

# دی‌اکسید کربن، چالش‌ها، منابع و کاربردهای صنعتی: مروری اجمالی بر روش‌های انتقال، جذب و کاهش انتشار

حمید مقدم دیمه\*

استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: [h.moghadam@eng.usb.ac.ir](mailto:h.moghadam@eng.usb.ac.ir)

مقاله‌ی مروری

صفحه ۷۳ - ۸۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

## چکیده

دی‌اکسید کربن یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که به‌طور طبیعی و همچنین در نتیجه فعالیت‌های انسانی در جو زمین منتشر می‌شود. این گاز به‌طور طبیعی از طریق فرآیندهایی مانند تنفس موجودات زنده، فوران‌های آتشفشانی و تجزیه مواد آلی وارد جو می‌شود؛ اما در دو قرن اخیر، فعالیت‌های صنعتی انسان باعث افزایش چشمگیر غلظت این گاز در جو شده است. گرمایش جهانی را شاید بتوان مهم‌ترین مشکل ناشی از افزایش دی‌اکسید کربن در جو به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای دانست. در بررسی حاضر سعی شده است ابتدا به منابع انتشار دی‌اکسید کربن اشاره شود. سپس روش‌های جذب طبیعی این گاز به‌اختصار مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که در چند دهه اخیر تعادلی بین نرخ انتشار و جذب دی‌اکسید کربن در جو وجود نداشته و انباشت این گاز در جو مشکلات متعددی را به همراه داشته است، روش‌های کاهش انتشار و جذب این گاز مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه میان روش‌های مختلف جذب گاز دی‌اکسید کربن نشان می‌دهد، در حال حاضر جذب شیمیایی با آمین‌ها، با توجه به بلوغ فناوری و سطح تجاری‌سازی از سایر روش‌ها مقرون به‌صرفه‌تر می‌باشد. در ادامه مقاله، روش‌های انتقال دی‌اکسید کربن و درنهایت روش‌های استفاده از دی‌اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: جذب دی‌اکسید کربن، انتقال دی‌اکسید کربن، گاز گلخانه‌ای، ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن

## ۱. منابع انتشار دی‌اکسید کربن

انتشار دی‌اکسید کربن در جو از منابع مختلفی صورت می‌گیرد که هر کدام سهم مشخصی در کل انتشار دارند [۱]. بخشی از این انتشار به‌صورت طبیعی (غیرانسانی) در طول میلیون‌ها سال در جو زمین انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تنفس موجودات زنده، فعالیت‌های آتشفشانی، تجزیه مواد آلی، آتش‌سوزی‌های طبیعی، تبخیر از اقیانوس‌ها و برخی فرآیندهای زمین‌شناسی اشاره کرد. سالانه بالغ‌بر ۲۷۰ میلیارد تن دی‌اکسید کربن به‌صورت طبیعی (غیرانسانی) به‌واسطه تنفس جانوران و گیاهان (حدود ۱۲۰

میلیارد تن)، تجزیه مواد آلی در خاک (بالغ‌بر ۶۰ میلیارد تن)، انتشار از اقیانوس‌ها (حدود ۹۰ میلیارد تن) و فوران‌های آتشفشانی (حدود ۰/۳ میلیارد تن) وارد جو می‌شود [۲]. این میزان انتشار که به انتشار طبیعی شناخته می‌شود، حدود ۹۶ تا ۹۸ درصد از کل انتشار جهانی دی‌اکسید کربن به جو را شامل می‌شود. نکته مهم این است که در شرایط طبیعی، این نوع انتشار با مکانیسم‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن مانند فتوسنتز گیاهان و حل شدن در اقیانوس‌ها که در طبیعت وجود دارد، متعادل می‌شود. این در حالی است که تشدید





نمونه قطع درختان جنگل‌های آمازون در سال ۲۰۲۲ منجر به انتشار ۱/۵ میلیارد تن دی‌اکسید کربن شده است. جنگل‌زدایی سالانه باعث انتشار حدود ۵ میلیارد تن دی‌اکسید کربن می‌شود [۴].

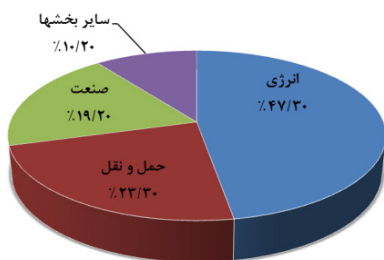
### ۱-۲. سوخت‌های فسیلی

سوخت‌های فسیلی عامل حدود ۸۸ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از فعالیت‌های انسانی است و بزرگ‌ترین محرک تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود. کل انتشار سالانه دی‌اکسید کربن با عوامل انسانی در سال ۲۰۲۳ حدود ۳۷ میلیارد تن بوده است که از این میان سهم سوخت‌های فسیلی بالغ بر ۳۲/۶ میلیارد تن می‌باشد. از این مقدار حدود ۴۳ درصد (۱۴ میلیارد تن) مربوط به نفت، ۳۵ درصد مربوط به زغال سنگ (۱۱/۴ میلیارد تن) و ۲۲ درصد مربوط به گاز طبیعی (۷/۲ میلیارد تن) است [۵]. نیروگاه‌های تولید برق با سوخت فسیلی از بزرگ‌ترین منابع انتشار هستند. سیمان، فولاد و پتروشیمی از دیگر منابع مهم انتشار CO<sub>2</sub> هستند. علاوه بر این موارد، وسایل نقلیه موتوری با سوخت فسیلی سهم قابل توجهی در انتشار CO<sub>2</sub> دارند [۶]. در نهایت مصرف انرژی در منازل، به‌ویژه برای گرمایش و پخت‌وپز، منجر به انتشار CO<sub>2</sub> می‌شود. در (شکل ۱) سهم انتشار هر یک از بخش‌های ذکر شده در بالا ارائه شده است.

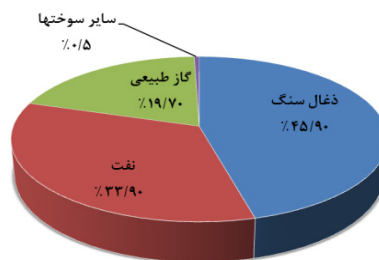
فعالیت‌های صنعتی در چند دهه اخیر و افزایش نرخ انتشار گاز دی‌اکسید کربن در جو، این تعادل طبیعی را برهم زده است [۳]. انتشار دی‌اکسید کربن با منشأ انسانی (انسان‌ساز) که حدود ۴۲ میلیارد تن است، تنها ۲ تا ۴ درصد از انتشار سالانه به جو را شامل می‌شود؛ اما از آنجا که یک تعادل مناسب بین انتشار طبیعی و جذب طبیعی دی‌اکسید کربن (که بعداً به آن اشاره خواهد شد) وجود دارد، همین مقدار اندک انتشار انسان‌ساز، عامل اصلی افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو و پیامدهای آن می‌باشد؛ بنابراین هدف اصلی این قسمت شرح منابع انسانی انتشار گاز دی‌اکسید کربن است که در ادامه به‌صورت موردی به آن‌ها اشاره شده است.

### ۱-۱. جنگل‌زدایی

جنگل‌زدایی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی تغییرات اقلیمی، سهمی در حدود ۱۲ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از فعالیت‌های انسانی را به خود اختصاص داده است. جنگل‌ها به‌عنوان ریه‌های زمین حدود ۶۰۰ میلیارد تن کربن را در زیست‌توده خود ذخیره کرده‌اند. قطع درختان این کربن را به‌صورت دی‌اکسید کربن آزاد می‌کند (مانع جذب می‌شود). تغییر کاربری اراضی و تبدیل جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی یا مناطق مسکونی ظرفیت جذب گاز دی‌اکسید کربن را کاهش می‌دهد. برای



(ب)



(الف)

شکل ۱: سهم انتشار گاز دی‌اکسید کربن ناشی از سوخت‌های فسیلی مختلف (الف) در بخش‌های مختلف (ب) [۷]

جذب طبیعی نقش حیاتی در تنظیم اقلیم جهانی ایفا می‌کنند. اقیانوس‌ها سالانه حدود ۲۵-۳۰ درصد از دی‌اکسید کربن تولیدشده توسط انسان را جذب می‌کنند. این مقدار معادل جذب ۹۰ میلیارد تن دی‌اکسید کربن در سال است (البته اقیانوس‌ها در همان زمان حدود ۸۸ میلیارد تن هم آزاد می‌کنند که پیش از صنعتی شدن، این دو مقدار تقریباً برابر بودند). دی‌اکسید کربن جذب شده توسط اقیانوس‌ها وارد یک چرخه پیچیده می‌شود که شامل واکنش‌های

### ۲. جذب طبیعی دی‌اکسید کربن

طبیعت از طریق چند مکانیسم کلیدی، سالانه حدود ۵۵ درصد از دی‌اکسید کربن منتشر شده توسط انسان را جذب می‌کند.

### ۱-۲. اقیانوس‌ها

یکی از بزرگ‌ترین روش‌های جذب طبیعی دی‌اکسید کربن در کره زمین جذب در اقیانوس‌ها است و این روش

شیمیایی و تعامل با زیست‌بوم‌های دریایی است. این فرایندها تأثیرات مثبت و منفی متعددی بر محیط‌زیست دریایی دارند [۸]. به‌طور خلاصه در این روش، دی‌اکسید کربن موجود در جو با سطح آب اقیانوس تماس پیدا می‌کند و در آن حل می‌شود. پس از حل شدن، دی‌اکسید کربن با آب واکنش داده و به اسید کربنیک تبدیل می‌شود که سپس به یون‌های بیکربنات و کربنات تجزیه می‌گردد [۹]. این واکنش‌ها باعث می‌شود اقیانوس‌ها بتوانند مقادیر بیشتری دی‌اکسید کربن جذب کنند. این فرایند بخشی از چرخه طبیعی کربن در اقیانوس‌هاست، اما باعث افزایش اسیدیته آب (کاهش pH) می‌شود. گیاهان و جلبک‌های دریایی، طی فرایند فتوسنتز، CO<sub>2</sub> را جذب و به شکل زیست‌توده ذخیره کرده و حدود ۴۰ درصد از جذب اقیانوسی را انجام می‌دهند. برخی از این موجودات پس از مرگ به اعماق اقیانوس فرو می‌روند و کربن را برای مدت طولانی در رسوبات اقیانوسی ذخیره می‌کنند. CO<sub>2</sub> جذب‌شده به‌طور غیرمستقیم در تشکیل کربنات کلسیم (CaCO<sub>3</sub>) نقش دارد. موجودات دریایی مانند مرجان‌ها و صدف‌ها از این ماده برای ساخت پوسته‌های خود استفاده می‌کنند [۱۰]. با مرگ این موجودات، پوسته‌ها به بستر اقیانوس فرو رفته و بخشی از چرخه طولانی مدت کربن می‌شوند. البته جذب بیش از حد نیز اثرات جانبی مخربی دارد. افزایش غلظت CO<sub>2</sub> باعث کاهش pH آب اقیانوس‌ها می‌شود که به‌عنوان «اسیدی شدن اقیانوس‌ها» شناخته می‌شود (از سال ۱۷۵۰ میلادی تاکنون، اسیدیته اقیانوس‌ها حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است). این پدیده می‌تواند به زیست‌بوم‌های حساس مانند صخره‌های مرجانی آسیب وارد کند و بر رشد و بقای موجودات دریایی اثر منفی بگذارد. با افزایش غلظت CO<sub>2</sub> و اسیدی شدن، ظرفیت اقیانوس‌ها برای جذب این گاز کاهش می‌یابد. این مسئله می‌تواند به افزایش دی‌اکسید کربن باقی‌مانده در جو و تشدید گرمایش جهانی منجر شود. با گرم شدن زمین، توانایی اقیانوس‌ها برای جذب دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. گرمایش جهانی می‌تواند جذب دی‌اکسید کربن توسط اقیانوس‌ها را تا ۴۰ درصد کاهش دهد.

## ۲-۲. جنگل‌ها و پوشش گیاهی

همان‌طور که بیان شد جنگل‌ها و پوشش گیاهی زمین به‌عنوان ریه‌های کره زمین شناخته شده و نقش حیاتی در جذب دی‌اکسید کربن ایفا می‌کنند. گیاهان در فرآیند فتوسنتز، دی‌اکسید کربن جو را جذب و آن را به اکسیژن

و مواد آلی (مانند گلوکز) تبدیل می‌کنند. بخشی از کربن جذب‌شده در چوب، ریشه و برگ‌ها ذخیره می‌شود. گیاهان در این فرآیند، اکسیژن آزاد می‌کنند که برای حیات روی زمین ضروری است. طبق آخرین تحقیقات جنگل‌ها و پوشش گیاهی سالانه حدود ۲۰-۲۵ درصد از دی‌اکسید کربن منتشرشده توسط انسان را جذب می‌کنند. این مقدار معادل ۱۱-۱۲ میلیارد تن دی‌اکسید کربن در سال است [۵].

## ۲-۳. خاک‌ها

خاک‌ها پس از اقیانوس‌ها و جنگل‌ها، سومین محل ذخیره بزرگ کربن در کره زمین هستند و نقش مهمی در تنظیم غلظت دی‌اکسید کربن جو ایفا می‌کنند. خاک از طریق روش‌های زیر کربن را جذب و ذخیره می‌کند:

- تجزیه مواد آلی: برگ‌ها، ریشه‌ها و بقایای گیاهی توسط میکروب‌های خاک تجزیه شده و به ماده آلی پایدار (هیوموس) تبدیل می‌شوند.
- ریشه گیاهان: گیاهان طی فتوسنتز، کربن را به‌صورت ترکیبات آلی به ریشه‌ها می‌فرستند و بخشی از آن در خاک ذخیره می‌شود.
- تثبیت کربن معدنی: برخی خاک‌ها (مانند خاک‌های آهکی) از طریق واکنش‌های شیمیایی، کربن را به شکل کربنات کلسیم ذخیره می‌کنند [۱۱].

خاک‌های جهان سالانه حدود ۵-۱۰ درصد از دی‌اکسید کربن منتشرشده توسط انسان را جذب می‌کنند. این مقدار معادل ۲-۴ میلیارد تن کربن در سال است. کشاورزی پایدار کلید افزایش این ظرفیت است.

## ۲-۴. سایر مکانیسم‌ها

طبیعت به روش‌های دیگری مانند جذب در تالاب‌ها و علفزارها، هوازدگی سنگ‌ها و ... (که البته سهم بسیار کمتری نسبت به اقیانوس‌ها، جنگل‌ها و خاک‌ها دارد) نیز دی‌اکسید کربن را جذب می‌کند.

پیش از صنعتی شدن و تشدید فعالیت‌های انسانی که سبب انتشار بی‌رویه دی‌اکسید کربن به جو بود، یک تعادل طبیعی میان انتشار و جذب دی‌اکسید کربن وجود داشته است؛ اما امروزه تنها در حدود ۵۵ درصد از دی‌اکسید کربن منتشر شده توسط انسان به‌وسیله طبیعت جذب می‌شود و مابقی در جو تجمع می‌یابد.





### ۳. روش‌های کاهش انتشار و جذب دی‌اکسید کربن

از آنجا که در چند دهه اخیر و به واسطه تشدید فعالیت‌های انسانی، تعادلی بین نرخ انتشار و جذب دی‌اکسید کربن در جو وجود نداشته و همان‌طور که بیان شد انباشت این گاز در جو مشکلات متعددی را به همراه داشته، به بررسی روش‌های کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن و به‌طور خاص به شرح روش‌های جذب دی‌اکسید کربن پرداخته شده است. از آنجا که انسان تسلطی بر انتشار طبیعی دی‌اکسید کربن ندارد، بنابراین به‌منظور کاهش انتشار باید بر روش‌های کاهش انتشار با منشأ فعالیت‌های انسانی و جذب بخشی از دی‌اکسید کربن تولید شده در صنایع، پیش از انتشار تمرکز داشت. البته جذب مستقیم از جو نیز راهکار دیگری است که به آن نیز پرداخته شده است.

#### ۱-۳. روش‌های کاهش انتشار دی‌اکسید کربن

##### ۱-۱-۳. بهبود بهره‌وری انرژی

از آنجا که بخش عمده (حدود ۸۸ درصد) از انتشار دی‌اکسید کربن با منابع انسانی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف است، بهبود بهره‌وری انرژی در این بخش‌ها به‌طور قطع در کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن مؤثر خواهد بود. اقداماتی از قبیل بهینه‌سازی سیستم‌های احتراق، استفاده از توربین‌های کارآمدتر و کاهش تلفات انرژی، میزان مصرف سوخت و در نتیجه انتشار  $CO_2$  را کاهش خواهد داد [۱۲]. همچنین استفاده از فناوری‌هایی مانند شبکه‌های گرمایی و سیستم‌های بازیابی انرژی می‌تواند در کاهش انتشار  $CO_2$  مؤثر باشد.

##### ۲-۱-۳. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کاهش انتشار  $CO_2$  در صنایع انرژی، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد، خورشید و انرژی‌های هسته‌ای است. این منابع انرژی، بدون تولید دی‌اکسید کربن، می‌توانند جایگزین نیروگاه‌های سوخت فسیلی شوند و کمک به کاهش شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای کنند [۱۳].

##### ۳-۱-۳. استفاده از سوخت‌های کم کربن

در صنایع تولیدی، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با

سوخت‌های کم کربن یا زیستی، می‌تواند به کاهش میزان  $CO_2$  منتشر شده کمک کند. به‌عنوان مثال استفاده از گاز طبیعی به‌جای زغال‌سنگ و نفت در نیروگاه‌ها می‌تواند انتشار  $CO_2$  را تا حدود ۵۰ درصد کاهش دهد [۱۴]. بیوگاز و سوخت‌های زیستی نیز به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی مطرح هستند که می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهند [۱۵، ۱۶].

#### ۳-۱-۴. بازیابی فرآیندهای صنعتی

در صنایع تولیدی مانند سیمان، فولاد و شیمیایی، برخی روش‌ها برای کاهش انتشار  $CO_2$  به‌ویژه در مراحل تولید معرفی شده‌اند. برای مثال در صنعت سیمان، استفاده از کوره‌های کارآمدتر و جایگزینی بخشی از سیمان با مواد معدنی می‌تواند به کاهش انتشار کمک کند. در صنعت فولاد، استفاده از الکتروسیته سبز و روش‌های تولید فولاد بدون کک (که در آن از هیدروژن به‌جای کک استفاده می‌شود) می‌تواند به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن کمک کند [۱۷، ۱۸].

##### ۲-۳. جذب دی‌اکسید کربن

روش‌های مختلفی برای جذب  $CO_2$  از منابع انتشار وجود دارد که به سه دسته اصلی جذب پیش از احتراق، جذب پس از احتراق و احتراق اکسی سوخت تقسیم می‌شوند. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند و انتخاب مناسب‌ترین روش به شرایط فنی و اقتصادی بستگی دارد [۱۹].

##### ۱-۲-۳. جذب پیش از احتراق

در این روش، سوخت‌های فسیلی قبل از احتراق به گاز سنتز (مخلوطی از هیدروژن و  $CO_2$ ) تبدیل می‌شوند. سپس  $CO_2$  از این مخلوط با روش‌هایی مثل جذب با آمین یا جداسازی غشایی جذب می‌شود. مزیت اصلی این روش راندمان بالای جذب (بیش از ۹۵ درصد) است. از جمله دیگر مزیت‌های این روش تولید هیدروژن با خلوص بالا (به‌عنوان سوخت) برای تولید انرژی و کاهش حجم گازهای احتراق است. این روش در مقایسه با روش جذب پس از احتراق، حدود ۱۵-۱۰ درصد انرژی کمتری نیاز دارد. با این وجود، هزینه‌های بالای اولیه، پیچیدگی فرآیند و محدودیت سوخت (مناسب برای زغال‌سنگ و گاز طبیعی) از جمله محدودیت‌های این روش است [۲۰].

### ۳-۲-۲. احتراق با اکسیژن خالص<sup>۱</sup>

متیل دی اتانول آمین از جمله جاذب‌های شیمیایی مورد استفاده در جذب شیمیایی هستند. در جذب با آمین‌ها (MEA، DEA، یا MDEA) یک واکنش شیمیایی برگشت پذیر بین دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ ) و محلول آمین رخ می‌دهد. این فرآیند برخلاف جذب فیزیکی که تنها مبتنی بر حل شدن گاز در حلال است، شامل تشکیل پیوندهای شیمیایی می‌شود. پس از جذب، دی‌اکسید کربن می‌تواند با گرم کردن مایع یا کاهش فشار، از آن جدا شده و آمین بازیافتی به سیستم بازگردانده می‌شود. این روش به دلیل کارایی بالا و امکان استفاده در مقیاس‌های بزرگ، به طور گسترده‌ای در نیروگاه‌ها و کارخانه‌های بزرگ به کار می‌رود. فناوری بالغ و تجاری شده و قابلیت نصب روی نیروگاه‌های موجود از جمله مهم‌ترین مزایای این روش است. این روش برای گازهای دودکش با غلظت پایین  $CO_2$  (مثلاً ۱۲~۱۴ درصد در نیروگاه‌ها) ایده‌آل است. در مقابل مصرف انرژی بالا (حدود ۳/۵-۴/۵ GJ/ton  $CO_2$ ) و تخریب حلال از جمله معایب این روش است [۲۵، ۲۶].

### ۳-۲-۳. جذب فیزیکی با حلال

جذب فیزیکی یکی از روش‌های جداسازی  $CO_2$  از گازهای دودکش است که بر اساس حل شدن انتخابی دی‌اکسید کربن در حلال‌های خاص عمل می‌کند. برخلاف جذب شیمیایی که با واکنش شیمیایی همراه است، در این روش مولکول‌های  $CO_2$  به صورت فیزیکی در حلال (مانند آب، متانول یا محلول‌های آلی مانند Selexol) حل می‌شوند. این فرآیند معمولاً در دمای پایین و فشار بالا انجام می‌شود، زیرا حلالیت  $CO_2$  با افزایش فشار بهبود می‌یابد. پس از اشباع حلال، با کاهش فشار یا افزایش دما،  $CO_2$  خالص آزاد می‌شود. مزیت اصلی جذب فیزیکی مصرف انرژی کمتر نسبت به روش‌های شیمیایی است، اما برای گازهای با غلظت بالای  $CO_2$  (بالای ۲۰ درصد) مناسب‌تر عمل می‌کند. از معایب آن می‌توان به ظرفیت جذب محدود و نیاز به تجهیزات پیچیده برای بازیافت حلال اشاره کرد. این روش در صنایعی مانند پالایش گاز طبیعی و تولید هیدروژن کاربرد دارد [۲۷، ۲۸]. در (جدول ۱) دو روش جذب شیمیایی و جذب فیزیکی باهم مقایسه شده‌اند.

احتراق با اکسیژن خالص یکی از روش‌های نوین برای کاهش انتشار مستقیم دی‌اکسید کربن از فرآیندهای احتراقی است که در آن به جای استفاده از هوای معمولی (که حدود ۷۸ درصد آن نیتروژن است)، از اکسیژن خالص برای سوزاندن سوخت استفاده می‌شود. این کار باعث می‌شود گازهای خروجی تقریباً فقط شامل  $CO_2$  و بخار آب باشند که فرآیند جداسازی و جذب  $CO_2$  را بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌کند. پس از تراکم و چگالش بخار آب،  $CO_2$  با خلوص بالا باقی می‌ماند که آماده ذخیره‌سازی یا استفاده مجدد است. از مزایای اصلی این روش می‌توان به کاهش حجم گاز دودکش، افزایش بازده جذب  $CO_2$  و کاهش نیاز به تجهیزات جداسازی پیچیده اشاره کرد. با این حال، چالش اصلی این فناوری، هزینه بالای تولید و تأمین اکسیژن خالص از طریق فرایندهایی مانند تقطیر برودتی است. به همین دلیل، این روش بیشتر در پروژه‌های پایلوت یا در صنایعی با مصرف بالا و متمرکز انرژی مورد آزمایش و توسعه قرار گرفته است [۲۱].

### ۳-۲-۳. جذب پس از احتراق<sup>۲</sup>

در این روش پس از احتراق،  $CO_2$  از گازهای خروجی، جدا می‌شود. این روش شامل تکنیک‌های مختلف شیمیایی، فیزیکی و زیستی است. جذب پس از احتراق متداول‌ترین روش جداسازی  $CO_2$  از گازهای دودکش است که می‌تواند تا ۹۰ درصد از دی‌اکسید کربن تولیدی را جذب کند. کاربرد اصلی این روش در نیروگاه‌های گاز طبیعی و زغال‌سنگ، پالایشگاه‌ها، صنایع سیمان و غیره است [۲۲-۲۴]. روش‌های مختلف جذب پس از احتراق در ادامه آورده شده است.

### ۳-۲-۳-۱. جذب شیمیایی با آمین

یکی از روش‌های رایج برای جذب  $CO_2$  از دودکش‌ها، استفاده از محلول‌های آمینی است. این فرآیند شامل عبور گازهای خروجی از دودکش از میان یک مایع حاوی آمین است که به طور شیمیایی دی‌اکسید کربن را جذب می‌کند. مونو اتانول آمین، دی اتانول آمین و

1. Oxy-fuel combustion
2. Post-combustion capture



جدول ۱: مقایسه میان جذب شیمیایی و جذب فیزیکی در فرآیند جذب دی‌اکسید کربن [۲۴-۲۷]

| ویژگی                              | جذب شیمیایی (آمین) [۲۴، ۲۵] | جذب فیزیکی (مثل Selexol) [۲۶، ۲۷] |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| مکانیسم                            | واکنش شیمیایی               | حل شدن فیزیکی گاز در حلال         |
| حساسیت به فشار                     | کم                          | زیاد (نیاز به فشار بالا)          |
| حساسیت به دما                      | زیاد (واکنش گرمادوست)       | کم                                |
| بازده برای CO <sub>2</sub> کم‌غلظت | بالا (~۹۰ درصد)             | پایین (نیاز به غلظت < ۲۰ درصد)    |
| مصرف انرژی                         | بالا (برای احیا مجدد)       | پایین‌تر                          |

عمل می‌کند. در این روش، گاز دودکش تحت فشار از سطح غشا عبور داده می‌شود و مولکول‌های CO<sub>2</sub> به دلیل اندازه کوچک‌تر و قطبیت بالاتر، سریع‌تر از مولکول‌های دیگر مانند نیتروژن از غشا نفوذ می‌کنند. غشاهای مورد استفاده معمولاً از جنس پلیمرهایی مانند پلی‌ایمید یا مواد سرامیکی مانند زئولیت‌ها ساخته می‌شوند [۳۳، ۳۴]. مزیت اصلی این روش سادگی طراحی، عدم نیاز به مواد شیمیایی و مصرف انرژی نسبتاً پایین است، اما چالش‌هایی مانند نیاز به فشارهای بالا (معمولاً بیش از ۲۰ بار) و حساسیت به ناخالصی‌های گاز دودکش (مانند SOx و NOx) دارد. این فناوری برای جریان‌های گازی با غلظت متوسط تا بالا (بیش از ۲۰ درصد حجمی CO<sub>2</sub>) مناسب‌تر است و در صنایعی مانند پالایش گاز طبیعی و تولید هیدروژن کاربرد دارد.

### ۳-۲-۳-۵. جذب کربن کریوژنیک<sup>۲</sup>

این روش با استفاده از سرمایش شدید گازهای دودکش تا دمای بسیار پایین (حدود ۱۲۰- تا ۱۶۰- درجه سانتی‌گراد) کار می‌کند. در این دماها، دی‌اکسید کربن به صورت جامد (یخ خشک) یا مایع جدا می‌شود، در حالی که سایر گازها مانند نیتروژن به صورت گاز باقی می‌مانند. مزیت اصلی این روش خلوص بالای CO<sub>2</sub> تولیدی (بیش از ۹۹ درصد) و امکان ذخیره‌سازی یا استفاده مستقیم است. همچنین، برخلاف روش‌های شیمیایی، نیاز به مواد مصرفی مانند حلال‌ها ندارد. با این حال، معایب آن شامل مصرف انرژی بسیار بالا برای سرمایش، حساسیت به ناخالصی‌های گاز دودکش (مانند رطوبت که باعث یخ‌زدگی می‌شود) و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه زیاد برای تجهیزات سرمایشی

### ۳-۲-۳-۳. جذب با جاذب‌های جامد

این روش مبتنی بر استفاده از مواد جامد متخلخل مانند زئولیت‌ها [۲۹]، کربن فعال [۳۰]، اکسیدهای فلزی (مثل CaO) یا چارچوب‌های فلزی-آلی<sup>۱</sup> [۳۱، ۳۲] است که CO<sub>2</sub> را از گازهای دودکش به صورت فیزیکی یا شیمیایی جذب می‌کنند. در جذب فیزیکی، مولکول‌های CO<sub>2</sub> در حفره‌های مواد جاذب به دام می‌افتند، در حالی که در جذب شیمیایی (مثل واکنش CaO با CO<sub>2</sub> برای تشکیل CaCO<sub>3</sub>)، پیوندهای شیمیایی تشکیل می‌شوند. مزیت اصلی این روش مصرف انرژی کمتر برای بازیابی جاذب (معمولاً با تغییر دما یا فشار) و طول عمر بالاتر نسبت به حلال‌های مایع است. با این حال، چالش‌هایی مانند ظرفیت جذب محدود، تخریب تدریجی جاذب پس از سیکل‌های مکرر و هزینه بالای برخی مواد همچنان وجود دارد. این فناوری به‌ویژه برای صنایعی با جریان‌های گازی کم‌فشار و کم‌غلظت CO<sub>2</sub> مناسب است و در حال توسعه به‌عنوان جایگزینی کارآمدتر برای روش‌های مبتنی بر آمین می‌باشد. این فناوری در مقیاس‌های کوچک‌تر و در جاهایی که CO<sub>2</sub> در فشار بالا موجود است، کاربرد دارد. برخی از جاذب‌های ویژه مانند چارچوب‌های فلزی-آلی به دلیل ساختار قابل تنظیم، برای محدوده وسیعی از غلظت‌ها (۵-۵۰ درصد) قابل طراحی هستند.

### ۳-۲-۳-۴. جداسازی غشایی

جداسازی غشایی<sup>۲</sup> یکی از روش‌های نوین جذب دی‌اکسید کربن از گازهای دودکش است که بر اساس اختلاف در نفوذپذیری گازها از طریق یک غشای نیمه‌تراوا

1. Metal Organic Framework - MOF
2. Membrane separation
3. Cryogenic carbon capture



است. این روش معمولاً در صنایعی با جریان‌های گازی غلیظ از CO<sub>2</sub> (مثل واحدهای تولید آمونیاک یا پالایش گاز طبیعی) استفاده می‌شود. در مقایسه با روش‌های دیگر، کریوژنیک برای کاربردهای خاص که نیاز به خلوص بسیار بالا دارند مناسب است، اما به دلیل هزینه و انرژی بالا، برای نیروگاه‌های معمولی مقرون به صرفه نیست [۳۶، ۳۵]. (جدول ۲) مقایسه میان روش‌های مختلف جذب دی‌اکسید کربن پس از احتراق را به صورت خلاصه ارائه کرده است.

جدول ۲: مقایسه میان روش‌های مختلف جذب کربن پس از احتراق [۲۴-۳۳]

| ویژگی                      | جذب شیمیایی (آمین) [۲۴، ۲۵]                | جذب شیمیایی (آمین) [۲۴، ۲۵] | جذب شیمیایی (آمین) [۲۴، ۲۵] | جذب فیزیکی (مثل Selexol) [۲۶، ۲۷] |
|----------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| بازده جذب                  | ۸۵-۹۰ درصد                                 | ۷۰-۸۵ درصد                  | ۵۰-۷۰ درصد                  | ۹۵-۸۵ درصد                        |
| مصرف انرژی                 | بالا                                       | متوسط                       | پایین                       | بسیار بالا                        |
| هزینه سرمایه‌گذاری         | متوسط                                      | متوسط                       | پایین تا متوسط              | بسیار بالا                        |
| غلظت مناسب CO <sub>2</sub> | ۵-۱۱۵ درصد                                 | <۱۵ درصد                    | <۲۰ درصد                    | <۲۰ درصد                          |
| محصول نهایی                | CO <sub>2</sub> گازی                       | CO <sub>2</sub> گازی        | CO <sub>2</sub> غلیظ        | CO <sub>2</sub> مایع/جامد         |
| حساسیت به ناخالصی‌ها       | متوسط (SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> ) | کم                          | کم تا متوسط                 | بالا (رطوبت، SO <sub>x</sub> )    |

### ۳-۲-۴. جذب مستقیم از جو<sup>۱</sup>

فناوری‌های جذب مستقیم از هوا که به طور مستقیم CO<sub>2</sub> را از جو جذب می‌کنند، به سرعت در حال توسعه هستند. این فناوری‌ها می‌توانند در صنایع برای جبران انتشار CO<sub>2</sub> مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، از آنجایی که این فناوری نیاز به منابع گازهای خروجی از دودکش ندارد، می‌توان آن را در هر نقطه‌ای از جهان به کار برد. این فناوری به طور ویژه برای جداسازی دی‌اکسید کربن مستقیماً از هوای محیط (با غلظت بسیار پایین ~ ۰/۰۴ درصد حجمی CO<sub>2</sub>) طراحی شده است [۳۷، ۳۸]. جذب مستقیم از هوا از دو روش اصلی استفاده می‌کند:

- جذب شیمیایی: استفاده از جاذب‌های جامد یا مایع (مانند آمین‌های اصلاح شده یا هیدروکسیدهای فلزی) که CO<sub>2</sub> را از هوا جذب می‌کنند. این مواد پس از اشباع، با حرارت دادن (۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) یا تغییر فشار، CO<sub>2</sub> خالص آزاد می‌کنند.
- جذب فیزیکی: استفاده از مواد متخلخل مانند چهارچوب‌های آلی-فلزی یا کربن فعال که در دمای

محیط CO<sub>2</sub> را جذب و با کاهش فشار آن را آزاد می‌کنند.

یکی از بزرگ‌ترین معایب این فناوری، هزینه‌های بالای جذب و بازیابی CO<sub>2</sub> است که باعث شده این روش هنوز در مرحله تحقیق و توسعه قرار داشته باشد. با این وجود پروژه‌هایی در این رابطه در برخی نقاط اجرا شده است. همچنین نیاز به فضای وسیع برای تماس با هوای کافی از دیگر معایب این روش است.

به عنوان جمع‌بندی مطالب ارائه شده در مورد روش‌های کاهش انتشار و جذب دی‌اکسید کربن می‌توان گفت در این بخش مجموعه‌ای از راهکارهای مقابله با افزایش CO<sub>2</sub> در جو را بررسی شده است. این راهکارها شامل کاهش در منبع (با بهبود بهره‌وری انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، سوخت‌های کم کربن و بازیابی فرآیندهای صنعتی) و همچنین جذب پس از تولید (از طریق فناوری‌های متنوع جذب شیمیایی، فیزیکی، جامد، غشایی و کریوژنیک) می‌باشد. در مقایسه میان روش‌ها، جذب شیمیایی با آمین‌ها به عنوان فناوری بالغ، قابل اعتماد و رایج در

1. Direct Air Capture - DAC





صنایع بزرگ (مانند نیروگاه‌ها) مطرح است، هرچند هزینه عملیاتی آن بالاست. در مقابل، روش‌های نوینی مانند جاذب‌های جامد و غشایی با وجود مصرف انرژی کمتر، هنوز در مرحله توسعه هستند و بهینه‌سازی بیشتری نیاز دارند. همچنین فناوری جذب مستقیم از جو با وجود پتانسیل بالا در مقابله با انتشار پراکنده، در حال حاضر از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست؛ بنابراین، توصیه نهایی در این بخش، ترکیب راهکارهای کاهش در منبع با فناوری‌های جذب پس‌احتراقی موجود است، در حالی که باید پژوهش و توسعه فناوری‌های نوظهور برای بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها در دستور کار قرار گیرد.

#### ۴. روش‌های انتقال دی‌اکسید کربن جذب شده

یکی از مراحل مهم پس از جذب دی‌اکسید کربن، انتقال باهدف استفاده پایدار از دی‌اکسید کربن جذب شده است. منظور از استفاده پایدار این است که دی‌اکسید کربن جذب شده در فرآیندی مصرف یا ذخیره شود که به راحتی و پس از گذشت زمان کوتاه، مجدداً به جو بازنگردد. روش انتقال دی‌اکسید کربن جذب شده را از دو منظر می‌توان بررسی نمود. اول فاز انتقال است که به سه صورت گاز، مایع و جامد و دوم ابزار انتقال است که با سه روش خط لوله، انتقال دریایی و انتقال جاده‌ای امکان پذیر است. در ادامه این روش‌ها به صورت ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

- انتقال به صورت گاز فشرده:  $CO_2$  در فشار بالا (معمولاً ۸۰-۱۵۰ بار) و دمای محیط به صورت گاز فشرده در خطوط لوله انتقال می‌یابد. رایج‌ترین روش انتقال  $CO_2$ ، استفاده از خطوط لوله است. این روش برای انتقال مقادیر زیاد  $CO_2$  (بیش از ۱ میلیون تن در سال) در مسافت‌های کوتاه تا متوسط (تا ۳۰۰ کیلومتر) مناسب است. هزینه عملیاتی پایین و فناوری بالغ و گسترده از مزایا و خطر نشت در فشار بالا و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا و چالش‌های حقوقی برای عبور از زمین‌های خصوص از معایب این روش است.
- انتقال به صورت مایع:  $CO_2$  در دمای ۲۰- تا ۵۰- درجه سانتی‌گراد و فشار متوسط (۱۵-۳۰ بار)

به صورت مایع حمل می‌شود. انتقال دی‌اکسید کربن جذب شده به صورت مایع را می‌توان به صورت جاده‌ای و یا دریایی منتقل نمود. انتقال با کشتی برای مسافت‌های طولانی (بین‌قاره‌ای) و مناطق ساحلی مناسب است. انعطاف‌پذیری در مقیاس (۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ تن در هر کشتی) و عدم نیاز به زیرساخت ثابت از جمله مزایای این روش است. هزینه بالای سردسازی و بارگیری از جمله معایب این روش می‌باشد. در فاز مایع، دی‌اکسید کربن جذب شده را می‌توان به صورت جاده‌ای نیز منتقل نمود. دی‌اکسید کربن در این روش به صورت مایع (در تانک‌های کرایوژنیک) یا گاز فشرده (در سیلندرها) حمل می‌شود. این روش معمولاً برای مقادیر کم (۱۰-۲۰ تن در هر بار) استفاده می‌شود. مناسب بودن برای مسافت‌های کوتاه (کمتر از ۲۰۰ کیلومتر)، راه‌حل سریع و بدون نیاز به زیرساخت ویژه و ایده‌آل بودن برای صنایع کوچک یا مناطق دورافتاده از جمله مزایای انتقال جاده‌ای است. در مقابل هزینه انتقال بسیار بالا، محدودیت در ظرفیت انتقال و انتشار کربن ناشی از سوخت دیزل، از معایب این روش است. به‌عنوان روشی دیگر، دی‌اکسید کربن در آب یا محلول‌های شیمیایی حل شده و به صورت دوغاب در فاز مایع قابل انتقال می‌باشد. همچنین دی‌اکسید کربن را می‌توان با مواد شیمیایی به‌عنوان حامل (مانند آمین‌ها یا کربنات‌ها) ترکیب و پس از انتقال به صورت فاز مایع، آزاد نمود.

- انتقال به صورت جامد (یخ خشک): دی‌اکسید کربن در دمای ۷۸/۵- سانتی‌گراد به صورت جامد (یخ خشک) حمل می‌شود. این نوع از استفاده معمولاً برای مقاصد پزشکی یا صنایع غذایی هست. عدم نیاز به فشار بالا و ایمنی نسبی از مزایا و محدودیت در مقیاس انتقال و هزینه بالای تولید یخ خشک از معایب آن است [۳۹، ۴۰].

(جدول ۳) به مقایسه روش‌های انتقال دی‌اکسید کربن جذب شده پرداخته است.

جدول ۳: مقایسه روش‌های انتقال دی‌اکسید کربن [۳۸، ۳۹]

| معایب                   | مزایا                            | هزینه (ت/دلار) | ظرفیت انتقال        | شرایط انتقال                    | فاز CO <sub>2</sub> | روش انتقال |
|-------------------------|----------------------------------|----------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|------------|
| سرمایه‌گذاری اولیه بالا | هزینه عملیاتی پایین              | ۰/۱۵-۰/۰۵      | > ۱ میلیون سال/تن   | فشار: ۸۰-۱۵۰ بار، دمای محیط     | گاز فشرده           | خط لوله    |
| نیاز به عایق‌بندی       | حجم کمتر نسبت به گاز             | ۰/۲-۰/۰۸       |                     | دمای: ۵۰ °C-<br>فشار: ۱۵-۳۰ بار | مایع سرد            |            |
| هزینه بالای سردسازی     | مناسب برای مسافت‌های طولانی      | ۰/۳-۰/۱        | ۵۰۰۰-۵۰۰۰۰ سال/تن   | دمای: ۵۰ °C-<br>فشار: ۶-۸ بار   | مایع سرد            | کشتی       |
| هزینه بسیار بالا        | انعطاف‌پذیر برای مناطق دورافتاده | ۱/۰-۰/۵        | ۱۰-۲۰ بار/تن        | دمای: ۵۰ °C-<br>فشار: ۶-۸ بار   | مایع سرد            | کامیون     |
| محدودیت شدید در ظرفیت   | ایمنی نسبی                       | ۲/۰-۱/۰        | ۱-۵ بار/تن          | دمای: ۵/۷۸ °C-<br>فشار: اتمسفر  | جامد (یخ خشک)       |            |
| خطر نشست در فشار بالا   | عدم نیاز به سردسازی              | ۱/۵-۰/۸        | ۱-۲ بار (سیلندر)/تن | فشار: ۲۰۰-۳۰۰ بار               | گاز فشرده           |            |

نگه‌دارند [۴۱، ۴۲]. انتخاب روش ذخیره‌سازی به عوامل متعددی بستگی دارد، از جمله:

- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی CO<sub>2</sub> در فشار و دمای مختلف
- شرایط زمین‌شناسی محل ذخیره‌سازی
- هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری
- ملاحظات زیست‌محیطی و ایمنی
- مقیاس پروژه و میزان CO<sub>2</sub> مورد نیاز برای ذخیره‌سازی

امروزه سه روش اصلی برای ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. این روش‌ها بر اساس مکانیزم‌های مختلفی عمل می‌کنند و در موقعیت‌های جغرافیایی متفاوتی قابل اجرا هستند.

#### ۱-۱-۵. ذخیره‌سازی زمین‌شناسی<sup>۱</sup>

این روش شامل تزریق CO<sub>2</sub> به صورت فشرده به سازندهای زیرزمینی مناسب در عمق معمولاً بیش از ۸۰۰ متر است، جایی که فشار و دمای بالا CO<sub>2</sub> را در حالت «فوق بحرانی» قرار می‌دهد. سه نوع مخزن اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند: سفره‌های نفتی و گازی تخلیه‌شده (که پیش‌تر هیدروکربن ذخیره کرده بودند)، لایه‌های آب‌دار شور عمیق (سازندهای متخلخل پر از آب شور) و لایه‌های زغال‌سنگ

در این بخش از مقاله، روش‌های انتقال دی‌اکسید کربن جذب‌شده به صورت گاز فشرده، مایع سرد و جامد (یخ خشک) و از طریق خط لوله، کشتی و حمل جاده‌ای بررسی شده‌اند. در این میان، انتقال از طریق خط لوله در فاز گازی به دلیل هزینه عملیاتی پایین، ظرفیت بالا و فناوری بالغ، مناسب‌ترین گزینه برای انتقال در مقیاس صنعتی و فواصل کوتاه تا متوسط است. در مقابل، انتقال دریایی (با کشتی) برای فواصل طولانی و مقیاس متوسط مناسب بوده و حمل جاده‌ای بیشتر برای مقادیر کم و مناطق دورافتاده کاربرد دارد، اما از نظر اقتصادی به صرفه نیست. بنابراین، توصیه می‌شود در پروژه‌های بزرگ و متمرکز، انتقال خط لوله به عنوان گزینه اصلی مدنظر قرار گیرد، در حالی که برای نقاط دور از شبکه، گزینه‌های ترکیبی با انعطاف‌پذیری بالا بررسی شوند.

#### ۵. کاربردهای دی‌اکسید کربن جذب شده

##### ۱-۵. ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن

پس از فرآیند جذب دی‌اکسید کربن از منابع صنعتی یا اتمسفر، مرحله حیاتی بعدی ذخیره‌سازی ایمن و پایدار آن است. این مرحله از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا در صورت عدم مدیریت صحیح، CO<sub>2</sub> می‌تواند مجدداً به اتمسفر بازگردد و اثرات تغییرات اقلیمی را تشدید کند. ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن نیازمند فناوری‌های پیشرفته و سایت‌های مناسب است که بتوانند حجم عظیم گاز را برای دوره‌های زمانی طولانی (صدها تا هزاران سال) در خود

1. Geological Storage



غیرقابل استخراج، CO<sub>2</sub> از طریق چهار مکانیسم اصلی به دام می‌افتد: تله‌اندازی ساختاری (حسب زیر لایه‌های نفوذناپذیر مانند سنگ‌های رسی)، تله‌اندازی موئینه‌ای، انحلال در آب سازند و معدنی شدن تدریجی. پروژه‌های موفق مانند Sleipner در نروژ (با ظرفیت ۱ میلیون تن CO<sub>2</sub> در سال از ۱۹۹۶) و Weyburn-Midale در کانادا اثربخشی این روش را نشان داده‌اند. مزیت اصلی آن ظرفیت عظیم (حدود ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ گیگاتن جهانی) و پایداری بلندمدت است، اما نیاز به بررسی‌های دقیق زمین‌شناسی و پایش مستمر برای جلوگیری از نشت دارد [۴۴، ۴۳].

### ۵-۱-۲. ذخیره‌سازی معدنی<sup>۱</sup>

این روش مبتنی بر تبدیل شیمیایی CO<sub>2</sub> به کانی‌های کربناته پایدار از طریق واکنش با سیلیکات‌های غنی از کلسیم یا منیزیم (مانند اولیوین، سرپانتین یا بازالت) است. واکنش اصلی به صورت  $Mg_2SiO_4 + 2CO_2 \rightarrow 2MgCO_3 + SiO_2$  انجام می‌گیرد که در آن CO<sub>2</sub> به صورت دائمی در ساختار کربنات‌های معدنی (مانند مگنیزیت یا کلسیت) تثبیت می‌شود. این فرآیند به دو صورت مستقیم (تماس مستقیم گاز با سنگ در دمای بالا و فشار حدود ۱۰۰-۲۰۰ بار) و غیرمستقیم (استخراج فلزات قلیایی از سنگ و سپس واکنش با CO<sub>2</sub>) انجام می‌پذیرد. پروژه CarbFix در ایسلند نمونه موفق این فناوری است که با تزریق CO<sub>2</sub> به سازندهای بازالتی، بیش از ۹۵ درصد گاز را در کمتر از دو سال معدنی کرده است. مزیت کلیدی این روش پایداری شیمیایی چند صدساله محصولات نهایی است، اما چالش‌هایی مانند انرژی بر بودن فرآیند، سرعت پایین واکنش‌های طبیعی و نیاز به مقادیر زیاد سنگ (حدود ۳/۷-۶/۱ تن سنگ به ازای هر تن CO<sub>2</sub>) دارد. فناوری‌های جدید مانند استفاده از کاتالیزورها یا فعال‌سازی مکانیکی سنگ‌ها در حال بهبود کارایی این روش هستند [۴۶، ۴۵].

### ۵-۱-۳. ذخیره‌سازی در اقیانوس<sup>۲</sup>

این روش شامل تزریق CO<sub>2</sub> به اعماق اقیانوس (معمولاً زیر ۱۰۰۰ متر) است، جایی که فشار بالا و دمای پایین باعث می‌شود CO<sub>2</sub> به صورت مایع چگال یا هیدرات گازی درآید. دو روش اصلی وجود دارد: تزریق در ستون آب که CO<sub>2</sub> به تدریج در آب حل می‌شود و رسوب‌گذاری در بستر دریا

که CO<sub>2</sub> مایع به دلیل چگالی بالاتر از آب دریا، به شکل «دریاچه» زیرآبی جمع می‌شود. در عمق بیش از ۳۰۰۰ متر، CO<sub>2</sub> حتی ممکن است به صورت جامد (هیدرات) تثبیت شود. پروژه‌های آزمایشی مانند ژاپن (در دهه ۱۹۹۰) نشان دادند این روش از نظر فنی امکان‌پذیر است، اما به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند اسیدی شدن موضعی آب و تأثیر بر اکوسیستم‌های دریایی، توسعه آن محدود شده است. برآوردها نشان می‌دهد اقیانوس‌ها ظرفیت نظری ذخیره چند هزار گیگاتن CO<sub>2</sub> را دارند، اما مقررات بین‌المللی مانند پروتکل لندن فعلاً این روش را برای مقاصد تجاری ممنوع کرده‌اند. تحقیقات فعلی بر روی کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهبود فناوری‌های تزریق متمرکز است [۴۷، ۴۸].

در رویکرد نوین مدیریت کربن، دی‌اکسید کربن جذب‌شده صرفاً به عنوان یک ماده زائد دیده نمی‌شود، بلکه به عنوان یک منبع ارزشمند کربن می‌تواند در چرخه اقتصادی مورد استفاده قرار گیرد. این تغییر پارادایم که تحت عنوان «اقتصاد دورانی کربن» شناخته می‌شود، بر تبدیل CO<sub>2</sub> از یک چالش محیط زیستی به یک فرصت صنعتی تأکید دارد. فناوری‌های امروزی این امکان را فراهم کرده‌اند که مولکول‌های CO<sub>2</sub> را به عنوان ماده اولیه در صنایع مختلف به کار بگیریم. استفاده مجدد از CO<sub>2</sub> جذب‌شده از چند جنبه حائز اهمیت است:

- کاهش وابستگی به منابع فسیلی با جایگزینی کربن بازیافتی
- ایجاد ارزش اقتصادی برای سیستم‌های جذب کربن
- توسعه بازارهای جدید برای محصولات کم کربن
- کاهش اثرات محیط زیستی از طریق بستن چرخه کربن

این تحولات در چهارچوب مفهومی به نام (جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن<sup>۳</sup>) قرار می‌گیرد که در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به بخش «استفاده» آن شده است. پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه‌های کاتالیزورها، الکتروشیمی و مهندسی فرآیند، امکان تبدیل اقتصادی CO<sub>2</sub> به محصولات متنوع را فراهم کرده است. دلایل محوری برای توسعه این فناوری‌ها عبارتند از:

- افزایش قیمت جهانی کربن و مالیات‌های CO<sub>2</sub>
- پیشرفت در تولید هیدروژن سبز به عنوان ماده همراه

1. Mineral Storage
2. Ocean Storage
3. Carbon Capture, Utilization, and Storage - CCUS

- توسعه کاتالیزورهای کارآمد برای واکنش‌های تبدیل
- تقاضای رو به رشد برای محصولات پایدار

در ادامه، مهم‌ترین و اقتصادی‌ترین کاربردهای صنعتی CO<sub>2</sub> جذب‌شده که هم‌اکنون در مقیاس تجاری یا آزمایشی در حال اجرا هستند بررسی شده است. این کاربردها از صنایع سنگین مانند تولید سوخت تا بخش‌های پیشرفته مانند فناوری‌های نانو را دربر می‌گیرد.

#### ۲-۵. تولید سوخت‌های مصنوعی

این فناوری با ترکیب دی‌اکسید کربن جذب‌شده و هیدروژن سبز (تولیدشده از الکترولیز آب با انرژی تجدید پذیر) در فرآیندهای کاتالیستی، سوخت‌های مایع مصنوعی مانند متانول، بنزین مصنوعی یا دی‌متیل اتر (DME) تولید می‌کند [۴۹]. واکنش اصلی در تولید متانول ( $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ ) با استفاده از کاتالیزورهای مس-روی در دمای ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۰-۱۰۰ بار انجام می‌شود. پروژه‌هایی مانند Haru Oni در شیلی (با حمایت پورشه و زیمنس) نشان داده‌اند که این سوخت‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم در موتورهای احتراقی موجود استفاده شوند، درحالی‌که ۸۰-۹۰ درصد انتشار کربن را نسبت به سوخت‌های فسیلی کاهش می‌دهند. چالش اصلی هزینه بالای تولید (حدود ۳-۴ برابر سوخت معمولی) و نیاز به مقادیر زیاد انرژی تجدیدپذیر است، اما پیشرفت‌های اخیر در کاتالیزورها و افزایش مقیاس تولید، امیدواری برای رقابت پذیری اقتصادی تا ۲۰۳۰ را ایجاد کرده‌اند [۵۰].

#### ۳-۵. ماده اولیه در صنایع شیمیایی و پتروشیمی

دی‌اکسید کربن جذب‌شده به‌عنوان ماده اولیه در تولید طیف وسیعی از محصولات شیمیایی باارزش کاربرد دارد. مهم‌ترین کاربردها شامل تولید اوره (از طریق واکنش با آمونیاک برای کودهای شیمیایی)، پلی‌کربنات‌ها (جایگزین فسژن خطرناک در تولید پلاستیک‌های مهندسی) و پلی‌یورتان‌ها (برای فوم‌های عایق) می‌شود. فناوری‌های نوین مانند الکتروکاتالیست‌ها امکان تبدیل مستقیم CO<sub>2</sub> به اتیلن و اتانول با بازده تا ۷۰ درصد را فراهم کرده‌اند. شرکت‌هایی مانند Covestro آلمان از CO<sub>2</sub> برای تولید فوم‌های انعطاف‌پذیر با ۲۰ درصد محتوای کربن بازیافتی استفاده می‌کنند. چالش اصلی انرژی مورد نیاز برای شکستن پیوندهای پایدار CO<sub>2</sub> است، اما توسعه کاتالیزورهای مبتنی بر

فلزات واسطه و سیستم‌های فتوسنتز مصنوعی در حال بهبود کارایی این فرآیندها هستند. این صنعت تا ۲۰۳۰ می‌تواند سالانه بیش از ۱۵۰ میلیون تن CO<sub>2</sub> مصرف کند [۵۱، ۵۲].

#### ۴-۵. تولید مواد ساختمانی

صنعت ساخت‌وساز با بهره‌گیری از فناوری‌های جذب کربن، دی‌اکسید کربن را به مواد پایدار ساختمانی تبدیل می‌کند. در روش‌های پیشرفته مانند کربناته کردن بتن، گاز CO<sub>2</sub> به‌صورت کنترل‌شده با سیمان تازه واکنش داده و کلسیم کربنات (CaCO<sub>3</sub>) تشکیل می‌دهد که هم استحکام بتن را تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد و هم به ازای هر مترمکعب بتن حدود ۵۰ کیلوگرم CO<sub>2</sub> به‌صورت دائمی ذخیره می‌شود. شرکت‌های پیشرو مانند CarbonCure و Solidia از این فناوری در تولید بتن‌های کم کربن استفاده می‌کنند. همچنین، پژوهش‌ها بر روی تولید آجرهای جاذب CO<sub>2</sub> از ضایعات صنعتی (مانند خاکستر بادی) و عایق‌های فومی کربناته متمرکز است. این نوآوری‌ها علاوه بر کاهش ردپای کربن صنعت ساختمان (که مسئول ۸ درصد انتشارات جهانی است)، کیفیت و دوام مصالح را نیز بهبود می‌بخشند [۵۱]. چالش اصلی مقیاس‌پذیری فناوری و هماهنگی با استانداردهای ساختمانی است، اما روند رو به رشد تقاضا برای ساختمان‌های سبز، توسعه این بازار را تا ۲۰۳۰ به ۱۵۰ میلیارد دلار پیش‌بینی می‌کند.

#### ۵-۵. صنایع غذایی و نوشیدنی

دی‌اکسید کربن جذب‌شده نقش حیاتی در صنایع غذایی ایفا می‌کند، به‌ویژه در تولید نوشابه‌های گازدار که سالانه بیش از ۱۰ میلیون تن CO<sub>2</sub> مصرف می‌کنند. در فرآیند کربناسیون، CO<sub>2</sub> با فشار ۳-۴ بار به نوشیدنی‌ها تزریق می‌شود و حباب‌های مشخصه این محصولات را ایجاد می‌کند. از دیگر کاربردهای کلیدی می‌توان به انجماد سریع مواد غذایی با یخ خشک (دمای ۵/۷۸-°C) برای حفظ کیفیت محصولات، تعدیل pH در فرآیندهای تخمیر (مانند تولید آجیو و نان) و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده (MAP) برای افزایش ماندگاری مواد غذایی اشاره کرد. شرکت‌هایی مانند PepsiCo و Coca-Cola به‌طور فزاینده‌ای از CO<sub>2</sub> بازیافتی در خطوط تولید خود استفاده می‌کنند. چالش اصلی این صنعت نیاز به خلوص بسیار بالا (۹۹/۹ درصد) و رعایت استانداردهای غذایی است، اما پیشرفت در فناوری‌های تصفیه، امکان استفاده ایمن از CO<sub>2</sub> جذب‌شده را فراهم کرده است. این بخش تا ۲۰۳۰ می‌تواند سالانه ۱۵ میلیون تن CO<sub>2</sub> مصرف کند [۵۳].



## ۵-۶. کاربردهای انرژی

بخش انرژی‌های تجدیدپذیر و مخصوصاً در برق خورشیدی از جمله چالش‌های اساسی است. این در حالی است که از دی‌اکسید کربن جذب شده می‌توان برای ذخیره‌سازی انرژی نیز بهره جست. در ذخیره‌سازی انرژی، CO<sub>2</sub> فشرده شده با انبساط کنترل شده می‌تواند انرژی را با بازده ۷۰-۸۰ درصد بازیابی کند. چالش اصلی این کاربردها نیاز به طراحی تجهیزات ویژه برای تحمل فشارهای بالا (تا ۳۰۰ بار) است، اما مزایای زیست‌محیطی و افزایش بازده، توسعه این فناوری‌ها را توجیه‌پذیر می‌سازد.

(جدول ۴) روش‌های مختلف استفاده از دی‌اکسید کربن جذب شده را باهم مقایسه کرده است.

جدول ۴: مقایسه روش‌های انتقال دی‌اکسید کربن [۳۸، ۳۹]

| وضعیت فناوری     | معایب/چالش‌ها                   | مزایا                             | میزان مصرف CO <sub>2</sub> (سالانه) | محصول/فرآیند        | حوزه کاربرد              |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------|--------------------------|
| تجاری-نیمه صنعتی | هزینه بالا، نیاز به هیدروژن سبز | کاهش ۸۰ درصد انتشار نسبت به فسیلی | ۵-۱۰ میلیون تن                      | متانول، دی‌متیل اتر | سوخت‌های مصنوعی [۴۸، ۴۹] |
| تجاری            | انرژی بر بودن واکنش‌ها          | ارزش افزوده بالا                  | ۱۵۰+ میلیون تن                      | اوره، پلی‌کربنات    | صنایع شیمیایی [۵۰، ۵۱]   |
| نیمه‌صنعتی       | محدودیت در استانداردها          | ذخیره دائمی کربن                  | ۱۰ میلیون تن                        | بتن کربن‌گیری شده   | مواد ساختمانی [۵۰]       |
| تجاری            | بازار اشباع                     | نیاز به خلوص بالا                 | ۱۵ میلیون تن                        | نوشابه‌ها، انجماد   | صنایع غذایی [۵۲]         |

سرمایه‌گذاری هدفمند بر فناوری‌های تبدیل CO<sub>2</sub> به سوخت و حامل انرژی، کلید بهره‌برداری پایدار و بلندمدت از این گاز در چارچوب اقتصاد دورانی خواهد بود.

### ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری، به‌منظور بررسی چالش‌ها، منابع و کاربردهای صنعتی دی‌اکسید کربن، به‌صورت نظام‌مند به تحلیل ابعاد مختلف این گاز به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای پرداخته شد. نتایج حاکی از آن است که اگرچه سهم انتشار انسان‌ساخت دی‌اکسید کربن در مقایسه با منابع طبیعی اندک به نظر می‌رسد، اما همین میزان اندک در نبود تعادل با مکانیسم‌های جذب طبیعی، عامل اصلی گرمایش جهانی و اختلال در چرخه کربن است.

از سوی دیگر، فناوری‌های توسعه‌یافته جذب، ذخیره‌سازی و انتقال دی‌اکسید کربن و همچنین استفاده از آن در فرآیندهای صنعتی، چشم‌اندازهای امیدوارکننده‌ای در جهت

دی‌اکسید کربن به‌عنوان سیالی کارآمد در سیستم‌های انرژی پیشرفته می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۵۴]. در چرخه‌های قدرت، از CO<sub>2</sub> در حالت سیال فوق بحرانی (دمای ۳۱ °C و فشار ۷۳ بار) می‌توان به‌عنوان محیط انتقال حرارت بهره برد و در نتیجه امکان افزایش بازده نیروگاه‌ها تا حدود ۱۰ درصد وجود دارد. فناوری Allam Cycle نمونه‌ای نوآورانه است که در آن با سوزاندن سوخت در محیط CO<sub>2</sub> خالص، علاوه بر تولید برق، CO<sub>2</sub> برای ذخیره‌سازی یا استفاده مجدد آماده می‌شود. همچنین، CO<sub>2</sub> به‌عنوان سیال خنک‌کننده در سیستم‌های تبرید صنعتی جایگزین مناسبی برای مواد مضر مانند CFC هاست. امروزه ذخیره‌سازی انرژی بخصوص در

در بخش پنجم مقاله با تمرکز بر کاربردهای دی‌اکسید کربن جذب‌شده، طیفی از استفاده‌های صنعتی معرفی شده‌اند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تولید سوخت‌های مصنوعی، مواد شیمیایی، مصالح ساختمانی، صنایع غذایی و سیستم‌های انرژی اشاره کرد. از منظر مقیاس و وضعیت فناوری، کاربرد در صنایع شیمیایی و غذایی با توجه به زیرساخت‌های موجود و تقاضای بالا، تجاری و اقتصادی‌ترین گزینه‌ها هستند. در مقابل، تولید سوخت‌های مصنوعی و مصالح ساختمانی کربن‌گیری شده، باوجود پتانسیل بالا در کاهش انتشار، هنوز با چالش‌هایی مانند هزینه بالا، نیاز به انرژی تجدیدپذیر، یا الزامات استاندارد مواجه‌اند. همچنین کاربردهای انرژی‌محور همچون چرخه‌های فوق‌بحرانی یا ذخیره‌سازی انرژی هنوز در مرحله توسعه هستند و نیازمند پشتیبانی فناورانه و مالی‌اند. بر این اساس، توصیه می‌شود در کوتاه‌مدت تمرکز بر گسترش استفاده از CO<sub>2</sub> در صنایع شیمیایی، غذایی و ساختمانی باشد، در حالی که برای آینده،



کاهش اثرات زیست‌محیطی و خلق ارزش افزوده ارائه می‌دهند. در این راستا، کاربردهایی نظیر تولید سوخت‌های مصنوعی، مصالح ساختمانی کم‌کربن، استفاده در صنایع شیمیایی و غذایی و همچنین سیستم‌های انرژی نوین، نمونه‌هایی از بهره‌برداری مؤثر از CO<sub>2</sub> جذب‌شده هستند که نه تنها از ورود دی‌اکسید کربن به جو جلوگیری می‌کنند، بلکه آن را دوباره به چرخه‌ی تولید بازمی‌گردانند.

با این وجود، برخی از چالش‌های کلیدی نظیر هزینه‌های بالای فناوری‌های نوین (مانند جذب مستقیم از هوا)، پیچیدگی‌های فنی در انتقال و ذخیره‌سازی در مقیاس وسیع و فقدان زیرساخت‌های حقوقی و سیاست‌گذاری جامع در بسیاری از کشورها، از موانع مهم تحقق گسترده این فناوری‌ها به‌شمار می‌آیند. همچنین، ابعاد اجتماعی، اقتصادی و بومی‌سازی فناوری‌ها به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر بررسی مدل‌های ترکیبی برای جذب و مصرف دی‌اکسید کربن با بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر متمرکز شود. همچنین بررسی شرایط اقلیمی و صنعتی ایران برای بهره‌برداری از فناوری‌های جذب و استفاده از دی‌اکسید کربن، می‌تواند موضوع دیگری برای تحقیق بیشتر در این حوزه باشد.

#### مراجع:

- [5]. Budget, G.C., Global carbon budget 2023. 2023.
- [6]. Abas, N. and N. Khan, Carbon conundrum, climate change, CO<sub>2</sub> capture and consumptions. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2014. 8: p. 39-48.
- [7]. Mohammed, S.J. and G.A. Mansoori, A unique view on carbon dioxide emissions around the world. *Global Journal of Earth Science and Engineering*, 2017. 4(1): p. 8-17.
- [8]. Feely, R.A., et al., Uptake and storage of carbon dioxide in the ocean: The global CO<sub>2</sub> survey. *OCEANOGRAPHY-WASHINGTON DC-OCEANOGRAPHY SOCIETY-*, 2001. 14(4): p. 18-32.
- [9]. Revelle, R. and R. Fairbridge, Carbonates and carbon dioxide. 1957.
- [10]. Beniash, E., et al., Elevated level of carbon dioxide affects metabolism and shell formation in oysters *Crassostrea virginica*. *Marine Ecology Progress Series*, 2010. 419: p. 95-108.
- [11]. Xie, J., et al., CO<sub>2</sub> absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle. *Environmental Geology*, 2009. 56: p. 953-961.
- [12]. Ding, G., et al., Process simulation and optimization of municipal solid waste fired power plant with oxygen/carbon dioxide combustion for near zero carbon dioxide emission. *Energy Conversion and Management*, 2018. 157: p. 157-168.
- [13]. Mostafaeipour, A., et al., A new model for the use of renewable electricity to reduce carbon dioxide emissions. *Energy*, 2022. 238: p. 121602.
- [14]. De Gouw, J.A., et al., Reduced emissions
- [1]. Anwar, M., et al., Sources of carbon dioxide and environmental issues. *Sustainable Agriculture Reviews 37: Carbon Sequestration Vol. 1 Introduction and Biochemical Methods*, 2019: p. 13-36.
- [2]. Stan, C., *Energy versus carbon dioxide*. 2022: Springer.
- [3]. Kabir, M., et al., Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University-Science*, 2023. 35(5): p. 102693.
- [4]. Watch, G.F., *Forest monitoring designed for action*. Global Forest Watch (GFW), Washington, DC, United States, 2022.



- research and design, 2011. 89(9): p. 1609-1624.
- [23]. Wang, Y., et al., A review of post-combustion CO<sub>2</sub> capture technologies from coal-fired power plants. *Energy Procedia*, 2017. 114: p. 650-665.
- [24]. Samanta, A., et al., Post-combustion CO<sub>2</sub> capture using solid sorbents: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012. 51(4): p. 1438-1463.
- [25]. Dutcher, B., M. Fan, and A.G. Russell, Amine-based CO<sub>2</sub> capture technology development from the beginning of 2013 A Review. *ACS applied materials & interfaces*, 2015. 7(4): p. 2137-2148.
- [26]. Aghel, B., et al., Review on CO<sub>2</sub> capture by blended amine solutions. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022. 119: p. 103715.
- [27]. Abdeen, F.R., et al., A review of chemical absorption of carbon dioxide for biogas upgrading. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016. 24(6): p. 693-702.
- [28]. Ban, Z.H., L.K. Keong, and A. Mohd Shariff, Physical absorption of CO<sub>2</sub> capture: a review. *Advanced Materials Research*, 2014. 917: p. 134-143.
- [29]. Fu, D. and M.E. Davis, Carbon dioxide capture with zeotype materials. *Chemical Society Reviews*, 2022. 51(22): p. 9340-9370.
- [30]. Abd, A.A., M.R. Othman, and J. Kim, A review on application of activated carbons for carbon dioxide capture: present performance, preparation, and surface modification for further improvement. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021. 28(32): p. 43329-43364.
- of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>2</sub> from US power plants owing to switch from coal to natural gas with combined cycle technology. *Earth's Future*, 2014. 2(2): p. 75-82.
- [15]. Hanaki, K. and J. Portugal-Pereira, The effect of biofuel production on greenhouse gas emission reductions. *Biofuels and sustainability: holistic perspectives for policy-making*, 2018: p. 53-71.
- [16]. Litvak, S. and O. Litvak, Some aspects of reducing greenhouse gas emissions by using biofuels. *Journal of Ecological Engineering*, 2020. 21(8): p. 198-206.
- [17]. Fucheng, Z., H. Lukuo, and X. Ying, Prospects for green steelmaking technology with low carbon emissions in China. *Carbon Energy*, 2024. 6(2): p. e456.
- [18]. Zhang, X., et al., A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World. *Journal of cleaner production*, 2021. 306: p. 127259.
- [19]. Kheirnik, M., S. Ahmed, and N. Rahmanian, Comparative techno-economic analysis of carbon capture processes: Pre-combustion, post-combustion, and oxy-fuel combustion operations. *Sustainability*, 2021. 13(24): p. 13567.
- [20]. Jansen, D., et al., Pre-combustion CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015. 40: p. 167-187.
- [21]. Li, X., et al., Oxy-fuel combustion for carbon capture and storage in internal combustion engines—A review. *International Journal of Energy Research*, 2022. 46(2): p. 505-522.
- [22]. Wang, M., et al., Post-combustion CO<sub>2</sub> capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chemical engineering*



transportation processes. 2015: Springer.

- [40]. Aspelund, A., Gas purification, compression and liquefaction processes and technology for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) transport, in *Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Capture and Storage Technology*. 2010, Elsevier. p. 383-407.
- [41]. Aminu, M.D., et al., A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, 2017. 208: p. 1389-1419.
- [42]. Zhang, Z. and D. Huisingsh, Carbon dioxide storage schemes: technology, assessment and deployment. *journal of cleaner production*, 2017. 142: p. 1055-1064.
- [43]. Baines, S.J. and R.H. Worden, *Geological storage of carbon dioxide*. 2004.
- [44]. Holloway, S., Carbon dioxide capture and geological storage. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007. 365(1853): p. 1095-1107.
- [45]. Snæbjörnsdóttir, S.Ó., et al., Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020. 1(2): p. 90-102.
- [46]. Kelemen, P., et al., An overview of the status and challenges of CO<sub>2</sub> storage in minerals and geological formations. *Frontiers in Climate*, 2019. 1: p. 9.
- [47]. De Baar, H., Options for enhancing the storage of carbon dioxide in the oceans: A review. *Energy conversion and Management*, 1992. 33(5-8): p. 635-642.
- [48]. Zhao, J., et al., A review on geological storage of marine carbon dioxide: Challenges and prospects. *Marine and Petroleum Geology*, 2024. 163: p. 106757.
- [31]. Sabouni, R., H. Kazemian, and S. Rohani, Carbon dioxide capturing technologies: a review focusing on metal organic framework materials (MOFs). *Environmental Science and Pollution Research*, 2014. 21: p. 5427-5449.
- [32]. Kazemi, S. and V. Safarifard, Carbon dioxide capture in MOFs: The effect of ligand functionalization. *Polyhedron*, 2018. 154: p. 236-251.
- [33]. Favre, E., Membrane processes and postcombustion carbon dioxide capture: Challenges and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 2011. 171(3): p. 782-793.
- [34]. Scholes, C.A., S.E. Kentish, and G.W. Stevens, Effects of minor components in carbon dioxide capture using polymeric gas separation membranes. *Separation & Purification Reviews*, 2009. 38(1): p. 1-44.
- [35]. Shen, M., et al., Cryogenic technology progress for CO<sub>2</sub> capture under carbon neutrality goals: A review. *Separation and Purification Technology*, 2022. 299: p. 121734.
- [36]. Baxter, L., A. Baxter, and S. Burt. Cryogenic CO<sub>2</sub> capture as a cost-effective CO<sub>2</sub> capture process. in *International Pittsburgh Coal Conference*. 2009.
- [37]. Castro-Munoz, R., et al., A new relevant membrane application: CO<sub>2</sub> direct air capture (DAC). *Chemical Engineering Journal*, 2022. 446: p. 137047.
- [38]. McQueen, N., et al., A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future. *Progress in Energy*, 2021. 3(3): p. 032001.
- [39]. Witkowski, A., et al., Advances in carbon dioxide compression and pipeline



- [49]. Alsunousi, M. and E. Kayabasi, The role of hydrogen in synthetic fuel production strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024. 54: p. 1169-1178.
- [50]. León, D., et al., Techno-economic analysis of the production of synthetic fuels using CO<sub>2</sub> generated by the cement industry and green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024. 80: p. 406-417.
- [51]. Kaiser, S. and S. Bringezu, Use of carbon dioxide as raw material to close the carbon cycle for the German chemical and polymer industries. *Journal of cleaner production*, 2020. 271: p. 122775.
- [52]. Takht Ravanchi, M. and S. Sahebdehfar, Carbon dioxide capture and utilization in petrochemical industry: potentials and challenges. *Applied Petrochemical Research*, 2014. 4(1): p. 63-77.
- [53]. Meyers, S., et al., Energy efficiency, carbon emissions, and measures towards their improvement in the food and beverage sector for six European countries. *Energy*, 2016. 104: p. 266-283.
- [54]. Vaz Jr, S., A.P.R. de Souza, and B.E.L. Baeta, Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022. 8: p. 100456.



## Carbon Dioxide, Challenges, Sources and Industrial Applications: an Overview of Methods for Transport, Absorption and Emission Reduction

Hamid Moghadam\*

Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

### ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

#### Article History:

Received: 29 April 2025

Revised: 31 May 2025

Accepted: 07 June 2025

#### Keywords:

Carbon dioxide capture  
Carbon dioxide transport  
Greenhouse gas  
Carbon dioxide storage

### ABSTRACT

Carbon dioxide is one of the most important greenhouse gases, released both naturally and as a result of human activities into the Earth's atmosphere. Naturally, it enters the atmosphere through processes such as respiration of living organisms, volcanic eruptions, and the decomposition of organic matter. However, over the past two centuries, industrial human activities have significantly increased the concentration of this gas in the atmosphere. Global warming is arguably the most critical consequence of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> levels as a greenhouse gas. This review initially outlines the sources of carbon dioxide emissions, followed by a brief examination of the natural mechanisms for CO<sub>2</sub> absorption. Given that in recent decades, a balance between emission and absorption rates has not been maintained—leading to its accumulation in the atmosphere and causing various environmental issues—this study explores different methods of emission reduction and CO<sub>2</sub> capture. A comparison of various carbon capture techniques indicates that, currently, chemical absorption using amines is the most cost-effective option due to its technological maturity and commercial viability. The article further discusses carbon dioxide transportation methods and finally reviews its potential industrial applications.

DOR: [20.1001.1.2504.1095.1404.03.17](https://doi.org/10.2504.1095.1404.03.17)

#### How to cite this article

H. Moghadam, Carbon Dioxide, Challenges, Sources and Industrial Applications: an Overview of Methods for Transport, Absorption and Emission Reduction. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(2): 73-89. ([https://www.ijge.irangi.org/article\\_732241.html](https://www.ijge.irangi.org/article_732241.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [h.moghadam@eng.usb.ac.ir](mailto:h.moghadam@eng.usb.ac.ir), (H. Moghadam).

Available online 22 September 2025

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

