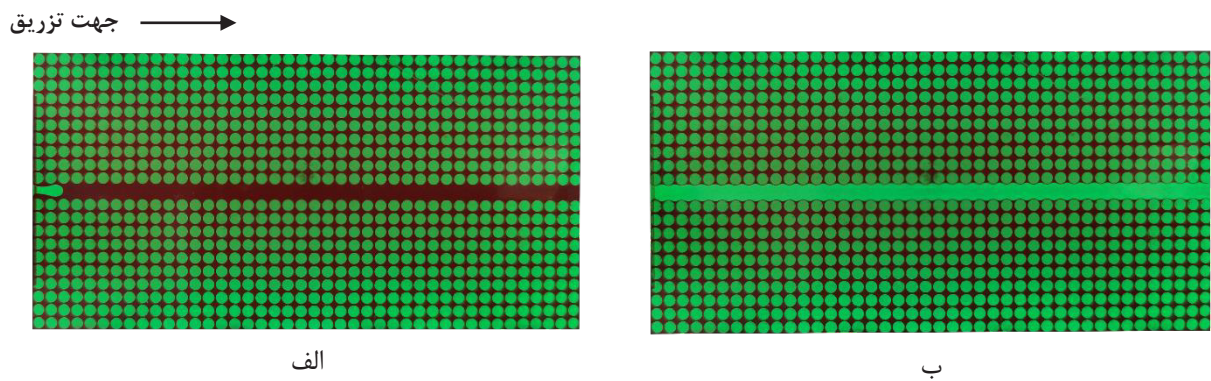
### ۳-۳-۲- بستر متخلخل با ترک

مشابه بستر متخلخل ساده، در بستر متخلخل با ترک نیز با سه مدل تزریق، نمودار برداشت برحسب حجم منافذ مطابق شکل ۱۳ حاصل شد. در این نمودار دیده می‌شود که میزان برداشت روغن در تزریق گاز و تزریق آب به یک اندازه و در حدود ۱۴ درصد شده است. همچنین میزان برداشت در تزریق متناوب حدود ۳۸ درصد است. همانند بستر متخلخل ساده، در بستر متخلخل با ترک نیز میزان برداشت در هر سه سناریو تا بریک‌ترو به صورت خطی و با شیب زیاد، افزایش می‌یابد و بعد از بریک‌ترو شیب نمودار کاهش پیدا می‌کند. اما در تزریق متناوب به علت وجود ترک، میزان برداشت تا بریک‌ترو کمتر از برداشت این سناریو در بستر S است. علت هم اندازه بودن برداشت آب و گاز و بیشتر بودن برداشت در تزریق متناوب، در ادامه بررسی می‌شود.



شکل ۱۳. میزان برداشت در بستر متخلخل با ترک بر حسب حجم منافذ تزریق شده

Fig. 13. Recovery vs PV injected in the F medium

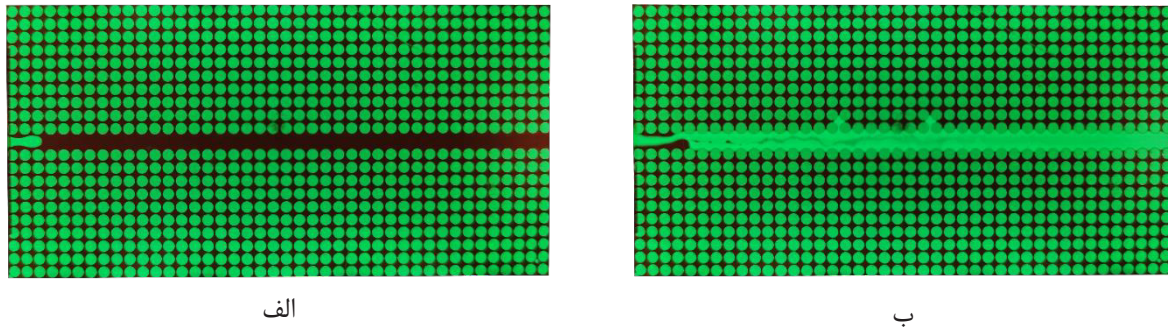


شکل ۱۴. تزریق گاز در بستر متخلخل با ترک. الف) ورود گاز به بستر، ب) پس از تزریق ۶ PV

Fig. 14. Gas injection in the F medium a) Gas entered the porous medium b) After 6 PV injection

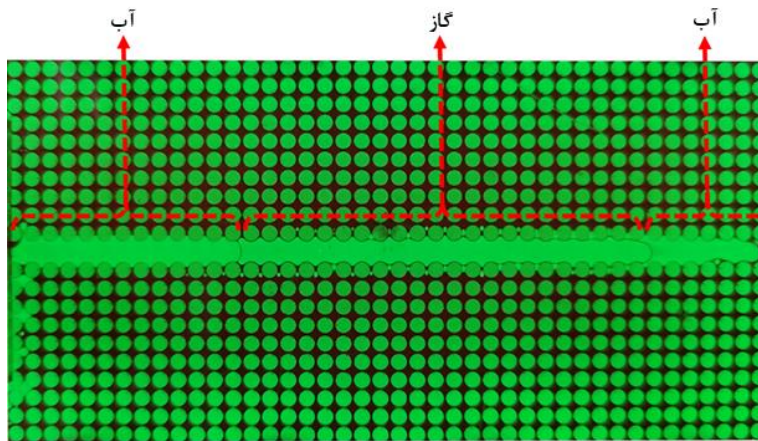


جهت تزریق →



شکل ۱۵. تزریق آب در بستر متخلخل با ترک . الف) ورود آب به بستر، ب) پس از تزریق ۶ PV

Fig. 15. Water injection in the F medium. a) Water entered the porous medium b) After 6 PV injection



شکل ۱۶. حضور متوالی آب و گاز در ترک

Fig. 16. Successive presence of water and gas in the fracture

### ۳-۴- مقایسه و بررسی تمامی نتایج

پس از تحلیل و بررسی هر کدام از آزمایش‌ها به طور جداگانه، در شکل ۱۸ تمامی آن‌ها به همراه میزان خطای تکرار هر آزمایش ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به علت وجود ترک در بستر متخلخل با ترک میزان تغییرات برداشت در تکراری مختلف بسیار اندک است اما در بستر متخلخل ساده بازه تغییرات گسترده‌تر است.

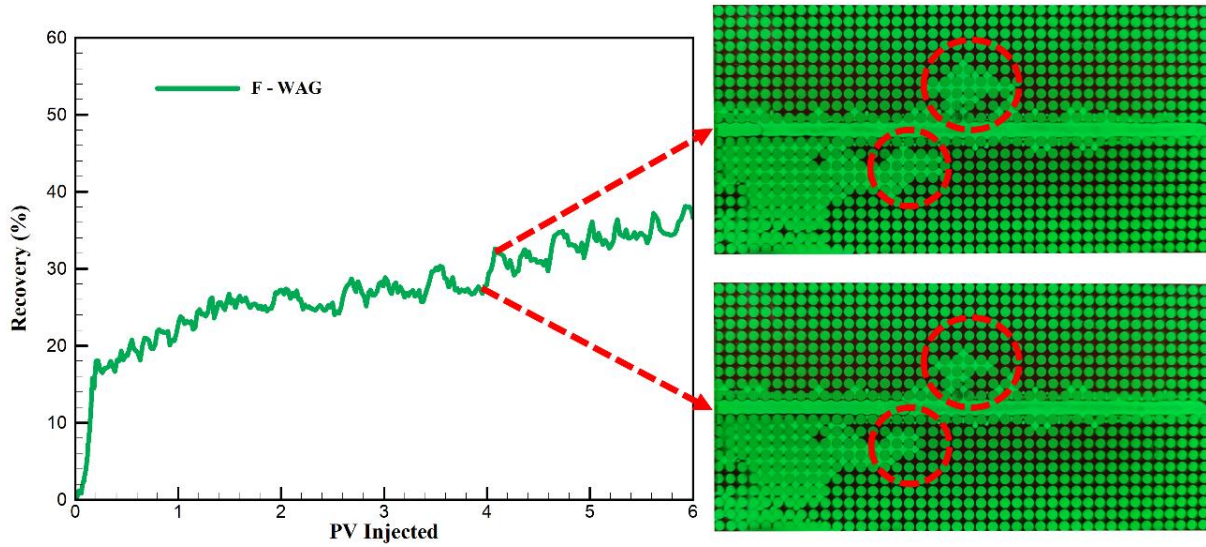
### ۳-۵- افت فشار

در ادامه، نمودار افت فشار در بستر متخلخل ساده (به عنوان نمونه) مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همان‌طور که در (شکل ۱۹ الف) مشاهده می‌شود در تزریق آب، بیشترین افت فشار در لحظه ورود آن به بستر ثبت شده است. پیشینه بودن افت فشار در این مرحله، به علت تلاش سیال جابه‌جا کننده

در تزریق متناوب آب و گاز اگرچه نسبت به تزریق تنهای گاز یا آب برداشت بیشتری وجود دارد اما به علت وجود ترک میزان برداشت، از برداشت در بستر متخلخل ساده کمتر است. زیرا همان‌طور که در بالا ذکر شد، فاز جابه‌جا کننده راه ترک (با تراوایی بالا) را برمی‌گزیند و مطابق شکل ۱۶ فازهای تزریقی به طور متناوب وارد ترک می‌شوند.

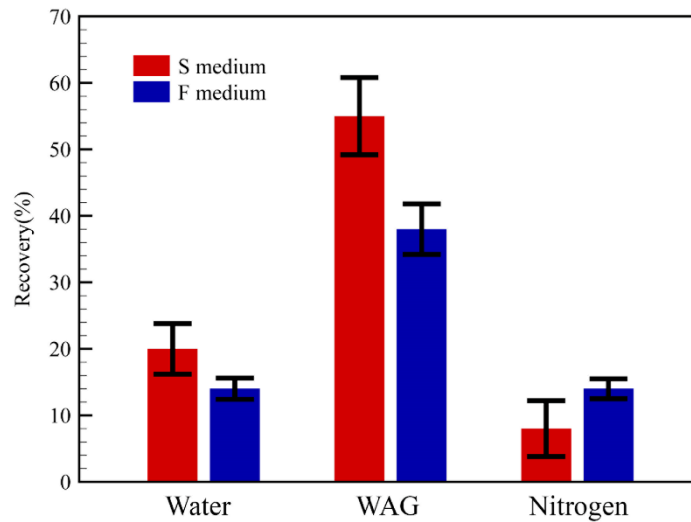
با ادامه تزریق، فشار ایجاد شده در اثر تراکم گاز بر روی آب به فشار مویبندی گلوله‌ها غلبه می‌کند و سرانجام وارد محیط اطراف ترک نیز می‌شود که این اتفاق مشابه بستر متخلخل ساده باعث جهش در میزان برداشت می‌شود (شکل ۱۷). در طول زمان تزریق، همانند تزریق تنهای آب حرکت عمود بر راستای ترک مشاهده می‌شود ولی به علت وجود فشار فاز گاز پشت سر فاز آب، این حرکت گسترش و تغییر محسوسی در برداشت ایجاد می‌کند.





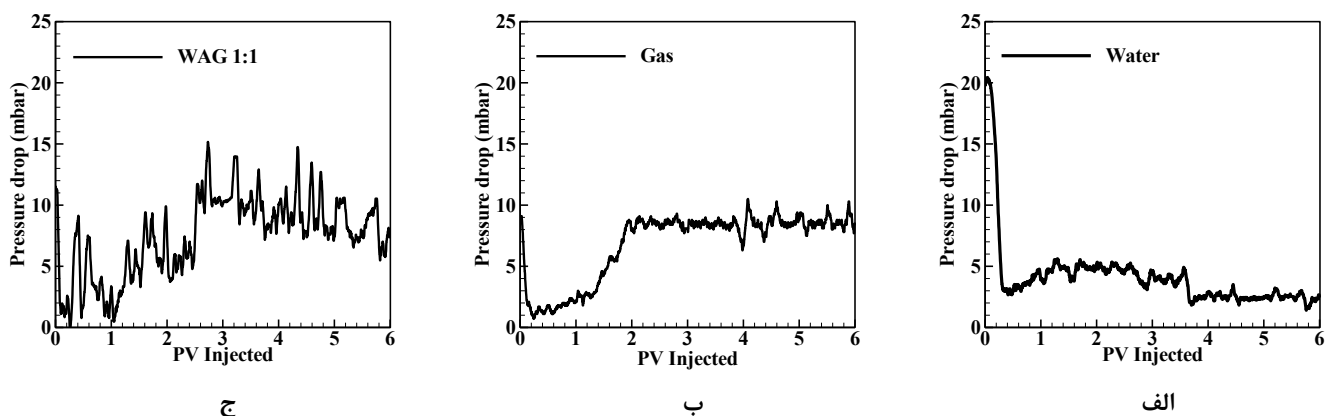
شکل ۱۷. جهش محلی برداشت در اثر تزریق متناوب آب و گاز

Fig. 17. Local jump in the recovery by the WAG injection



شکل ۱۸. حداکثر برداشت تمامی آزمایش‌ها در بستری متخلخل ساده و با ترک با دبی تزریقی ثابت ۴/۳ ml/hr

Fig. 18. Maximum recovery of all tests in S and F media with 4.3 ml/hr constant flow rate injection.



شکل ۱۹. نمودار افت فشار بر حسب حجم منافذ در بستر متخلخل ساده. الف) تزریق آب، ب) تزریق گاز، ج) تزریق متناوب

Fig. 19. Pressure drop vs PV injected in S medium. a) Water injection, b) Gas injection, c) WAG injection

برداشت، حاصل این نوسانات افت فشار است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش دو بستر دوعده‌ای متخلخل ساده و با ترک به کمک چاپگر سه‌بعدی ساخته و سه سناریوی تزریق گاز، آب و متناوب این دو آزمایش شد. با تصویربرداری و پردازش تصاویر حاصل شده به کمک کد نوشته شده به بررسی میزان برداشت روغن از بسترها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداخته شد. همچنین الگوهای انگشتی ایجاد شده و جبهه بین دو فاز جابه‌جا کننده و جابه‌جا شونده مطالعه شد و نتایج زیر به دست آمد:

- تزریق متناوب، در بستر متخلخل ساده حدود ۵۵ درصد محیط را جاروب کرده که این میزان بیش از ۶ برابر برداشت تزریق تنه‌های گاز و بیش از ۲/۵ برابر برداشت تزریق تنه‌های آب بوده است. همچنین تزریق متناوب در بستر متخلخل با ترک حدود ۳۸ درصد محیط را جاروب کرده که این میزان بیش از ۲/۵ برابر هر کدام از دیگر تزریق‌ها بوده است.

- با اندازه‌گیری افت فشار ورودی و خروجی و مقایسه آن در سه سناریو تفاوت میزان برداشت شرح داده شد. بدین صورت که نمودار افت فشار تزریق آب پس از بریک‌ترو دچار افت می‌شود و در همان سطح باقی می‌ماند و نمودار افت فشار تزریق گاز پس از افت، دوباره به سطوح بالای خود باز می‌گردد. اما تزریق متناوب، رفتاری از ترکیب هر دوی این‌ها دارد و با هر بار تغییر نوبت تزریق آب و گاز، افت فشار، قله‌های محلی تشکیل می‌دهد. تکرار این نوسان‌ها، جهش‌هایی را در برداشت ایجاد کرده که این جهش‌ها در نمودار برداشت قابل مشاهده است.

برای غلبه بر فشار مویبندی محیط است که پس از آن، نفوذ در بستر رخ می‌دهد و افت فشار شروع به کاهش می‌کند و تا رسیدن آب به خروجی روند همچنان کاهشی است و در بریک‌ترو به کمینه خود می‌رسد و تا انتهای زمان تزریق در همین محدوده باقی می‌ماند.

در تزریق گاز (شکل ۱۹ ب) مشابه تزریق آب در لحظه ورود به بستر، افت فشار بالاست و با ورود گاز به محیط افت فشار شروع به کاهش می‌کند که پس از بریک‌ترو به کمترین میزان خود می‌رسد. البته برخلاف آب به دلیل تراکم پذیری فاز گاز، مجدد افت فشار شروع به افزایش می‌کند و تا محدوده اولیه افزایش می‌یابد، اما پس از آن به دلیل تحرک کم، نفوذ بیشتر گاز به داخل گلوگاه‌های جدید دشوار است، بنابراین افت فشار در همان محدوده نوسان می‌کند.

در تزریق متناوب (شکل ۱۹ ج) همانند دو سناریو قبلی هنگام ورود فاز جابه‌جا کننده به بستر، افت فشار بالاست و با غلبه بر فشار مویبندی وارد بستر می‌شود. پس از بریک‌ترو، افت فشار کاهش می‌یابد. پس از این مرحله الگوی افت فشار، رفتار دوگانه‌ای نشان می‌دهد. بدین صورت که نوسانات زیادی رخ می‌دهد که ترکیبی از الگوهای تزریق گاز و آب مجزا است. تناوب ورود آب و گاز باعث افزایش افت فشار بوده که این افزایش به صورت قله‌های محلی در نمودار قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که هر چند روند افت فشار از میانه تزریق، اندکی رو به کاهش بوده است اما همچنان قله‌های تشکیل می‌شود، که این جهش‌ها توانایی نفوذ به گلویی‌های جاروب نشده را فراهم کرده و روند کلی برداشت با جاروب شدن گلویی‌های جدید همچنان افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده شد، افزایش‌های متناوب میزان

- experimental study, in: SPE Western Regional Meeting, OnePetro, 2010, pp. 1-10.
- [3] V. Er, T. Babadagli, Z. Xu, Pore-Scale Investigation of the Matrix–Fracture Interaction During CO<sub>2</sub> Injection in Naturally Fractured Oil Reservoirs, *Energy & Fuels*, 24(2) (2010) 1421-1430.
- [4] C. Zhang, M. Oostrom, J.W. Grate, T.W. Wietsma, M.G. Warner, Liquid CO<sub>2</sub> displacement of water in a dual-permeability pore network micromodel, *Environmental science & technology*, 45(17) (2011) 7581-7588.
- [5] L. Zhongchun, H. Jirui, L. Jianglong, C. Qian, Study of residual oil in Tahe 4th block karstic/fractured heavy oil reservoir, in: North Africa Technical Conference and Exhibition, OnePetro, 2012, pp. 1-8.
- [6] K. Ma, R. Liontas, C.A. Conn, G.J. Hirasaki, S.L. Biswal, Visualization of improved sweep with foam in heterogeneous porous media using microfluidics, *Soft Matter*, 8(41) (2012) 10669-10675.
- [7] C.A. Conn, K. Ma, G.J. Hirasaki, S.L. Biswal, Visualizing oil displacement with foam in a microfluidic device with permeability contrast, *Lab on a Chip*, 14(20) (2014) 3968-3977.
- [8] D. Wijeratne, B. Halvorsen, Computational study of fingering phenomenon in heavy oil reservoir with water drive, *Fuel*, 158 (2015) 306-314.
- [9] J. Gauteplass, K. Chaudhary, A.R. Kovscek, M.A. Fernø, Pore-level foam generation and flow for mobility control in fractured systems, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 468 (2015) 184-192.
- [10] F. Kazemifar, G. Blois, D.C. Kyritsis, K.T. Christensen, Quantifying the flow dynamics of supercritical CO<sub>2</sub>–water displacement in a 2D porous micromodel using fluorescent microscopy and microscopic PIV, *Advances in Water Resources*, 95 (2016) 352-368.
- [11] H.S. Rabbani, V. Joeekar-Niasar, N. Shokri, Effects of intermediate wettability on entry capillary pressure in angular pores, *Journal of colloid and interface science*, 473 (2016) 34-43.
- [12] M.A. Fernø, J. Gauteplass, M. Pancharoen, A. Haugen,

● مطالعه ترک نشان داد که وجود آن تأثیر منفی‌ای در میزان برداشت دارد. اگرچه میزان برداشت در بستر متخلخل با ترک در تزریق گاز حدود ۲ برابر بستر متخلخل ساده شده است، اما این میزان افزایش، به طور مستقیم به ضخامت ترک وابسته است. بدین ترتیب که در تزریق گاز یا آب مجزا، فاز جابه‌جا کننده، ناحیه با تراوایی بالا (ترک) را برای جاروب کردن انتخاب می‌کند و توانایی نفوذ به نواحی متخلخل با تراوایی پایین را ندارد. در تزریق متناوب نیز، فاز جابه‌جا کننده تمایل کمتری (نسبت به بستر متخلخل ساده) برای نفوذ در ناحیه با تراوایی پایین دارد که این امر باعث کاهش ملموس برداشت در بستر متخلخل با ترک شد.

در این مطالعه هندسه‌هایی با آرایه‌های منظم بررسی شد که برای مطالعات آینده می‌توان از بسترهای ناهمگن استفاده کرد. همچنین می‌توان به مطالعه تأثیر ضخامت و زاویه ترک پرداخت که نتایج متفاوتی را نسبت به مطالعه حاضر خواهند داشت.

## ۵- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$V_2$	سرعت فاز جابه‌جاکننده، m
$Ca$	عدد مویبگی (بی‌بعد)
$M$	نسبت لزجت دو فاز (بی‌بعد)
$WAG$	تزریق متناوب آب و گاز
$SAG$	تزریق متناوب سورفکتانت و گاز
$PV$	حجم منافذ

### علائم یونانی

$\theta$	زاویه تماس بین دو فاز (درجه)
$\mu_1$	لزجت فاز جابه‌جا شونده
$\mu_2$	لزجت فاز جابه‌جا کننده
$\sigma$	کشش بین سطحی دو فاز

## منابع

- [1] M. Sohrabi, D. Tehrani, A. Danesh, G.D. Henderson, Visualization of oil recovery by water-alternating-gas injection using high-pressure micromodels, *Spe Journal*, 9(03) (2004) 290-301.
- [2] H. Jiang, L. Nuryaningsih, H. Adidharma, The effect of salinity of injection brine on water alternating gas performance in tertiary miscible carbon dioxide flooding:

- flow characteristics and EOR mechanism of immiscible CO<sub>2</sub> water-alternating-gas injection after continuous CO<sub>2</sub> injection: A micro-scale visual investigation, *Fuel*, 282 (2020) 118689.
- [18] S. Razavi, M. Shahmardan, M. Nazari, M. Norouzi, Experimental Study of Surfactant Type Effects on the Foam Stability and Mobility With the Approach of Enhancing Oil Recovery, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(1 (Special Issue)) (2020) 339-356.
- [19] Z. Yang, X. Yue, M. Shao, Y. Yang, R. Yan, Monitoring of Flooding Characteristics with Different Methane Gas Injection Methods in Low-Permeability Heterogeneous Cores, *Energy & Fuels*, 35(4) (2021) 3208-3218.
- [20] X. Li, A. Li, W. Guo, S. Liu, S. Cui, Experimental Study on Mechanism of Water-Alternating-Gas Injection in thick Sandstone Reservoir, *E3S Web Conf.*, 338 (2022) 01001.
- [21] R. Lenormand, E. Touboul, C. Zarcone, Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media, *Journal of fluid mechanics*, 189 (1988) 165-187.
- A. Graue, A.R. Kovscek, G. Hirasaki, Experimental study of foam generation, sweep efficiency, and flow in a fracture network, *SPE journal*, 21(04) (2016) 1140-1150.
- [13] X. Lyu, Z. Liu, J. Hou, T. Lyu, Mechanism and influencing factors of EOR by N<sub>2</sub> injection in fractured-vuggy carbonate reservoirs, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 40 (2017) 226-235.
- [14] M.J. Shojaei, K. Osei-Bonsu, P. Grassia, N. Shokri, Foam flow investigation in 3D-printed porous media: fingering and gravitational effects, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(21) (2018) 7275-7281.
- [15] P. Luo, K.D. Knorr, S. Li, P. Nakutnyy, Dual-Permeability Matrix-Fracture Coreflows for Studying Gas Flooding in Tight Oil Reservoirs, in: *SPE Canada Unconventional Resources Conference, OnePetro, Canada 2018*, pp. 1-12.
- [16] J.A.R. Cordero, E.C.M. Sanchez, D. Roehl, Integrated discrete fracture and dual porosity-Dual permeability models for fluid flow in deformable fractured media, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175 (2019) 644-653.
- [17] L. Wang, Y. He, Q. Wang, M. Liu, X. Jin, Multiphase

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*K. Jafarian, M. H. Kayhani, M. Nazari, B. Ghorbanbakhsh, An Experimental Investigation of Multi-Phase Flow and the Effect of Fracture on Enhanced Oil Recovery in the Porous Medium, Amirkabir J. Mech Eng., 54(11) (2023) 2499-2518.*

DOI: [10.22060/mej.2022.20937.7342](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20937.7342)

