



The Investigation of Geological Systems and Storage Mechanisms in Carbon Dioxide Sequestration

Motaghed A.R.¹, Kamari M.², Rezaeyan A.³, Tabatabaei-nejad S.A.⁴

National Iranian South Oil Company^{1,2}
Sahand University of Technology^{3,4}
(a.r.motaghed@gmail.com)

Abstract

Due to excessive production of carbon dioxide from fossil fuels, emissions of this greenhouse gas in the atmosphere is over 28 Giga tons annually. In the past centuries, the average concentration of carbon dioxide in the atmosphere was 280 ppm which has increased to 375 ppm after the Industrial Revolution.

According to recent studies, increase in carbon dioxide concentration leads to global warming and sever climate changes which could affect the physical, chemical, biological, economic, and political aspects of the environment and society. Therefore, to reduce the carbon dioxide concentration in the atmosphere, capture and storage (sequestration) of carbon dioxide was introduced.

The carbon capture and storage (CCS) system consists of three distinct technologies: collection, transportation and storage. The storage of carbon dioxide is performed in various systems such as: the oceans, deep saline layers, unmineable coal seams and depleted oil and gas reservoirs. In each of these cases, various chemical or physical trapping mechanisms were involved. The candidate reservoir for CCS project should have integrative seal layer (caprock) and proper porosity and permeability for increasing injectivity and storage capacity of carbon dioxide.

Keywords: Carbon Capture and Storage (CCS), CO₂ Sequestration, Storage/Trapping Mechanisms, Geological storage system.



بررسی انواع سیستم‌های زمین‌شناسی و مکانیزم‌های ذخیره‌سازی در جداسازی دی‌اکسید کربن

احمد رضا معتقد^۱، مصیب کمری^۲، ابوالقاسم رضائیان^۳، سید علیرضا طباطبایی نژاد^۴

^۱ شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اداره پژوهش و فناوری (a.r.motaghed@gmail.com)

^۲ شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اداره ارزیابی مخازن

^۳ دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

^۴ دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده

به لحاظ تولید زیاد دی‌اکسید کربن ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز و ذغال سنگ)، مقدار آزاد شدن این گاز گلخانه‌ای در جو زمین سالانه بالغ بر ۲۸ گیگاتن است. در قرن‌های اخیر، میانگین غلظت دی‌اکسید کربن در جو حدود ۲۸۰ ppm بوده که پس از انقلاب صنعتی این غلظت به مقدار فعلی ۳۷۵ ppm رسیده است. مطالعات گوناگون نشان می‌دهند که تغییرات ناگهانی آب و هوایی زمین، عمدتاً به همین دلیل بوده و اثر گازهای گلخانه‌ای دیگر، کمتر است. بر اساس بررسی‌های اخیر، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن منجر به گرم شدن زمین و ناپایداری صفحات یخ‌های قطبی می‌شود که این تغییرات ناگهانی آب و هوایی، می‌تواند باعث تأثیرات فیزیکی، شیمیایی، زیستی، اقتصادی و سیاسی روی محیط و جامعه گردند. لذا برای کاهش غلظت دی‌اکسید کربن در جو زمین، پس از معاهده کیوتو (۱۹۹۷)، گزینه جمع‌آوری و ذخیره‌سازی (جداسازی) دی‌اکسید کربن مطرح گردید.

یک سامانه جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن (CCS) متشکل از سه فناوری مجزاست: جمع‌آوری، انتقال و ذخیره‌سازی؛ ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در اقیانوس‌ها، لایه‌های آب‌شور عمیق، رگه‌های ذغالی و مخازن نفت و گاز تهی شده، انجام می‌گیرد که بسته به نوع ذخیره‌سازی، به دام افتادگی دی‌اکسید کربن متأثر از یکسری مکانیزم‌های فیزیکی و یا شیمیایی حاکم بر آن خواهد بود. یک مخزن هیدروکربوری زمانی برای ذخیره‌سازی مستعد شناخته می‌شود که از پوش سنگی مناسب و یکپارچه برخوردار باشد و همچنین، تراوایی و تخلخل مناسبی را جهت بالا بردن نرخ تزریق‌پذیری و انباشتگی بیشتر دی‌اکسید کربن، دارا باشد.

واژگان کلیدی: جمع‌آوری و ذخیره‌سازی کربن، جداسازی دی‌اکسید کربن، مکانیزم‌های ذخیره‌سازی/به دام افتادگی، سیستم‌های زمین‌شناسی ذخیره‌سازی.



مقدمه

اثر گلخانه‌ای که از گازهای گلخانه‌ای نشأت می‌گیرد، به دلیل عدم برقراری تعادل حرارتی بین درون و بیرون جو زمین است [۱]. بطوریکه، گازهای گلخانه‌ای با ایجاد لایه‌ای در جو زمین، بازتابش نور خورشید را جذب می‌کنند و این عمل سبب بالا رفتن درجه حرارت زمین می‌شود که از آن به گرمایش زمین یاد می‌شود [۲]. محققین بر این باورند که وجود دی‌اکسیدکربن، بیشترین درجه اهمیت را در بین دیگر گازهای گلخانه‌ای در ایجاد اثر گلخانه‌ای شدن دارد [۳]. اندازه‌گیری‌های درجه حرارت سطح زمین نشان می‌دهد که در اواخر قرن بیستم میلادی، ۰/۶ درجه سانتی‌گراد به میانگین درجه حرارت کره زمین افزوده شده و به ۱۴/۶ درجه رسیده است [۴]. فعالیت‌های بشری، هر ساله حدود ۲۸ میلیارد تن دی‌اکسیدکربن به جو زمین وارد می‌کند و سبب افزایش سطح گازهای گلخانه‌ای می‌شود که این ما را به اختلالی خطرناک در سامانه اقلیم زمین نزدیکتر می‌سازد. جنگل‌های جهان در حدود دو تا سه میلیارد تن و اقیانوس‌ها نیز، حدود ۷ میلیارد تن از این گاز خروجی را در هر سال جذب می‌کنند. متخصصین تخمین می‌زنند که ۵ تا ۱۰ میلیارد تن دیگر از این گاز گلخانه‌ای را می‌توان از جو خارج نمود و به صورت ایمن ذخیره کرد [۵].

پیشرفت فناوری‌ها برای جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن یا به عبارتی جداسازی دی‌اکسیدکربن، یک راهبرد محسوس در این راستاست [۶، ۷]. در واقع، جداسازی دی‌اکسیدکربن راهی کم هزینه و ایمن برای کاهش دی‌اکسید کربن در مقیاس بزرگ است. به همین منظور در سال ۱۹۹۷ پیمانی موسوم به پیمان کیوتو (Kyoto Protocol) منعقد گردید [۸].

از دی‌اکسیدکربن برای نخستین بار به منظور افزایش برداشت نفت استفاده گردید که از آن به پروژه CO₂ EOR در صنعت نفت یاد می‌گردد. نخستین ثبت علمی این تحقیق، در سال ۱۹۵۲ به وورتون (Whorton) و همکارانش از طرف انجمن ثبت اختراعات آمریکایی اعطا گردید [۹]. با انعقاد قرارداد کیوتو و مطرح شدن سامانه جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن، محققان به این فکر افتادند که بتوان از ساختار طراحی- اجرایی عملیات CO₂ EOR و بهره‌گیری از علم ذخیره‌سازی گازهای طبیعی و اسیدی در مخازن زیرزمینی به پیشبرد حذف ۴۰ درصدی دی‌اکسیدکربن از جو زمین کمک قابل ملاحظه‌ای کرد [۱۰].

بعدها به تدریج پروژه‌های ذخیره‌سازی در مقیاس صنعتی آغاز گردیدند. در پروژه اسلیپنر (Sleipner) نروژ در دریای شمال، از سال ۱۹۹۶ شرکت ملی نفت نروژ در حال تزریق دی‌اکسیدکربن جدا شده از تولید گاز طبیعی به درون یک سفره عمیق آب‌شور بوده است [۱۱]. از سال ۲۰۰۰ در منطقه ویبرن (Weyburn) کانادا، دی‌اکسیدکربن با اهداف افزایش بازدهی تولید نفت و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن، این گاز به درون زمین تزریق می‌شود [۱۲، ۱۳]. در پاییز ۲۰۰۴، در عین‌صلاح (In Salah) الجزایر، شرکت نفت بریتانیا تزریق دی‌اکسیدکربن حاصل از تولید گاز طبیعی به درون مخازن گاز را آغاز کرده است [۱۴]. چندین پروژه دیگر حتی در مقیاس‌های بزرگتر، در حال اجرا یا برنامه‌ریزی در کشورهای آلمان، استرالیا و ایالات متحده می‌باشند [۱۵].

پروژه‌های صنعتی که اشاره شد، از گذشته تا کنون عموماً با تکیه بر مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه است که توسط محققین مختلفی تاکنون انجام شده است که تعدادی از آن‌ها عبارتند از: توماس و همکاران (۱۹۶۸)، راد و همکاران (۱۹۷۳)، شووالتر (Showalter) (۱۹۷۹)، هورسمن (Horseman) و همکاران (۱۹۹۷ و ۱۹۹۹)، هورسمن و هرینگتون (Harrington) (۱۹۹۹)، هیلدن‌برند (Hildenbrand) و همکاران (۲۰۰۲)، پروس و گارسیا (Pruess and Garcia) (۲۰۰۲)، کروس و همکاران (۲۰۰۴)، الباضلی و همکاران (۲۰۰۵)، لی (Lee) و همکاران (۲۰۰۵)، ایگرمن (Egermann) و همکاران (۲۰۰۶)، شاه (Shaw) و همکاران (۲۰۰۸)، هس (Hess) و همکاران (۲۰۰۹)، ولن‌وبر (Wollenweber) و همکاران (۲۰۰۹)، کارلز (Carles) و همکاران (۲۰۱۰)، فلوری (Fluery) و همکاران (۲۰۱۱) و نیز شوکا (shooka) و همکاران (۲۰۱۱)، که با مرور کلی بر تکنولوژی‌ها و مبانی کلی جداسازی کربن در سازندهای زیرزمینی، جنبه‌های کلیدی این فرایند را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه، شرح مختصری از انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی و مکانیزم‌های غالب در جداسازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن و برگرفته از این پژوهش‌هاست.



انتخاب بسترهای زمین شناسی جهت جداسازی

بررسی‌های میدانی بسیاری جهت انتخاب یک بستر زمین‌شناسی مناسب، برای ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن نیاز است. ضوابط عمومی انتخاب بسترهای زمین شناسی جهت ذخیره‌سازی بلندمدت دی‌اکسیدکربن شامل موارد زیر است:

- پوش‌سنگ مناسب و یکپارچه؛
- بالا بودن ظرفیت نگهداشت و قابلیت تزریق‌پذیری (سازند مربوطه از تخلخل و تراوایی مناسبی برخوردار باشد)؛
- بلوغ حوزه رسوبی (سنگ‌های آذرین و دگرگونی به هیچ وجه محیطی مناسب برای ذخیره دی‌اکسیدکربن محسوب نمی‌شوند. یک حوزه رسوبی بالغ، در واقع یک محیط زمین‌شناسی پایدار است که عدم ماندگاری گاز در ضمن ذخیره‌سازی و خطر نشت یا فرار دی‌اکسیدکربن برای آن رخ نخواهد داد) [۱۶، ۱۷].

سه عامل مذکور، کلیدی‌ترین فاکتورها در انتخاب یک حوزه رسوبی جهت ذخیره‌سازی است که باید مد نظر قرار گیرد. حال با وجود این عوامل، حضور پارامترهای زیر در بهبود راندمان و ظرفیت ذخیره‌سازی مؤثر هستند:

- حضور تأسیسات و زیربنای، بدین معنی که عمدتاً سایت‌هایی مورد توجه کارشناسان بوده و در اولویت هستند که با کمترین تغییرات، پتانسیل اجرای عملیات ذخیره‌سازی را داشته باشند؛ به عنوان مثال، در منطقه ویبرن کانادا، سال‌ها عملیات تولید و تزریق انجام می‌شد و لذا با صرف کمترین هزینه، تغییر کاربری داده و پروژه عظیم جداسازی دی‌اکسید کربن را در سال ۲۰۰۰ به مرحله بهره‌برداری رسانیدند؛
- حوزه‌های رسوبی که بر روی صفحه قاره‌ای یا نیمه قاره‌ای بوده و یا در گوشه یک صفحه مقاوم قاره‌ای قرار داشته باشند، مکان مناسبی برای انتخاب تلقی می‌شوند؛
- حوزه‌های رسوبی پشت کوه‌های حاصل از برخورد دو صفحه قاره‌ای، همچون جنوب حوزه زاگرس و نیز رسوبات حاوی هیدروکربن نیز کاندید مناسبی می‌باشند؛
- در حوزه‌های رسوبی سرد به دلیل کاهش گرادیان زمین‌گرایی و افزایش چگالی دی‌اکسید کربن نسبت به شرایط عادی و لذا کاهش اختلاف چگالی سیال تزریقی با سیالات درجا، پتانسیل نگهداری نیز افزایش می‌یابد؛
- وقتی عمق حوزه رسوبی بالا باشد، برای حفاری چاه‌های تزریق گاز، بایستی هزینه‌های مازادی (هزینه حفاری و هزینه متراکم‌سازی گاز) هم در نظر گرفت که خود از عوامل تأثیر گذار روی انتخاب مکان ذخیره‌سازی هستند؛
- فشار آب سازندی در انتخاب سایت ذخیره سازی هم حائز اهمیت است. یک سازند با فشار پایین نسبت به سازند دیگر با فشار بالا مناسب‌تر است [۱۸، ۱۹].

همچنین شرایط نامناسب سیستم کاندید جهت ذخیره‌سازی عبارتند از:

- ضخامت سازند کمتر از ۱۰۰۰ متر باشد.
- دیاژنز سنگ‌ها زیاد باشد.
- ارتباط بین سنگ مخزن و پوش‌سنگ ضعیف باشد.
- توالی لایه‌ها به شدت ناموزون باشند.
- فعالیت تکتونیکی بالا باشد.



• مخزن تحت فشار باشد [۲۰].

دارا بودن ضخامت و تخلخل کافی (جهت افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی) و تراوایی (برای افزایش تزریق‌پذیری) بسیار ضروری‌اند. معمولاً با افزایش عمق و لذا افزایش فشردگی و سیمان‌شدگی، تخلخل کاهش می‌یابد که منجر به کاهش ظرفیت نگهداری و بازدهی آن می‌شود. بستر ذخیره‌سازی می‌بایست تحت پوشش لایه نگهدارنده (مثل لایه‌های شیل، نمک یا انیدریت) و در تماس با آن باشد تا اطمینان حاصل شود که CO_2 توانایی فرار از مخزن و نفوذ به طبقات بالاتر و نهایتاً سطح را نداشته باشد [۲۱].

حوزه‌های رسوبی حاوی گسل و یا شکاف زیاد، به خصوص در نواحی فعال لرزه‌خیز، نیازمند مشخصه‌سازی خوب و کامل‌اند که بتوانند کاندیدای خوبی برای ذخیره‌سازی CO_2 باشند؛ مگر اینکه شکاف‌ها و گسل‌ها کاملاً محکم چسبیده و لذا CO_2 تزریق شده، از مجاری آن‌ها نفوذ کند [۲۲].

فشار و رژیم جریان آب سازند در حوزه رسوبی نیز فاکتورهای مهمی در انتخاب محل مناسب برای ذخیره‌سازی CO_2 می‌باشند. تزریق با فشار مازاد به سازند، منجر به فشردگی و یا حتی شکست سنگ شده که با توجه به مباحث تکنولوژیکی و ایمنی ممکن است پیامدهای نامطلوبی را به دنبال داشته باشد. سازندهای تحت فشار در حوزه‌های رسوبی، واقع در نواحی میان قاره‌ای نزدیک به کناره‌های فلات قاره و یا پشت کوه‌هایی که از تصادم صفحه‌ای شکل گرفته‌اند، ممکن است برای ذخیره‌سازی CO_2 مناسب باشند. ذخیره‌سازی CO_2 در سفره‌های آب نمک عمیق با سیال دارای زمان اقامت طولانی (حدود میلیون‌ها سال) منجر به تله‌گذاری معدنی و یا هیدرودینامیکی می‌شود [۲۳].

امکان وجود منابع هیدروکربنی و ذغال‌سنگ و توانایی اکتشاف و تولید، از دیگر ملاحظات هستند که در انتخاب محل ذخیره‌سازی باید در نظر گرفت. حوزه‌های با امکان اکتشاف کمتر هیدروکربن، ممکن است گزینه‌های مطمئنی برای ذخیره‌سازی نباشد که علت آن محدودیت اطلاعات قابل دسترس زمین‌شناسی و نیز ابهام در استعداد سازگاری این مخازن ناشناخته با CO_2 است [۲۴]. حوزه‌های رسوبی بالغ معمولاً اولین گزینه برای ذخیره‌سازی CO_2 می‌باشند، زیرا:

- مشخصه‌های آن‌ها شناخته شده است.
- منابع هیدروکربنی و یا لایه‌های ذغالی آن کشف و تولید شده‌اند.
- شامل مخازن نفتی هستند که ممکن است، تخلیه شده و متروک و لذا غیر اقتصادی باشند.
- تسهیلات لازم برای انتقال و تزریق CO_2 ممکن است در جا و حاضر باشند [۱۶]، [۲۴].

در این حوزه‌ها، وجود چاه‌های قدیمی که در واقع به زیر سطح پوش سنگ نگهدارنده نفوذ کرده‌اند، می‌تواند مسیری برای نشت CO_2 و لذا عدم اطمینان از ماندگاری گاز در محل ذخیره‌سازی باشد. هر چند که در ویبورن با وجود بیش از صدها چاه، پس از چهار سال از تزریق CO_2 تاکنون، هنوز نشتی قابل توجهی صورت نگرفته است [۲۵].

انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی

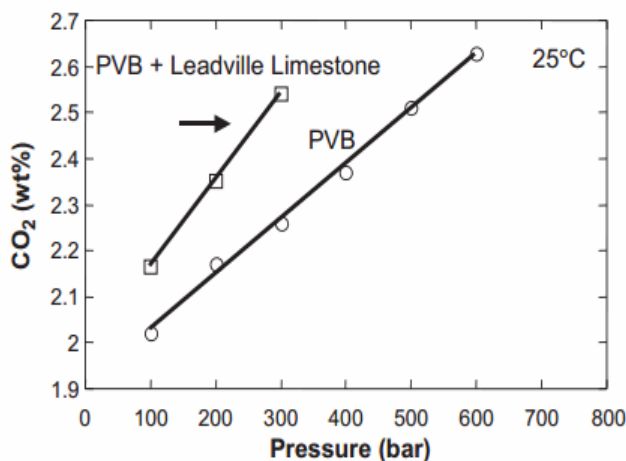
انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن عبارتند از: ذخیره‌سازی زمین‌شناسی، ذخیره‌سازی در اقیانوس و ذخیره‌سازی در بخش سطحی زمین؛ ذخیره‌سازی زمین‌شناسی به عنوان مطلوب‌ترین روش شناخته شده، شامل تزریق مستقیم دی‌اکسیدکربن به سازندهای زیرزمینی است که این سازندها عبارتند از: مخازن تخلیه شده نفت و گاز، لایه‌های ذغالی غیر قابل معدن‌کاوی و سفره‌های آب شور عمیق. با وجود ظرفیت طبیعی بالای اقیانوس‌ها برای ذخیره‌سازی، مخالفت عمومی با ایده تزریق دی‌اکسیدکربن به طور مستقیم به اعماق اقیانوس، موجب جلوگیری از تحقیق در این زمینه شده است. پتانسیل ذخیره‌سازی در بخش سطحی زمین نیز به



دلیل بازه زمانی و پایداری کوتاه مدت ذخیره‌سازی و نگهداری کربن در توده زیستی و نرخ آهسته واکنش‌های تشکیل کربنات کلسیم، با محدودیت مواجه است. انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی زمین‌شناسی در ادامه تشریح می‌گردد.

ذخیره سازی CO₂ در سفره های آب شور

کوید (koide) و همکارانش (۱۹۹۲) مدعی شدند که حوزه‌های رسوبی دنیا، توانایی نگهداری حدود ۳۲۰ گیگاتن دی‌اکسیدکربن را دارند [۲۶]. ایالات متحده آمریکا می‌تواند تقریباً ۶۵ درصد CO₂ تولید شده از نیروگاه‌های برق را مستقیماً به سفره‌های عمیق آب شور (Deep Saline Formations) در زیرکارخانه‌ها تزریق کند. پژوهش‌های مشابهی در ارتباط با ظرفیت سفره‌های آب نمک در نقاط مختلف دنیا در حال اجراست. بسته به نوع واکنش‌هایی که بین CO₂ ذخیره شده با آب نمک و سنگ سازند رخ می‌دهد و نیز ترکیبات معدنی و کربنات حاصل از واکنش، ظرفیت مخزن ممکن است کاهش یا افزایش یابد. از آن جا که چگالی CO₂ فوق بحرانی تزریق شده به آبد، حدود $660 \frac{kg}{m^3}$ و کمتر از چگالی آب شور است، لذا به علت وجود نیروهای شناوری، به سمت بالا صعود می‌کند. رزنباور (Rosenbauer) و همکاران (۲۰۰۵) با در نظر گرفتن تله معدنی به عنوان یکی دیگر از مکانیزم‌های مهم و غالب ذخیره‌سازی در آبد-ها، چندین آزمایش را با این مکانیزم اجرا کردند، بدین صورت که CO₂ فوق بحرانی را با ترکیبات مختلفی از سیال میزبان و سنگ سازند مثل آب نمک فرورفتگی پاراداکس (Paradox Valley Brine; PVB)، سنگ آهک و ماسه سنگ واکنش دادند و مشاهده شد که عموماً انحلال CO₂ در آبد، با افزایش دما و شوری کاهش و با افزایش فشار افزایش می‌یابد (شکل ۱) [۲۷].



شکل ۱- انحلال CO₂ در آب نمک فرورفتگی پاراداکس (PVB) در حضور و عدم حضور سنگ آهک لدویل (Leadville) در دمای ۲۵°C.

ذخیره سازی CO₂ در مخازن نفت و گاز تخلیه شده

کل پتانسیل ذخیره سازی CO₂ مخازن نفت و گاز دنیا بین ۴۰۰ تا ۹۰۰ گیگاتن تخمین زده شده است که اگر مخازن کشف نشده نفت و گاز را نیز در نظر بگیریم، این مقدار تا ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. توجه شود، از آنجا که مخازن گازی توانایی خود را در نگهداری ایمن گاز، آن هم در مقیاس زمانی بلند زمین شناسی اثبات کرده‌اند، کاندید مناسبی برای ذخیره‌سازی به شمار می‌آیند. دی‌اکسیدکربن تزریق شده در یک محدوده فشاری خاص می‌تواند، نفت یا گاز باقیمانده را به بیرون از مخزن هل داده و لذا مزیت‌های مالی و محیطی را در حوزه ازدیاد برداشت نفت و گاز (EOR- EGR) به همراه خواهد داشت [۲۸]. لازم به ذکر است که CO₂



اضافه شده در مخازن گازی، ممکن است گاز طبیعی را آلوده کند. اگر چه اودنبرگ (Oldenberg) و بنسن (Benson) بیان کرده‌اند که چون CO_2 به طور قابل ملاحظه‌ای چگالی و گرانی‌تری نسبت به گاز طبیعی دارد، احتمال مخلوط شدن آن‌ها بسیار کم است و حتی اگر اتفاق بیافتد در بازه زمانی بلند مدت زمین‌شناسی رخ می‌دهد [۲۹].

به طور کلی در دنیا، حدود ۱۳۰ گیگاتن دی‌اکسیدکربن می‌تواند جهت عملیات CO_2 EOR تزریق و دفع شود که این بستگی به نسبت مقدار CO_2 تولید شده به نفت خروجی نیز دارد. شرکت استاتویل (Statoil) با به کارگیری تکنولوژی ذخیره‌سازی زیرزمینی در میدان اسلیپینر، سالانه حدود یک میلیون تن CO_2 حاصل از تولید تجاری گاز را تزریق می‌کند. آن‌ها علاوه بر ازدیاد بازیافت گاز، دنبال ترسیب گاز کمپرس شده CO_2 با تزریق آن به سازند آتسیرا (Utsira) (آبده نمکی ماسه سنگی) که حدود ۱۰۰۰ متر زیر سطح دریا قرار دارد، از طریق یک چاه تزریقی مجزا نیز می‌باشند. ذکر این نکته نیز لازم است که باید به جنبه ایمن بودن ذخیره‌سازی (برای میادین گازی و نفتی) و نیز شکست مکانیکی احتمالی در پوش سنگ نگهدارنده در نتیجه تغییرات فشار مخزن، توجه ویژه شود [۳۰].

هر چند که هدف از ازدیاد برداشت نفت یا گاز، تخلیه نفت و گازی است که برداشت آن‌ها به صورت طبیعی به صرفه نیست، ولی میزان کل دی‌اکسیدکربن تزریق و ذخیره‌سازی شده در این فرآیند ممکن است، خیلی مؤثر نباشد؛ زیرا قسمتی از گاز تولید شده، مجدداً سوزانده شده و منجر به تولید مجدد دی‌اکسیدکربن می‌شود. علاوه بر این، در صورتی که حتی تمام دی‌اکسیدکربن استفاده شده درون مخزن باقی بماند، ممکن است، درصد کمی از کل تولید دی‌اکسیدکربن را شامل شود؛ چنانچه در نیروگاه‌های با سوخت فسیلی، در حال حاضر در حدود ۵۰ برابر دی‌اکسیدکربن تزریق شده در پروژه‌های EOR تولید می‌شود [۳۱].

ذخیره‌سازی CO_2 در رگه‌های ذغالی

رگه‌های ذغالی (Coal Seams) غیرقابل معدن‌کاوی، دیگر مخازن مستعد برای ذخیره‌سازی CO_2 می‌باشند. مکانیزم ذخیره‌سازی CO_2 در اینجا عمدتاً، جذب سطحی CO_2 از طریق میکرومنافذ موجود در ماتریکس ذغال می‌باشد که بسیار متفاوت با مکانیزم دام-افتادگی هیدرودینامیکی موجود در آبده‌های نمکی یا مخازن نفت و گاز است. طبق تئوری موجود، تا وقتی که فشار مخزن بالاتر از فشار واتراوش یا فشار پس‌دهی (Desorption) سازند باشد، CO_2 در تله ذغالی ماندگار است. خواص جذب سطحی CO_2 و نیز تورم ماتریکسی منسوب به رونشینی (Adsorption) گاز توسط چند پژوهشگر از جمله ماهاجان (Mahajan) و کروس (krooss) و همکاران گزارش شده است [۳۲].

همچنین، سازند ذغالی موقعیتی را برای ذخیره‌سازی همزمان CO_2 و افزایش تولید متان موجود در لایه‌های ذغالی (Coal Bed Methane; CBM) ایجاد می‌کند. تولید اقتصادی متان از یک لایه ذغالی عمیق غیرقابل معدن‌کاوی را می‌توان با تزریق CO_2 به سازند افزایش داد، بطوریکه رونشینی CO_2 منجر به پس‌دهی متان می‌شود. این فرآیند با بهبود بازدهی و افزایش سود اقتصادی عملیات تولید، برای ذخیره حجم عظیمی از CO_2 مناسب است [۳۳]. این روش هم‌اکنون در غالب پایلوت‌های آزمایشی در دو محل در آمریکای شمالی (پروژه آلبرتا و پروژه پایلوتی در حوزه سن‌خوان، نیومکزیکو/کلرورادو) مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴].

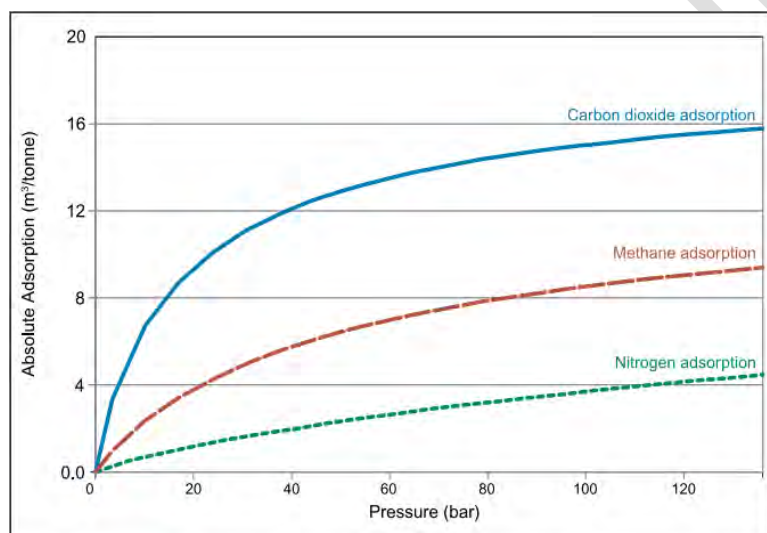
فاکتور مهم دیگری که باید در ذخیره‌سازی CO_2 در رگه‌های ذغالی در نظر گرفت، حساسیت ذغال به رطوبت می‌باشد. در واقع با جذب CO_2 و آب، ذغال سنگ متورم می‌شود. رفتار غیرعادی ذغال نسبت به جذب گاز و همچنین اهمیت رونشینی ایزوترم، تأثیر رونشینی و جذب گاز روی تراوایی و تغییر خواص مکانیکی ذغال سنگ مثل مقاومت نیز توسط پژوهشگران بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۵، ۳۶].

در واقع، رگه‌های ذغالی حاوی شبکه‌های به هم پیوسته‌ای از شکاف‌ها بوده که مابین شکاف‌ها، قسمت سنگی ذغال به واسطه منافذ ریز خلل و فرج در برگزیده خود، سبب جذب سطحی و نفوذ مولکول‌های گازی به درون این رگه‌ها می‌شود. با توجه به شکل ۲، توانایی



جذب دی‌اکسیدکربن نسبت به دیگر گازها بیشتر است. در این مقیاس هرچه ذغال جوان‌تر باشد، میزان جذب دی‌اکسیدکربن نیز بیشتر خواهد بود [۱۵].

در دما و فشار بالای شرایط بحرانی، مکانیزم به دام‌افتادگی دی‌اکسیدکربن در رگه‌های ذغالی نامشخص است. گفته می‌شود که جذب سطحی گاز به جذب درون جسمی تغییر می‌یابد؛ یعنی دی‌اکسیدکربن نفوذ می‌کند یا در ذغال حل می‌شود. وجود دی‌اکسید کربن در ذغال، یک عامل پلاستیکی کننده است لذا کاهش دمای رگه ذغالی، باعث می‌شود که ذغال از ساختاری ترد و شکننده به ساختاری نرم و پلاستیکی تبدیل گردد. پلاستیکی شدن رگه ذغالی منجر به افزایش تزریق‌پذیری می‌شود [۳۷]. بر اثر جذب و جذب سطحی دی‌اکسیدکربن، رگه ذغالی متورم شده، به دنبال آن کاهش تراوایی و کاهش تزریق‌پذیری رخ می‌دهد که برای خنثی کردن این عامل مزاحم، بایستی فشار تزریق را بالا برد. همچنین، واکنش بین دی‌اکسیدکربن و ذغال، مشکلاتی را برای تزریق در رگه‌های کم تراوا ایجاد می‌کند [۳۸].



شکل ۲- جذب مطلق گاز خالص (نیتروژن، متان و دی‌اکسیدکربن) به ازای هر تن گاز تزریقی در رگه ذغالی Tiffany در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد.

مکانیزم‌های ذخیره‌سازی و نگهداری دی‌اکسیدکربن در مخزن

در سازندهای زمین‌شناسی عمیق، در ابتدا خلل و فرج بین دانه‌ها با سیالاتی چون آب، نفت و یا گاز اشغال شده که درزها و شکاف‌های موجود نیز بر اثر فعالیت‌های تکتونیکی با سیالات مزبور اشباع می‌گردند. تزریق دی‌اکسیدکربن در خلل و فرج و شکاف‌های یک سازند تراوا، ضمن اشغال فضای خالی موجود، بخشی از سیالات درجا را جابه‌جا می‌کند و نیز ممکن است با سنگ و سیال محیط متخلخل، واکنش دهد [۳۹]. در این بین، مکانیسم‌های اولیه رانش و انتقال سیال در مخزن، شامل موارد زیر است:

- مهاجرت سیال در پاسخ به گرادیان فشار ایجاد شده توسط فشار سیال تزریقی؛
- جریان سیال در پاسخ به گرادیان هیدرولیکی طبیعی [۴۰]؛
- نیروی شناوری ایجاد شده ناشی از اختلاف چگالی بین سیال تزریقی و سیالات درجا [۴۱]؛
- نفوذ مولکولی [۴۲]؛
- پراکندگی و انگشتی شدن سیال به دلیل ناهمگونی‌های سازند [۴۳]؛

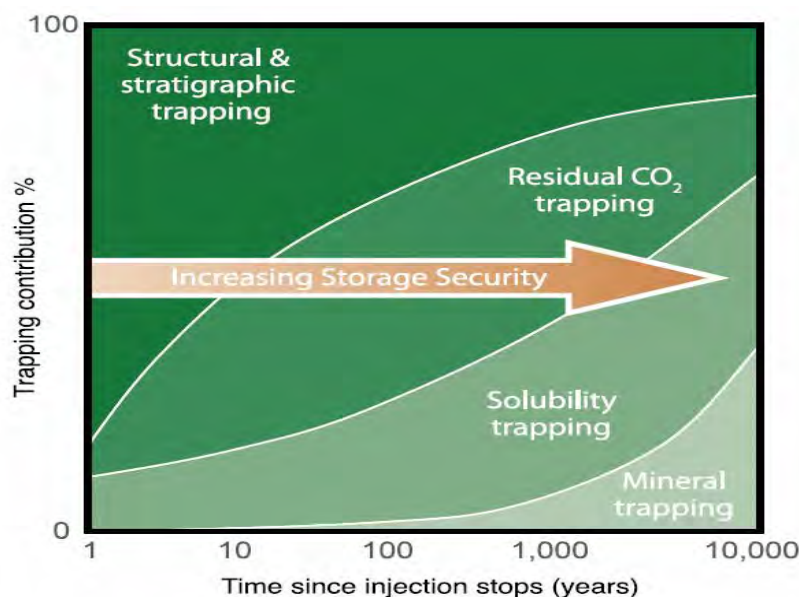


- جذب سطحی دی‌اکسید کربن به درون مواد آلی؛
- انحلال در سیالات درجا [۴۴]؛

حضور چندین فاز گوناگون ممکن است، فاکتور تزریق‌پذیری سازند و تراوایی نسبی دی‌اکسیدکربن را در فرایند مهاجرت کاهش دهد. گاهی اگر دی‌اکسیدکربن به مخازن گاز طبیعی تزریق شود، با گاز درجا تشکیل یک فاز واحد گازی را می‌دهد که به اصطلاح آن را تزریق امتزاجی می‌نامیم [۴۵]. در صورتی که دی‌اکسیدکربن به سفره‌های آب‌شور عمیق تزریق گردد، با توجه به عمق بالای تزریق و فوق‌بحرانی چگال بودن گاز، تزریق غیرامتزاجی خواهد بود. اما در تزریق دی‌اکسیدکربن به مخازن نفتی، بسته به دما، فشار و ترکیب نفت درجا، تزریق می‌تواند امتزاجی یا غیرامتزاجی باشد [۴۶]. زمانی که دی‌اکسید کربن به رگه‌های ذغالی تزریق می‌گردد، علاوه بر رخ دادن یکی از دو فرایند فوق، جذب و واجذبی سطحی گازهای درجا (به ویژه متان) که خود به درون ذغال جذب گردیده‌اند، نیز صورت می‌پذیرد که موجب منبسط و منقبض گردیدن رگه ذغالی می‌شود [۳۶].

محققین باور دارند که مخازن گازی قابلیت نگهداری دی‌اکسیدکربن بیشتری را دارا هستند. از آنجا که در مخازن نفتی و آبدی‌های نمکی، دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی لزجت کمتر و تحرک‌پذیری بیشتری نسبت به نفت و آب دارد، جبهه‌های پیشرو دی‌اکسیدکربن ناپایدارتر بوده و نفت و یا آب کمتری جابه‌جا می‌شود. اما در خصوص مخازن گازی خلاف قضیه ذکر شده، صادق است؛ بدان معنا که، با توجه به لزجت بیشتر دی‌اکسیدکربن نسبت به گاز طبیعی، جبهه‌ها پایدارتر بوده و پدیده نامطلوب انگشتی شدن دی‌اکسیدکربن و دور زدن سیال درجا، رخ نمی‌دهد. همچنین، به لحاظ چگالی کمتر دی‌اکسیدکربن نسبت به آب و نفت، سیر صعودی سریع‌تری در سازندهای عمیق آب‌شور یا مخازن نفتی دارد و در حالی که در مخازن گازی در ابتدا این سیر روند معکوس داشته و پس از اشباع شدن لایه‌های زیرین سازندی، سیری صعودی و اما کند را در پیش می‌گیرد. در واقع، بهتر آن است که دی‌اکسید کربن در زیرین‌ترین لایه سازند تزریق شود. گفته می‌شود که ناهمگونی لایه‌ها و حضور لایه‌های ناتراوا و یا کم‌تراوا نظیر شیل‌ها، باعث می‌گردد نرخ صعودی مهاجرت گاز دی‌اکسیدکربن کند گردد. هدف اصلی از کندی سیر صعودی دی‌اکسیدکربن، دستیابی سیال تزریقی به تمامی فضاهای خالی لایه‌های سازند و لذا افزایش راندمان ذخیره‌سازی است [۱۵].

لازم به ذکر است که در سازندهای آب‌شور عمیق، مقدار قابل توجهی از دی‌اکسیدکربن در آب حل می‌شود و عاملی مساعد در جهت بهبود ذخیره‌سازی است. لذا می‌بایست هنگام طراحی عملیات تزریق، پارامترهای مؤثر روی انحلال‌پذیری دی‌اکسیدکربن در آب، غربال‌گری شده و بهینه‌سازی صورت گیرد. همچنین، وجود نیروهای هیدرولیکی ناشی از ستون آب در آبدی‌های عمیق نمکی سبب می‌شود که دی‌اکسید کربن گسترش عرضی کندتری داشته باشد. این عامل باعث می‌شود که علاوه بر دستیابی به تمام گستره لایه، بتوان نرخ تزریق دی‌اکسید کربن را بالا برد [۴۶].



شکل ۳- نگهداشت CO₂ متأثر از ترکیبی از مکانیسم‌های به دام اندازی فیزیکی و ژئوشیمیایی است.

با مهاجرت دی‌اکسیدکربن در سازند، مقدار کثیری از آن در خلل و فرج‌های ریز به دام می‌افتند که عامل آن را حضور نیروی موینگی می‌خوانیم و از آن، به دام اندازی (به تله اندازی) دی‌اکسیدکربن باقی مانده یاد می‌شود. چنانچه دی‌اکسیدکربن در کف سازند تزریق شود و این عامل غالب گردد، دی‌اکسیدکربن قبل از رسیدن به پوش سنگ، توسط مکانیسم نیروی موینگی به دام می‌افتد. عامل نیروی موینگی به عنوان اولین عامل ممانعت کننده از فرار دی‌اکسید کربن شناخته می‌شود. وجود مکانیسم‌های به دام انداز (Trapping Mechanisms) که در ادامه ارائه خواهند شد، عامل ضروری ماندگاری دی‌اکسیدکربن برای قرن‌های متوالی در آن سازند زمین‌شناسی محسوب می‌گردند [۴۷].

ماندگاری زمین‌شناسی دی‌اکسیدکربن به مجموعه‌ای از مکانیسم‌های به دام اندازی فیزیکی و ژئوشیمیایی بستگی دارد. (شکل ۳) می‌توان گفت که موثرترین سایت‌ها در ذخیره‌سازی آن‌هایی هستند که دی‌اکسیدکربن بدون تحرک ابقاء گردد که معمولاً در حضور لایه‌های ضخیم و کم‌تراوا رخ می‌دهد. ترکیبی از مکانیسم‌های به دام اندازی فیزیکی و ژئوشیمیایی نیز در ماندگاری و ابقاء بدون تحرک دی‌اکسید کربن نقش به‌سزایی دارند [۱۵].

به دام‌اندازی فیزیکی

ذخیره‌سازی و نگهداری هیدرودینامیکی

گاز دی‌اکسیدکربن تزریق شده در ابتدا به صورت گاز یا سیال فوق بحرانی در مخزن قرار می‌گیرد. در این حالت دی‌اکسیدکربن را می‌توان به صورت گاز آزاد فرض کرد که در اثر نیروی شناوری به سمت بالا حرکت می‌کند تا به پوش سنگ برسد و در آنجا تجمع یابد. مسأله عمده به دام اندازی هیدرودینامیکی، امکان نشت دی‌اکسیدکربن از پوش سنگ است. این امر در مواردی باعث می‌شود که دی-اکسیدکربن ترشوندگی سنگ را تغییردهد و یا اینکه با سنگ واکنش داده و یکپارچگی آن را از بین ببرد [۵۲]. باجو (Bachu) و



همکاران تله هیدرودینامیکی را فرآیندی تعریف می کنند که در آن پراکندگی بسیار آرام توده دی اکسیدکربن در سفره آب نمک، به علت سرعت انتقال پایین آیده (کمتر از ۰/۱ متر در سال) رخ می دهد [۴۹].

ذخیره سازی و نگهداری به صورت فاز پسماند

نیروهای موئینگی رفتار جریان دی اکسیدکربن را محدود می کنند و دی اکسیدکربن به صورت یک فاز پسماند (Residual Phase) باقی می ماند، بنابراین قسمت عمده حجم دی اکسیدکربن رانش شده توسط نیروی شناوری، قبل از اینکه به پوش سنگ برسد، با این روش متوقف می شود.

در واقع، به دام اندازی فیزیکی شامل عواملی است که دی اکسید کربن قبل از رسیدن به پوش سنگ (به عنوان قوی ترین عامل به دام اندازی و حفظ و ماندگاری دی اکسیدکربن) ابقاء گردد. ساختار زمین شناسی بسترها و وجود ساختارهای استراتیوگرافی در به دام اندازی فیزیکی حائز اهمیت هستند [۵۰].

شیل های بسیار کم تراوا، بسترهای نمکی، سطوح کم عمق حاوی هیدرات های گازی، و ساختارهای رسوبی مسدود ناشی از چین و گسل به عنوان ساختارهای مناسب زمین شناسی و نیز چینه ها و ریف ها، به عنوان ساختارهای استراتیوگرافی (یعنی لایه های مجاوری همچون در کنار هم قرار گرفتن لایه های تراوا و ناتراوا که خصوصیات متفاوتی دارند)، مستعد برای به دام اندازی فیزیکی می باشند [۵۱]. به دام اندازی موئینگی در حفرات بسیار ریز اتفاق می افتد. صرف نظر از پوش سنگ، ساختار لایه های کم تراوا نیز شامل این مکانیسم هستند. به طور میانگین اشباع گاز دی اکسیدکربن در مکانیسم به دام اندازی موئینگی (به اصطلاح اشباع باقیمانده دی اکسیدکربن) حدود ۲۵-۱۵ درصد است [۵۲].

به دام اندازی ژئوشیمیایی

ذخیره سازی و نگهداری به صورت مواد معدنی

گاز دی اکسیدکربن با کانی های معدنی سنگ واکنش می دهد و یا ابتدا در سیالات مخزن حل می شود و سپس با سنگ واکنش می دهد. این امر منجر به تولید کانی هایی پایدار می شود که به این فرآیند تبدیل به مواد معدنی گویند. این روش پایدارترین حالت نگهداری دی اکسیدکربن است ولی میزان دی اکسیدکربن که طی این فرآیند جذب می شود، اندک است [۵۳]. شبیه سازی انجام شده در مورد سازند اتسیرا در میدان اسلیپنر نشان داد که حدود ۱ درصد از کل دی اکسیدکربن با این مکانیسم جذب شده است، هرچند که در دراز مدت می تواند به مقدار دی اکسیدکربن نگهداری شده، کمک شایانی نماید [۱۱].

ذخیره سازی و نگهداری دی اکسیدکربن در حالت محلول

در فرآیند تزریق دی اکسیدکربن در لایه های آب نمکی، دی اکسیدکربن معمولاً به صورت فوق بحرانی است تا اینکه کاملاً حل شود. وقتی دی اکسیدکربن کاملاً به صورت محلول درآید، دیگر امکان نشت آن وجود ندارد. انحلال یک فرایند کند و زمانبر است. انحلال در سیال باعث می شود که فاز دی اکسیدکربن دیگر مجزا نباشد و اثر منفی نیروی شناوری برطرف شود [۴۹].

باچو و آدامز (Bachu and Adams) و باچو و همکاران، نهایت ظرفیت ذخیره سازی CO_2 به صورت محلول (UCSCS) در یک آیده را اختلاف بین نهایت ظرفیت CO_2 در حالت اشباع به صورت محلول و تمام کربن طبیعی موجود در آن، تعریف کرده اند که به



فشار سیال، دما و میزان شوری آبدسته بستگی دارد. اکثر آبدسته‌های عمیق که دارای شوری بالایی بوده و در یک حوزه رسوبی واقع شده‌اند، به علت فشار بالای سازند، توانایی نگهداری مقدار بیشتری دی‌اکسیدکربن را دارند [۴۹]، [۵۳].

ذخیره‌سازی و جذب بر روی سطح جامدات

تجمع مولکول‌های گاز روی سطح یک جامد، وقتی با آن در تماس قرارگیرد را جذب سطحی می‌نامند. تعداد مولکول‌های گازی که روی سطح جامد جذب می‌شوند با افزایش فشار زیاد می‌شود و با کاهش فشار مولکول‌ها از روی سطح خارج می‌شوند. فرآیند جذب در اثر نیروهای جاذبه بین مولکولی گاز و جامد است و اگر گاز و جامد دارای خواص الکترواستاتیک نیز باشند، نیروی الکترواستاتیک نیز به این فرآیند اضافه می‌شود. فرآیند جذب سطحی را می‌توان دو نوع در نظر گرفت: فیزیکی و شیمیایی؛ جذب فیزیکی در اثر نیروهای جاذبه بین مولکولی ضعیف ایجاد می‌شود که نیروهای الکترواستاتیک و وان‌دروالس هستند و جذب شیمیایی نیز شامل پیوندهای شیمیایی قوی است. جذب فیزیکی برگشت‌پذیر است در حالیکه جذب شیمیایی کند و برگشت‌ناپذیر می‌باشد. جذب فیزیکی به صورت تک و یا چند لایه اتفاق می‌افتد در حالیکه جذب شیمیایی فقط در یک لایه رخ می‌دهد. در لایه‌های ذغال سنگ، مولکول‌های متان در شبکه ذغال سنگ جذب شده و به دلیل اینکه جذب شیمیایی دی‌اکسیدکربن روی ذغال سنگ، بسیار سریع اتفاق می‌افتد. دی‌اکسیدکربن در سطح ذغال سنگ جایگزین متان می‌شود [۴۸].

به دام افتادن دی‌اکسیدکربن در رگه‌های ذغالی و همچنین در شیل‌های نفتی و گازی کم عمق، تحت جذب سطحی صورت می‌پذیرد. شکل دیگری از به دام اندازی ژئوشیمیایی، تشکیل گازهای هیدراته در اعماق کف اقیانوس و مناطق سردسیر خشکی می‌باشد. درحقیقت مدل‌ها نشان می‌دهند که در طول زمان‌های طولانی (صدها و یا هزاران سال) مکانیزم‌های نگهداشت عمده دی-اکسیدکربن، همان تبدیل به حالت محلول و یا کانی‌های معدنی هستند [۵۴]. جدول ۱ شرحی مختصر از ظرفیت‌های نگهداری و عوامل تاثیرگذار بر آن را در ایالات متحده و سراسر کره زمین نشان می‌دهد.

جدول ۱- محدوده ظرفیت‌های تخمین زده شده و مکانیزم اصلی نگهداری در حالت‌های ذخیره‌سازی و جذب دی‌اکسیدکربن در زمین [۴۸]، [۵۴].

ظرفیت در آمریکا (میلیارد تن)	ظرفیت در جهان (میلیارد تن)	مکانیزم اصلی نگهدارنده	سازند
۳۶۳۰	۹۵۰۰	هیدرودینامیک، فازمحلول، تبدیل به کانی‌های معدنی	لایه‌های آب نمک
۱۲ - ۳۵	۷۰۰ - ۱۲۰	هیدرودینامیک، فازمحلول، تبدیل به کانی‌های معدنی	مخازن نفت و گاز
۳۰	۱۴۰	جذب شیمیایی	لایه‌های ذغال سنگ
۲۴۰	گزارش نشده	هیدرودینامیک، فازمحلول، تبدیل به کانی‌های معدنی	سازندهای بازالتی



نتیجه گیری

- تولید زیاد دی‌اکسیدکربن ناشی از فعالیت‌های بشری، سبب تشدید اثر گلخانه‌ای شده که این ما را به اختلالی خطرناک در سامانه اقلیم زمین نزدیکتر می‌سازد. جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن یا به عبارتی جداسازی دی‌اکسیدکربن، نتیجه مطالعات گوناگون انجام شده، برای رفع این مسأله است.
- پوش‌سنگ مناسب و یکپارچه، بالا بودن ظرفیت نگهداشت و قابلیت تزریق‌پذیری و بلوغ حوزه رسوبی، کلیدی‌ترین فاکتورها در انتخاب یک حوزه رسوبی جهت ذخیره‌سازی است.
- فشار و رژیم جریان‌های آب سازند در حوزه رسوبی نیز فاکتورهای مهمی در انتخاب محل مناسب برای ذخیره‌سازی CO₂ می‌باشند. تزریق با فشار مازاد به سازند، منجر به فشردگی و یا حتی شکست سنگ شده که با توجه به مباحث تکنولوژیکی و ایمنی ممکن است پیامدهای نامطلوبی را به دنبال داشته باشد.
- ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن عمدتاً در اقیانوس‌ها، لایه‌های آب‌شور عمیق، رگه‌های ذغالی، مخازن نفت و گاز تهی شده می‌تواند انجام گیرد؛ بازالت‌ها، شیل‌های گازی و نفتی، گودال‌های نمکی و معادن رها شده از دیگر مکان‌های قابل بررسی است.
- در مخازن نفت و گاز تهی شده، وجود چاه‌های قدیمی که در واقع به زیر سطح پوش‌سنگ نگهدارنده نفوذ کرده‌اند، می‌تواند مسیری برای نشت CO₂ و لذا عدم اطمینان از ماندگاری گاز در محل ذخیره‌سازی باشد.
- دی‌اکسیدکربن علاوه بر ذخیره‌سازی، سبب به جلو رانده شدن سیالات درجا می‌شود. از این ویژگی جهت افزایش برداشت سیالات درجا استفاده می‌شود. نظر به هزینه بر بودن پروژه‌های جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن، استفاده از کارایی آن‌ها جهت ازدیاد برداشت، قسمت اعظمی از هزینه‌ها قابل بازگشت خواهد بود.
- مکانیزم ذخیره‌سازی CO₂ در اینجا عمدتاً، جذب سطحی CO₂ از طریق میکرومنافذ موجود در ماتریکس ذغال می‌باشد که بسیار متفاوت با مکانیزم دام‌افتادگی هیدرودینامیکی موجود در آبداه‌های نمکی یا مخازن نفت و گاز است.
- تولید اقتصادی متان از یک لایه ذغالی عمیق غیرقابل معدن‌کاوی را می‌توان با تزریق CO₂ به سازند افزایش داد، بطوریکه رونشینی CO₂ منجر به پس‌دهی متان می‌شود.
- بر اثر جذب و جذب سطحی دی‌اکسیدکربن، رگه ذغالی متورم شده، به دنبال آن کاهش تراوایی و کاهش تزریق‌پذیری رخ می‌دهد که برای خنثی کردن این عامل مزاحم، بایستی فشار تزریق را بالا برد.
- ابقاء دی‌اکسید کربن در بازالت‌ها، با وقوع واکنش با سیلیکات‌ها و در نتیجه تشکیل کانی‌های کربناته صورت می‌پذیرد.
- به علت پایین بودن نفوذپذیری کانی‌های شیلی، حجم ذخیره‌سازی در این سازندها محدود است.
- لایه‌های نمکی متشکل از هالیت، در برابر فشار سیال تزریقی غیرتراوا هستند و در نتیجه، به صورت خودبخودی، محیطی محصور با ماهیت پلاستیکی ایجاد کرده که منجر به فراهم آوردن یک محیط ذخیره‌سازی قوی، ایمن و مطمئن می‌گردد.
- معادن سنگ‌های آذرین و دگرگونی، به دلیل بالا بودن دانسیته شبکه شکاف‌ها، گزینه مناسبی نیستند. بهترین گزینه این معادن، در حوزه سنگ‌های رسوبی (همچون رسوبات پتاسیم‌دار، معادن نمکی و رسوبات روی‌دار) است.
- در صورتی که دی‌اکسیدکربن به سفره‌های آب‌شور عمیق تزریق گردد، با توجه به عمق بالای تزریق و فوق‌بحرانی چگال بودن گاز، تزریق غیرامتزاجی خواهد بود. اما در تزریق دی‌اکسیدکربن به مخازن نفتی، بسته به دما، فشار و ترکیب نفت درجا، تزریق می‌تواند امتزاجی یا غیرامتزاجی باشد.



- از آنجا که در مخازن نفتی و آبدی‌های نمکی، دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی لزجت کمتر و تحرک‌پذیری بیشتری نسبت به نفت و آب دارد، جبهه‌های پیشرو دی‌اکسیدکربن ناپایدارتر بوده و نفت و یا آب کمتری جابه‌جا می‌شود. اما در خصوص مخازن گازی خلاف قضیه ذکر شده، صادق است.
- بهتر آن است که دی‌اکسید کربن در زیرین‌ترین لایه سازند تزریق شود. گفته می‌شود که ناهمگونی لایه‌ها و حضور لایه‌های ناتراوا و یا کم‌تراوا نظیر شیل‌ها، باعث می‌گردد نرخ صعودی مهاجرت گاز دی‌اکسیدکربن کند گردد.
- ماندگاری زمین شناسی دی‌اکسیدکربن به مجموعه‌ای از مکانیسم‌های به دام اندازی فیزیکی (ذخیره‌سازی و نگهداری هیدرودینامیکی و ذخیره‌سازی و نگهداری به صورت فاز پسماند) و ژئوشیمیایی (ذخیره‌سازی و نگهداری به صورت مواد معدنی، ذخیره‌سازی و نگهداری دی‌اکسیدکربن در حالت محلول و ذخیره‌سازی و جذب بر روی سطح جامدات) بستگی دارد.
- شیل‌های بسیار کم‌تراوا، بسترهای نمکی، سطوح کم عمق حاوی هیدرات‌های گازی، و ساختارهای رسوبی مسدود ناشی از چین و گسل به عنوان ساختارهای مناسب زمین‌شناسی و نیز چینه‌ها و ریف‌ها، به عنوان ساختارهای استراتیوگرافی، مستعد برای به دام‌اندازی فیزیکی می‌باشند.
- ذخیره‌سازی و نگهداری به صورت مواد معدنی، پایدارترین حالت نگهداری دی‌اکسیدکربن است ولی میزان دی‌اکسیدکربن که طی این فرآیند جذب می‌شود، اندک است.
- انحلال یک فرآیند کند و زمانبر است. انحلال در سیال باعث می‌شود که فاز دی‌اکسیدکربن دیگر مجزا نباشد و اثر منفی نیروی شناوری برطرف شود.
- در لایه‌های ذغال سنگ، مولکول‌های متان در شبکه ذغال سنگ جذب شده و به دلیل اینکه جذب شیمیایی دی‌اکسیدکربن روی ذغال سنگ، بسیار سریع اتفاق می‌افتد. دی‌اکسیدکربن در سطح زغال سنگ جایگزین متان می‌شود.

تشکر و قدردانی:

این مقاله با حمایت و پشتیبانی اداره ارزیابی مخازن شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب تهیه شده است.

منابع

- [1] Crosson, P.: 'Greenhouse warming and climate change: Why should we care?', Food Policy, 1989, 14, (2), 107-118.
[2] Franck, H.-G., and Stadelhofer, J.W.: 'Carbon dioxide and oxygen cycles — a vital combination', Fuel, 1989, 68, (4), 411-415.
[3] Anastasi, C., Hudson, R., and Simpson, V.J.: 'Effects of future fossil fuel use on CO₂ levels in the atmosphere', Energy Policy, 1990, 18, (10), 936-944.



- [4] Wigley, T.M.L.: 'Warming of the climate', *Futures*, 1982, 14, (1), 77-79.
- [5] Shukla, R., Ranjith, P., Haque, A., and Choi, X.: 'A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity', *Fuel*, 2010, 89, (10), 2651-2664.
- [6] Riemer, P.: 'Greenhouse gas mitigation technologies, an overview of the CO₂ capture, storage and future activities of the IEA Greenhouse Gas R&D programme', *Energy Conversion and Management*, 1996, 37, (6-8), 665-670.
- [7] Freund, P., and Ormerod, W.G.: 'Progress toward storage of carbon dioxide', *Energy Conversion and Management*, 1997, 38, Supplement, (0), S199-S204.
- [8] 'Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change', United Nations, 1997.
- [9] Whorton, L.P., Brownscombe, E.R., and Dyes, A.B.: 'Method for producing oil by means of carbon dioxide' 1952.
- [10] Quintella, C.M., Dino, R., and Musse, A.P.S.: 'CO₂ Enhanced Oil Recovery and Geologic Storage: An Overview with Technology Assessment Based on Patents and Articles'. Proc. SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- [11] Baklid, A., Korbol, R., and Owren, G.: 'SLEIPNER VEST CO₂ DISPOSAL, CO₂ INJECTION INTO A SHALLOW UNDERGROUND AQUIFER'. Proc. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 1996.
- [12] Srivastava, R.K., Huang, S.S., and Dong, M.: 'Laboratory Investigation of Weyburn CO₂ Miscible Flooding', *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2000, 39, (2).
- [13] Barnhart, W., and Coulthard, C.: 'Weyburn CO₂ Miscible Flood Conceptual Design and Risk Assessment', *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2000, 39, (9).
- [14] Wright, I.W.: 'The In Salah Gas CO₂ Storage Project'. Proc. International Petroleum Technology Conference, Dubai, U.A.E., 2007.
- [15] Metz, B., Davidson, O., Coninck, H.d., Loos, M., and Meyer, L.: 'IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage', 2005.
- [16] Shaw, J., and Bachu, S.: 'Screening, Evaluation, and Ranking of Oil Reservoirs Suitable for CO₂-Flood EOR and Carbon Dioxide Sequestration', *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2002, 41, (9).
- [17] Xuan, Z., and He, S.: 'Potential and Early Opportunity-Analysis on CO₂ Geo-Sequestration in China'. Proc. SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, 2010.
- [18] Rodosta, T.D., Litynski, J.T., Plasynski, S.I., Hickman, S., Frailey, S., and Myer, L.: 'U.S. Department of energy's site screening, site selection, and initial characterization for storage of CO₂ in deep geological formations', *Energy Procedia*, 2011, 4, (0), 4664-4671.
- [19] Ramirez, A., Hagedoorn, S., Kramers, L., Wildenborg, T., and Hendriks, C.: 'Screening CO₂ storage options in the Netherlands', *Energy Procedia*, 2009, 1, (1), 2801-2808.
- [20] Haigh, M.: 'Well Design Differentiators for CO₂ Sequestration in Depleted Reservoirs'. Proc. Offshore Europe, Aberdeen, UK, 8-11 September 2009.
- [21] Solomon, S.: 'Carbon Dioxide Storage: Geological Security and Environmental Issues – Case Study on the Sleipner Gas field in Norway', Bellona Report, 2007.
- [22] Shukla, R., Ranjith, P., Haque, A., and Choi, H.: 'Some Aspects of Caprock Failure in Geo-Sequestration of Carbon'. Proc. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 1-6 October, 2008.
- [23] Gupta, A.K.: 'An Understanding the Plume Dynamics and Risk Associated with CO₂ Injection in Deep Saline Aquifers', the University of Texas at Austin, 2011.
- [24] Aarnes, J., Selmer-Olsen, S., Flach, T.A., Foto, S.S., Kl, C., #x00F6, ppner, R, O., #x00F8, snes, and Vivalda, C.: 'Development and Testing of Unified Approach to Qualifying CO₂ Storage Sites'. Proc. Offshore Europe, Aberdeen, UK, 8-11 September 2009.
- [25] Jimenez, J.A., and Chalaturnyk, R.J.: 'Integrity of Bounding Seals for Geological Storage of Greenhouse Gases'. Proc. SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, 20-23 October 2002.
- [26] Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K., and Shindo, Y.: 'Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs', *Energy Conversion and Management*, 1992, 33, (5-8), 619-626.
- [27] Rosenbauer, R.J., Koksalan, T., and Palandri, J.L.: 'Experimental investigation of CO₂-brine-rock interactions at elevated temperature and pressure: Implications for CO₂ sequestration in deep-saline aquifers', *Fuel Processing Technology*, 2005, 86, 1581-1597.



- [28] Mamora, D.D., and Seo, J.G.: 'Enhanced Gas Recovery by Carbon Dioxide Sequestration in Depleted Gas Reservoirs'. Proc. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29 September-2 October 2002.
- [29] Z., L., M., D., S., L., and S., H.: 'CO₂ Sequestration in Depleted Oil and Gas Reservoirs – Caprock Characterization and Storage Capacity'. Proc. Energy Conversion and Management, 2006.
- [30] Wright, I.W., Ringrose, P.S., Mathieson, A.S., and Eiken, O.: 'An Overview of Active Large-Scale CO₂ Storage Projects'. Proc. SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization, San Diego, California, USA, 2-4 November 2009.
- [31] Loizzo, M., Lecampion, B., Berard, T., Harichandran, A., and Jammes, L.: 'Reusing O&G Depleted Reservoirs for CO₂ Storage: Pros and Cons'. Proc. Offshore Europe, Aberdeen, UK, 8-11 September 2009.
- [32] Reeves, S.R.: 'Geological Sequestration of CO₂ in Deep, Unmineable Coalbeds: An Integrated Research and Commercial-Scale Field Demonstration Project'. Proc. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September-3 October 2001.
- [33] Stevens, S.H., Spector, D., and Riemer, P.: 'Enhanced Coalbed Methane Recovery Using CO₂ Injection: Worldwide Resource and CO₂ Sequestration Potential'. Proc. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, 2-6 November 1998.
- [34] Crist, T.E., Boyer, C.M., and Kelso, B.S.: 'A Geologic and Coalbed Methane Resource Analysis of the Menefee Formation in the San Juan Basin, Southwestern Colorado and Northwestern New Mexico'. Proc. Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, 6-8 March 1989.
- [35] Harpalani, S., Singh, K., and Zutshi, A.: 'CO₂/N₂ Flow Behavior of Deep Coal-Gas Reservoirs', 17-21 June 2006.
- [36] Khosrokhavar, R., Schoemaker, C., Battistutta, E., Wolf, K.-H.A.A., and Bruining, J.: 'Sorption of CO₂ in Shales Using the Manometric Set-up'. Proc. SPE Europe/EAGE Annual Conference, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012.
- [37] Gorucu, F.B., Jikich, S.A., Bromhal, G.S., Sams, W.N., Ertekin, T., and Smith, D.H.: 'Matrix Shrinkage and Swelling Effects on Economics of Enhanced Coalbed Methane Production and CO₂ Sequestration in Coal'. Proc. SPE Eastern Regional Meeting, Morgantown, West Virginia, 14-16 September 2005.
- [38] Anggara, F., Sasaki, K., and Sugai, Y.: 'Experimental and Analytical Studies on Permeability Reduction of a Coal Seam by CO₂ Injection'. Proc. International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand, 7-9 February 2011.
- [39] Bennion, D.B., and Bachu, S.: 'Supercritical CO₂ and H₂S□Brine Drainage and Imbibition Relative Permeability Relationships for Intergranular Sandstone and Carbonate Formations'. Proc. SPE Europe/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria, 12-15 June 2006.
- [40] Fayers, F.J., and Sheldon, J.W.: 'The Effect of Capillary Pressure and Gravity on Two-Phase Fluid Flow in a Porous Medium', 1959.
- [41] CRANE, F.E., KENDALL, H.A., and GARDNER, G.H.F.: 'Some Experiments on the Flow of Miscible Fluids of Unequal Density through Porous Media', 1963.
- [42] Aronofsky, J.S., and Heller, J.P.: 'A Diffusion Model to Explain Mixing of Flowing Miscible Fluids in Porous Media', 1957.
- [43] Zhao, X., Toks, M.N., and #246: 'Modeling Fluid Flow in Heterogeneous and Anisotropic Porous Media', 1991.
- [44] Woods, A.W., Jupp, T.E., and Richardson, C.N.: 'The interaction of flow and reactions in porous media'. Proc. International Symposium on Oilfield Scale, Aberdeen, United Kingdom, 29-30 January 2003.
- [45] Moore, J.S.: 'Design, Installation, and Early Operation of the Timbalier Bay S-2B (RA) SU Gravity-Stable, Miscible CO₂-injection Project', SPE Production Engineering, 1986, 1, (5), 369-378.
- [46] Cinar, Y., Riaz, A., and Tchelepi, H.A.: 'Experimental Study of CO₂ Injection into Saline Formations'. Proc. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, U.S.A., 11-14 November 2007.
- [47] Pentland, C.H., El-maghraby, R., Iglauer, S., Tsuchiya, Y., Okabe, H., and Blunt, M.J.: 'Measurement of Carbon Dioxide Capillary Trapping in Core Analysis'. Proc. SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization, New Orleans, Louisiana, USA, 10-12 November 2010.
- [48] White, C.M., Straziser, B.R., Granite, E.J., Hoffman J.S., and Pennline H.W.: 'Separation and Capture of CO₂ from Large Stationary Sources and Sequestration in Geological Formations Coal beds and Deep Saline Aquifers', Journal of the Air & Waste Management Association, 2003.
- [49] 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, 2003, 44, (20), 3151-3175.
- [50] Saadatpoor, E., Bryant, S.L., and Sepehrmoori, K.: 'Effect of Capillary Heterogeneity on Buoyant Plumes: A New Local Trapping Mechanism', Energy Procedia, 2009, 1, 3299-3306.



- [51] Bachu, S.: 'Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media', *Environmental Geology*, 2003, 44, (3), 277-289.
- [52] Suekane, T., Thanh, N.H., Matsumoto, T., Matsuda, M., Kiyota, M., and Ousaka, A.: 'Direct Measurement of Trapped Gas Bubble by Capillary on the Pore Scale', *Energy Procedia*, 2009, 1, 3189-3196.
- [53] Bachu, S., Gunter, W.D., and Perkins, E.H.: 'Aquifer disposal of CO₂: hydrodynamic and mineral trapping', *Energy Conversion and Management*, 1994, 35, (4), 269-279.
- [54] Obdam, A., Meer, L.G.H.v.d., May, F., Kervevan, C., Bech, N., and Wildenborg, A.: 'Effective CO₂ storage capacity in aquifers, gas fields, oil fields and coal fields'. Proc. the International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 2003.