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 به‌کارگیری کربن: مروری بر ادبیات پژوهش

فرهاد فراهانی

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

چکیده

دی‌اکسیدکربن حاصل از به‌کارگیری سوخت‌های فسیلی در فرآیندهای صنعتی به‌عنوان مهم‌ترین عامل تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود. یکی از روش‌های جدید برای کاهش دی‌اکسیدکربن هوا استفاده از فناوری‌های به‌کارگیری کربن است که به‌ویژه در دهه‌ی اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. پژوهش حاضر با استفاده از روش مطالعات کتابخانه‌ای می‌کوشد شیوه‌های مختلف به‌کارگیری کربن پس از فرایند جذب را بررسی کند. یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که به‌کارگیری کربن جذب‌شده در بخش‌های مختلف از جمله تولید مصالح ساختمانی (سیمان، سنگدانه و بتن)، سوخت، مواد شیمیایی و مواد پلاستیکی هم مقرون‌به‌صرفه است و هم موجب کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. سناریوی ایده‌آل زمانی خواهد بود که هزینه‌ی ایجادشده در تأسیسات جذب کربن را بتوان با استفاده از درآمد تولیدشده با فروش یا به‌کارگیری و فروش محصولات فرعی جبران کرد. در نهایت، برآوردها نشان می‌دهد که فناوری‌های به‌کارگیری کربن می‌توانند یکی از بهترین گزینه‌ها برای دستیابی به اهداف اقتصاد کم‌کربن باشند.

واژه‌های کلیدی

به‌کارگیری کربن، مصالح ساختمانی، سوخت، مواد شیمیایی، پلاستیک، کربنات کلسیم رسوبی

۱. مقدمه

اقتصاد کم‌کربن به‌مثابه راه‌حلی برای مقابله با تغییرات اقلیمی و انتشار فزاینده‌ی گازهای گلخانه‌ای یکی از مهم‌ترین عوامل بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات منفی صنایعی است که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند و بر کیفیت و کمیت آب و منابع زمینی و در عین حال به‌طور غیرمستقیم بر بهبود سلامت و کاهش بیماری‌ها، کاهش فقر و نابرابری، و افزایش تاب‌آوری جامعه اثرگذار است [۱]. دی‌اکسیدکربنی که حاصل به‌کارگیری سوخت‌های فسیلی در فرآیندهای صنعتی است به‌عنوان عامل مهم تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود، تا جایی که تنها در سال ۲۰۱۱ حدوداً ۷۳ درصد از واداشت تابشی اقلیمی ناشی از افزایش این گاز در جو زمین بود [۲]. انتشار گازهای گلخانه‌ای صنایع از حدود ۲۸ گیگاتون در سال ۲۰۰۵ به ۳۲ گیگاتون در سال ۲۰۱۰ افزایش یافت [۳]. از نظر غلظت اتمسفری، دی‌اکسیدکربن تنها در سال ۲۰۱۱ به حدود ۳۹۱ بخش بر میلیون (*ppm*) رسید که افزایشی ۴۰ درصدی نسبت به دوران پیشاصنعتی داشته است و برآورد [۳] نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۳۰ از ۴۵۰ بخش بر میلیون عبور می‌کند و در سال ۲۱۰۰ به رقمی بین ۷۵۰ تا ۱۳۰۰ بخش بر میلیون خواهد رسید. چنین افزایش غلظتی منجر به افزایش ۶ درجه‌ی سانتی‌گرادی دمای متوسط جهانی در بلندمدت می‌شود که به‌نوبه‌ی خود آینده‌ای به‌شدت تاریک را برای تداوم حیات روی زمین، سلامت جمعیت و مسائل زیست‌محیطی، ترسیم می‌کند. نظر به این‌که تولید و استفاده از سوخت‌های فسیلی همچنان بخشی مهم از ترکیب انرژی مورد نیاز زندگی بشر تا سال ۲۰۵۰ خواهد بود [۴]، پژوهش حاضر با استفاده از روش مطالعات کتابخانه‌ای می‌کوشد شیوه‌های مختلف به‌کارگیری کربن پس از فرایند جذب را بررسی کند.

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. به‌کارگیری کربن (Carbon utilization)؛
۲. مصالح ساختمانی (Construction material)؛
۳. سوخت (Fuel)؛
۴. مواد شیمیایی (Chemicals)؛
۵. پلاستیک (Plastic)؛
۶. کربنات کلسیم رسوبی (Precipitated calcium carbonate).

برای بررسی جدیدترین مطالعات در ادبیات پژوهش پیرامون فناوری‌های به‌کارگیری کربن بازه‌ی زمانی ۲۰۰۸ الی ۲۰۲۲ در نظر گرفته شد. بیش از ۳۰ منبع مرتبط با موضوع مقاله‌ی مروری حاضر شناسایی شدند که در مجموع ۱۸ عنوان اثر پژوهشی با کلیدواژه‌های مذکور متناسب بودند و در این پژوهش به‌کار رفته‌اند.

۳. یافته‌های پژوهش

فناوری جذب و به‌کارگیری کربن فرآیندی است که طی آن دی‌اکسید کربن جذب و سپس برای تولید محصولی جدید استفاده می‌شود. به‌منظور حفظ شرایط اقلیمی پایدار برای نسل‌های آینده، نیازی ضروری برای دفن دائمی حجم زیاد دی‌اکسیدکربن اجتناب‌ناپذیر است. طبق مطالعات هنسن و همکاران [۵] و پژوهش‌های بعدی [۶-۱۰]، ۳۵۰ بخش بر میلیون دی‌اکسیدکربن در اتمسفر بالاترین حد ایمنی است که اکنون بشر از آن پیشی گرفته است و هر ساله بر حجم این میزان دی‌اکسیدکربن می‌افزاید. نظر به مطالعات اخیر، گرچه صنعت جذب و ذخیره‌سازی کربن (*carbon capture and storage*) از فوریت ویژه برخوردار است، اما هنوز مشوق‌های مالی چنان که باید برای عملیاتی‌شدن فراگیر این پروژه‌ها وجود ندارد؛ به‌عبارت دیگر، شرکت‌ها نمی‌توانند از سرمایه‌گذاری در این فناوری‌ها دست‌کم در کوتاه‌مدت کسب سود کنند، و در نتیجه اغلب تمایلی برای ورود به این حوزه ندارند. یکی از راه‌حل‌های موجود برای رفع این خلأ، فناوری‌های به‌کارگیری کربن است.

اصطلاح به‌کارگیری کربن اشاره به شیوه‌هایی است که از طریق آن‌ها دی‌اکسیدکربنی که پیش‌تر از طریق زنجیره‌ی ارزش جذب و ذخیره‌سازی کربن از اتمسفر یا پسماند صنعتی خارج شده است برای تولید محصولات یا خدماتی که دارای ارزش اقتصادی هستند استفاده یا بازیابی می‌شود. برای به‌کارگیری کربن گزینه‌هایی متعدد وجود دارد که هر یک از پتانسیل خاص کاهش گازهای گلخانه‌ای برخوردار است؛ به‌عنوان نمونه، ارزش فعلی بازار بتن کم‌کربن (*low-carbon concrete*) بیشتر از سایر بخش‌ها است، همانطور که سطح کاهش گاز گلخانه‌ای آن نیز متفاوت است [۱۱-۱۳] با اینهمه، سایر بخش‌ها، از جمله سوختهای کم‌کربن، سوخت‌ها و محصولات مبتنی بر جلبک‌ها و سنگدانه‌های مخصوص مصالح ساختمانی چه‌بسا تا سال ۲۰۳۰ از بتن کم‌کربن پیشی بگیرند. این امر حاکی از آن است که با اتخاذ سیاست‌های مناسب، تمامی بخش‌های به‌کارگیری کربن دارای پتانسیلی قابل‌توجه برای رشد بازار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند [۱۴-۱۵].

۱.۳. مصالح ساختمانی

مصالح ساختمانی فرصتی بزرگ و کوتاه‌مدت برای به‌کارگیری کربن، عمدتاً به‌صورت سیمان و سنگدانه (شن و ماسه یا سنگ خردشده که در بتن استفاده می‌شوند) است. بازار جهانی فعلی برای بتن حدود ۳۰ میلیارد تن است و برآوردها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۴۰ میلیارد تن خواهد رسید. به‌طور مشابه، بازار جهانی سنگدانه ۲۵ تا ۳۵ میلیارد تن است، که تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۵۰ میلیارد تن می‌رسد [۱۱ و ۱۳]. اگر کربن جایگزین کربنات کلسیم شود، پتانسیل کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در بخش مواد ساختمانی می‌تواند ۱ میلیارد تا ۱۰ میلیارد تن تا سال ۲۰۳۰ باشد. این در حالی است که فناوری‌های تولید مصالح ساختمانی جدید از کربن نظیر فیبرهای کربن نیز در حال توسعه هستند [۱۱ و ۱۵].

یکی از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از دی‌اکسید کربن این است که مولکول آن بسیار کم‌انرژی است. کاربری‌های مختلف کربن غالباً نیازمند شکلی از انرژی (گرمایی، شیمیایی یا الکتریکی) است تا دی‌اکسیدکربن را به مولکولی متفاوت تبدیل کرده و از این طریق سوخت‌ها و مواد شیمیایی ایجاد کنند. در مقابل، کربنات‌ها انرژی به‌مراتب کمتری از دی‌اکسیدکربن دارند. وقتی برای تولید سیمان و سنگدانه (و در نهایت بتن) از دی‌اکسیدکربن استفاده شده و کربنات‌ها ایجاد می‌شوند، افزودن انرژی بیشتر برای رفع محدودیت‌های ترمودینامیکی ضروری نیست. و این مسئله‌ای حائز اهمیت است، چرا که انرژی مورد نیاز برای ایجاد حجم زیاد مصالح ساختمانی می‌تواند بسیار پرهزینه باشد و مزیت رقابتی به‌کارگیری کربن را کاهش دهد. روش دیگر استفاده از کربن در مصالح ساختمانی، به‌کارگیری مستقیم یا افزودن دی‌اکسیدکربن به بتن طی فرآیند عمل‌آوری آن است. این کار میزان سیمان مورد نیاز برای تولید بتنی با مقاومت معادل را کاهش می‌دهد. فناوری اخیر هنوز در مقیاس آزمایشی است و پیش‌بینی می‌شود که به‌زودی برای تجاری‌سازی آماده شود [۱۳-۱۱].

۲.۳. سوخت، مواد شیمیایی و مواد پلاستیکی

پتانسل فعلی برای انواع سوخت‌ها، مواد شیمیایی و پلاستیک‌ها فرصتی قابل‌ملاحظه برای به‌کارگیری کربن جذب‌شده است و از بازارهای بالقوه و متنوع برخوردار است، ویژگی مشترک هر سه شیوه‌ی به‌کارگیری کربن در سوخت، مواد شیمیایی و انواع پلاستیک‌ها فرآیندهای مشترک تولید هستند [۱۱]. ابعاد کلی بازار برای سه دسته محصول پیش‌گفته از ۱ میلیارد دلار تا بیش از ۲۵۰ میلیارد دلار در سال است و پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای این نوع به‌کارگیری کربن از ۱۰۰،۰۰۰ تا ۲.۱ میلیارد تن در سال است. به‌اضافه، سوخت‌ها از بازاری بسیار بزرگتر برخوردارند و پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در این شیوه‌ی به‌کارگیری نسبت به مواد شیمیایی و پلیمرها بسیار بیشتر است. در حال حاضر دی‌اکسیدکربن می‌تواند به‌طور بیولوژیکی به سوخت‌های کم‌کربن در مقیاس تجاری تبدیل شود؛ سوخت‌هایی با بیش از ۷۰ درصد کاهش گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با همتایان فسیلی خود [۱۳].

تبدیل دی‌اکسیدکربن به سوخت‌ها و مواد شیمیایی مستلزم افزودن هیدروژن به کربن برای تولید هیدروکربن (*hydrogen*) است. دو روش اصلی برای انجام این کار عبارتند از هیدروژنه‌کردن مستقیم دی‌اکسیدکربن و تولید غیرمستقیم به‌صورت تبدیل دی‌اکسیدکربن به مونوکسیدکربن و تولید محصولات خاص است. بیشترین مواد شیمیایی که از این طریق تولید می‌شوند متانول و اتانول هستند. مؤلفه‌های سازنده‌ی بیشتر پلیمرها شامل مواد شیمیایی پیش‌گفته‌اند. فرآیندهایی که مواد شیمیایی مورد استفاده در کالاها را از دی‌اکسیدکربن

تولید می‌کنند نسبت به پتروشیمی‌ها اساساً پلیمرهایی با چرخه‌ی عمر و انتشار کم‌تر دی‌اکسیدکربن می‌سازند. همچنین، پلیمرها می‌توانند از طریق ادخال (*inclusion*) مستقیم دی‌اکسیدکربن در ماتریس پلیمری مواد مختلف، نقشی مهم در به‌کارگیری کربن ایفا کنند [۱۶-۱۷].

تبدیل دی‌اکسیدکربن به کربنات کلسیم رسوبی (*Precipitated Calcium Carbonate*) یکی از راه‌حل‌های امیدوارکننده‌ی به‌کارگیری کربن برای ذخیره‌سازی دائمی دی‌اکسیدکربن است. کربنات کلسیم در صنعت کاغذ، پلاستیک، رنگ، چسب، لاستیک و غیره به‌کار می‌رود. صنعت کاغذ و سیمان هم اکنون حجمی قابل‌توجه از گازهای گلخانه‌ای را به جو منتشر می‌کنند. بنابراین، نصب تجهیزات جذب کربن و استفاده از کربن جذب‌شده برای تولید محصول مرتبط در همان صنعت منطقی به‌نظر می‌رسد، زیرا هزینه‌های حمل‌ونقل کربن برای تولید محصول را حذف می‌کند [۱۱ و ۱۸]. به‌کارگیری دی‌اکسید کربن پتانسیل فعالیت در مقیاس بزرگ و با هزینه‌ی کم را دارد، به این معنا که چشم‌انداز رونق کسب‌وکار در آینده را حفظ می‌کند. مقادیر ذکرشده در این مرور ادبیات پژوهش تا سال ۲۰۳۰ ارزیابی شده‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

برخی از روش‌های به‌کارگیری کربن در دهه‌ی اخیر کشف شده‌اند و توفیق تجاری آن‌ها هنوز نیازمند مطالعات بیشتر است. از آن جا که هزینه‌های جذب کربن بی‌تردید زیاد است، فناوری‌های به‌کارگیری کربن گزینه‌ای مناسب برای تأمین مالی و حتی سرمایه‌گذاری کوتاه‌مدت و بلندمدت محسوب می‌شوند. یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که به‌کارگیری کربن جذب‌شده در بخش‌های مختلف از جمله تولید مصالح ساختمانی (سیمان، سنگدانه و بتن)، سوخت، مواد شیمیایی و مواد پلاستیکی هم مقرون‌به‌صرفه است و هم موجب کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. سناریوی ایده‌آل زمانی خواهد بود که هزینه‌ی ایجادشده در تأسیسات جذب کربن را بتوان با استفاده از درآمد تولیدشده با فروش یا به‌کارگیری و فروش محصولات فرعی جبران کرد. به‌کارگیری کربن یکی از راه‌حل‌های مناسب برای کاهش گازهای گلخانه‌ای است که تاکنون ارائه شده است و چشم‌اندازی نویدبخش را در حوزه‌ی فناوری‌های کاهش دی‌اکسیدکربن و توفیق در اقتصاد کم‌کربن نشان می‌دهد.

منابع

[1] N. Watts, W. N. Adger, P. Agnolucci, J. Blackstock, P. Byass, W. Cai, S. Chaytor, T. Colbourn, M. Collins, A. Cooper, and P. M. Cox. “Health and climate change: policy responses to protect public health.” *The lancet*, vol. 386, pp.1861-1914, 2015.

[2] A. Ghumman, A. Alodah, H. Haider and M. Shafiquzzaman. "Evaluating the impact of climate change on stream flow: integrating GCM, hydraulic modelling and functional data analysis." *Arabian Journal of Geosciences*, vol 13, pp. 1-15, 2020.

[3] S. Budinis, S. Krevor, N. Mac Dowell, N Brandon and A. Hawkes. “An assessment of CCS costs, barriers and potential.” *Energy strategy reviews*, vol. 22, pp.61-81, 2018.

[4] P. Fragkos and N. Kouvaritakis. "Model-based analysis of Intended Nationally Determined Contributions and 2 C pathways for major economies." *Energy*, vol 160, pp. 965-978, 2018.

[5] J. Hansen, M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner, V. Masson-Delmotte, M. Pagani, M. Raymo and D. L. Royer. "460 Zachos, JC: Target Atmospheric CO: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, vol. 2, pp. 217–231, 2008.

[6] S. Vanderheiden. "Globalizing responsibility for climate change." *Ethics & international affairs*, vol. 25, pp. 65-84, 2011.

[7] A. A. Abd, S. Z. Naji, A. S. Hashim and M. R. Othman. "Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: a review." *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, 104142, 2020.

[8] R. Connolly, M. Connolly, R. M. Carter and W. Soon. "How much human-caused global warming should we expect with business-as-usual (BAU) climate policies? a semi-empirical assessment." *Energies*, vol. 13, 1365, 2020.

[9] M. Pardakhti, T. Jafari, Z. Tobin, B. Dutta, E. Moharreri, N. S. Shemshaki, S. Suib and R. Srivastava. "Trends in solid adsorbent materials development for CO2 capture." *ACS applied materials & interfaces*, vol. 11, pp. 34533-34559, 2019.

[10] L. C. Ruud and E. Thorstensen. "“We Must All Be Ready for Major Changes”: Visiting Climate for Change at the Norwegian Petroleum Museum." *Journal of Educational Media, Memory, and Society*, vol. 14, pp. 55-75, 2022.

[11] A. Al-Mamoori, A. Krishnamurthy, A. A. Rownaghi and F. Rezaei. "Carbon capture and utilization update." *Energy Technology*, vol. 5, pp. 834-849, 2017.

[12] K. H. Ryu, B. Kim and S. Heo. "Sustainability analysis framework based on global market dynamics: A carbon capture and utilization industry case." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 166, 112639, 2022.

[13] G. Chen, T. Wang, G. Zhang, G. Liu and W. Jin. "Membrane materials targeting carbon capture and utilization." *Advanced Membranes*, vol. 2, 100025, 2022.

[14] H. Mikulčić, I. R. Skov, D. F. Dominković, S. R. W. Alwi, Z. A. Manan, R. Tan, N. Duić, S. N. H. Mohamad and X. Wang. "Flexible Carbon Capture and Utilization technologies in future energy systems and the utilization pathways of captured CO2." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109338, 2019.

[15] D. Ravikumar, G. Keoleian and S. Miller. "The environmental opportunity cost of using renewable energy for carbon capture and utilization for methanol production." *Applied Energy*, vol. 279, 115770, 2020.

[16] Y. Yoo, D. Kang, S. Park and J. Park. "Carbon utilization based on post-treatment of desalinated reject brine and effect of structural properties of amines for CaCO3 polymorphs control." *Desalination*, vol. 479, 114325, 2022

[17] A. Al-Mamoori, S. Lawson, A. A. Rownaghi and F. Rezaei. "Oxidative dehydrogenation of ethane to ethylene in an integrated CO2 capture-utilization process." *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 278, 119329, 2020.

[18] J. Godin, W. Liu, S. Ren and C. C. Xu. "Advances in recovery and utilization of carbon dioxide: A brief review." *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, 105644, 2021.