دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

فناوری‌های ذخیره‌سازی کربن: مروری بر ادبیات پژوهش

فرهاد فراهانی

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران Farhadfarahani2@gmail.com

چکیده

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای تهدیدی جدی برای حفظ حیات در سیاره‌ی زمین است و کنترل سطح دی‌اکسیدکربن به بحرانی بین‌المللی تبدیل شده است. پژوهش حاضر با روش مطالعات کتابخانه‌ای به ادبیات پژوهش در مورد ذخیره‌سازی کربن به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های کاربردی کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن در اتمسفر می‌پردازد. پژوهش‌های تاکنون موجود تأکید می‌کنند که فناوری‌های جذب، ذخیره‌سازی و به‌کارگیری کربن می‌توانند به کاهش روند انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کنند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که چهار روش برای ذخیره‌سازی کربن وجود دارد که عبارتند از ازدیاد برداشت نفت، ذخیره‌سازی زیرزمینی، ذخیره‌سازی اقیانوسی و ذخیره‌سازی معدنی. نظر به پیشینه‌ی صنعت نفت و گاز، یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که دو روش ازدیاد برداشت نفت و ذخیره‌سازی زیرزمینی کاربردی و نسبت به ذخیره‌سازی اقیانوسی و ذخیره‌سازی معدنی در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر است. از نظر خطرات ناشی از نشت دی‌اکسیدکربن، مطالعات بر اهمیت نظارت بر ذخیره‌سازی در هر چهار شیوه تأکید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی

ذخیره‌سازی کربن، ازدیاد برداشت نفت، ذخیره‌سازی زیرزمینی، ذخیره‌سازی اقیانوسی، ذخیره‌سازی معدنی

۱. مقدمه

میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو سده‌ی اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. انرژی خورشیدی محرک اصلی سیستم آب‌وهوایی زمین است. در حال حاضر، میانگین تابش خورشیدی ۳۴۲ (Wm^{-2}) است. حدود ۳۱ درصد این تابش از طریق ابرها، یخ و برف در فضا منعکس شده و در نتیجه حدوداً ۲۳۵ (Wm^{-2}) در جو و سطح زمین جذب می‌شود. تابش خروجی از سطح زمین در دمای متوسط ۱۵+ درجه‌ی سانتیگراد در حدود ۳۹۰ (Wm^{-2}) است. این فرآیند نتیجه‌ی اثر گلخانه‌ای است [۱]. جو زمین ظرفیت انتشار مادون‌قرمز و جذب گازهای گلخانه‌ای را دارد. گازهای گلخانه‌ای شامل دی‌اکسیدکربن، بخار آب، متان، نیتروز اکسید (N_2O)، کلروفلوئوروکربن (*chlorofluorocarbons*)، اوزون در تروپوسفر (*troposphere*) (پایین‌ترین لایه‌ی اتمسفر) و استراتوسفر (*stratosphere*) (لایه‌ی بعد و بالاتر از تروپوسفر) هستند. میزان غلظت این گازها برای زندگی در سیاره‌ی زمین حیاتی است. اگر غلظت گازهای گلخانه‌ای افزایش یابد، سطح زمین مادون‌قرمز بیشتر جذب می‌کند که موجب گرمایش جهانی و در نتیجه تغییرات اقلیمی گسترده می‌شود. از بین گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسیدکربن مهم‌ترین گازی است که افزایش غلظت آن می‌تواند اثرات گلخانه‌ای پیش‌گفته را به‌نحوی فزاینده تشدید می‌کند [۲]. نظر به اهمیت مسائلی چون افزایش جمعیت، رشد اقتصادی و در نتیجه نیاز به مصرف انرژی بیشتر، کنترل سطح دی‌اکسیدکربن آزادشده در اتمسفر به بحرانی بین‌المللی بدل شده است. پژوهش حاضر با روش مطالعات کتابخانه‌ای می‌کوشد به ادبیات پژوهش پیرامون ذخیره‌سازی کربن به‌مثابه یکی از راه‌حل‌های کاربردی کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن بپردازد. گرچه انتشار صفر دی‌اکسیدکربن در حال حاضر غیرممکن است، فناوری‌های جذب، ذخیره‌سازی و به‌کارگیری کربن می‌توانند به کاهش روند انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کنند.

۲. روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر با استفاده از پایگاه داده‌های علمی و پژوهشی گوگل اسکالر انجام شد. مقالات و پژوهش‌های مورد نظر با کلیدواژه‌های زیر، در مواردی به‌تفکیک و در مواردی تلفیقی، در موتور جستجوی گوگل اسکالر بررسی شدند:

۱. ذخیره‌سازی کربن (Carbon storage)؛
۲. ازدیاد برداشت نفت (Enhanced oil recovery)؛
۳. ذخیره‌سازی زیرزمینی (Geological storage)؛
۴. ذخیره‌سازی اقیانوسی (Ocean storage)؛
۵. ذخیره‌سازی معدنی (Mineral carbonation).

برای بررسی جدیدترین مطالعات در ادبیات پژوهش پیرامون فناوری‌های ذخیره‌سازی کربن بازه‌ی زمانی ۲۰۱۰ الی ۲۰۲۲ در نظر گرفته شد. بیش از ۳۰ منبع مرتبط با موضوع مقاله‌ی مروری حاضر شناسایی شدند که در مجموع ۱۶ عنوان اثر پژوهشی با کلیدواژه‌های مذکور متناسب بودند و در این پژوهش به‌کار رفته‌اند.

۳. یافته‌های پژوهش

گزارش‌های تاریخی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی همواره اثراتی زیان‌آور بر زیست بشر داشته است، تا جایی که برخی تمدن‌های اولیه تحت تغییر شرایط اقلیمی به‌کلی فروپاشیدند؛ از جمله امپراتوری مصر، تمدن مایا، کنعان در عصر مفرغ (*Bronze Age Canaan*) و کشاورزان گرینلند (*Norse farmers of Greenland*) [۳]. در عین حال، تمامی گونه‌های زنده همواره تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی بوده‌اند. در سال ۲۰۰۳، موج گرمای شدید در اروپا آغاز شد و دما در طول ماه‌های تابستان ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به میانگین دما در طول سال‌های دیگر افزایش یافت که از برخی نتایج مستقیم این پدیده کاهش بارش باران، افزایش تبخیر در منطقه‌ی مدیترانه و جنوب اروپا، کسری تراز آب تا ۳۸۰ میلی‌متر، کاهش تولید محصولاتی نظیر گندم در فرانسه و غلات در اوکراین بود [۳]. در چنین شرایطی، پژوهشگران بیش از پیش به بررسی راه‌حل‌های کاهش دی‌اکسیدکربن پرداخته‌اند. ذخیره‌سازی کربن یکی از گزینه‌های مؤثر برای کاهش گازهای گلخانه‌است که در طول دهه‌ی اخیر محل بحث و مطالعات میان‌رشته‌ای گسترده بوده است.

ذخیره‌ی کربن نیازمند فرآیند پیشینی جذب کربن (*carbon capture*) در طول زنجیره‌ی ارزش جذب، ذخیره‌سازی و به‌کارگیری کربن (*carbon utilization*) است. فناوری‌های تاکنون موجود جذب کربن عبارتند از جذب مستقیم کربن از هوا (*direct air capture*) [۴] جذب کربن از طریق جلبک (*algae based carbon capture*) [۵] جذب پس‌سوز کربن (*absorption*) [۶] و جذب سطحی کربن (*adsorption*) [۷]. پس از انجام فرآیند جذب از طریق فناوری‌های پیش‌گفته، دی‌اکسیدکربن فشرده شده، بارگیری یا از طریق خط لوله منتقل می‌شود، و در نهایت از طریق فناوری‌های دیگر در زمین، اقیانوس یا به‌صورت کانی کربنات (*mineral carbonate*) ذخیره می‌شود، که به‌ترتیب ذخیره‌سازی زیرزمینی، ذخیره‌سازی اقیانوسی و ذخیره‌سازی کربناته خوانده می‌شوند. مناطقی متعدد در سراسر جهان وجود دارند که برای ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن به روش‌های مختلف مناسب هستند. حوضه‌های کوه‌هایی که حاصل برخورد صفحات هستند احتمالاً از ظرفیت ذخیره‌سازی خوبی برخوردارند؛ از جمله حوضه‌های کوه‌های راکی، آپالاش و آند در آمریکا، حوضه‌های اروپایی شمال آلپ و کارپات و غرب اورال، و حوضه‌های آسیایی جنوب زاگرس و هیمالیا. در مواردی دی‌اکسیدکربن برای استخراج نفت از مخازن در بخش نفت و گاز به‌کار می‌رود که اصطلاحاً ازدیاد برداشت نفت (*enhanced oil recovery*) نامیده می‌شود. در فرآیند ازدیاد برداشت نفت، دی‌اکسیدکربن در زیر زمین ذخیره می‌شود در نوع خود شیوه‌ای برای ذخیره‌سازی کربن است. در ادامه به انواع فناوری‌های تاکنون موجود در خصوص ذخیره‌سازی کربن می‌پردازیم.

۱.۳. ازدیاد برداشت نفت

فرآیند تولید نفت معمولاً سه مرحله دارد. نخست چاه نفت حفر می‌شود، و سپس مخزن زیرزمینی نفت به سطح منتقل می‌شوند. اما این شیوه تنها حدود ۱۰ درصد از نفت مخزن را برداشت می‌کند. در برداشت ثانویه، غالباً سیالی نظیر آب یا گاز در مخزن پمپاژ و نفت به سطح رانده می‌شود. حدوداً ۲۰ تا ۴۰ درصد نفت مخزن از این طریق برداشت می‌شود. هر برداشت پس از مرحله دوم نیازمند تزریق سیالی است که از پیش در مخزن وجود ندارد. ازدیاد برداشت نفت رایج‌ترین روش برداشت نوع سوم است که طی آن دی‌اکسیدکربن با فشار آب در چاه تزریق می‌شود (چاه تزریق) و نفت از چاه خارج می‌شود. ازدیاد برداشت نفت می‌تواند بیش از ۶۰ درصد نفت موجود را استخراج کند. با اینهمه، تا جایی که به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط است، ذخیره‌سازی کربن در این شیوه گرچه از حجم دی‌اکسیدکربن در هوا می‌کاهد (حدوداً روزانه ۱۰۰ تن)، موجب افزایش تولید و به‌کارگیری نفت و در نتیجه افزایش دی‌اکسیدکربن می‌شود [۸].

۲.۳. ذخیره‌سازی زیرزمینی

ذخیره‌سازی زیرزمینی عبارت است از تزریق دی‌اکسیدکربن در اعماق بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر به سازندهایی (*formation*) نظیر مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده، آبده‌ی شور و عمیق (*deep saline aquifer*) و سازندهای بستر زغال‌سنگ. معیارهای مورد استفاده برای تعیین تناسب حوضه (*basin*) عبارتند از مختصات حوضه نظیر حرکت زمین‌ساختی (*tectonic movement*)، شکل رسوب، وضعیت زمین‌گرمایی (*geothermal*) و هیدرودینامیکی، منابع حوضه (هیدروکربن‌ها، گاز، نمک)، و همچنین وضعیت صنعتی و زیرساخت‌ها. بسته به نوع سایت، دی‌اکسیدکربن از طریق مکانیسم‌های مختلف تله (*trap*)، از جمله لایه‌های ناتراوا (*impermeable layer*) معروف به پوش‌سنگ (*caprock*) نظیر گِل‌سنگ (*mudstone*)، رس و پلمه‌سنگ (shale) در بخش زیرین، مایعات متخلخل (*situ fluids*) و مواد آلی ذخیره و سپس حل یا جذب می‌شود (با توجه به فشار و دمای مخزن، دی‌اکسیدکربن به‌صورت گاز فشرده، مایع یا در شرایط فوق بحرانی ذخیره می‌شود). ذخیره‌سازی کربن در سازندهای زیرزمینی به‌دلیل تجربه قبلی صنعت نفت و گاز چه‌بسا یکی از امیدبخش‌ترین گزینه‌ها باشد. این فناوری به‌خوبی با ویژگی‌های ساختاری و رفتاری مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده سازگار است و تکنیک‌های حفاری چاه و تزریق می‌توانند برای کاربردهای ذخیره‌سازی کربن به‌کار روند. سازندهای آبده شور و عمیق نیز امکان ذخیره‌سازی ۷۰۰ تا ۹۰۰ گیگاتن دی‌اکسید کربن را فراهم می‌کنند. مورد خاص سازندهای بستر زغال‌سنگ هنوز نیازمند پژوهش‌های بیشتر است تا از امنیت این سازندها برای ذخیره‌سازی کربن اطمینان حاصل شود [۹-۱۰].

۳.۳. ذخیره‌سازی اقیانوسی

ذخیره‌سازی اقیانوسی اصلاً مبتنی بر این ایده است که بستر اقیانوس در اعماق آب ظرفیتی عظیم برای تزریق و ذخیره‌ی دی‌اکسیدکربن دارد. بیشتر قاره‌ها از چنین حوضه‌هایی برخوردارند؛ مانند اقیانوس اطلس، قطب شمال و اقیانوس هند. در مناطق که به‌لحاظ زمین‌ساختی فعال هستند، مثلاً مناطق نزدیک اقیانوس آرام یا شمال مدیترانه، ممکن است برای ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن چندان مناسب نباشند، چرا که خطر نشت دی‌اکسیدکربن در این نواحی بالا است. گرچه این فناوری بیش از ۲۵ سال از سوی پژوهشگران بررسی شده است، ذخیره‌سازی اقیانوسی کربن هرگز در مقیاس بزرگ آزمایش نشده است [۱۱-۱۲].

۴.۳. ذخیره‌سازی معدنی

ذخیره‌سازی معدنی کربن عبارت است از واکنش دی‌اکسیدکربن با اکسیدهای فلزی مانند منیزیم و اکسیدهای کلسیم برای تشکیل کربنات‌ها. ذخیره‌سازی معدنی کربن، که ترسیب معدنی (*mineral sequestration*) نیز خوانده می‌شود، هم نوعی گزینه‌ی ذخیره‌سازی است و هم امکانی برای به‌کارگیری کربن (*carbon utilisation*)؛ مورد دوم به‌ویژه در صنعت ساخت‌وساز قابل استفاده است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که پروژه‌های ذخیره‌سازی کربن تا سال ۲۰۳۰ پتانسیل ذخیره‌ی سالانه ۲۰۰ میلیون تن دی‌اکسیدکربن را دارد [۱۳].

برخی برآوردها حاکی از آن است که ایالات‌متحد می‌تواند به‌تنهایی انتشار دی‌اکسیدکربن ۵۰۰ سال اخیر خود را به‌صورت زیرزمینی ذخیره کند؛ این مقدار در سطح جهانی در حدود ۳۰۰ سال است [۱۴]. چالش‌های ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در درجه‌ی اول تابعی از چالش‌های اقتصادی، قانونی و نظارتی هستند؛ به‌عنوان مثال، ذخیره‌سازی زیرزمینی خود دارای مجموعه‌ای از چالش‌ها نظیر یافتن سازند مناسب برای ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن است، در حالی که به‌موازات آن امکان نشت دی‌اکسیدکربن از سایت مسئله‌ای نگران‌کننده و نیازمند تعیین دقیق پتانسیل ذخیره‌سازی و نظارت ثابت بر دی‌اکسیدکربن ذخیره شده است. با اینهمه، ذخیره‌سازی کربن بدون به‌کارگیری آن هزینه‌ساز است، چون فاقد نوآوری لازم برای سرمایه‌گذاری است. در چنین شرایطی است که چالش‌های اقتصادی و مسائل قانون‌گذاری و سیاست‌گذاری تشویقی حائز اهمیت است؛ به‌ویژه مسائل حقوقی ناشی از مسئولیت نشت کربن، پیچیدگی‌های قضایی مالکیت و به‌کارگیری منابع زیرزمینی [۱۵-۱۶].

۴. نتیجه‌گیری

ذخیره‌سازی کربن راه‌حلی برای کاهش دی‌اکسیدکربن و اثرات گازهای گلخانه‌ای است. پژوهش‌های تاکنون موجود راه‌حل‌های مختلف را برای ذخیره‌سازی کربن پیشنهاد کرده‌اند. با اینهمه، جز دو روش ازدیاد برداشت نفت و ذخیره‌سازی زیرزمینی هنوز ادبیات پژوهش نیازمند مطالعات بیشتر برای توسعه‌ی روش و زیرساخت‌های لازم برای ذخیره‌سازی اقیانوسی و ذخیره‌سازی معدنی است. مهم‌ترین دغدغه‌ی پژوهش‌های سال‌های اخیر در خصوص ذخیره‌سازی کربن، خطرات بالقوه‌ی نشت دی‌اکسیدکربن است. در عین حال، هر یک از روش‌های ذخیره‌سازی پیش‌گفته از مقتضیات اقتصادی و حقوقی خاص خود برخوردار است که نیاز به سیاست‌گذاری در سطوح ملی و فراملی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. در نهایت، با توجه به پیشینه و تجربه‌ی کافی در حوزه‌ی برداشت نفت و گاز، به‌نظر می‌رسد دو روش ازدیاد برداشت نفت و ذخیره‌سازی زیرزمینی در کوتاه‌مدت می‌توانند گزینه‌هایی مناسب برای ذخیره‌سازی کربن و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر باشد.

منابع

[1] P. Dasgupta, S. K. Pattanayak and K. Smith. Handbook of Environmental Economics. *Elsevier*, 2018.

[2] E. Cooke, A. Cussans, A. Clack and C. Cornford. "Climate change and health scorecard: What are UK professional and regulatory health organizations doing to tackle the climate and ecological emergency?" *The Journal of Climate Change and Health*, vol. 8, 100164, 2022.

[3] H. Ismayilli. *Circular Economy and Carbon Capture, Utilisation and Storage Technologies in Developing Countries*. Department of Civil, Chemical, Environmental, and Materials Engineering, University of Bologna, 2020.
[4] W. D. Keith, G. Holmes, D. St Angelo and K. Heidel. "A process for capturing CO2 from the atmosphere." *Joule*, vol. 2, pp. 1573-1594, 2018.
[5] D. Moreira and J. C. Pires. "Atmospheric CO2 capture by algae: negative carbon dioxide emission path." *Bioresource technology*, vol. 215, pp. 371-379, 2016.
[6] F. M. Santos, A. L. Gonçalves and J. C. Pires. "Negative emission technologies." In *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*, pp. 1-13. Academic Press, 2019.
[7] R. Ben-Mansour, M. A. Habib, O. E. Bamidele, M. Basha, N. A. A. Qasem, A. Peedikakkal, T. Laoui and M. J. A. E. Ali. "Carbon capture by physical adsorption: materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations–a review." *Applied Energy*, vol. 161, pp. 225-255, 2016.
[8] V. Núñez-López and E. Moskal. "Potential of CO2-EOR for near-term decarbonization." *Frontiers in Climate*, vol. 1, p. 5, 2019.
[9] M. Sorai, X. Lei, Y. Nishi, T. Ishido and S. Nakao. "CO2 geological storage." In *Handbook of climate change mitigation and adaptation*, pp. 1531-1584. Cham: Springer International Publishing, 2022.
[10] Y. Zapata, M. R. Kristensen, N. Huerta, C. Brown, C. S. Kabir and Zulfiquar Reza. "CO2 geological storage: Critical insights on plume dynamics and storage efficiency during long-term injection and post-injection periods." *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 83, 103542, 2020.
[11] M. M. Ezat, T. L. Rasmussen, M. P. Hain, M. Greaves, J. W. Rae, K. Zamelczyk, T. M. Marchitto, S. Szidat and L. C. Skinner. "Deep ocean storage of heat and CO2 in the Fram Strait, Arctic Ocean during the last glacial period." *Paleoceanography and paleoclimatology*, vol. 36, e2021PA004216, 2021.
[12] S. Goldthorpe. "Very Deep Ocean Storage of CO2–Further Considerations." In *14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne*, pp. 21-26. 2018.
[13] K. Biniek, K. Henderson, M. Rogers and G. Santoni. "Driving CO2 emissions to zero (and beyond) with carbon capture, use, and storage." *McKinsey Quarterly*, 2020.
[14] A. A. Park. "Towards sustainable energy and materials: new circular carbon economy via carbon capture, utilization and storage." In *ciencias*, Springer, 2022.
[15] A. Ilinova and E. Kuznetsova. "CC (U) S initiatives: Prospects and economic efficiency in a circular economy." *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1295-1301, 2022.
[16] L. Desport and S. Selosse. "Perspectives of CO2 utilization as a negative emission technology." *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, 102623, 2022.