بررسی آزمایشگاهی اثر ویژگی‌های فیزیکی شکاف بر شکل‌گیری و توسعه انگشتی‌ها در مخازن نفت سنگین شکاف‌دار در شرایط تزریق امتزاجی

میلاد سعیدیان، محمد حسین غضنفری*+، محسن مسیحی
تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

ریاض خراط
تهران، دانشگاه صنعت نفت، مرکز تحقیقات نفت تهران

چکیده: شکل‌گیری و توسعه انگشتی‌ها در سطح مشترک میان دو سیال در زمان تزریق امتزاجی می‌تواند باعث کاهش ضریب بازیافت نهایی در فرایندهای افزایش برداشت شود. در این پژوهش، آزمایش های تزریق حلال هیدروکربوری در سیستم میکرومدل که در ابتدا توسط نفت سنگین اشباع شده اند، انجام شده است. میکرومدل‌های شکاف‌دار با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت شکاف، در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. نرم افزار تحلیل تصاویر با دقت بالا برای مشخص کردن رفتار حرکت سیال، حرکت جبهه حلال تزریقی و همچنین شکل‌گیری انگشتی‌ها که بر اثر حرکت حلال در شکاف و ماتریس رخ می‌دهد، مورد استفاده قرار گرفت. مشاهده‌ها نشان داده‌اند که پخش‌شدگی بیشتر حلال در شکاف نسبت به ماتریس، هم در جهت حرکت و هم عمود بر آن موجب می‌شود تا رفتار انگشتی‌ها تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی شکاف تغییر کند. همچنین این پدیده موجب می‌شود تا انگشتی‌ها محو شده و یا با هم ترکیب شوند و در اطراف شکاف‌ها تشکیل یک انگشتی واحد را دهند. به دلیل ناهمگونی که وجود شکاف‌ها در محیط متخلخل ایجاد می‌کند، قبل از زمان اولین عبور حلال، پدیده جدا شدگی نوک انگشتی‌ها رخ می‌دهد. در حقیقت پخش‌شدگی در جهت حرکت حلال موجب پیشرفت پدیده غالب شده در صورتی که پخش‌شدگی در جهت عمود بر حرکت حلال باعث افزایش احتمال رخ دادن پدیده‌های جدا شدگی و پخش شدگی می‌شود. علاوه بر آن نتیجه‌ها نشان داده‌اند که پخش شدگی شکاف، ناپیوستگی شکاف و تعداد شکاف‌ها در محیط متخلخل با پدیده جدا شدگی قبل و بعد از اولین عبور و پخش شدگی در اطراف شکاف‌ها، ارتباط مستقیم دارند. همچنین آزمایش‌ها نشان دادند که پدیده حرکت غالب بیشتر تحت تأثیر جهت شکاف بوده و در حالتی که شکاف با جهت میانگین حرکت زاویه صفر درجه می‌سازد این پدیده بیشینه می‌شود. نتیجه‌های این مطالعه می‌تواند به درک بهتر رفتار انگشتی‌ها، که نقش اساسی در پیش بینی دقیق ضریب بازیافت نهایی در فرایند تزریق امتزاجی در مخازن نفت سنگین شکافدار بازی می‌کند، کمک نماید.

واژه‌های کلیدی: انگشتی شدن، نفت سنگین، تزریق امتزاجی، میکرومدل، محیط متخلخل شکافدار، حرکت غالب، جداشدگی، پخش شدگی، ازدیاد برداشت نفت.

KEY WORDS: *Viscous fingering, Heavy oil, Micromodel, Fractured porous media, Shielding, Splitting, Spreading, Enhanced oil recovery.*

*عهده دار مکاتبات
+E-mail: ghazanfari@sharif.ir

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

به طور عموم پدیده انگشتی شدن به شکل‌گیری و گسترش ناپایداری‌هایی که در فرایند جابه‌جایی سیالات در محیط متخلخل رخ می‌دهد، گفته می‌شود. این رخ داد در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند برداشت اولیه و ثانویه از مخازن، بازتولید لایه‌ها در فرایندهای مهندسی شیمی، آب شناسی و فیلتراسیون وجود دارد. در حقیقت انتظار می‌رود این پدیده در تمامی زمینه‌های مهندسی و صنعتی که سیالی درون محیط متخلخل حرکت می‌کند، رخ دهد [۱]. این پدیده بر اثر وجود ناهمگونی در محیط متخلخل یا حضور نیروهایی چون نیروی گرانرو که بر اثر اختلاف نامناسب گرانروی ایجاد می‌شود، نیروی مویینه که بر اثر وجود کشش سطحی میان سطوح امتزاج ناپذیر ایجاد می‌شود، نیروی گرانشی که بر اثر اختلاف جرم حجمی میان دو سیال رخ می‌دهد و همچنین نیروهای پخش کننده که به‌دلیل اختلاف غلظت ایجاد می‌شوند، رخ می‌دهد. نیروهای ذکر شده همگی به گونه‌ای به ناپایدار و غیرقابل پیش‌بینی شدن پدیده انگشتی شدن دامن می‌زنند. درنتیجه برای بررسی هرچه بهتر این پدیده شناخت نیروهای ذکر شده ضروری به نظر می‌رسد. *قربی*[۱] و *همکاران* [۲] آزمایش‌هایی را در یک سیستم بسته به هم فشرده شیشه‌ای با امکان مشاهده انجام دادند و در آن به بررسی اثر نسبت گرانروی و عدد ثقلی روی میزان و نحوه شکل‌گیری انگشتی‌ها و همچنین ضریب بازیافت نهایی پرداختند. در این مطالعه آنها با استفاده از سه مفهوم پخش‌شدگی، حرکت غالب و جدا شدگی که اولین بار توسط *هامسی*[۲] [۱] معرفی شدند، به توصیف کیفی پدیده انگشتی شدن پرداخته و همچنین با استفاده از سیستم شبکه عصبی مصنوعی به مدل‌سازی این پدیده و ارتباط شکل انگشتی‌ها با بعد فراکتالی پرداختند. حرکت غالب به شکل‌گیری یک انگشتی غالب در مسیر حرکت گفته می‌شود که به طور معمول حرکت سیال در انگشتی‌های دیگر را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. پخش شدگی نیز تمایل انگشتی برای بزرگتر شدن در اثر پدیده پخش شدن در محیط متخلخل می‌باشد. با گذشت زمان پخش شدگی موجب افزایش عرض انگشتی شده و در صورتی که سرعت حرکت سیال در سامانه بالا باشد سرانجام به جداشدگی نوک انگشتی‌ها منجر می‌شود. جداشدگی به ناپایداری در حرکت نوک انگشتی‌ها و تمایل آن‌ها به وارد شدن به چند مسیر گوناگون و در نتیجه آن جدا شدن نوک انگشتی‌ها اطلاق می‌شود [۱]. مطالعات آزمایشگاهی فراوان دیگری نیز در زمینه پدیده انگشتی شدن انجام شده است که بیشتر به بررسی این پدیده در ستون‌های کروماتوگرافی مربوط می‌شود. در این مطالعات به طور عمول ستون را با استفاده از گلوله‌های شیشه‌ای شفاف پر کرده و سپس با استفاده از سیال جابه‌جا شونده پر می‌کنند. پس از آن، سیال جابه‌جا کننده را از بالا به درون ستون تزریق می‌نمایند. در این مطالعه‌ها پارامترهای تأثیر گذار بر شکل‌گیری انگشتی‌ها در جابه‌جایی تحت ریزش ثقلی بررسی شده است [۵ ـ ۳]. اثر پارامترهای سرعت تزریق سیال جابه‌جا کننده و همچنین اختلاف میان گرانروی سیالات توسط *کتچپول*[۳] و *همکاران* [۵] مورد آزمایش قرار گرفت. *شالیکر*[۴] و *همکاران* [۶] امکان تکرارپذیری انگشتی شدن و شکل‌گیری انگشتی‌های یکسان در آزمایش‌های همانند را مورد آزمایش قرار دادند و ادعایی مبنی بر تکرارپذیری انگشتی‌ها در آزمایش‌های یکسان را اعلام کردند. *برویلس*[۵] و *همکاران* [۳] نیز برگشت‌پذیر بودن پدیده انگشتی شدن در ستون‌های کروماتوگرافی را ادعا نمودند. آن‌ها یک فرایند تزریق حلال امتزاجی را با استفاده از تزریق دوباره از انتهای ستون در جهت عکس انجام داده و دیدند به جز در موردهایی که انگشتی تحت تأثیر نفوذ مولکولی تغییر شکل جزیی می‌دهد، در باقی موارد، شکل انگشتی‌ها ثابت می ماند. آنها همچنین در این مطالعه ادعای *شالیکر* و *همکاران* [۶] را مبنی بر تکرار پذیر بودن انگشت‌ها را مردود دانست و تأثیر تراوایی ابتدا و انتهای ستون را بی‌تأثیر بر شکل‌گیری انگشتی‌ها دانست.

علاوه بر بررسی‌ها آزمایشگاهی پدیده انگشتی شدن، تلاش‌هایی نیز جهت مدل‌سازی عددی این پدیده صورت گرفته است. در این مطالعه‌ها سه روش برای مدل‌سازی انگشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. روش اول استفاده از معادله‌های کلی حاکم بر سیستم فیزیکی بوده است. *ژانگ*[۶] و *همکاران* [۷] نیز با استفاده از معادله‌های دارسی و انتقال جرم و یک سیستم آزمایشگاهی با امکانات مشاهده‌ای در الگوی پنج نقطه‌ای به مطالعه پدیده انگشتی شدن پرداختند. روش دوم مدلسازی انگشتی‌ها با استفاده از مطالعه‌ها در مقیاس حفره می‌باشد. *لوول*[۷] و *همکاران* [۸]

(۱) Gharbi
(۲) Honsy
(۳) Catchpoole
(۴) Shalliker
(۵) Broyles
(۶) Zhange
(۷) L øvoll

Archive of SID
www.SID.ir

با استفاده از این نوع مدل‌سازی تأثیر پارامترهای نیروی ثقل، موبینگی و گرانرو را در محیطی که سیالات تحت نیروی ثقل حرکت می‌کنند، را بررسی نمودند. آنها پدیده انگشتی شدن را در اثر ریزش ثقلی و موبینگی را در حالت‌های گوناگون مورد مطالعه قرار دادند. روش دیگری که توسط پژوهشگران استفاده می‌شود استفاده از علم آمار و پدیده‌های تصادفی می باشد. *هاتیبوگلو*[۱] و *همکاران* [۹] توانستند با استفاده از روش تصادفی DLA یا توده محدود شده توسط نفوذ مولکولی، تا حد قابل قبولی شکل‌گیری انگشتی‌ها را در سیستم‌های همسو و ناهمسو در فرایند جابه‌جایی سیال توسط حلال در شرایط ایستا و توسط نفوذ مولکولی را شبیه‌سازی نمایند. دیدگاه دیگری که که جهت بررسی پدیده انگشتی‌شدن مورد استفاده قرار گرفته است، دیدگاه فراکتالی شکل انگشتی‌ها می‌باشد. این روش را نمی‌توان نوعی مدل‌سازی انگشتی‌ها دانست زیرا با استفاده از اندازه‌ها فرکتالی انگشتی ها در یک سامانه تنها می توان مساحتی را که انگشتی در سامانه به خود اختصاص داده و در نتیجه بازدهی نهایی در هر لحظه را به‌دست آورد. این دیدگاه ابتدا توسط *پیترز*[۲] و *همکاران* [۱۰] ارایه شد. آن‌ها ادعا نمودند که شکل انگشتی‌ها در طول فرایند جابه‌جایی در محیط متخلخل از تئوری فراکتال‌ها پیروی می‌کند و می‌توان با توجه به ثابت بودن بعد فراکتالی در طول فرایند تزریق ماده جابجا کننده و دانستن شعاع بدون بعد انگشتی به ضریب بازیافت در آن لحظه دست پیدا کرد. *قربی* و *همکاران* [۲] با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و بر اساس تئوری فراکتال‌ها توانستند نتیجه‌های بهتری برای به‌دست آوردن ضریب بازیافت نهایی، به‌دست آورند.

با توجه به توضیحاتی که در رابطه با پدیده انگشتی شدن و شیوه‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی آن ارایه شد، مشخص شد که تاکنون هیچ گونه مطالعه‌ای چه آزمایشگاهی و چه مدل‌سازی عددی بر روی این پدیده در سامانه‌های شکاف‌دار صورت نگرفته است. با توجه به پارامترهای مؤثر در شکل‌گیری انگشتی‌ها در محیط‌های متخلخلی که تحت فرایند تزریق امتزاجی قرار می گیرند، می‌توان به اهمیت تأثیر وجود شکاف بر روی نحوه شکل‌گیری انگشتی‌ها پی‌برد. در این مطالعه با توجه آزمایش‌هایی که در محیط‌های شکاف‌دار صورت می‌گیرد به تأثیر پارامترهای فیزیکی شکاف بر چگونگی تغییر شکل و گسترش انگشتی‌ها پرداخته و همچنین تحلیلی کیفی و کمی بر چگونگی شکل‌گیری انگشتی‌ها و تأثیر آن‌ها بر ضریب بازیافت نهایی فرایند تزریق امتزاجی ارایه شده است.

بخش تجربی

سامانه آزمایشگاهی

شمای سامانه آزمایشگاهی میکرومدل استفاده شده در آزمایش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. طراحی شکاف ها بر اساس مدل صفحات موازی [۱۱] انجام شده که در آن شکاف را به صورت دو صفحه به‌طور کامل مسطح و موازی در نظر گرفته و تغییرات دهانه شکاف نادیده گرفته می‌شوند. الگوهایی در اندازه‌های ۶×۶ سانتیمتر مربع با روزنه‌های یکسان اما ویژگی‌های هندسی متفاوت شکاف، با عمق متوسط ۵۵ تا ۶۵ میکرومتر بر روی سطح شیشه حک شد (شکل ۲). روش ساخت الگوهای ذکر شده توسط پژوهشگران متفاوتی شرح داده شده است [۱۴ ـ ۱۲].

کیفیت و وضوح عکس‌های گرفته شده در حین آزمایش‌ها تأثیر به‌سزایی در دقت نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌ها دارد. از این رو، دوربینی با کیفیت بسیار بالا برای عکس‌برداری و فیلم‌برداری در زمان حرکت سیال درون الگو استفاده شده است. نرم افزار تجزیه تصویرها برای بررسی جزییات عکس‌های گرفته شده از محیط متخلخل استفاده شده است.

مواد

در این پژوهش نمونه نفت مرده یکی از مخازن نفت سنگین ایران مورد استفاده قرار گرفته است. حلال تزریقی نیز مخلوطی از ۴۰درصد حجمی دکان، ۴۰ درصدحجمی میعانات گازی، ۱۰ درصدحجمی اتیلن گلایکول مونو بوتیل اتر[۳] و ۱۰ درصد حجمی بوتانول می‌باشد. این حلال به عنوان حلال بهینه برای نفت مورد نظر توسط اعلام شده است [۱۵]. مشخصات کلی نفت و حلال مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

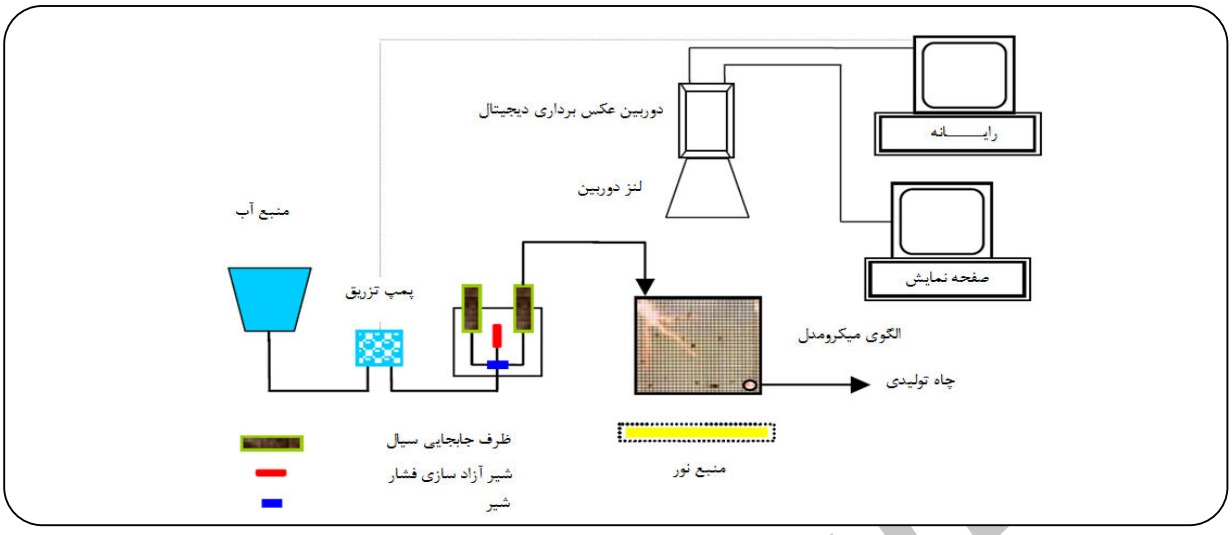
الگوها ابتدا با تولوئن، آب مقطر و استون شستشو و خشک شدند. سپس توسط نفت خام مورد آزمایش به طور کامل اشباع شده و پس از آن حلال با استفاده از پمپ با دقت بالا، با نرخ ثابت از مجرای تزریق وارد نمونه می‌شدند. کلیه آزمایش‌ها بدون حضور آب همراه، به صورت افقی، در دما و فشار استاندارد و با نرخ تزریق ۰/۰۰۰۸سانتی متر مکعب در دقیقه انجام شده اند.

(۱) Hatibuglu

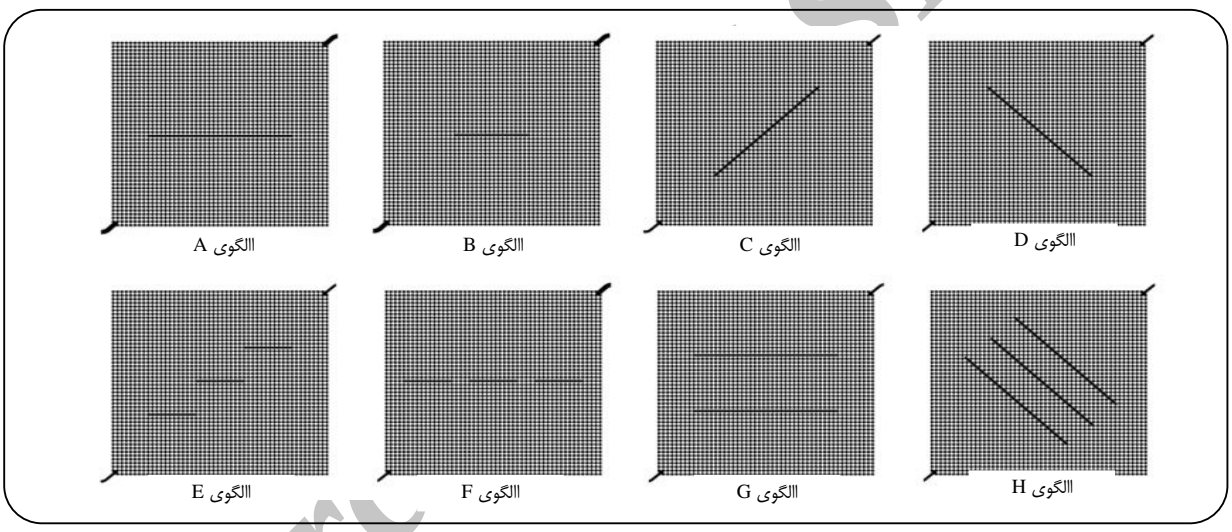
(۲) Peters

(۳) Ethylene glycol mono butyl ether

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱ـ شمای سیستم آزمایشگاهی استفاده شده.



شکل ۲ـ الگوهای استفاده شده جهت بررسی خواص فیزیکی شکاف.

بخش نظری

تجزیه کمی پدیده انگشتی شدن

تلاش‌های فراوانی برای بررسی و مدل سازی ریاضی آغاز پدیده انگشتی شدن و همچنین چگونگی پیشرفت این پدیده به وسیله روش آشفتگی جبهه سیال[۱] صورت پذیرفته است [۱۷ ، ۱۶]. نتیجه‌های مطالعه‌ها نشان داده است که در جابه‌جایی امتزاج پذیر در شرایط مشخص، اختلال‌های جبهه سیال زمانی که طول موج کمتر از میزان بحرانی است توسط پخش شدگی در محیط از بین رفته و در شرایطی که طول موج از میزان بحرانی بیشتر شود، پدیده انگشتی ینگ رخ خواهد داد. معادله تقریبی زیر برای محاسبه طول موج بحرانی در حالتی که مرز میان سیال جابه‌جا کننده و جابه‌جا شونده متمایز باشد، توسط *گاردنر*[۲] [۱۸] ارایه شده است:

$$\lambda_{c,x} = ۲^{۲.۵}\pi \frac{\mu_o + \mu_s}{\mu_o - \mu_s} \frac{K_x}{v_x} \qquad (۱)$$

که در آن $\lambda_{c,x}$ ، طول موج بحرانی μ_s ، μ_o ، گرانروی حلال و نفت ؛

(۱) Frontal perturbation theory

(۲) Gardner

www.SID.ir

جدول ۱ـ ویژگی‌های نفت و حلال استفاده شده در آزمایش.

نوع سیال	نفت	حلال
جرم حجمی (kg/m^3)	۹۶۸	۷۳۴
گرانروی (cp)	۶۵	۱/۲۲۴

K_x ، ضریب پخش شوندگی و x ، v_x ، سرعت سیال جابه‌جا کننده در برای x می‌باشند.

با توجه به معادله داده شده در دو سیستم متفاوت با سیالات جابه‌جا کننده و جابه‌جا شونده یکسان، ضریب پخش شوندگی و سرعت حرکت سیال نقش به‌سزایی در میزان طول موج بحرانی بازی می‌کنند. وجود شکاف در محیط متخلخل و همچنین تغییر ویژگی‌های فیزیکی آن می‌تواند تا حد زیادی بر میزان این دو پارامتر اساسی در پدیده انگشتی شدن تأثیرگذار باشد. بالاتر بودن سرعت حرکت سیال در شکاف و همچنین ضریب‌های پخش شوندگی در این محیط نسبت به محیط متخلخل این اثر گذاری را تقویت می‌کند.

مفهوم ضریب پخش شدگی میانگین

برای بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی شکاف بر میزان ضریب پخش شوندگی محیط متخلخل شکاف‌دار، مفهومی بر اساس میانگین سطحی با عنوان ضریب پخش شوندگی میانگین به صورت زیر تعریف شد:

$$K_{x,O} = \frac{K_{x,m} \times A_m + K_{x,f} \times A_f}{A_m + A_f} \qquad (۲)$$

که در آن $K_{x,o}$ ، ضریب پخش شدگی میانگین؛ x ، L یا T، که به ترتیب نمایانگر برای حرکت سیال و عمود بر حرکت سیال می‌باشد، $K_{x,f}$ و $K_{x,m}$ ، ضریب‌های پخش شوندگی در برای x به ترتیب برای شکاف و ماتریس؛ A_f ، A_m: مساحت شکاف و ماتریس می‌باشند.

مفهوم معرفی شده را می‌توان برای بررسی تأثیر شکاف بر پدیده انگشتی شدن مورد استفاده قرار داد. با توجه به مفهوم طول موج بحرانی می‌توان به صورت تقریبی میزان انگشتی‌های تشکیل شده در جهت حرکت سیال یا جهت عمود بر آن مورد بررسی قرار داد. بالاتر بودن $K_{L,O}$ را می‌توان به‌صورت کاهش احتمال رخ دادن انگشتی‌ها در جهت حرکت و افزایش حجم جبهه حلال تزریقی در این جهت تفسیر نمود. همچنین بالا بودن $K_{T,O}$ می‌تواند نشانه کاهش انگشتی‌ها در جهت عمود بر میانگین حرکت سیال و افزایش حجم جبهه سیال تزریقی در این جهت باشد. معادله تصحیح شده *گاردنر* [۱۸] با توجه به وجود شکاف در محیط متخلخل به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\lambda_{c,x} = ۲^{۲.۵}\pi \frac{\mu_o + \mu_s}{\mu_o - \mu_s} \frac{K_{x,O}}{v_{x,O}} \qquad (۳)$$

که در آن $\lambda_{c,x}$ ، طول موج بحرانی در جهت x ؛ μ_s ، μ_o ، گرانروی حلال و نفت، به ترتیب، $K_{x,o}$: ضریب پخش شوندگی میانگین در جهت x ؛ $v_{x,o}$ ، سرعت میانگین سیال جابه‌جا کننده در جهت x می‌باشند. سرعت میانگین در جهت حرکت سیال و همچنین عمود بر جهت حرکت سیال را می‌توان با روش میانگین‌گیری سطحی داده شده برای ضریب‌های پخش شوندگی محاسبه نمود.

تجزیه کیفی پدیده انگشتی شدن

با توجه به نقش موثری که پدیده انگشتی شدن و انگشتی‌ها بر میزان ضریب بازیافت ناشی از تزریق امتزاجی در سامانه‌های شکاف‌دار بازی می‌کند، در این بخش به بررسی دقیق تر این پدیده و عامل‌های مؤثر بر شکل‌گیری انگشتی‌ها پرداخته می‌شود. به‌طور عموم پدیده انگشتی شدن به شکل‌گیری و گسترش ناپایداری‌هایی که در فرایند جابه‌جایی سیالات در محیط متخلخل رخ می‌دهد، گفته می‌شود [۱]. این پدیده بر اثر وجود ناهمگونی در محیط متخلخل یا حضور نیروهایی چون نیروی گرانرو که بر اثر اختلاف نامناسب گرانروی ایجاد می شود، نیروی مویینه که بر اثر وجود کشش سطحی میان سطوح امتزاج ناپذیر ایجاد می شود، نیروی گرانشی که بر اثر اختلاف جرم حجمی میان دو سیال بوجود می آید و همچنین نیروهای پخش‌کننده[(۱)] که به دلیل اختلاف غلظت ایجاد می‌شوند، رخ می‌دهد [۲]. در جابه‌جایی‌های امتزاج‌پذیر به دلیل ممزوج شدن سیال جابجا کننده و جابه‌جا شونده، سطوح میان آن‌ها از بین رفته و کشش سطحی و نیروهای مویینه تأثیرگذار نمی‌باشند. در این مطالعه آزمایش‌ها به صورت امتزاج‌پذیر و در راستای افقی انجام شده‌اند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نیروهای گرانش و مویینه در شکل گیری انگشتی‌ها بی‌تأثیر می‌باشند. دو عامل مهم که در شکل گیری انگشتی ها در آزمایش‌های انجام شده اختلاف نامناسب میان گرانروی بین سیال جابه‌جا کننده و جابجا شونده و ضریب پخش شوندگی[(۲)] موجود

(۱) Dispersive force

(۵) Dispersion coefficient

Archive of SID
www.SID.ir

در محیط متخلخل می‌باشد. برای بررسی کیفی انگشتی‌های دیده شده در این آزمایش ها در ابتدا لازم است مفاهیمی که هُمسی [۱] در مقاله خود جهت تعریف شکل ظاهری انگشتی‌ها عنوان کرد، بهتر شناخته شوند. این مفاهیم عبارتند از جداشدگی، حرکت غالب و پخش شوندگی که در ادامه به مفهوم آنها و تأثیر وجود شکاف بر رخ دادن این پدیده‌ها پرداخته می‌شود. در این مطالعه به اختصار به اثر وجود شکاف بر چگونگی شکل‌گیری انگشتی‌ها با استفاده از تعریف‌های داده شده برای توصیف انگشتی، پرداخته می‌شود.

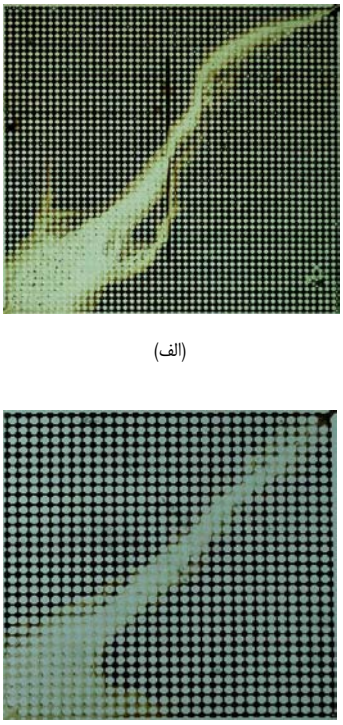
نتیجه‌ها و بحث

اثر وجود شکاف بر پدیده انگشتی شدن

عامل اصلی پدیده انگشتی شدن و شروع آن، با وجود تمام مطالعه‌های انجام شده، هنوز دارای ابهاماتی است. به طور عموم این پدیده به وجود ناهمگونی‌های جزیی در تراوایی یک محیط مرتبط می‌شود. شکاف نیز می‌تواند به‌عنوان یک ناهمگونی در یک محیط متخلخل همگون در نظر گرفته شود. بنابراین وجود شکاف به دلیل تأثیری که بر روی پروفیل سرعت و فشار و همچنین ضریب‌های پخش‌شوندگی در جهت و عمود بر جهت حرکت سیال جابه‌جا کننده دارد، می‌تواند باعث به وجود آمدن یا ازبین رفتن انگشتی‌ها شود. در این مطالعه تمامی آزمایش ها در شرایط افقی انجام شده‌اند بنابراین می‌توان از اثر نیروی جاذبه بر شکل‌گیری انگشتی‌ها صرف‌نظر نمود. دو نیروی اصلی مؤثر بر شکل‌گیری و رشد انگشتی‌ها در جابه‌جایی‌های امتزاج پذیر نیروی پخش کننده و نیروی گرانرو هستند. بالاتر بودن میزان پخش شوندگی در شکاف نسبت به ماتریس درجهت و عمود بر جهت حرکت سیال تزریقی موجب می‌شود تا میزان پخش شوندگی در جهت‌های ذکر شده در کل محیط متخلخل افزایش یابد، که در نتیجه آن احتمال شروع و رشد انگشتی‌ها بیشتر می شود. شکل ۳ (الف) نشان می دهد که چگونه شکاف بر مسیر حرکت سیال به سمت چاه تولیدی تأثیرگذار بوده و انحراف از مسیر اصلی را به سیال تحمیل می‌کند. همچنین بالاتر بودن سرعت سیال در شکاف نسبت به ماتریس از عواملی است که به احتمال به وقوع پیوستن انگشتی‌ها در طول فرایند بر اثر اختلاف گرانروی، دامن می‌زند.

پدیده جداشدگی

جداشدگی به ناپایداری در حرکت نوک انگشتی‌ها و تمایل آنها به وارد شدن به چند مسیر مختلف و در نتیجه آن جدا شدن نوک انگشتی‌ها اطلاق می‌شود [۲]. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده



(الف)

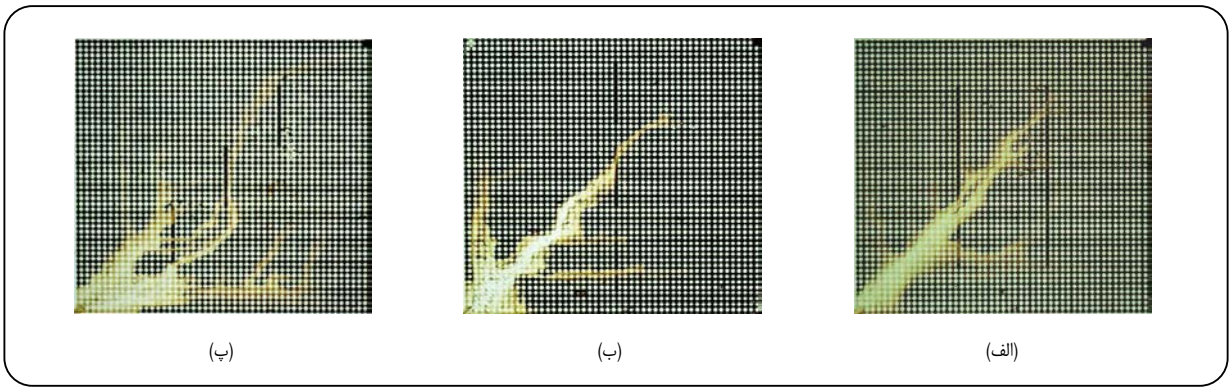
(ب)

شکل ۳ـ تأثیر وجود شکاف بر نحوه حرکت سیال تزریقی در (الف) محیط شکاف دار (ب) محیط بدون شکاف.

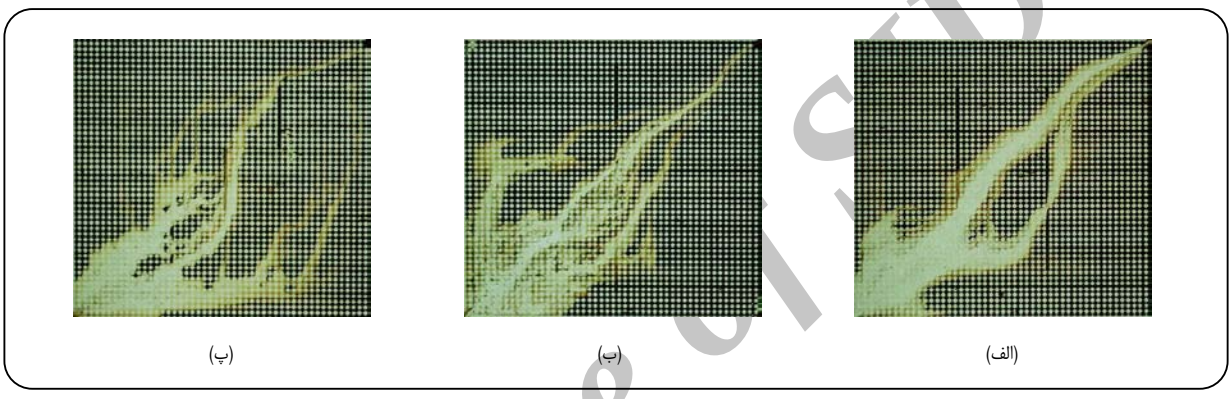
از آزمایش‌ها می‌توان جداشدگی را در دو مرحله مورد بررسی قرار داد. مرحله اول قبل از زمان اولین عبور حلال یعنی زمانی که انگشتی‌ها در حال تشکیل شدن می‌باشند، در این زمان جداشدگی می‌تواند زمینه ساز ایجاد انگشتی های غالب در زمان‌های بعدی باشد. قبل از اولین عبور حلال از چاه تولیدی شکاف در سیستم به صورت ناهمگونی عمل کرده و توزیع فشار در محیط را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده به خوبی در شکل ۴ و همچنین شکل ۵ قابل دیدن است. تصویرهای مربوط به آزمایش شکل ۴ را پس از زمان اولین عبور نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود انگشتی‌هایی که قبل از زمان اولین عبور تشکیل شدند پس از عبور حلال از چاه تولیدی رشد کرده و به جبهه‌های اصلی حلال تبدیل شدند.

بعد از اولین عبور حلال، جداشدگی همراه با پخش‌شدگی شکل انگشتی ها را تغییر داده و حتی انگشتی های جدیدی را به‌وجود می‌آورند که موجبات افزایش ضریب بازیافت نفت را بر اثر افزایش برخورد حلال و نفت، فراهم می‌نمایند. بالاتر بودن پخش‌شدگی

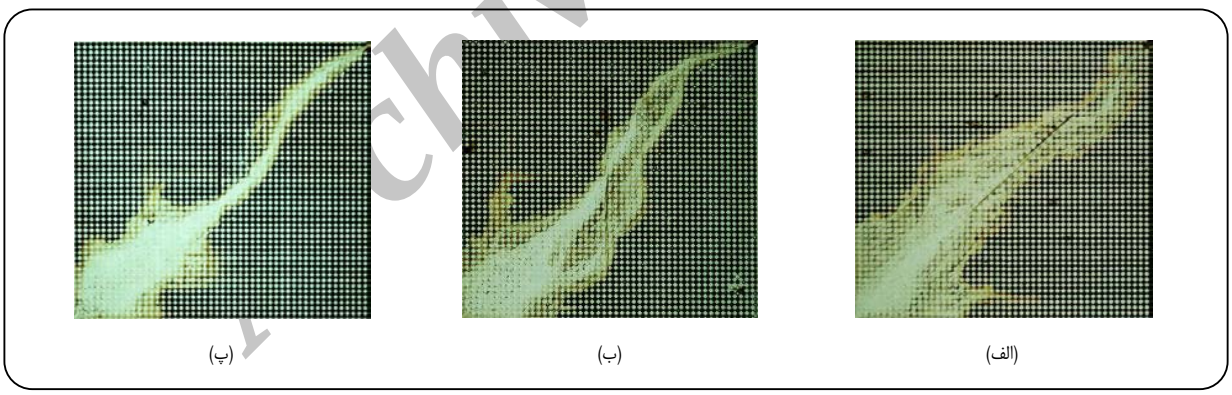
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ٤ ـ پدیده جداشدگی قبل از زمان اولین عبور حلال در الگوهای (الف) G (ب) F (پ)E .



شکل ۵ ـ رشد انگشتی‌های جدا شده و تبدیل آنها به جبهه حلال با حرکت غالب در الگوهای (الف) E(ب) F (ج) G .



شکل ٦ ـ شکل‌گیری انگشتی‌ها در اثر پخش‌شدگی و عدم رشد آن‌ها به‌دلیل غالب بودن جبهه اصلی حلال در الگوهای (الف) A (ب) B (پ) C.

در شکاف‌ها نسبت به ماتریس باعث افزایش پدیده پخش‌شدگی در محیط شده و احتمال وقوع جداشدگی در محیط را افزایش می‌دهد. در برخی موارد این انگشتی ها رشد کرده و به انگشتی‌های به نسبت بزرگی تبدیل شوند و در برخی موارد دیگر در اندازه های اولیه خود باقی می‌مانند. این پدیده به میزان غالب بودن انگشتی اصلی و همچنین سرعت حرکت سیال در بازه‌هایی که پخش شدگی رخ می‌دهد، بستگی دارد. نمونه ای از انگشتی‌های کوچک که توانایی رشد را نداشته‌اند را می‌توان در شکل ۶ دید.

www.SID.ir

پدیده حرکت غالب

حرکت غالب به شکل‌گیری یک انگشتی غالب در مسیر حرکت گفته می‌شود که به‌طور معمول حرکت سیال در انگشتی‌های دیگر را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد [۲]. این پدیده بیشتر تحت تأثیر نرخ تزریق می باشد. در سیامانه‌های امتزاج پذیر تا زمان اولین عبور حلال هر سه پدیده برای شکل دادن انگشتی‌ها در حال رقابت هستند. در این میان جداشدگی و پخش‌شدگی در شکل‌گیری انگشتی‌های اولیه نقش اساسی را بازی می‌کنند. به دلیل زمان کم تا اولین عبور حلال در سیستم‌های امتزاج‌پذیر که به طور عمده به دلیل اختلاف زیاد میان گرانروی حلال تزریقی می‌باشد، پدیده‌های جداشدگی و پخش‌شدگی تا زمان اولین عبور حلال[۱] فرصت کافی برای تأثیرگذاری پیدا نمی کنند، بنابراین در زمان‌های اولیه پدیده‌ای که شکل‌گیری انگشتی‌ها را کنترل می‌کند حرکت غالب می‌باشد. همانگونه که در سیستم بدون شکاف در شکل ۱(ب) دیده می‌شود پدیده حرکت غالب را می توان تنها عامل مهم در شکل‌گیری انگشتی دانست. وجود شکاف‌ها با توجه به تعداد آنها در شکل‌گیری انگشتی غالب مؤثر می‌باشند. در شکل ۱(الف) تأثیر شکاف بر تغییر مسیر انگشتی غالب، قابل دیدن می‌باشد. این پدیده به پخش شدن حلال در سیستم کمک شایانی نموده و زمینه را برای بروز پدیده های پخش شدگی و جداشدگی فراهم می‌نماید. وجود شکاف با توجه به ویژگی‌ها فیزیکی در محیط متخلخل مانند طول، جهت و دانسیته بر چگونگی حرکت سیال تأثیرگذار است به طوری که جبهه حلال را که می‌توان به‌صورت یک انگشتی با حرکت غالب در نظر گرفت را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.

با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌ها، وجود شکاف و جهت آن بیشترین تأثیر را بر چدیده حرکت غالب داشته و در این میان شکافی که با جهت میانگین حرکت سیال زاویه صفر درجه می‌سازد بیشترین تأثیر را بر این پدیده دارد. در الگوی بدون شکاف همگونی محیط متخلخل در مقایسه با الگوی شکافدار، جبهه حلال تزریقی تنها یک انگشتی با حرکت غالب را در محیط ایجاد می‌کند.

پدیده پخش شدگی

پخش شدگی نیز تمایل انگشتی برای بزرگتر شدن در اثر پدیده پخش شدن در محیط متخلخل می‌باشد. با گذشت زمان پخش‌شدگی موجب افزایش عرض انگشتی شده و در صورتی که سرعت حرکت سیال در سیستم بالا باشد سرانجام به جداشدگی نوک انگشتی‌ها[۲] منجر می‌شود [۲].پس از اولین عبور حلال دو پدیده پخش‌شدگی و جداشدگی شکل انگشتی‌ها را کنترل می‌کنند. عامل اصلی پخش شدگی در سیستم وجود عواملی به نام‌های ضریب پخش‌شوندگی در جهت حرکت[۳]، K_L، و ضریب پخش‌شوندگی عمود بر جهت حرکت[۴]، K_T، می‌باشند که توسط *تیلر*[۵] [۱۹] به صورت زیر تعریف شدند:

$$K_x = \alpha_x v_x + D_m \qquad (۴)$$

که در آن K ، ضریب پخش شوندگی؛ x ، نمایانگر L و یا T می‌باشد که به ترتیب جهت حرکت سیال تزریقی و عمود بر آن را نشان می‌دهند؛ α ، پخش شوندگی؛ v_x ، سرعت حرکت حلال؛ D_m ، ضریب نفوذ مولکولی حلال در نفت می‌باشند.

در محیط بدون شکاف به‌دلیل سرعت کم حرکت سیال در محیط متخلخل در زمان تزریق امتزاجی بخش $a_x v_x$ در معادله (۴) در مقایسه با ضریب نفوذ مولکولی قابل اغماض می‌باشد، بنابراین فرایند تحت تأثیر نفوذ مولکولی انجام می گیرد. در محیط شکاف‌دار به‌دلیل بالاتر بودن سرعت سیال در شکاف تأثیر این پارامتر بیشتر شده و ضریب پخش شدگی به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. با توجه به معادله (۳) هر دو عامل سرعت و ضریب پخش‌شوندگی در پدیده انگشتی شدن نقش به‌سزایی بازی می‌کنند. شکل ۴ چگونگی گسترش انگشتی‌ها را در جهت شکاف‌های موجود در سیستم نشان می‌دهد. ضریب پخش‌شوندگی در جهت عمود بر حرکت حلال به طور معمول باعث افزایش عرض انگشتی‌ها در محیط می شود. وجود شکاف عمود بر حرکت سیال در شکل ۷ (الف) و ۷ (ب) و همچنین ۷ (پ) که بزرگنمایی بخشی از ۷ (ب) می‌باشد، به روشنی این پدیده را نشان می‌دهند.

با توجه به افزایشی که در پخش‌شدگی سیستم به واسطه وجود شکاف ایجاد می‌شود و همچنین افزایش عرض انگشتی‌ها در محیط، در زمان پایان فرایند تزریق، انگشتی‌ها یا به بیان دیگر جبهه‌های حلال به هم پیوسته شده و تشکیل یک جبهه واحد را می‌دهد. این پدیده در شکل ۸ به روشنی دیده می‌شود.

(۱) Break through time

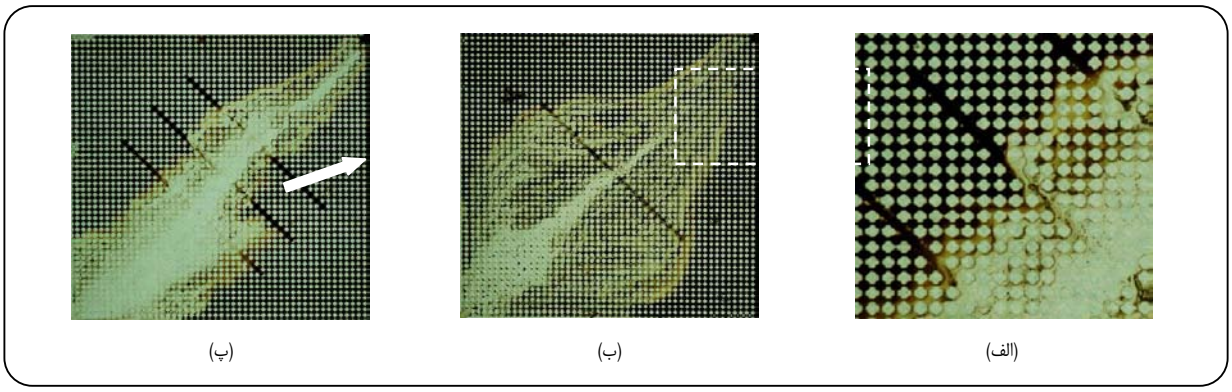
(۲) Finger tip

(۳) Longitudinal dispersion coefficient

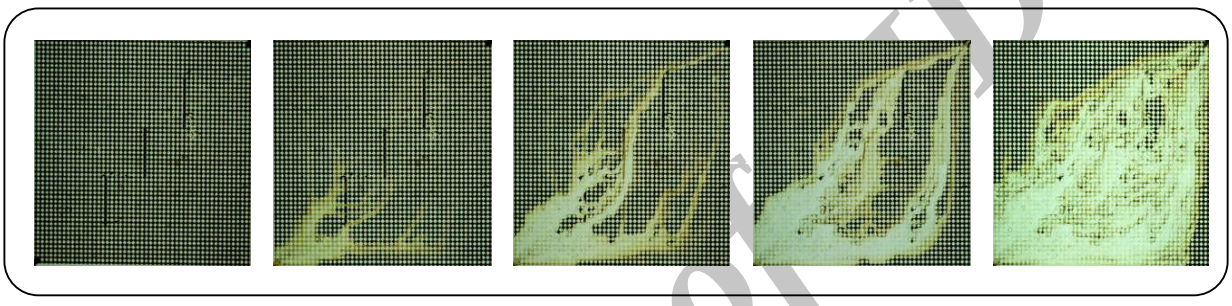
(۴) Transverse dispersion coefficient

(۵) Tayler

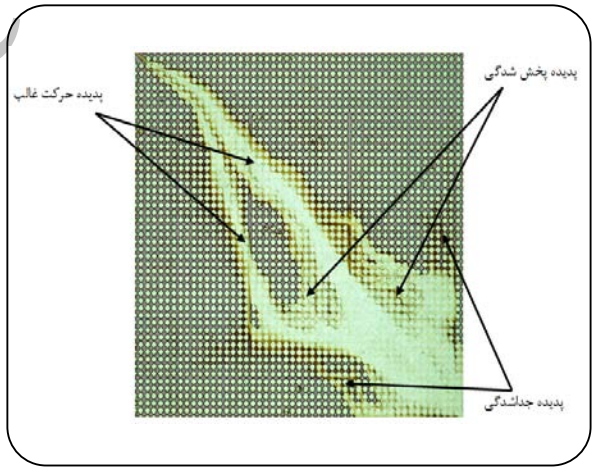
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷ ـ عریض شدن جبهه حلال بر اثر افزایش ضریب پخش شدگی عمود بر جهت حرکت (الف) الگوی D (ب) الگوی H (پ) بزرگنمایی الگوی H .



شکل ۸ ـ پیوستن انگشتی‌ها و تشکیل یک جبهه واحد در فرایند تزریق امتزاجی در الگوی E .



شکل ۹ـ بررسی دقیق تر پدیده‌های دخیل در فرایند انگشتی‌شدن.

اختلاف زیاد میان سرعت در شکاف و ماتریس باعث ایجاد پخش شدگی در محیط می‌شود. در شرایطی که اختلاف سرعت و همچنین تغییرهای جهت حرکت سیال بیشتر شود به‌عنوان مثال در شرایطی که تعداد، ناپیوستگی و پخش شدگی شکاف‌ها در محیط افزایش یابد، پخش شدگی نیز در محیط افزایش می یابد.

برای بررسی هرچه بیشتر پدیده انگشتی‌شدن و مفهوم‌های عنوان شده در این زمینه یکی از تصویرهای گرفته در مقیاس بزرگتر مورد بررسی قرار گرفته است. (شکل ۹) برای افزایش کارایی تصویر با استفاده از نرم افزار ویرایش تصویر تغییراتی در رنگ اصلی این تصویر اعمال شده است.

نتیجه گیری

- بالاتر بودن پخش‌شدگی در شکاف نسبت به ماتریس در هر دو جهت حرکت و عمود بر حرکت باعث می‌شود تا رفتار حرکت انگشتی‌ها در محیط متخلخل شکافدار تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی شکاف قرار گیرد. همچنین این پدیده موجب می‌شود تا انگشتی‌ها با هم ادغام شده و در انتها تشکیل یک جبهه واحد حلال را دهند.
- قبل از زمان اولین عبور حلال پدیده جداشدگی به‌دلیل وجود شکاف و تأثیر آن به عنوان ناهمگونی در محیط، رخ داده و انگشتی‌ها آغاز می‌شوند. جدا شدگی انگشتی‌ها قبل و بعد از اولین عبور حلال و همچنین پخش شدگی در اطراف شکاف‌ها با پخش‌شدگی، ناپیوستگی و تعداد شکاف‌ها رابطه مستقیم دارد.

Archive of SID
www.SID.ir

• قبل از اولین عبور حلال، انگشتی‌هایی که در ابتدا ایجاد شده‌اند رشد کرده و به‌عنوان انگشتی‌های با حرکت غالب، فرایند جابه‌جایی امتزاج‌پذیر و همچنین رفتار حرکت سیال را کنترل می‌کنند.

• پدیده حرکت غالب به طور عمده تحت تأثیر جهت شکاف بوده و در زمانی که شکاف با جهت میانگین حرکت حلال زاویه صفر درجه داشته باشد به میزان بیشینه خود می‌رسد.

• پخش‌شدگی در جهت حرکت سیال پدیده حرکت غالب را تقویت نموده و پخش شدگی در جهت عمود بر حرکت سیال احتمال رخداد پدیده‌های پخش شدگی و جدا شدگی را افزایش می‌دهد.

• پس از اولین عبور حلال، پخش‌شدگی و پیرو آن جداشدگی فرایند انگشتی شدن را تحت کنترل خود درآورده و شکل جبهه حلال و همچنین ضریب بازدهی در انتهای فرایند را مشخص می‌کند.

• نتیجه‌های این مطالعه می‌تواند به شناخت بهتر پدیده انگشتی‌شدن که برای پیش‌بینی دقیق ضریب بازیافت نهایی به دست آمده از تزریق امتزاجی کاربرد فراوانی دارد، کمک شایانی نماید.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۹/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۶/۲۱

مراجع

[1] Homsy M.G., Viscous Fingering in Porous Media, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **19**, p. 271 (1987).

[2] Gharbi R.B.C., Qasem F., Peters E.J., A Relation Between the Fractal Dimention and Scaling Qroups of Unstable Miscible Displacements, *Exp. Fluids*, **31**, p. 357 (2001).

[3] Broyles B.S., Shalliker R.A., Cherrak D.E., Guiochon G., Visualization of Viscous Fingering in Chromatographic Columns, *Journal of Chromatography A*, **822**, p. 173 (1998).

[4] Mayfield K.J., Shalliker R.A., Catchpoole H.J., Sweeney A.P., Wong V., Guiochon G., Viscous Fingering Induced Flow Instability in Multidimensional Liquid Chromatography, *Journal of Chromatography A*, **1080**(2), p. 124 (2005).

[5] Catchpoole H.J., Shalliker R.A., Dennis G.R., Guiochon G., Visualising the Onset of Viscous Fingering in Chromatography Columns, *Journal of Chromatography A*, **1117**, p. 137 (2006).

[6] Shalliker R.A., Catchpoole H.J., Dennis G.R., Guiochon G., Visualizing Viscous Fingering in Chromatography Columns: High Viscosity Solute Plug, *Journal of Chromatography A*., **1142**, p. 48 (2007).

[7] Zhang J.H., Liu Z.H., Study of the Relationship between Fractal Dimension and Viscosity Ratio for Viscous Fingering with a Modified DLA Model, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **21**, p. 123 (1998).

[8] Løvoll G., Meheust Y., Maløy K.J., Aker E., Schmittbuh J., Competition of Gravity, Capillary and Viscous Forces During Drainage in a Two-Dimensional Porous Medium, a Pore Scale Study, *Energy*,.**30**, p. 861 (2005).

[9] Hatiboglu C.U., "Miscible and Immiscible Transfer of Liquid-Liquid and Gas-Liquid Pairs Between Matrix and Fracture Under Static Conditions", Ph.D. Dissertation, University of Alberta, Alberta (2007).

[10] Peters E.J., Cavalero S.R., The Fractal Nature of Viscous Fingering in Porous Media, *SPE 20491*, (1990).

[11] Lomize G., "Seepage in Fissured Rocks", State Press.Moscow-Leningrad (1951).

Archive of SID
www.SID.ir

[12] McKellar M., A Method of Making Two-Dimensional Glass Micromodels of Pore Systems, *J. Can. Pet. Technol*., **21**, p. 39 (1982).

[13] Sohrabi M.H.G., Visualization of Oil Recovery by Water Alternating Gas (Wag) Injection Using High Pressure Micromodels: Oil-Wet & Mixed-Wet Systems, *Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans-Louisiana.*SPE 71494*. 30 Sept.-3 October (2001).

[14] Dehghan A.A., Kharrat R., Ghazanfari, M.H., Studying the Effects of Pore Geometry, Wettability and Co-Solvent Types on the Efficiency of Solvent Flooding to Heavy Oil in Five-Spot Models. *Asia Pacific Oil and Gas Conference*. Indonesia. *SPE 123315.4-6*, August (2009).

[15] Allah Karami M., Nasirahmadi E., Kharrat R., Ghazanfari M.H., Improvement of Heavy Oil Recovery in Hydrocarbon Solvent Flooding by Proposing Optimum Solvent: A Micromodel Study, *ICIPEG Conference.Kualalampur-Malasyia,* 15-17 June (2010).

[16] Perrine R., The Development of Stability Theory of Miscible Liquid-Liquid Displacement, *Soc. Pet. Eng. J.*, **1**(1), p. 17 (1961).

[17] Outmans H.D., Nonlinear Theory for Frontal Stability and Viscous Fingering in Porous Media, *Soc. Pet. Eng. J.*, **2**(2), p. 165 (1962).

[18] Gardner J.W., Ypma J.G.J., An investigation of Phase Behavior-Macroscopic Bypassing Interaction in CO_2 Flooding, *SPE EOR Symposium. SPE 10686* (1982).

[19] Taylor G., Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly through a Tube.Mathematical, Physical & Engineering Sciences, *Proceeding of Royal Society A*. p. 186 (1953).

Archive of SID

www.SID.ir