

# شبیه‌سازی تبخیر آب و رسوب نمک در فرآیند جذب و ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید در سازند آبدۀ

میلاذ غفوری، الناز خداپناه\* و سیدعلیرضا طباطبائی‌نژاد

پژوهشکده نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۳۱

## چکیده

کربن دی‌اکسید گازی گلخانه‌ای است که در پدیده گرم شدن کره زمین بیشترین تأثیر را دارد. جذب و ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید به عنوان انتخاب برتر در کاهش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر در نظر گرفته می‌شود. سفره‌های آبدۀ شور ظرفیت بالقوه بالایی نسبت به سایر گزینه‌های ذخیره‌سازی، نظیر مخازن نفت و گاز تخلیه شده برای ذخیره کربن دی‌اکسید دارند. علاقه زیادی در زمینه مطالعه ذخیره کربن دی‌اکسید در سفره آبدۀ شور در دهه اخیر به وجود آمده است. در بین مکانیزم‌های مختلف، کربن دی‌اکسید می‌تواند به وسیله انحلال در آب سازند در سفره آبدۀ شور به تله بیافتد. تبخیر آب فرآیندی است که در زمان انحلال کربن دی‌اکسید در آب اتفاق می‌افتد و باعث رسوب نمک می‌شود و تخلخل را کاهش داده، به تراوایی مخزن در نزدیکی چاه آسیب می‌زند و باعث کاهش تزریق‌پذیری می‌شود. برای مطالعه تأثیر تزریق کربن دی‌اکسید بر خواص سفره آبدۀ در طی فرآیند تزریق، مدل‌سازی و شبیه‌سازی این فرآیند با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2013a انجام شده است. مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل In-house با داده‌های ارائه شده توسط زیدونی و همکارانش نشان می‌دهد نتایج تغییر تخلخل و تغییر تراوایی بر هم منطبق هستند و مدل ارائه شده با میانگین خطای نسبی حدود ۷٪ برای شعاع نواحی فازی دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی خواص در فرآیند تزریق کربن دی‌اکسید در سفره آبدۀ شور دارد.

**کلمات کلیدی:** شبیه‌سازی، جذب و ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید، تغییر تراوایی، آبدۀ، رسوب نمک، آسیب.

## مقدمه

هوایی مانند گرم شدن کره زمین و تخریب لایه اُزن می‌باشد. کربن دی‌اکسیدگازی گلخانه‌ای است که در این پدیده بیشترین تأثیر را دارد [۱]. بنابراین یافتن راهکارهای اقتصادی و پربازده جهت حذف و یا کاهش این آلاینده از مهم‌ترین اهداف پیش رو است.

افزایش جمعیت و فعالیت بشر روز به روز باعث افزایش غلظت و سرعت تغییر گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر به میزان بیش از حد طبیعی آنها گردیده است. نتیجه آن اثر گلخانه‌ای و بروز تغییرات آب و

هم‌اکنون چندین پروژه در نقاط مختلف جهان در زمینه مطالعه ذخیره کربن دی‌اکسید در سفره

مدل‌سازی عددی برهم کنش سنگ و سیال در فرآیند ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید در حال پیشرفت است و فقط تعداد معدودی مطالعه در این زمینه انجام شده است. در این میان تعداد کمی مطالعه به مدل‌سازی انتقال واکنش‌دار<sup>۱</sup> پرداخته‌اند و اکثر آنها نیز هنوز در حال توسعه هستند. مدل‌سازی انتقال غیر واکنش‌دار در اوایل دهه ۹۰ شروع شد به طوری که وندر می<sup>۲</sup> به دام انداختن کربن دی‌اکسید را در تله چینه‌ای تاکدیمی دایره‌ای شبیه‌سازی کرد [۹]. جدول ۱ مروری کلی بر مطالعات ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید در سفره آبدی را نشان می‌دهد.

### فرآیند مدل‌سازی

برای مطالعه تأثیر تزریق کربن دی‌اکسید بر خواص سفره آبدی طی فرآیند تزریق، مدل‌سازی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2013a انجام شده است. شبیه‌سازی برای مدت زمان تزریق ۱۰ سال انجام شده است. پارامترهای ورودی اولیه در جدول ۲ داده شده است. این پارامترها برگرفته از مطالعه زیدونی و همکارانش [۷] می‌باشد. جدول ۳ اجراهای مختلف شبیه‌سازی به منظور انجام آنالیز حساسیت را نشان می‌دهد. این اجراها واکنش‌های ژئوشیمیایی را در نظر نمی‌گیرد زیرا سرعت واکنش‌های انحلال و رسوب کانی‌ها بسیار آهسته بوده به گونه‌ای که ۱۰۰۰۰ سال طول می‌کشد تا یک واکنش ۱٪ رسوب دهد و میزان رسوب کانی در مدت زمان ۱۰ سال قابل چشم‌پوشی است.

### توصیف مدل

سفره آبدی شبیه‌سازی شده دارای طول ۴۰۰ m، ضخامت ۱۰۰ m و عرض ۱۰۰ m است. ابعاد مدل در شکل ۱ نشان داده شده است.

آبدی شور در حال انجام است. از جمله بزرگترین این پروژه‌ها می‌توان به «اسلپنر»<sup>۱</sup> در دریای شمال به عنوان پروژه قدیمی، «اسنوهیت»<sup>۲</sup> در دریای بارنتز<sup>۳</sup>، و «ویبرن-میدل»<sup>۴</sup> که پروژه ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید در کانادا می‌باشد اشاره کرد [۲].

جذب و ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید<sup>۵</sup> شامل جدا کردن گاز کربن دی‌اکسید از منابع اصلی رهاسازی این گاز در اتمسفر مانند نیروگاه‌های سوخت فسیلی، حمل و نقل آن به یک سایت ذخیره‌سازی و در نهایت ذخیره آن در یک مخزن طبیعی زیرزمینی است [۳]. این فرآیند به عنوان انتخاب برتر در جهت کاهش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر در نظر گرفته می‌شود. سفره‌های آبدی شور نسبت به سایر گزینه‌های ذخیره‌سازی نظیر مخازن نفت و گاز تخلیه شده ظرفیت بالقوه بالایی برای ذخیره کربن دی‌اکسید دارند [۴]. سفره‌های آبدی شور سازندهای زمین‌شناسی تراوایی هستند که دارای آب با نمک بسیار بالا بوده و معمولاً در حوزه‌های ماسه سنگی در اعماق بیشتر از یک کیلومتر وجود دارند و آب نمک آنها دارای شوری بالایی از ۲۵ تا بیش از ۲۲۵ g/L می‌باشد [۵].

تزریق کربن دی‌اکسید به آبدی باعث برهم کنش پیچیده سه فازی شامل به تله افتادن در اثر موینگی، انحلال، نفوذ، همرفتی و واکنش‌های شیمیایی می‌شود [۶]. تبخیر آب فرآیندی است که می‌تواند در زمان انحلال کربن دی‌اکسید در آب اتفاق بیافتد. این تبخیر باعث رسوب نمک می‌شود که تخلخل را کاهش داده، به تراوایی مخزن در نزدیکی چاه آسیب می‌زند و باعث کاهش تزریق پذیری می‌شود [۷]. تعداد چاه‌های تزریقی مورد استفاده در فرآیند ذخیره زمین‌شناسی کربن دی‌اکسید به دلایل اقتصادی محدود است لذا مسائل تزریق مهم است، چرا که سطح بالای نرخ جریان کربن دی‌اکسید باید برای دوره زمانی طولانی؛ معمولاً پنجاه سال، ثابت نگه داشته شود [۸].

1. Sleipner

2. Snøhvit

3. Barmes

4. Weyburn-Midale

5. Carbon Capture and Sequestration (CCS)

6. Reactive Transport

7. Vander Meer

جدول ۱ مروری کلی بر مطالعات انجام شده در زمینه ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید در آبد.

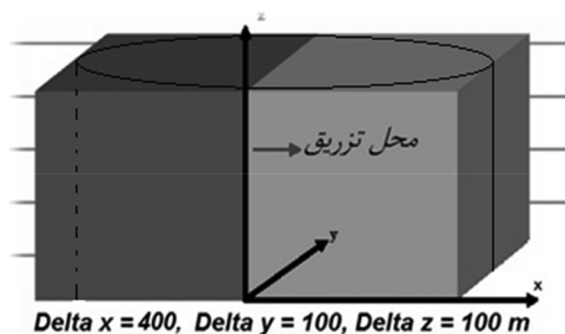
پژوهشگر	روش مطالعه	اهم نتایج
هولت	استفاده از اکلیپس ۱۰۰	نرخ تزریق و تراوایی مطلق، فاکتورهای غالب در مهاجرت CO <sub>2</sub> است [۱۰]
ویبر	مدل TOUGH2 چند فازی-چند جزئی	فاکتور اصلی مؤثر بر ذخیره حجمی CO <sub>2</sub> ، تراوایی مطلق است [۱۱].
کول	ارائه معادله حالت برای CO <sub>2</sub> برای استفاده در شبیه ساز TOUGH2	تراوایی مطلق کنترل کننده اصلی مهاجرت CO <sub>2</sub> است [۱۲].
استفان باچو	ارائه حل شبه تحلیلی برای پخش گاز اسیدی در اطراف چاه	سرعت پخش به خواص سفره آبد و خواص سیال تزریقی بستگی دارد [۱۳].
گیب	شبیه سازی ذخیره CO <sub>2</sub> در سفره آبد شور	تله حل شونده و تله گاز باقیمانده در رقابت با یکدیگر هستند [۱۴].
لورنت آندره	ارزیابی آزمایشگاهی خشک شدن آب نمک در نمونه ماسه سنگی	مدل سازی عددی تغییر پروفایل اشباع در مدل جریان دوفازی را با در نظر گرفتن تأثیرات دمایی ارائه نمودند [۱۵].
فروزش و نظری	شبیه سازی فرآیند نفوذ-همرفتی	نتایج این مطالعه در فهم بهتر مکانیزم های انحلال CO <sub>2</sub> در آب-نمک مؤثر است [۱۶].

جدول ۲ پارامترهای ورودی اولیه در فرآیند شبیه‌سازی بر هم کنش سنگ و سیال هنگام تزریق کربن دی‌اکسید به آبد شور.

۰/۱	شعاع چاه (m)	۴۵	دما (°C)
۰/۰۵۱۶	شوری (کسر مولی)	۱۰۰	نرخ تزریق (kg/s)
۵۸/۴۳	جرم ملکولی نمک	۱۲۰	فشار اولیه سفره آبد (bar)
۰/۳	S <sub>wirr</sub> (کسر)	۲۰۰	فشار ته چاه (bar)
۰/۰۵	S <sub>gc</sub> (کسر)	۰/۱۲	تخلخل (کسر)
۲۱۶۴/۸۳	چگالی نمک (kg/m <sup>3</sup> )	۲۵	تراوایی (md)

جدول ۳ مقادیر مختلف پارامترهای به کار رفته در آنالیز حساسیت.

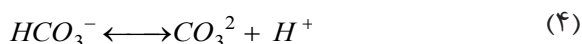
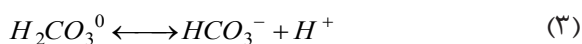
پارامتر	مقدار مرجع	تغییر ۱	تغییر ۲
دما (°C)	۴۵	۲۵	۶۰
فشار اولیه (bar)	۱۲۰	۸۰	۱۴۰
تراوایی (md)	۲۵	۱۵	۵۰
شوری (کسر مولی)	۰/۰۵۱۶	۰/۱	۰/۱۴



شکل ۱ ابعاد مدل In-house.

$CO_2^0$  تقریب زده شود [۲۰].

اسید کربنیک تجزیه می‌شود و یون‌های بی کربنات و کربنات تشکیل می‌شود [۴]:



انحلال گاز در آب نمک به عنوان فرآیند تعادل فازي مدل‌سازی شده است که با تساوی فوگاسیته در فاز آبی و گازی به دست می‌آید [۱۴]:

$$f_{i,g} = f_{i,aq} \quad i = 1, \dots, n_c \quad (۵)$$

$n_c$  تعداد مؤلفه‌های موجود است.  $f_{i,g}$  فوگاسیته مؤلفه  $i$  در فاز گازی است که با معادله حالت به دست می‌آید و  $f_{i,aq}$  فوگاسیته مؤلفه  $i$  در فاز آبی است که می‌تواند با قانون هنری محاسبه شود [۱۴].

مدل PVT استفاده شده در این مطالعه مدل اسپایکر و همکارانش [۲۱] می‌باشد. در مدل اسپایکر و پریس فوگاسیته اجزا با استفاده از معادله حالت اصلاح شده ردلیچ-کوانگ محاسبه شده است که با داده‌های آزمایشگاهی برای کربن دی‌اکسید خالص مطابقت داده شده است. چگالی فاز آبی اشباع از کربن دی‌اکسید با رابطه زیر محاسبه شده است [۲۲]:

$$\rho_{sat} = \frac{1 + \frac{MW_2}{MW_1} x_2}{\frac{V_{CO_2}}{MW_1} \left( \frac{x_2}{x_1} \right) + \frac{1}{\rho_1}} \quad (۶)$$

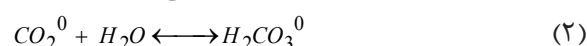
تعداد گریده‌ها ۴۰۰ گرید در جهت طول، ۱۰ گرید در جهت  $y$  و ۱۰ گرید در جهت  $z$  می‌باشد. چاه‌هایی با فشار ثابت برابر با فشار اولیه سفره آبد در مرزها فرض شده است. محل تزریق در خط وسط سفره آبد است. شکل ۲ منحنی‌های تراوایی نسبی را نشان می‌دهد. برای تعیین تراوایی نسبی آب نمک از تابع ون جنوکتن<sup>۱</sup> [۱۷] و برای تراوایی نسبی گاز از منحنی کوری<sup>۲</sup> [۱۸] استفاده شده است.

#### مدل حلالیت کربن دی‌اکسید در آب نمک

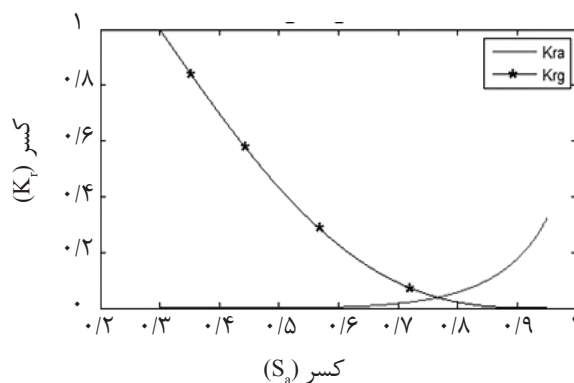
اساساً انگیزه ذخیره کربن دی‌اکسید در سفره آبد به تله افتادن در اثر انحلال است [۱۴]. انحلال فاز گازی کربن دی‌اکسید در فاز آبی با واکنش زیر نشان داده می‌شود [۱۹]:



کربن دی‌اکسید حل شده که هنوز یونیزه نشده است به دو شکل می‌تواند وجود داشته باشد: شکل هیدراته (اسید کربنیک) یا  $H_2CO_3^0$  و شکل غیر هیدراته:  $CO_2^0$ . مجموع این دو شکل نشان دهنده کل کربن دی‌اکسید حل شده است که همان کربن دی‌اکسید آبی (aq) می‌باشد. واکنش هیدراسیون به صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:



این واکنش بیشتر به سمت چپ تمایل دارد و بیشتر  $CO_2$  غیر یونیزه به شکل  $CO_2^0$  است و تمام کربن دی‌اکسید حل شده می‌تواند به صورت



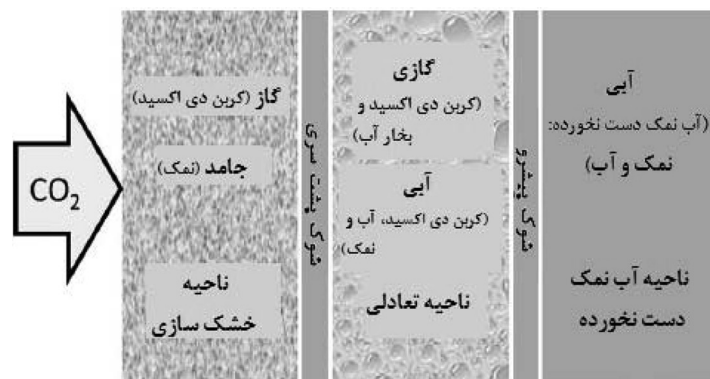
شکل ۲ منحنی‌های تراوایی نسبی استفاده شده در مدل In-house.

1. Van Genuchten Function  
2. Corey Curve

مویبندی و گرانش نادیده گرفته شده است، سنگ بدون واکنش می باشد، تعادل فاز محلی وجود دارد و دما و فشار ثابت است [۷]. با نادیده گرفتن فشار مویبندی و هم چنین فرآیند نفوذ، ناسازگاری در اشباع توسط شوک هایی برای مناطق مختلف تعریف شده است؛ به طوری که سفره آبدۀ توسط شوک هایی به سه ناحیه تقسیم شده است؛ شوک پیشرو<sup>۱</sup> و شوک پشت سری<sup>۲</sup>. دورتر از چاه و در پایین دست شوک پیشرو منطقه آب نمک است که هنوز نمک آن رسوب نداده است و با کربن دی اکسید تزریقی جابه جا می شود. در بالا دست شوک پشت سری یک منطقه تعادلی دوفازی خواهیم داشت که شامل کربن دی اکسید محلول در آب نمک (فاز آبی) و کربن دی اکسید به همراه بخار آب (فاز گازی) می باشد. شوک تبخیری پشت سری<sup>۳</sup> ناحیه تعادلی را از ناحیه خشک سازی (که در آن رسوب نمک خواهیم داشت) جدا می سازد. شکل ۳ این نواحی را نشان می دهد [۷].

مسئله پیوستگی و مفهوم جریان کسری در نظر گرفته شده است که به معادله دیفرانسیل جزئی هذلولوی غیرخطی درجه ۱ منجر می شود:

$$\frac{\partial G_{CO_2}}{\partial t} + \frac{q_{inj}}{\pi h \phi_0} \frac{\partial H_{CO_2}}{\partial G_{CO_2}} \frac{\partial G_{CO_2}}{\partial r^2} = 0 \quad (9)$$



شکل ۳ نواحی فازی در نظر گرفته شده در مدل تحلیلی رسوب نمک [۷].

$\rho$  بر حسب  $\text{kg/m}^3$ ، و اندیس ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به حلال و حل شونده است.  $\bar{V}_{CO_2}$  از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\bar{V}_{CO_2} = 37.51 - 9.585 \times 10^{-2} T + 8.74 \times 10^{-4} T^2 - 5.044 \times 10^{-7} T^3 \quad (7)$$

$\bar{V}_{CO_2}$  بر حسب سانتی متر مکعب بر مول و دما بر حسب °C است. چگالی فاز گازی با استفاده از معادله حالت و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۳]:

$$V^3 - V^2 \left( \frac{RT}{P} \right) - V \left( \frac{RTb_m}{P} - \frac{a_m}{PT^{0.5}} + b_m^2 \right) - \left( \frac{a_m b_m}{PT^{0.5}} \right) = 0 \quad (8)$$

### مدل رسوب نمک

پروفایل رسوب نمک، میزان رسوب، میزان کاهش تراوایی و تخلخل را می توان مدل سازی کرد. در این قسمت از مدلی تحلیلی [۷] استفاده شده که نسبتاً ساده بوده و ابزاری کاربردی برای پیش بینی رسوب نمک در مکان و زمان خاص است. این مدل در سرعت های بالا (وقتی نیروهای ویسکوز بر نیروی گرانش غلبه دارد) کاربرد دارد. فرضیات اصلی به کار رفته در ایجاد مدل تحلیلی رسوب نمک بدین صورت است: مخزن همگن در نظر گرفته شده است، فرآیندهای نفوذ و پخش غیرفعال هستند، نیروهای

1. Leading Shock  
2. Trailing Shock  
3. Trailing Evaporation Shock

$$\left(\frac{r^2 - r_w^2}{t}\right)_{G_{CO_2}} = \frac{q_{inj}}{\pi h \phi} \left(q_D \frac{\partial f_g}{\partial S_g}\right)_{G_{CO_2}} \quad (14)$$

به دلیل عدم تحرک نمک جامد، سیستم سه فازی کربن دی اکسید، آب و نمک با سیستم دوفازی کربن دی اکسید-آب نمک تقریباً می‌شود. همه نمک رسوبی در بالا دست شوک پشت سری مربوط به تبخیر نمک اشباع در پایین دست شوک پشت سری است. به عبارت دیگر مدل بدون تغییر شوری در منطقه تعادلی است. این قسمت از مدل «ناحیه خشک‌سازی» نام دارد [۷]. با استفاده از موازنه جرم، رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$S_{salt} = \frac{\rho_a \omega_{salt,a}}{\rho_s} (1 - S_g^c) \quad (15)$$

$S_g^c$  اشباع گاز پایین دست شوک عقبی،  $S_{salt}$  اشباع نمک رسوبی و  $\omega_{salt,a}$  غلظت مولی نمک در فاز آب است. معادله فوق بیان می‌کند که اشباع نمک رسوبی به غلظت مولی نمک در فاز آب  $\omega_{salt,a}$ ، چگالی مولی فاز آبی  $\rho_a$  و چگالی مولی نمک جامد  $\rho_s$  و اشباع گاز پایین دست شوک عقبی  $S_g^c$  بستگی دارد. بر اساس شوری آب نمک می‌توان تقریباً زیر را برای  $\omega_{salt,a}$  در نظر گرفت [۷]:

$$\omega_{salt,a} = s(1 - \omega_{CO_2,a}) \quad (16)$$

در رابطه فوق  $s$  شوری به صورت کسر مولی است. رسوب نمک تخلخل را کاهش می‌دهد که تأثیر آن با معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$\Phi = \Phi_0(1 - S_{salt}) \quad (17)$$

نمک می‌تواند در خلل و فرج بزرگ، کوچک یا در گلوگاه‌ها رسوب کند. بر اساس محلی که نمک رسوب می‌کند میزان تأثیر روی تراوایی متفاوت است. مدل‌های مختلفی در دست است که تراوایی را به تخلخل نسبت می‌دهند. در این مطالعه از مدل کوزنی-کارمن که مربوط به دانه‌های کروی شکل است برای محاسبه تغییر تراوایی بر اساس تخلخل استفاده می‌شود [۷]؛ بنابراین نسبت تراوایی ثانویه و اولیه به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$h$  ضخامت سفره آبد و  $q_{inj}$  نرخ تزریق است.  $H_{CO_2}$  نرخ مولی کربن دی اکسید نرمالایز شده است و  $G_{CO_2}$  چگالی مولی کلی کربن دی اکسید نرمالایز شده با چگالی مولی سیال تزریقی است که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۷]:

$$H_{CO_2} = \rho_{aD} \omega_{CO_2,a} f_a q_D + \rho_{gD} \omega_{CO_2,g} f_g q_D \quad (10)$$

$$G_{CO_2} = \rho_{aD} \omega_{CO_2,a} S_a + \rho_{gD} \omega_{CO_2,g} S_g \quad (11)$$

$\rho_{aD}$  چگالی مولی فاز آبی بدون بعد بوده و برابر نسبت چگالی مولی فاز آبی به چگالی مولی کربن دی اکسید تزریقی است.  $\rho_{gD}$  برابر نسبت چگالی مولی فاز گازی به چگالی مولی کربن دی اکسید تزریقی است.  $\omega_{CO_2,a}$  کسر مولی کربن دی اکسید در فاز آبی،  $\omega_{Brine,a}$  کسر مولی آب نمک در فاز آبی،  $\omega_{CO_2,g}$  کسر مولی کربن دی اکسید در فاز گازی و  $\omega_{water,g}$  کسر مولی آب در فاز گازی است.  $q_D$  در منطقه دو فازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_D = \frac{(\rho_{aD} \omega_{CO_2,a} - \rho_{gD} \omega_{CO_2,g}) S_g^c - \Delta \rho_D S_g^c + \omega_{Brine,a} \rho_{aD}}{(\rho_{aD} \omega_{CO_2,a} - \rho_{gD} \omega_{CO_2,g}) f_g^c - \Delta \rho_D f_g^c} + \omega_{Brine,a} \rho_{aD} + \rho_{aD} \rho_{gD} \Delta \omega_{CO_2} (S_g^c - f_g^c) \quad (12)$$

نماد  $\Delta$  در این رابطه بیانگر مقدار پارامتر در فاز آبی منهای مقدار پارامتر در فاز گازی است.  $S_g^c$  اشباع گاز در شوک پیشرو و  $f_g^c$  جریان کسری مربوط به اشباع گاز شوک جلویی است. به دلیل ثابت بودن دما و فشار، کسرهای مولی و چگالی فازی ثابت است؛ بنابراین فقط تابع اشباع است. دامور و همکارانش در سال ۱۹۸۶ نشان دادند که اگر ترکیب جزئی در امتداد خط ارتباطی (گره)<sup>۱</sup> در ناحیه دوفازی تغییر کند سرعت جریان محلی ثابت خواهد بود [۲۴]. بنابراین  $H_{CO_2}$  نیز فقط تابعی از  $f_g$  است و از آن جا که  $f_g$  نیز فقط تابع اشباع گاز است؛ بنابراین می‌توان  $H_{CO_2}$  را بر حسب  $G_{CO_2}$  نوشت. حل کلی معادله ۹ به معادلات سرعت موج زیر منجر می‌شود:

$$\left(\frac{r^2 - r_w^2}{t}\right)_{G_{CO_2}} = \frac{q_{inj}}{\pi h \phi} \left(\frac{\partial H_{CO_2}}{\partial G_{CO_2}}\right)_{G_{CO_2}} \quad (13)$$

فاز گازی تنها کربن دی اکسید خالص است [۲۳]. از رابطه تجربی حسن‌زاده-پولادی درویش [۲۳] برای محاسبه گرانیروی فاز گازی استفاده شده است. واضح است که اشباع گاز در ناحیه تک فاز کربن دی اکسید برابر ۱ و در ناحیه‌ای که هنوز گاز بدانجا نرسیده برابر صفر است. در این روش از دو نقطه به نام‌های I و J مماس‌هایی بر نمودار جریان کسری گاز رسم کرده و بدین ترتیب اشباع شوک‌های پشت سری و پیشرو به دست می‌آید [۷]. مختصات نقاط

$$I \text{ و } J \text{ به صورت زیر به دست می‌آید:} \\ (S_g^I, f_g^I) = \left( \frac{\rho_{aD} \omega_{CO_2,a}}{\rho_{aD} \omega_{CO_2,a} - \rho_{gD} \omega_{CO_2,g}}, \frac{\rho_{aD} \omega_{CO_2,a}}{\rho_{aD} \omega_{CO_2,a} - \rho_{gD} \omega_{CO_2,g}} \right) \quad (22)$$

$$(S_g^J, f_g^J) = \left( \frac{\rho_{aD} \omega_{CO_2,a}}{\rho_{aD} \omega_{Brine,a} - \rho_{gD} \omega_{water,g}}, \frac{\rho_{aD} \omega_{Brine,a}}{\rho_{aD} \omega_{Brine,a} - \rho_{gD} \omega_{water,g}} \right) \quad (23)$$

شکل ۴ روش گرافیکی را به خوبی نشان می‌دهد. مدل افت فشار

افت فشار کلی برابر مجموع افت فشار در سه ناحیه است. افت فشار در طول ناحیه تک فاز کربن دی اکسید با استفاده از قانون دارسی به دست می‌آید [۲۶]:

$$\Delta p_{dry} = \frac{q \mu_g}{2 \pi h k k_{r,Sg=1}} \ln \left( \frac{r_{dry}}{r_w} \right) \quad (24)$$

این فاکتور در نامعادله زیر صدق می‌کند:

$$k_{r,g} |_{Sg,dry} < k_{r,Sg=1} < 1 \quad (25)$$

$$\frac{K'}{K} = \left( \frac{(1 - S_{salt})^3}{\left( 1 + \left( \frac{\Phi_0}{1 - \Phi_0} \right) S_{salt} \right)^2} \right) \quad (18)$$

تغییر در تراوایی می‌تواند با ضریب پوسته بیان شود:

$$Skin = \int_{r_w}^r \left( \frac{k}{K'} - 1 \right) \frac{dr}{r} \quad (19)$$

با توجه به معادله (۱۸) نتیجه می‌شود:

$$Skin = \left[ \frac{\left( 1 + \left( \frac{\Phi_0}{1 - \Phi_0} \right) S_{salt} \right)^2}{(1 - S_{salt})^3} - 1 \right] \ln \left( \frac{r_{dry}(t)}{r_w} \right) \quad (20)$$

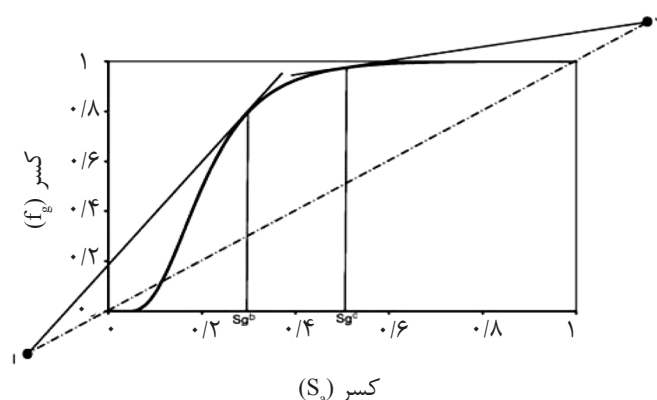
$r_{dry}$  شعاع منطقه خشک‌سازی است و به زمان وابسته است. بنابراین این معادله ضریب پوسته را بر حسب زمان محاسبه می‌کند.

مدل تعیین نواحی

با رسم جریان کسری گازی  $f_g$  بر حسب اشباع گاز  $S_g$  می‌توان نواحی فاز از تزریق کربن دی اکسید به سفره آبدار را مشخص کرد. جریان کسری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_g = \frac{1}{\left( 1 + \frac{K_{ra}}{K_{rg}} \cdot \frac{\mu_g}{\mu_a} \right)} \quad (21)$$

$\mu_g$  ویسکوزیته فاز گازی و  $\mu_a$  ویسکوزیته فاز آبی است. گرانیروی آب نمک براساس رابطه ارائه شده توسط مک کین و همکارانش تخمین زده می‌شود [۲۵]. برای محاسبه گرانیروی فاز گازی فرض شده است که



شکل ۴ روش گرافیکی تعیین مختصات شوک پشت سری و پیشرو [۷].



دقیقاً در پایین دست جبهه خشک‌سازی است و  $S_{g,BL}$  اشباع فاز کربن دی اکسید در منطقه ی دو فازی دقیقاً در بالا دست جبهه باکلی-لورت است [۲۶].

افت فشار در طول ناحیه تک فاز ی آب نمک به صورت زیر است [۲۶]:

$$\Delta p_{Brine} = \frac{q\mu_w}{2\pi kh} \ln\left(\frac{r_e}{r_{BL}}\right) \quad (28)$$

### نتایج و بحث

مدل تحلیلی ارائه شده توسط زیدونی به یک مسأله دارای حل عددی اعمال شده است. نتایج عددی این مسأله توسط پریس و همکارانش [۲۸] ارائه شده است. در این مدل عددی از شبه‌سازی TOUGH2 استفاده شده که توانایی شبه‌سازی رسوب نمک را دارد. مقایسه بین حل عددی و حل تحلیلی ارائه شده توسط زیدونی در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین نتایج برقرار است؛ بنابراین مرجع مذکور دارای اعتبار است.

شکل‌های ۷ تا ۱۰ نتایج شبه‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل In-house نسبت به نتایج ارائه شده توسط زیدونی و همکارانش [۷] انطباق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل In-house دارای خطاهای ناچیزی است که در جدول ۴ آمده است.

حد پایین به تراوایی نسبی فاز غنی از کربن دی اکسید در پایین دست جبهه خشک‌سازی مربوط است. این حد رو به افزایش است زیرا نمک رسوبی نمی‌تواند خلل و فرجی را بیش از آنچه که آب اولیه اشغال کرده اشغال کند. حد بالایی مربوط به حالتی است که کاهش تراوایی مطلق به خاطر رسوب، صفر است. آزمایشات نشان داده‌اند که مقدار  $k_{r,Sg=1}$  بین ۰/۷ تا ۰/۸۵ می‌باشد [۲۷]. برای سادگی فرض شده است که نمک در داخل خلل و فرج توزیع شده است؛ در صورتی که نمک در واقع در گلوگاه و در نقطه تماس دانه‌های سنگ، رسوب می‌کند [۲۶].

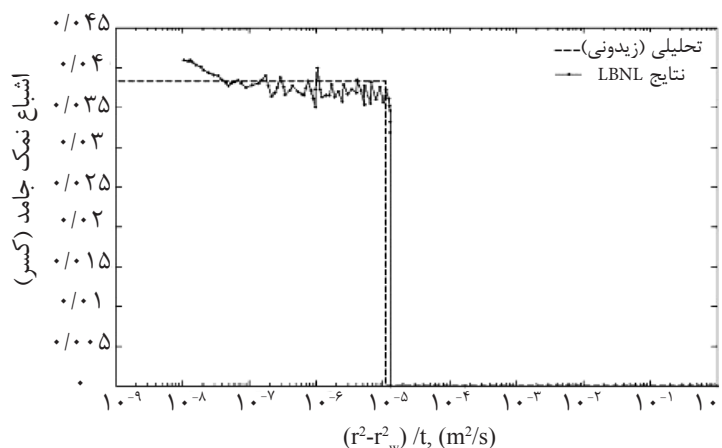
افت فشار در ناحیه باکلی-لورت دوفازی به صورت زیر تقریب زده می‌شود [۲۶]:

$$\Delta p_{BL} = \frac{q}{2\pi kh} \ln\left(\frac{r_{BL}}{r_{dry}}\right) \left(\frac{k_{rg} + k_{rw}}{\mu_g + \mu_w}\right)^{-1} \Big|_{S_{g,avg}} \quad (26)$$

رابطه سمت راست آنالیز را به شکل قابل توجهی ساده کرده است. این تقریب به جای استفاده از میانگین شعاعی تحرک، از تحرک در اشباع میانگین ناحیه دوفازی استفاده کرده است. این تقریب وقتی منطقی است که بازه تغییر اشباع در ناحیه دوفازی باریک باشد. بنابراین:

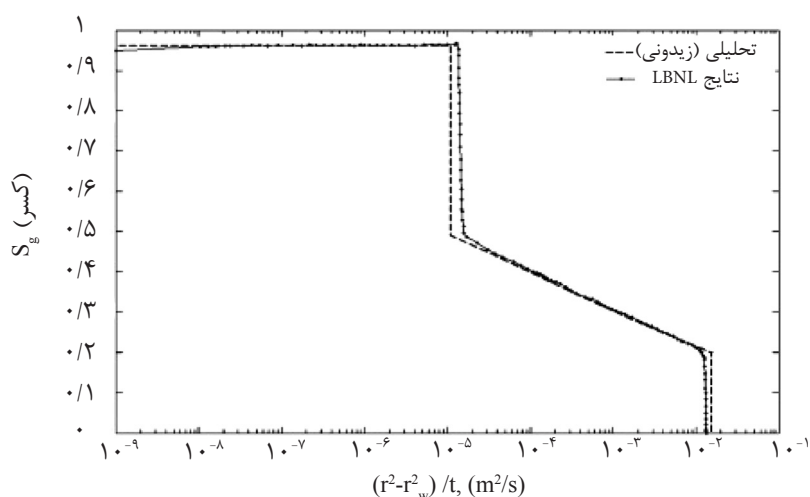
$$S_{g,avg} = \left(\frac{S_{g,dry} + S_{g,BL}}{2}\right) \quad (27)$$

$S_{g,dry}$  اشباع فاز کربن دی اکسید در ناحیه دوفازی

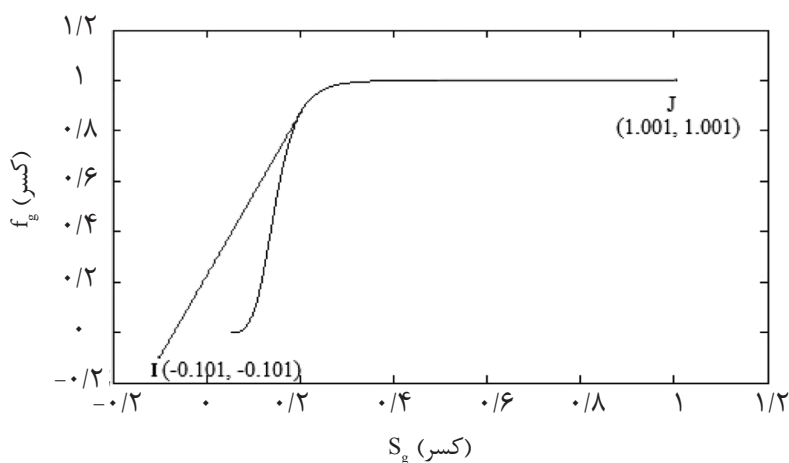


شکل ۵ مقایسه نتایج عددی با نتایج مدل زیدونی برای اشباع نمک رسوبی [۷].

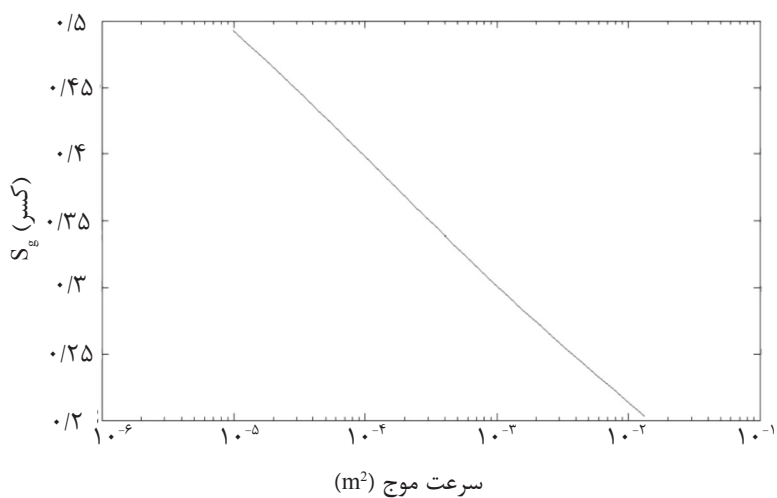




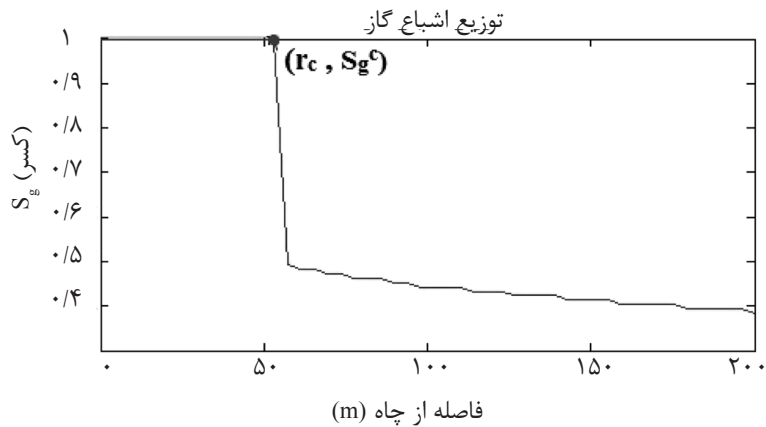
شکل ۶ مقایسه نتایج حل عددی با نتایج زیدونی برای اشباع فاز گازی [۷].



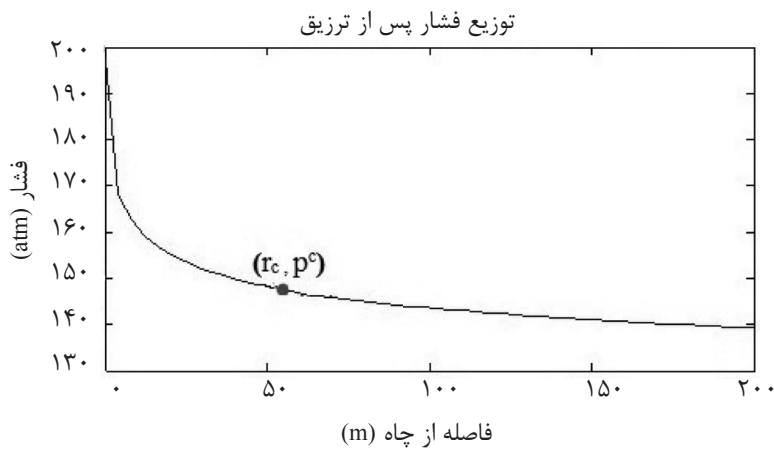
شکل ۷ تعیین اشباع نواحی مدل In-house با روش ترسیمی.



شکل ۸ اشباع گاز در ناحیه تعادلی برحسب سرعت موج در مدل In-house.



شکل ۹ توزیع اشباع گاز بعد از گذشت ۱۰ سال در مدل In-house.



شکل ۱۰ توزیع فشار بعد از گذشت ۱۰ سال در مدل In-house.

جدول ۴ مقایسه نتایج مدل In-house با مطالعه زیدونی.

پارامتر	مدل In-house	مدل زیدونی	درصد خطا
$I_b$ (متر)	۲۰۴۷	۲۲۰۶	۷/۲
$I_c$ (متر)	۵۵/۴	۶۰	۷/۶
$S_g^c$ (درصد)	۴۹/۹	۴۸/۹	۲
$S_g^b$ (درصد)	۲۰/۳	۱۹/۸	۲/۵
اشباع نمک رسوبی (درصد)	۴/۵	۳/۸	۱۸/۴
نسبت مقدار تراوایی به مقدار تراوایی اولیه	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰
مقدار ضریب پوسته بعد از یک سال	۰/۱۷۶	۰/۱۷۶	۰
کسر مولی کربن دی اکسید در فاز آبی (در فشار سفره آبد)	۰/۰۲۰۵	۰/۰۱۱۰	۸۶/۳۶
کسر مولی کربن دی اکسید در فاز گازی (در فشار سفره آبد)	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۵۷	۰/۰۳
گرانروی فاز آبی در ناحیه تعادلی (سانتی پویز)	۰/۹۲۷۸	۰/۸۲۶۰	۱۲/۳۲
گرانروی فاز گازی در ناحیه تعادلی (میکرو پاسکال ثانیه)	۶۱/۹	۴۹/۶	۲۴/۸
چگالی کربن دی اکسید تزریقی	۶۴۴/۸۲۳۹	۶۴۶/۱۲۲۴	۰/۲

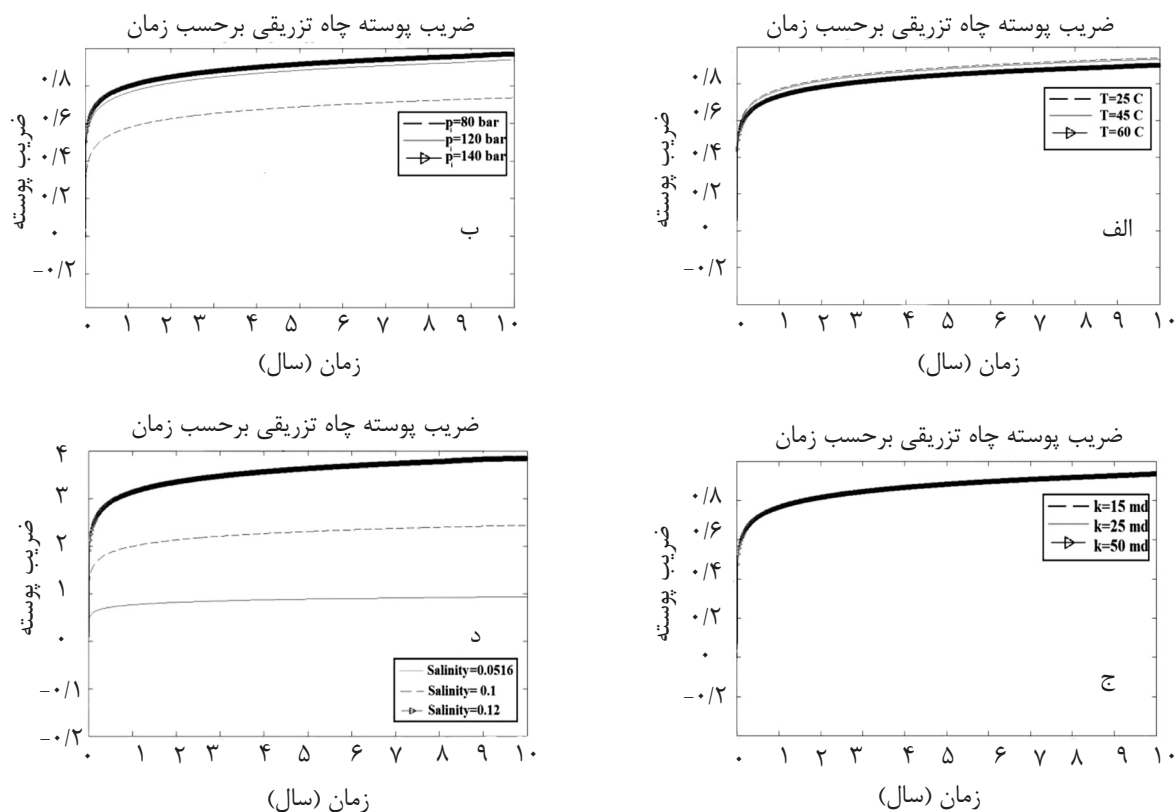
داشت که بیانگر این است که در طول ۱۰ سال تزریق ناحیه تک فازی آب نمک نخواهیم داشت. دلیل این مشاهده این است که شعاع سفره ی آبد (۲۰۰ m) کمتر از شعاع ناحیه تعادلی (۲۰۴۷/۳ m) است. شکل ۱۰ پروفایل فشار سفره آبد بعد از ۱۰ سال تزریق را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین شیب نمودار در ناحیه گازی است. فشار در انتهای آبد بعد از تزریق به مدت ۱۰ سال به ۱۳۹/۲۴۱۷ atm می‌رسد که بیشتر از فشار اولیه سفره آبد (۱۱۸/۴۴ atm) است.

شکل ۱۱ نتایج حاصل از شبیه‌سازی ضریب پوسته را برای آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف نشان می‌دهد. شکل ۱۱ (الف) نشان می‌دهد هر چه دمای سفره آبد بیشتر باشد میزان ضریب پوسته حاصل از رسوب نمک کمتر است. با کاهش ۲۰ درجه دما پس از ده سال مقدار ضریب پوسته نسبت به حالت مرجع ۰/۸۷٪ افزایش و با افزایش ۱۵ درجه دما، پس از ده سال مقدار ضریب پوسته نسبت به حالت مرجع ۰/۴۰۱٪ کاهش می‌یابد. نتیجه تغییر دمای سفره آبد بر روی تغییر تخلخل و تغییر تراوایی آنقدر محسوس نیست اما هر چه دمای سفره آبد بیشتر باشد تغییر در تخلخل و تراوایی کمتر است و نسبت تخلخل ثانویه به اولیه و تراوایی ثانویه به اولیه به عدد یک نزدیکتر است. این نتیجه منطقی است زیرا با افزایش دما نمک بیشتری به صورت محلول در آب باقی می‌ماند و در نتیجه رسوب کمتر است؛ بنابراین انتظار می‌رود تخلخل و تراوایی به میزان کمتری کاهش یابد. شکل ۱۱ (ب) به وضوح نشان می‌دهد که در فشار بالاتر سفره آبد میزان ضریب پوسته حاصل از رسوب نمک بیشتر است که در تزریق پذیری تأثیر می‌گذارد.

آنچه بیشتر مد نظر این مدل‌سازی است؛ نواحی تعادلی، میزان ضریب پوسته و از همه مهمتر مدل‌سازی بر هم کنش سنگ و سیال است که این بر هم کنش در میزان تغییر تراوایی و تخلخل خود را نمودار می‌سازد. با گرد کردن نتایج به دست آمده از مدل In-house به اندازه دقت نتایج مدل زیدونی (تا دو رقم معنی دار) نتایج تغییر تخلخل و ضریب پوسته در مدل In-house و مدل زیدونی و همکارانش بر هم منطبق هستند؛ بنابراین مدل دارای اعتبار است. نکته قابل توجه این است که نتایج کسر مولی اجزا در حال تعادل در مدل In-house نسبت به مدل زیدونی دارای دقت بالاتری است. جدول ۵ خطای کسر مولی اجزا در حال تعادل را در دو مدل In-house و مدل زیدونی نسبت به داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط اسپایکر و پریس (۲۰۰۳) نشان می‌دهد. شکل ۷ تعیین اشباع نواحی تعادلی با روش ترسیم را نشان می‌دهد. مقدار I برابر (-0.101, -0.101) و مقدار J برابر (1.001, 1.001) می‌باشد. اشباع‌های به دست آمده با این روش همان روش زیدونی و همکارانش می‌باشد، با این تفاوت که گرانیروی فازهای گازی و آبی با روابط تجربی استفاده شده توسط زیدونی به دست نیامده است. نتایج نشان می‌دهد که این اشباع‌ها تنها حدود ۲ درصد خطا دارند. شکل ۸ سرعت موج را نشان می‌دهد. همانند مطالعه زیدونی و همکارانش سرعت موج در ناحیه ی تعادلی بین  $10^{-5}$  و  $10^{-2}$   $m^2/s$  می‌باشد. شکل ۹ اشباع گاز در نواحی / مختلف بعد از تزریق را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار اشباع گاز در ناحیه تک فازی گاز برابر یک بوده و این اشباع تا شعاع ۵۵/۴۱۵۷ m دیده می‌شود. از این شعاع تا انتهای سفره آبد ناحیه تعادلی خواهیم

جدول ۵ مقایسه کسر مولی به دست آمده توسط مدل In-house و مدل زیدونی با نتایج آزمایشگاهی.

درصد خطای مدل زیدونی	In-house مدل	درصد خطای مدل زیدونی
۵۰/۰	۶/۸	کسر مولی کربن دی اکسید در فاز آبی (در فشار سفره آبد)
۵/۴	۵/۳	کسر مولی کربن دی اکسید در فاز گازی (در فشار سفره آبد)



شکل ۱۱ مقایسه ضریب پوسته حاصل از مدل In-house در الف: دماهای مختلف، ب: فشارهای مختلف، ج: مقادیر تراوایی مختلف و د: مقادیر شوری مختلف.

نتایج، برای انتخاب سفره آبدۀ جهت ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید، سفره آبدۀ باید انتخاب شود که دمای پایین‌تر، فشار بالا و شوری کمتری دارد. این پارامترها در به تله انداختن کربن دی‌اکسید در اثر حلالیت کمک می‌کنند. سفره آبدۀ با تراوایی بالاتر موجب تزریق پذیری بهتر گاز می‌شود.

### نتیجه‌گیری

علاقه زیادی در زمینه مطالعه ذخیره کربن دی‌اکسید در سفره ی آبدۀ شور در دهه اخیر ایجاد شده است و این به خاطر تهدید زیست محیطی کربن دی‌اکسید است. در بین مکانیزم‌های مختلف کربن دی‌اکسید می‌تواند به وسیله انحلال در آب سازند در سفره آبدۀ شور به تله بیافتد. پروفایل رسوب نمک، میزان رسوب، میزان کاهش تراوایی و تخلخل را می‌توان مدل‌سازی کرد. تزریق کربن دی‌اکسید به سفره آبدۀ عمیق شور سه منطقه

اما باید توجه داشت که بر اساس رابطه بین حلالیت کربن دی‌اکسید در آب نمک و فشار، کسر مولی کربن دی‌اکسید در فاز گازی در فشار بالاتر، بیشتر است. شکل ۱۱ (ج) به خوبی نشان می‌دهد که مقادیر تراوایی مختلف، ضریب پوسته یکسانی را نتیجه می‌دهند. بنابراین تغییر تراوایی در مدل تعیین نواحی و تعیین میزان رسوب نمک تأثیری ندارد اما باید توجه داشت هرچه تراوایی سفره آبدۀ بیشتر باشد تزریق‌پذیری بهتر و بعد از تزریق فشار سفره آبدۀ بالاتر است و میزان افت فشار کمتر خواهد بود. شکل ۱۱ (د) ضریب پوسته را برای مقادیر شوری مختلف نشان می‌دهد. با افزایش شوری، ضریب پوسته به شدت افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش کسر مولی شوری از ۰/۰۵۱۶ به ۰/۱۲، مقدار تراوایی ۳۰٪ کاهش می‌یابد. بنابراین بالا بودن بیش از حد شوری سفره آبدۀ در فرآیند ذخیره‌سازی تأثیر منفی دارد. براساس این

$\rho_{gD}$ : چگالی مولی بدون بعد فاز گازی  
 $\omega_{Brine,a}$ : غلظت مولی آب نمک در فاز آبی (کسر)  
 $\omega_{water,g}$ : غلظت مولی آب در فاز گازی (کسر)  
 $\omega_{salt,a}$ : غلظت مولی نمک در فاز آب (کسر)  
 $\Phi_0$ : تخلخل اولیه (کسر)  
 $f_g$ : جریان کسری (کسر)  
 $f_g^C$ : جریان کسری مربوط به اشباع گاز شوک جلویی (کسر)  
 $f_{i,aq}$ : فوگاسیته ی مولفه  $i$  در فاز آبی  
 $f_{i,g}$ : فوگاسیته ی مولفه  $i$  در فاز گازی  
 $G_{CO_2}$ : چگالی مولی کلی کربن دی اکسید نرمالایز شده با چگالی مولی سیال تزریقی  
 $H_{CO_2}$ : نرخ مولی کربن دی اکسید نرمالایز شده  
 $h$ : ضخامت سفره ی آبد (m)  
 $K$ : تراوایی (داری)  
 $K'$ : تراوایی نهایی (داری)  
 $K_{ra}$ : تراوایی نسبی آب نمک  
 $K_{rg}$ : تراوایی نسبی گاز  
 $K_{r,Sg=1}$ : کاهش تراوایی به خاطر رسوب نمک (کسر)  
 $MW$ : جرم مولکولی  
 $P$ : فشار (atm)  
 $q_D$ : نرخ جریان محلی بی بعد  
 $q_{inj}$ : نرخ حجمی تزریق ( $m^3/s$ )  
 $q_t$ : نرخ جریان محلی کلی ( $m^3/s$ )  
 $r_b$ : شعاع انتهای ناحیه دوفازی (m)  
 $r_c$ : شعاع انتهای ناحیه تک فاز کربن دی اکسید (m)  
 $r_{BL}$ : شعاع انتهای ناحیه باکلی-لورت (m)  
 $r_{dry}$ : شعاع منطقه خشک سازی (m)  
 $r_w$ : شعاع چاه (m)  
 $s$ : شوری (کسر مولی)  
 $S_{salt}$ : اشباع نمک رسوبی (کسر)  
 $S_{g,BL}$ : اشباع فاز کربن دی اکسید در منطقه دو فاز دقیقاً در بالا دست جبهه باکلی-لورت (کسر)

جریانی ایجاد می کند. برای مطالعه تأثیر تزریق کربن دی اکسید بر روی خواص سفره آبد در طی فرآیند تزریق، مدل سازی و شبیه سازی فشار، اشباع سیالات، ضریب پوسته و تغییر تخلخل و تراوایی با استفاده از نرم افزار MATLAB R2013a انجام شد. نتایج حاصل از این مطالعه به صورت زیر می تواند بیان شود:

۱- با گرد کردن نتایج به دست آمده از مدل In-house به اندازه دقت نتایج مدل زیدونی (تا دو رقم معنی دار) نتایج تغییر تخلخل و ضریب پوسته در مدل In-house و مدل زیدونی و همکارانش بر هم منطبق هستند.

۲- برتری مدل ارائه شده در این مطالعه این است که توزیع فشار سفره آبد پس از تزریق کربن دی اکسید را پیش بینی می کند و کسر مولی اجزا در حالت تعادل را با دقت بالاتری تخمین می زند.

۳- در فرآیند شبیه سازی، حساسیت پارامترهای مختلف بر روی نتایج مدل بررسی شده است که نتایج آن در رویکرد انتخاب سفره آبد بهینه جهت ذخیره سازی مؤثر است.

۴- مدل ارائه شده با میانگین خطای نسبی حدود ۷٪ برای شعاع نواحی فازی دقت بسیار خوبی در پیش بینی خواص در فرآیند تزریق کربن دی اکسید در سفره آبد دارد.

### تشکر و قدردانی

مراتب قدردانی و سپاس خود را از پژوهشکده های نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند اعلام می داریم.

### علائم و نشانه ها

$\mu_a$ : گرانروی فاز آبی (Pa.s)  
 $\mu_g$ : گرانروی فاز گازی (Pa.s)  
 $\rho_{sat}$ : چگالی فاز آبی اشباع از کربن دی اکسید ( $kg/m^3$ )  
 $\rho_D$ : چگالی مولی فاز آبی ( $kmol/m^3$ )  
 $\rho_{ad}$ : چگالی مولی بدون بعد فاز آبی  
 $\rho_s$ : چگالی مولی نمک جامد ( $kmol/m^3$ )

<p>حالت) <math>V_4</math>: میانگین حجم مولی جزء تغلیظ شده <math>i</math> در بازه فشاری <math>p^0</math> تا <math>p</math> <math>\text{cm}^3/\text{mol}</math></p> <p><math>x</math>: کسر مولی در فاز آبی</p> <p><math>y</math>: کسر مولی در فاز غنی از کربن دی اکسید</p>	<p><math>S_{gc}</math>: اشباع گاز پایین دست شوک عقبی (کسر)</p> <p><math>S_{gc}</math>: اشباع گاز بحرانی (کسر)</p> <p><math>T</math>: دما (درجه سانتی‌گراد، درجه کلوین در معادله حالت)</p> <p><math>V</math>: حجم (سانتی متر مکعب، مترمکعب در معادله</p>
--	---

## مراجع

- [۱]. نیک‌نژاد د.، "بررسی پیامدهای ناشی از گازهای گلخانه‌ای و اثرات آن بر روی کره زمین"، سومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، صفحات ۹-۱، ۱۳۸۸.
- [2]. Kvamme B., Jemai Kh., Chejara A. and Vafaei M. T., "Simulation of geomechanical effects of CO<sub>2</sub> injection in cold aquifers with possibility of hydrate formation", Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Gas Hydrates, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, pp. 1-6, July 17-21, 2011.
- [3]. Carbon Capture & Storage Association, "What is CCS?", UK, <http://www.ccsassociation.org/what%ADis%ADccs/1/2>, Retrieved 27 December 2014.
- [4]. Ofori A. and Engler T., "Effect of CO<sub>2</sub> sequestration on the petrophysical properties of an aquifer rock", New Mexico Institute of Mining and Technology, SPE, Canadian Unconventional Resource Conference, Calgary, Alberta, Canada, pp. 1-9, 15-17 November, 2011.
- [5]. Bachu S., "Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: road map for site selection using the transform of The geological space into the CO<sub>2</sub> phase space," Energy Conversion & Management, Vol. 43, pp. 87-102, 2002.
- [6]. Xiao Y., Xu T., and Pruess K., "The effects of gas-fluid-rock interactions on CO<sub>2</sub> injection and storage: insights from reactive transport modeling", ExxonMobil Upstream Research Company, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control, Berkeley, USA, pp. 1783-1790, 2009.
- [7]. Zeidouni M., Pooladi-Darvish M. and Keith D., "Analytical solution to evaluate salt precipitation during CO<sub>2</sub> injection in saline aquifers", Energy and Environmental Systems Group, Institute for Sustainable Energy, Environment, and Economy, University of Calgary, Canada International Journal of Greenhouse Gas Control 01/2009, , Calgary AB, T2N 1N4, Canada, pp. 600-611, 2009.
- [8]. Peysson Y., Bazin B., Magnier C., Kohler E. and Youssef S., "Permeability alteration due to salt precipitation driven by drying in the context of CO<sub>2</sub> injection", Journal Energy Procedia 4, IFP Energies Nouvelles, 1-4 avenue de Bois Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex- France, pp. 4387-4394, 2011.
- [9]. Van Der Meer L. G. H., "The condition limiting CO<sub>2</sub> storage in aquifers", Ener. Conferc. Mgmt, 34 (9-11), pp. 959-966, 1993.
- [10]. Holt T., Jensen J. I. and Lindeberg E., "Underground storage of CO<sub>2</sub> in aquifers and oil reservoirs", Ener. Conferc. Mgmt, Vol. 36, Issues 6-9, pp. 535-538, June-September 1995.
- [11]. Weir G.J., White S. P. and Kissling W. M., "Reservoir storage and contaminant of greenhouse gases", Transport in porous media, 23, pp. 37-60, 1996.

- [12]. Cole B. S., "An aquation of state for multiphase  $CO_2$  and water", Independent Study (M.Sc), New Mexico Institute of Mining and Technology, 1999.
- [13]. Bachu S., Nordbotten J. M. and Michael A. Celia, "Evaluation of the spread of acid-gas plumes injected in deep saline aquifers in western Canada as an analogue for  $CO_2$  injection into continental sedimentary basins", Dept. of Civil and Environmental Engineering, Princeton University, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Princeton, NJ 08544, USA, pp. 1-9, 2004.
- [14]. Nghiem L., Shrivastava V., Tran D., Kohse B., Hassam M. and Yang Ch., "Simulation of  $CO_2$  storage in saline aquifer", Computer Modelling Group Ltd, SPE, Reservoir Characterization and Simulation Conference, Abu Dhabi, UAE, pp. 1-16, 19-21 October, 2009.
- [15]. André L., Azaroual M., Peysson Y. and Bazin B., "Impact of porous medium desiccation during anhydrous  $CO_2$  injection in deep saline aquifers: up scaling from experimental results at laboratory scale to Near-Well region", Author manuscript, published in Energy Procedia 4, pp. 4442-4449, 2011.
- [16]. Foroozesh J. and Nazari Moghaddam R., "The convective-diffusive mechanism in  $CO_2$  sequestration in saline aquifers: experimental and numerical simulation study", SPE-174383-MS, EUROPEC, Madrid, Spain, pp. 1-13, 1-4 June 2015.
- [17]. Van Genuchten M. Th., "A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp. 892-898, 1980.
- [18]. Corey A. T., "The interrelation between gas and oil Relative permeabilities", Producers Monthly 19 (November): pp. 38-41, 1954.
- [19]. Noh M., Lake L.W., Bryant S. L. And Araque-Martinez, "Implication of coupling fractional flow and Geochemistry for  $CO_2$  injection in aquifers", SPE, Reservoir Evaluation & Engineering, University of Texas at Austin, pp. 406-414, 2007.
- [20]. Watson M. K., "Growth and modeling of freshwater algae as a function of media inorganic carbon content", Clemson University. Biosystems Engineering, ProQuest, USA, p.11, 2009.
- [21]. Spycher N., Pruess K., and Ennis-King J., "CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O mixtures in the geological sequestration of CO<sub>2</sub>: I. assessment and calculation of mutual solubilities from 12 to 100 °C and up to 600 bar", Geochimica et Cosmochimica Acta, 67(16): pp. 3015-3031, 2003.
- [22]. Garcia J. E. , "Density of aqueous solutions of CO<sub>2</sub>", Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-49023, pp. 1-7, 2001.
- [23]. Hassanzadeh H., Pooladi-Darvish M., Elsharkawy M., Keith W. and Leonenko Y., "Predicting PVT data for CO<sub>2</sub>-Brine Mixtures for Black-Oil Simulation of CO<sub>2</sub> Geological Storage", International Journal of Green House Gas Control 2, pp. 65-77, 2008.
- [24]. Dumore J. M., Hagoort J. and Isseeuw A. S., "An analytical model for one-dimensional three-component condensing and vaporizing gas drives", Soc. Pet. Eng. J. 24, pp. 169-179, 1984.
- [25]. Danesh A., "PVT and phase behaviour of petroleum reservoir fluids", Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, Scotland, U.K, p. 93, 1998.



- [26]. Burton M., Kumar N. and Bryant L., "*Time dependent injectivity during CO<sub>2</sub> storage in aquifers*", SPE, Improved Oil Recovery Symposium, The University of Texas at Austin, Oklahoma, USA, pp. 1-15, 2008.
- [27]. Zuluaga, "*Geochemical effects in two phase flow*", PhD Dissertation, U.of Texas at Austin, Austin, Texas, p. 136, 2005.
- [28]. Pruess, K. and Spycher N., "*ECO2N—A Fluid Property module for the TOUGH2 code for studies of CO<sub>2</sub> storage in saline aquifers*", Energy Convers, Manage. 48 (6), pp. 1761–1767, 2007.