

مروری بر روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن و سازوکار پوش‌سنگ در ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن

رضا فتحی^{۱*}، امیرحسین سیاح‌زاده^۱

^{۱*} - دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

نوع مقاله: مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۱

چکیده

رشد روزافزون جمعیت نیاز به انرژی به‌ویژه استفاده از منابع فسیلی را افزایش داده که در نتیجه دی‌اکسیدکربن در اتمسفر را که نوعی گاز گلخانه‌ای است چندین برابر کرده و منجر به افزایش گرمایش جهانی شده، این گرمایش جهانی می‌تواند زیستگاه‌های گیاهان و حیوانات را به‌خطر انداخته و الگوهای آب و هوا را دست‌خوش تغییرات کند و نتیجه آن وقوع سیل، خشک‌سالی و طوفان‌های شدید مخرب خواهد بود. یکی از راه‌های کاهش دی‌اکسیدکربن در اتمسفر ذخیره زیرزمینی دی‌اکسیدکربن می‌باشد که این ذخیره زیرزمینی به یک سنگ مخزن متخلخل که روی آن یک پوش‌سنگ آب‌بند غیرقابل نفوذ قرار گرفته، نیاز دارد. اهمیت پوش‌سنگ در این است که جابجایی دی‌اکسیدکربن شناور، آب‌شور و سایر مواد موجود را مهار می‌کند که این مواد به سازندهای فوقانی نشت نکنند. پوش‌سنگ باید قادر به تحمل تغییرات تنش در محل و تحمل تغییرات در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی باشد. هدف از انجام این مقاله مروری بر روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن و سازوکار پوش‌سنگ در ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن است. روش پژوهش مروری بر منابع و مآخذ موجود مرتبط با موضوع است. براساس نتایج به‌دست آمده فشار آب‌بندی پوش‌سنگ باید قبل از شروع عمل تزریق مشخص شده و در طی فرآیند تزریق از مقدار مشخصی فراتر نرود همچنین قبل از تزریق دی‌اکسیدکربن بهتر است دمای آن با دمای مخزن متناسب گردد تا از ایجاد شکستگی در پوش‌سنگ جلوگیری شود و برای درک بهتر از رفتار و ساختار پوش‌سنگ بهتر است خصوصیت‌های ژئوشیمیایی، ژئومکانیکی، حرارتی و مسیر جریان در پوش‌سنگ را در کارهای آزمایشی و شبیه‌سازی در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: گازهای گلخانه‌ای، ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن، شکست پوش‌سنگ، گرمایش جهان

مقدمه

رشد سریع اقتصاد به تقاضای روزافزون انرژی منجر شده است. پیامد بارز این امر موجب افزایش استفاده از سوخت‌ها، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی معمولی (ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی) شده که از زمان انقلاب صنعتی به منابع اصلی انرژی تبدیل شده‌اند. با این حال، استفاده فراوان از سوخت‌های فسیلی به دلیل اثرات نامطلوب آن‌ها بر محیط‌زیست، به‌ویژه انتشار دی‌اکسیدکربن (یک گاز اصلی گلخانه‌ای) به نگرانی عموم تبدیل شده است. براساس پایگاه اطلاعات انتشار دی‌اکسیدکربن در تحقیقات جوی جهانی میزان انتشار دی‌اکسیدکربن نسبت به دودمه پیش ۴۸٪ افزایش یافته است. در طول قرن گذشته، میزان دی‌اکسیدکربن در اتمسفر به بیش از ۳۹٪ افزایش یافته است. بدون سیاست‌های کاهش تغییرات آب و هوایی تخمین زده می‌شود که انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی در سال ۲۰۳۰ میلادی نسبت به سال ۲۰۰۰ میلادی به میزان ۲۵٪ الی ۹۰٪ افزایش یابد. با افزایش ممتد دی‌اکسیدکربن در اتمسفر تأثیراتی منفی پدیدار می‌گردد به نحوی که در صورت ذوب یخ‌های قطبی، یخچال‌های طبیعی به درون اقیانوس‌ها سرازیر شده و سطح دریا تا پایان قرن می‌تواند ۲/۴ متر افزایش یابد که این افزایش سطح دریا می‌تواند موجب زیر آب رفتن بسیاری از خشکی‌ها و درخطر افتادن بسیاری از جانداران و انسان‌ها گردد و باعث تغییرات عمده آب و هوایی مانند زمستان‌های بسیار سردتر یا تابستان‌های بسیار گرم‌تر گردد. ذوب شدن یخ‌های قطبی می‌تواند میزان انعکاس نور خورشید را کاهش دهد و باعث ذوب شدن بیشتر یخ‌های قطبی و افزایش سریع‌تر سطح دریا شود. هم‌چنین گرم شدن بیشتر باعث ایجاد عوارض جانبی دیگری می‌شود که می‌تواند از کنترل خارج شود. به‌طور خلاصه، خطرات ذکر شده با به‌خطر انداختن زندگی جانداران به‌اندازه کافی جدی هستند که باید در مورد راه‌حل‌های احتمالی دقیق فکر کنیم. پنجمین گزارش

هیأت بین‌دولتی تغییرات اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change) در سال ۲۰۱۳ الی ۲۰۱۴ نشان داد که برای جلوگیری از بدترین تأثیرات تغییرات آب و هوایی، لازم است که افزایش دما کمتر از دو درجه سانتیگراد نسبت به قبل از انقلاب صنعتی باشد و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۰۵۰ میلادی باید در سطح جهانی ۴۱٪ تا ۷۲٪ کاهش یابد. و تا سال ۲۱۰۰ نسبت به سطح ۲۰۱۰ به میزان ۷۸٪ تا ۱۱۸٪ کاهش یابد (Leung et al., 2014).

روش‌های مختلفی برای کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای مختلف اتخاذ شده است (Leung et al., 2014). که عبارت‌است از:

الف- بهبود بهره‌وری در مصرف انرژی و ارتقاء مصرف انرژی.

ب- افزایش استفاده از سوخت‌های کم‌کربن از جمله گاز طبیعی، هیدروژن یا انرژی هسته‌ای.

ج- استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، باد، نیروگاه انرژی و انرژی زیستی.

د- اعمال رویکردهای مهندسی به‌عنوان مثال جنگل‌زایی و یا ضبط و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن (Carbon Capture and Storage).

یکی از راه‌های کاهش دی‌اکسیدکربن جو که پس از سال‌ها نمایش تئوریک و آزمایشات میدانی، ثابت شده است، جذب و ذخیره کربن به‌نحوی که سهم قابل‌توجهی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی دارد در حال حاضر ذخیره زیرزمینی مناسب‌ترین گزینه در نگهداری مقادیر زیاد دی‌اکسیدکربن موردنیاز برای کاهش مؤثر گرم شدن کره زمین و تغییر اقلیم مرتبط است. یک مکان ذخیره‌سازی زیرزمینی معمولی می‌تواند ده‌ها میلیون تن دی‌اکسیدکربن را با مکانیسم‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی به‌دام بیاندازد (Leung et al., 2014). پتانسیل ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در مخزن نفت و گاز بین ۴۰۰ گیگاتن تا ۹۰۰ گیگاتن به‌صورت جهانی تخمین زده می‌شود. مخازن گاز مناسب‌ترین مکان‌ها برای ذخیره سازی دی‌اکسیدکربن هستند زیرا قبلاً توانایی خود در

گیرد (Olabode & Radonjic, 2013). هم‌چنین Kaldi و همکاران بیان داشتند که برای به حداقل رساندن خطر نشت دی‌اکسیدکربن به‌جو و یا سازندهای فوقانی که ممکن است دارای منابع اقتصادی بالقوه مانند آب آشامیدنی، نفت، گاز، زغال‌سنگ یا سایر مواد معدنی باشد درک سیستم پوش‌سنگ ضروری است (Kaldi et al., 2013). در این پژوهش تمرکز بر روی این سوال است که روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن و سازوکار پوش‌سنگ در ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن است به چه صورت است؟

مواد و روش‌ها

روش پژوهش، مروری بر منابع و مآخذ بین‌المللی مرتبط با موضوع است که استخراج گردیده و پس از جمع‌آوری، دسته‌بندی گردیدند. در پاسخ به سؤال ذکر شده ابتدا عملکردهای پوش‌سنگ و تئوری مکانیسم‌های به دام انداختن دی‌اکسیدکربن مخزن سپس رفتار دی‌اکسید در زمان تزریق و پس از تزریق هم‌چنین رفتار پوش‌سنگ تحت شرایط مختلف از جمله، دما، فشار تزریق و شرایط خودترمیمی پوش‌سنگ بررسی می‌گردد و در نهایت روش‌هایی که به ما امکان بررسی پوش‌سنگ را می‌دهند ذکر می‌شوند.

نتایج

عملکرد پوش‌سنگ و تئوری مکانیسم‌های به‌دام

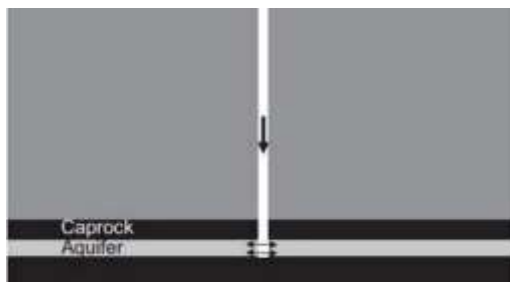
انداختن دی‌اکسیدکربن در مخزن

ذخیره زیرزمینی دی‌اکسیدکربن به یک سنگ مخزن متخلخل که روی آن یک پوش‌سنگ آب‌بند غیرقابل نفوذ قرار گرفته، نیاز دارد. اهمیت پوش‌سنگ در این است که جابجایی دی‌اکسیدکربن شناور، آب‌شور و سایر مواد موجود را مهار می‌کند که این مواد به سازندهای فوقانی نشت نکنند. پوش‌سنگ باید وسعت جانبی کافی برای پوشاندن مخزن ذخیره‌سازی را داشته باشد. علاوه بر این، ضخامت آن باید از هرگونه شکاف موجود بیشتر باشد تا

نگهداری ایمن گاز در مقیاس‌های زیرزمینی را ثابت کرده‌اند (Shukla et al., 2010).

در گذشته تحقیقات مختلفی به‌صورت جهانی در رابطه با این موضوع صورت گرفته به‌صورتی که Leung و همکاران در پژوهشی نشان دادند که معمولاً سه سازه مختلف برای ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن در نظر گرفته می‌شود که عبارت هستند از: مخازن نفت و گاز تخلیه شده (یا تقریباً تخلیه)، بستر زغال‌سنگ تصفیه نشده و سفره‌های آب‌شور. هم‌چنین ذخیره در اعماق اقیانوس گزینه‌ای مناسب برای ذخیره دی‌اکسیدکربن است اگرچه نگرانی‌های محیط زیستی (مانند اسیدی شدن اقیانوس و فرورانش کردن) ممکن است کاربرد آن را محدود کند. هم‌چنین ویژگی اصلی مخازن زیرزمینی این است که دی‌اکسیدکربن را در دوره‌های بسیار طولانی، بدون هیچ‌گونه نشت قابل توجهی به سطح، حفظ کند و الزامات عمومی برای مخزن‌های زیرزمینی دی‌اکسیدکربن شامل تخلخل، ضخامت و نفوذپذیری مناسب مخزن سنگی به‌همراه پوش‌سنگ (caprock) با قابلیت آب‌بندی مناسب و یک محیط زیرزمینی پایدار می‌باشد (Leung et al., 2014). Shukla و همکاران یک مخزن ایده‌آل با یک پوش‌سنگ تقریباً یک‌پارچه (عاری از هرگونه خطا یا شکستگی عمده) را توصیه نمودند زیرا تزریق دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی هیچ‌گونه مزاحمت قابل توجهی در زمینه تنش و پایداری سازندهای زیرزمینی در مخزن ایجاد نمی‌کند. اگرچه یافتن چنین مخزن‌هایی برای محل کار دشوار است، اما ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن در چنین مخازن ایده‌آل مناسب‌ترین گزینه برای کاهش دی‌اکسیدکربن خواهد بود (Shukla et al., 2011). در پژوهش دیگری محققان دریافتند که میزان ظرفیت و یکپارچگی مخزن مهم‌ترین عوامل در انتخاب مخازن زیرزمینی هستند که در رفتار صحیح مخزن در ضبط دی‌اکسیدکربن بسیار تأثیرگذارند و نشت دی‌اکسیدکربن پس از تزریق در مخزن می‌تواند از طریق سیستم دهانه‌چاه، شکاف‌ها و یا به‌دلیل هجوم فشار مویبندی و از بین رفتن تأثیر پراکندگی در مخزن صورت

نشان داده شده است، جریان عمودی شناور دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی مستلزم آن است که سازند توسط لایه‌ای از سنگ با نفوذپذیری کم (پوش‌سنگ) محصور شود تا از حرکت عمودی دی‌اکسیدکربن به سطح زمین جلوگیری شود (Xu *et al.*, 2012). به دام افتادن توسط چنین لایه‌های آب‌بند، به دام افتادن هیدرودینامیکی گفته می‌شود. این مکانیسم از آن جهت بسیار مهم است که پیش شرط لازم برای هر مکان ذخیره سازی این است که از نشت دی‌اکسیدکربن از طریق پوش‌سنگ جلوگیری کند. ضبط دی‌اکسیدکربن توسط این مکانیسم تا حد زیادی به ظرفیت آب‌بندی پوش‌سنگ بستگی دارد (Zhang & Song, 2014).



شکل ۱- ضبط زیرزمینی دی‌اکسیدکربن به روش هیدرودینامیکی (Xu *et al.*, 2012).

به دام انداختن رسوبی (Residual trapping)

هنگامی که دی‌اکسیدکربن به داخل مخزن تزریق می‌شود، ابتدا آب‌شور را به صورت هم‌زمان جابجا می‌کند. اما هنگامی که تزریق متوقف شده است، به دلیل اختلاف چگالی بین دی‌اکسیدکربن و آب‌شور، دی‌اکسیدکربن به سمت بالا حرکت می‌کند و آب‌شور به سمت پایین جریان می‌یابد بنابراین فاز ترکننده (آب‌شور) به وسیله فاز ترکننده ضعیف‌تر (دی‌اکسیدکربن) وارد منافذ می‌شود. در چنین فرآیندی آب‌شور، دی‌اکسیدکربن را جابجا می‌کند و منجر به اشباع قابل توجه دی‌اکسیدکربن در خوشه‌های کوچک منافذ می‌شود در نتیجه دی‌اکسیدکربن ضبط شده به عنوان یک فاز بی‌حرکت به دام می‌افتد. به

بتواند مانع مؤثری باشد. دانستن این که پوش‌سنگ‌های آب‌بند دارای شکاف، توانایی به دام انداختن تجمع‌های دی‌اکسیدکربن را دارند، درمقابل آن‌هایی که دارای توده غیرقابل قبول هستند، یک جنبه مهم برای ارزیابی ظرفیت‌های مخزن ذخیره‌سازی هم در سطح زیرین و هم در سایت‌های خاص است. به طور مشابه، تعیین پتانسیل پوش‌سنگ برای حفظ ایمنی دی‌اکسیدکربن تزریقی یک عنصر مهم در فرآیند انتخاب سایت برای تزریق و ذخیره دی‌اکسیدکربن است (Kaldi *et al.*, 2013). پوش‌سنگ باید قادر به تحمل تغییرات تنش در میدان و تحمل تغییرات در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ناشی از اندرکنش دی‌اکسیدکربن، آب‌شور و سنگ باشد زیرا این روند برای هزاران سال ادامه می‌یابد تا این که سرانجام دی‌اکسیدکربن بی‌حرکت و تبدیل به رسوب‌های کربنات جامد شود. در این دوره، پوش‌سنگ در معرض فشرده‌سازی، در بعضی موارد تنش، هوازدگی ناشی از رسوب مواد معدنی، انحلال و شروع ترک یا انتشار ترک ناشی از تغییر الگوهای تنش و فشار بیش از حد در فشار تزریق قرار دارد (Shukla *et al.*, 2010).

مکانیسم‌های به دام انداختن دی‌اکسیدکربن در مخزن

برای درک بهتر نقش پوش‌سنگ در به دام انداختن دی‌اکسیدکربن بهتر است مکانیسم‌های به دام انداختن دی‌اکسیدکربن در مخزن بررسی گردد.

به دام افتادن هیدرودینامیکی (Hydrodynamic trapping)

به دام افتادن هیدرودینامیکی به این معنی است که دی‌اکسیدکربن به عنوان سیال فوق بحرانی در زیر پوش‌سنگ با نفوذپذیری کم به دام افتاده است (Zhang & Song, 2014). دی‌اکسیدکربن در حالت فوق بحرانی به دلیل چگالی زیاد نسبت به حالت گاز، ذخیره زیرزمینی مؤثر را امکان‌پذیر می‌کند. با این حال، چگالی دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی از سیال آب‌خوان یا سازند دیگری کمتر است، بنابراین همان‌طور که در شکل ۱

رفتار دی‌اکسیدکربن در هنگام تزریق و پس از**تزریق و تأثیرات آن روی پوش سنگ**

در فرآیند جذب و ذخیره کربن، در ابتدا معمولاً دی‌اکسیدکربن از محل منابع اصلی جدا می‌شود و به دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی تبدیل می‌شود و به محل ضبط منتقل می‌گردد. سپس در سازندهای هیدروژئولوژیکی مناسب مانند سفره‌های شور و مخازن نفت و گاز تخلیه شده تزریق می‌شود و همان‌طور که قبلاً گفته شد توسط پوش سنگ به دام انداخته می‌شود (Shukla *et al.*, 2010). بسته به شرایط مخزن، دی‌اکسیدکربن می‌تواند به صورت گاز فشرده، مایع یا در یک مرحله فوق بحرانی ذخیره شود. اکثر دی‌اکسیدکربن تزریق شده به صورت یک فاز متحرک مستقر می‌شوند که به راحتی می‌توانند به صورت جانبی یا به صورت عمودی به سمت پوش سنگ حرکت کنند (Zhang & Song, 2014). در حالت فوق بحرانی، تغییرهای زیادی در خواص از جمله چگالی، ویسکوزیته و استحکام در برابر حل شدگی در شرایطی نزدیک به شرایط مرزی رخ می‌دهد. دی‌اکسیدکربن در دما و فشار اتمسفر در فاز گاز است. در دماهای پایین دی‌اکسیدکربن جامد است، در دمای بین ۵۶/۵ تا ۳۱/۱ درجه سانتیگراد، دی‌اکسیدکربن یک گاز است و در دماهای بالاتر از ۳۱/۱ درجه سانتیگراد و فشارهای بیش از ۷/۳۸ مگاپاسکال (نقطه بحرانی)، دی‌اکسیدکربن در حالت فوق بحرانی است. فرآیندهای مختلفی وجود دارد که ممکن است در طول تزریق و پس از ذخیره سازی در مخزن و پوش سنگ اتفاق بیفتد که به دلیل نشت احتمالی دی‌اکسیدکربن تزریق شده به جو بسیار مهم است که مورد توجه قرار گیرد. دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی یک مایع بسیار واکنش پذیر و خورنده است و احتمالاً بعد از ضبط در سازند پوش سنگ با محیط ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی اندرکنش دارد (Shukla *et al.*, 2011).

دما و فشار در یک مخزن ذخیره سازی معمولاً بالاتر از مقادیر فوق بحرانی دی‌اکسیدکربن است اما در بعضی موارد، شرایط هیدرومکانیکی موجود در مخزن و

این مکانیسم به دام افتادن موینگی (Capillary trapping) نیز گفته می‌شود (Zhang & Song, 2014).

به دام انداختن حل شوندهایی (Solubility Trapping)

در به دام انداختن حل شوندهایی دی‌اکسیدکربن با آب شور واکنش داده و اسیدکربنیک تشکیل می‌شود. از مزایای این روش این است که دی‌اکسیدکربن دیگر نمی‌تواند به صورت یک فاز مستقل وجود داشته باشد و بنابراین نیروی شناوری که دی‌اکسیدکربن را به سمت بالا می‌برد حذف می‌گردد. به نحوی که آب شور با دی‌اکسیدکربن مخلوط می‌شود و چگالی آن از سایر مایعات اطراف بیشتر شده و در قسمت پایین سازند قرار می‌گیرد و از حرکت به سمت بالا جلوگیری می‌کند. حل شدن دی‌اکسیدکربن در آب شور به پارامترهایی مانند فشار، دما و غلظت نمک فازآبی بستگی دارد. به گونه‌ای که حلالیت دی‌اکسیدکربن با افزایش فشار افزایش می‌یابد. مشکل اساسی در مورد این مکانیسم مسأله زمان می‌باشد زیرا ده‌ها سال طول می‌کشد تا دی‌اکسیدکربن به طور کامل در آب شور حل شود (Zhang & Song, 2014).

به دام انداختن معدنی (Mineral trapping)

پس از واکنش دی‌اکسیدکربن با آب شور مخزن چه به طور مستقیم یا غیرمستقیم و در نهایت تشکیل اسیدکربنیک بین این اسیدکربنیک ایجاد شده و مواد معدنی (منیزیم و کلسیم سیلیکات) در مخزن زیرزمینی واکنش‌هایی صورت گرفته که منجر به تشکیل رسوبات جامد دی‌اکسیدکربن می‌شود. این مکانیسم به دلیل توانایی آن در سکون کردن دی‌اکسیدکربن برای مدت زمان طولانی بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. علاوه بر این به دام انداختن معدنی امن‌ترین مکانیسم به دام انداختن دی‌اکسیدکربن شناخته شده است. با این وجود به دام انداختن معدنی بیش از هر مکانیسم دیگری به مدت زمان بیشتری نیاز دارد، اما اگر پارامترهای درجه حرارت و فشار سیستم، pH آب شور، سرعت نشت، فعل و انفعالات دی‌اکسیدکربن، تغییرات تنش در حفرات مخزن و یکپارچگی پوش سنگ به خوبی بررسی گردد می‌توان سرعت به دام انداختن معدنی را افزایش داد (Zhang & Song, 2014).

کنترل گرمایش کره زمین را بی‌اعتبار می‌کند و در نهایت منجر به عواقب جدی مانند اسیدی شدن در محیط‌های اطراف می‌شود (Leung *et al.*, 2014). فاکتورهای مهم در تعیین میزان نشت دی‌اکسیدکربن از طریق پوش سنگ شامل ضخامت و نفوذپذیری پوش سنگ، نفوذپذیری مخزن، تخلخل پوش سنگ و تخلخل مخزن است (Hou *et al.*, 2012). پتانسیل آب‌بندی پوش سنگ، مهم‌ترین جنبه مهار دی‌اکسیدکربن است که تحت‌عنوان ظرفیت آب‌بندی تعریف می‌شود. ظرفیت آب‌بندی به ارتفاع ستون دی‌اکسیدکربن که پوش سنگ قبل از آنکه نیروهای موئینگی اجازه جابجایی دی‌اکسیدکربن را به بیرون دهد حفظ کند اطلاق می‌شود. عواملی مانند ساختار، ضخامت، شکل‌پذیری و تراکم شکستگی بر خاصیت آب‌بندی تأثیر می‌گذارند و این عوامل با تجزیه و تحلیل پتروفیزیکی پوش سنگ مشخص می‌شوند. یکپارچگی پوش سنگ به خصوصیات ژئوشیمیایی آن بستگی دارد این خواص توسط ساختار پوش سنگ، میدان‌های تنش‌های محلی و تغییرات تنش ناشی از تزریق کنترل می‌شود. هم‌چنین، تغییر در ساختار پوش سنگ به دلیل اندرکنش ژئوشیمیایی بین سنگ، سیال سازند و دی‌اکسیدکربن تزریق شده ممکن است منجر به انحلال یا رسوب برخی از مواد معدنی و در نتیجه افزایش یا کاهش نفوذپذیری شود (Kaldi *et al.*, 2013).

از طرف دیگر با توجه به میزان اسیدی بودن آب‌های اشباع شده با دی‌اکسیدکربن و واکنش‌پذیری کلسیت موجود در اکثر پوش سنگ‌ها، امکان تغییرات ژئوشیمیایی مسیرهای جریان در پوش سنگ وجود دارد. کلسیت مهم‌ترین ماده معدنی واکنش‌پذیر در زمینه نفوذپذیری مسیرهای جریان است زیرا معیارهای لازم برای محلول و واکنش سریع را دارد و در سنگ‌های رسوبی انبوه فراگیر است و در بعضی از سازندها به‌اندازه کافی فراوان است که انحلال به‌تغییرات مهم تخلخل منجر شود. انحلال مواد معدنی پوش سنگ در مسیرهای جریان می‌تواند نفوذپذیری را افزایش داده و نشت دی‌اکسیدکربن را ترویج دهد. یعنی اگر انحلال مواد معدنی در یک مسیر

اندرکنش شیمیایی با مواد معدنی یا سایر موادشیمیایی موجود در سازند ممکن است منجر به تغییر در فاز و رفتار دی‌اکسیدکربن تزریقی شود. هنگامی که دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی به فاز گاز تغییر کند، کم ویسکوزتر و متراکم‌تر می‌شود و به سمت سطح حرکت می‌کند و فشار رو به بالا روی پوش سنگ را افزایش می‌دهد. این افزایش فشار می‌تواند باعث ایجاد تنش یا ترک خوردگی فشاری در پوش سنگ و سنگ‌مخزن شود و حتی ممکن است در برخی موارد شکاف‌های از قبل موجود را فعال کند به همین دلیل واکنش‌پذیری و مشخصات جریان دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی نیاز به بررسی بیشتر دارد، با توجه به اینکه دی‌اکسیدکربن در حالت فوق‌بحرانی نسبت به تغییرات دما و فشار بسیار حساس است و می‌تواند پوش سنگ را تضعیف کرده و باعث ایجاد تغییرات در ساختار پوش سنگ شوند، اثرات ژئوشیمیایی دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی را نمی‌توان در ارزیابی‌ها نادیده گرفت (Shukla *et al.*, 2011).

هم‌چنین جریان دی‌اکسیدکربن در طول مسیرهای جریان پوش سنگ ممکن است با افزایش فشار حفره‌ای در انتهای پوش سنگ اجازه ورود دی‌اکسیدکربن به پوش سنگ را بدهد. در نتیجه فعال‌سازی ترک‌های کوچک در پوش سنگ نقش مهمی در تراوش و جریان دی‌اکسیدکربن در شرایط تنش موجود را دارد (Angeli *et al.*, 2009). این واکنش‌های ژئوشیمیایی بین دی‌اکسیدکربن و ساختار پوش سنگ می‌تواند از چندین سال تا صدها سال اتفاق بیفتد (Xu *et al.*, 2012).

بررسی رفتار پوش سنگ در شرایط مختلف

به‌طور کلی دومنبع مشترک نشت از سازندهای زیرزمینی وجود دارد، نشت از طریق پوش سنگ و نشت از طریق مسیرهای نفوذپذیر. به‌طور معمول نشت از طریق پوش سنگ کند خواهد بود و ممکن است ده‌ها هزار سال طول بکشد در حالی که نشت از طریق مسیرهای نفوذپذیر می‌تواند سریع‌تر باشد و نگرانی‌های بیشتری را برای اپراتور ایجاد کند. میزان نشت بالای ۰/۱٪ در سال،

مانند انحلال و رسوب مواد معدنی کربنات را دارد. که در نتیجه یکپارچگی پوشش سنگ ممکن است توسط آبشور اسیدی تغییر یافته و بر پتانسیل نشت دی‌اکسیدکربن تزریق شده به سطح تأثیر بگذارد. افزایش فشار بین سازندهای پوشش سنگ و تزریق ناشی از تزریق دی‌اکسیدکربن ممکن است نشت رو به بالا را از طریق شکستگی‌های موجود در پوشش سنگ ایجاد کند. حتی پس از پایان تزریق، این شکستگی‌ها ممکن است همچنان به‌عنوان مسیر نشت عمل کنند (Ellis et al., 2011).

قابل ذکر است که آشفستگی در تنش منجر به تغییر شکل مکانیکی و تکثیر شکستگی می‌شود که می‌تواند نفوذپذیری سازند را افزایش یا کاهش دهد. عدم تعادل شیمیایی بین مایعات و مواد معدنی ساکن منجر به انحلال یا ته‌نشینی می‌شود که باعث تغییر بیشتر تخلخل و نفوذپذیری در پوشش سنگ می‌شود. این عدم تعادل شیمیایی در محل‌های تزریق و مخازن هیدروترمال منجر به جریان‌های واکنشی می‌شود که ممکن است نفوذپذیری سازند و پوشش سنگ را به‌میزان قابل توجه‌ای تغییر دهند (Elkhoury et al., 2015). همچنین اندرکنش شیمیایی بین سیال منفذی و شکاف‌ها ممکن است خصوصیات پوشش سنگ را تغییر دهد به همین دلیل حرکت دی‌اکسیدکربن به پوشش سنگ ممکن است واکنش‌های ژئوشیمیایی مؤثر بر پارامترهای مهم مانند تخلخل و نفوذپذیری را درگیر کند. تغییرات فشار حفره ای به دلیل تزریق دی‌اکسیدکربن به میزان و نفوذپذیری مخزن ذخیره بستگی دارد و ممکن است در شرایط تنش اولیه خاص، گسیختگی‌های برشی و کششی در بالای محل تزریق ایجاد کند (Angeli et al., 2009). تغییر تنش و تغییر شیمیایی و فیزیکی در مخزن و پوشش سنگ ناشی از اسیدکربن که با حل شدن دی‌اکسیدکربن در آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌شود، می‌تواند منجر به کاهش مقاومت و گسیختگی پوشش سنگ شود (Shukla et al., 2010). هم‌چنین در نظر گرفتن تنش‌هایی که در پوشش سنگ، شکستگی ایجاد می‌کند و بر ساختار پوشش سنگ اثر می‌گذارد اهمیت دارد. شکستگی

جریان در طول تزریق وجود داشته باشد یا ایجاد شود، جریان آبشور اسیدی شده و مسیر جریان می‌تواند به طور نامطلوب خواص هیدرودینامیکی آن را تغییر داده و میزان نشت را افزایش دهد (Fitts & Peters, 2013).

به‌طور کلی مکانیسم‌هایی که ممکن است در ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن منجر به نشت آن از طریق پوشش سنگ شود به شرح زیر است (Shukla et al., 2010).

الف- فعال‌سازی مجدد شکاف‌ها در پوشش سنگ، فشار محلی در نزدیکی شکاف در هنگام تزریق باعث کاهش تنش مؤثر نرمال و در نتیجه کاهش مقاومت برشی پوشش سنگ شود.

ب- فعال‌سازی مجدد سایر شکاف‌ها که به صورت هیدرولیکی به مخزن وصل می‌شوند.

ج- اعمال گسیختگی برشی در پوشش سنگ.

د- شکستگی هیدرولیکی (قبل از تزریق و هنگام تزریق).

و- فشار بیش از حد مویبندی در پوشش سنگ.

تزریق دی‌اکسیدکربن به سفره عمیق آبشور حالت تنش کل را تغییر می‌دهد و منجر به تجمع فشار در زیر پوشش سنگ می‌شود. تغییر در تنش مؤثر و تغییر شکل ناشی از آن به‌طور بالقوه می‌تواند به پوشش سنگ صدمه بزند و شکستگی‌های جدید ایجاد کند. این فرآیند شکستگی می‌تواند مسیرهای جدیدی را برای دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی باز کند و به‌طور قابل ملاحظه‌ای اثربخشی محبوس‌سازی را کاهش دهد. به‌همین دلیل، یک مدل هیدرومکانیکی همراه برای تجزیه و تحلیل یکپارچگی پوشش سنگ و تجزیه و تحلیل ریسک مرتبط با نشت بالقوه دی‌اکسیدکربن ضروری است (Xu et al., 2012). بنابراین بیشترین خطر گسیختگی در قسمت پایین پوشش سنگ می‌باشد زیرا با تغییرات شدید هیدرومکانیکی کامل همراه است که موجب کاهش در تنش مؤثر نرمال در قسمت تحتانی پوشش سنگ می‌شود (Shukla et al., 2010).

باید توجه نمود تزریق دی‌اکسیدکربن در سازندهای شور عمیق منجر به اسیدی شدن آب‌شور ساکن خواهد شد. این اسیدی شدن پتانسیل افزایش اندرکنش آب و سنگ

قابل توجه‌ای در اطراف چاه تزریق می‌شود، به طوری که در آب‌خوان و حتی پوش‌سنگ می‌توانند شکستگی ایجاد کنند. اگر شکستگی‌ها در جهت عمودی گسترش یابد، می‌توانند به‌عنوان مسیر نشت دی‌اکسیدکربن عمل کنند. هنگامی که دی‌اکسیدکربن در دمای ۴۰ الی ۵۰ درجه سانتیگراد تزریق می‌شود، تنش‌های موجود در پوش‌سنگ نزدیک چاه تزریق در طولانی‌مدت تبدیل به تنش‌های کششی می‌شود، درحالی‌که وقتی دی‌اکسیدکربن در ۹۰ درجه سانتیگراد تزریق می‌شود (دمای محیط در سفره آب‌خوان) با همان سرعت تنش‌ها فشاری می‌شوند. تنش‌ها حتی می‌توانند بر مقاومت کششی پوش‌سنگ غلبه کنند، بنابراین پوش‌سنگ شکافته می‌شود (Gor & Prévost, 2013).

بررسی تأثیرات فشار تزریق در رفتار پوش‌سنگ

به دلیل احتمال شروع شکستگی مخزن، یک عامل مهم در پروژه ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن فشار تزریق است. این فشار ممکن است از نظر تئوری باعث شکستگی پوش‌سنگ شده یا شکستگی‌ها و شکاف‌های موجود را دوباره فعال کند (Kaldi et al., 2013). فشار لازم برای شروع شکستگی در پوش‌سنگ به‌عنوان فشار شکست یا فشار شکستگی پوش‌سنگ شناخته می‌شود. فشار شکست پوش‌سنگ تابعی از مقاومت کششی پوش‌سنگ، فشار حفره‌ای آن و حداکثر و حداقل تنش‌های افقی است (Hou et al., 2012). به‌طور کلی تزریق دی‌اکسیدکربن در دمای قابل ملاحظه‌ای متفاوت از محیط، در ترکیب با فشار بیش از حد، منجر به تنش کافی برای شروع شکستگی در آب‌خوان و پوش‌سنگ خواهد شد (Gor et al., 2013).

بررسی امکان خود به‌بودی پوش‌سنگ

در بررسی امکان خود به‌بودی پوش‌سنگ تئوری‌های مختلفی وجود دارد که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تئوری اول محتوای رس در پوش‌سنگ‌های کربنات ممکن است عامل مهمی در کنترل یکپارچگی بلندمدت آن‌ها باشد به‌عنوان مثال اگر شکستگی در

های اولیه در اعماق کم عمق ایجاد شده و سپس با گذشت زمان عمیق‌تر می‌شوند. افزایش جابجایی برشی در سراسر شکستگی موجود، تأثیر متفاوتی در تنش همه جانبه مؤثر دارد. به‌طور کلی ساختار پوش‌سنگ از جمله ناهمگونی، وضعیت تنش در هنگام ایجاد شکستگی و حالت مربوط به شکستگی و رفتار مکانیکی پوش‌سنگ در تغییر شکل عواملی هستند که بر ساختار پوش‌سنگ تأثیر می‌گذارند (Frash et al., 2017).

با توجه به مطالب فوق مؤثرترین پوش‌سنگ‌ها سیلیکات‌های ریزدانه (سنگ‌های مبتنی بر خاک رس)، سنگ‌های تیخیری (آنهیدریت، گچ، هالیت) و سنگ‌های غنی از مواد آلی (سنگ‌های شیلی) هستند. همچنین باید در نظر گرفت که خصوصیات سنگی نظیر تخلخل و نفوذپذیری محیط متخلخل، به دلیل تغییرات کوتاه‌مدت ناشی از اندرکنش سنگ و سیال می‌تواند به‌طور قابل توجهی تغییر کند (Olabode & Radonjic, 2013).

بررسی تأثیرات دما در رفتار پوش‌سنگ

با توجه به اختلاف دمای دی‌اکسیدکربن و دمای محیطی آب‌خوان، مقادیر زاویه اصطکاک موجود محاسبه شده (هم در پوش‌سنگ و هم در مخزن) افزایش می‌یابد. بنابراین، با تنظیم کردن دمای دی‌اکسیدکربن نسبت به دمای مخزن، به اپراتور اجازه می‌دهد تا از خرابی برشی در پوش‌سنگ نیز جلوگیری شود (Gor et al., 2013). اگر دمای محیط موجود در آب‌خوان، تنش‌های حرارتی که در آب‌خوان اطراف چاه تزریق ایجاد می‌شود به اندازه کافی زیاد باشند تا از مقاومت کششی فراتر رود در نتیجه باعث افزایش نفوذپذیری آب‌خوان در مجاورت چاه می‌شود. با این وجود، پس از چندین سال از تزریق دی‌اکسیدکربن تنش حرارتی در پوش‌سنگ و شکستگی پوش‌سنگ ایجاد می‌شود. ترک خوردگی کششی تنها تهدید برای یکپارچگی پوش‌سنگ نیست بلکه با تغییر قابل توجه در تنش، پوش‌سنگ می‌تواند دچار برش نیز شود (Gor et al., 2013). وقتی دی‌اکسیدکربن سرد در آب‌خوان تزریق می‌شود، باعث ایجاد تنش‌های حرارتی

الف- توسعه مدل‌های تکامل نفوذپذیری ساده براساس کلسیت به عنوان تنها ماده معدنی واکنش‌پذیر، و آزمایش‌های آزمایشگاهی درمقیاس نمونه و آزمایش‌های میدانی صورت‌گیرد تا چنین مدل‌های واکنش‌پذیر ژئوشیمیایی در پیش‌بینی تغییر نفوذپذیری مؤثر باشد.

ب- پرتونگاری الکترونیکی و روش‌های پردازش تصویر پیشرفته در نظر گرفته شود.

ج- تعیین دقیق فضای منافذ، نقاط اتصال منافذ و ناهمگنی و تنوع‌گانی در نظر گرفته شود.

د- تصویربرداری از مقیاس واقعی در زمان مشخص از فرآیندهای سطحی در مرزهای مسیر جریان در طول آب شور اسیدی و جریان چند فاز در شرایط فشار نسبت به دمای پوش‌سنگ صورت‌گیرد.

مدل‌سازی عددی نیز ابزار اصلی مورد نیاز برای پیش‌بینی اثر بخشی مخزن‌های ضبط زیرزمینی دی‌اکسیدکربن و ارزیابی خطر احتمالی براساس سناریوهای تزریق مختلف، خصوصیات و شرایط زیرزمینی است و باید در چرخه یک پروژه گنجانده شوند. روش معمول شامل مدل‌سازی رفتار دی‌اکسیدکربن در حین و بعد از تزریق با استفاده از خصوصیت‌های مخزن‌های اختصاصی و پوش‌سنگ است (Hou et al., 2012). یکی دیگر از روش‌های بررسی پوش‌سنگ و نشست، روش ارزیابی اثر نشست (Leakage Impact Valuation) می‌باشد. روش ارزیابی اثر نشست انعطاف‌پذیر است و می‌تواند برای بررسی طیف گسترده‌ای از سناریوهای نشست برای فعالیت‌ها و منابع زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد (Fitts & Peters, 2013). شامل موارد زیر است.

الف- فقط نشست.

ب- نشستی که با فعالیت زیرزمینی تداخل دارد.

ج- نشستی که آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

د- نشستی که به سطح می‌رسد.

خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در راستای این موضوع در جدول ۱ نمایش داده می‌شود.

پوش‌سنگ دارای سطوح معدنی خیس شده بود (پوشش رس)، ممکن است در اثر کم‌شدن تماس بین آب‌شور دی‌اکسیدکربن و سطوح معدنی واکنش‌پذیر، انحلال کمتری رخ دهد (Ellis et al., 2011).

تئوری دیگری این است که اندرکنش ژئوشیمیایی بین دی‌اکسیدکربن، آب‌شور و مخزن به احتمال زیاد منجر به آب‌کافت اسید مواد معدنی مخزن شده و می‌تواند چندین اثر مختلف بر روی پوش‌سنگ و مهاجرت کلی دی‌اکسیدکربن تزریقی داشته باشد. دی‌اکسیدکربن تزریق شده در آب حل می‌شود و اسیدکربنیک تشکیل می‌دهد که ممکن است با آب‌های قلیایی واکنش نشان داده و به‌عنوان کربنات رسوب کند. دی‌اکسیدکربن که در آب‌شور تحت فشار زیاد حل می‌شود، آب‌شور را به شدت اسیدی می‌کند که منجر به انحلال مواد معدنی کربنات‌سنگ و تولید یون‌های بی‌کربنات می‌شود. این اسیدکربنات هم‌چنین می‌تواند باعث هوازدگی سنگ‌های سیلیکات شود. بنابراین دی‌اکسیدکربن می‌تواند به شکل مواد معدنی کربنات و مواد معدنی سیلیکات به دام بیفتد. آب‌های زیرزمینی قلیایی به رسوب مواد معدنی کربنات کمک می‌کند و این ته‌نشینی ممکن است شکستگی‌ها را آب‌بند کند و نفوذپذیری اقشار سنگی را کاهش داده و از این طریق آب اشباع‌شده دی‌اکسیدکربن را به دام بیاندازد (Shukla et al., 2010).

روش‌های بررسی رفتار پوش‌سنگ

عملکرد پوش‌سنگ باید دارای سطح مناسب از جزئیات مورد نیاز برای پیش‌بینی نرخ نشست و تکامل آن‌ها با زمان باشد. به‌همین جهت آزمایش‌های دقیق آزمایشگاهی باید تحت اندرکنش شیمیایی دی‌اکسیدکربن با مواد معدنی سنگ و آب‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط ویژه تأثیرات سایر فرایندها در مسیر جریان و سرعت واکنش مورد بررسی قرار گیرد (Shukla et al., 2010). بر همین اساس بخش‌های زیر برای کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی، اولویت‌های تحقیق آزمایشگاهی و مدل‌سازی می‌باشد (Fitts & Peters, 2013).

جدول ۱- مروری بر روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن و سازوکار پوش‌سنگ در ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن

نام نویسنده و سال	پارامتر مورد مطالعه	روش پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
(Angeli et al., 2009)	اندرکنش پوش سنگ و دی‌اکسیدکربن	مطالعات آزمایشگاهی	در مسیرهای جریان پوش سنگ، افزایش فشار حفره‌ای در انتهای پوش سنگ می‌تواند اجازه ورود دی‌اکسیدکربن به پوش سنگ را بدهد. گاهی این افزایش فشار حفره‌ای سبب ایجاد ترک‌های کوچک می‌شوند در نتیجه فعال‌سازی ترک‌های کوچک نقش مهمی در تراوش و جریان دی‌اکسیدکربن به خارج از مخزن ذخیره‌سازی در شرایط تنش موجود را دارد.	با بررسی فشار حفره‌ای در زمان تزریق دی‌اکسیدکربن می‌توان تا حدی رفتار پوش سنگ را پیش‌بینی نمود.
(Ellis et al., 2011)	کانی‌شناسی و ارزیابی شکست در پوش سنگ	مطالعات آزمایشگاهی	تزریق دی‌اکسیدکربن در سازندهای شور عمیق منجر به اسیدی شدن آب شور ساکن خواهد شد. این اسیدی شدن پتانسیل انحلال و رسوب موادمعدنی کربنات را دارد. که در نتیجه یکپارچگی پوش سنگ ممکن است تغییر یافته و بر پتانسیل نشت دی‌اکسیدکربن تزریق شده به سطح تأثیر بگذارد.	تغییرات کانی‌شناسی در رفتار پوش سنگ تأثیر به‌سزایی دارد.
(Elkhoury et al., 2015)	قابلیت خودترمیمی پوش سنگ	مطالعات آزمایشگاهی	عدم تعادل شیمیایی بین مایعات و موادمعدنی ساکن منجر به انحلال یا ته‌نشینی می‌شود که باعث تغییر بیشتر تخلخل و نفوذپذیری در پوش سنگ می‌شود این عدم تعادل شیمیایی در محل‌های تزریق و مخازن هیدروترمال منجر به جریان‌های واکنشی می‌شود که می‌تواند نفوذپذیری پوش سنگ را افزایش یا کاهش دهد.	در پژوهش‌های آینده توصیه می‌گردد که پارامترهای گسترده‌تری از جریان‌های جنبشی، واکنش‌های معدنی و مدت‌زمان بیشتری بررسی گردد.
(Fitts & Peters, 2013)	نفوذپذیری پوش سنگ و نشت دی‌اکسیدکربن	مطالعات عددی/تحلیلی	کلسیت مهم‌ترین ماده معدنی واکنش‌پذیر در زمینه نفوذپذیری مسیرهای جریان است زیرا معیارهای لازم برای محلول و واکنش سریع را دارد و در بعضی از سازندها به اندازه کافی فراوان است که انحلال به تغییرات مهم تخلخل منجر شود.	توصیه می‌شود که پوش سنگ کلسیتی به‌عنوان یک معیار سنجش بحرانی ارزیابی شود.
(Frash et al., 2017)	نفوذپذیری پوش سنگ	مطالعات آزمایشگاهی/ عددی	نفوذپذیری ناشی از شکست به میزان قابل‌توجهی به تنش‌هایی که در آن شکستگی ایجاد می‌شود، میزان جابجایی برشی و مدت‌زمان جریان بستگی دارد.	برای ارزیابی خطر نشت در مخازن احتمالی توجه به این پارامترها ضروری است.
(Xu et al., 2012)	بررسی ژئومکانیکی مخزن‌های زیرزمینی در برابر تزریق دی‌اکسیدکربن	مطالعات عددی/تحلیلی	تزریق دی‌اکسیدکربن به سفره عمیق آب شور حالت تنش کل را تغییر می‌دهد و منجر به تجمع فشار در زیر پوش سنگ می‌شود. تغییر در تنش مؤثر و تغییر شکل ناشی از آن به‌طور بالقوه می‌تواند به پوش سنگ صدمه بزند و شکستگی‌های جدید ایجاد کند.	دراثر تزریق، فشار سیال در آبخوان می‌تواند افزایش یابد و موجب شکستگی در پوش سنگ گردد.
(Gor et al., 2013)	تأثیر دمای دی‌اکسیدکربن تزریق شده بر پوش سنگ	مطالعات عددی/تحلیلی	تزریق دی‌اکسیدکربن در دمای قابل ملاحظه‌ای متفاوت از محیط، در ترکیب با فشار بیش از حد، منجر به تنش کافی برای شروع شکستگی در آب‌خوان و پوش سنگ خواهد شد. با تنظیم کردن دمای دی‌اکسیدکربن نسبت به دمای مخزن، از شروع شکستگی و خرابی برشی در پوش سنگ جلوگیری می‌شود.	اقدامات پیشگیرانه شامل استراتژی‌های مدیریت فشار و دما می‌تواند مفید واقع شود.
(Gor & Prevos, 2013)	بررسی تنش‌های حرارتی گسترش-یافته ناشی از تزریق در پوش سنگ	مطالعات عددی/تحلیلی	هنگامی که دی‌اکسیدکربن در دمای ۴۰ الی ۵۰ سانتیگراد تزریق می‌شود، تنش‌های موجود در پوش سنگ در طولانی مدت تبدیل به تنش‌های کششی می‌شود، در حالی که وقتی دی‌اکسیدکربن در ۹۰ درجه سانتیگراد تزریق می‌شود با همان سرعت تنش‌ها فشاری می‌شوند. تنش‌ها حتی می‌توانند تا شکافتن پوش سنگ بر مقاومت‌کششی پوش سنگ غلبه کنند.	در نظر گرفتن اقدامات پیشگیرانه شامل استراتژی مدیریت فشار می‌تواند مفید واقع شود.
(Hou et al., 2012)	تأثیر مشخصات پوش سنگ بر نشت دی‌اکسیدکربن	مطالعات عددی/تحلیلی	فاکتورهای مهم در تعیین میزان نشت دی‌اکسیدکربن از پوش سنگ عبارت است از ضخامت، نفوذپذیری و تخلخل پوش سنگ، نفوذپذیری و تخلخل مخزن.	قبل از عملیات تزریق بهتر است ویژگی‌های مخزن و پوش سنگ را کاملاً بررسی نمود.
(Kaldi et al., 2013)	درک رفتار پوش سنگ در ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن	مطالعات عددی/تحلیلی	درک خصوصیات ژئومکانیکی و اندرکنش پوش سنگ با دی‌اکسیدکربن برای ارزیابی یکپارچگی پوش سنگ ضروری است زیرا تغییرات میدان تنش در یک مخزن در حین و بعد از تزریق دی‌اکسیدکربن می‌تواند به خرابی مکانیکی پوش سنگ و مخزن منجر شود.	خصوصیات ژئومکانیکی و ژئوشیمیایی پوش سنگ تأثیر به‌سزایی در رفتار پوش سنگ دارند.

نام نویسنده و سال	پارامتر مورد مطالعه	روش پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
-------------------	---------------------	-----------	------------	---------

وجود یک پوش سنگ با قابلیت آب بندی مناسب یک الزام عمومی برای مخزن ذخیره سازی می باشد و اصولاً نشت از طریق پوش سنگ کند خواهد بود و ممکن است ده ها هزار سال طول بکشد در حالی که نشت از طریق مسیبه های نفوذ پذیر می تواند سریع تر باشد.	مطالعات مروری	بررسی جنبه های مختلف ذخیره ذیرزمینی دی اکسید کربن	(Leung et al., 2014)
خصوصیات پوش سنگ را می توان با تغییرات ژئوشیمیایی در سطح ریزمیکرون به صورت آنی تغییر داد. این تغییرات ژئوشیمیایی بر ناحیه خاص سطح و شبکه منافذ (قطر، دهانه و حجم) پوش سنگ شیلی تأثیر می گذارد.	مطالعات آزمایشگاهی	اندرکنش ژئوشیمیایی پوش سنگ با دی اکسید کربن تزریق شده	(Olabode & Radonjc, 2013)
تغییر تنش شیمیایی و فیزیکی مخزن و پوش سنگ ناشی از اسید کربن که با حل شدن دی اکسید کربن در آب های زیرزمینی ایجاد می شود، می تواند منجر به کاهش مقاومت و گسیختگی پوش سنگ شود.	مطالعات مروری	بررسی جنبه های مختلف ذخیره زیرزمینی دی اکسید کربن	(Shukla et al., 2010)
دی اکسید کربن در حالت بحرانی نسبت به تغییرات دما و فشار بسیار حساس است و می تواند پوش سنگ را تضعیف کرده و باعث ایجاد تغییرات در ساختار پوش سنگ شوند، اثرات ژئوشیمیایی دی اکسید کربن فوق بحرانی را نمی توان در ارزیابی ها نادیده گرفت.	مطالعات مروری و عددی	بررسی مشخصات پوش سنگ در اثر تزریق دی اکسید کربن در شرایط درجا	(Shukla et al., 2011)
برای تعیین فشار تزریق و ظرفیت ذخیره هیدروپنایمیکی مخزن باید فشار موئینگی پوش سنگ و ناحیه ضعف پوش سنگ آب بند به خوبی بررسی شود.	مطالعات مروری	مکانیسم های ذخیره زیرزمینی CO ₂	(Zhang & Song, 2014)

بحث

یکی از بهترین روش های کاهش دی اکسید کربن اتمسفر، جذب و ذخیره سازی دی اکسید کربن در مخازن زیرزمینی می باشد. در این روش مخازن زیرزمینی باید توسط پوش سنگ آب بند با نفوذ پذیری پایین احاطه شده باشد تا دی اکسید کربن تزریق شده به لایه های بالاتر و در نهایت اتمسفر نشت نکند. به همین دلیل قبل از اجرای عملیات تزریق و ذخیره سازی دی اکسید کربن ابتدا باید مخازن زیرزمینی و به ویژه پوش سنگ موجود بررسی شوند تا از نگرانی ها و عدم قطعیت های موجود کاسته شود. برای کاهش این عدم قطعیت ها توجه به نکات زیر پیشنهاد می گردد:

- تعیین پتانسیل پوش سنگ برای حفظ ایمنی دی اکسید کربن تزریقی یک عنصر مهم در فرآیند انتخاب سایت برای تزریق و ذخیره دی اکسید کربن است. بنابراین پوش سنگ باید وسعت جانبی کافی برای پوشاندن مخزن ذخیره سازی را داشته باشد

همچنین قابلیت آب بندی پوش سنگ باید کاملاً مورد بررسی قرار گیرد.

فاکتورهای مهم در تعیین میزان نشت دی اکسید کربن از طریق پوش سنگ شامل ضخامت و نفوذ پذیری پوش سنگ، نفوذ پذیری مخزن، تخلخل پوش سنگ و تخلخل مخزن است. همچنین در زمان ارزیابی عملیات تزریق اثرات ژئوشیمیایی دی اکسید کربن فوق بحرانی را نمی توان نادیده گرفت زیرا با توجه به اینکه دی اکسید کربن در حالت فوق بحرانی نسبت به تغییرات دما و فشار بسیار حساس است، می تواند پوش سنگ را تضعیف کرده و باعث ایجاد تغییرات در ساختار پوش سنگ شود.

- فشار آب بندی پوش سنگ باید قبل از شروع فرآیند ذخیره زیرزمینی دی اکسید کربن مشخص شود و نباید طی فرآیند تزریق دی اکسید کربن از مقدار مشخصی تجاوز نماید تا موجب شکست پوش سنگ و انتقال دی اکسید کربن به سازندهای بالایی شود.

- International Journal of Greenhouse Gas Control. Vol. 64, pp: 60-72.
6. **Gor, G.Y., Elliot, T.R. and Prévost, J.H., 2013.** Effects of thermal stresses on caprock integrity during CO₂ storage. International Journal of Greenhouse Gas Control. Vol. 12, pp: 300-309.
 7. **Gor, G.Y. and Prévost, J.H., 2013.** Effect of CO₂ injection temperature on caprock stability. Energy Procedia. Vol. 37, pp: 3727-3732.
 8. **Hou, Z.; Rockhold, M.L. and Murray, C.J., 2012.** Evaluating the impact of caprock and reservoir properties on potential risk of CO₂ leakage after injection. Environmental Earth Sciences. Vol. 66(8), pp: 2403-2415.
 9. **Kaldi, J.; Daniel, R.; Tenthoey, E.; Michael, K.; Schacht, U.; Nicol, A. and Backe, G. 2013.** Containment of CO₂ in CCS: Role of Caprocks and Faults. Energy Procedia. Vol. 37, pp: 5403-5410.
 10. **Leung, D.Y.; Caramanna, G. and Maroto-Valer, M.M. 2014.** An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 39, pp: 426-443.
 11. **Olabode, A. and Radonjic, M., 2013.** Experimental investigations of caprock integrity in CO₂ sequestration. Energy Procedia. Vol. 37, pp: 5014-5025.
 12. **Shukla, R.; Ranjith, P.; Haque, A. and Choi, X. 2010.** A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity. Fuel. Vol. 89(10), pp: 2651-2664.
 13. **Shukla, R.; Ranjith, P.G.; Choi, S.K. and Haque, A., 2011.** Study of caprock integrity in geosequestration of carbon dioxide. International Journal of Geomechanics. Vol 11(4), pp: 294-301.
 14. **Xu, Z.; Fang, Y.; Scheibe, T.D. and Bonneville, A., 2012.** A fluid pressure and deformation analysis for geological sequestration of carbon dioxide. Computers & Geosciences. Vol. 46, pp: 31-37.
 15. **Zhang, D. and Song, J., 2014.** Mechanisms for geological carbon sequestration. Procedia IUTAm. Vol. 10, pp: 319-327.

- قبل از تزریق دی‌اکسیدکربن به مخزن بهتر است دمای دی‌اکسیدکربن با دمای مخزن به صورت متناسب تنظیم شود تا از ایجاد شکستگی در پوش سنگ جلوگیری گردد و برای درک بهتر معیارهای خرابی پوش سنگ اثرات همراه ژئومکانیکی، حرارتی، ژئوشیمیایی و مسیر جریان برای کار آزمایشی و تحولات نظری در شبیه‌سازی مخزن نیاز است.

- با توجه به اینکه کلسیت مهم‌ترین ماده معدنی واکنش‌پذیر در زمینه نفوذپذیری مسیرهای جریان است، زیرا معیارهای لازم برای محلول و واکنش سریع را دارد و در سنگ‌های رسوبی انبوه فراگیر است، توصیه می‌شود که پوش سنگ کلسیتی به عنوان یک معیار سنجش بحرانی ارزیابی شود.

- تغییر تنش و تغییر شیمیایی و فیزیکی در مخزن و پوش سنگ ناشی از اسیدکربن که با حل شدن دی‌اکسیدکربن در آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌شود، می‌تواند منجر به کاهش مقاومت و گسیختگی پوش سنگ شود.

منابع

1. **Angeli, M.; Soldal, M.; Skurtveit, E. and Aker, E., 2009.** Experimental percolation of supercritical CO₂ through a caprock. Energy Procedia. Vol. 1(1), pp: 3351-3358.
2. **Ellis, B.R., Bromhal, G.S., McIntyre, D.L. and Peters, C.A., 2011.** Changes in caprock integrity due to vertical migration of CO₂-enriched brine. Energy Procedia. Vol. 4, pp: 5327-5334.
3. **Elkhoury, J.E.; Detwiler, R.L. and Ameli, P., 2015.** Can a fractured caprock self-heal?. Earth and Planetary Science Letters. Vol. 417, pp: 99-106.
4. **Fitts, J.P. and Peters, C.A. 2013.** Caprock fracture dissolution and CO₂ leakage. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Vol. 77(1), pp: 459-479.
5. **Frash, L.P.; Carey, J.W.; Ickes, T. and Viswanathan, H.S. 2017.** Caprock integrity susceptibility to permeable fracture creation.

An Overview of Geological Carbon Dioxide Storage Methods and the Mechanism of Caprock in Carbon Dioxide Storage

Reza Fathi^{*1}, Amirhossein Sayyahzadeh¹

1- Department of Civil Engineering, University of Malayer, Malayer, Iran

Abstract

Population growth has increased the need for energy especially use of fossil fuels, which in turn is lead to increase carbon dioxide in the atmosphere, which is a type of greenhouse gas that leading to enhance global warming. This global warming can put plant and animal habitats in danger and change climate patterns, resulting in floods, droughts and severe destructive storms. One of the ways that reduces carbon dioxide in the atmosphere is geological carbon dioxide storage, which requires a porous reservoir with an impermeable sealing caprock that laying on the reservoir. The importance of caprock is to inhibit the movement of submerging carbon dioxide, saline and the other existence materials preventing leakage of these materials into the upper formations. Caprock should be able to withstand in-situ stress changes and physical and chemical properties changes. The purpose of this paper is to review geological carbon dioxide storage methods and the mechanism of caprock in carbon dioxide storage. The research method is an overview of related sources and references. According to the results of this study, the sealing pressure of the caprock should be distinguished before the injection process and during the injection process should not exceed a certain amount. Likewise, before the injection of carbon dioxide, its temperature should be proportionate to the temperature of the reservoir to avert caprock failure and it is better to take the geochemical, geomechanical, thermal and flow path properties in experimental and simulation works into consideration for a better understanding of caprock's behavior and structure.

Keywords: Greenhouse Gases, Carbon Dioxide Storage, Caprock Failure, Global Warming

* Corresponding Author's email: rezafathi746@gmail.com