

بررسی اثر تغییر تخلخل، تراوایی و غیرهمسانگردی سنگ مخزن در فرایند انحلال و شروع جابه‌جایی طبیعی در ذخیره‌سازی کربن‌دی‌اکسید در آبدده‌های شور

حمیدرضا امیری، رضا آذین*⁺

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

روح‌اله فاتحی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

شهریار عصفوری

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

چکیده: از جمله راهکارهای کاهش اثرهای محیط زیستی انتشار کربن‌دی‌اکسید و کاهش تغییرهای آب و هوا توسعه فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS) در آبدده‌های شور می‌باشد. انحلال گاز اسیدی در آب باعث می‌شود مقداری از گاز اسیدی به صورت محلول وارد سیال مخزن شود که باعث افزایش ظرفیت ذخیره مخزن می‌شود. انحلال کربن‌دی‌اکسید باعث بالا رفتن چگالی آب در قسمت بالای مخزن می‌شود. آب اشباع شده که در بالای مخزن قرار دارد، موجب فرایند همرفت (جابه‌جایی) می‌شود که در نتیجه آن، کربن‌دی‌اکسید بیش‌تری در آب حل شده و ایمنی ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهد. در این پژوهش، انحلال کربن‌دی‌اکسید و جابه‌جایی طبیعی در یک مخزن آبدده شور مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی در این مطالعه، بررسی اثر تغییر تخلخل و تراوایی و غیرهمسانگردی سنگ مخزن در فرایند انحلال و شروع جابه‌جایی طبیعی، زمان شروع بیش‌ترین و تغییر مقدار انحلال با زمان در حالت‌های گوناگون مخزن آبدده است. بر اساس همین هدف، شبیه‌سازی عددی اختلاط همرفتی در آبدده همگن و در ادامه غیرهمسانگرد صورت گرفته و سه دوره مؤثر در زمان ذخیره‌سازی کربن‌دی‌اکسید درون آبدده معرفی شده است. همچنین معیارهای مورد نیاز برای دقت شبکه‌بندی مناسب و مدل‌سازی صحیح اختلاط همرفتی کربن‌دی‌اکسید در آبدده بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان داده که تراوایی اثر چشمگیری روی زمان آغاز جابه‌جایی و فرایند اختلاط همرفتی دارد، بنابراین باید به عنوان یکی از پارامترهای اصلی در انتخاب مخزن ذخیره‌سازی در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌سازی کربن‌دی‌اکسید؛ آبدده؛ اختلاط همرفتی؛ جابه‌جایی طبیعی؛ غیرهمسانگردی تراوایی.

KEYWORDS: Carbon Dioxide storage; Aquifer; Convective mixing; Natural convection; Permeability anisotropy.

مقدمه

تولید و انتشار گازهای آلاینده شامل گازهای گلخانه‌ای و اسیدی در حجم گسترده، به عنوان یکی از مشکل‌های محیط زیستی در جهان به شمار می‌رود که باعث اثرهای گلخانه‌ای شده است. کاهش عمده حجم گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در اتمسفر به عنوان سازوکار اصلی رسیدن به پایداری شناخته شده است. در میان گازهای گلخانه‌ای، کربن‌دی‌اکسید سهم عمده‌ای در ایجاد اثرهای ناخواسته در اتمسفر دارد. ۷۳٪ از این ماده از سوختن سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید [۱]. از جمله راهکارهای کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید می‌توان به تغییر سوخت، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی هسته‌ای، استفاده از وسایل کم مصرف با بازدهی بالا، جذب و ذخیره‌سازی کربن^(۱) اشاره کرد. به دام انداختن و ذخیره‌سازی کربن‌دی‌اکسید برای کاهش انتشار این گازهای گلخانه‌ای قبل از روش‌های دیگر مانند استفاده در مقیاس بزرگ از انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی هسته‌ای و بهبود بازدهی انرژی، به تدریج به عنوان یک روش مهم مطرح شد [۲، ۱]. فناوری تزریق گازهای اسیدی در سازندهای زمین‌شناسی در جهان به نسبت جدید است و برای اولین بار در سال ۱۹۸۹ میلادی در یک مخزن نفت تخلیه‌شده بلیمور توسط شرکت شورون انجام گرفت. از سال ۱۹۹۰ میلادی در ایالت آبرتا کشور کانادا اجرا شده است [۳]. در حال حاضر بیش از ۶۵ پروژه در بسیاری از کشورهای صنعتی جهان مانند آمریکا، استرالیا، عمان، آلمان، ژاپن، هلند، نروژ و الجزایر با موفقیت در حال اجرا است، از جمله پروژه‌های بزرگ کشورهای صنعتی در حال اجرا می‌توان به پروژه‌های میدان گازی صلاح الجزایر، اشلیپنر^(۲)، نروژ، اشنوویت^(۳)، نروژ و ویبرن^(۴) در کانادا اشاره کرد [۴]. در بین مخازن زیرزمینی سفره‌های آب شور به دلیل داشتن بالاترین ظرفیت ذخیره‌سازی گزینه‌ای مناسب به منظور ذخیره‌سازی گازهای اسیدی به شمار می‌روند. گازهای اسیدی گازهایی هستند که با حل شدن در آب تولید اسید می‌کنند که مهم‌ترین آن‌ها کربن دی‌اکسید و هیدروژن سولفید است. حضور سفره‌های آب زیرزمینی در بسیاری از مخازن، حجم بزرگ لایه‌های آبی، انحلال بالای گاز اسیدی در آب، در دسترس بودن و فراوانی لایه‌های آبی از مهم‌ترین برتری‌های این نوع مخازن

بوده است و آن‌ها را به یک گروه مناسب برای دفع و یا ذخیره‌سازی تبدیل کرده است.

از نظر عملیاتی، پیشنهاد می‌شود ذخیره‌سازی کربن‌دی‌اکسید در سفره‌ی آب شور با عمق بیشتر از ۸۰۰ متر انجام شود. این کار موجب می‌شود این ماده در حالت فوق بحرانی قرار گیرد. انحلال کربن‌دی‌اکسید در چنین شرایطی به فشار، دما و شوری آب‌های شور موجود در سازند زمین‌شناسی بستگی دارد [۵]. تزریق کربن‌دی‌اکسید سبب بالا رفتن فشار در نزدیکی چاه شده و باعث می‌شود که این ماده وارد فضاها متخلخل شود. مقدار و توزیع فشار ایجادشده به نرخ تزریق، تراوایی و ضخامت سازند، حضور و یا نداشتن موانع تراوایی در سازند و هندسه سامانه سفره آب زیرزمینی بستگی دارد [۶]. در شرایط متعارف حوضه‌های رسوبی، چگالی کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی ۳۰ تا ۴۰ درصد کمتر از آب است [۷]. به هنگام تزریق کربن‌دی‌اکسید به سازند، این ماده در محیط متخلخل منتشر می‌شود و آب سازند را جابه‌جا می‌کند. سپس از طریق ترکیبی از مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی به دام می‌افتد. مهم‌ترین مکانیسم‌های فعال در این فرایند، شامل مکانیسم‌های فیزیکی به دام اندازی ساختمانی و به دام اندازی گاز باقی‌مانده و مکانیسم‌های شیمیایی انحلال و رسوب کانی‌ها است. در این مطالعه، تمرکز بر روی مکانیسم انحلالی می‌باشد. انحلال کربن‌دی‌اکسید باعث بالا رفتن چگالی آب در قسمت بالای آبد شده و آب اشباع از کربن‌دی‌اکسید به سمت پایین حرکت می‌کند و فرایند همرفت را به دنبال دارد که باعث می‌شود مقدار بیشتری کربن‌دی‌اکسید در آب حل شود و ایمنی ذخیره‌سازی افزایش یابد. به دام افتادگی انحلالی یک فرایند پیوسته و به نسبت کند است. به طوری که زمان تأثیر آن در موارد عملی از مرتبه قرن است.

تغییرهای چگالی بر اثر اختلاف دما و غلظت در محیط متخلخل، موجب تشکیل جریان‌های ناشی از اختلاف چگالی می‌شود. این جریان به علت وجود سه پدیده‌ی ادوکنشن^(۵)، پراکنش^(۶) و نفوذ^(۷) در محیط گسترش می‌یابد. در صورت قرار گرفتن یک سیال با چگالی نسبی بالا بر روی آب عاری از کربن‌دی‌اکسید، شرایط جریان ناپایدار شده و اختلاط همرفتی ناشی از اختلاف چگالی، الگوهای اختلاط همرفتی را شکل می‌دهند که موجب تداخل و ایجاد پدیده انگشتی^(۸) می‌شود.

(۱) Carbon Capture and Storage (CCS)

(۲) Sleipner

(۳) Snøhvit

(۴) Weyburn

(۵) Advection

(۶) Dispersion

(۷) Diffusion

(۸) Fingering

مورد مطالعه قرار دادند [۱۷]. جدی زاهد و رستمی اثر شدت جریان تزریق گاز دی اکسید کربن و همچنین میزان شوری آب نمک سازندی بر روی میزان تزریق پذیری را بررسی کردند [۱۸]. به تازگی امامی میبدی و همکاران در یک مرور جامع، چالش‌های کلیدی این موضوع را بررسی کرده و چشم اندازی از آینده آن ارائه کرده‌اند [۱۹].

در این مطالعه، نخست انحلال کربن دی‌اکسید و جابه‌جایی طبیعی در یک مخزن آبدی مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه، اثر تخلخل‌ها و تراوایی‌های گوناگون و همچنین اثر غیرهمسانگردی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی بررسی اثر تغییر این عوامل در فرایند انحلال و شروع جابه‌جایی طبیعی و تغییر مقدار انحلال با زمان در حالت‌های گوناگون مخزن آبدی است. بر اساس همین هدف شبیه‌سازی عددی اختلاط همرفتی در آبدی همگن و در ادامه غیرهمسانگرد صورت گرفته و سه دوره مؤثر در زمان ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید درون آبدی معرفی شده است. همچنین معیارهای مورد نیاز برای دقت شبکه‌بندی مناسب و مدل‌سازی صحیح اختلاط همرفتی کربن دی‌اکسید در آبدی بررسی شده است.

روش بررسی مسئله

به منظور شبیه‌سازی این سامانه از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 4.3 استفاده شده است [۲۰]. این نرم‌افزار یک مجموعه‌ی شبیه‌ساز است که می‌تواند معادله‌های دیفرانسیل سامانه‌های غیرخطی را توسط روش المان محدود در فضاهای یک، دو و سه بعدی حل نماید. در این بخش، مدل‌سازی این فرایند به همراه مدل فیزیکی و مختصات سامانه‌ی مورد استفاده در شبیه‌سازی آورده شده است.

شکل ۱ هندسه محیط متخلخل اشباع با آب مورد استفاده در این مدل‌سازی را نشان می‌دهد. به دلیل نفوذ کربن دی‌اکسید در آن، قسمت بالایی آن که تحت نفوذ این ماده قرار گرفته و از آب دست‌نخورده (تازه) (۶) چگال‌تر می‌شود. در این شرایط وقتی که عدد رایلی به مقدار بحرانی خود رسیده باشد ناپایدار است و منجر به اختلاط همرفتی می‌شود.

معادله حاکم جریان و غلظت برای این سامانه به صورت معادله‌های (۱) تا (۳) است. فرض می‌شود تقریب بوزینسک (۷)

چگونگی پیشروی این جریان، تابعی از عامل‌هایی مانند ویژگی‌های محیط متخلخل و اختلاف چگالی در سیال است. این پدیده باعث افزایش انتقال جرم نسبت به حالتی که فقط نفوذ مولکولی خالص وجود دارد می‌شود. این پدیده همچنین موجب کاهش چشمگیر زمان اختلاط (۱) و افزایش گستره‌ی تداخل در محیط نیز می‌شود.

بناراد اولین کسی بود که پدیده‌ی ناپایداری و اختلاف چگالی در اثر تغییرهای دمایی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد [۸]. در ادامه لرد رایلی در سال ۱۹۱۶ میلادی معادله‌ای را بیان کرد که پایه اصلی ایجاد ناپایداری‌های ناشی از اختلاف چگالی در سیال بر آن نهاده شد [۹، ۱۰]. برای بررسی سامانه‌های جریان شناوری (۲) از پارامترهای بدون بعد استفاده می‌شود که امکان شکل‌گیری پدیده انگشتی را تعیین می‌کند. مشهورترین این پارامترها عدد رایلی (۳) می‌باشد که توسط رایلی در سال ۱۹۱۶ میلادی معرفی شده است. و در سال ۱۹۵۹ میلادی توسط وودینگ برای استفاده در جریان سیال در محیط‌های متخلخل به کار گرفته شد. این عدد بی‌بعد بیانگر نسبت نیروی شناوری به نیروی نفوذ مولکولی است. ویر و همکاران در سال ۱۹۹۶ اولین بار تشکیل سلول همرفتی را در طی شبیه‌سازی عددی ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید در آبدی شور دیدند [۱۱]. در سال ۱۹۹۷ میلادی لیندربرگ و همکاران [۱۲] معادله پایه برای حجم، گرما و شار کربن دی‌اکسید در محیط متخلخل که با توجه به دمای میدان و نفوذ مولکولی با در نظر گرفتن معیار پایداری برای جریان جابه‌جایی عمودی در محیط متخلخل را تجزیه و تحلیل کردند. حسن‌زاده و همکاران در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ میلادی اثر پارامترهای گوناگون سازند بر اختلاط همرفتی (۴)، اثر جریان طبیعی آبدی همراه با پدیده پراکنش بر آغاز جابه‌جایی طبیعی، آنالیز پیمایشی (۵) اختلاط همرفتی با روش عددی، بررسی اثر شبکه بندی و گام زمانی را مورد بررسی قرار دادند [۱۳-۱۵]. اسلام و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی تأثیر نفوذ دوگامه (گرمایی و غلظت) در جابه‌جایی طبیعی کربن دی‌اکسید را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. همچنین آدین و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی به منظور ایجاد صحت عددی و پایداری، اثر مرتبه المان، اثر گام زمانی، اثر اندازه المان و اثر اختلال در سطح تماس گاز - مایع را

(۱) Mixing

(۲) Buoyancy flow

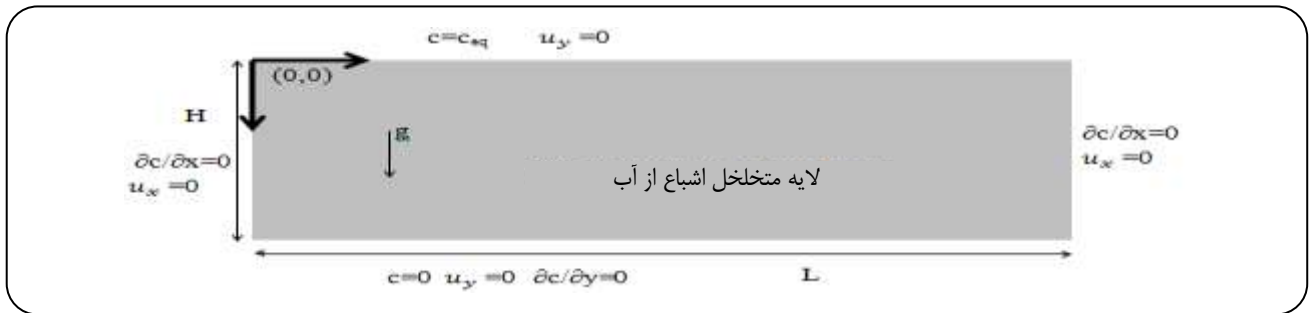
(۳) Rayleigh Number

(۴) Convective mixing

(۵) Scaling analysis

(۶) Fresh

(۷) Boussinesq approximation



شکل ۱- هندسه محیط متخلخل مورد مطالعه و شرایط مرزی برای شبیه‌سازی عددی اختلاط همرفتی.

در سطوح بالا ($y=0$) و پایین ($y=H$) به صورت معادله‌های (۵) و (۶) است و شرط اولیه به صورت معادله‌ی (۷) است.

$$u_y(x, 0, t) = 0 \quad \& \quad u_y(x, H, t) = 0 \quad (5)$$

$$(x, 0, t) = C_{eq} \quad \& \quad \left. \frac{\partial c(x, y, t)}{\partial y} \right|_{z=H} = 0 \quad (6)$$

$$c(x, y, 0) = 0 \quad \& \quad u_x(x, y, 0) = u_y(x, y, 0) = 0 \quad (7)$$

در عبارت‌های بالا u_x مؤلفه‌ی سرعت در جهت x و u_y مؤلفه‌ی سرعت در جهت y است. C_{eq} نیز غلظت تعادلی جزء حل شونده در سطح تماس کربن‌دی‌اکسید و آب است. برای این سامانه غلظت تعادلی در سطح تماس برابر 137 mol/m^3 در نظر گرفته شده است.

عدد‌های بدون بعد

در این مطالعه، از شبیه‌سازی عددی برای یافتن زمان آغاز جابه‌جایی طبیعی^(۱)، طول موج اولیه ناپایداری همرفت و شروع بیش‌ترین^(۲) استفاده می‌شود. عدد شروع از تقسیم کل اختلاط سامانه (حل عددی) به اختلاط مربوط به مکانیزم نفوذ خالص $(Sh = C_{nu}/C_{pd})$ به دست می‌آید. در این تعریف، C_{nu} غلظت متوسط به دست آمده از حل عددی و C_{pd} غلظت متوسط ناشی از نفوذ خالص در همان زمان است. زمانی که مقدار شروع از یک بیش‌تر می‌شود به عنوان مبنای شروع جابه‌جایی طبیعی انتخاب می‌شود [۵]. در این پژوهش، آغاز جابه‌جایی را زمانی گرفته‌ایم که در آن زمان، C_{nu} ۵ درصد بیشتر از C_{pd} شده باشد. استفاده از این رابطه‌های پیمایشی^(۳) می‌تواند کل اختلاط و زمان آن را به منظور

(معادله (۴)) برای تغییرهای چگالی و مدل داری برای جریان سیال برقرار باشد. از اثرهای پراکنش، موئینگی و واکنش ژئوشیمیایی نیز صرف‌نظر شده است.

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

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho g \nabla z) \quad (2)$$

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

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

در معادله‌های بالا u سرعت داری، k تراوایی، μ گرانیوی، p فشار، ρ چگالی، g شتاب گرانش زمین، D ضریب نفوذ مولکولی، C غلظت، t زمان، ρ_0 چگالی آب دست‌نخورده (تازه)، ϕ تخلخل و β نیز ضریب افزایش چگالی است. غلظت اولیه در محیط صفر است، سیال تراکم ناپذیر فرض شده و چگالی محلول تابع غلظت کربن‌دی‌اکسید حل شده در آب است برای این منظور از رابطه خطی تقریب بوزینسکی در معادله (۴) استفاده شده است [۵]. ویژگی‌های مدل مورد استفاده مشابه با حالت ۱۳ در سامانه مورد استفاده در مرجع [۱۵] است. ویژگی‌های این مورد که یک محیط متخلخل همگن، همسان گرد با ضخامت H و اشباع از آب خالص است، در جدول ۱ آورده شده است. توزیع فشار هیدرواستاتیکی نخست در مخزن برقرار است، جریان سیال در محیط متخلخل تک فاز در نظر گرفته شده از گرادیان دمایی صرف نظر شده و سیال نخست ساکن است.

اگر محیط متخلخل به صورت یک مخزن بلند افقی نامحدود با ارتفاع ثابت H (شکل ۱) در نظر گرفته شود، شرایط مرزی

(۱) Onset of natural convection

(۲) Maximum Sherwood number

(۳) Scaling relations

جدول ۱- ویژگی‌های مدل شبیه‌سازی شده مورد استفاده [۱۴].

تراوایی (mD)	تخلخل	گرانروی (mPa.s)	ضریب نفوذ (m ² /s)	اختلاف چگالی (kg/m ³)	ارتفاع (m)	رایلی
115	0.08	0.48	5.0×10 ⁻⁹	6.1	10	354

ارایه شود [۵] که c_1 و c_2 ثابت هستند و t_{DC} زمان بدون بعد بحرانی است که با زمان پیمایشی H/D^2 پیمایش می‌شود، که در کار حسن‌زاده و همکاران برابر $t_{DC} = 50 \cdot Ra^{-2}$ به دست آمده است [۵]. این زمان پایان دوره نفوذ غالب و شروع دوره اختلاط همرفتی است.

حل عددی

به منظور شبیه‌سازی عددی جریان تحت رانش اختلاف چگالی^(۲) که مستعد خطای گسسته سازی است باید دقت شود تا حل صحیح به دست آید. حل عددی برای این چنین سامانه‌هایی به‌طور معمول در $Pe \leq 2$ و $Cr \leq 1$ بدون نوسان و خطای عددی است [۵]. بنابراین از مبنای زیر (معادله‌های (۱۱) و (۱۲)) برای پایداری، صحت حل عددی و به حداقل رساندن خطای عددی در مسئله‌های دو بعدی استفاده می‌شود.

$$Pe = u \frac{\Delta l}{D\phi} \leq 2 \quad (11)$$

$$Cr = u \frac{\Delta t}{\phi \Delta l} \leq 1 \quad (12)$$

که Cr ، Pe به ترتیب عدد کورانت^(۳) و پکلت^(۴) است، u سرعت داری، Δl (I=x,y) اندازه بلوک شبکه^(۵) و Δt گام زمانی شبیه‌سازی است. بیش‌ترین سرعت داری بر پایه بیش‌ترین اختلاف چگالی از طریق معادله (۱۳) به دست می‌آید.

$$u_{max} = \frac{k}{\mu} \Delta \rho g \quad (13)$$

در شبیه‌سازی عددی بیش‌ترین مقدار اندازه بلوک شبکه‌ها با جای‌گذاری بیش‌ترین سرعت داری در معادله پکلت با استفاده از محدودیت عدد پکلت و بیش‌ترین گام زمانی با استفاده از محدودیت عدد کورانت به دست می‌آید. طول موج بحرانی سلول‌های همرفتی با استفاده از آنالیز پایداری از معادله (۱۴) به دست می‌آید [۱۴].

غربالگری آبداه‌های شور برای انتخاب مکان ذخیره‌سازی و هدف‌های ارزیابی ریسک را بدون استفاده از شبیه‌سازی زمان‌بر در پی داشته باشد. با استفاده از تحلیل پایداری خطی^(۱) می‌توان آغاز ناپایداری و طول موج اولیه ناپایداری همرفت را تخمین زد. تخمین رفتار اختلاط بعد از شروع جابه‌جایی با استفاده از تحلیل پایداری خطی ممکن نیست. پایداری چنین سامانه‌هایی با استفاده از عدد رایلی محیط متخلخل (معادله (۸)) تعریف می‌شود. تحلیل پایداری خطی بیان‌کننده این است که رایلی باید بزرگ‌تر از یک مقدار بحرانی معین برای شروع همرفت باشد. رایلی بحرانی برای شروع جابه‌جایی برابر $4\pi^2$ است [۵].

$$Ra = \frac{kg\Delta\rho H}{\mu\phi D} \quad (8)$$

در معادله (۸)، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی سیال عاری از کربن دی‌اکسید و سیال اشباع از آن است.

از راه‌های دیگر تشخیص پایداری سامانه و یافتن آغاز فرایند همرفت طبیعی بررسی انحراف غلظت متوسط به دست آمده از شبیه‌سازی عددی از غلظت متوسط پیش‌بینی‌شده توسط نفوذ خالص است. زمان پیدایش این جدایش و انحراف نشان‌دهنده افزودن مکانیسم اختلاط همرفتی است که برابر با زمان آغاز جابه‌جایی طبیعی است. کسر نهایی انحلال ناشی از نفوذ خالص از معادله (۹) به دست می‌آید.

$$\overline{C_{pd}} = 1 - \frac{\lambda}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2n+1} \right)^2 \exp \left[- \left(\frac{2n+1}{2} \pi \right)^2 t_D \right] \quad (9)$$

در معادله (۹) t_D زمان بدون بعد است که در معادله (۱۰) تعریف می‌شود.

$$t_D = \frac{D \times t}{H^2} \quad (10)$$

همچنین با استفاده از تحلیل پایداری خطی فهمیده می‌شود که زمان بدون بعد آغاز جابه‌جایی می‌تواند با رابطه $t_{DC} = c_1 Ra^{c_2}$

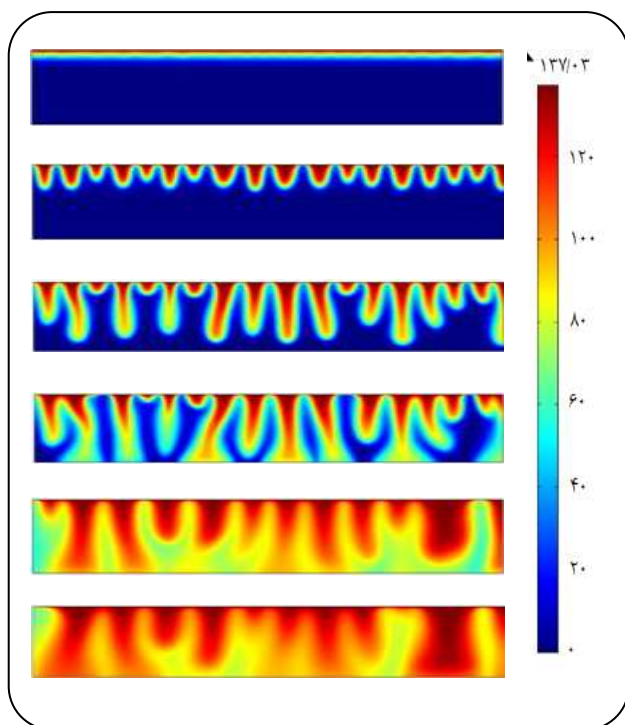
(۱) Linear stability analysis

(۲) Density-driven flow

(۳) Courant number

(۴) Peclet number

(۵) Grid block



شکل ۲- کانتور غلظت کربن دی‌اکسید بر حسب mol/m^3 برای حالت ۱ در مرحله‌های گوناگون اختلاط.

نتیجه‌های حل تحلیلی با حل عددی برابر است زیرا تنها مکانیسم انحلال، مکانیسم نفوذ خالص است.

برای دیدن بهتر اختلاف به دست آمده از حل عددی نسبت به حل تحلیلی نفوذ خالص، نمودار اختلاف نسبی بر حسب زمان بدون بعد در شکل ۴ رسم شده است. در این شکل، اختلاف نسبی

به صورت $\left| \frac{C_{\text{nu}} - C_{\text{pd}}}{C_{\text{pd}}} \right| \times 100$ تعریف می‌شود. افزایش اختلاف ناشی از آغاز فرایند جابه‌جایی طبیعی است.

اگر شکل ۳ برای زمان‌های طولانی‌تر رسم شود، نمودار اختلاط همرفتی می‌تواند به سه دوره تقسیم شود که شامل (a) نفوذ غالب (b) اختلاط میانی (c) اختلاط پایانی است. برای مشخص کردن دوره‌های اختلاط از عدد شروود استفاده می‌کنیم که به صورت نسبت کل اختلاط به اختلاط به دست آمده از نفوذ خالص تعریف می‌شود. در شکل ۵ نمودار سمت چپ دوره‌های اختلاط و نمودار سمت راست عدد شروود بر حسب زمان بدون بعد را نشان می‌دهد. دوره (a) نشان‌دهنده فرایند نفوذ غالب است که در آن، نرخ انحلال کند و وابسته به ضریب نفوذ مولکولی است و

$$\lambda = 4 \cdot \pi \frac{\phi \mu D}{k \Delta \rho g} \quad (14)$$

به منظور اطمینان از نبودن خطای عددی با توجه به شرط کورانت و پکلت اندازه بلوک شبکه‌ها و گام زمانی به دست آمد. در اینجا بر اساس مقادیر جدول ۱، اندازه المان‌ها برابر $(180/H)$ در نظر گرفته شد. مقدار بیش‌ترین گام زمانی بر پایه عدد کورانت از معادله (۱۲) به دست می‌آید. کوچک بودن عدد کورانت باعث کاهش نوسان‌های عددی و در نتیجه، موجب افزایش دقت حل خواهد شد. عدد موج بحرانی بدون بعد از معادله (۱۵) به دست می‌آید [۱۴].

$$a = \frac{2\pi H}{\lambda} \quad (15)$$

که در آن، λ طول موج اختلال است. عدد موج بحرانی از معادله (۱۵) برای این سامانه $17,68$ به دست می‌آید. طول محیط متخلخل استفاده‌شده برای شبیه‌سازی عددی برابر با $L=63$ متر در نظر گرفته شده است که این مقدار به اندازه کافی از طول موج بحرانی بزرگتر است. برای دقت بیشتر، در طی این شبیه‌سازی از المان مرتبه دوم استفاده شده است. حل عددی با اعمال یک اختلال کوچک با استفاده از یک تابع تصادفی مطابق معادله (۱۶) در سطح تماس گاز - آب صورت گرفته است [۱۷].

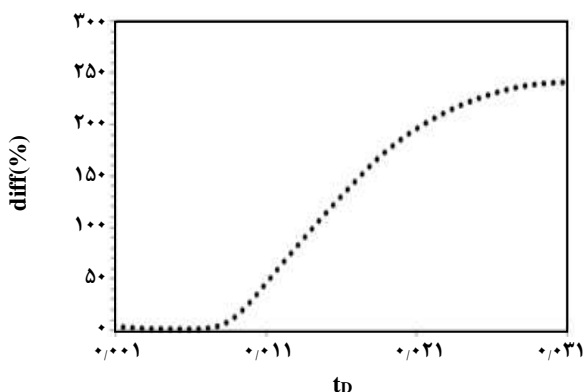
$$C_{\text{eq}} = C \times \left[1 + 0.001 \times \text{rand} \left(\frac{x}{l} \right) \right] \quad (16)$$

نتیجه‌ها و بحث

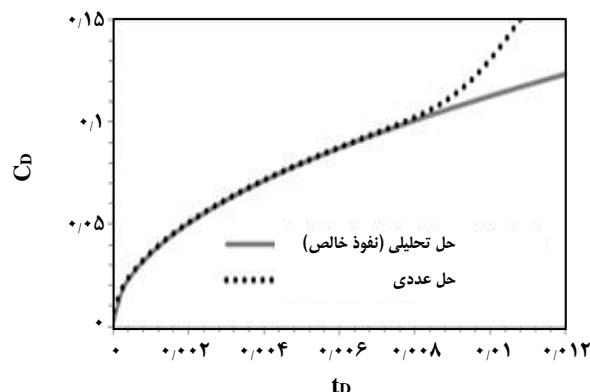
پس از شبیه‌سازی نتیجه‌های زیر به دست می‌آید. نقشه غلظت برای این حالت در مرحله‌های گوناگون اختلاط در شکل ۲ مشخص است. در مقایسه با تعداد موج (انگشتی^(۱)) $17,68$ به دست آمده از تحلیل پایداری خطی تعداد انگشتی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برابر $17,5$ است.

اگر غلظت بدون بعد که نسبت غلظت متوسط محیط به غلظت سطح تماس گاز- مایع در مرز بالایی محیط متخلخل تعریف می‌شود، بر حسب زمان بدون بعد (معادله (۱۰)) برای نتیجه‌های به دست آمده از حل تحلیلی (نفوذ خالص) و حل عددی رسم شود، شکل ۳ به دست می‌آید. نقطه جدایی بین این دو نمودار نشان‌دهنده زمان شروع جابه‌جایی طبیعی است. تا پیش از این زمان،

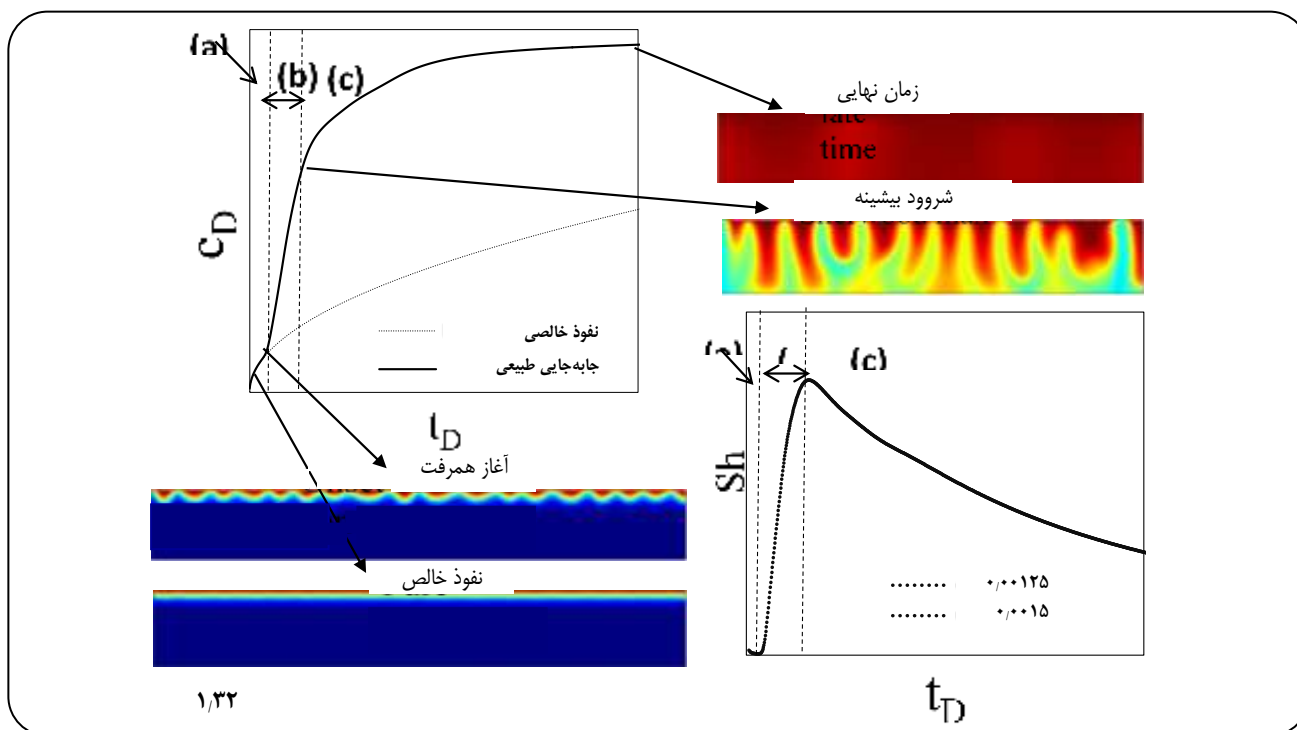
(۱) Finger



شکل ۴- اختلاف ناشی از حل عددی نسبت به حل تحلیلی بر حسب زمان بدون بعد.



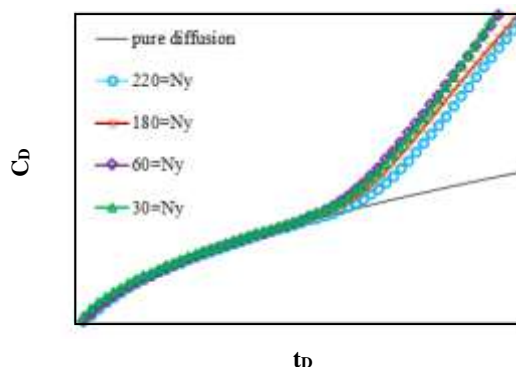
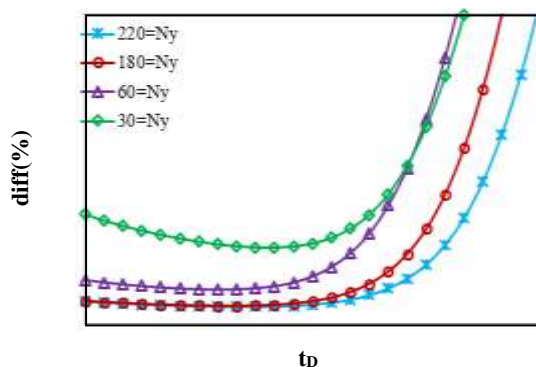
شکل ۳- غلظت بدون بعد بر حسب زمان بدون بعد برای حل تحلیلی (نفوذ خالص) و حل عددی.



شکل ۵ - نمودار انحلال (سمت چپ) و عدد شرود (سمت راست) بر حسب زمان بدون بعد برای تشخیص دوره‌های گوناگون اختلاط.

لایه نفوذی غلظت ناپایدار می‌شود و این ناپایداری در سطح تماس گاز - مایع رشد می‌کند. میزان رشد ناپایداری تابع ویژگی‌های فیزیکی سیال و محیط متخلخل است. با توجه به عدد رایلی سامانه، نرخ انحلال در این دوره از فرایند نفوذ خالص بیش‌تر است و کسر نهایی انحلال به بیش از ۵۰ درصد در پایان این دوره می‌رسد. زمانی که انگشتی‌ها به مرز پایینی می‌رسد نرخ اختلاط با زمان آغاز به کاهش می‌کند که شروع دوره (c) است همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است گذر از دوره (b) به دوره (c)

غلظت متوسط از معادله (۹) به دست می‌آید. زمان این دوره به عدد رایلی آبدسته بستگی دارد و به شروع همرفت محدود می‌شود. در برخی از آبدسته‌ها مکانیزم انتقال جرم، نفوذ خالص باقی می‌ماند تا موقعی که جبهه نفوذ به مرز پایینی برسد. در این دوره عدد شرود برابر یک است. پس از این دوره لایه نفوذی ممکن است ناپایدار شود که مقارن با آغاز فرایند همرفت است، همان‌گونه که در شکل ۵ چپ دیده می‌شود آغاز همرفت کمی پیش‌تر از جدایی نمودار اختلاط همرفتی از نمودار نفوذ خالص است. در دوره (b)



شکل ۷- نمودار اختلاف حل عددی و تحلیلی $(\frac{C_{pd} - C_{nu}}{C_{pd}} \times 100)$ بر حسب زمان بدون بعد در اندازه شبکه‌های گوناگون $(N_y = H/\Delta l)$.

شکل ۶ - غلظت بدون بعد بر حسب زمان بدون بعد در اندازه شبکه‌های گوناگون $(N_y = H/\Delta l)$.

آورده شده است. شکل ۸ اثر تخلخل را روی زمان شروع جابه‌جایی طبیعی و مقدار انحلال کربن‌دی‌اکسید زمانی که تخلخل از ۰/۱ تا ۰/۵ تغییر می‌کند نشان می‌دهد. زمانی که تخلخل سامانه افزایش می‌یابد، مکانیسم نفوذ غالب می‌شود و نرخ انحلال پایین است، به طوری که برای تخلخل‌های ۰/۴ و ۰/۵ تا زمان شبیه‌سازی شده به طور کامل بر روی نمودار نفوذ خالص منطبق می‌شوند. بنابراین با افزایش تخلخل نرخ اختلاط کاهش می‌یابد. با توجه به معادله (۸) رایلی سامانه با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۸ نیز مشخص است با افزایش تخلخل و در نتیجه کاهش عدد رایلی زمان شروع جابه‌جایی طبیعی دیرتر می‌شود.

شکل ۹ اثر تراوایی سامانه را بر روی فرایند اختلاط همرفتی زمانی که تراوایی از ۵۰ میلی داری تا ۱۵۰ میلی داری تغییر می‌کند نشان می‌دهد. سایر مقادیر از جدول ۱ گذاشته شده است. می‌توان دید که زمانی که تراوایی آبد افزایش می‌یابد، آغاز جابه‌جایی طبیعی سریع‌تر رخ می‌دهد و نرخ اختلاط با توجه به سرعت داری افزایش می‌یابد. با افزایش تراوایی سامانه با توجه به معادله (۸) رایلی سامانه افزایش می‌یابد و با افزایش رایلی زمان شروع جابه‌جایی طبیعی کاهش و مقدار اختلاط افزایش می‌یابد.

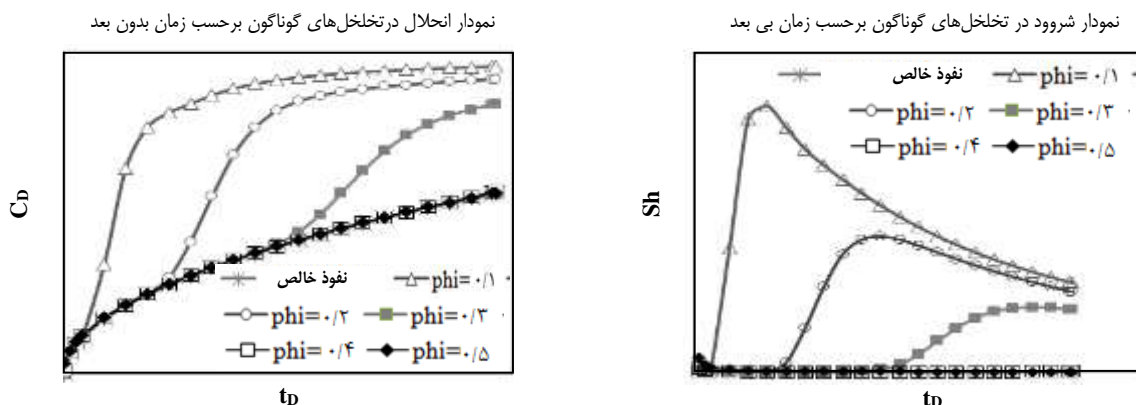
جدول ۲ خلاصه بررسی اثرهای تخلخل و تراوایی را بر روی محدودیت‌های عددی و خروجی‌های شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در جدول ۲ عدد رایلی از معادله (۸) و محدودیت‌های عددی مورد نیاز برای شبیه‌سازی یعنی Δl_{max} از معادله (۱۱) و Δt_{max} از معادله (۱۲) به دست آمده و با استفاده از تحلیل پایداری مورد استفاده حسن‌زاده و همکاران [۱۴] طول موج بحرانی (۸)

در بیشینه مقدار عدد شروود (شروود بیش‌ترین) رخ می‌دهد. لایه‌بندی گرادیان چگالی در این دوره باعث تقلیل دادن و کاهش نرخ انحلال در این دوره می‌شود.

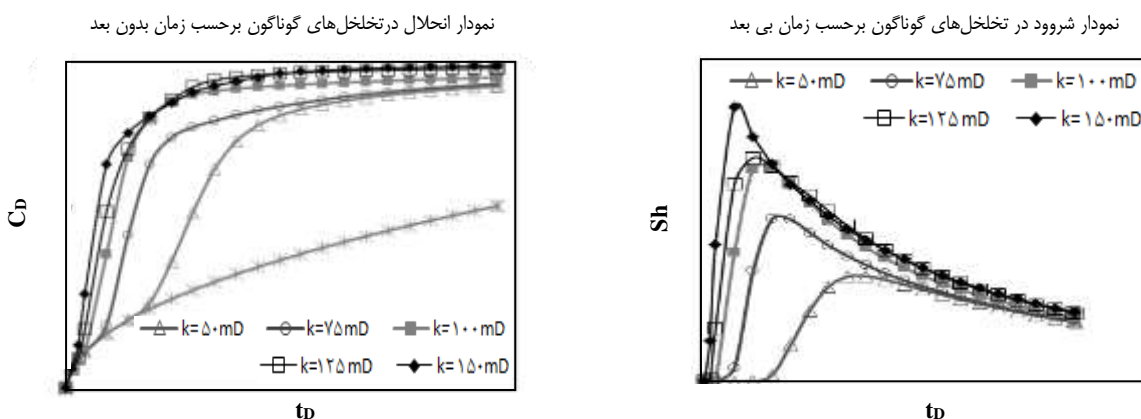
در این قسمت، نتیجه‌های شبیه‌سازی براساس تغییر شبکه‌بندی $(N_y = 220, 180, 60, 30)$ برای این سامانه ارایه و تحلیل می‌شود. N_y تعداد شبکه در جهت y می‌باشد. نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی در تعداد شبکه گوناگون در راستای قائم محیط در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است. در تعداد شبکه ۱۸۰ تا ۲۲۰ تایی شرط پکلت و کورانت رعایت شده است. با توجه به شکل با افزایش تعداد شبکه دقت حل افزایش می‌یابد.

به منظور اطمینان از جواب عددی به دست آمده از شبیه‌سازی با توجه به معیارهای مورد استفاده آدین و همکاران [۱۷] در تأثیر اندازه شبکه، گام زمانی و مرتبه المان شبیه‌سازی‌ها بر پایه محدودیت‌های عدد کورانت و پکلت انجام شده است. در شبیه‌سازی‌ها به منظور پایین آوردن زمان اجرای برنامه و اطمینان از درستی پاسخ عددی از المان مرتبه دوم و بیش‌ترین اندازه شبکه (۱۸۰) و گام زمانی مجاز به استفاده با توجه به محدودیت کورانت و پکلت استفاده شده است.

به منظور بررسی رفتار سامانه در رایلی‌های گوناگون و همچنین بررسی تأثیر تغییرهای تخلخل و تراوایی سامانه روی فرایند اختلاط همرفتی، سامانه با ویژگی‌های ارایه شده در جدول ۱ در ۵ حالت با تخلخل‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ و حالت با تراوایی‌های ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ میلی داری مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های همه حالت‌ها در جدول ۲



شکل ۸- اثر تغییر تخلخل بر مقدار انحلال کربن دی اکسید و زمان شروع جابه جایی طبیعی و عدد شروود.



شکل ۹- اثر تغییر تراوایی بر مقدار انحلال کربن دی اکسید و زمان شروع جابه جایی طبیعی و عدد شروود.

ضخامت آبدۀ است با در نظر گرفتن $1179Ra^{-2} = t_{Dc}$ زمان بدون بعد برای شروع جابه جایی طبیعی مستقل از ضخامت آبدۀ است. در تخلخل های ۴۰ درصد و ۵۰ درصد جابه جایی در زمان های طولانی تر از $t_D = 0.25$ رخ می دهد به خاطر این که عدد رایلی در این دو مورد به عدد رایلی بحرانی نزدیک است و در زمان های طولانی در اثر نفوذ کربن دی اکسید به تقریب جبهه ی مخلوط آب و کربن دی اکسید به مرز پایینی رسیده و همان گونه که در شکل ۱۱ نیز دیده می شود در زمان های طولانی برای تخلخل ۴۰ درصد انگشتی های تشکیل شده خیلی محسوس نیستند و مکانیسم نفوذ غالب است.

با افزایش تراوایی مطابق جدول ۲ عدد رایلی نیز طبق معادله (۸) افزایش می یابد. در نتیجه ی افزایش عدد رایلی، محدودیت های عددی سنگین تر شده و مقدار گام زمانی و اندازه شبکه بندی کاهش

از معادله (۱۴) و عدد موج بحرانی (a) از معادله (۱۵) به دست آمده است. زمان شروع جابه جایی طبیعی، شروود بیشترین، زمان شروود بیشترین و میزان اختلاط در شروود بیش تر با شبیه سازی عددی به دست آمده است. طبق معادله (۸) عدد رایلی با افزایش تخلخل کاهش می یابد و همچنین محدودیت های عددی ساده تر می شود و نیاز به استفاده از شبکه بندی ریزتر و گام زمانی کوچک نیست. و زمان اجرای شبیه سازی نیز بسیار کاهش می یابد. همچنین با افزایش تخلخل در نتیجه کاهش عدد رایلی، طول موج بحرانی افزایش یافته و در نتیجه تعداد موج بحرانی نیز کاهش می یابد. همان گونه که در شکل ۱۰ و جدول ۲ نیز مشخص است با افزایش عدد رایلی زمان شروع جابه جایی کاهش می یابد. با توجه به معادله ی (۱۰) زمان بی بعد با توان دوم ضخامت آبدۀ رابطه ی عکس دارد و عدد رایلی نیز متناسب با

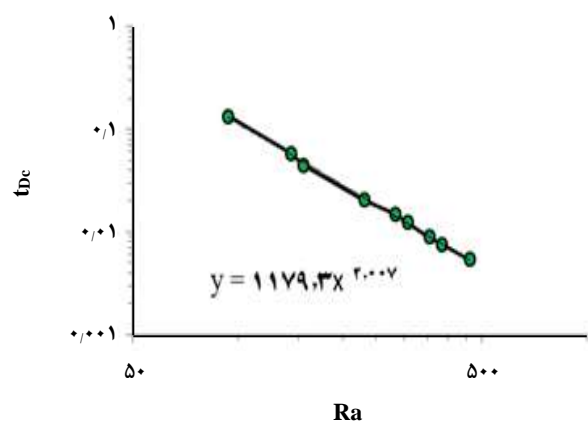
جدول ۲- اثر تخلخل و تراوایی بر روی محدودیت‌های عددی و نتیجه‌های مسئله

ویژگی‌های مدل	رایلی	Δl_{max} (m)	Δt_{max} (s)	λ	a	زمان شروع جابه‌جایی	شروود بیش‌ترین	زمان شروود بیش‌ترین	اختلاط در شروود بیش‌ترین %
مدل ارایه شده در جدول ۱	۳۵۴	۰٫۰۵۶۵	$۳٫۲ \times ۱۰^{-۵}$	۳٫۵۵	۱۷٫۶۸	۰٫۰۰۸۵	۳٫۱۹۹	۰٫۰۳۵۵	۶۸%
تخلخل ۱۰%	۲۸۳	۰٫۰۷۰۶	۵×۱۰^{-۵}	۴٫۴۳	۱۴٫۱۵	۰٫۰۱۴۲	۳٫۱۱۲	۰٫۰۴۳۵	۷۳%
تخلخل ۲۰%	۱۴۲	۰٫۱۴۱۳	۲×۱۰^{-۶}	۸٫۸۷	۷٫۰۷	۰٫۰۵۵۷	۲٫۰۶۳	۰٫۱۲۲۲	۸۱%
تخلخل ۳۰%	۹۴	۰٫۲۱۲۰	$۴٫۵ \times ۱۰^{-۶}$	۱۳٫۳۱	۴٫۷۱	۰٫۱۲۷۵	۱٫۵	۰٫۲۲۴۲	۸۰٫۵%
تخلخل ۴۰%	۷۱	۰٫۲۸۲	۸×۱۰^{-۶}	۱۷٫۷۵	۳٫۵۳	در زمان‌های طولانی	-	-	-
تخلخل ۵۰%	۵۶	۰٫۳۵۳	$۱٫۲۴ \times ۱۰^{-۷}$	۲۲٫۱۹	۲٫۸۲	"	-	-	-
تراوایی ۵۰md	۱۵۴	۰٫۱۳۰۰	$۱٫۷ \times ۱۰^{-۶}$	۸٫۱۶	۷٫۶۸	۰٫۰۴۴۵	۲٫۱۵۲	۰٫۱۰۵۵	۷۸٫۸%
تراوایی ۷۵md	۲۳۰	۰٫۰۸۶۶	$۷٫۵ \times ۱۰^{-۵}$	۵٫۴۴	۱۱٫۵۳	۰٫۰۲۰۱	۲٫۸	۰٫۰۵۳۵	۷۳%
تراوایی ۱۰۰md	۳۰۷	۰٫۰۶۵۰	$۴٫۲ \times ۱۰^{-۵}$	۴٫۰۸	۱۵٫۳۵	۰٫۰۱۱۸	۳٫۳۷	۰٫۰۴۲۲	۷۸٫۲%
تراوایی ۱۲۵md	۳۸۴	۰٫۰۵۲۰	$۲٫۷ \times ۱۰^{-۵}$	۳٫۲۶	۱۹٫۲۲	۰٫۰۰۷۲	۳٫۴۳۳	۰٫۰۳۶	۷۳%
تراوایی ۱۵۰md	۴۶۱	۰٫۰۴۳۳	$۱٫۸۸ \times ۱۰^{-۵}$	۲٫۷۲	۲۳٫۰۷	۰٫۰۰۵۱	۳٫۹۸۳	۰٫۰۲۴	۷۰%

افزایش و زمان معادل آن کاهش می‌یابد و نرخ اختلاط با توجه به سرعت دارسی افزایش می‌یابد و در مدت زمان کمتری مقدار اختلاط بیش‌تری صورت می‌گیرد. این افزایش انحلال در کوتاه مدت خطر نشت کربن‌دی‌اکسید را کاهش می‌دهد و ایمنی فرایند را به دنبال دارد.

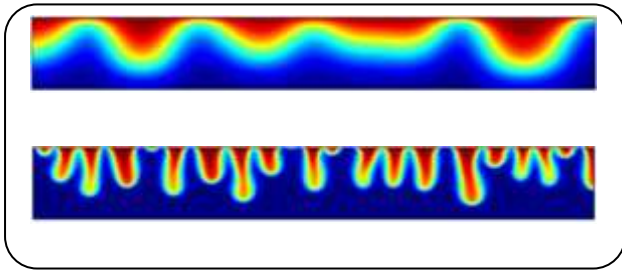
با توجه به شکل ۱۲ جبهه غلظت برای حالت با رایلی بزرگ‌تر خیلی سریع حرکت می‌کند و تعداد انگشتی‌ها نیز بیش‌تر است. در حالت رایلی کم‌تر، تعداد انگشتی کم‌تری توسعه می‌یابد و همچنین مقدار چشمگیری لکه نفوذی در قسمت جلو جبهه‌ی غلظت دیده می‌شود که این انگشتی‌ها با حرکت مستقل و بدون تعامل با انگشتی‌ها مجاور به نظر می‌رسند در حالی که در رایلی بزرگ ناپایداری به شدت توسعه می‌یابد و منجر به انگشتی‌های پیچیده می‌شود.

سامانه با ویژگی‌های ارایه شده در جدول ۱ این بار با همان ویژگی‌ها و تخلخل ۸ درصد و تراوایی افقی ۱۱۵ میلی دارسی در غیر همسانگردی نسبت تراوایی kv/kh از ۰٫۲ تا ۱ مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۳ با افزایش نسبت غیرهمسانگردی شروع جابه‌جایی زودتر اتفاق می‌افتد و نرخ

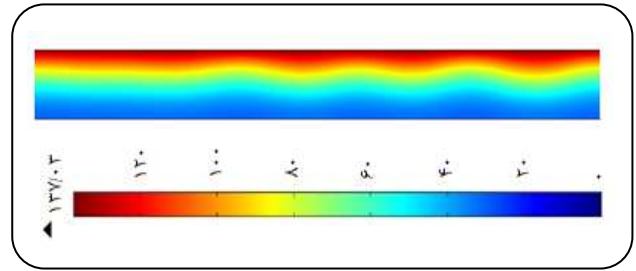


شکل ۱۰ - آغاز جابه‌جایی بر حسب تابعی از عدد رایلی با استفاده از شبیه‌سازی عددی.

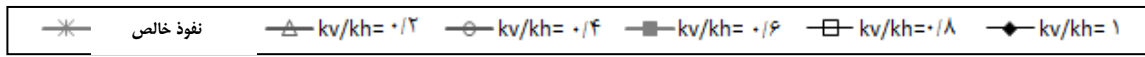
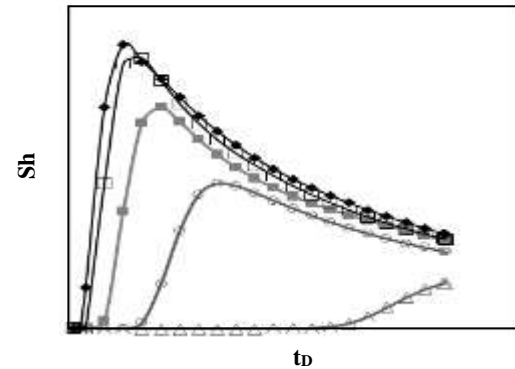
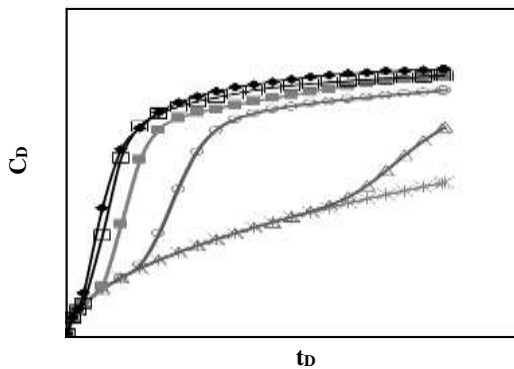
و زمان اجرای برنامه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش تراوایی و افزایش عدد رایلی، طول موج بحرانی کاهش یافته و عدد موج بحرانی یا به عبارتی تعداد انگشتی‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به نتیجه‌های شبیه‌سازی با افزایش تراوایی زمان شروع جابه‌جایی طبیعی کاهش می‌یابد. همچنین شروود بیش‌تر با افزایش تراوایی



شکل ۱۲- کانتور غلظت در رایلی‌های (الف) ۹۴ و (ب) ۴۶۱ به ترتیب در زمان‌های ۲/۷e۹ و ۲e۸ ثانیه است..



شکل ۴- ایجاد ناپایداری ضعیف در زمان‌های طولانی برای آبدۀ با تخلخل ۴۰ درصد.



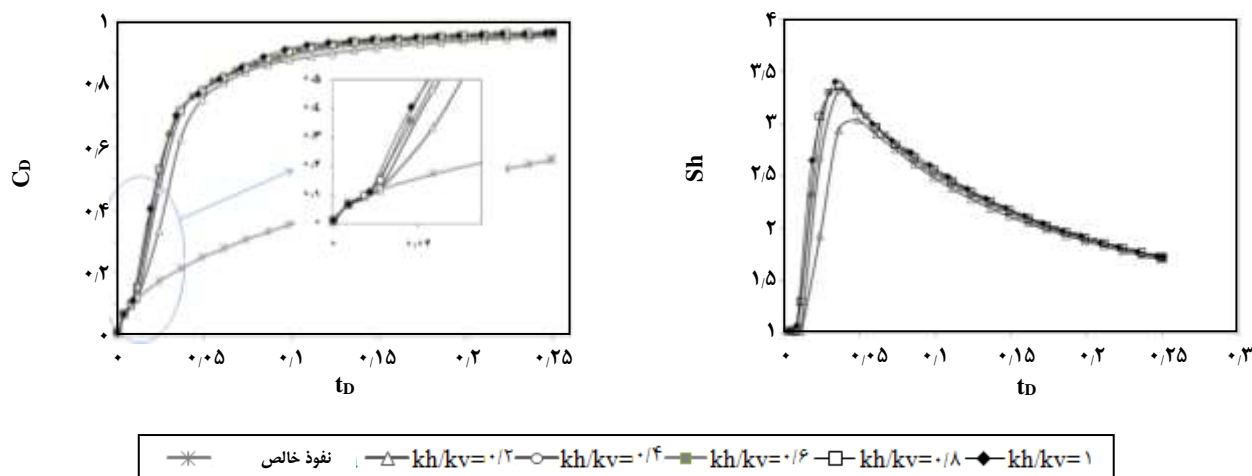
شکل ۱۳- تأثیر نسبت غیر همسانگردی kv/kh بر مقدار انحلال کربن‌دی‌اکسید در یک سامانه همگن - غیرهمسانگرد.

- ۱) اندازه شبکه نامناسب موجب خطای عددی می‌شود. پایداری و همگرایی شبیه‌سازی‌های عددی با رعایت بازه‌ی عدد پکلت و کورانت به‌دست می‌آیند.
- ۲) با افزایش رایلی تعداد انگشتی‌ها افزایش می‌یابد و آغاز جابه‌جایی زودتر رخ می‌دهد.
- ۳) زمانی که تراوایی آبدۀ افزایش می‌یابد، زمان آغاز جابه‌جایی طبیعی سریع‌تر رخ می‌دهد و نرخ اختلاط با توجه به سرعت دارسی افزایش می‌یابد. با افزایش تراوایی سامانه، رایلی سامانه افزایش می‌یابد و با افزایش رایلی، زمان شروع جابه‌جایی طبیعی کاهش و مقدار اختلاط افزایش می‌یابد.
- ۴) با افزایش تخلخل عدد رایلی کاهش، طول موج بحرانی افزایش، عدد موج بحرانی کاهش و با توجه محدودیت عدد پکلت و کورانت شبکه‌بندی و گام زمانی بزرگتر انتخاب می‌شود و زمان اجرای برنامه کاهش می‌یابد.
- ۵) تراوایی آبدۀ به ویژه تراوایی عمودی اثر چشمگیری

اختلاط با افزایش مقدار کل تراوایی سامانه افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در نمودار نیز دیده می‌شود نسبت غیر همسانگردی برای مقدار زیر ۰/۴ اثر زیادی بر شروع جابه‌جایی طبیعی دارد. سپس تراوایی عمودی ثابت و برابر ۱۱۵ میلی دارسی در نظر گرفته شده و در غیر همسانگردی نسبت تراوایی kv/kh از ۰/۲ تا ۱ مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۴ با افزایش نسبت غیرهمسانگردی شروع جابه‌جایی زودتر اتفاق می‌افتد ولی نسبت به حالت قبل که تراوایی افقی ثابت بود و تراوایی عمودی کاهش می‌یافت، مقدار آن چشمگیر و محسوس نیست. همان‌گونه که مشاهده می‌شود زمان شروع جابه‌جایی و فرایند اختلاط تابع قوی از تراوایی عمودی آبدۀ به دلیل جهت حرکت انگشتی‌ها و مسیر اختلاط و یا سلول‌های همرفتی می‌باشد.

نتیجه گیری

مهم‌ترین نتیجه‌هایی که از این پژوهش به‌دست آمده به شرح زیر است.



شکل ۱۴- تاثیر نسبت غیر همسانگردی kh/kv بر مقدار انحلال کربن دی اکسید در یک سامانه همگن-غیرهمسانگرد.

قدردانی

نویسندگان از مدیریت پژوهش و فناوری سازمان منطقه ویژه اقتصادی پارس در حمایت از این کار تشکر می کنند.

روی زمان شروع جابه جایی و فرایند اختلاط همرفتی دارد، بنابراین باید به عنوان یکی از پارامترهای اصلی در انتخاب سایت ذخیره سازی در نظر گرفته شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵،۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶،۷،۲۴

مراجع

- [1] Lokhorst, A. and T. Wildenborg, Introduction on CO₂ Geological Storage-Classification of Storage Options, *Oil & Gas Science and Technology*, **60**(3): 513-515 (2005).
- [2] Bachu S., Bonijoly D., Bradshaw J., Burruss R., Holloway S., Christensen N.P., Mathiassen O.M., CO₂ Storage Capacity Estimation: Methodology and Gaps, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **1**(4): 430-443 (2007).
- [3] Heinrich J.J., Herzog H.J., Reiner D.M., "Environmental Assessment of Geologic Storage of CO₂", *Second National Conference on Carbon Sequestration*. Citeseer (2003).
- [4] Large Scale Integrated CCS Projects. <http://www.globalccsinstitute.com/projects/browse> 2013.
- [5] Hassanzadeh H., "Mathematical Modeling of Convective Mixing in Porous Media for Geological CO₂ Storage", Dissertation, University of Calgary (2006).
- [6] Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M., Meyer L., "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage", *Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva (Switzerland). Working Group III* (2005).
- [7] Kaldi J., Gibson-Poole C., "Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterization for CO₂ Storage Projects", *Report No: RPT08-1001, CO2CRC, Canberra, ACT, AU*, (2008).
- [8] Bénard H., Les Tourbillons Cellulaires Dans Une Nappe Liquide., *ev. Gen. Sci. Pures Appl.*, **11**(1309): 1261-1271 (1900).

- [9] Rayleigh L., "On the Dynamics of Revolving Fluids", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, **93**(648): 148-154 (1917).
- [11] kheng K., Torng T.A., SAM, "Simulations of the Onset of Transient Convection in Porous Media under Fixed Surface Temperature Boundary Condition Second International Conference on CFD in the Mineral and Process Industries", *CSRIO, Melbourne, Australia*, (1999).
- [11] Weir G.J., White S.P., Kissling W.M., Reservoir Storage and Containment of Greenhouse Gases, *Transport in Porous Media*, **23**(1): 37-60 (1996).
- [12] Lindeberg E., Wessel-Berg D., Vertical Convection in an Aquifer Column under a Gas Cap of CO₂, *Energy Conversion and Management*, **38**: S229-S234 (1997).
- [13] Hassanzadeh H., Pooladi-Darvish M., Keith D., Modelling of Convective Mixing in CO Storage, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **44**(10): 43-51 (2005).
- [14] Hassanzadeh H., Pooladi-Darvish M., Keith D.W., Scaling Behavior of Convective Mixing, with Application to Geological Storage of CO₂, *AIChE journal*, **53**(5): 1121-1131 (2007).
- [15] Hassanzadeh H., Pooladi-Darvish M., Keith D.W., The Effect of Natural Flow of Aquifers and Associated Dispersion on the Onset of Buoyancy-Driven Convection in a Saturated Porous Medium, *AIChE Journal*, **55**(2): 475-485 (2009).
- [16] Islam A.W., Sharif M.A., Carlson E.S., "Density Driven (Including Geothermal Effect) Natural Convection of Carbon Dioxide in Brine Saturated Porous Media in the Context of Geological Sequestration", *Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, At Stanford University, CA*, (2013).
- [17] Azin R., Jafari Raad S.M., Osfouri Sh., Fatehi R., Onset of Instability in CO₂ Sequestration into Saline Aquifer: Scaling Relationship and the Effect of Perturbed Boundary, *Heat and Mass Transfer*, **49**(11): 1603-1612 (2013).
- [۱۸] جدی زاهد، جواد؛ رستمی، بهزاد؛ بررسی تغییرات تراوایی به دلیل رسوب نمک در فرایند ترسیب گاز کربن دی اکسید، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۳۳**(۳): ۶ تا ۷۳ (۱۳۹۶).
- [19] Emami-Meybodi H., Hassanzadeh., Green Ch. P., Ennis-King J.E., Convective Dissolution of CO₂ in Saline Aquifers: Progress in Modeling and Experiments, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **40**: 238-266 (2015).
- [20] Multiphysics C., 4.3 User's Guide., COMSOL (2012).