

# شبیه‌سازی فرآیند تزریق پلیمر در میکرو مدل شکاف‌دار حاوی نفت سنگین

علی کریمان مقدم، سعید صادق نژاد و آرزو جعفری\*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱۳

## چکیده

در این تحقیق شبیه‌سازی فرآیند سیلاب‌زنی با محلول پلیمر در الگوهای میکرومدل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. آنالیز حساسیت روی پارامترهای موثر بر شکاف، شامل طول، جهت (زاویه راستا) و تعداد شکاف‌ها انجام شده و تأثیر هر یک از این پارامترها بر میزان بازیافت نفت در سیلاب‌زنی محلول پلیمر در نفت سنگین مطالعه شده است. برای ساخت مدل شبیه‌سازی، نرم‌افزار اکلیپس از سری نرم‌افزارهای شرکت شلمبرجر به کار گرفته شده و نتایج مدل شبیه‌سازی ساخته شده از طریق مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی موجود در منابع، اعتبار سنجی شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر سیلاب‌زنی محلول پلیمر، نتایج با سیلاب‌زنی آب که ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش برای افزایش برداشت است، مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که اضافه کردن پلیمر به آب به‌خصوص در مخازن شکاف‌دار سبب می‌شود پدیده انگشتی شدن کاهش و میزان بازیافت نفت در فرآیند تزریق آب افزایش یابد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در میکرومدل با تعدادی شکاف کوتاه، میزان بازیافت نفت بهتر از سایر حالات است.

**کلمات کلیدی:** تزریق پلیمر، شبیه‌سازی، میکرومدل شکاف‌دار، نفت سنگین

## مقدمه

تولیدی رانده شود. در صورت ناهمگن بودن مخزن، به عنوان نمونه مخزن حاوی شکاف، آب به دنبال آسان‌ترین مسیر به سمت چاه تولیدی می‌باشد. در این حالت آب از بین شکاف‌ها و لایه‌های با تراوایی بالا عبور می‌کند و خود را به چاه‌های تولید می‌رساند. در این حالت نفت سایر مناطق دست نخورده باقی می‌ماند، در نتیجه میزان ضریب جاروبی مخزن کاهش می‌یابد [۱]. سیلاب‌زنی با محلول‌های پلیمری روشی است که می‌تواند باعث بهبود برداشت شود.

در تمامی مخازن به علت تولید نفت، افت فشار شدیدی روی می‌دهد. این افت فشار مانع از تولید نفت درون مخزن به صورت طبیعی می‌شود. برای حفظ فشار مخزن از سیلاب‌زنی آب استفاده می‌گردد. در این روش آب تزریقی سبب می‌شود نفت باقی‌مانده درون مخزن به درون چاه‌های

\*مسئول مکاتبات

رفتار الاستیکی از خود نشان می‌دهد. همچنین در سرعت‌های خیلی بالا، ویسکوزیته به صورت غیر قابل برگشت کاهش یافته و رفتار پلیمر پلاستیکی خواهد بود. از این رو رفتار رئولوژی محلول پلیمر در نزدیکی‌های چاه تزریق که سرعت تزریق بالا می‌باشد و به تبع آن میزان نرخ برشی زیاد است، بسیار با اهمیت می‌گردد [۶].

برای انجام آزمایشات جریان چند فازی، از میکرومدل‌های شیشه‌ای استفاده می‌شود. این میکرومدل‌ها به عنوان مدل دو بعدی سنگ مخزن در نظر گرفته می‌شوند که مهم‌ترین مزیت آنها قابلیت مشاهده حرکت سیال است که از لحاظ کیفی به تهیه بهترین مدل‌های حرکت سیال در محیط متخلخل کمک می‌نماید [۷]. همچنین در این میکرومدل‌ها می‌توان بسیاری از خصوصیات ناهمگنی مخزن را بررسی نمود. در سال‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی تزریق مواد شیمیایی از جمله پلیمر، سورفکتانت و آلکالین در مقیاس میکرومدل صورت گرفته است [۸-۱۰]. بررسی اثر غلظت پلیمر، غلظت نمک، نرخ تزریق و اختلاف میزان بازیافت تزریق پلیمر و آب در مطالعات آزمایشگاهی سایر محققین انجام شده است [۱۱-۱۳]. همچنین بررسی و شبیه‌سازی اثر هندسه شیل و آب همزاد در تزریق محلول پلیمر صورت گرفته است [۱۴]. اما در مورد بررسی اثر الگوهای احتمالی یک شبکه شکاف‌دار مطالعات کمی صورت گرفته است و نیاز به بررسی جامع در این حوضه احساس می‌شود. از آنجا که انجام آزمایشات میکرومدل مانند هر فعالیت آزمایشگاهی دیگر نیاز به مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار دارد، روش‌های عددی به‌عنوان گزینه‌ای ارزان، سریع و در عین حال قابل اعتماد همواره مورد توجه می‌باشد [۱۵]. لازم به ذکر است که در مطالعات گذشته شبیه‌سازی رفتار تزریق پلیمر در مقیاس میدان و آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری رایج، انجام شده است.

در تزریق پلیمر تحرک‌پذیری آب به دو دلیل کاهش می‌یابد: ۱- ویسکوزیته محلول پلیمر از آب خالص بالاتر است و هرچه غلظت پلیمر محلول بیشتر باشد، افزایش ویسکوزیته بیشتر خواهد بود. ۲- تراوایی نسبی سنگ نسبت به آب کمتر می‌شود. ترکیب این دو اثر سبب می‌شود که تحرک‌پذیری آب کاهش یابد، در حالی که تحرک‌پذیری نفت بدون تغییر باقی می‌ماند. در فرآیند سیلاب‌زنی نسبت تحرک‌پذیری به صورت زیر محاسبه می‌شود. هنگامی که این عدد بزرگ‌تر از یک باشد، اثر انگشتی شدن<sup>۱</sup> روی می‌دهد و هنگامی که کوچک‌تر از یک باشد، حرکت دو فاز به صورت پیوستونی است [۲-۴].

$$M = \frac{(k/\mu)_{water}}{(k/\mu)_{oil}} \quad (1)$$

هنگامی که پلیمر به مخزن تزریق می‌شود، مولکول‌های با زنجیر طولانی‌تر بر روی سطح سنگ جذب می‌شوند. همچنین ممکن است برخی از مولکول‌های بزرگ پلیمر در ورودی گلوگاه‌های منافذ کوچک به دام بیفتند و میزان پلیمر درون محلول کاهش یابد. محققین دریافتند که سنگ مخزن یک ظرفیت محدود برای جذب پلیمر دارد. جذب و به دام افتادن پلیمر سبب کاهش تراوایی نسبی سنگ نسبت به محلول می‌شود. برای مدل کردن این پدیده، فرض می‌گردد که میزان تغییرات تراوایی نسبی سنگ متناسب با میزان از دست رفتن پلیمر باشد. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که میزان تغییرات تراوایی نسبی هیدروکربورها در این فرآیند ناچیز است و محلول پلیمر به تنهایی قادر است از میان کسری از فضاهای خالی سنگ عبور کند. هر چه این فضاهای غیر قابل دسترس<sup>۲</sup> افزایش یابد، سرعت موثر حرکت پلیمر درون سنگ افزایش می‌یابد [۲-۵]. رئولوژی محلول‌های پلیمری پیچیده می‌باشد. در سرعت‌های پایین تزریق، ویسکوزیته محلول تقریباً ثابت است و وابسته به غلظت پلیمر درون محلول است. در سرعت‌های بالاتر، ویسکوزیته محلول به صورت برگشت‌پذیر کاهش می‌یابد و

1. Fingering

2. Dead Pore Volume

گسسته کردن معادله فوق و معادلات اصلاح شده فشار و درجه اشباع آب در محلول پلیمری به روش حجم کنترل - تفاضل محدود<sup>۱</sup>، برای فاز نفت، آب، پلیمر و شورا به ترتیب معادلات زیر حاصل می‌شود [۱۹]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{VS_o}{B_r B_o} \right) = \sum \left[ \frac{Tk_{ro}}{B_o \mu_o} (\delta P_o - \rho_o g D_z) \right] + Q_o \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{VS_w}{B_r B_w} \right) = \sum \left[ \frac{Tk_{rw}}{B_w \mu_{w \text{ eff}} R_k} (\delta P_w - \rho_w g D_z) \right] + Q_w \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{VS_w^* C_p}{B_r B_w} \right) + \frac{d}{dt} \left( V \rho_r C_a \frac{1 - \varphi}{\varphi} \right) = \sum \left[ \frac{Tk_{rw} C_p}{B_w \mu_{p \text{ eff}} R_k} (\delta P_w - \rho_w g D_z) \right] + Q_w C_p \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{VS_w C_n}{B_r B_w} \right) = \left[ \frac{Tk_{rw} C_n}{B_w \mu_{s \text{ eff}} R_k} (\delta P_w - \rho_w g D_z) \right] + Q_w C_n \quad (6)$$

$$S_w^* = S_w - S_{apv} \quad (7)$$

در معادلات فوق  $R_k$  فاکتور کاهش تراوایی نسبی است. همچنین  $K$  تراوایی سنگ،  $K_{rw}$  تراوایی نسبی فاز آب،  $\mu_{p \text{ eff}}$  ویسکوزیته موثر پلیمر،  $\nabla P$  اختلاف فشار و  $D$  اختلاف ارتفاع می‌باشد. همچنین  $B_o$ ،  $B_w$  و  $B_r$  به ترتیب ضریب حجمی سازند برای نفت، آب و سنگ و همچنین  $T$  انتقال پذیری می‌باشد. در این تحقیق فرض شده که محلول پلیمر، شورا به مخزن و آب تزریقی به صورت فازهای کاملاً امتزاج پذیر هستند. تاثیر پلیمر و شورا به روی جریان توسط معادلات ۴ و ۷ اعمال می‌شود. ویسکوزیته‌های سیال وابسته به غلظت نمک و پلیمر است. میزان جذب پلیمر با اضافه کردن ترم تجمعی موازنه جرم در سمت چپ معادله ۵ بیان می‌گردد. همچنین میزان جذب پلیمر تابع غلظت پلیمر و نوع سنگ است.

به‌عنوان نمونه در سال‌های اخیر، صحت و اعتبار شبهه‌سازهای نفتی در مدل‌سازی پارامترهای موثر بر تزریق پلیمر از جمله رئولوژی، جذب روی سطح سنگ، کاهش تراوایی و نسبت تحرک و فضای غیرقابل دسترس در جریان‌های تک‌فازی و چندفازی در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شده است [۱۵]. همچنین شبهه‌سازی تزریق پلیمر در مقیاس میدان برای نفت‌های سنگین صورت گرفته است [۱۶]. تاثیر خاک رس در تزریق پلیمر با استفاده از شبهه‌ساز UTCHEM نیز توسط محققین بررسی شده است [۱۷]. با این وجود شبهه‌سازی در مقیاس میکرومدل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا هدف اصلی این مطالعه، بررسی عددی میزان بازیافت نفت در میکرومدل‌های مختلف شکافدار نفت سنگین به کمک شبهه‌ساز اکلیپس می‌باشد. برای این منظور ابتدا معادلات حاکم بر سیلاب‌زنی محلول پلیمر ارائه شده و سپس در بخش شبهه‌سازی، ویژگی‌های مدل و الگوهای شکاف طراحی شده معرفی می‌گردد.

### معادلات حاکم بر سیلاب‌زنی محلول پلیمر

در نرم‌افزار اکلیپس فرض می‌شود که محلول پلیمر با فاز هیدروکربور برهم‌کنشی نداشته و تنها در فاز آبی حضور دارد. بنابراین برای توصیف فاز هیدروکربور از معادلات مدل نفت سیاه استفاده می‌شود. اما برای فاز آب لازم است معادلات اصلاح گردد [۱۸]. معادله انتقال<sup>۱</sup> بر اساس اصل موازنه جرم و صرف نظر از ترم پراکندگی، به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_w^* C_p + \rho_r (1 - \varphi) C_a) = -div(C_p \bar{V}_w) - q_w C_{pi} \quad (2)$$

که در آن  $C_p$  غلظت پلیمر در محلول،  $C_a$  میزان جذب پلیمر بر روی سنگ،  $\varphi$  تخلخل و  $\rho_r$  دانسیته سنگ می‌باشد. در سیلاب‌زنی محلول پلیمر معمولاً از ترم پراکندگی صرف نظر می‌شود. در معادله بالا سرعت دارسی فاز محلول پلیمری است. با

1. Transport Equation

2. Control Volume - Finite Difference

## شبیه‌سازی تزریق پلیمر

هدف اصلی این شبیه‌سازی، بررسی تاثیر سیستم‌های مختلف شکاف‌دار بر میزان بازیافت نفت سنگین در تزریق پلیمر پلی-اکریل آمید می‌باشد. لازم به ذکر است که این پلیمر نسبت به پلیمرهای زیستی در دما و فشار مخزن پایدارتر است و در صنعت نفت کاربرد بیشتری دارد [۳]. الگوهای مختلفی برای شکاف‌های سیستم طراحی شده در ادامه ارائه می‌گردد. هر یک از این الگوها، بر میزان بازیافت نفت و برش آب<sup>۱</sup> تاثیر گذار هستند. سایر پارامترهای ورودی از جمله نرخ تزریق، فشار، خصوصیات سنگ، پلیمر، آب و همچنین غلظت نمک بر روی نتایج تاثیر می‌گذارند، که این پارامترها ثابت در نظر فرض می‌شود تا نقش هر یک از الگوها در میزان بازیافت نفت آشکار گردد.

## ساخت هندسه میکرومدل

در این تحقیق شبیه‌سازی بر روی میکرومدل به‌کاررفته در مطالعات آزمایشگاهی صداقت و همکاران [۱۲] انجام شده است و خصوصیات فیزیکی میکرومدل مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اینکه ضخامت میکرومدل بسیار کم است؛ می‌توان جهت شبیه‌سازی آنها را دو بعدی در نظر گرفت.

**جدول ۱- خصوصیات فیزیکی میکرومدل شبیه‌سازی شده، به‌کار رفته در مطالعات آزمایشگاهی صداقت و همکاران [۱۲]**

ویژگی	مقدار
ابعاد (mm×mm×mm)	۱۰۰×۱۰۰×۵
حجم فضای خالی (cc)	۲۵
تخلخل	۰/۵

همچنین تعداد بلوک‌ها باید به گونه‌ای انتخاب گردد که نتایج به تعداد بلوک‌ها وابسته نباشد برای این منظور آنالیز حساسیت بر روی تعیین تعداد بلوک‌های مدل در الگوی بدون شکاف صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، بیشتر شدن تعداد بلوک‌ها از یک مقدار معین، نقشی در نتایج

شبیه‌سازی نخواهد داشت و تنها به اضافه شدن زمان محاسبات منجر می‌شود. در نهایت به منظور دقت مناسب، تعداد بلوک‌ها به صورت ۱×۲۰×۲۰ برای شبیه‌سازی الگوها انتخاب شده است.

**جدول ۲- نتایج آنالیز حساسیت تعداد بلوک‌ها برای الگوی بدون شکاف**

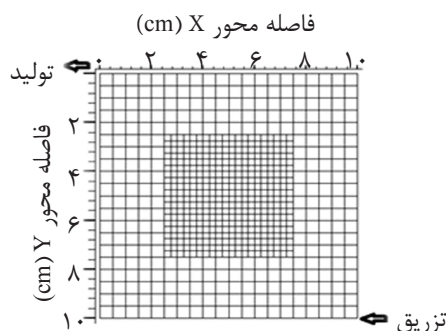
تعداد بلوک‌ها	نسبت حجم تزریقی پلیمر به حجم فضای خالی	نسبت بازیافت نفت در تزریق پلیمر به نفت درجا
۱×۵×۵	۱/۴	۰/۷۲
۱×۲۰×۲۰	۱/۴	۰/۷۴
۱×۴۰×۴۰	۱/۴	۰/۷۴

از آنجا که بررسی الگوهای مختلف شکاف مد نظر است، بلوک‌های میانی ریزتر شده‌اند تا این بررسی با دقت بیشتری صورت بگیرد. تزریق از گوشه سمت راست- پایین و تولید از گوشه سمت چپ-بالا (یک چهارم از مدل تزریق پنج نقطه‌ای) صورت می‌گیرد. هندسه مورد نظر و شبکه‌بندی انجام شده در شکل ۱ نشان داده شده و اطلاعات مربوط به خصوصیات پلیمر تزریقی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین فضای غیر قابل دسترس برای پلیمر ۰/۰۵ کل فضای خالی و میزان فاکتور مقاومت باقی‌مانده پلیمر ۱/۳ می‌باشد. نفت سنگین استفاده شده در این تحقیق دارای درجه API ۱۹/۴، ویسکوزیته ۶۸ cP و تراکم‌پذیری  $5 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$  می‌باشد.

همچنین در این مدل، تراکم‌پذیری سنگ برابر با صفر، تراوایی بلوک‌ها و شکاف‌ها به ترتیب ۱ و ۱۰۰۰ md، نرخ تزریق ۰/۱ ml/hr و فشار اولیه سیستم ۱ atm (برابر با فشار محیط) فرض شده است. تابع تراوایی نسبی آب و نفت به صورت نمودار شکل ۲ در نظر گرفته شده است.

## بررسی پارامترهای آنالیز حساسیت

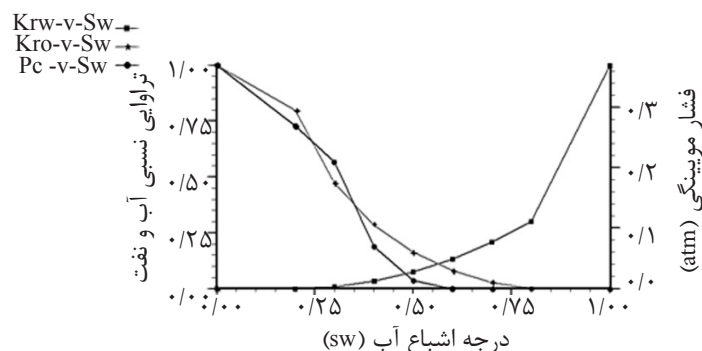
در این تحقیق سعی شده است الگوهای شکاف طوری طراحی شوند که پارامترهای مهم آن، از جمله طول شکاف، جهت شکاف و تعداد شکاف‌ها در دو حالت تزریق آب و پلیمر بررسی شوند.



شکل ۱- هندسه شبکه‌بندی شده مورد مطالعه در این تحقیق

جدول ۳- خصوصیات پلیمر [۱۶]

نسبت ویسکوزیته پلیمر به آب $\mu_p/\mu_w$	میزان جذب پلیمر $C_a$ ( $kg_p/kg_R$ )	غلظت پلیمر $C_p$ ( $kg/m^3$ )
۱	۰	۰
۳/۶	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۵
۶/۳	۰/۰۰۰۰۱۸	۱
۱۲/۵	۰/۰۰۰۰۱۹	۱/۵
۲۵/۸	۰/۰۰۰۰۰۳	۲
۴۸	۰/۰۰۰۰۰۳	۳



شکل ۲- توابع استفاده شده برای تراوایی نسبی و فشار مویبندی [۱۶]

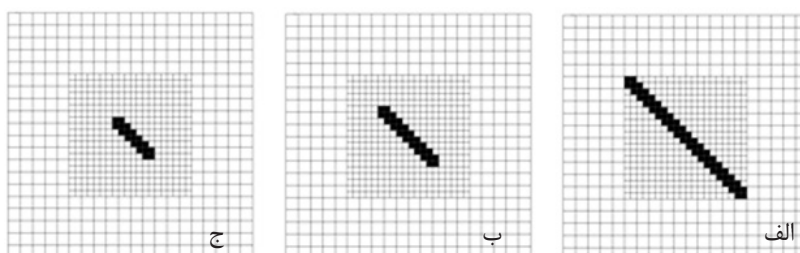
شکل ۳ نمایشی از این سه الگو می‌باشد. بررسی زاویه شکاف: جهت بررسی این پارامتر، سه الگو به صورت زیر در نظر گرفته شده است: ۱- الگوی الف: در این الگو زاویه راستای شکاف با خط واصل بلوک تولید و تزریق صفر درجه است.

۲- الگوی د: در این الگو زاویه راستای شکاف با خط واصل بلوک تولید و تزریق ۴۵ درجه است. ۳- الگوی ه: در این الگو زاویه راستای شکاف با خط واصل بلوک تولید و تزریق ۹۰ درجه است. در شکل ۴ نمایشی از این سه الگو نشان داده شده است.

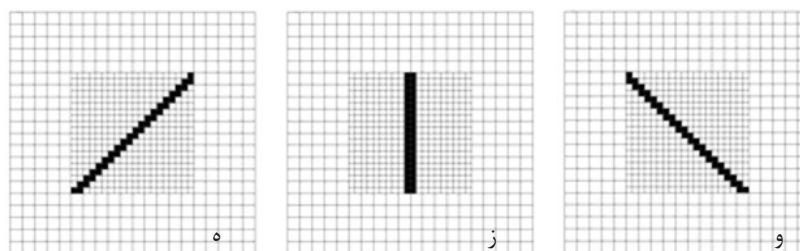
همچنین سایر پارامترهای آنالیز حساسیت در ادامه شرح داده می‌شود.

بررسی طول شکاف: جهت بررسی اثر طول شکاف ها بر روی میزان بازیافت نفت و برش آب، سه الگوی شکاف به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱- الگوی الف: شامل ۲۰ بلوک در سه ردیف با تراوایی بالا به عنوان شکاف  
 ۲- الگوی ب: شامل ۱۵ بلوک در سه ردیف با تراوایی بالا به عنوان شکاف  
 ۳- الگوی ج: شامل ۱۰ بلوک در سه ردیف با تراوایی بالا به عنوان شکاف



شکل ۳- الگوهای استفاده شده برای بررسی طول شکاف



شکل ۴- الگوهای استفاده شده برای بررسی زاویه شکاف

پلیمر و آب نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است، در الگوی الف که طولانی‌ترین طول شکاف را دارد، سیال تزریقی کمتر توانسته در کل مساحت میکرومدل پخش شود، در نتیجه میزان جاروب موثر سطحی<sup>۱</sup> در این حالت پایین است که در نهایت به بازیافت کمتر نفت منجر شده است.

در شکل ۸ نمودارهای بازیافت نفت و برش آب را برای دو حالت تزریق پلیمر و آب تا تزریق به میزان ۰/۲۵ حجم فضای خالی رسم شده است. لازم به ذکر است که این نمودارها از نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار حاصل شده است. همان طور که از این نمودارها مشخص است، هر چه طول شکاف افزایش یابد، بیرون زدن آب<sup>۲</sup> سریع‌تر رخ می‌دهد، بنابراین میزان بازیافت نفت کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج تزریق پلیمر و آب نشان می‌دهد که حساسیت طول شکاف در تزریق پلیمر کمتر است. زیرا در سه الگوی معرفی شده حداکثر اختلاف بازیافت نفت در تزریق پلیمر و آب به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۸ می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که شیب نمودار بازیافت نفت در تزریق پلیمر در ابتدا زیاد و پس از مدتی ناگهان به سمت صفر میل می‌کند.

بررسی تعداد شکافها: در این قسمت سه الگو به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- الگوی ب: یک شکاف در راستای جریان
  - ۲- الگوی و: دو شکاف موازی در راستای جریان
  - ۳- الگوی ز: سه شکاف موازی در راستای جریان
- در این سه الگو طول شکافها یکسان است که در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

### تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی

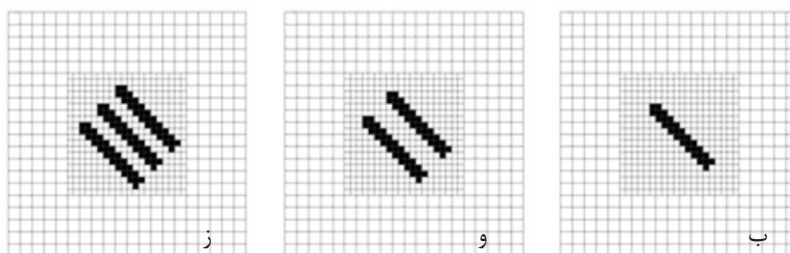
در این قسمت پس از بررسی صحت و اعتبار مدل، نتایج ارائه می‌گردد. برای این منظور نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی موجود [۱۲]، برای میزان بازیافت نفت بر حسب نسبت حجم تزریق پلیمر به حجم فضای خالی در الگوهای الف و ب، مقایسه شده است (شکل ۶). همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی حاصل از تزریق پلیمر در میکرومدل تطابق بسیار خوبی دارد.

### اثر طول شکاف

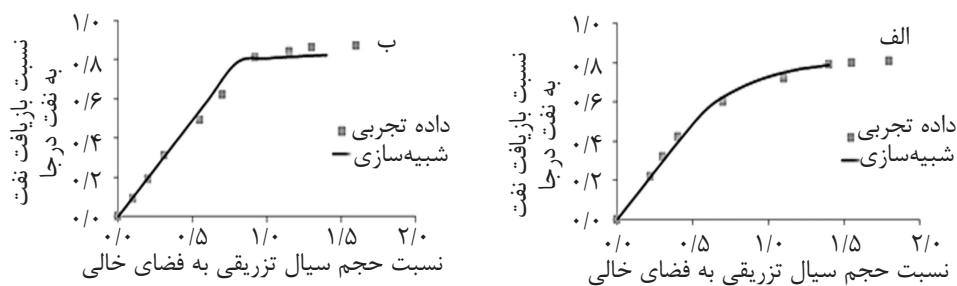
نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار اکلیپس برای الگوهای الف، ب و ج در شکل ۷ رسم شده است. این شکل میزان پیشروی سیال تزریقی در زمان تزریق به میزان ۰/۲۵ کل فضای خالی را برای تزریق محلول

1. Areal Sweep Efficiency  
2. Breakthrough

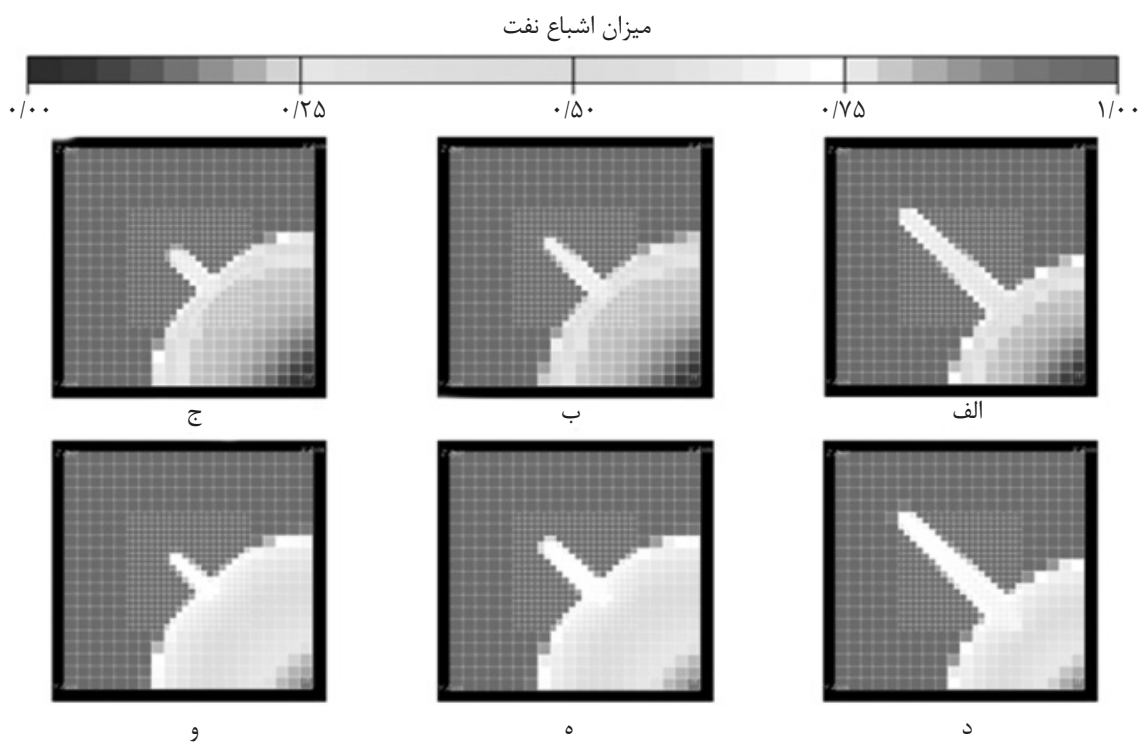




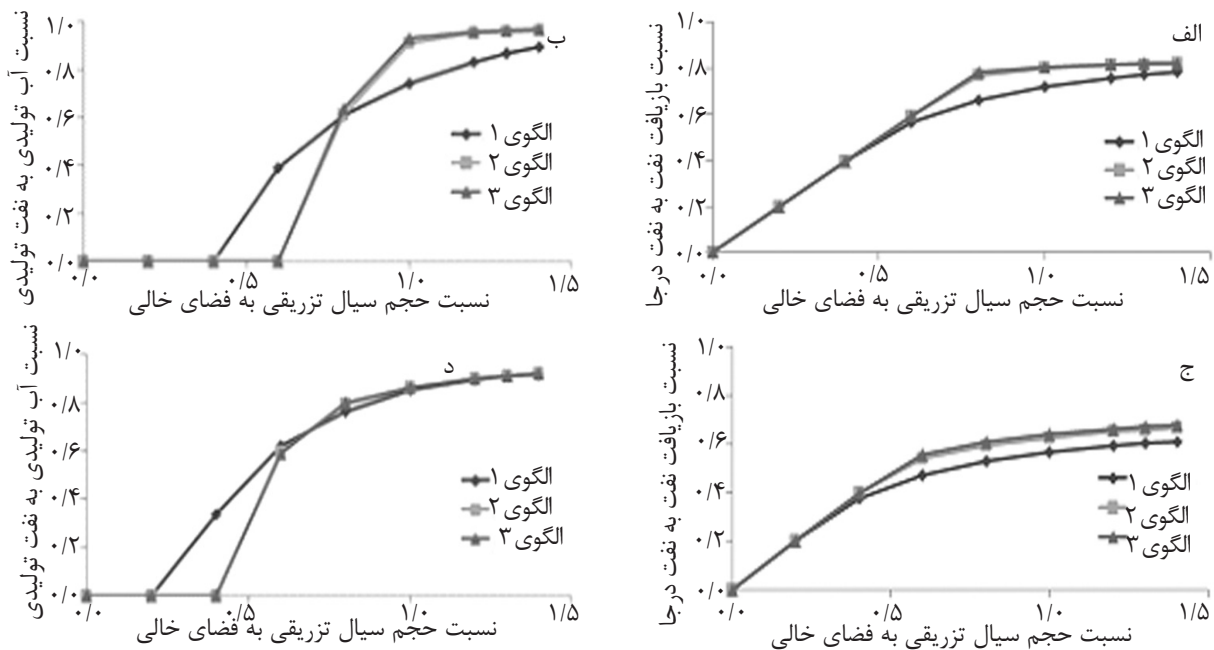
شکل ۵- الگوهای استفاده شده برای بررسی تعداد شکاف



شکل ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی، الف) الگوی الف و ب) الگوی ه [۱۲]



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی بررسی اثر طول شکاف. الف) تزریق پلیمر در الگوی الف، ب) تزریق پلیمر در الگوی ب، ج) تزریق پلیمر در الگوی ج، د) تزریق آب در الگوی الف، ه) تزریق آب در الگوی ب، و) تزریق آب در الگوی ج.



شکل ۸- نمودارهای بررسی تأثیر طول شکاف در الگوهای الف، ب و ج. (الف) باز یافت نفت در تزریق پلیمر، (ب) برش آب در تزریق پلیمر، (ج) باز یافت نفت در تزریق آب، (د) برش آب در تزریق آب (الگوهای ۲ و ۳ هم‌پوشانی دارند)

می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوی الف کمترین باز یافت نفت را به خود اختصاص داده است و بیرون زدن آب در این الگو نسبت به سایر الگوها سریع‌تر روی می‌دهد. علت این است که راستای شکاف این الگو در راستای مسیر تزریق و تولید قرار دارد و در زمان تزریق، سیال تزریق شده خود را سریع‌تر به چاه تولید می‌رساند. همچنین در اینجا نیز حساسیت این اثر برای تزریق پلیمر کمتر از آب است.

#### اثر تعداد شکاف‌ها

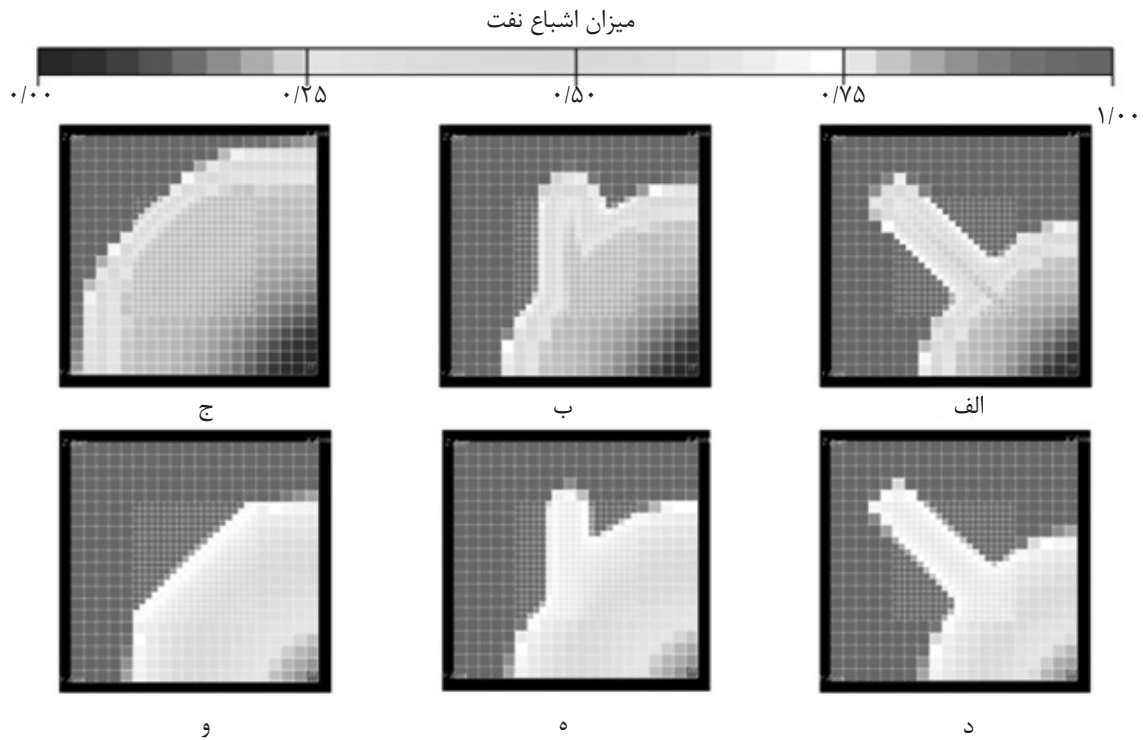
نتایج شبیه‌سازی این قسمت برای الگوهای ب، و، ز و نمودارهای باز یافت نفت و برش آب در دو حالت تزریق پلیمر و آب به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ رسم شده است. شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی نرم افزار پس از تزریق سیال به میزان ۰/۲۵ حجم فضای خالی را نشان می‌دهد و شکل ۱۲ نمودارهای باز یافت نفت و برش آب برای دو حالت تزریق پلیمر و آب رسم شده است. همان‌طور که از شکل‌ها قابل مشاهده است، نمودارها بسیار نزدیک به هم هستند و این نشان می‌دهد که این پارامتر اهمیت کمتری نسبت به دو پارامتر قبلی دارد.

در حالی که شدت کاهش شیب در تزریق آب کندتر است. علت این مسأله این است که در تزریق پلیمر، میزان جابه‌جایی موثر سیال تزریقی نسبت به آب بیشتر است و بیرون زدگی سیال تزریقی دیرتر اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که پس از مدتی، به علت پدیده بیرون زدگی سیال تزریقی، ادامه تزریق تأثیری بر افزایش باز یافت نفت نخواهد داشت.

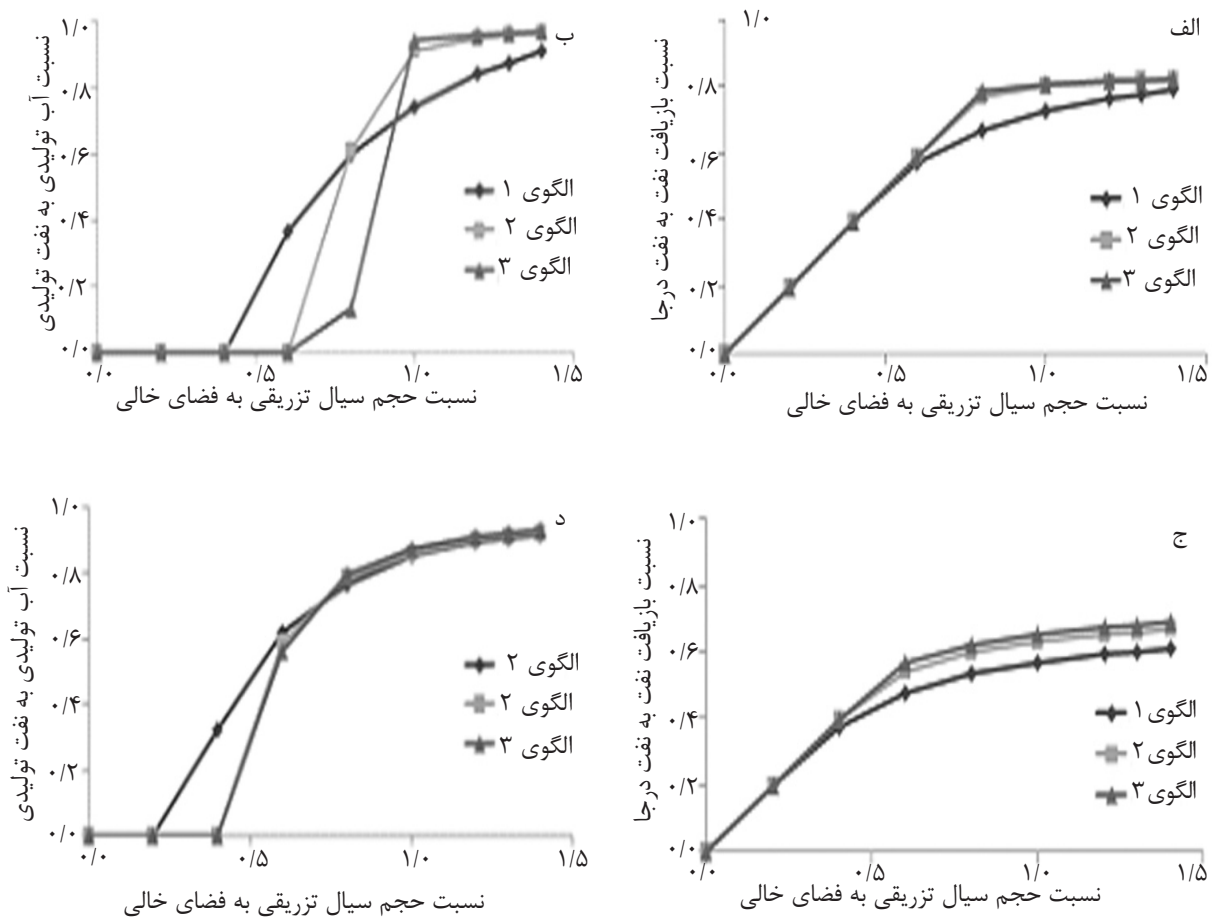
#### اثر زاویه شکاف

نتایج شبیه‌سازی این قسمت برای الگوهای الف، د و ه در دو حالت تزریق پلیمر و آب در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل‌ها زمان تزریق سیال به میزان ۰/۲۵ حجم فضای خالی است. با توجه به این شکل‌ها الگوی ه بهترین جا روب موثر سطحی را دارا می‌باشد بدین علت است که در این حالت، راستای شکاف عمود بر مسیر جریان است که سبب پخش شدن سیال تزریق در کل سطح میکرومدل و در نتیجه تاخیر در بیرون زدن سیال تزریقی می‌شود. بنابراین، میزان باز یافت نفت در این الگو نسبت به سایر الگوها بیشتر است. شکل ۱۰ نمودارهای باز یافت نفت و برش آب سیال تزریقی را برای دو حالت تزریق پلیمر و آب نشان

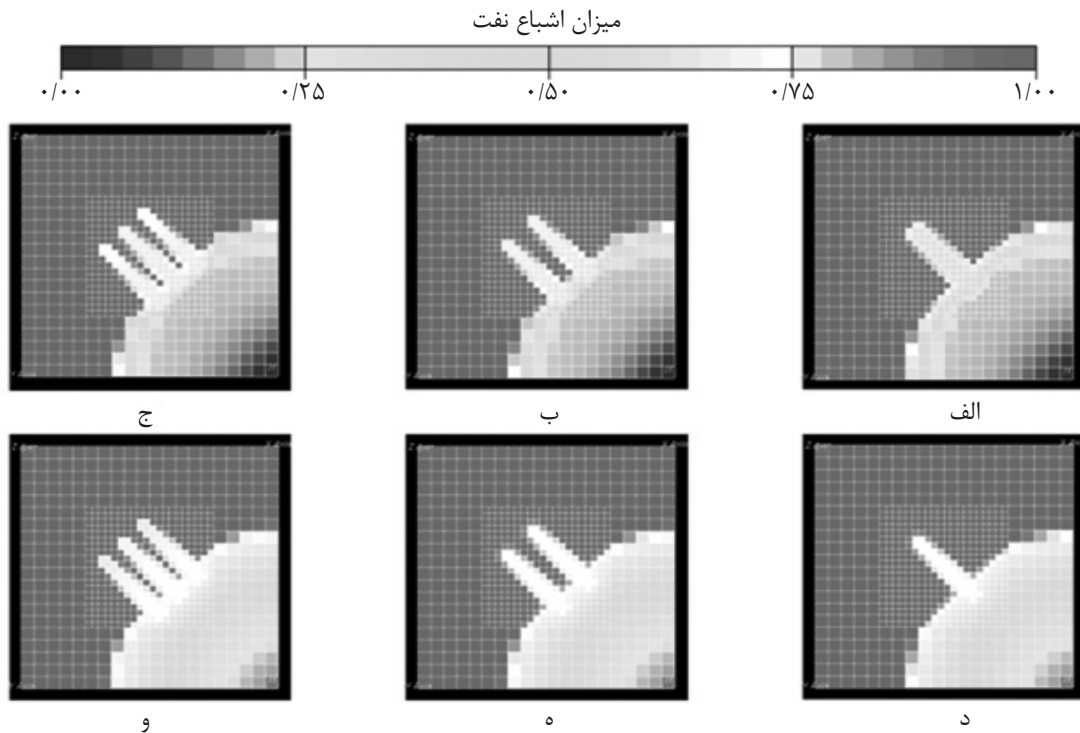




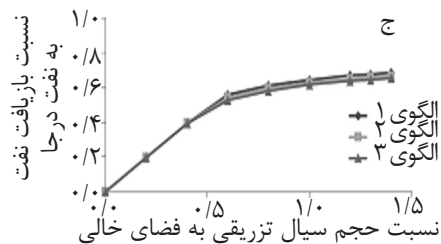
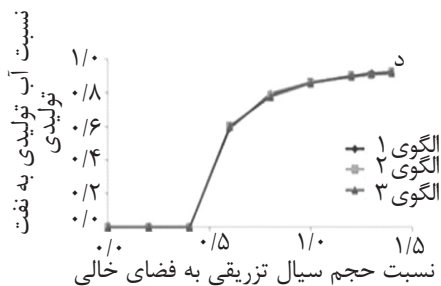
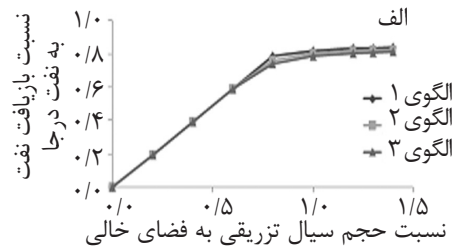
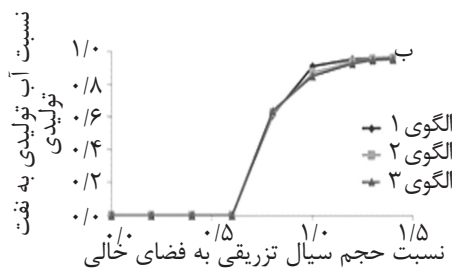
شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی بررسی اثر زاویه شکاف. (الف) تزریق پلیمر در الگوی الف، (ب) تزریق پلیمر در الگوی د، (ج) تزریق پلیمر در الگوی ه، (د) تزریق آب در الگوی الف، (ه) تزریق آب در الگوی د، (و) تزریق آب در الگوی ه.



شکل ۱۰- نمودارهای بررسی اثر زاویه شکاف در الگوهای الف، د و ه. (الف) بازیافت نفت در تزریق پلیمر، (ب) برش آب در تزریق پلیمر، (ج) بازیافت نفت در تزریق آب، (د) برش آب در تزریق آب



شکل ۱۱- نتایج شبیه‌سازی اثر تعداد شکاف. (الف) تزریق پلیمر در الگوی ب، (ب) تزریق پلیمر در الگوی و، (ج) تزریق پلیمر در الگوی ز، (د) تزریق آب در الگوی ب، (ه) تزریق آب در الگوی و، (و) تزریق آب در الگوی ز.



شکل ۱۲- نمودارهای بررسی اثر تعداد شکاف در الگوهای ب، و ز. (الف) بازیافت نفت در تزریق پلیمر، (ب) برش آب در تزریق پلیمر، (ج) بازیافت نفت در تزریق آب، (د) برش آب در تزریق آب

می‌ماند و سیال تزریقی به دلیل حضور شکافها از کنار آن عبور کرده و توانایی جاروب آن را ندارد. لذا هر چه تعداد شکافها افزایش یابد، این فضای غیرقابل جاروب افزایش و در نهایت بازیافت نفت کاهش می‌یابد.

با دقت بیشتر می‌توان دریافت در الگوی ب با یک شکاف نسبت به سایر الگوهای این قسمت، بازیافت نفت به‌خصوص در حالت تزریق پلیمر به میزان کمی بالاتر است. علت را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که در صورت زیاد بودن تعداد شکافها، بخشی از نفت در فضای ماتریس بین شکافها باقی

## نتیجه گیری

از این تحقیق موارد زیر را می توان نتیجه گرفت:  
 ۱- شکافها و شکستگی های موجود در مخازن در ازدیاد برداشت به روش تزریق پلیمر، سبب کاهش میزان بازیافت نفت می شود. زیرا هنگام تزریق، سیال تمایل دارد از بین شکافها حرکت کند، بنابراین نفت بیشتری درون ماتریس سنگ مخزن باقی می ماند (عملیات آشام به خوبی صورت نمی گیرد).

۲- طول شکافهای موثر در مسیر جریان، نقش موثری در میزان بازیافت نفت دارد. به طوری که هر چه طول شکافها بیشتر باشد، میزان بازیافت نفت به علت بیرون زدگی سریع تر سیال تزریقی کاهش می یابد.

۳- زاویه راستای شکاف از دیگر پارامترهای تاثیر گذار بر میزان بازیافت نفت است. هر چه زاویه بین راستای شکاف و خط واصل چاه تولید و تزریق کمتر باشد، بازیافت نفت کمتر شده و بیرون زدن آب سریع تر صورت می گیرد.

۴- تعداد شکافهای بین چاه تولید و تزریق، نسبت به دو پارامتر قبلی اهمیت کمتری دارد. بنابراین اگر در یک مخزن، تعداد زیادی شکاف کوتاه موجود باشد، نسبت به حالتی که یک یا چند شکاف بلند در راستای خط واصل چاه تولید و تزریق وجود دارد، تاثیر کمتری روی بازیافت نفت خواهد داشت.

## علائم و نشانه ها

- $A$ : سطح مقطع بین دو بلاک ( $m^2$ )  
 $B$ : ضریب حجمی سازند ( $bbI_{res}/bbI_{sc}$ )  
 $R_k$ : کاهش تراوایی نسبی  
 $C_a$ : جذب سطحی پلیمر ( $kg\ polymer/kg\ rock$ )  
 $S_{dpp}$ : فضای غیر قابل دسترس (بدون بعد)  
 $C_p$ : غلظت پلیمر در محلول ( $kg/m^3$ )  
 $\Delta t$ : گام زمانی (s)  
 $C_{pi}$ : غلظت اولیه پلیمر در محلول ( $kg/m^3$ )  
 $T$ : انتقال پذیری ( $md.m/cp$ )  
 $C_n$ : غلظت نمک در محلول ( $kg/m^3$ )  
 $V$ : حجم فضای خالی در بلاک ( $m^3$ )  
 $D_z$ : اختلاف ارتفاع (m)  
 $\bar{V}_w$ : سرعت داری فاز آب ( $m/day$ )  
 $\bar{D}$ : ضریب نفوذ ( $m^2/day$ )  
 $\rho_r$ : دانسیته سنگ ( $kg/m^3$ )  
 $k$ : تراوایی (md)  
 $\phi$ : تخلخل (بدون بعد)  
 $m$ : نرخ برشی کاهش شونده پلیمر (بدون بعد)  
 $\mu$ : ویسکوزیته (cP)  
 $M$ : نسبت تحرک پذیری (بدون بعد)  
 $\mu_{p,eff}$ : ویسکوزیته موثر پلیمر (cP)  
 $q_w$ : نرخ جریان آب در چاه ( $m^3/day$ )  
 $\mu_{w,eff}$ : ویسکوزیته موثر آب (cP)

## مراجع

- [1]. Ahmed T., "Reservoir Engineering Handbook," 2<sup>nd</sup> ed. Gulf Professional Publishing, 2001  
 [2]. Green D. W., Willhite G.P., "Enhanced oil recovery," AIME, 1998.  
 [3]. Larry W. Lake, *Enhanced Oil Recovery*, Prentice Hall, 1989.  
 [4]. Seright R., Seheult J. M., and Talashek T., "Injectivity characteristics of EOR polymers," SPE Reservoir Evaluation & Engineering," Vol. 12, No. 5, pp. 783-792, 2009.  
 [5]. Eclipse, "Eclipse technical description manual," 2<sup>nd</sup> ed., Schlumberger, 2009.  
 [6]. AlSofi A. and Blunt M., "Streamline-based simulation of non-newtonian polymer flooding," SPE Journal, Vol. 15, No. 4, pp. 895-905, 2010.

- [7]. Ghazanfari M. H., Kharrat R., Rashtchian D., and Vossoughi S., "Statistical model for dispersion in a 2D glass micromodel," SPE J., Vol. 15, No. 2, pp. 301-312, 2010.
- [8]. Esmaeili M., Heydarian A., and Helalizadeh A., "An Experimental study of alkali-surfactant-polymer flooding through glass micromodels including dead-end pores," Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 48-56, 2013.
- [9]. AlDousary S., "Determining pore level mechanisms of alkaline surfactant polymer flooding using a micromodel," SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, Oct. 8-10, 2012.
- [10]. Farzaneh S., Kharrat R., and Ghazanfari M. H., "Experimental study of solvent flooding to heavy oil in fractured five-spot micro-models: the role of fracture geometrical characteristics," Journal of Canada Petroleum Technology, Vol. 49, No. 3, pp. 36-4, 2010.
- [11]. Sedaghat M. H., Masihi M., Ghazanfari M. H., and Rashtchian D., "Experimental investigation of microscopic/macroscopic efficiency of polymer flooding in fractured heavy oil five-spot systems," Journal of Energy Resource Technology, Vol. 135, No. 3, pp. Mar., 2013.
- [12]. Sedaghat M. H., Ghazanfari M. H., Masihi M., and Rashtchian D., "Experimental and numerical investigation of polymer flooding in fractured heavy oil five-spot systems," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 108, pp. 370-382, 2013.
- [13]. Parvasi P., Sedaghat M. H., Janamiri R., and Hatampour A., "Effects of polymers and alkaline on recovery improvement from fractured models," World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 6, pp. 12-28, 2012.
- [14]. Mohamadi S., Masihi M., and Ghazanfari M. H., "Characterizing the role of shale geometry and connate water saturation on performance of polymer flooding in heavy oil Reservoirs: experimental observations and numerical simulations," Transport in Porous Media, Vol. 91, Issue 3, pp 973-998, 2011.
- [15]. Hatzignatiou D. G. and Norris U., and Stavland A., "Core-scale simulation of polymer flow through porous media," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 108, pp. 137-150, 2013.
- [16]. Lie K., "Fast simulation of polymer injection in heavy-oil reservoirs based on topological sorting and sequential splitting," SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, USA, 18-20 Feb. 2013.
- [17]. Falode O. A. and Afolabi F. A., "Simulation study of polymer performance: effect of clay minerals," Petroleum and Coal, Vol. 53 (3), pp. 206-211, 2011.
- [18]. Bear J., "Dynamics of Fluids in Porous Media," American Elsevier Publishing Company, 1972.
- [19]. Chen Z. "Reservoir simulation mathematical technique in oil recovery," SIAM, 2007.