



## مطالعه‌ی آزمایشگاهی فرآیند همرفت در یک میکرومدل شکافدار

سپهر اسلامی<sup>۱</sup>، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

امیر صرافی<sup>۲</sup>، مهین شفیعی<sup>۳</sup>، علی محبی<sup>۴</sup>، پژوهشکده انرژی و مهندسی محیط زیست، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

وجود شبکه‌ی شکاف‌ها در مخازن شکافدار باعث شده تا پدیده‌های خاصی در این مخازن مشاهده شود که جریان همرفت و نفوذ از جمله‌ی آنهاست. در ستون نفتی قبل از تولید، اختلاف دمای پایین و بالای ستون باعث اختلاف چگالی نفت در این دو ناحیه می‌شود. پس از تولید و با کاهش فشار مخزن، به تدریج گاز از نفت بالای مخزن خارج می‌شود و گرادیان چگالی معکوس بیشتر می‌گردد. با تشدید ناپایداری، پدیده‌ی همرفت رخ داده، جای نفت بالا و پایین مخزن عوض می‌شود. پدیده‌ی همرفت تابع یک پارامتر بدون بعد به نام عدد ریلی است. هنگامی که عدد ریلی در سیستم به مقدار بحرانی خود برسد، پدیده‌ی همرفت آغاز می‌شود. در این مطالعه با ساخت یک میکرومدل و انجام آزمایش، عدد ریلی، سرعت همرفت و پهنای سلول‌های همرفتی با تغییر ضخامت شکاف، طول شکاف و نوع سیال بررسی و تحلیل شده و داده‌های آزمایشگاهی با روابط و فرمول‌های ارائه شده مقایسه گردیده و در نهایت شکل سلول‌های همرفتی از شروع جریان همرفت تا گسترش کامل سلول بررسی شده است. با افزایش ضخامت شکاف و طول شکاف، عدد ریلی، سرعت همرفت و پهنای سلول‌ها افزایش می‌یابد بطوریکه برای سرعت همرفت در مخازن باید ضریب  $\frac{1}{4}$  در رابطه‌ی داریسی ضرب شود.

واژه‌های کلیدی | پتروگرافی، محیط رسوبی، سازند فراقان، پرمن پیشین، پتروفاسیس، مدل رسوبی

مقدمه

دینامیک در مخازن می‌تواند وجود داشته باشد. پیش از تولید یعنی زمانی که مخزن در حالت استاتیک است، اختلاف دمای بالا و پایین ستون نفتی می‌تواند عامل به وجود آمدن جریان‌های همرفتی در مخزن شود. نفت بالای مخزن دمای کمتری نسبت به نفت پایین مخزن دارد و در اثر گرادیان معکوس دانسیته، جای نفت بالا و پایین مخزن در یک دوره‌ی طولانی عوض می‌شود. پس از حفر چاه در مخزن و افت فشار مخزن، خروج گاز از نفت بالای مخزن باعث سنگین‌تر شدن آن می‌شود و همراه با عامل دما به انجام فرآیند همرفت و سرعت بیشتر تشکیل سلول‌های همرفتی کمک می‌کند [۱،۳]. اولین تحقیقات در مورد همرفت به سال ۱۹۰۰ برمی‌گردد. بنارد اولین کسی بود که به بررسی چگالی و تغییرات پایداری و ناپایداری و بررسی سلول‌های جریان همرفتی پرداخت [۴]. در ادامه‌ی این تحقیقات، لرد ریلی در سال ۱۹۱۶ یک سری آزمایش‌ها انجام داد و نتایج را به صورت معادله‌ای ریاضی بیان نمود. این معادله همان عدد بدون بعد ریلی<sup>۵</sup> است که پایه‌ی اصلی ایجاد ناپایداری‌ها در چگالی مایعات بر آن نهاده شد. لپ وود در سال ۱۹۴۸ ایجاد سلول‌های همرفتی در درون یک

اکثر مخازن ایران از نوع شکافدار هستند. مخزن شکافدار<sup>۲</sup> به مخزنی اطلاق می‌شود که شامل شبکه‌ای از شکاف‌ها باشد. این شکاف‌ها خصوصیتی متفاوت نسبت به ماتریکس سنگ دارند و باعث وقوع پدیده‌های خاصی در مخازن می‌شوند که در مخازن معمولی با آنها مواجه نمی‌شویم. شکاف‌ها معمولاً دارای قابلیت گذردهی بالا و تخلخل کم هستند، در صورتی که ماتریکس سنگ گذردهی بسیار پایین‌تر و تخلخل بالاتری نسبت به شکاف دارد. درحالی‌که مخزن در شرایط استاتیک یا دینامیک قرار دارد رفتارهای خاصی از مخازن شکافدار سر می‌زند؛ در هنگام تولید از مخازن شکافدار بسته به شرایط شکاف‌ها و ماتریکس، نواحی مختلفی در طول دوره‌ی بهره‌برداری تشکیل می‌شود: ناحیه‌ی کلاهک گازی اولیه و ثانویه، ناحیه‌ی مورد هجوم گاز، ناحیه‌ی گاز زده، ناحیه‌ی زیراشباع و ناحیه‌ی آبی. مسائل مهم در مخازن شکافدار عبارتند از: پدیده‌ی آشام، ریزش ثقیلی، اثر متقابل بلوک‌ها، اثر بلوک تنها، پدیده‌ی دیفیوژن<sup>۳</sup> و همرفت<sup>۴</sup> [۱،۲]. مکانیسم همرفت هم در حالت استاتیک و هم در حالت

افت فشار پس از تولید به تسریع همرفت کمک می کند. فرآیند همرفت در مخازن شکافدار بسیار پیچیده است؛ مباحث تئوری پدیده‌ی همرفت موضوع تحقیقات بسیار در سال‌های اخیر بوده است. در این مباحث اغلب چندین احتمال بررسی می شود و عموماً نتایج آزمایشگاهی می توانند به یافتن مورد صحیح کمک نمایند.

### ۲-۱ عدد ریلی

عدد ریلی عددی است بدون بعد که به صورت زیر تعریف می شود [۱]:

$$Ra = \frac{\rho g k \beta \Delta T L}{\mu \alpha} \quad (1)$$

که در آن  $K$  برابر  $b^2/12$  و  $b$  ضخامت شکاف است.  $g$  شتاب ثقل،  $\beta$  ضریب انبساط گرمایی،  $\Delta T$  اختلاف دما،  $\mu$  گرانیوی،  $\alpha$  نفوذ گرمایی و  $L$  پارامتر مربوط به طول است.

هنگامی که عدد ریلی به مقدار بحرانی می رسد همرفت آغاز می شود. در شروع همرفت عرض سلول از رابطه‌ی زیر بدست می آید [۱]:

$$w = 2^{1/4} \sqrt{Lb} \quad (2)$$

پس از رشد سلول‌ها، برای محاسبه‌ی عرض سلول روابط زیر به ترتیب توسط سعیدی و سجادیان پیشنهاد شد [۱,۳]:

$$w = R_{ac}^{1/4} \sqrt{Lb} \quad (3)$$

$$w = R_{ac}^{1/6} \sqrt{Lb} \quad (4)$$

### ۳-۱ سرعت همرفت

موثر یا غیر موثر بودن فرآیند همرفت در مخازن به سرعت همرفت بستگی دارد. برای محاسبه‌ی سرعت سلول‌های همرفتی روابط زیر پیشنهاد شده است [۱]:

$$\bar{v} = \frac{k g \rho \beta \Delta T}{\mu} \quad (5)$$

$$\bar{v} = \frac{k g \rho \beta \Delta T}{4 \mu} \quad (6)$$

برای آب از رابطه‌ی ۵ و برای نفت از رابطه‌ی ۶ استفاده می شود.

### ۲- روش تحقیق

#### ۲-۱ وسایل و لوازم مورد نیاز برای انجام آزمایش

۱- دو شیشه معمولی به ابعاد  $48 \times 100$  سانتی متر و با

طول افقی از محیط متخلخل را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. پس از آن در سال‌های بعد نیز در مورد سلول‌های همرفتی و عدد ریلی در محیط‌های متخلخل و باز پژوهش‌هایی انجام داد [۱]. سعیدی و همکارانش در سال ۱۹۷۹ در انستیتو نفت فرانسه آزمایش‌هایی در زمینه‌ی بازیافت نفت بوسیله‌ی مکانیسم همرفت و دیفیوژن انجام دادند.

در سال ۲۰۰۵ سجادیان و همکاران یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در مورد پدیده‌ی همرفت در مخازن شکافدار انجام دادند. آنها زوج بودن سلول‌های همرفتی را تایید کردند. همچنین فرمول جدیدی برای پهنای سلول‌های همرفتی<sup>۶</sup> بدست آوردند. مطالعات آنها نشان داد که ضخامت شکاف (تراوایی شکاف) نقش اصلی را در فرآیند همرفت ایفا می کند [۳]. بابادانگلی و ترایدی (۲۰۰۸) انتقال جرم میان ماتریکس و شکاف را با تحقیقات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی (با استفاده از معادلات جابجایی - همرفت) بررسی کردند و ضریب نفوذ موثر برای سیستم را تعیین کردند [۵]. بابادانگلی و هاتینگلو در سال ۲۰۱۰ یک کار آزمایشگاهی در زمینه‌ی انتقال جرم بین ماتریکس و شکاف در شرایط استاتیک تحت نیروی نفوذ و همرفت طبیعی انجام دادند. آنها یک سری آزمایش‌های مغزه را برای مقایسه‌ی بازیافت نفت در حالات جریان هم‌جهت و غیر هم‌جهت تحت فرآیند انتقال جرم انجام دادند [۶].

از آنجایی که شناخت علمی و اصولی مکانیسم‌های تولید موثر در مخازن شکافدار هنوز در نیمه‌ی راه است و چالش‌های بسیاری در فرآیندهای مرتبط با مخازن شکافدار مطرح است، مطالعه‌ی پدیده‌ی همرفت در این مخازن می تواند اهمیت زیادی برای مهندسی مخزن داشته باشد. عدد ریلی، سرعت همرفت و پهنای سلول‌های همرفتی از جمله مسائل مهم در شناخت پدیده‌ی همرفت به‌شمار می رود که در این مطالعه بررسی شده‌اند.

### ۱- تئوری

#### ۱-۱ فرآیند همرفت

فرآیند همرفت یکی از روش‌های انتقال گرماست. این پدیده در طبیعت بسیار اتفاق می افتد. در بعضی از مخازن نفتی پدیده‌ی همرفت باعث جابجایی نفت بالا و پایین مخزن می شود. خواص بسیار یکنواخت سیال در طول ستون نفتی در چندین مخزن شکافدار ایرانی و عراقی دلیلی بر وجود جریان‌های همرفتی در این مخازن است. اصلی ترین نیروی حاکم بر فرآیند همرفت در مخازن، وجود گرادیان معکوس دانسیته است که خود از گرادیان دمای سازند نشات می گیرد. خروج گاز از نفت بالای مخزن در اثر



اضافه می‌کنیم. ۷۲ ساعت اجازه می‌دهیم تا چسب کاملاً خشک شود. اکنون سیستم شکاف آماده شده است. یک محفظه‌ی چوبی بصورت ریلی برای نگهداری شیشه طوری ساخته می‌شود که قسمت پایین آن سوراخی برای عبور لوله‌ی مسی آب داشته باشد. هنگامی که شیشه‌ها درون محفظه‌ی چوبی قرار می‌گیرند، لوله‌ی مسی عبور آب باید به سطح پایینی شیشه کاملاً چسبیده باشد. برای این کار ابتدا لوله‌ی مسی را از محفظه‌ی چوبی عبور داده و سپس شیشه‌ها را از بالای محفظه وارد می‌کنیم. لوله‌ی مسی از دو طرف محفظه ۱۰ سانتی متر بیرون بوده تا دو سر شیلنگ ورودی و خروجی حمام آب به آن وصل شود (شکل ۱). حمام آب را در محل مناسب قرار داده و شیلنگ‌ها را به آن وصل می‌کنیم. ورودی و خروجی آن را به دو سر لوله‌ی مسی متصل می‌کنیم. با بسط فلزی لوله‌ی مسی و شیلنگ را به خوبی به هم چسبانده و از نشستی احتمالی جلوگیری می‌کنیم. جهت اطمینان از اتصال درست شیلنگ‌ها، حمام آب را تا نشانه‌ی مخصوص با آب پر و دستگاه را روشن می‌کنیم. آب از حمام وارد شیلنگ ورودی شده و از لوله‌ی مسی که به دیواره‌ی پایین شیشه چسبیده گذشته، سپس از شیلنگ خروجی دوباره به حمام آب بر می‌گردد. عدد حس گر دمایی را از قسمت بالای شیشه‌ها و از فضای خالی بین آنها وارد می‌کنیم. حس گرها را تا جایی پایین می‌بریم که سطح آب درون شیشه (طول شکاف) بالا آمده باشد. فیش حس گرها را به دستگاه مولتی متر که مقاومت، شدت جریان و دما را اندازه می‌گیرد وصل می‌کنیم. حال سطح شیشه را با ماژیک مدرج می‌کنیم تا بتوانیم اندازه‌ی سلول‌های تشکیل شده را بینیم. دورین دیجیتالی را در فاصله و زاویه‌ی مناسب قرار می‌دهیم. اکنون میکرومدل آماده‌ی انجام آزمایش است.

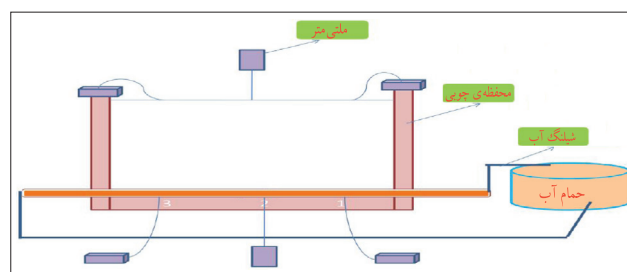
### ۲-۳ مراحل انجام آزمایش

حمام آب را تا نشانه‌ی موجود در دستگاه پر از آب کرده،

ضخامت هفت میلی‌متر ۲- سیم نازک مسی به قطر یک میلی‌متر ۳- لوله‌ی مسی آب به قطر ده میلی‌متر ۴- حمام آب دیجیتالی ۵- حس گرهای دمایی ۶- مولتی متر ۷- رنگ روغنی با خواص مشخص ۸- پرمنگنات پتاسیم ۹- نفت سفید ۱۰- محفظه‌ی چوبی ۱۱- دورین دیجیتالی ۱۲- خط کش ۱۳- شیلنگ نرم به قطر ده میلی‌متر ۱۴- بسط لوله ۱۵- مایع شستشوی شیشه ۱۶- سرنگ در سایزهای مختلف ۱۷- چسب قطره‌ای ۱۸- چسب آکواریوم ۱۹- زمان سنج دیجیتالی

### ۲-۲ ساخت میکرومدل

میکرومدل از دو قسمت تشکیل شده؛ یک قسمت سیستم شکاف است که در آن همرفت رخ می‌دهد و قسمت دیگر وسایل و تجهیزاتی مانند حمام آب و محفظه‌ی چوبی است که سیستم شکاف را در خود جای می‌دهد. برای ساخت سیستم شکاف ابتدا یکی از شیشه‌ها را روی یک سطح می‌خوابانیم. سیم نازک مسی به قطر یک میلی‌متر را به فاصله‌ی یک میلی‌متر از سمت راست و چپ شیشه با چسب قطره‌ای به مرور زمان چسبانده و با دمیدن هوا به خشک کردن آن کمک می‌کنیم. یک سیم مسی به طول ۹۸ سانتی‌متر را به ۲ قسمت ۲۰ سانتی‌متری و یک قسمت ۵۷ سانتی‌متری تقسیم می‌کنیم. هر سه قسمت را با چسب قطره‌ای به پایین شیشه و به فاصله‌ی ۲ سانتی‌متر از لبه طوری می‌چسبانیم که فاصله‌ی آنها از هم یک میلی‌متر باشد. حال ۲ حس گر دمایی را در این فاصله طوری با چسب قطره‌ای می‌چسبانیم که نوک حس گر بتواند دمای پایین میکرومدل را اندازه‌گیری کند. اجازه می‌دهیم ۲۴ ساعت بگذرد تا حس گر و سیم مسی کاملاً به شیشه بچسبند. اکنون شیشه‌ی دوم را روی شیشه‌ی اول که سیم مسی و حس گر روی آن چسبانده شده قرار می‌دهیم و فاصله‌ی سیم مسی از لبه‌ی شیشه را در سه طرف چپ، راست و پایین با چسب آکواریوم کاملاً پر می‌کنیم. یک لایه چسب روی لبه‌ها جهت اطمینان از عدم نشستی



روغنی چند سی سی رنگ روغنی را با مقداری مشخص نفت سفید مخلوط کرده و هم می‌زنیم تا کاملاً حل شود. مقدار رنگ استفاده شده بسته به ارتفاع شکاف (سطح نفت درون شیشه) متغیر است. حس‌گرهایی که از بالا وارد میکرومدل کرده‌ایم را در سطح آب (نفت) قرار می‌دهیم. مولتی‌مترها و حمام آب را روشن کرده و شروع به ثبت داده‌ها می‌کنیم. داده‌های ثبت شده در هر آزمایش شامل دما در نقاط بالا و پایین میکرومدل، دمای حمام آب و

سپس با سرنگ و تا ارتفاع مورد نظر فضای بین دو شیشه را از آب پر می‌نماییم. مقداری پودر پرمنگنات از فضای بین دو شیشه وارد میکرومدل می‌کنیم (شکل ۱) و اجازه می‌دهیم تا پودر پرمنگنات کاملاً ته‌نشین شود. پودر پرمنگنات برای دیدن سلول‌های تشکیل شده و تهیه‌ی تصویر از آنها به کار می‌رود. برای آزمایش‌هایی که با نفت سفید انجام می‌شود، محلول رنگ روغنی را با سرنگ به فضای بین دو شیشه تزریق می‌کنیم. برای تهیه‌ی محلول رنگ



شکل ۱ | سلول‌های تشکیل شده در آزمایش با آب



شکل ۲ | سلول پس از رشد کامل

جدول ۱ | یک نمونه از داده‌های ثبت شده در حین آزمایش

توضیحات	زمان min	عرض سلول cm	ارتفاع آب cm	دمای حمام آب	دمای بالای میکرومدل (°C)		دمای پایین میکرومدل (°C)	
					۲	۱	۲	۱
روشن کردن حمام آب	-	۲۵	۰	۴۰	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
	-	۲۵	۵	۴۵	۲۴	۲۴	۲۶	۲۷
	-	۲۵	۸	۴۸	۲۴	۲۴	۲۷	۲۸
	-	۲۵	۱۲	۵۳	۲۴	۲۴	۲۷	۲۸/۵
تشکیل اولین سلول	۳/۴	۲۵	۱۴	۵۵	۲۴	۲۴	۲۸	۲۹
	-	۲۵	۱۷	۵۷	۲۴	۲۴	۲۸/۵	۲۹/۵
	-	۲۵	۲۰	۶۰	۲۴	۲۴	۲۹	۳۰
رسیدن اولین سلول به بالای مدل	۱۵/۵	۲۵	۲۲	۶۲	۲۴	۲۵	۲۹/۵	۳۰
	-	۲۵	۲۵	۶۳/۵	۲۵	۲۶	۳۰	۲۹
سیکل کامل	-	۲۵/۱	۲۷	۶۵	۲۵	۲۶/۵	۳۰/۵	۲۸/۵
	-	۲۵/۱	۳۰	۶۷	۲۶	۲۶/۵	۲۹/۵	۲۷
	-	۲۵/۱	۳۴	۶۹	۲۵/۵	۲۶	۲۸	۲۷

جدول ۲ | نتایج بدست آمده برای عرض سلول‌های همرفتی

شماره آزمایش	ضخامت شکاف mm	طول شکاف cm	پهنای سلول در شروع همرفت cm		درصد خطای فرمول	پهنای سلول پس از همرفت cm		
			آزمایشگاهی	رابطه ۲		آزمایشگاهی	رابطه ۳	رابطه ۴
۱	۱/۲	۲۸	۲/۳	۲/۱۸	۵/۲	۱۰/۵	۹/۹۸	۵/۶۷
۲	۱/۲	۲۲/۵	۱/۹	۲/۰۳	۶/۸	۱۴/۳	۱۵/۱۸	۷/۲۴
۳	۱/۳	۲۵	۲/۴	۳/۸۶	۱۳/۵	۱۵/۵	۱۷/۲۸	۸/۱۴
۴	۱/۲	۲۸	۲/۲	۲/۱۸	۰/۹	۱۰	۱۰/۲۲	۵/۷۶
۵	۱/۳	۳۲	۲/۳	۲/۴۳	۵/۶	۱۲	۱۱/۹۵	۶/۶۳
۶	۱/۴	۳۶	۲/۵	۲/۶۷	۶/۸	۱۴	۱۳/۷	۷/۵
۷	۱/۲	۲۱	۲	۱/۸۹	۵/۵	۱۱	۱۳/۱۵	۶/۴۹
۸	۱/۳	۲۶	۱/۹	۲/۱۹	۱۵/۲	۱۶/۵	۱۸/۴۲	۸/۵۴

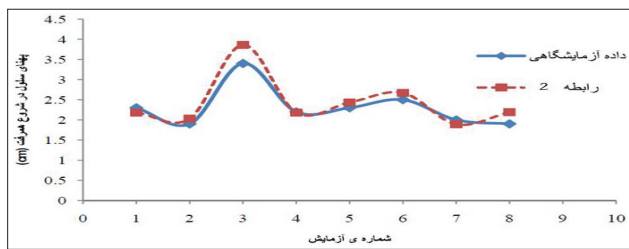


شد، سیال از پایین شکاف شروع به حرکت به سمت بالا می‌کند. طرز حرکت سیال به سمت بالا به صورت سلول‌هایی زوجی است که به آنها سلول‌های همرفتی می‌گویند. شکل‌های ۲ و ۳ سلول‌های تشکیل شده را نشان می‌دهند. شکل‌های نامنظم به خاطر شرایط فیزیکی متفاوت در نقاط مختلف میکرومدل است. در شکل ۴ یک سلول رشد یافته نمایش داده شده است که در این حالت سلول به حداکثر پهنای خود می‌رسد.

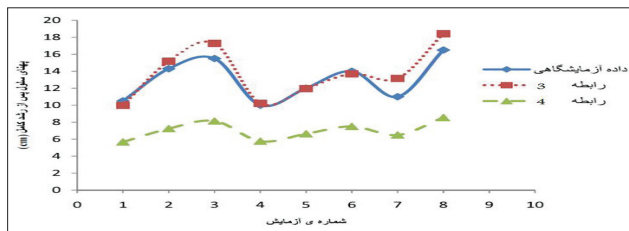
### ۲-۳ پهنای سلول‌های همرفتی

نتایج بدست آمده برای عرض سلول‌های همرفتی در جدول ۲ آمده است.

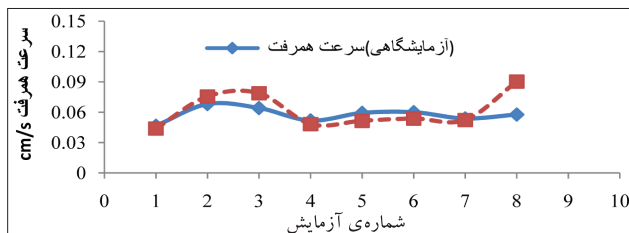
۱- با توجه به جدول ۲ با افزایش ضخامت شکاف، پهنای سلول‌های همرفتی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول شکاف نیز پهنای سلول‌های تشکیل شده بیشتر می‌شود. شکل ۵ پهنای سلول را بر حسب حاصلضرب طول در ضخامت شکاف نشان می‌دهد.



شکل ۶ | مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی برای عرض سلول‌ها در شروع همرفت با رابطه‌ی ۲



شکل ۷ | مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی با روابط ارائه شده برای پهنای سلول‌ها پس از رشد سلول



شکل ۸ | مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی سرعت همرفت با فرمول ارائه شده

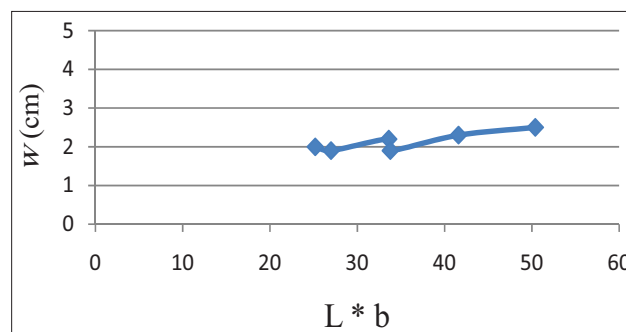
لوله‌ی مسی، زمان رسیدن سلول‌ها به بالای مدل، تغییر ارتفاع آب یا نفت و عرض سلول‌ها در زمان‌های مختلف است. پس از انجام هر آزمایش، سطح داخلی شیشه‌ها را کاملاً شسته و تمیز می‌کنیم تا برای انجام آزمایش بعدی آماده شود. آزمایش‌ها را با تغییر ضخامت شکاف، طول شکاف و نوع سیال چندین بار تکرار می‌کنیم.

### ۳- ارائه و تحلیل نتایج

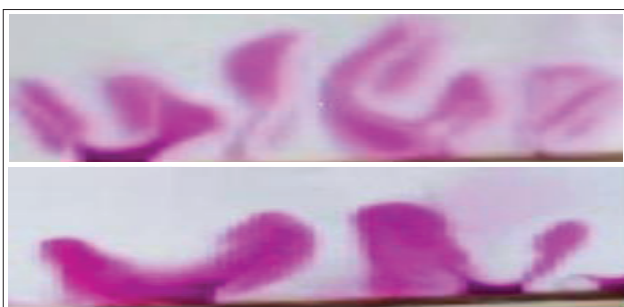
#### ۳-۱ نمونه داده‌های آزمایشگاهی

در جدول ۱، یک نمونه از ثبت داده‌های آزمایش آورده شده است: ضخامت شکاف: ۱/۳ میلی‌متر  
طول شکاف: ۲۵ سانتی‌متر  
دمای محیط: ۲۴ درجه‌ی سانتیگراد  
مایع مورد استفاده: نفت سفید  
هنگامی که شرایط لازم برای شروع پدیده‌ی همرفت ایجاد

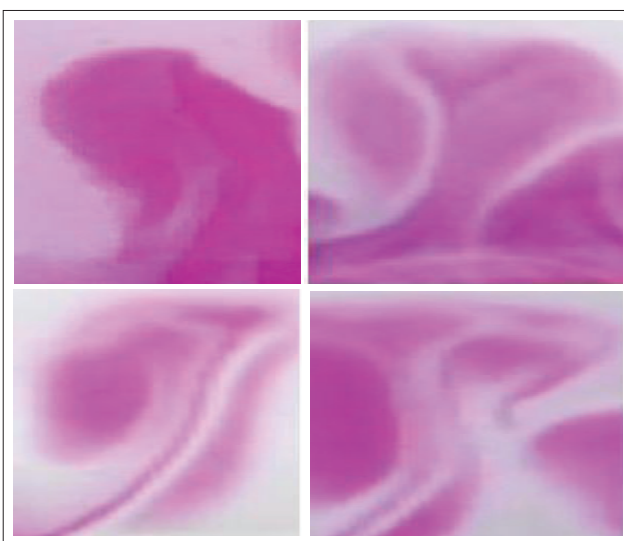
شماره‌ی آزمایش	سیال مورد استفاده	ضخامت شکاف (mm)	سرعت همرفت در یک سیکل کامل (آزمایشگاهی) (cm/s)	سرعت همرفت با استفاده از روابط ۵ و ۶ (cm/s)
۱	آب	۱/۲	۰/۰۴۶۶	۰/۰۴۳۹
۲	نفت سفید	۱/۲	۰/۰۶۸۱	۰/۰۷۵۶
۳	نفت سفید	۱/۳	۰/۰۶۴۱	۰/۰۷۸۸
۴	آب	۱/۲	۰/۰۵۱۸	۰/۰۴۸۳
۵	آب	۱/۳	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۱۵
۶	آب	۱/۴	۰/۰۰۶	۰/۰۵۳۸
۷	نفت سفید	۱/۲	۰/۰۵۳۸	۰/۰۵۲۳
۸	نفت سفید	۱/۳	۰/۰۵۷۷	۰/۰۹۰۳



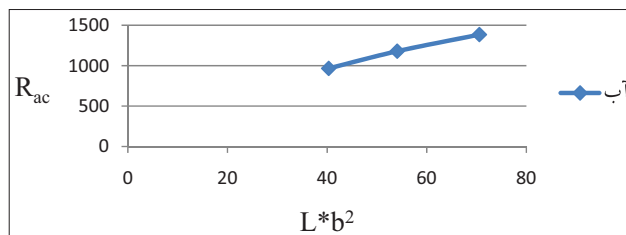
شکل ۵ | تغییرات پهنای سلول با افزایش طول و ضخامت شکاف



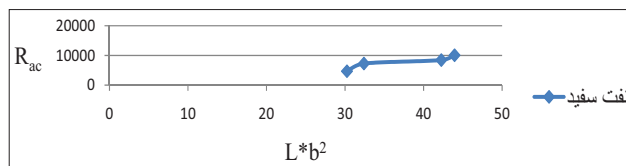
شکل ۱۱ | زوجی بودن سلول‌ها



شکل ۱۲ | سلول‌های عمما مانند



شکل ۹ | تغییرات عدد ریلی با افزایش طول و ضخامت شکاف



شکل ۱۰ | تغییرات عدد ریلی با افزایش طول و ضخامت شکاف

جدول ۴ | مقادیر بدست آمده برای عدد ریلی بحرانی

شماره ی آزمایش	سیال مورد استفاده	طول شکاف (cm)	اختلاف دما	عدد ریلی
۱	۱/۲	۲۸	۵	۸۷۸۸
۲	۱/۲	۲۲/۵	۵/۵	۷۲۹۳
۳	۱/۲	۲۵	۵	۸۴۵۱
۴	۱/۲	۲۸	۵/۵	۹۶۶/۷
۵	۱/۳	۳۲	۵	۱۱۷۸/۷
۶	۱/۴	۳۶	۴/۵	۱۳۸۴
۷	۱/۲	۲۱	۴	۴۷۰۹/۷
۸	۱/۳	۲۶	۶	۱۰۰۷۰

میانگین خطایی حدود ۴۵/۶ درصد اعتبار چندانی ندارد (شکل ۷).

### ۳-۳ سرعت فرآیند همرفت

داده های سرعت همرفت برای آزمایش های انجام شده، در جدول ۳ آمده است.

با توجه به جدول ۳ با افزایش ضخامت شکاف، سرعت همرفت افزایش می یابد.

هنگامی که سیال مورد آزمایش آب باشد از رابطه ی داری استفاده می شود که نتایج آن نسبتاً قابل قبول است. برای نفت سفید طبق تحقیقات سعیدی، رابطه ی داری باید در ۱/۴ ضرب شود که نتایج آزمایش ها این مطلب را تایید می کند (شکل ۸). بنابراین برای محاسبه ی سرعت همرفت در شبکه ی شکاف ها در یک مخزن واقعی، باید از رابطه ی ۶ استفاده کرد. در صورت استفاده از رابطه ی داری با درصد خطای بسیار بزرگی مواجه می شویم.

۲- در مخازن شکافدار چون شکاف ها به هم مرتبط هستند، طول شکاف به اندازه ی ارتفاع ستون نفتی است. هرچه ارتفاع شکاف (ارتفاع ستون نفتی) بیشتر باشد، اختلاف دمای بالا و پایین ستون نفتی بیشتر شده و این به وقوع فرآیند همرفت کمک می کند.

۳- فرمول ارائه شده برای پهنای سلول ها در شروع همرفت نشان می دهد که پهنای سلول با جذر حاصلضرب طول شکاف در ضخامت شکاف متناسب است. این مورد طی انجام آزمایش ها ثابت شد. میانگین خطای این فرمول ۷/۴۳ درصد است. شکل ۶ مقایسه ی داده های آزمایشگاهی را با فرمول ارائه شده نشان می دهد.

۴- نتایج نشان می دهد که رابطه ی بدست آمده توسط سعیدی برای عرض سلول های رشد یافته میانگین خطایی حدود ۷/۶ درصد دارد در حالی که رابطه ی ارائه شده توسط سجادیان و همکاران با





### ۳-۴ عدد ریلی

جدول ۴ مقدار عدد ریلی را برای آزمایش‌ها نشان می‌دهد. لحظه‌ی شروع فرآیند همرفت زمانی است که عدد ریلی به عدد ریلی بحرانی برسد.

با افزایش ضخامت و طول شکاف عدد ریلی افزایش می‌یابد (شکل ۹ و ۱۰).

عرض شکاف در تمام آزمایش‌ها ۹۸ سانتی‌متر بوده و با افزایش طول شکاف نسبت به عرض شکاف طی آزمایش‌ها مقدار عدد ریلی سریعاً افزایش می‌یابد.

میانگین اختلاف دمای لازم برای شروع همرفت حدود ۵ درجه است.

### ۳-۵ شکل سلول‌های همرفتی

۱- سلول‌های همرفتی تشکیل شده به صورت زوجی هستند (شکل ۱۱) و این تاییدی بر تحقیقات گذشته است.

۲- با گذشت زمان، عرض سلول‌ها افزایش می‌یابد و زمانی که ارتفاع آنها از نصف طول شکاف بیشتر شود، در حین حرکت به سمت بالا، حالت عصا ماندی پیدا می‌کنند و قسمتی از سلول به سمت پایین حرکت می‌کند (شکل ۱۲).

۳- شرایط فیزیکی متفاوت باعث تشکیل سلول‌هایی با شکل‌های متفاوت و عرض مختلف می‌شود که یکنواخت و یکسان نبودن سطح تماس لوله‌ی مسی و شیشه از جمله‌ی آنهاست. همچنین اختلاف دمای سیم مسی در ابتدا و انتهای عرض شیشه که مقداری حدود یک درجه‌ی

سانتیگراد است، باعث تاخیر زمانی در تشکیل سلول‌ها می‌شود.

### نتیجه‌گیری

۱- ضخامت شکاف (تراوایی شکاف) اساسی‌ترین نقش را در فرآیند همرفت داراست. پهنای سلول‌های همرفتی، سرعت همرفت و عدد ریلی با افزایش ضخامت شکاف، افزایش می‌یابند. در محیط متخلخل چون تراوایی پایین است، لذا احتمال وقوع فرآیند همرفت بسیار کم است به طوری که تاکنون در مخازن معمولی پدیده‌ی همرفت مشاهده نشده است. ولی در مخازن شکافدار به خاطر تراوایی بالای شکاف‌ها احتمال وقوع همرفت بسیار زیاد است.

۲- با افزایش طول شکاف، پهنای سلول‌های تشکیل شده افزایش می‌یابد.

۳- فرمول ۳ برای محاسبه‌ی پهنای سلول‌های همرفتی پس از رشد کامل سلول، مناسب است ولی فرمول ۴ خطای زیادی ایجاد می‌کند.

۴- موثر یا غیرموثر بودن همرفت در مخازن شکافدار به سرعت همرفت بستگی دارد. برای محاسبه‌ی سرعت همرفت در این مخازن باید از رابطه‌ی ۶ استفاده شود که  $\frac{1}{4}$  رابطه‌ی داری است.

۵- شکل سلول‌های همرفتی به شدت تابع شرایط فیزیکی است. اکثر سلول‌ها قبل از رشد کامل و رسیدن به بالای میکرومدل، حالت عصا مانند پیدا می‌کنند و در حین حرکت به سمت بالا، قسمتی از سلول به سمت پایین حرکت می‌کند و حالت چرخشی دارد.

### پی‌نوشت‌ها

<sup>1</sup> Sepehr\_Eslami2000@yahoo.com

<sup>2</sup> Fractured reservoir

<sup>3</sup> Diffusion

<sup>4</sup> Convection

<sup>5</sup> Rayleigh Number

<sup>6</sup> Width of Convective Cells

### منابع

- [۱] Saidi, A. M., "Reservoir Engineering of Fractured Reservoirs (fundamentals and practical aspects)", published by TOTAL Edition press, ۱۹۸۷.
- [۲] Van Golf-Racht T.D., "Fundamentals of Fractured Reservoirs Engineering", Elsevier Scientific Publishing Company, ۱۹۸۲.
- [۳] سجادیان ولی احمد، قنبرپور امید، بهزاد اسیری همایون، "مطالعه‌ی فرآیند همرفت در مخازن شکافدار"، اولین کنگره مهندسی نفت ایران، ۱۳۸۵
- [۴] Bejan A., "Convection Heat Transfer", Third Edition, Publish by John Wily & sons, ۲۰۰۴
- [۵] Trivedi, J., Babadagli, T., ۲۰۰۹. "Experimental and numerical modeling of the mass transfer between rock matrix and fracture". Chem. Eng. Jour. ۲۰۴-۱۹۴, ۱۴۶.
- [۶] Hatiboglu, C.U., Babadagli, T. ۲۰۱۰. "Experimental and visual analysis of diffusive mass transfer between matrix and fracture under static conditions", Pet. Eng. Jour. ۱۰-۰, ۱۸۹۴