

شبیه‌سازی جابجایی طبیعی در فرآیند دفع گازهای اسیدی به سازند آبد

پژوهش نفت

سال بیست و چهارم

شماره ۷۷

صفحه، ۱۰۹-۱۰۰ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۳/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۷/۱۰

سید مصطفی جعفری‌راد^۱، رضا آذین^{۱*}، شهریار عصفوری^۲ و روح‌اله فاتحی^۳

۱- دانشکده مهندسی نفت گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بخش مهندسی نفت

۲- دانشکده مهندسی نفت گاز و پتروشیمی، بخش مهندسی شیمی دانشگاه خلیج فارس

۳- دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه خلیج فارس

reza.azin@pgu.ac.ir

واژه‌های کلیدی: گازهای اسیدی، سازند آبد، تزریق گاز، جابه‌جایی طبیعی، شوری

چکیده

یکی از راه‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، ذخیره‌سازی و دفع این گازها در سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد. درک مفاهیم مربوط به فرآیند ذخیره‌سازی و مکانیزم‌های درگیر در فرآیند از قبیل جابه‌جایی طبیعی و میزان اثرگذاری آنها بر زمان لازم برای ذخیره‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از مکانیزم‌های تأثیرگذار در افزایش میزان حلالیت گاز CO_2 در فرآیند ذخیره‌سازی، وارد شدن پدیده جابه‌جایی طبیعی در سایر مکانیزم‌های درگیر در فرآیند می‌باشد. در این تحقیق، تزریق گاز دی‌اکسیدکربن (به عنوان مهم‌ترین جزء گازهای گلخانه‌ای) به سفره‌های آب زیرزمینی به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. اثر میزان شوری محیط آبد تحت تزریق بر زمان شروع جابه‌جایی طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار، شش سناریو با محوریت تغییر درصد شوری آبد و ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرهای درگیر در فرآیند مطالعه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر مستقیم درصد شوری آبد بر زمان شروع جابه‌جایی طبیعی دی‌اکسید کربن محلول در آب است، به نحوی که با افزایش درصد شوری آبد، زمان وقوع جابه‌جایی طبیعی به تأخیر می‌افتد. در نتیجه، مقدار تجمعی گاز حل شده پس از زمان مشخص کمتر خواهد بود.

مقدمه

پیمان‌های جهانی زیست محیطی از قبیل کنفرانس کپنهاک و پروتکل کیوتو نشان از یک اجماع جهانی برای رفع مشکل افزایش دمای متوسط جهانی بر اثر فعالیت‌های انسانی است. به طوری که این فعالیت‌ها در ۱۰۰ سال گذشته باعث افزایشی در حدود $0/6^{\circ}C$ در متوسط دمای جهان گردیده و مطابق مدل پیش‌بینی می‌شود که این افزایش تا ۱۰۰ سال آینده به میزان $5/7^{\circ}C$ برسد [۱].

استفاده از سوخت‌های فسیلی، فعالیت‌های صنایع مختلف و قطع درختان (جنگل‌زدایی) از عوامل افزایش روز افزون گازهای CO_2 ، CH_4 ، N_2O ، هیدروفلوروکربن (HFCs)، پرفلوروکربن (PFCs) و هگزا فلوراید سولفور (SF_6) در فضای اتمسفری زمین می‌باشد. وجود این گازها در اتمسفر که به گازهای گلخانه‌ای مشهور هستند، نقش مهمی در افزایش دمای جهان دارد. در میان گازهای گلخانه‌ای نام برده

1.Greenhouse Gas

سمت پایین و جابجایی لایه‌های بالا و پایین باعث ایجاد یک حرکت جا به جایی طبیعی^۷ می‌شود که میزان حلالیت CO₂ در سیال آبدۀ را برای دوره‌های زمانی کوتاه در مقایسه با مکانیسم نفوذ تنها، افزایش می‌دهد. شروع جا به جایی طبیعی را می‌توان تابعی از سرعت تشکیل لایه اشباع و اختلاف چگالی لایه اشباع و لایه‌های زیرین دانست. چنانچه اشاره گردید یکی از عوامل تأثیرگذار در سرعت تشکیل لایه اشباع، میزان حلالیت گاز در آبدۀ است. میزان حلالیت CO₂ در محل تزریق به پارامترهای متفاوتی از قبیل میزان ضریب پخش، مشخصات محیط، دما، فشار و میزان شوری آب سازند بستگی دارد [۴]. لذا هر یک از پارامترهای اشاره شده می‌تواند نقش اساسی در بازه زمانی مورد نیاز برای شروع جا به جایی طبیعی و سایر مکانیسم‌های انحلالی در جهت افزایش حلالیت گاز در سیال سازند ایفا نماید.

با توجه به اهمیت این موضوع، تا کنون روش‌های متعددی برای بررسی پایداری پروفایل غلظت وابسته به زمان در فرآیند دفع گاز در آبدۀ مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. جواهری و همکاران در سال ۲۰۰۹ با انجام آنالیز پایداری خطی، اثر شیب سفره‌های آب را بر روی الگوی شروع جا به جایی طبیعی مورد بررسی قرار داده‌اند [۸]. حسن‌زاده و همکاران اثر شرایط مرزی متغیر و همچنین اثر تجمعی وجود جریان طبیعی همراه با پدیده پخش را بر روی شروع جا به جایی طبیعی در محیط متخلخل مورد بررسی قرار داده‌اند [۷ و ۹]. قسمت و همکاران اثر پخش غیر همسان‌گرد و نیز اثرات فرآیندهای ژئوشیمی درگیر در پروسه تزریق دی اکسید کربن را بر روی جا به جایی اختلاطی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۰ و ۱۱].

مهم‌ترین اهداف این تحقیقات عبارتند از: ایمنی در تزریق گاز به مخازن، پایش جبهه پیشرو جریان CO₂ تزریقی و بهبود

شده گاز دی اکسید کربن با توجه به حجم انتشار بالا، نقش اساسی‌تر و مهم‌تری در گرمایش جهانی^۱ ایفا می‌کند. غلظت اتمسفری CO₂ از زمان پیدایش صنایع تا کنون بیش از ۳۵٪ افزایش داشته است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۱۰۰ به میزان ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ppm افزایش یابد. این مقدار حدود ۶۰٪ اثر گلخانه‌ای را شامل می‌گردد [۱].

مارچتی [۲] معتقد بود که اثرات زیست محیطی سوخت‌های فسیلی را می‌توان با جداسازی و دفع کربن حاصل از اتمسفر کاهش داد. یکی از راه‌های کاهش سطح CO₂ در اتمسفر، ذخیره‌سازی زیر زمینی آن می‌باشد. جمع‌آوری و ذخیره‌سازی CO₂ در ساخت‌های زیر زمینی در نقاطی با آلاینده‌گی بالا مانند مجتمع‌های صنعتی نقش بسیار مهمی در حل این مشکل ایفا می‌کند. استفاده از این تکنیک برای دفع گازهای آلاینده در سطح وسیع، نیازی به تأمین زیر ساخت‌های عمده نخواهد داشت. سفره‌های آب زیر زمینی^۲ یکی از پتانسیل‌های موجود جهت ذخیره‌سازی گازهای آلاینده می‌باشد که ظرفیت ذخیره‌سازی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ گیگاتن برای آن پیش‌بینی می‌شود [۳]. در فرآیند دفع و ذخیره‌سازی گاز در آبدۀ سه مکانیسم اصلی نقش دارند که در ادامه به آنها اشاره می‌گردد.

۱- به دام‌اندازی انحلالی^۳: گاز تزریقی در آب سازند حل می‌شود و به صورت محلول در آب در می‌آید [۴].

۲- اشباع گاز باقی مانده^۴: گاز تزریق شده می‌تواند به صورت درصدی از اشباع (گاز خشک) درون فضای خالی حفره توزیع گردد [۵].

۳- دفع به کمک عمل سنگ^۵: همچنین ممکن است گاز با ترکیبات تشکیل‌دهنده ساختار آبدۀ از قبیل ساختار بلوک‌های مخزن واکنش دهد [۶].

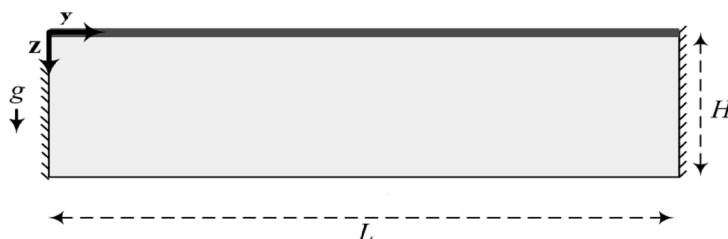
در این مطالعه تمرکز بر روی مکانیسم انحلالی می‌باشد. در این فرآیند دی اکسید کربن تزریق شده به سفره زیر زمینی^۶ با حل شدن در آب و نفوذ به لایه‌های زیرین به دام می‌افتد. در بازه‌های زمانی طولانی که گاز تزریق شده به صورت یک لایه سیال بر روی آبدۀ قرار می‌گیرد، گاز به آرامی در لایه‌های زیرین خود حل شده و به سمت پایین نفوذ می‌کند. سیال آبدۀ اشباع شده توسط CO₂ اندکی سنگین‌تر از سیال اولیه است. بنابراین، حرکت لایه‌های بالایی به

1. Global Warming
2. Aquifer
3. Solubility Trapping
4. Residual Gas Trapping
5. Mineral Trapping
6. Natural Convection
7 Salinity

مکانیسم‌های اشاره شده که به طور مستقیم حلالیت دی اکسید کربن در آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد، با تحلیل نمودارهای توزیع غلظت جزء حل شده مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی فرآیند

در این تحقیق از نرم‌افزار شبیه‌ساز COMSOL multiphysics 4.0 برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند انحلال CO₂ در آب شور استفاده شده است. این نرم‌افزار برای حل معادلات از روش عددی اجزای محدود استفاده می‌کند. در این کار از یک هندسه دو بعدی عمودی مطابق شکل ۱ به عنوان هندسه مخزن استفاده شده است. پس از انجام آنالیز حساسیت شبکه، از شبکه منظم ۴۰ در ۱۲۰ با المان چهار ضلعی برای ابعاد ۱۰۰ متری در ارتفاع و ۳۰۰ متری طول آبدۀ مورد مطالعه، استفاده شده است. مشخصات فیزیکی به همراه پارامترهای ترمودینامیکی مورد استفاده در مدل در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- تصویر هندسه مسأله مورد مطالعه در فرآیند شبیه‌سازی شده

جدول ۱- مشخصات فیزیکی به همراه پارامترهای ترمودینامیکی مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی شده

متغیر	واحد	مقدار	مرجع
طول (L)	متر	۳۰۰	-
ارتفاع (H)	متر	۱۰۰	-
تخلخل (ϕ)	-	۰/۱	-
نفوذپذیری (k)	متر مربع	1.0×10^{-14}	-
ضریب نفوذ مولکولی (De)	متر مربع بر ثانیه	1×10^{-8}	-
دما (T)	سانتی گراد	۳۵	-
فشار در سطح تماس گاز و سیال آبدۀ (P)	مگا پاسکال	۱۰	-
ثابت هنری گاز در سطح تماس (H)	مگا پاسکال	۵۸۸/۲۳	[۱۳]
کسر مولی CO ₂ در سطح تماس (H)	-	۰/۰۱۷	-
غلظت CO ₂ در سطح تماس (\hat{C})	مول بر متر مکعب	۹۱۰	-

درک فرآیند انتقال جریان CO₂ در مخزن. به طور کلی تمامی این تحقیقات روی تعیین مشخصات سایت تزریق و دسته‌بندی اطلاعات ضروری جهت تصمیم‌گیری در مورد زمان مورد نیاز ذخیره‌سازی تمرکز دارند. در این تحقیق فرآیند تزریق گاز دی‌اکسیدکربن در سفره‌های آب زیر زمینی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL multiphysics [۱۲] شبیه‌سازی شده است.

هدف از انجام این شبیه‌سازی بررسی اثر شوری آب سازند بر روی بازده مکانیزم‌های درگیر در فرآیند تزریق گاز دی‌اکسید کربن به سفره‌های آب زیرزمینی و به طور خاص بررسی اثر شوری بر زمان شروع جا به جایی طبیعی می‌باشد. در این تحقیق برای بررسی میزان تأثیر درصد نمک (NaCl) محلول در آب بر زمان شروع جا به جایی طبیعی و متعاقباً تغییرات توزیع پروفایل غلظت بر حسب زمان، شش سناریو با محوریت تغییر درصد نمک محلول در آب و ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای درگیر در فرآیند تزریق دنبال شده است. اثر تجمعی شوری بر روی

$$u(y,0,t)=v(y,0,t)=0, u(y,H,t)=v(y,H,t)=0 \quad (6)$$

شرایط اولیه

$$c(y,z,0)=0, u(y,z,0)=v(y,z,0)=0 \quad (7)$$

معادلات کمکی

به منظور تعریف مقادیر پارامترهای مورد استفاده در معادلات اصلی از جمله مقادیر چگالی و لزجت از معادلات کمکی استفاده شده است. در این راستا، مقادیر چگالی آب خالص و آب شور به صورت تابعی از دما، فشار و شوری با استفاده از روابط ارائه شده توسط بازل و وانگ [۱۴] محاسبه می‌گردد. برای محاسبه مقادیر حجم مولی ظاهری دی اکسید کربن و نیز تغییرات چگالی آب با افزایش غلظت جزء حل شده (CO_2) از رابطه ارائه شده توسط گارسیا [۱۵] استفاده شده است. مقادیر لزجت در مدل بر حسب دما، فشار و شوری از روابط ارائه شده توسط مک کین [۱۶] محاسبه می‌گردد. حجم مولی دی اکسید کربن خالص و حل شده در آب شور به ترتیب از روابط ارائه شده توسط گارسیا و بچو [۴ و ۱۵] تعیین می‌شود:

$$\rho_{aq.co_2} = \frac{\rho_{brine}}{1 - y_{co_2} \left(1 - \frac{V_{\phi,b}}{M} \rho_{brine}\right)} \quad (8)$$

$$\rho_{brine} = \rho_{pure\ water} + 10^3 \times S \{0.668 + 0.44 \times S + 10(-6) [300P - 2400PS + T(80 + 3T - 3300S - 13P + 47PS)]\} \quad (9)$$

$$\rho_{pure\ water} = 1000 + 10^{-3} (-80T - 3.3T^2 + 0.00175T^3 + 489P - 2TP + 0.016T^2P - 1.3 \times 10^{-5} T^3P - 0.333P^2 - 0.002TP^2) \quad (10)$$

$$V_{\phi} = 37.51 - 9.585 \times 10^{-2} \times T + 8.740 \times 10^{-4} \times T^2 - 5.044 \times 10^{-7} \times T^3 \quad (11)$$

$$V_{\phi,b} \rho_{brine} = V_{\phi} \rho_{pure\ water} \quad (12)$$

$$\mu_{brine} = \mu_{brine} (0.9994 + 4.0295 \times P \times 10^{-5}) + 3.1062 \times P^2 \times 10^{-9} \quad (13)$$

$$\mu_{brine} = AT^{-B} \quad (14)$$

$$A = 109.574 - 8.40564 \times S + 0.313314 \times S^2 + 8.72213 \times S^3 \times 10^{-3} \quad (15)$$

$$B = 1.12166 - 2.63951 \times S \times 10^{-2} + 6.79461 \times S^2 \times 10^{-4} \quad (16)$$

$$+ 5.47119 \times S^3 \times 10^{-5} \quad (16)$$

$$D = De + \alpha \times u_b \quad (17)$$

$$\alpha = 0.01 \times L \quad (18)$$

1. Henry's Constant
2. Homogeneous
3. Isotropic

فرضیات

در این مدل فرض شده است که دی اکسید کربن فوق بحرانی در مرز تماس با سیال سازند، در تعادل ترمودینامیکی با آب شور می‌باشد. لذا می‌توان غلظت دی اکسید کربن را در سطح تماس، با توجه به شرایط ترمودینامیکی مشخص، ثابت در نظر گرفت [۱۰]. غلظت تعادلی اشباع در سطح تماس گاز و آب با استفاده از ثابت هنری سیستم آب خالص / دی اکسید کربن ارائه شده توسط ماجر و همکاران [۱۳] محاسبه گردیده است. در این مدل از تغییرات ثابت هنری^۱ براساس افزایش درصد نمک محلول در آب صرف نظر شده است. در مدل مورد استفاده محیط متخلخل همگن^۲ و همسان‌گرد^۳ در نظر گرفته شده و تمام پارامترهای فیزیکی محیط، ثابت فرض شده است. در این مدل سیال آبد در زمان شروع فرآیند تزریق ساکن است. حین انجام فرآیند از شرایط تقارن در مرزهای عمودی و عدم جریان در مرز افقی پایینی استفاده شده است. در این مدل توزیع فشار هیدرواستاتیک به عنوان شرط اولیه فشار در محیط متخلخل و شرط مرزی فشار ثابت در سطح تماس گاز و آب به کار رفته است. لازم به ذکر است که مقادیر ضریب نفوذ مولکولی و توزیع دما در سرتاسر مدل ثابت فرض شده است.

معادلات حاکم

معادلات مورد استفاده در مدل شامل معادله حرکت (معادله دارسی)، معادله بقای جرم، معادله پیوستگی و معادلات کمکی توزیع چگالی و لزجت می‌باشند. معادلات اصلی حاکم بر مدل به همراه شرایط مرزی، شرایط اولیه و معادلات کمکی در ادامه تشریح می‌گردد:

$$u = - \frac{K}{\mu_{brine}} (\nabla P - \rho_{aq.co_2} g \hat{e}) \quad (1)$$

$$\phi \frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \nabla c = \phi (\nabla \cdot D \cdot \nabla c) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

شرایط مرزی

$$c(y, 0, t) = c_0, \quad \frac{\partial c(y, H, t)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$c(0, z, t) = c(L, z, t), u(0, z, t) = u(L, z, t), v(0, z, t) = v(L, z, t) \quad (5)$$

شکل‌های ۲- الف، ۲- ب و ۲- ج به ترتیب توزیع غلظت در سه زمان مختلف بعد از شروع فرآیند تزریق و همچنین خطوط جریان پروفایل غلظت مربوط به تزریق دی اکسید کربن در آب خالص نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲- الف، در زمان‌های نزدیک به زمان تزریق که ضخامت لایه اشباع دی اکسید کربن حل شده در آب کم می‌باشد و اختلاف چگالی بین لایه‌های در حال اشباع و لایه‌های زیرین برای ایجاد جریان شناوری کافی نیست، تنها مکانیزم درگیر در فرآیند انتقال جزء حل شده فرآیند نفوذ است.

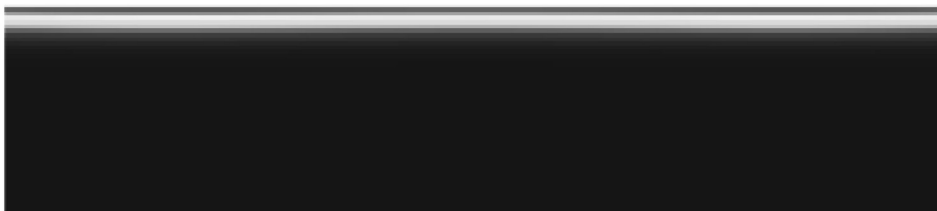
$$u_b = \frac{k(\rho_{aq.co_2} - \rho_{brine})g}{H_{brine}} \quad (19)$$

نتایج و بحث

در تحقیق انجام شده برای بررسی میزان اثرگذاری درصد نمک محلول در آب بر روی زمان شروع جا به جایی طبیعی و متعاقباً تغییرات توزیع غلظت بر حسب زمان، شش سناریو با محوریت تغییر درصد نمک محلول در آب و ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای درگیر در فرآیند تزریق دنبال شده است. خلاصه مشخصات سناریوها در جدول ۲ ارائه شده است. در

جدول ۲- نتایج عددی به دست آمده از شبیه‌سازی در سناریوهای متفاوت تزریق

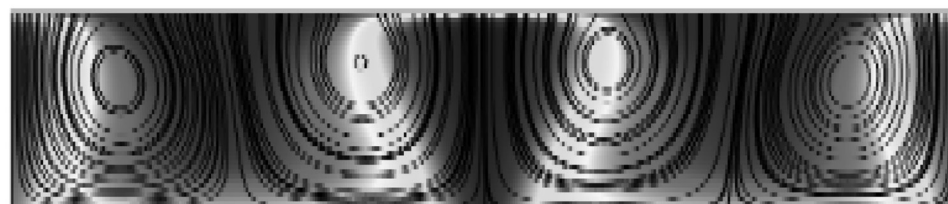
عدد ریلی	غلظت متوسط بدون بعد شروع جا به جایی طبیعی	غلظت متوسط شروع جا به جایی طبیعی (متر مکعب/مول)	زمان بدون بعد شروع جا به جایی طبیعی	زمان شروع جابجایی طبیعی (ثانیه)	درصد نمک (درصد)	سناریو
۱۳۱/۴۲	۰/۱۲۳۵	۱۱۲/۴	۰/۰۴۲۹	۲۵/۹۸	۰	۱
۱۲۳/۲۵	۰/۱۳۰۶	۱۱۸/۹	۰/۰۴۶۰	۲۸/۹۶	۵	۲
۱۲۰/۹۷	۰/۱۳۷۰	۱۲۴/۷۴	۰/۰۴۹۹	۳۱/۸	۱۰	۳
۱۱۲/۱۴	۰/۱۴۹۴	۱۳۶/۰۲	۰/۰۵۶۸	۳۷/۷	۱۵	۴
۱۰۱/۹۵	۰/۱۶۲۷	۱۴۸/۱۱	۰/۰۶۴۱	۴۴/۵	۲۰	۵
۹۲/۸۵	۰/۱۹۵۹	۱۷۸/۲۸	۰/۰۸۸۶	۶۳/۸۸	۲۵	۶



شکل ۲ الف- کانتور توزیع غلظت در زمان‌های نزدیک به شروع فرآیند



شکل ۲ ب- کانتور توزیع غلظت در زمان‌های نسبتاً طولانی پس از شروع فرآیند



شکل ۲ ج- کانتور توزیع پروفایل غلظت و خطوط جریان در زمان بسیار طولانی پس از شروع فرآیند

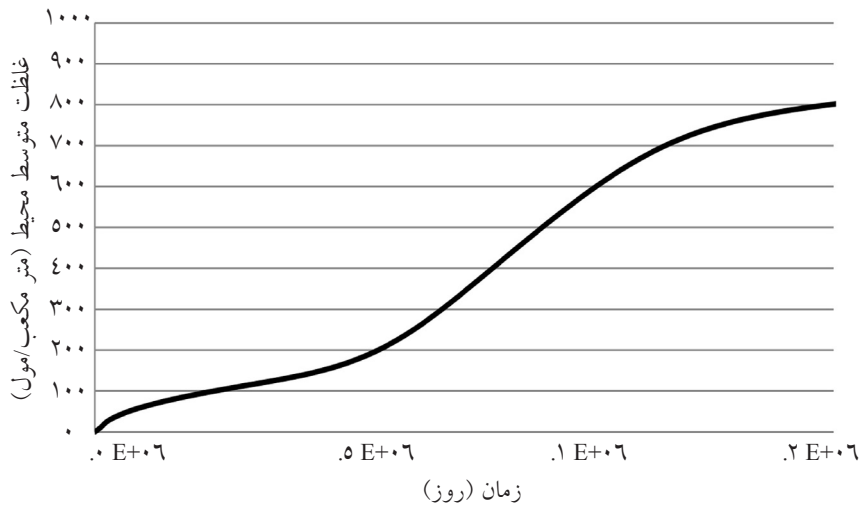
شکل ۵ غلظت متوسط بدون بعد بر حسب زمان بدون بعد نشان داده شده است. مقادیر زمان بدون بعد در لحظه شروع جا به جایی طبیعی و غلظت متوسط متناظر با آن در جدول ۲ آمده است. مقادیر زمان بدون بعد براساس معادله ۲۱ محاسبه گردیده است. در جدول شماره ۲ نتایج کمی مربوط به هر شش سناریوی شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. در این جدول عدد ریلی^۱ و زمان بحرانی^۲ بدون بعد به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ra = \frac{k(\rho_{aq,CO_2} - \rho_{brine})gH}{D \phi \mu_{brine}} \quad (20)$$

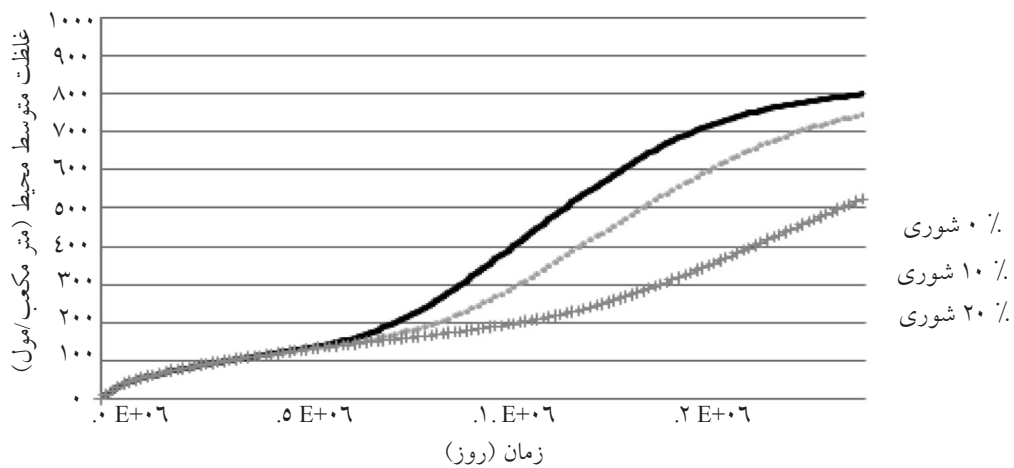
$$t_D = \frac{t D}{H^2} \quad (21)$$

تغییرات مقدار غلظت متوسط بدون بعد در زمان شروع جا به جایی طبیعی بر حسب درصد شوری آب سازند در شکل ۶ نمایش داده شده است. این شکل به روشنی نشان می‌دهد که با کاهش میزان شوری آب سازند، جا به جایی طبیعی ناشی از نیروی شناوری در غلظت متوسط کمتری از جزء حل شده رخ می‌دهد. با توجه به داده‌های حاصل از شبیه‌سازی برای مسأله مورد مطالعه، می‌توان غلظت متوسط بدون بعد در زمان شروع جا به جایی طبیعی را با معادله درجه دوم نشان داده شده بر روی نمودار به درصد شوری آبدی نسبت داد. در شکل ۷ تغییرات غلظت متوسط بدون بعد در نقطه شروع جا به جایی طبیعی بر حسب عدد ریلی و تغییرات عدد ریلی بر حسب درصد شوری در سناریوهای تعریف شده، نشان داده شده است. با توجه به روند تغییرات نشان داده شده در شکل، با افزایش عدد ریلی که مترادف با تشدید جریان شناوری می‌باشد، میزان غلظت متوسط بدون بعد در نقطه شروع جا به جایی طبیعی کاهش می‌یابد. این موضوع بدین معناست که با افزایش عدد ریلی، زمان لازم برای شروع جا به جایی طبیعی کاهش می‌یابد. این موضوع بدین معناست که با افزایش عدد ریلی، زمان لازم برای شروع جا به جایی طبیعی کاهش می‌یابد.

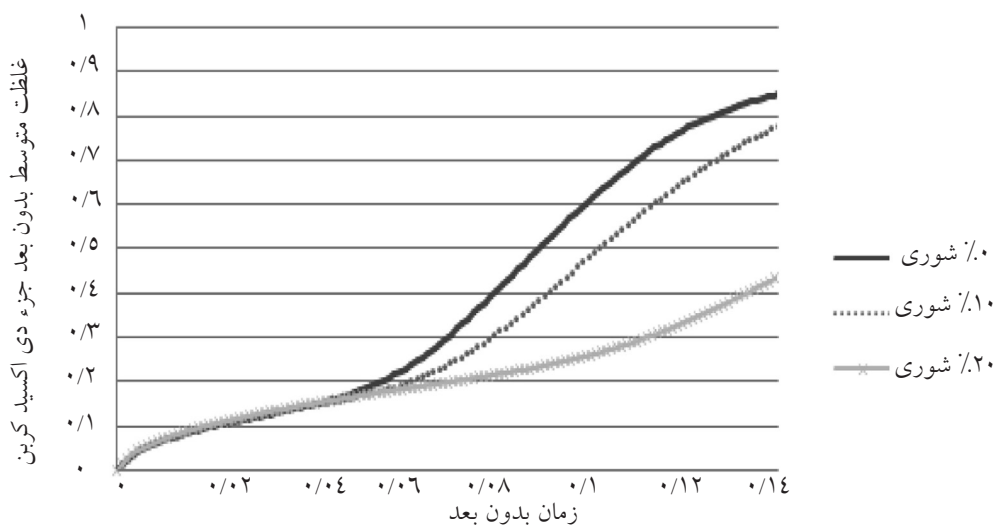
در این حالت جزء حل شده دارای یک توزیع غلظت همگون با جبهه پیشرو یکنواخت می‌باشد. شکل ۲-ب کانتور، توزیع غلظت را در زمان نسبتاً طولانی بعد از زمان تزریق نشان می‌دهد. در این حالت لایه‌های نزدیک به سطح تماس گاز با سازند با نفوذ گاز به تراز بالایی از اشباع رسیده‌اند و حداقل اختلاف چگالی لازم برای ایجاد جریان شناوری بین لایه‌های بالایی و زیرین تأمین شده است. در این حالت شروع جریان شناوری با وقوع پدیده انگشتی شدن همراه می‌باشد که در نهایت شاهد توزیع این جریان در سرتاسر هندسه مورد مطالعه مطابق آنچه در شکل ۲-ج مشاهده می‌شود، خواهیم بود. در شکل ۳ تغییرات غلظت متوسط CO_2 بر حسب زمان برای حالت تزریق در آب خالص رسم شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، توزیع غلظت بر حسب زمان شامل سه ناحیه با جهت تقعر متفاوت می‌باشد. با توجه به نمودار نشان داده شده سرعت افزایش غلظت متوسط در ناحیه دوم (ناحیه با تقعر رو به بالا) بیشتر از سرعت افزایش غلظت در ناحیه اول (ناحیه با تقعر رو به پایین، قبل از نقطه عطف اول) می‌باشد. در واقع شاهد یک تغییر ناگهانی در جهت افزایش سرعت رشد غلظت متوسط بعد از پایان ناحیه اول هستیم. با توجه به مفاهیم اشاره شده در مقدمه، وقوع پدیده مذکور را می‌توان به شروع جا به جایی طبیعی در فرآیند مورد مطالعه نسبت داد. برای به دست آوردن زمان شروع جا به جایی طبیعی و غلظت متناظر با آن، داده‌های به دست آمده از هر سناریو از زمان شروع فرآیند تا پایان ناحیه دوم به طور مجزا تحت رگرسیون تابعی قرار گرفت و مرز جدا کننده ناحیه اول و دوم که در واقع نقطه عطف اول می‌باشد، به عنوان نقطه شروع جایجایی طبیعی در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از این آنالیز در جدول ۲ آمده است. شکل ۴ توزیع غلظت متوسط بر حسب زمان را برای هر شش سناریوی تعریف شده نشان می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نمک محلول در آب، نقطه‌گذار از ناحیه اول به دوم در زمان دیرتری از شروع فرآیند رخ خواهد داد. در نتیجه با افزایش درصد نمک محلول، جا به جایی طبیعی ناشی از نیروی شناوری در زمان دیرتری از شروع فرآیند اتفاق خواهد افتاد. در



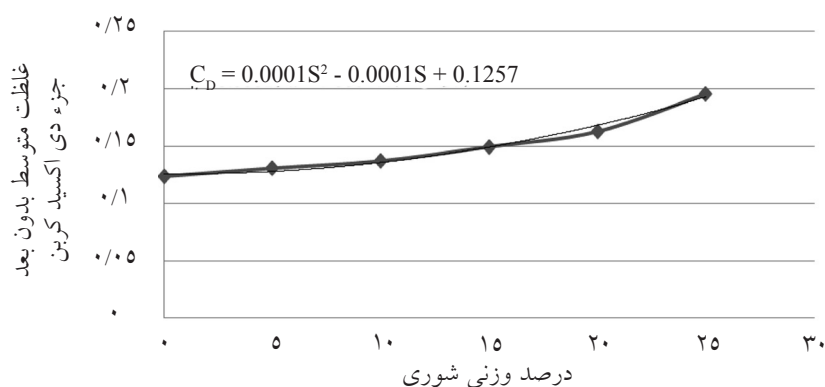
شکل ۳- نمودار توزیع غلظت متوسط بر حسب زمان در حالت تزریق گاز در آب خالص



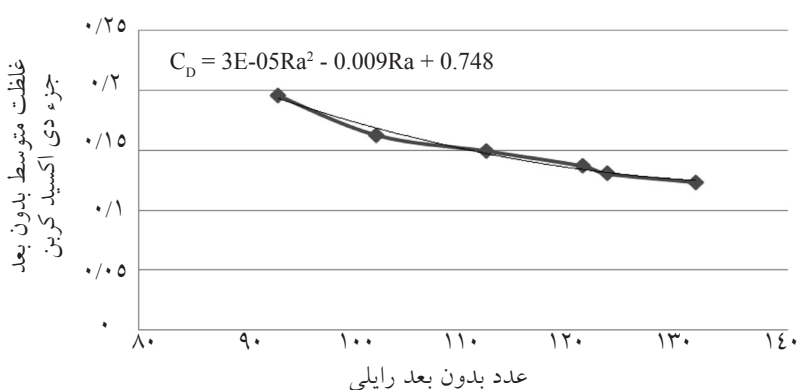
شکل ۴- نمودار توزیع غلظت متوسط بر حسب زمان برای تزریق گاز در آب با درصد شوری متفاوت



شکل ۵- نمودار توزیع غلظت متوسط بدون بعد (\hat{C}/C_0) بر حسب زمان بدون بعد برای تزریق گاز در آب با درصد شوری متفاوت



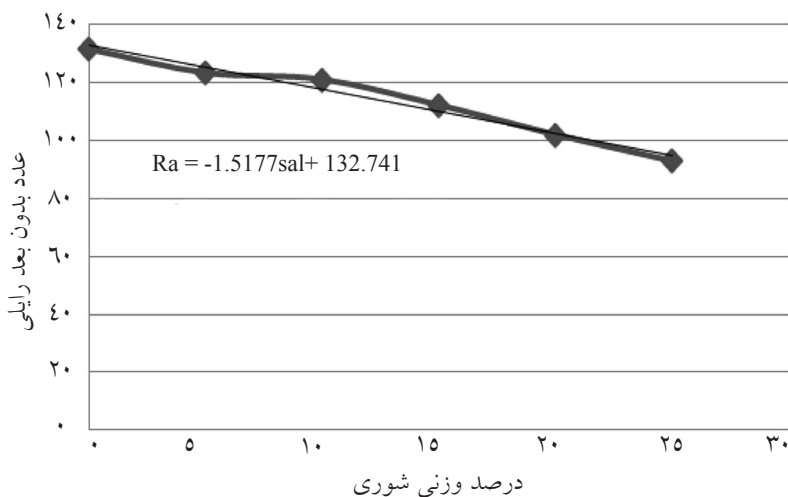
شکل ۶- نمودار توزیع غلظت متوسط بدون بعد در نقطه شروع جابجایی طبیعی بر حسب درصد شوری آبده



شکل ۷- نمودار تغییرات غلظت متوسط بدون بعد در نقطه شروع جابجایی طبیعی بر حسب عدد رایلی

است. مطابق شکل، با افزایش درصد شوری آبده، مقدار عدد رایلی کاهش می‌یابد. با توجه به داده‌های حاصل از شبیه‌سازی برای مسأله مورد مطالعه می‌توان تغییرات عدد رایلی را با معادله درجه یک نشان داده شده بر روی نمودار به درصد شوری آبده نسبت داد.

با توجه به داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، می‌توان غلظت متوسط بدون بعد در زمان شروع جا به جایی طبیعی را با معادله درجه دوم نشان داده شده بر روی نمودار به عدد رایلی نسبت داد. در شکل ۸ تغییرات عدد رایلی بر حسب درصد شوری در سناریوهای تعریف شده رسم شده



شکل ۸- نمودار تغییرات عدد رایلی در سناریوهای جداگانه از درصد شوری آبده

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در سناریوهای متفاوت تعریف شده حاکی از آن است که افزایش درصد نمک محلول در آب با تحت تأثیر قرار دادن مقادیر چگالی و لزجت سیال، موجب تاخیر در شروع جا به جایی طبیعی ناشی از نیروی شناوری خواهد شد. به بیانی دیگر با کاهش میزان شوری آب سازند، جا به جایی طبیعی ناشی از نیروی شناوری در غلظت متوسط کمتری از جزء حل شده رخ می‌دهد. همچنین با افزایش عدد ریلی که با توجه به نحوه تعریف آن مترادف با تشدید جریان شناوری می‌باشد، میزان غلظت متوسط بدون بعد در نقطه شروع جا به جایی طبیعی کاهش می‌یابد و این موضوع بدین معناست که با افزایش عدد ریلی زمان لازم برای شروع جا به جایی طبیعی کاهش خواهد یافت.

علائم و نشانه‌ها

u : مؤلفه سرعت در جهت z (m/s)

v : مؤلفه سرعت در جهت y (m/s)

c : غلظت جزء دی اکسید کربن حل شده در محیط (mol/m^3)

C_D : غلظت متوسط بدون بعد جزء دی اکسید کربن حل شده در محیط

P : فشار (atm)

k : نفوذپذیری محیط (m^2)

φ : تخلخل

D : ضریب کلی انتقال جرم (m/s)

De : ضریب نفوذ مولکولی (m^2/s)

$\rho_{aq} \cdot CO_2$: چگالی مخلوط آب شور و دی اکسید کربن (kg/m^3)

μ_{brine} : لزجت آب شور در فشار محیط (cP)

ρ_{brine} : چگالی آب شور (kg/m^3)

ρ_{pure_water} : چگالی آب خالص (kg/m^3)

V_φ : حجم مولی ظاهری دی اکسید کربن خالص (cm^3/mol)

$V\varphi, b$: حجم مولی ظاهری دی اکسید حل شده در آب

شور (cm^3/mol)

y_{CO_2} : درصد وزنی دی اکسید کربن در محیط

Ra : عدد بدون بعد رایلی

S : درصد وزنی شوری

t_D : زمان بدون بعد

M : جرم مولکولی دی اکسید کربن (gr/mol)

u_b : ماکزیمم سرعت شناوری (m/s)

α : ضریب پخش (m)

H : ارتفاع آبدۀ (m)

L : طول آبدۀ (m)

مراجع

- [1]. Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguera M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K. and Johnson C. A., 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]. Marchetti C., *On geoengineering and the CO₂ problem*, Climatic Change, 1: 59-68, 1977.
- [3]. Keith D., *Towards a strategy for implementing CO₂ capture and storage in Canada*, Ottawa, Canada, Oil, Gas and Energy Branch, Environment Canada, Ottawa, Ontario, 2002.
- [4]. Bachu S. and Adams J. J., "Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution", Energy Conversion and Management, Vol. 44 (20), pp. 3151-3175, 2003.
- [5]. Foster T. "Stability of a homogeneous fluid cooled uniformly from above". Phys Fluids, pp. 8:1249-1257, 1965.
- [6]. Foster T., "Effect of boundary conditions on the onset of convection". Phys Fluids, pp. 11:1257-1262, 1968.
- [7]. Hassanzadeh H., Pooladi-Darvish M. and Keith DW., "The effect of natural flow of aquifers and associated dis-

- persion on the onset of Buoyancy-Driven Convection in a Saturated Porous Medium*". AIChE J, pp. 55: 475–485, 2009.
- [8]. Javaheri M., Abedi J. and Hassanzadeh H., "Onset of Convection in CO₂ Sequestration in Deep Inclined Saline Aquifers". JCTP, Vol. 48, No. 8, 2009.
- [9]. 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". Trans Porous Media. 65:193–211, 2006.
- [10]. Ghesmat K., Hassanzadeh H. and Abedi J., "The effect of anisotropic dispersion on the convective mixing in long-term CO₂ storage in saline aquifers", AIChE J, pp. 57: 561–570, 2011.
- [11]. Ghesmat K., Hassanzadeh H. and Abedi J., "The impact of geochemistry on convective mixing in a gravitationally unstable diffusive boundary layer in porous media: CO₂ storage in saline aquifers", J. Fluid Mech., Cambridge University Press, pp. 1-33, (2011).
- [12]. Comsol multiphysics, version 4.0, Protected by U.S. Patents 7,519,518; 7,596,474; and 7,623,991. Patents pending., copyright 2005.
- [13]. Vladimir M., Sedlbauer J. and Bergin G., "Henry's law constant and related coefficients for aqueous hydrocarbons, CO₂ and H₂S over a wide range of temperature and pressure", Fluid Phase Equilibria, Vol. 272, pp. 65–74, 2008.
- [14]. Batzle M. and Wang Z., "Seismic properties of pore fluids: geophysics", Vol. 57, No. 11, pp. 1396-1408, 1992.
- [15]. Garcia J. E., "Density of aqueous solutions of CO₂", Report LBNL-49023, Lawrence Berkeley National Laboratory, 8 p. CA 2001.
- [16]. McCain W. D. Jr, "Reservoir fluid property correlations-state of the art", SPE Reservoir Engineering, 6, pp. 266-272, 1991.