

## ذخیره‌سازی $CO_2$ در مخزن آبدۀ شکافدار جهت کاهش آلودگی زیست‌محیطی: ارزیابی تاثیرات بازشدگی و زاویه شکاف

پرنیا ظفری<sup>۱</sup>، احسان موسوی<sup>۲\*</sup>، مهران قلی‌نژاد<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهره‌برداری، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران
  - ۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی نفت و معدن، تهران، ایران
  - ۳- مرکز تحقیقات مدل‌سازی و بهینه‌سازی در علوم و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
- \* نویسنده مسئول مکاتبات: Se.Moosavi@yahoo.com و Se\_Moosavi@azad.ac.ir

### چکیده

لزوم مداوم به سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع انرژی در سراسر جهان و سرعت نسبتاً تدریجی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، سبب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله  $CO_2$  در جو شده است. به این منظور، راهبردهای مقابله با گرمایش جهانی و تغییرات زیست‌محیطی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در دو دهه اخیر توسعه فناوری جذب و ذخیره‌سازی  $CO_2$  در سازندهای زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است. مخازن آبدۀ به سبب پتانسیل بالا راهکار مطلوبی جهت ذخیره‌سازی  $CO_2$  می‌باشند. با انحلال  $CO_2$  فوق بحرانی در مخزن آبدۀ به توجه به فشار، دما و میزان شوری، چگالی آب شور بین ۰/۱ تا ۱ درصد افزایش یافته و منجر به ظهور ناپایداری و بالتبع بروز انگشتی‌ها در سیستم جریانی محیط و پدیده‌ی اختلاط همرفتی را موجب می‌شود. در این مقاله، با تمرکز بر تاثیر پارامترهای بازشدگی و زاویه‌ی شکاف بر ذخیره‌سازی  $CO_2$  در مخزن آبدۀ شکافدار، شبیه‌سازی دو بعدی به کمک نرم‌افزار COMSOL multiphysics 4.3 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله حاکی از آن است که، با افزایش بازشدگی شکاف، بهبود ذخیره‌سازی  $CO_2$  طی دوره‌ی ۴۰ سال، قابل ملاحظه است. همچنین، با کاهش زاویه‌ی شکاف نسبت به حالت عمود، انگشتی‌ها پیشروی بیشتری به درون آبدۀ داشته است و سبب افزایش ایمنی ذخیره‌سازی خواهد شد.

کلمات کلیدی: ذخیره‌سازی  $CO_2$ ، زیست‌محیطی، مخازن آبدۀ شکافدار، اختلاط همرفتی، COMSOL.

### مقدمه

مکانیسم به دام‌افتادگی ناشی از انحلال،  $CO_2$  فوق بحرانی در اثر پدیده‌ی نفوذ به درون آب سازندی وارد شده و با پیشروی پدیده‌ی نفوذ، موجب ظهور ناپایداری و بالتبع بروز انگشتی‌ها در سیستم جریانی می‌گردد (Szulczewski et al., 2013). پدیده‌ی ناپایداری و اختلاف چگالی توسط بنارد ارائه شد. این پدیده در اثر تغییرات دمایی با قرار دادن آب بین دو صفحه‌ی موازی که فاصله‌ی کمی دارند، مورد بررسی قرار گرفت. نامبرده با افزایش دمای صفحه‌ی پایینی دریافت که انرژی گرمایی منتقل شده به سیال از طریق رسانش گرمایی صفحه، منجر به حرکت سیال می‌شود (Bénard, 1900). سپس رایلی، با مساوی قرار دادن نیروی گرانشی با نیروی اصطکاک ناشی از ویسکوزیته سیال، پارامتر حاصله را «رایلی» اطلاق نمود. این عدد به پایه اصلی پدیده‌ی همرفتی تبدیل شد، به طوری که با تخمین این پارامتر می‌توان امکان همرفت جریان را پیش‌بینی نمود (Rayleigh, 1917). لیدنبرگ و وسل-برگ، معادله‌ای بر پایه‌ی حجم

مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش قابل توجه گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، تخریب لایه‌ی اوزون و تغییرات اقلیمی شده است (Arshad et al., 2019). ذخیره‌دی اکسیدکربن ( $CO_2$ ) در سازندهای زمین‌شناسی بالانحص آبدۀهای عمیق به دلیل ظرفیت بالای ذخیره‌سازی، توزیع وسیع در سراسر جهان، تخلخل و تراوایی مطلوب گزینه‌ی مناسبی جهت مقابله با مشکلات زیست‌محیطی می‌باشند (Saeedi, 2012, Metz et al., 2005). به طوری که کاهش ۱۷ درصد انتشار  $CO_2$  جهانی توسط فناوری جذب و ذخیره‌سازی تا سال ۲۰۵۰ تخمین زده شده است (IPCC, 2005, Edenhofer, 2015). با تزریق  $CO_2$ ، مکانیسم‌های ذخیره‌سازی در سازندهای زمین‌شناسی عبارتند از: (۱) به دام‌افتادگی ساختاری، (۲) به دام‌افتادگی موینگی، (۳) به دام‌افتادگی ناشی از انحلال و (۴) به دام‌افتادگی ناشی از تشکیل کانی (Ajayi et al., 2019, Fetter et al., 2017). در

سطح شکستگی را بر انحلال  $CO_2$  و انتشار انگشتی ها، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وجود شکاف سبب تراکم انگشتی ها جهت رشد مسیر نفوذپذیری می شود. علاوه بر آن، جهت گیری شکاف، سبب افزایش انحلال در راستای ذخیره سازی  $CO_2$  می شود. همچنین، در سیستم های شکستگی چندگانه، نفوذپذیری ماتریس دارای اثر غالب و مثبت بر ذخیره سازی  $CO_2$  می باشد (Rezki & Foroozesh, 2019). سیلویا و ساموئل، روشی تحلیلی جهت ارزیابی نرخ تزریق  $CO_2$  که ذخیره سازی را پیشینه می کند، ارائه دادند. این روش، تحت مدل های مختلف تعداد چاه ها و فاصله بین چاه ها تخمین زده شد (De Simone and Krevor, 2021). شچیپانو و همکاران، بر جنبه های تزریق دوره ای  $CO_2$  به آبدی شور بی نهایت با استفاده از مدل مکانیکی مخزن، از جمله مدیریت فشار و ظرفیت ذخیره سازی تمرکز کردند. طبق نتایج حاصله، فشار انبساط  $CO_2$  تحت تاثیر موقعیت چاه در ساختار زمین شناسی و اندازه آبدی می باشد (Shchipanov et al., 2022).

در این مقاله، به منظور بررسی پدیده های همرفتی و شکل گیری انگشتی های حاصل از ذخیره سازی  $CO_2$ ، شش مدل با محوریت اختلاف میزان بازشدگی و زاویه ی شکاف طی دوره ی ۴۰ سال شبیه سازی شده است. نتایج حاصله حاکی از تاثیر وجود شکستگی ها در برهم کنش انگشتی ها و بهبود ذخیره سازی  $CO_2$  می باشد.

### معادلات حاکم

شروع ناپایداری های موجود در سیستم و گذر از حالت نفوذ مولکولی به همرفتی توسط پارامتر رایلی تعیین می شود. عدد مذکور، توازن در انتقال جرم را در پدیده های نفوذ مولکولی و همرفتی بیان می کند که در واقع نسبت نیروی شناوری به نیروی نفوذ مولکولی است. عدد رایلی در محیط متخلخل به صورت رابطه (۱) ارائه شده است (Lapwood, 1948, Hassanzade et al., 2007).

$$Ra = \frac{\Delta \rho g H K}{\mu \phi D} \quad (1) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه مذکور،  $\Delta \rho$  اختلاف چگالی بین آب و آب اشباع از  $CO_2$  ( $kg/m^3$ )،  $g$  شتاب گرانشی زمین ( $m/s^2$ )،  $H$  ارتفاع سازند مورد بررسی ( $m$ )،  $K$  تراوایی سازند ( $m^2$ ).

گرما و شار  $CO_2$  با توجه به دمای میدان و نفوذ مولکولی با احتساب معیار پایداری جهت جابه جایی همرفتی در محیط متخلخل ارائه دادند. نامبردگان دریافتند زمانی که گاز به داخل آبدی تزریق می شود نیروهای فیزیکی متعددی بر انتقال آن در محیط متخلخل دخیل هستند. با نفوذ تدریجی  $CO_2$  به آب، گرادیان چگالی در سیستم شکل می گیرد و با شروع جریان های عمودی همرفتی میزان ظرفیت ذخیره سازی آبدی افزایش چشمگیری می کند (Lindeberg & Wessel-Berg, 1997). حسن زاده و همکاران اثر پارامترهای گوناگون را در همرفتی مورد بررسی قرار دادند. مدل دو بعدی از مخزن با اثر نفوذ مولکولی و همرفتی مورد مطالعه محققین قرار گرفت. نامبردگان دریافتند که دو مقطع زمانی مهم وجود دارد، زمانی که همرفتی آغاز می شود و سپس زمانی که انحلال به طور کامل انجام می گیرد (Hassanzade et al., 2004). نید و سیمونز، عدد رایلی در سیستم های همگن را با استفاده از خصوصیات میانگین تعریف کردند که می تواند تخمین بهینه ای ارائه و فرآیند همرفت را پیش بینی کند (Nield & Simmons, 2007). هان و همکاران، اثر تغییر نفوذپذیری (ناهمگنی سازند) بر به دام انداختن  $CO_2$  توسط همرفت طبیعی ناشی از چگالی و مهاجرت  $CO_2$  در سفره های آب شور را بصورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که هندسه سازندهای زمین شناسی تأثیر بیشتری بر میزان  $CO_2$  محبوس شده نسبت به مقدار نفوذپذیری مؤثر سازند دارد (Han et al., 2010). آیدینگ و بلانت، به تله افتادن  $CO_2$  در اثر انحلال در سفره های آبی دارای شکاف را با استفاده از راه حل های تحلیلی در محیط های متخلخل بررسی کردند. وجود یک شکاف در مدل آبدی، سبب افزایش انحلال  $CO_2$  از ۱۶/۹ درصد به ۲۱/۶ درصد خواهد شد (Iding, & Blunt, 2011). وجویک و گرف، ایجاد همرفت درون و بین شکاف در محیط های متخلخل با نفوذپذیری کم را با استفاده از مدل سه بعدی مورد بررسی قرار دادند. نویسندگان تخمین زدند که شروع همرفت در مدار شکست منظم دو بعدی و سه بعدی را می توان با عدد رایلی بحرانی، معادل با نصف عدد رایلی بحرانی یک شکاف عمودی منفرد تعیین کرد. همچنین، همرفت بین شکستگی در امتداد مدار شکاف، محتمل ترین حالت همرفت است و بیشترین تأثیر را از نظر انتقال املاح دارد (Vujević & Graf, 2015). جمال و فروزش، اثر چگالی، جهت گیری، نفوذپذیری و زبری

- ✓ شار جرمی  $(\partial c / \partial x)$  در مرزهای جانبی و پایینی در تمامی زمان‌ها وجود ندارد (تغییرات غلظت در مرزهای جانبی و پایینی وجود ندارد).
- ✓ غلظت تعادلی گاز  $CO_2$  در مرز فوقانی مدل، ثابت و برابر  $910 \text{ mol}/m^3$  است.
- ✓ در زمان صفر، سیال ساکن بوده و غلظت گاز در تمامی محیط متخلخل برابر صفر است.

#### شبیه‌سازی مدل

به منظور شبیه‌سازی، مدل در حین انحلال گاز  $CO_2$  در آبده مطابق فضای ۲ بعدی مستطیل شکل (ارتفاع ۱۵ متر و طول ۳۰ متر) در نظر گرفته شده است. این مخزن آبی با دو شکاف در عمق یک کیلومتری قرار دارد. شکل ۱ نمایی از مدل ارائه شده را نشان می‌دهد. در بخش مش‌بندی، تقسیم‌بندی گریدها به اندازه ۰/۲ متر و بیشترین اندازه تغییرات چگالی با حل شدن  $CO_2$  در آب که تابعی از غلظت  $CO_2$  است، رخ می‌دهد. در این مدل جهت تغییرات چگالی و تأثیر آن در مدل داریسی از تقریب خطی بوزینسک استفاده شده است. (رابطه ۶).

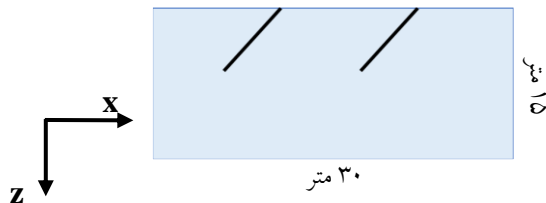
$$\rho = \rho_0 + \beta \times C \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در رابطه فوق:

$C$ : غلظت  $CO_2$  ( $\text{mol}/m^3$ ).

$\rho_0$ : چگالی اولیه آبده ( $\text{mol}/m^3$ ).

$\beta$ : ضریب افزایش چگالی، تابع انحلال پذیری ذره‌ی حل شونده در آب سازندی ( $\text{kg}/\text{kmol}$ ).



شکل ۱- نمایی از مدل مورد هدف

$\mu$  ویسکوزیته (Pa.s)،  $\phi$  تخلخل و  $D$  ضریب نفوذ ( $m^2/s$ ) است. عدد رایلی اگر از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد، ناپایداری شکل خواهد گرفت و پدیده همرفتی رخ می‌دهد که به ویژگی‌های مرزی سیستم بستگی دارد. معادلات حاکم بر حرکت ذرات با چگالی متغیر در اثر تزریق  $CO_2$  در محیط متخلخل اشباع از آب مطابق قوانین مربوط پیوستگی در معادله انتشار پیروی می‌کند که به ترتیب جریان داریسی در ماتریس (رابطه ۳) و جریان داریسی در شکستگی مطابق روابط ۴ و ۵ می‌باشند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho) + \nabla(\rho u) = Q_m \quad \text{رابطه (۲)}$$

رابطه (۳)

$$u = -\frac{k_f}{\mu}(\nabla_T \rho + \rho g)$$

در رابطه فوق،  $u$  سرعت

داریسی،  $k$  تراوایی،  $\mu$  ویسکوزیته،  $\varepsilon_p$  تخلخل ماتریس،  $\nabla \rho$  گرادیان فشار،  $g$  شتاب گرانشی،  $\nabla(\rho u)$  ترم همرفتی است.

رابطه (۴)

$$d_f \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho) + \nabla_T(d_f \rho u) = d_f Q_m$$

رابطه (۵)

$$u = -\frac{k_f}{\mu}(\nabla_T \rho + \rho g)$$

که در رابطه فوق  $d_f$  مربوط به بازشدگی شکست می‌باشد. با انحلال گاز یا هر ذره‌ی حل‌شونده در داخل سیال یک گرادیان غلظتی شکل می‌گیرد و انتقال جرم به وقوع می‌پیوندد. حال، جهت مدلسازی انحلال گاز  $CO_2$  در آبده باید جریان داریسی با معادلات انتقال جرم جفت شود تا فرآیند همرفتی و توزیع جریان قابل مشاهده باشد.

#### شرایط مرزی و اولیه

چنانچه محیط شبیه‌سازی همگن و به صورت یک مخزن افقی اشباع از آب در نظر گرفته شده باشد، شرایط مرزی اولیه عبارت است از:

- ✓ سیستم بسته در نظر گرفته شده است و جریان سیال در تمامی مرزها و در تمامی زمان‌ها صفر می‌باشد (سرعت‌ها در مرزها صفر است).

و قابل ملاحظه می‌باشد. مطابق شکل ۲، پس از گذشت ۱ سال از زمان تزریق، ناپایداری‌ها به صورت انگشتی‌های کوچک نمایان شده است. طی گذشت ۵ سال انگشتی‌ها بزرگتر شده؛ که حاکی از آغاز جریان همرفتی می‌باشد (شکل ۲-د). این انگشتی‌ها دارای غلظت بالای  $CO_2$  بوده و به دلیل چگالی بیشتر نسبت به آب سازندی به سبب نیروی گرانش به سمت پایین حرکت می‌کند. انگشتی‌های حاصله پس از ۲۰ سال نقاط اتصال را مطابق شکل ۳-ز تشکیل داده و همرفت ایجاد شده سبب سرعت بخشیدن در انتقال جرم و فرآیند انحلال گاز در آب سازندی می‌شود. سیستم اشباع از  $CO_2$  طی مدت گذشت ۴۰ سال مطابق شکل ۳-ط قابل مشاهده است و در مخزن آبدۀ جهت ذخیره‌سازی به دام می‌افتد. با مقایسه‌ی شکل ۳ و ۴، می‌توان مشاهده کرد پس از گذشت ۱۰ سال از تزریق، بخش کمی از آبدۀ تحت تاثیر  $CO_2$  قرار گرفته است (شکل ۳-ه). در صورتی که با بازشدگی ۵ سانتی‌متر، نیمی از مخزن اشباع از  $CO_2$  شده است (شکل ۴-ه). مطابق نتایج حاصله می‌توان مشاهده کرد که افزایش باز شدگی شکاف سبب کانالی شدن  $CO_2$  در امتداد شکستگی شده، مستقیم بر انگشتی‌شدن تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این، انگشتی‌ها به سمت پایین در جهت تقریباً عمود با جریان جانبی ضعیف در حال گسترش است. با این حال، در بازشدگی ۵ سانتی‌متر نسبت به ۱ میلی‌متر، پیشروی  $CO_2$  به صورت چشمگیری در مدت زمان کمتر قابل مشاهده می‌باشد.

#### تاثیر زاویه شکاف

به منظور بررسی تاثیر میزان زاویه شکاف بر تزریق  $CO_2$  و ذخیره‌سازی در آبدۀ، در ۳ مدل با زوایای ۹۰ درجه، ۶۰ درجه و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که زوایا نسبت به حالت عمود در نظر گرفته شده است. طبق شکل ۵-الف زمانی که زاویه شکاف ۹۰ درجه باشد، پس از گذشت ۱ سال، انگشتی‌ها شروع به شکل‌گیری و به طور کامل به داخل آبدۀ وارد نمی‌شوند. در حالی که با زوایای ۶۰ درجه و ۴۵ درجه پس از ۱ سال انگشتی‌ها بطور محسوس وارد آبدۀ می‌شوند (شکل ۶-الف و شکل ۷-الف). با مشاهده شکل ۷-د طی گذشت ۵ سال، نیمی از آبدۀ تحت تاثیر  $CO_2$  قرار گرفته است. این مهم به سبب قیاس در (شکل ۵-د) طی گذشت ۵ سال حاکی از عدم

لازم به ذکر است، ضریب افزایش چگالی در تحقیق حاضر مطابق مطالعات کتابخانه‌ای در بازه‌ی ۱۷/۷ و ۱۷/۸ می‌باشد که مقدار  $10^{-3} \times 17/8$  کیلوگرم بر مول در نظر گرفته شده است (Hassanzade et al., 2007).  $CO_2$  در عمق یک کیلومتر به حالت فوق بحرانی می‌باشد و فشار در این عمق گرید ۰/۵ متر و کمترین آن ۰/۰۰۱ متر، تعداد المان ۴۸۰۰

جدول ۱- پارامترهای ورودی

مقدار	واحد	مشخصه
۱۰۰۰	$kg/m^3$	چگالی اولیه آبدۀ ( $\rho_0$ )
۰/۵	cp	ویسکوزیته ( $\mu$ )
$9 \times 10^6$	Pa	فشار اولیه ( $P_i$ )
۹۱۰	$mol/m^3$	غلظت تعادلی (ceq)
$5 \times 10^{-9}$	$m^2/s$	ضریب نفوذ (D)
۱۵	m	طول (L)
۱۰	$m/s^2$	گرانش زمین (g)
۰/۱۵	-	تحلل ( $\phi$ )
۱۰۰	mD	تراوایی (K)
$10 \times 10^6$	Pa	فشار تزریق ( $P_{inj}$ )

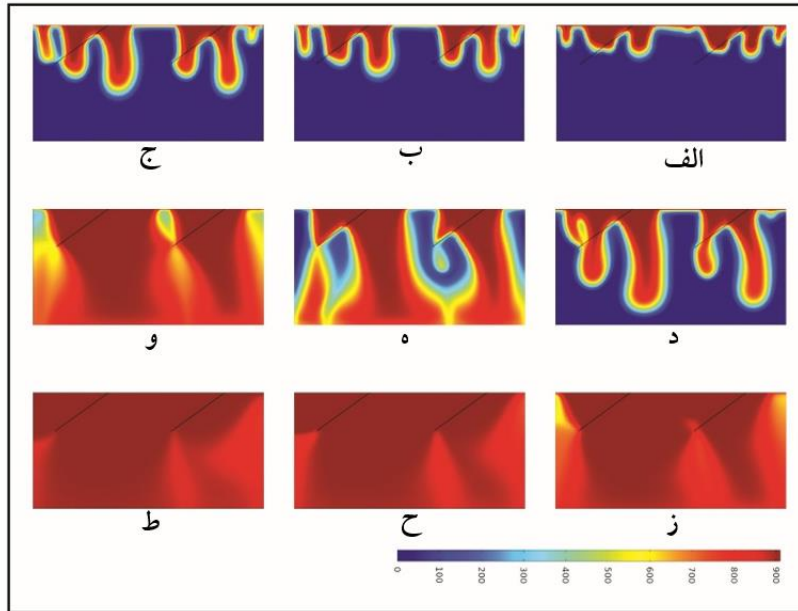
می‌باشد و نوع گرید هم از نوع Extra Fine انتخاب شده است. تقریباً برابر  $9 \times 10^6$  پاسکال در نظر گرفته شده است. با توجه به آن که فشار تزریقی باید از فشار حفرات بیشتر باشد، فشار تزریقی معادل  $10 \times 10^6$  پاسکال (۱۰ مگاپاسکال) در نظر گرفته شده است.

#### تاثیر بازشدگی شکاف

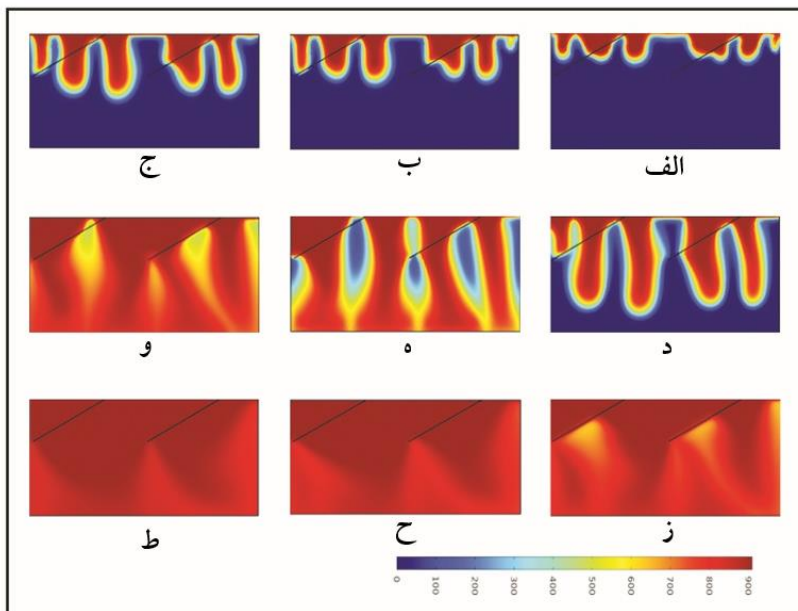
تأثیر بازشدگی شکاف بر فرآیند اختلاط همرفتی و ذخیره‌سازی  $CO_2$  با استفاده از سه مدل ۱ سانتی‌متر، ۵ سانتی‌متر و ۱ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که مقدار عدد رایلی از مقدار بحرانی آن که برابر با  $4\pi^2$  است، بیشتر است (Lindeberg & Wessel-Berg, 1997). از این رو، پدیده همرفتی و زبانه‌ای شدن مورد انتظار است. پروفایل غلظت  $CO_2$  طی گذشت ۴۰ سال جمع‌آوری

است. چرا که، شکاف‌های افقی عملاً مسیری را به سمت پایین برای انگشتی‌ها باز نمی‌کنند و فقط به پراکندگی در جهت افقی کمک خواهند کرد که تاثیر کمی بر پیشروی جبهه  $CO_2$  خواهد گذاشت. چنانچه غلظت تعادلی بر حسب زمان جهت نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی رسم شود، مطابق شکل ۸ با سه مدل بازشدگی قابل رؤیت است که با افزایش میزان بازشدگی شکاف، آبد در بازه زمان کوتاه‌تر و با سرعت بیشتری به غلظت تعادلی می‌رسد.

تاثیر ۵۰ درصدی آبد حاوی  $CO_2$  که پیشروی کم‌تر انگشتی‌ها را منتج شده است. اشکال ۶-ه و ۶-ح به ترتیب پس از گذشت ۱۰ سال و ۳۰ سال بیانگر اشباع بخش پایینی از  $CO_2$  و نیز کل آبد حاوی از غلظت  $CO_2$  را نشان می‌دهند. با گذشت ۱۰ سال مطابق شکل ۵-ه با پدیده همرفت مواجه شده و طی سپری شدن ۲۰ سال آبد به حالت اشباع و به غلظت تعادلی  $CO_2$  نزدیک تر شده است. بررسی با گذشت ۱۰ سال هنوز آبد را بطور کامل فرانگرفته



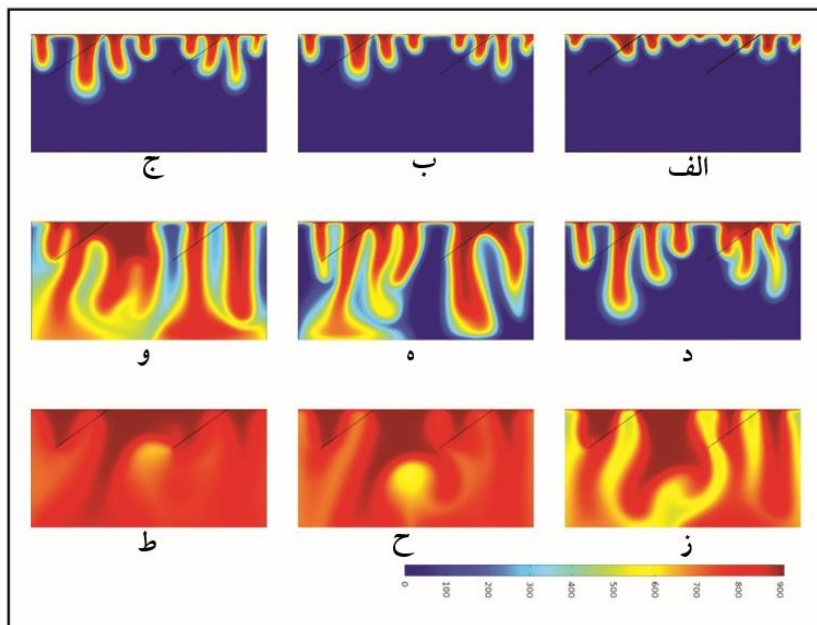
شکل ۲- پروفایل غلظت  $CO_2$  در بازه زمانی الف) ۱ سال، ب) ۲ سال، ج) ۳ سال، د) ۵ سال، ه) ۱۰ سال، و) ۱۵ سال، ز) ۲۰ سال، ح) ۳۰ سال و ط) ۴۰ سال با میزان بازشدگی ۱ سانتی‌متر



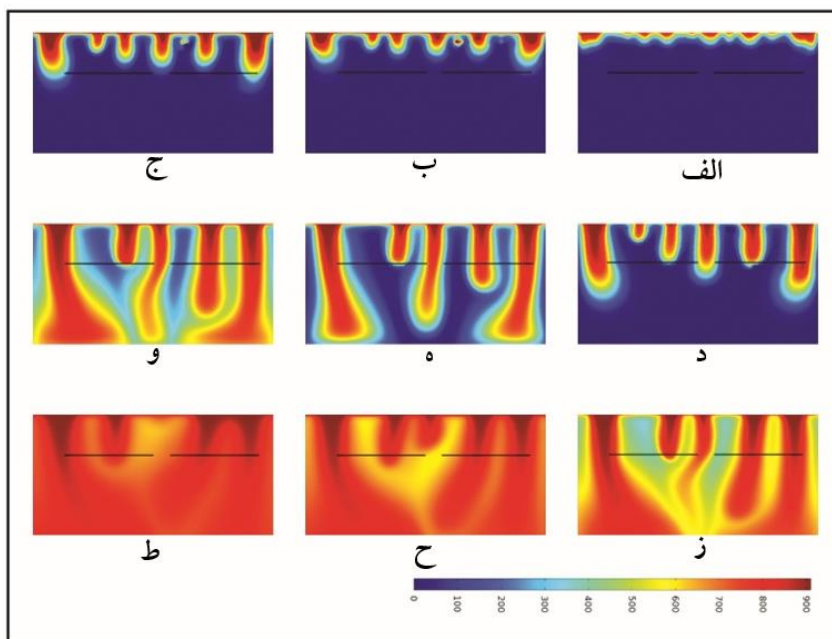
شکل ۳- پروفایل غلظت  $CO_2$  در بازه زمانی الف) ۱ سال، ب) ۲ سال، ج) ۳ سال، د) ۵ سال، ه) ۱۰ سال، و) ۱۵ سال، ز) ۲۰ سال، ح) ۳۰ سال و ط) ۴۰ سال با میزان بازشدگی ۵ سانتی‌متر

سبب رشد سریع تر انگشتی ها شده و کل آبدۀ را فرامی گیرد. به عنوان مثال؛ زاویه شکاف ۴۵ درجه سبب سرعت بخشیدن به دام اندازی  $CO_2$  شده و طی مدت زمان کوتاه تر به غلظت تعادلی مذکور می رسد.

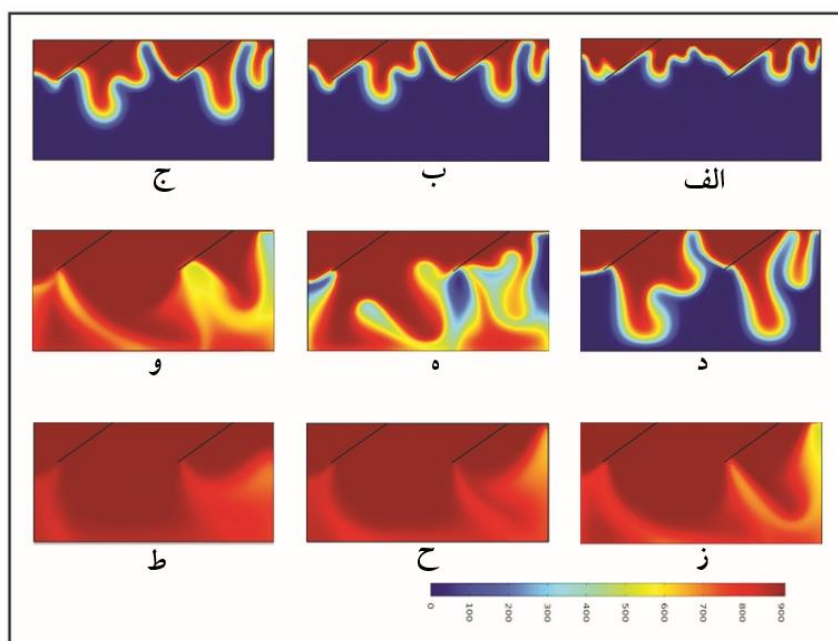
به طوری که با بازشدگی ۱ میلی متر انگشتی ها به تدریج وارد آبدۀ شده و پس از گذشت ۵۰ سال هنوز به غلظت تعادلی ۹۰۰ مول بر متر مکعب نرسیده است. همچنین جهت مشاهده تاثیر زاویه شکاف با توجه به شکل ۹، کاهش زاویه شکاف،



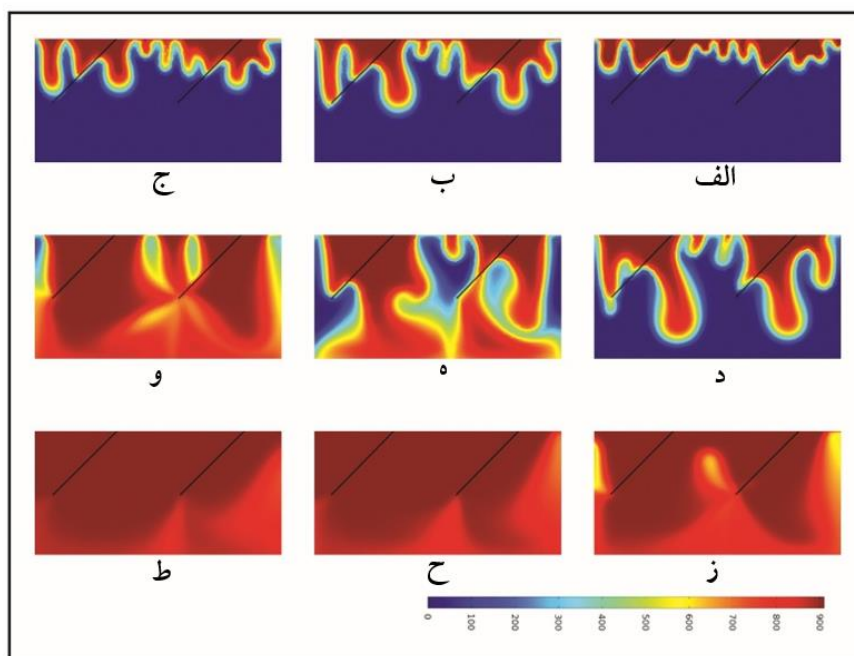
شکل ۴- پروفایل غلظت  $CO_2$  در بازه زمانی الف) ۱ سال، ب) ۲ سال، ج) ۳ سال، د) ۵ سال، ه) ۱۰ سال، و) ۱۵ سال، ز) ۲۰ سال، ح) ۳۰ سال و ط) ۴۰ سال با میزان بازشدگی ۱ میلی متر



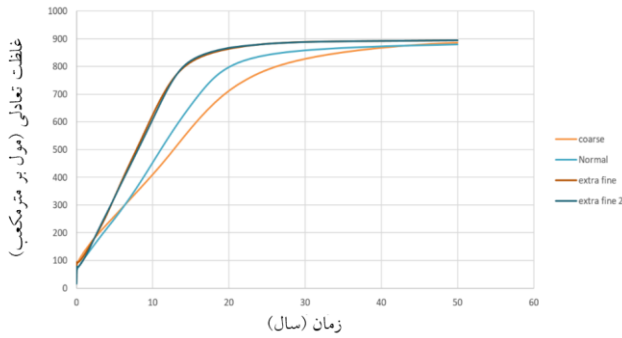
شکل ۵- پروفایل غلظت  $CO_2$  در بازه زمانی الف) ۱ سال، ب) ۲ سال، ج) ۳ سال، د) ۵ سال، ه) ۱۰ سال، و) ۱۵ سال، ز) ۲۰ سال، ح) ۳۰ سال و ط) ۴۰ سال با زاویه شکست ۹۰ درجه



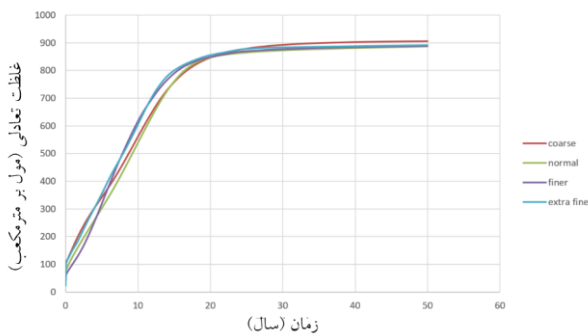
شکل ۶- پروفایل غلظت CO<sub>2</sub> در بازه زمانی الف) ۱ سال، ب) ۲ سال، ج) ۳ سال، د) ۵ سال، ه) ۱۰ سال، و) ۱۵ سال، ز) ۲۰ سال، ح) ۳۰ سال و ط) ۴۰ سال با زاویه شکست ۶۰ درجه



شکل ۷- پروفایل غلظت CO<sub>2</sub> در بازه زمانی الف) ۱ سال، ب) ۲ سال، ج) ۳ سال، د) ۵ سال، ه) ۱۰ سال، و) ۱۵ سال، ز) ۲۰ سال، ح) ۳۰ سال و ط) ۴۰ سال با زاویه شکست ۴۵ درجه



شکل ۱۰- حساسیت سنجی نوع مش بندی با بازشدگی ۱ سانتی متر



شکل ۱۱- حساسیت سنجی نوع مش بندی با زاویه شکاف ۴۵ درجه

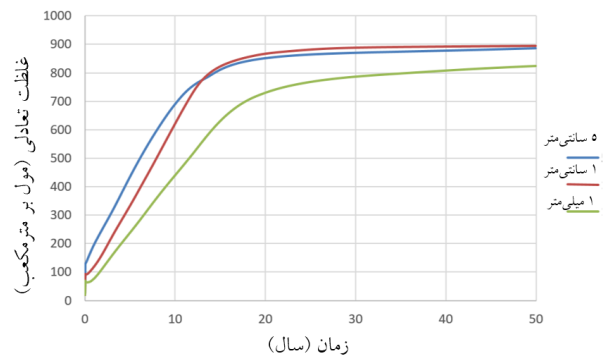
### نتیجه گیری

پدیده‌ی همرفت طی انتقال جرم  $CO_2$  در مخزن آبدۀ شکافدار با تمرکز بر تاثیر بازشدگی و زاویه‌ی شکاف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

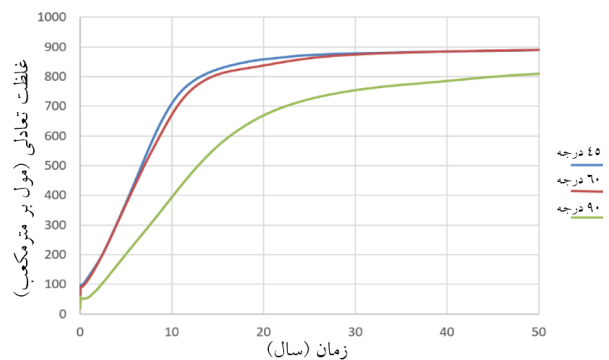
۱) نفوذ مولکولی  $CO_2$  در آب سازندی سبب افزایش چگالی آب می‌شود. وجود سیال با چگالی بالاتر در بخش فوقانی سیال سبک منجر به ظهور جریان‌های همرفتی می‌گردد که نرخ انحلال را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۲) جهت تعیین ناپایداری و همرفتی استفاده از رایلی بحرانی متداول است. عدد رایلی بحرانی با توجه به شرایط مرزی مسئله می‌تواند مقادیر متفاوتی را اتخاذ کند که اگر عدد رایلی مسئله مقدار بحرانی کمتر باشد مبین عدم تشکیل جریان همرفتی و برای همیشه نفوذ مولکولی در انتقال جرم تأثیرگذار است. چنانچه، عدد رایلی از حد بحرانی تعیین

همچنین، به منظور بررسی استقلال از شبکه و تعیین مش بندی مطلوب، مدل بازشدگی ۱ سانتی متر و زاویه شکاف ۴۵ درجه، با ۴ نوع مش بندی Normal، Coarse، Extra Fine و Extra Fine 2 (Finer) حساسیت سنجی شده است. مطابق شکل ۱۱ و ۱۲ در دو مورد مش Normal و Extra Fine، غلظت تعادلی  $CO_2$  موجب تغییرات شده، که منوط بر وابسته بودن نتایج به معیار مش بندی می‌باشد. در حالی که، با مش بندی Extra Fine و Extra Fine 2، غلظت تعادلی  $CO_2$  نظیر یکدیگر بوده که حاکی از عدم وابستگی نتایج به تعداد المان‌ها می‌باشد. با توجه به بررسی موارد مذکور در این شبیه سازی از مش بندی Extra Fine استفاده شده است.



شکل ۸- نمودار غلظت تعادلی  $CO_2$  بر حسب زمان با سه مدل بازشدگی شکاف ۱ میلی متر، ۱ سانتی متر و ۵ سانتی متر



شکل ۹- نمودار غلظت تعادلی  $CO_2$  بر حسب زمان با سه مدل زاویه‌ی شکاف ۹۰ درجه، ۶۰ درجه و ۴۵ درجه



می‌شود. به عنوان مثال، در زاویه شکاف نزدیک به قائم (۹۰ درجه) امکان ورود زبانه‌ها به آبدۀ میسر نبوده و پس از پایان سال ۵۰ به غلظت تعادلی مطلوب نمی‌رسد. (۵) از آنجایی که در ذخیره سازی گاز  $CO_2$  تسریع نرخ انحلال گاز در آبدۀ مورد هدف است. به بیان دیگر، امکان تشکیل اختلاط همرفتی سریع‌تر مورد انتظار است؛ چرا که به دام‌افتادگی ناشی از انحلال اتفاق می‌افتد. از این رو،  $CO_2$  به طور پیوسته در آب باقی و امکان نشت زود هنگام به اتمسفر نمی‌باشد؛ که منتج به ایمنی حداکثری خواهد شد.

شده بیشتر باشد، نخست نفوذ مولکولی و پس از گذشت مدت زمان مشخصی، اختلاط همرفتی حاکم خواهد شد. (۳) با افزایش میزان بازشدگی شکاف آبدۀ در بازه زمانی کمتر و با سرعت بیشتری به غلظت تعادلی رسیده و پس از طی ۴۰ سال به حالت اشباع رسیده است. بطوری که در بازشدگی ۱ میلی‌متر با گذشت ۵۰ سال هنوز به غلظت تعادلی ۹۰۰ مول بر متر مکعب نرسیده است. (۴) با کاهش زاویه شکاف نسبت به خط عمود، سرعت رشد شکل‌گیری انگشتی‌ها افزایش و آبدۀ اشباع از  $CO_2$

## منابع

- Arshad, R., Gholami, R., Rezaee, R., Rasouli, V., Rabiei, M., (2019), "Significant aspects of carbon capture and storage – A review", *Petroleum*, 5(4), pp 335-340.
- Ajayi, T., . Gomes, J.S., Bera, A.A., (2019), "A review of  $CO_2$  storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches", *Petroleum Science*, 16, pp 1028-1063.
- Bénard, H., (1900), "Les Tourbillons Cellulaires Dans Une Nappe Liquide", *ev. Gen. Sci. Pures Appl.*, 11(1309), pp 1261-1271.
- De Simone, S., Krevor, S., (2021), "A tool for first order estimates and optimization of dynamic storage resource capacity in saline aquifers, *International Journal of Gas Control*", 106, pp 1750-5836.
- Edenhofer, O., (2015), "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change", 3, Cambridge University Press.
- Fetter, C.W., Boving, T., Kreamer, D., (2017), *Contaminant Hydrogeology - 3rd Edition*.
- Han, W.S., Lee, S.Y., Lu, C., McPherson, B.J., (2010), "Effects of permeability on  $CO_2$  trapping mechanisms and buoyancy-driven  $CO_2$  migration in saline formations", *Water Resour.*, 46.
- Hassanzadeh, H., Pooladi-Darvish, M., Keith, D.W., (2004), "Modelling of Convective Mixing in  $CO_2$  Storage", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 44, pp 43-51.
- Hassanzadeh, H., Pooladi-Darvish, M., Keith, D.W., (2007), "Scaling behavior of convective mixing with application to geological storage of  $CO_2$ ", 53, pp 1121-1131.
- Iding, M., Blunt, M.J., (2011), "Enhanced solubility trapping of  $CO_2$  in fractured reservoirs", *Energy Procedia* 4, pp 4961-4968.
- IPCC, (2005), "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change", USA, pp 442.
- Lidenberg, E., Wessel-Berg, D., (1997), "Vertical convection in an aquifer column under a gas cap of  $CO_2$ ", *Energy Conversion and Management*, 38, pp 229-234.
- Lapwood, E., (1948), "Convection of a fluid in a porous medium. In: *Mathematical Proceedings of the*", Cambridge Philosophical Society, pp 508-521.
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., Meyer, L., (2005), "IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage", Cambridge University Press, UK, pp 431.
- Nield, D., Simmons, C.T., (2007), "A discussion on the effect of heterogeneity on the onset of convection in a porous medium *Transport Porous Media*", 68, pp 413-421.
- Rayleigh, L., (1917), "On the Dynamics of Revolving Fluid", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Physical and Engineering Sciences*, 93(648), pp 148-154.
- Rezk, M.J., Foroozesh, J., (2019), "Study of convective-diffusive flow during  $CO_2$  sequestration in fractured heterogeneous saline aquifers", *Journal of Natural Gas Science*, 69, pp 1875-5100.
- Saeedi, A., (2012), "Experimental Study of Multiphase Flow in Porous Media during  $CO_2$  Geo-Sequestration Processes", *Springer Science*, 14(3), pp 533-554.
- Shchipanov, A., Kollbotn, I., Encinas, M., Fjelde, I., Berenblyum, R., (2022), "Periodic  $CO_2$  Injection for Improved Storage Capacity and Pressure Management under Intermittent  $CO_2$  Supply", 15, pp 566.
- Szulczewski, M., Hesse, M., Juanes, R., (2013), "Carbon dioxide dissolution in structural and stratigraphic traps", *Journal of Fluid Mechanics*, 736, pp 287-315.
- Vujević, K., Graf, T., (2015), "Combined inter-and intra-fracture free convection in fracture networks embedded in a low-permeability matrix", *Adv. Water Resour.* 84, pp 52-63.

# **$CO_2$ storage in aquifer crack reservoir to reduce environmental pollution: Assessing the effects of aperture and fracture orientation**

**P. Zafari<sup>1</sup>, E. Moosavi<sup>2,3\*</sup>, M. Gholinejad<sup>2,3</sup>**

1. Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2. Assistant Professor, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Department of Petroleum and Mining Engineering, Tehran, Iran

3. Research Center for Modeling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(\*corresponding author: Se\_Moosavi@azad.ac.ir; Se.Moosavi@yahoo.com)

## **Abstract**

Continuous need for fossil fuels as a source of energy around the world and gradual velocity of renewable energy development, increasing greenhouse gases, including  $CO_2$  in the atmosphere. For this purpose, strategies to counter global warming and environmental change are important. Over the last two decades, technology developments of  $CO_2$  capture and storage in underground formations has been considered aquifer reservoirs are a good method to  $CO_2$  storage because of high potential. By dissolution of supercritical  $CO_2$  in aquifer reservoir due to salinity, pressure and temperature, brine density increased from 0.1 to 1 percent and it causes the emergence of instability and fingering in the environmental flow system and convectional mixing phenomenon. In this article, focusing on effect of aperture and fracture orientation parameters on  $CO_2$  storage in aquifer reservoir, two dimensional simulation has been investigated by COMSOL multiphysics 4.3 software. Improving  $CO_2$  storage over a 40 years period is significant as the fracture aperture increases. Also, by reducing fracture orientation relative to vertical, fingerings will advance into aquifer and increase storage safety.

**Keywords:**  $CO_2$  storage, environmental, aquifer crack reservoir, convective mixing, COMSOL