

# شبیه‌سازی عددی اختلاط همرفتی ضمن ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در مخازن آب شور

پژوهش نفت

سال بیست و چهارم

شماره ۷۹

صفحه، ۱۳۴-۱۲۰ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۹/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۲/۳۰

محسن پاسدار، بهزاد رستمی\* و رسول نظری مقدم

انستیتو مهندسی نفت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

نتایج این مقاله شناخت و آگاهی لازم برای اجرای پروژه‌های ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در مخازن آب شور عمیق را بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های هزینه‌بر، افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز مقیاسی، اختلاط همرفتی، ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن، زمان انحراف اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی، شبیه‌سازی عددی

## مقدمه

به دلیل کاربرد روزافزون سوخت‌های فسیلی، غلظت گاز دی‌اکسید کربن در جو از زمان انقلاب صنعتی تا به امروز از ۲۸۰ ppmv به ۳۸۰ ppmv افزایش پیدا کرده است [۱]. افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو، موجب افزایش اثر گلخانه‌ای شده و کره زمین را گرم می‌کند. برای جلوگیری از تغییرات شدید آب و هوایی لازم است مقادیر گازهای گلخانه‌ای تولید شده طی قرن ۲۱ کاهش یابد. یکی از راه‌های کاهش غلظت اتمسفری دی‌اکسید کربن، ذخیره‌سازی زیرزمینی است. ذخیره‌سازی زیرزمینی، فرآیند تزریق گاز دی‌اکسید کربن در سازندهای زیرزمینی، بدون شک یکی از مهم‌ترین روش‌های پیش رو برای پرهیز از انتشار گاز دی‌اکسید کربن در جو می‌باشد.

## چکیده

ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در مخازن آب شور به عنوان روشی مؤثر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای شناخته شده است. پیش‌بینی رفتار دراز مدت دی‌اکسید کربن تزریقی نیازمند شناخت مکانیسم‌های حاضر در فرآیند می‌باشد. دی‌اکسید کربن تزریقی با نفوذ در آب شور، باعث افزایش چگالی آب شور و وقوع پدیده اختلاط همرفتی می‌شود. در نتیجه نرخ انحلال افزایش می‌یابد. بنابراین شناخت فاکتورهای مؤثر بر اختلاط همرفتی در مخازن آب شور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله یک مدل دوبعدی و تک‌فاز برای مدل‌سازی اختلاط همرفتی ارائه می‌گردد. آنالیز مقیاسی اختلاط همرفتی در مخازن آب شور بیان شده و پارامترهای همرفتی به صورت تابعی از عدد رایلی سیستم بیان می‌گردد. برای اولین بار در این مطالعه زمان افزایش انحلال ناشی از اختلاط همرفتی به عنوان یک پارامتر مهم در ارزیابی سایت‌های مناسب ذخیره‌سازی بر حسب عدد رایلی به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته است؛ نتایج نشان می‌دهد که افزایش انحلال ناشی از اختلاط همرفتی در زمانی حدود سه برابر زمان ناپایداری‌ها شکل می‌گیرد.

که خود منجر به افزایش انحلال<sup>۱</sup> در مدت زمان کمتری نسبت به پدیده نفوذ مولکولی خالص<sup>۹</sup> می‌شود [۱۰ - ۱۳]. وقوع پدیده اختلاط<sup>۱۰</sup> همرفتی می‌تواند به مقدار قابل توجهی سبب افزایش پتانسیل مخزن آب شور برای ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن طی مکانیسم به دام افتادگی ناشی از انحلال‌پذیری شود. مقیاس زمانی شروع چنین پدیده‌ای و انحلال کامل دی‌اکسیدکربن در آب سازندی بسیار مهم می‌باشد، چرا که طی این دوره زمانی، دی‌اکسیدکربن در حالت فاز گازی بوده و همواره احتمال نشت آن از طریق چاه‌های متروکه، گسل‌های موجود و یا سنگ‌پوش نیمه‌تراوا به اتمسفر وجود دارد. بنابراین، توسعه ابزار مهندسی مناسب برای تشخیص سایت‌های مناسب ذخیره‌سازی قبل از انجام تزریق در مقیاس میدانی امری ضروری می‌باشد.

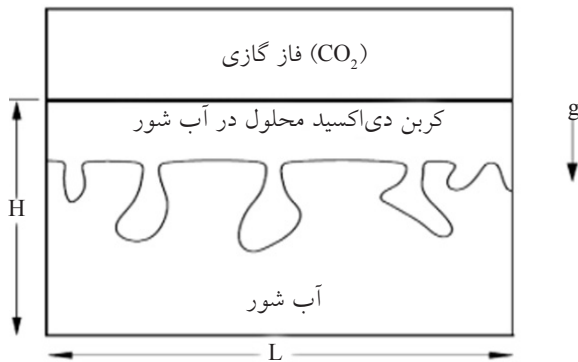
لیندبرگ و وسلبرگ از پیشگامان ایده تزریق دی‌اکسیدکربن درون آب شور سازندی و شکل‌گیری همرفتی عمودی نفوذ دی‌اکسیدکربن در درازمدت می‌باشند [۱۰]. آنها داده‌های مخازن دریای شمال را برای محاسبه همرفتی، مورد آنالیز قرار دادند. انیس - کینگ و پترسون از شبیه‌ساز TOUGH2 برای محاسبه‌ی دبی انحلال دی‌اکسیدکربن ناشی از اختلاط همرفتی استفاده نمودند [۱۱]. آنها بیان کردند که نفوذ دی‌اکسیدکربن به درون آب شور سبب می‌شود که آب شور اشباع از دی‌اکسیدکربن، از آب شور زیرین چگال‌تر شده و منجر به اختلاط همرفتی گردد. ایشان همچنین دریافتند که اختلاط همرفتی می‌تواند به مقدار قابل توجهی انحلال درون آب شور را افزایش دهد. حسن‌زاده و همکاران مدل‌سازی عددی اختلاط همرفتی را برای ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در مخازن آب شور انجام دادند [۱۳]. آنها اهمیت اختلاط همرفتی در ذخیره‌سازی و مقیاس زمانی آن را مورد بررسی قرار

حداقل سه گزینه مناسب برای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز دی‌اکسیدکربن وجود دارد: میدان‌های نفتی و گازی تخلیه شده، بسترهای عمیق زغال‌سنگ و سفره‌های زیرزمینی عمیق آب شور [۲]. سفره‌های زیرزمینی آب شور یا همان مخازن آب شور<sup>۱</sup> به دلیل ظرفیت بالا و گستردگی در بیش تر نقاط کره زمین مناسب‌ترین گزینه می‌باشند. در این روش چندین مکانیسم به ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در مخازن آب شور کمک می‌کند. مقداری از دی‌اکسیدکربن تزریقی در آب سازندی حل می‌شود (به‌دام‌افتادگی ناشی از انحلال‌پذیری<sup>۲</sup>) [۳]، مقداری در اثر اشباع گاز کاهش نیافتنی<sup>۳</sup> به دام می‌افتد (به‌دام‌افتادگی ناشی از اشباع گاز کاهش نیافتنی) [۴] و مقداری دیگر با مواد معدنی سنگ سازند<sup>۴</sup> واکنش داده، سبب تشکیل رسوب کربنات می‌شود (به‌دام‌افتادگی ناشی از واکنش با سنگ سازند) [۵ و ۶]. در این مطالعه مکانیسم به‌دام‌افتادگی ناشی از انحلال‌پذیری در مخازن آب شور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

چگالی گاز دی‌اکسیدکربن تزریقی در مخازن آب شور، که در شرایط مخزن در حالت فوق بحرانی می‌باشد، به طور معمول حدود ۶۰-۴۰٪ از چگالی آب شور سازندی کمتر می‌باشد. پس از تزریق گاز دی‌اکسیدکربن در مخازن آب شور، مقداری از آن ضمن مهاجرت روبه‌بالا به دلیل نیروهای بویانسی، در آب سازندی حل می‌شود. به دلیل روراندگی<sup>۵</sup> چگالی بالا و ضریب تحرک بد (حداقل در مخازن ضخیم)، جابه‌جایی دی‌اکسیدکربن - آب مطلوب نبوده و بیش تر گاز تزریقی به سمت بالای مخزن مهاجرت کرده و سرانجام زیر قسمت محصورکننده سنگ‌پوش<sup>۶</sup> پخش می‌شود [۹]. بخشی از دی‌اکسیدکربن تزریقی که ضمن مهاجرت رو به بالا در آب سازندی حل می‌شود، معمولاً کم‌تر از ۱۰٪ می‌باشد. طی یک بازه زمانی نسبتاً طولانی، گاز تزریقی که اکنون لایه نازکی را در زیر سنگ‌پوش تشکیل داده، به تدریج در آب شور سازندی زیرین حل می‌شود و به سمت پایین نفوذ می‌کند. چون آب سازندی اشباع شده به مقدار کمی از آب سازندی عاری از دی‌اکسیدکربن چگال‌تر می‌باشد، قرار گرفتن لایه‌ای با چگالی بیشتر در بالای آب سازندی عاری از دی‌اکسیدکربن، می‌تواند سبب بروز پدیده همرفتی<sup>۷</sup> گردد

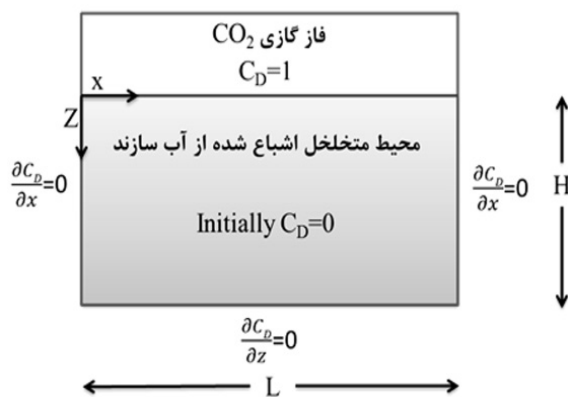
1. Deep Saline Aquifers
2. Solubility Trapping
3. Residual Phase Trapping
4. Mineral Trapping
5. Override
6. Cap Rock
7. Convection
8. Dissolution
9. Pure Diffusion
10. Mixing

می‌باشد، و آب شور تقریباً مسطح باقی می‌ماند و تحت تأثیر انگشتی‌های ایجاد شده در آب شور قرار نمی‌گیرد [۱۷]. این موضوع به خوبی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱- ایجاد جریان همرفتی در آب شور به دلیل ناپایداری‌های گرانشی [۱۸]

لیدنبرگ و برجمو و انیس کینگ و پترسون نشان دادند که می‌توان در سطح تماس بین دی‌اکسیدکربن و آب شور، تعادل ترمودینامیکی محلی را فرض کرد. بنابراین فرض می‌شود که لایه گازی دی‌اکسیدکربن به عنوان یک مرز بالایی با غلظت ثابتی از دی‌اکسیدکربن عمل می‌کند. آنها همچنین اظهار داشتند که می‌توان با اعمال تقریب بوسینسک در یک محیط بسته‌ای که از بالا با غلظت ثابتی از دی‌اکسیدکربن محصور می‌شود ناپایداری‌های گرانشی را مطالعه کرد. مدل فیزیکی، دستگاه مختصات و شرایط مرزی مسئله در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیک سیستم، شرایط اولیه و دستگاه مختصات

و یک رابطه مقیاسی<sup>۱</sup> برای شروع همرفتی ارائه دادند [۱۴]. حسن‌زاده و همکاران با استفاده از آنالیز پایداری خطی، اثر شرایط مرزی و شرایط اولیه مختلف را بر شروع همرفتی در یک مخزن همگن و همسان‌گرد<sup>۲</sup> بررسی کردند [۱۵]. آنها با استفاده از نتایج به‌دست آمده در ۲۴ مورد از مخازن آب شور حوضه آلبرتا، نتیجه گرفتند که بیش از ۵۰٪ از این مخازن در دراز مدت تحت تأثیر همرفتی قرار خواهند گرفت.

اگرچه آنالیز پایداری خطی قادر به پیش‌بینی شروع همرفتی و طول موج اولیه ناپایداری‌ها می‌باشد، اما برآورد رفتار اختلاط پس از شروع همرفتی به کمک این آنالیز امکان‌پذیر نیست [۱۶]. در این مقاله از شبیه‌سازی‌های عددی برای توصیف رفتار اختلاط سیستم در زمان شروع همرفتی و پس از آن استفاده می‌شود. از شبیه‌سازی‌های عددی به‌منظور به‌دست آوردن روابط مقیاسی برای پیش‌بینی شروع همرفتی، نواحی اختلاط و همچنین نرخ انحلال ماکزیمم کمک گرفته شده است. همچنین زمان انحراف منحنی اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی خالص که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، برحسب ویژگی‌های سنگ و سیال مخزن محاسبه می‌شود. روابط مقیاسی به‌دست آمده می‌تواند کمک شایانی در انتخاب سایت‌های مناسب ذخیره‌سازی و ارزیابی ریسک نشت دی‌اکسیدکربن از مخازن آب شور داشته شد.

در این مقاله ابتدا مدل‌سازی عددی فرآیند اختلاط همرفتی توصیف شده و مدل عددی ساخته شده با مسأله محک‌الدر (۱۹۶۷) در محیط متخلخل اعتبارسنجی می‌شود. سپس روابط مقیاسی برای توصیف اختلاط همرفتی بیان می‌گردد. در نهایت کاربرد روابط مقیاسی برای مخازن آب شور حوضه آلبرتا ارائه شده و نتایج به‌دست آمده با کارهای عددی حسن‌زاده و همکاران مقایسه می‌شود.

### توصیف مدل

شبیه‌سازی‌های عددی دوفازی مسأله توسط لیدنبرگ و برجمو نشان می‌دهد که سطح تماس بین دی‌اکسیدکربن تزریقی، که در شرایط مخزن در حالت فوق بحرانی<sup>۳</sup>

1. Scaling relationship  
2. Isotropic  
3. Supercritical

تعادلی دی‌اکسیدکربن در فشار اولیه سیستم می‌باشد [۱۶]. به دلیل غیر خطی بودن معادلات حاکم بر سیستم، روش‌های تحلیلی برای حل این دستگاه معادلات وجود ندارد. از این رو باید از روش‌های عددی برای حل همزمان این معادلات استفاده کرد. در این مطالعه از نرم‌افزار ریاضی flexPDE برای حل عددی معادلات حاکم استفاده می‌شود. flexPDE نرم‌افزاری با مبنای ریاضی است که سیستم معادلات مشتقات جزئی را به المان محدود<sup>۱</sup> تبدیل کرده و پس از حل عددی معادلات، پروفایل غلظت و فشار را درون محیط محاسبه می‌نماید. در ادامه برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی، از مسأله محک الدر در محیط متخلخل در حوزه جریان پیش رانشی چگالی استفاده می‌شود.

### مسأله الدر

الدر جریان آرام سیال را در یک مدل عمودی جعبه‌ای شکل مطالعه نمود [۲۰]. جریان سیال درون مدل با کمک گرادیان عمودی دما شروع می‌شود. گرادیان چگالی ایجاد شده ناشی از تغییرات دما سبب ایجاد الگوی جریان پی‌چیده‌ای از انگشتی‌ها و نرمه‌ها<sup>۲</sup> می‌شود. الدر مدل مورد نظر را به دو صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه کرده است.

ووس و سوزا مسأله الدر را، برای آب‌های زیرزمینی با چگالی متغیر در حالتی که چگالی سیال تابعی از غلظت نمک می‌باشد، بازسازی کردند [۲۱]. جریان پیش رانشی چگالی در مسأله اصلی الدر با کمک تغییرات دما روی می‌دهد اما در اصلاحیه ووس و سوزا عامل جریان پیش رانشی چگالی، تغییرات غلظت می‌باشد؛ در این حالت چگالی آب شور تابعی از غلظت نمک می‌باشد،  $\rho = \rho_0(1 + \beta C)$ . مسأله الدر به‌طور گسترده در مطالعات مربوط به آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱-۲۳]. از همین رو، از این مسأله برای نشان دادن دقت مدل عددی استفاده می‌شود. هندسه و شرایط مرزی مسأله الدر در شکل ۳ نشان داده شده است:

شبیه‌سازی مسأله الدر به کمک مدل عددی ارائه شده انجام می‌شود.

مدل مورد نظر یک محیط متخلخل همگن و همسان‌گرد با ضخامت  $H$  می‌باشد که از آب سازندی اشباع شده است. شرایط مرزی عبارتند از: عدم وجود جریان سیال در تمام مرزها و تمام زمان‌ها، عدم وجود شار جرمی در مرزهای جانبی و پایینی در تمام زمان‌ها و غلظت دی‌اکسیدکربن در مرز بالایی در زمان‌های بیشتر از صفر. سیال (آب سازندی) ابتدا به صورت ساکن بوده و محیط متخلخل دارای نفوذپذیری و تخلخل ثابت می‌باشد. محیط مورد نظر در زمان صفر تحت یک تغییر سریع در غلظت آبی دی‌اکسیدکربن در مرز بالایی قرار می‌گیرد. به دلیل نفوذ دی‌اکسیدکربن در آب شور، آب شور از دی‌اکسیدکربن اشباع شده و چگالی آن از آب شور زیرین بیشتر می‌شود. قرار گرفتن لایه‌ای با چگالی بیشتر در بالا تحت شرایطی خاص ناپایدار بوده و سبب تشکیل انگشتی‌های فاز سنگین‌تر درون فاز سبک‌تر می‌گردد. فرض می‌شود که تقریب بوسینسک و مدل جریانی داری برقرار باشد. بنابر تقریب بوسینسک، هنگامی که تغییرات چگالی ناچیز است، می‌توان از آن در معادله انتقال صرف‌نظر کرد. با این وجود وقتی که مؤلفه چگالی در کنار مؤلفه گرانش قرار می‌گیرد، ترکیب آنها قابل ملاحظه بوده و نمی‌توان از تغییرات آن صرف‌نظر نمود. علاوه بر این فرض می‌شود که آمیختگی پایه سرعتی و اثرات موئینگی ناچیز بوده و واکنش‌های ژئوشیمیایی در محیط روی نمی‌دهد. برای چنین سیستمی معادلات حاکم بر میدان‌های غلظت و جریان با در نظر گرفتن مدل داری برای سرعت به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = -\frac{K}{\mu} (\nabla P - \rho \mathbf{g} \nabla Z) \quad (2)$$

$$D \phi \nabla^2 C - \mathbf{V} \cdot \nabla C = \phi \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

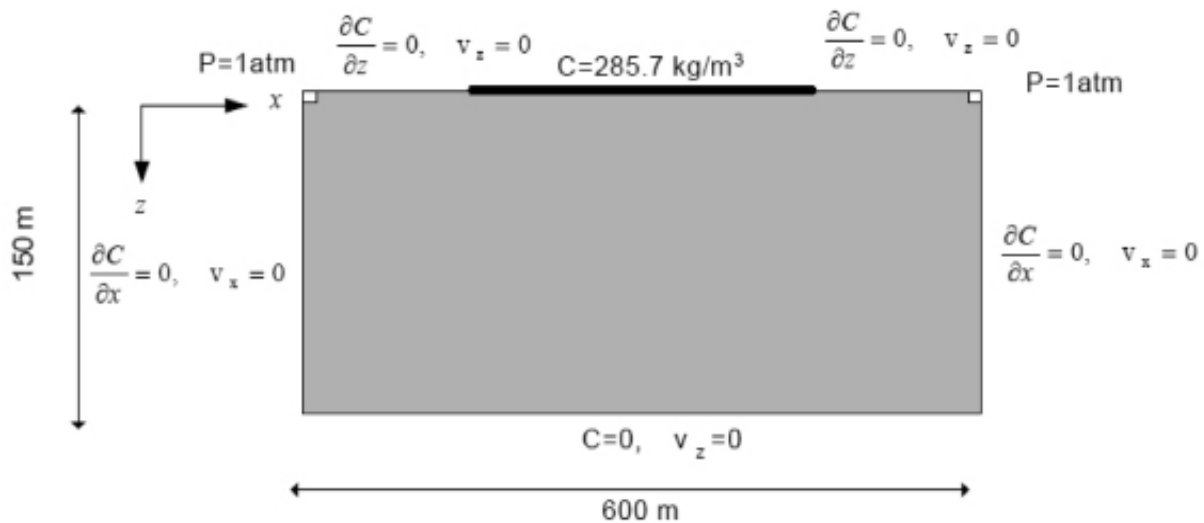
$$\rho = \rho_0(1 + \beta C) \quad (4)$$

پارامتر مهمی که برای توصیف پایداری چنین سیستمی به‌کار می‌رود، عدد رایلی محیط متخلخل می‌باشد که به صورت نسبت بین شارهای بویانسی و نفوذی تعریف می‌شود [۱۹]:

$$Ra = \frac{K \Delta \rho g H}{\phi \mu D} \quad (5)$$

در رابطه بالا  $\Delta \rho = \beta \rho_0 C^*$  اختلاف چگالی آب شور اولیه و آب شور اشباع شده از دی‌اکسیدکربن بوده و  $C^*$  غلظت

1. Finite Element  
2. Lobe



شکل ۳- هندسه و شرایط مرزی برای مسئله الدر [۲۴]

منحنی اختلاط به سه ناحیه زمانی تقسیم می‌شود: الف) ناحیه نفوذ مولکولی، ب) ناحیه میانی و پ) ناحیه اختلاط پایانی [۲۴]. برای توصیف دوره‌های زمانی اختلاط، از تعریف حسن‌زاده برای عدد شروود استفاده می‌شود: نسبت اختلاط کلی به اختلاط در حالت نفوذ مولکولی خالص [۲۴]. عدد شروود میزان افزایش انحلال ناشی از اختلاط همرفتی را نشان می‌دهد؛ هر چه جریان همرفتی به مقدار بیشتری درون سیستم صورت گیرد، عدد شروود سیستم بزرگ‌تر خواهد بود. شکل ۶ رفتار عدد شروود را در بازه‌های مختلف زمانی نشان می‌دهد.

در ناحیه «الف» شکل ۶ که فرآیند غالب نفوذ مولکولی می‌باشد، نرخ انحلال کم بوده و عدد شروود برابر با یک خواهد بود. در زمان‌های اولیه، عمق نفوذ کم بوده و انتقال جرم کلی با  $\sqrt{t_D}$  متناسب است. جزء نهایی انحلال در این بازه زمانی طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۲۵]:

$$C_D = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{1}{2n+1} \right)^2 \exp \left[ - \left( \frac{2n+1}{2} \pi \right)^2 t_D \right] \quad (6)$$

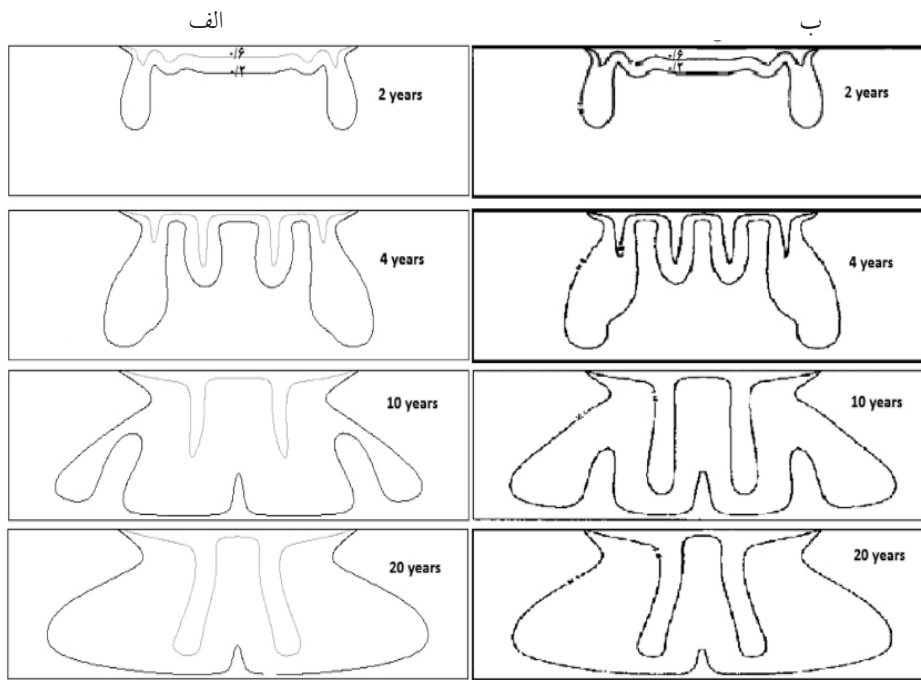
مدت زمان این ناحیه به عدد رایلی سیستم و شروع ناپایداری‌ها بستگی دارد. برای بعضی از مخازن آب شور ممکن است جبهه نفوذی دی‌اکسیدکربن بدون اینکه همرفتی صورت بگیرد، به انتهای مخزن برسد که در این حالت رفتار سیستم به صورت نفوذ مولکولی خالص خواهد بود.

غلظت اولیه نمک در محیط متخلخل صفر بوده و محیط ابتدا در حالت ساکن می‌باشد. نمک به وسیله نفوذ مولکولی درون آب خالص نفوذ کرده و سبب می‌شود که آب اشباع شده از نمک در لایه‌های بالایی نسبت به آب لایه‌های زیرین چگال‌تر شده و سرانجام منجر به اختلاط همرفتی می‌گردد. این الگوهای جریانی با پراکنده کردن نمک درون محیط فرآیند، اختلاط را بهبود می‌بخشد.

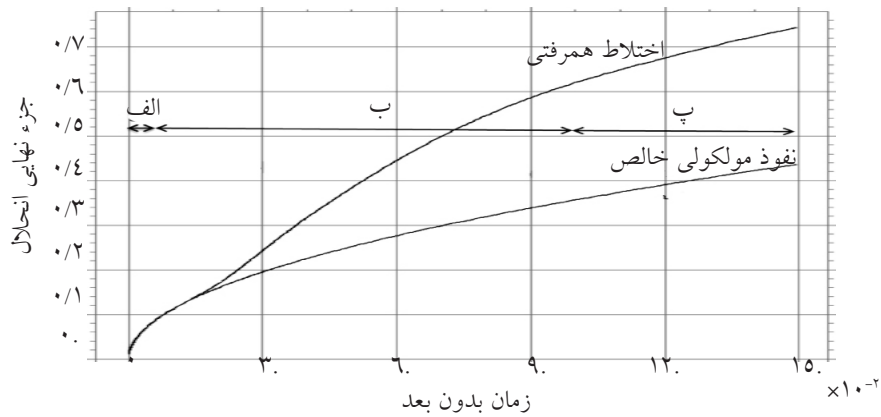
مقادیر غلظت بدون بعد نمک بعد از زمان ۲۰ سال از شروع نفوذ مولکولی، با مقادیر گزارش شده توسط کلدیتز و همکاران در شکل ۴ مقایسه شده است [۲۲]. لازم به ذکر است که پاسخ‌های مختلفی برای مسأله الدر وجود دارد که بسته به روش‌های عددی به کار رفته و تقریب‌های استفاده شده برای چگالی، تفاوت کمی با یکدیگر دارند [۲۱-۲۳]. همان‌طور که در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود، برای مقادیر غلظت بدون بعد ۰/۲ و ۰/۶ در زمان‌های ۲، ۴، ۱۰ و ۲۰ سال، مدل عددی استفاده شده، پاسخ‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد.

#### مکانیسم‌های اختلاط

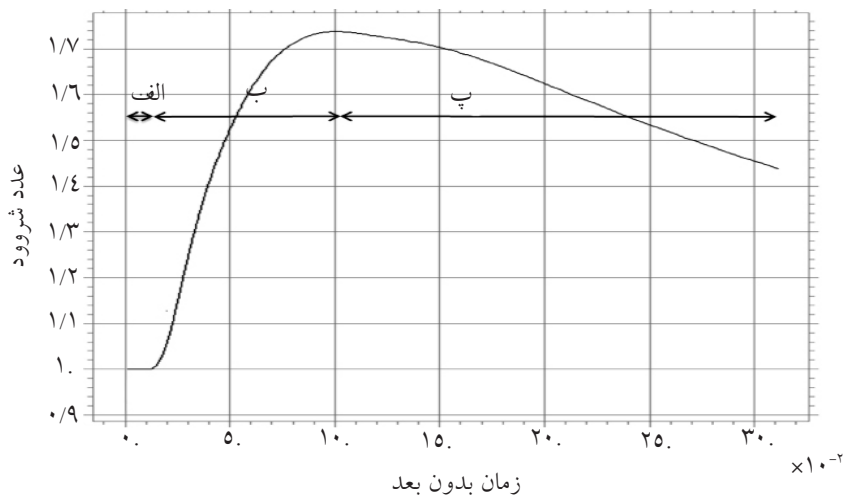
برای یک مخزن آب شور بسته، جزء نهایی انحلال به صورت مقدار کل دی‌اکسیدکربن حل شده به مقدار نهایی انحلال تعریف می‌شود [۱۳]. شکل ۵ رفتار نوعی اختلاط را برای حالت نفوذ مولکولی خالص و جریان همرفتی برحسب زمان بدون بعد ( $t_D = Dt/H^2$ ) نشان می‌دهد.



شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی غلظت‌های بدون بعد  $0/2$  و  $0/6$  برای مسأله الدر؛ الف: نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این مطالعه و ب: نتایج گزارش شده توسط کلدیتز و همکاران [۲۲].



شکل ۵- رفتار نوعی اختلاط برحسب زمان بدون بعد

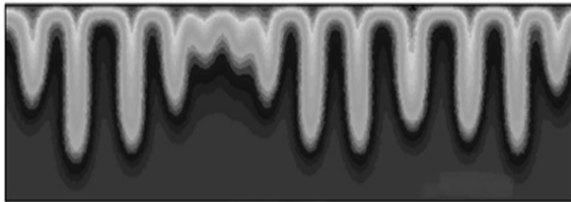


شکل ۶- رفتار عدد شروع در بازه‌های مختلف زمانی اختلاط همرفتی

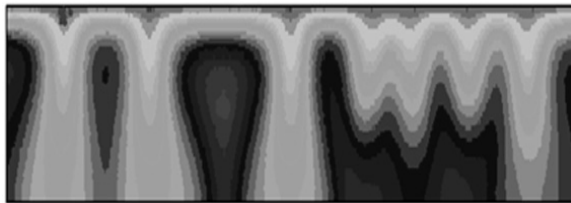
بین رفتن سلول‌های همرفتی، نرخ انحلال کاهش می‌یابد. شکل ۷، رفتار پروفایل غلظت را در هر یک از این بازه‌های زمانی نشان می‌دهد.



ناحیه نفوذ مولکولی



ناحیه میانی



ناحیه اختلاط پایانی

شکل ۷- رفتار پروفایل غلظت در بازه‌های زمانی اختلاط همرفتی (Ra=۱۹۱)

دوره‌های زمانی، عدد شروود و زمان متناظر آن در ارزیابی ریسک و کاربرد دی‌اکسیدکربن ذخیره‌سازی در ابعاد میدانی بسیار حائز اهمیت است. باید توجه داشت که در حالت نفوذ مولکولی خالص، معادلات حاکم خطی بوده و با استفاده از جواب‌های تحلیلی این معادلات قابل حل می‌باشند؛ اما برای سیستم‌های تحت جریان همرفتی، معادلات حاکم غیرخطی است و از روش‌های عددی برای حل آنها استفاده می‌شود.

### آنالیزهای مقیاسی

در این بخش با استفاده از مدل عددی، روابط مقیاسی برای به‌دست آوردن زمان شروع همرفتی، زمان انحراف اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی و عدد شروود ماکزیمم ارائه می‌شود. به کمک چنین روابطی می‌توان رفتار اختلاط و زمان متناظر آن را جهت انتخاب مخازن آب شور مناسب

هنگامی که جبهه دی‌اکسیدکربن به انتهای سیستم می‌رسد، انحلال کلی سیستم با  $\sqrt{t_D}$  متناسب نخواهد بود. همان‌طور که گفته شد چون در این بازه زمانی، ناحیه «الف»، تنها مکانیزم انتقال جرم، مکانیزم نفوذ مولکولی می‌باشد بنابراین عدد شروود برابر با یک خواهد بود. بعد از این بازه زمانی، لایه مرزی نفوذی ممکن است تحت شرایطی ناپایدار شده که خود منجر به شروع ناپایداری‌ها می‌گردد. در بخش‌های بعدی به توصیف دقیق‌تر زمان شروع همرفتی و زمان انحراف منحنی اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی پرداخته می‌شود.

در ناحیه «ب»، شکل ۶ لایه مرزی نفوذی ناپایدار شده و سبب شکل‌گیری ناپایداری‌ها در سطح تماس آب شور اشباع از دی‌اکسیدکربن و آب شور عاری از دی‌اکسیدکربن می‌گردد. در واقع شروع همرفتی کمی پیش از انحراف منحنی اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی روی می‌دهد [۲۴]. ناپایداری‌های ایجاد شده به ویژگی‌های سیال و محیط متخلخل مربوط می‌شود. در این بازه زمانی، اختلاط با  $t_D$  نسبت مستقیم دارد [۲۴].

در اعداد رایلی پایین، انگشتی‌های ایجاد شده بدون اینکه اثر متقابل بر روی همدیگر داشته باشند، به پایین مخزن آب شور می‌رسند. برای اعداد رایلی بالا به دلیل اثر متقابل انگشتی‌ها بر روی همدیگر، نرخ انحلال می‌تواند تغییر کند.

اثر متقابل انگشتی‌ها می‌تواند تأثیر زیادی بر روی فرایند اختلاط داشته باشد. بسته به میزان عدد رایلی، نرخ انحلال در این بازه زمانی از حالت نفوذ مولکولی خالص بیشتر بوده و جزء نهایی انحلال می‌تواند به بیش از ۶۰٪ در انتهای این بازه زمانی برسد، در حالی که در مدت زمان مشابه، نفوذ مولکولی فقط قادر به انحلال ۳۰٪ از دی‌اکسیدکربن تزریقی در آب شور می‌باشد.

پس از رسیدن جبهه دی‌اکسیدکربن به پایین مخزن و غالب شدن اثرات مرز پایینی، نرخ انحلال با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در این زمان که عدد شروود در حالت ماکزیمم خود قرار دارد، ناحیه «پ» آغاز می‌شود. طی این بازه زمانی، گرادیان‌های غلظت رفته رفته کاهش یافته و با از

روش حل معادلات، مقادیر مختلفی برای  $C_1$  و  $C_2$  گزارش شده است. به عنوان مثال حسن‌زاده و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای چنین بازه‌ای از اعداد رایلی، مقادیر  $C_1 = 500$  و  $C_2 = -2$  را پیشنهاد دادند [۱۳].

#### انحراف اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی خالص

نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که افزایش انحلال ناشی از اختلاط همرفتی، بلافاصله پس از شروع ناپایداری‌ها روی نمی‌دهد (شکل ۹). پس از ناپایدار شدن لایه مرزی نفوذی و شروع ناحیه همرفتی، مدت زمانی طول می‌کشد تا انگشتی‌های ایجاد شده سبب به وجود آمدن همرفتی در آب شور شود و آب شور عاری از دی‌اکسیدکربن را به مجاورت لایه گازی دی‌اکسیدکربن برساند. طی این مدت، ناپایداری‌ها باعث به وجود آمدن گرادیان غلظت می‌شود که این مسأله می‌تواند در زمان‌های بعدی سبب افزایش انحلال گردد. برای شبیه‌سازی‌های انجام شده در بخش قبل، زمان انحراف منحنی اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی خالص در شکل ۱۰ برحسب عدد رایلی بدون بعد نشان داده شده است.

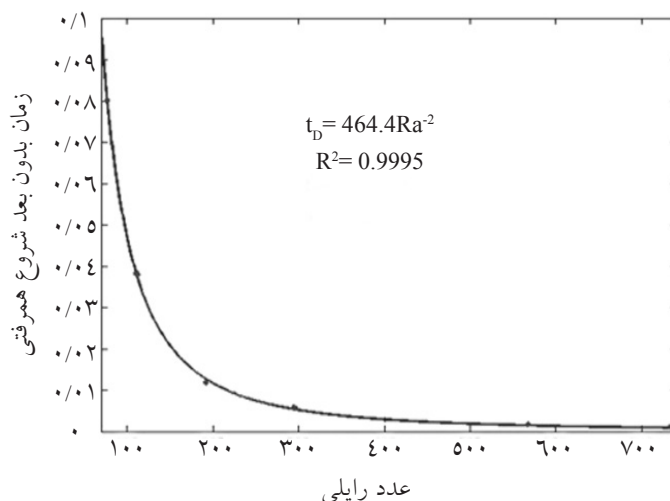
این نتایج به صورت  $t_{Ddep} = 6284 Ra^{-2.314}$  بیان می‌شوند. از مقایسه  $t_{Dc}$  و  $t_{Ddep}$  برای مخازن همگن و همسان‌گرد می‌توان دریافت که مدت نسبتاً زیادی طول می‌کشد تا ناپایداری‌های ایجاد شده منجر به افزایش انحلال گردد.

برای ذخیره‌سازی و ارزیابی ریسک، بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های عددی زمان‌بر در ابعاد میدانی، برآورد کرد. شروع اختلاط همرفتی

در این قسمت به کمک شبیه‌سازی‌های عددی، زمان شروع همرفتی در یک مخزن همگن و همسان‌گرد محاسبه می‌شود. این شبیه‌سازی‌های عددی با تغییر پارامترهای سیال و محیط متخلخل، بازه‌ای از اعداد رایلی ۷۳۵- را فراهم می‌کند. شبیه‌سازی‌های عددی بدون اعمال آشفتگی‌های فیزیکی انجام شده است که این امر سبب می‌شود شبیه‌سازی‌های عددی در مقایسه با آنالیز پایداری خطی، شروع ناپایداری‌ها را دیرتر پیش‌بینی نماید.

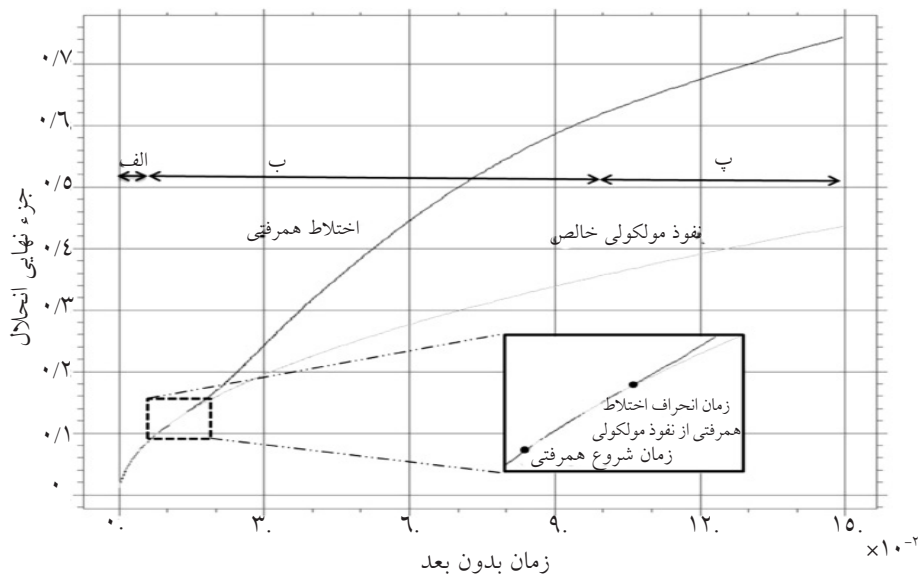
عدد بدون بعد استفاده شده، عدد رایلی می‌باشد. طبق آنالیز پایداری خطی، برای شروع همرفتی عدد رایلی باید از مقدار بحرانی بیشتر باشد. علاوه بر این، استفاده از آنالیز پایداری خطی برای پیش‌بینی زمان شروع همرفتی، رابطه  $t_{Dc} = C_1 Ra^2$  را پیشنهاد می‌دهد که  $C_1$  و  $C_2$  ثابت،  $Ra$  عدد رایلی و  $t_{Dc}$  زمان بدون بعد شروع همرفتی می‌باشد [۲۴]. زمان شروع ناپایداری‌ها زمانی است که لایه مرزی نفوذی ناپایدار می‌شود.

شکل ۸ زمان بدون بعد شروع همرفتی را برحسب عدد رایلی سیستم نشان می‌دهد. زمان شروع همرفتی طبق رابطه  $t_{Dc} = 464.4 Ra^2$  محاسبه می‌گردد که در حالت ابعادی به صورت  $t_c = 464.4 \left[ \frac{\phi \mu \sqrt{D}}{K \Delta \rho g} \right]^2$  بیان می‌شود. بسته به انتخاب

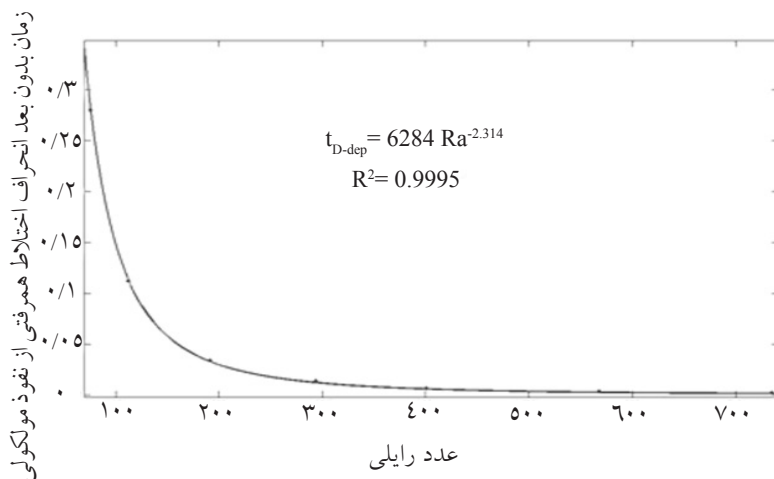


شکل ۸- زمان بدون بعد شروع ناپایداری‌ها برای محیط همگن و همسان‌گرد برحسب عدد رایلی





شکل ۹- انحراف اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی خالص



شکل ۱۰- زمان بدون بعد انحراف اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی برای محیط همگن و همسان گرد برحسب عدد رایلی

ناحیه متناظر با زمانی است که در آن عدد شروود به بیشترین مقدار خود رسیده است. در این زمان، بسته به عدد رایلی سیستم، بیشترین مقدار اختلاط در مقایسه با حالت نفوذ مولکولی خالص روی می‌دهد.

با توجه به لزوم انحلال دی‌اکسیدکربن در کمترین زمان ممکن، جهت کاهش ریسک نشستی دی‌اکسیدکربن از مکان‌های تزریق، زمان رسیدن به عدد شروود و مقدار اختلاط کل در این زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آنالیز مقیاسی عدد شروود ماکزیمم و زمان متناظر آن بر حسب عدد رایلی سیستم کمک می‌کند تا بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های هزینه‌بر در مقیاس میدانی، به برآورد میزان

لازم به ذکر است که با افزایش عدد رایلی، فعالیت سلول‌های همرفتی بیشتر شده و رفته رفته نسبت  $\frac{t_{Ddep}}{t_{Dc}}$  کاهش می‌یابد. زمان انحراف اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی خالص، در انتخاب سایت‌های مناسب ذخیره‌سازی و ارزیابی ریسک نشستی کربن‌دی‌اکسید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و زمان شروع ناپایداری‌ها اهمیت چندانی در انتخاب سایت‌های مناسب ذخیره‌سازی ندارد. زیرا افزایش اختلاط در حدود سه برابر مقیاس زمانی شروع ناپایداری‌ها شکل می‌گیرد.

#### عدد شروود ماکزیمم و زمان متناظر آن

زمان شروع همرفتی، متناظر با پایان ناحیه «الف» است. ناحیه دوم اختلاط، ناحیه میانی می‌باشد. زمان پایان این

از روابط مقیاسی ارائه شده نتیجه می‌شود که در مخازن آب شور با عدد رایلی کمتر از ۷۰، افزایش انحلال ناشی از اختلاط همرفتی روی نمی‌دهد و در چنین مخازنی اختلاط همرفتی نمی‌تواند کمکی به افزایش انحلال دی‌اکسیدکربن در مخازن آب شور نماید. جهت روشن شدن اهمیت اختلاط همرفتی، به عنوان نمونه دو مخزن آب شور با نفوذپذیری‌های مختلف (۲۰ و ۱۲۰ md) مورد آنالیز قرار گرفت؛ اعداد رایلی این دو مخزن ۶۷ و ۴۰۱ می‌باشند. سایر پارامترهای این دو مخزن در جدول ۱ ارائه شده است.

برای مخزن آب شور با عدد رایلی ۶۷ هیچ‌گونه افزایش انحلال ناشی از اختلاط همرفتی درون سیستم به‌وجود نمی‌آید؛ درحالی‌که در مخزن با نفوذپذیری بالا، اختلاط همرفتی باعث شده که در زمان پایان ناحیه میانی، ۵۸٪ از دی‌اکسیدکربن تزریقی درون آب شور حل شود. در همین زمان برای مخزن با نفوذپذیری کمتر که مکانیسم غالب انحلال، نفوذ مولکولی می‌باشد، فقط ۲۹٪ از دی‌اکسیدکربن تزریقی درون آب شور حل شده است.

برای بررسی قابلیت کاربرد روابط مقیاسی با فرض مخزن همگن و همسان‌گرد، داده‌های ۲۴ مورد از مخازن آب شور حوضه آلبرتا برای آنالیز انتخاب شده‌اند [۷]. اعداد رایلی با استفاده از داده‌های فراهم شده برای این سایت‌ها توسط بچو و همکاران محاسبه شده‌اند [۷] و [۲۶]. جدول ۲ مقایسه جواب‌های به‌دست آمده توسط مدل عددی ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی‌های عددی حسن‌زاده و همکاران را نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین جواب‌های این دو روش عددی وجود دارد. همچنین در این مقاله زمان افزایش اختلاط ناشی از همرفتی برحسب ویژگی‌های سنگ و سیال مخزن محاسبه شده است، در حالی‌که در نتایج شبیه‌سازی عددی حسن‌زاده و همکاران به این مهم به‌صورت کمی پرداخته نشده است.

تأثیر اختلاط همرفتی و زمان رسیدن به حداکثر نسبت اختلاط همرفتی به نفوذ مولکولی خالص پرداخت. در شکل ۱۱ زمان عدد شروود ماکزیمم برحسب عدد رایلی نشان داده شده است که طبق رابطه  $f_{Dsh_{max}} = \frac{81.4}{Ra^{1.18}}$  بیان می‌شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عدد شروود ماکزیمم به‌عنوان میزانی از اختلاط برحسب عدد رایلی به صورت  $Sh_{max} = 0.195 Ra^{0.3863}$  ارائه می‌گردد (شکل ۱۲).

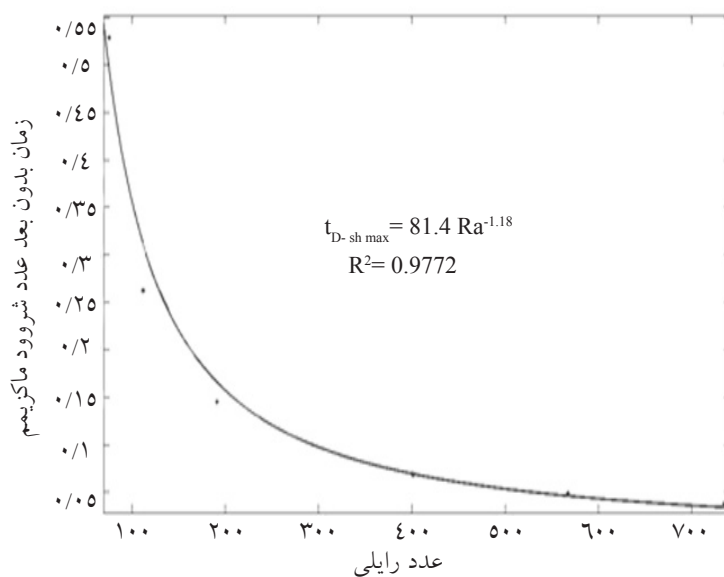
### بحث و نتایج

شبیه‌سازی‌های عددی ارائه شده با فرض محیط متخلخل همگن انجام شده است. مخازن آب شور واقعی همگن نیستند، بنابراین فرض مقدار ثابت برای نفوذپذیری سیستم، نمی‌تواند بیان‌گر وضعیت واقعی مخازن آب شور باشد. انتظار می‌رود که ناهمگنی<sup>۱</sup> در محیط متخلخل، بر روی زمان شروع ناپایداری‌ها و رشد متعاقب انگشتی‌ها تأثیر بسزایی داشته باشد. لذا، لازم است بررسی‌های بیشتری برای توصیف اثر ناهمسان‌گردی<sup>۲</sup> و ناهمگنی نفوذپذیری بر روی رفتار اختلاط و آنالیزهای مقیاسی انجام گیرد. روابط مقیاسی ارائه شده در این مطالعه برای اعداد رایلی کمتر از ۷۵۰ برای مخازن همسان‌گرد قابل کاربرد می‌باشد. در اعداد رایلی بالا به‌دلیل اثرات متقابل انگشتی‌های ایجاد شده حاصل از ناپایداری‌ها، توصیف پارامترهای اختلاط به‌ویژه عدد شروود ماکزیمم برحسب عدد رایلی به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. اثرات متقابل انگشتی‌ها بر روی هم سبب می‌شود که این ناپایداری‌ها دیرتر به سمت پایین حرکت کرده و عدد شروود ماکزیمم که بیان‌گر افزایش انحلال ناشی از اختلاط همرفتی می‌باشد، کمتر از میزان انتظار باشد. مدل‌سازی اختلاط همرفتی در این مطالعه در محیط دوبعدی و تک‌فاز انجام شده است. شبیه‌سازی دوفازی اختلاط همرفتی در ابعاد بالاتر با در نظر گرفتن ناحیه‌گذاری مویینگی<sup>۳</sup> که ممکن است سبب کاهش همرفتی در محیط متخلخل گردد، می‌تواند در مطالعات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

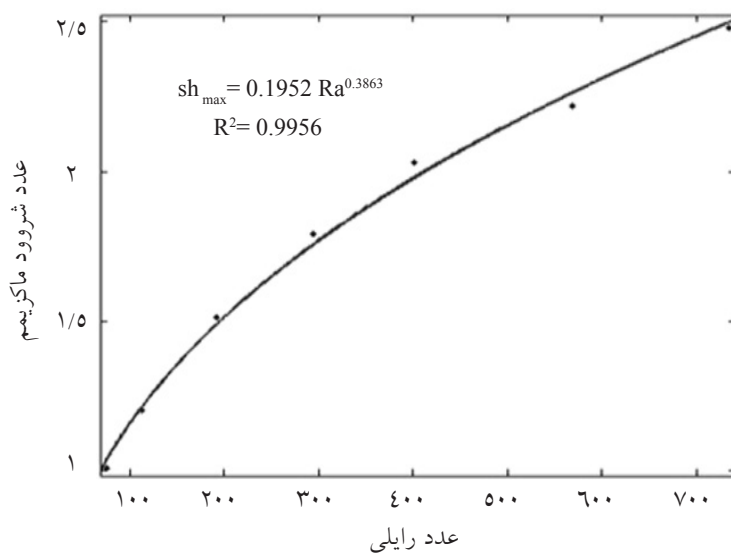
1. Heterogeneity

2. Anisotropy

3. Capillary Transition Zone



شکل ۱۱- زمان بدون بعد عدد شروع ماکزیمم برای محیط همگن و همسان گرد برحسب عدد رایلی



شکل ۱۲- عدد شروع ماکزیمم برای محیط همگن و همسان گرد برحسب عدد رایلی

جدول ۱- پارامترهای مخزن آب شور

تخلخل (fraction)	گرانروی (cP)	اختلاف چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب نفوذ مولکولی (m <sup>2</sup> /s)	ضخامت مخزن (m)
۰/۲۲	۰/۶	۱۸	۲×۱۰ <sup>-۹</sup>	۵

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی‌های عددی اختلاط همرفتی در این مطالعه و حسن‌زاده و همکاران برای مخازن آب شور حوضه آبرتا [۱۶]

عدد شروع ماکزیمم		زمان عدد شروع ماکزیمم (سال)		زمان انحراف اختلاط همرفتی (سال)		زمان شروع ناپایداری (سال)		عدد رایلی	مخزن
حسن‌زاده [۱۶]	کار حاضر	حسن‌زاده [۱۶]	کار حاضر	حسن‌زاده [۱۶]	این مطالعه	حسن‌زاده [۱۶]	کار حاضر		
۱/۲۴	۱/۳۲	۴۶۰	۴۱۴	-	۱۳۹	۴۴	۴۱	۱۴۰/۴	۱
۱/۲۳	۱/۳۱	۲۱۰	۱۹۲	-	۶۵	۲	۱۹	۱۳۸/۱	۲
-	۱/۰۳	۱۵۱۰	۱۳۳۱	-	۷۵۲	۲۴۱	۲۲۲	۷۴/۲	۳
۱/۲۴	۱/۳۱	۱۵۰	۱۳۱	-	۴۴	۱۴	۱۳	۱۳۹	۴
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م*	۱۰/۳	۵
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۳۷/۱	۶
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۳/۴	۷
۱/۸۵	۱/۷۹	۵۶۰۰	۵۲۶۱	-	۹۲۱	۲۷۵	۲۷۲	۳۰۹/۸	۸
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۱۱	۹
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۲۸/۴	۱۰
-	-	-	-	-	۱۳	۴	۴	۱۳۴۱/۳	۱۱
۱/۲۶	۱/۳۳	۱۱۰	۹۹	-	۳۲	۱۰	۱۰	۱۴۴/۳	۱۲
۱/۹۹	۱/۸۹	۵۵	۵۰	-	۸	۲	۲	۳۵۸/۱	۱۳
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۱۸/۸	۱۴
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۰	۱۵
۱/۹۲	۱/۸۵	۱۷۳۰	۱۶۵۹	-	۲۷۲	۸۰	۸۰	۳۳۶	۱۶
۱/۸۹	۱/۸۲	۱۳	۱۲	-	۲	۱	۱	۳۲۳/۸	۱۷
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۲۶/۵	۱۸
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۱۳/۸	۱۹
-	۱	۸۰۰	۷۱۶	-	۴۴۳	۱۳۹	۱۳۱	۶۶/۵	۲۰
۱/۱۹	۱/۲۷	۳۰۰۰	۲۷۰۲	-	۹۷۸	۳۱۰	۲۸۹	۱۲۷/۷	۲۱
۱/۳۲	۱/۳۸	۴۰	۳۶	-	۱۱	۳	۳	۱۵۸/۳	۲۲
-	-	-	-	-	-	ن م	ن م	۲/۶	۲۳
۱/۱۹	۱/۲۸	۱۷۰	۱۵۱	-	۵۴	۱۷	۱۶	۱۲۹/۲	۲۴

\*: نفوذ مولکولی

## نتیجه‌گیری

همرفتی برحسب عدد رایلی به‌صورت کمی مورد بررسی قرار گرفت. در پایان برای بررسی قابلیت کاربرد روابط مقیاسی، نتایج این مطالعه برای ۲۴ مخازن آب شور حوضه آبرتا مورد بررسی قرار گرفت. در پایان برای بررسی قابلیت کاربرد روابط مقیاسی ارائه شده، از نتایج این مطالعه برای محاسبه پتانسیل ذخیره‌سازی ۲۴ مخزن از مخازن آب شور حوضه آبرتا استفاده شد. زمان شروع ناپایداری‌ها، زمان افزایش انحلال ناشی از اختلاط همرفتی و عدد شروع ماکزیمم برای این مخازن به کمک روابط مقیاسی ارائه شده،

در این مقاله به کمک مدل‌سازی عددی اختلاط همرفتی، روابط مقیاسی ساده و کارا برای توصیف فرآیند ذخیره‌سازی دی اکسید کربن ارائه گردید است. با انجام شبیه‌سازی‌های عددی، ناحیه‌های مختلف اختلاط بررسی شده و روابط مقیاسی برای محاسبه زمان شروع ناپایداری‌ها و عدد شروع ماکزیمم به عنوان میزانی از اهمیت اختلاط همرفتی بر حسب عدد رایلی سیستم ارائه شد. همچنین در این مطالعه برای اولین بار زمان افزایش اختلاط ناشی از

$K$ : نفوذپذیری ( $m^2$ )  
 $P$ : فشار، (Pa)  
 $ppmv$ : جزء حجمی در میلیون  
 $Ra$ : عدد رایلی (بدون بعد)  
 $Sh$ : عدد شروود (بدون بعد)  
 $t$ : زمان (s)  
 $t_c$ : زمان شروع همرفتی (s)  
 $t_D$ : زمان بدون بعد  
 $t_{Dc}$ : زمان بدون بعد شروع همرفتی  
 $t_{Ddep}$ : زمان بدون بعد انحراف اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی  
 $t_{DShmax}$ : زمان بدون بعد عدد شروود ماکزیمم  
 $V$ : بردار سرعت (m/s)  
 $\beta$ : ضریب افزایش چگالی (kg/mol)  
 $\phi$ : تخلخل (fraction)  
 $\rho_0$ : چگالی اولیه آب شور ( $kg/m^3$ )  
 $\Delta \rho$ : اختلاف چگالی آب شور اولیه و آب شور اشباع شده از دی‌اکسیدکربن ( $kg/m^3$ )  
 $\mu$ : گرانروی (cP)

بدون انجام شبیه‌سازی‌های عددی هزینه بر، محاسبه شد. نتایج اصلی این مقاله به صورت زیر می‌باشند:  
 - زمان انحراف منحنی اختلاط همرفتی از نفوذ مولکولی به عدد رایلی سیستم بستگی دارد و در زمانی تقریباً سه برابر زمان شروع ناپایداری‌ها روی می‌دهد.  
 - اختلاط همرفتی می‌تواند منجر به افزایش قابل ملاحظه انحلال دی‌اکسیدکربن در مخازن آب شور در مدت زمان کمتری نسبت به نفوذ مولکولی خالص شود.  
 - روابط مقیاسی ارائه شده برای مخازن آب شور همگن و همسان‌گرد بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های میدانی هزینه‌بر، می‌تواند کمک شایانی به انتخاب سایت‌های مناسب ذخیره‌سازی نماید.

#### علائم و نشانه‌ها

$C$ : غلظت (مولالیت، mol/kg)  
 $C_D$ : غلظت بدون بعد  
 $D$ : ضریب نفوذ مولکولی ( $m^2/s$ )  
 $H$ : ضخامت محیط متخلخل (m)

#### مراجع

- [1]. Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguera M., Lindin P. J. v. d. and Dai X., *Climate change 2001: The scientific basis*, Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge. UK, 2001.
- [2]. Keith D. W., *Towards a strategy for implementing CO<sub>2</sub> capture and storage in Canada*, Oil, Gas and Energy Barnch, Environment Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 2002.
- [3]. Bachu S. and Adams J. J., "Estimating CO<sub>2</sub> sequestration capacity in solution in deep saline aquifers", *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, No. 20, pp. 3151-3175, 2003.
- [4]. Fellet M., Gurton R. and Taggart I., "The function of gas-water relative permeability hysteresis in the sequestration of Carbon Dioxide in saline formations", SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, SPE paper 88485, Perth, Australia, 2004.
- [5]. Gunter W., Perkins E. H. and McCann T. J., "Aquifer disposal of CO<sub>2</sub>-rich sequestration design for added capacity", *Energy Conversion and Management*, Vol. 34, pp. 941-948, 1993.
- [6]. Perkins E. H. and Gunter W., *A users manual for PATHARC.94: a reaction path-mass transfer program*, in: Alberta Research Council Report ENVTR 95-11, 1995.
- [7]. Bachu S., Nordbotten J. M. and Celia M. A., "Evaluation of the spread of acid gas plumes injected in deep

- saline aquifers in western Canada as an analogue to CO<sub>2</sub> injection in continental sedimentary basins*, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, IEA Greenhouse Gas Programme, Cheltenham, UK, 2004.
- [8]. Bachu S., Gunter W., *Overview of acid-gas injection operations in western Canada*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, IEA Greenhouse Gas Programme, Cheltenham, UK., 2004.
- [9]. Lindeberg E., "Escape of CO<sub>2</sub> from aquifers", *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, pp. 235-240, 1997.
- [10]. Lindeberg E., Wessel-Berg D., "Vertical convection in an aquifer column under a gas cap of CO<sub>2</sub>", *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, pp. 229-234, 1997.
- [11]. Ennis-King J. and Paterson L., "Rate of dissolution due to convective mixing in the underground storage of carbon dioxide", 6<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies 2002, Kyoto, Japan., 2002.
- [12]. Ennis-King J., Pretson I. and Paterson L., "Onset of convection in anisotropic porous media subject to a rapid change in boundary conditions", *Physics of Fluids*, Vol. 17, 2005.
- [13]. Hassanzadeh H., Pooladi-Darvish M. and Keith D. W., "Modeling of convective mixing in CO<sub>2</sub> storage", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 44, No. 10, pp. 43-51, 2005.
- [14]. Xu X., Chen S. and Zhang Z., "Convective stability analysis of the longterm storage of carbon dioxide in deep saline aquifers", *Advances in Water Resources*, Vol. 29, pp. 397-497, 2006.
- [15]. Hassanzadeh H., Pooladi-Darvish M. and Keith D. W., "Stability of a fluid in a horizontal saturated porous layer: Effect of non-linear concentration profile initial and boundary conditions", *Transport in Porous Media*, Vol. 65, pp. 193-211, 2006.
- [16]. Hassanzadeh H., Pooladi-Darvish M. and Keith D. W., "Scaling behavior of convective mixing, with Application to Geological Storage of CO<sub>2</sub>", *American Institute of Chemical Engineers AIChE*, Vol. 53, pp. 1121-1131, 2007.
- [17]. Lidenburgm E. and Bergmo P., "The long-term fate of CO<sub>2</sub> injected into an aquifer", Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Technologies, 2003.
- [18]. Hesse M. A., "Mathematical modeling and multiscale simulation of CO<sub>2</sub> storage in saline aquifers", PhD Thesis, Department of Energy Resources Engineering, Stanford University, 2008.
- [19]. Horton C. W. and Rogres F. T., "Convection currents in porous media", *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, pp. 367-369, 1945.
- [20]. Elder J. W., "Steady free convection in a porous medium heated from below", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 27, pp. 29-50, 1967.
- [21]. Voss C. I. and Souza W. R., "Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone", *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 10, pp. 1851-1866, 1987.
- [22]. Kolditz O., Ratke R., Diersch H.-J. and Zielke W., "Coupled groundwater flow and transport: 1. Verification

- of variable density flow and transport models*", Advances in Water Resources, Vol. 21, No. 1, pp. 27-46, 1998.
- [23]. Simpson M. J., Clement T. P., "*Theoretical analysis of the worthiness of Henry and Elder problems as benchmarks of density-dependent groundwater flow models*", Advances in Water Resources, Vol. 26, No. 1, pp. 17-31, 2003.
- [24]. Hassanzadeh H., *Mathematical Modeling of Convective Mixing in Porous Media for Geological CO<sub>2</sub> Storage*, PhD Thesis, Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, 2006.
- [25]. Carslaw H. S. and Jaeger J. C., *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press, 1959.
- [26]. Bachu S. and Carroll J. J., "*In-situ phase and thermodynamic properties of resident brine and acid gases (CO<sub>2</sub> & H<sub>2</sub>S) injected in geological formations in western Canada*", Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vancouver, B.C. Canada, pp. 5-9, September 2004.