# 1.مقدمه

منظور از گرمایش جهانی، افزایش طبیعی و غیر طبیعی متوسط دماي اتمسفر در نزدیکی سطح زمین است. تحقیقات نشان می‌دهند که افزایش دماي زمین مستقیماً به تولید گازهاي گلخانه‌اي ناشی از فعالیت‌هاي انسانی بستگی دارد. انسان بزرگترین عامل در تولید گازهاي گلخانه اي بوده و بیشتر این گازها را با سوزاندن سوخت‌هاي فسیلی در وسایل نقلیه موتوري ، کارخانه‌ها و دامداري‌ها تولید می‌کند. جو زمین از گازهاي گوناگونی تشکیل شده است. گروهی از گازها به حفظ گرماي سطح زمین کمک میکنند زیرا که نحوه عملکردشان در اتمسفر زمین مانند گلخانه است که پرتوهاي خورشیدي را به دام می‌اندازد تا گرماي لازم براي رشد گیاهان مهیا شود. این گازها براي حیات ما بر روي کره زمین ضروري هستند. بدون گازهاي گلخانه‌اي هیچ لایه اتمسفري براي به دام انداختن تشعشع خورشیدي وجود نخواهد داشت و زمین به اندازه‌اي سرد می‌شود که غیر قابل سکونت خواهد شد. در جدول 1 گازهاي گلخانه‌اي متداول، منابع ابتدایی تولید این گازها و فعالیتهاي مرتبط و پتانسیل گرمایش جهانی هریک از گازها به تفکیک آمده است.گازهاي گلخانه‌اي در غلظت استانداردشان براي حیات روي کره زمین ضروري هستند ولی مقدار بالاي آنها موجب تغییر در اقلیم جهانی می‌شود. حد بالای کربن دی اکسید در جو 300 پی‌پی‌ام بوده اما امروزه این مقدار به اما امروزه این مقدار به 388 پی‌پی‌ام رسیده است و تحقیقات نشان میدهند که این مقدار سالانه 2 پی‌پی‌ام بالاتر می‌رود. متاسفانه ماندگاري CO2 در جو زمین بسیار بالاست و این بدین معناست که اگر همین امروز تولید CO2 را کاهش دهیم چندین سال طول میکشد تا اثرات زیانبار افزایش CO2 بر اقلیم جهانی کاهش یابد. در مقابل CO2، CH4 طول عمر کوتاه‌تري در جو دارد. تقریباً زمان ماندگاري CH4 ، 12 سال محاسبه شده است، بنابراین با متوقف کردن تولید آن، این گاز به سرعت از جو زمین محو می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که پدیده گرمایش جهانی داراي آثار مخرب بالقوه‌اي مانند تغییر اقلیم جهانی، آب شدن یخ‌ها در قطب شمال و جنوب، بالا آمدن سطح آب اقیانوس‌ها، خشکسالی‌هاي طولانی مدت، کاهش منابع و ذخایر آبی، ایجاد طوفان‌ها و سیل‌هاي ناگهانی، تغییرات آب و هوایی شدید، آتش سوزي جنگل‌ها، افزایش ریزگردها و آلودگی هوا، اثر سوء بر توریسم و دیگر صنایع می‌باشد . بنابراین با افزایش نگرانی‌ها در خصوص آثار مخرب این پدیده، درک مناسب از انتشار گازهاي گلخانه‌اي از فعالیت‌هاي انسانی با دیدگاه زیست محیطی ضروري است.

جدول 1: گازهاي گلخانه‌اي متداول و پتانسیلهاي گرمایش جهانی

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| نام گاز گلخانه‌اي | GHGs | GWP | منابع ابتدایی تولید |
| دي اکسید کربن | CO2 | 1 | سوزاندن سوخت فسیلی (حمل و نقل، صنایع و تولید انرژي) |
| متان | CH4 | 23 | محل‌هاي دفن، زغال معدنی، کشاورزي، مواد زائد حیوانی، فاضلاب |
| اکسید نیتروژن | N2O | 310 | کودهاي شیمیایی، وسایل نقلیه، تصفیه فاضلاب، سوزاندن مواد زائد |
| هیدروفلوروکربن‌ها | HFCs | 11700-140 | مواد شیمیایی صنعتی استفاده شده به عنوان جایگزین عوامل ایجاد کننده افت ازن استراتوسفري |
| پرفلوروکربن‌ها | PFCs | 9200-6500 | صنایع ذوب آلومینیوم، صنایع نیمه رسانا، صنایع انتقال انرژي الکتریکی |
| هگزافلورایدسولفور | SF6 | 23900 | صنایع ذوب آلومینیوم، کارخانجات نیمه رسانا، صنایع انتقال انرژي الکتریکی |

# 1.1 دلایل ایجاد گرمایش جهانی

## 1.1.1 نیروهاي خارجی

نیروهاي خارجی به فرآیندهاي خارجی سیستم‌های اقلیمی ( نه فقط لزوماً خارجی براي زمین) که آب و هوا را تحت تاثیر قرار می‌دهند اشاره دارد. اقلیم به چندین نوع از نیروهاي خارجی از قبیل نیروهاي تابشی ناشی از تغییرات در ترکیب اتمسفر ( بیشتر غلظت و تمرکز گازهاي گلخانه‌اي)، تغییرات در پرتوهاي خورشیدي، فوران آتشفشانی و تغییر در مدار گردش زمین به دور خورشید واکنش نشان می‌دهد. این چرخه‌ها به آرامی در طول ده‌ها هزار سال قبل تغییر کرده‌اند و بنابراین احتمال اینکه سبب تغییرات دمایی مشاهده شده در قرن گذشته باشند هنوز به اثبات نرسیده است.

## 1.1.2 گازهاي گلخانه‌اي

اثر گلخانه‌اي فرآیندي است که با جذب و انتشار پرتوهاي فروسرخ به وسیله گازهاي اتمسفر زمین باعث گرم شدن سطح و اتمسفر پایین زمین می‌شود. این مساله به وسیله Fourier Joseph در سال 1824 کشف شد و براي اولین بار از نظر کمی توسط Arrhenius Svante در سال 1896 بررسی شد.

وجود گازهاي گلخانه‌اي باعث افزایش دما در حدود 33 درجه سانتی گراد (59 درجه فارنهایت) می‌شود. گازهاي گلخانه‌اي اصلی شامل بخار آب که مسبب 70-36 درصد اثر گلخانه‌اي،دي اکسید کربن سبب 26- 9 درصد گرمایش، متان سبب 4-9 درصد گرمایش و اوزون سبب 3-7 درصد گرمایش میشود. فعالیت‌هاي انسان از زمان انقلاب صنعتی منجر به افزایش میزان گازهاي دي اکسید کربن، متان، اوزون تروپوسفري،CFC و اکسیدهاي نیتروژن شده است. غلظت گازهاي CO2و CH4 به ترتیب 36 و 48 درصد از سال 1750 افزایش یافته است. این مقادیر در طی 650 هزار سال گذشته بالاترین حد را داشته‌اند. این اطلاعات قابل استناد مربوط به 650 هزار سال گذشته از ترکیب هواي به دام افتاده در یخ‌ها استخراج شده‌اند. مدارك زمین شناسی نشان داده‌اند که مقدار CO2 در حال حاضر داراي بیشترین مقدار در طی 20 میلیون سال گذشته بوده است. حدود 3.4 درصد افزایش گاز CO2 ناشی از سوزاندن سوخت‌هاي فسیلی توسط انسان در طول 20 سال گذشته بوده است. اکثر این اضافات ناشی از تغییرات کاربري اراضی به ویژه جنگل‌زدایی می‌باشد. غلظت گاز CO2 در اثر سوزاندن سوخت‌هاي فسیلی و تغییر کاربري اراضی در حال افزایش یافتن است. بنابراین گزارش ویژه کمیته تغییر اقلیم در رابطه با سناریوهاي انتشار این گاز می‌گویند که دامنه انتشار CO2تا سال 2100 در محدوده 541 تا970 پی‌پی‌ام می‌باشد.

## 1.1.3 نوسان و تغییر در پرتوهاي خورشیدي

تغییرات در پرتوهاي خورشیدي علت تغییرات آب و هوایی در گذشته بوده ولی نیروي خورشید براي دلیل گرمایش جهانی در دهه‌هاي اخیر داراي اهمیت کمی می‌باشد. گازهاي گلخانه‌اي و پرتوهاي خورشید به راه‌هاي مختلف بر دما تاثیر می‌گذارند. با افزایش فعالیت خورشید استراتوسفر گرم شده در حالی که با افزایش گازهاي گلخانه‌اي استراتوسفر خنک شده است. اندازه گیري‌هاي ماهواره‌اي نشان داد که دما در استراتوسفر از سال 1979 در حال خنک شدن است. یک فرضیه که به وسیله Henrik Svensmark پیشنهاد شده این است که فعالیت مغناطیسی خورشید باعث انحراف پرتوهاي کیهانی شده که ممکن است سبب تولید ابرهاي هسته‌اي انقباضی و به موجب آن تاثیر گذاشتن بر روي اقلیم شود.

## 1.1.4 پسخور مثبت و منفی

گرمایش گلخانه‌اي پدیده‌اي بسیار پیچیده است. تاثیر این گرمایش سبب آغاز حلقه‌هاي پس خور مثبت و منفی می‌شود که ممکن است هر افزایش دما را خنثی کرده یا آن را بالاتر ببرد. پس خور مثبت باعث تشدید کمیت اولیه شده در حالی که پس خور منفی باعث کاهش آن می‌شود. پسخور در مطالعات گرمایش جهانی مهم است زیرا ممکن است که این زیاد شدن‌ها و یا کم شدن‌ها در نتیجه یک سري فرآیندهاي ویژه‌اي باشد. یک پس خور مثبت مهم در گرمایش جهانی این است که گرم شدن منجر به افزایش مقدار بخار آب در اتمسفر شده که این خود منجر به گرمایش بیشتر می‌شود. در پسخور منفی مهم این است که طبق قانون Boltzmann Stefan با افزایش دماي سطح زمین و اتمسفر آن مقدار گرماي تابشی از سطح زمین به فضا افزایش می‌یابد. فهم نادرستی از پس خورها علت اصلی تردید و نگرانی در خصوص گرماي جهانی می‌باشد.

# 1.2 اثرات سوء گرمایش جهانی

## 1.2.1 اثرات سوء گرمایش جهانی در ایران

تغییر اقلیم در کشور از ابعاد مختلفی چون بروز سیل، خشکسالی، گسترش بیماري‌هاي نظیر مالاریا و در نهایت تاثیر بر کشاورزي و اقتصاد ملی قابل طرح است. پیامدهاي تغییر اقلیم در کشور را میتوان به طور خلاصه به صورت زیر نشان داد:

* تغیر اقلیم کیفیت منابع آب را با مخاطرات جدي روبه‌رو خواهد نمود و کیفیت آب به ویژه آب‌هاي سطحی تنزل خواهد یافت و از میزان آب سالم قابل استحصال خواهد کاست.
* تغییر الگوي بارش، ناهنجاری‌هاي در شدت، مدت و میزان بارش در مناطق مختلف ایجاد خواهد کرد.
* باعث نابودي پوشش گیاهی و جنگلی و نیز تشدید بیابان‌زدایی خواهد شد.
* باعث تغییر ضریب روان‌اب و تغییر میزان نفوذ و افزایش رسوب خیزي حوضه‌هاي آبریز خواهد شد.
* باعث تغییر نسبت تبخیر به نفوذ می‌شود که سبب تغییر سطح آب‌هاي زیرزمینی و همچنین تغییر میزان روان‌اب در مناطق مختلف می‌گردد.
* باعث تغییر در میزان ذخایر برفی و ذوب زودرس برف و از دست رفتن ذخیره برفی که در تأمین آب سدهاي مخزنی عمده نقش تعیین کننده‌اي دارد.
* باعث احتمال تغییر سطح آب خلیج فارس و دریاچه مازندران خواهد شد.
* از آنجایی‌ که ایران در منطقه خشک قرار دارد پس میزان محصولات کشاورزي آن کاهش خواهد یافت که این پدیده باعث افزایش بیکاري و مهاجرت به شهرها و پیامدهاي مربوط به آن خواهد بود.
* تغییر توزیع زمانی و مکانی بارش برف و باران باعث تغییر رژیم آبدهی مناطق مختلف می‌شود.

## 1.2.2 اثرات سوء گرمایش در سطح جهانی

پیش‌بینی می‌شود که گرمایش این اثرات سوء را در پی خواهد داشت:

1. بالا آمدن جهانی سطح آب دریاها

* زیر آب رفتن تالاب‌ها و اراضی پست
* فرسایش خط ساحل
* تشدید کردن سیلاب‌هاي ساحلی
* افزایش شوری مرداب‌ها و آب‌ها و سایر آسیب‌ها به کیفیت آب
* تغییر در مکان ته نشست رسوبات در رودخانه‌ها
* تغییر در رنج جزر و مدی و افزایش ارتفاع امواج
* کاهش در میزان نور رسیده به ته دریاها و رودخانه‌ها

1. تغییرات آب و هوایی

* تغییر در مقدار و الگوي بارش
* تغییر در تکرار و شدت حوادث اقلیمی
* توسعه بیابان در نواحی گرمسیري
* آسیب پذیري اکوسیستم‌ها
* انقراض گونه‌هاي گیاهی و جانوري
* عقب نشینی یخچال‌ها
* تغییر در میزان محصولات کشاورزي
* کاهش سطح قطبین و صفحات یخچال‌ها

## 1.3 راهکارهاي مقابله با افزایش گرمایش جهانی

## 1.3.1 نقش انرژي‌هاي نو در کاهش گازهاي گلخانه‌اي

با توجه به نیاز روز افزون جوامع امروزی به انرژی برای تامین نیازهای متفاوت، دانشمندان و محققان کشورهای متعدد جهان، رویکردی اساسی نسبت به دستیابی به انرژی‌های تجدیدپذیر در دستور کار خود قرار داده اند. دانشمندان معتقدند انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک با توجه به محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط زیست می توانند به اولین گزینه برای تولید انرژی تبدیل شوند، چرا که استمرار استفاده از سوخت‌های فسیلی، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، بالا رفتن دمای کره زمین و به تبع آن تغییرات آب و هوایی و آلودگی‌های زیست محیطی را همراه دارد. و به همین خاطر بهره‌گیری حداکثری از انرژی‌های نو به‌ عنوان بحث روز در کشورهای مختلف جهان مدنظر است. در این تحقیق که بر محورهای گردآوری اطلاعات، تحلیل علمی با مطالعات کتابخانه‌ای و تطبیق به شیوه تحلیل محتوی استوار است، به بررسی کاربرد و نقش انرژی‌های نو در رفع پیامدهای ناشی از گازهای گلخانه‌ای و تاثیر آن در حفظ محیط زیست پرداخته و راهکارهای لازم ارایه خواهد شد. بطوری‌که میتوان بیان نمود که استفاده از انرژی‌های نو در حفظ محیط زیست طبیعی و انسانی، کاهش روند گرمایش جهانی و همچنین در نیل به اهداف توسعه پایدار از محیط زیست نقش مهمی را ایفا می کنند. واقعیت آن است که استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر، علاوه بر کاهش عوارض آلاینده‌های زیست محیطی نقش موثری در کاهش هزینه‌های مصرف کنندگان دارد. جدول 2 میزان تاثیرگذاري انواع منابع انرژي بر محیط زیست را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که سوخت‌هاي فسیلی تاثیر منفی بسیاري بر محیط زیست و تغییر اقلیم دارد در حالی که انرژي‌هاي جایگزین تاثیرات سوء کمتري را بر محیط زیست دارند.

جدول 2: مقایسه تاثیرگذاري انواع منابع انرژي بر محیط زیست

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **منابع انرژي** | **حیات وحش** | **آلودگی هوا** | **تغییر اقلیم** |
| زغال سنگ | بسیار زیاد | بسیار زیاد | بسیار زیاد |
| نفت | بسیار زیاد | متوسط تا زیاد | زیاد |
| گاز طبیعی | کم یا زیاد | کم تا زیاد | کم تا متوسط |
| سوخت‌هاي زیستی | کم تا زیاد | کم تا متوسط | کم |
| باد | نزدیک به صفر | نزدیک به صفر | کم |
| خورشید | نزدیک به صفر | نزدیک به صفر | کم |
| زمین گرمایی | نزدیک به صفر | نزدیک به صفر | کم |
| انرژي هستهاي | زیاد | نزدیک به صفر | کم |

## 1.3.2 جنگل کاري به منظور کاهش گرمایش جهانی

پس از سوخت‌هاي فسیلی، جنگل زدایی دومین عامل در ایجاد دي اکسید کربن مازاد در اتمسفر می‌باشد. معمولاً تمام کربن وارد شده به اتمسفر از پاك تراشی جنگلها در مناطق حاره‌ای به وجود می‌آید. جنگل‌هاي معتدله به دلیل اینکه نرخ رشد و قطع آن همدیگر را خنثی می‌کند، در افزایش دي اکسید کربن مؤثرند. جنگل زدایی از طریق سوزاندن آنها به دو صورت باعث افزایش دي اکسید کربن می‌شود، از یک سو نابودي آنها به خودي خود به معنی از بین بردن مهم ترین منابع جذب دي اکسید کربن به شمار می‌رود و از سوي دیگر با سوزاندن آنها به میزان قابل توجهی به موجودي کربن دي اکسید افزوده می‌شود. درختکاري خطر گرمایش جهانی را تخفیف می دهد. درختان در جریان فتوسنتز دي اکسید کربن را می‌گیرند و میتوانندکربن آن را براي مدت طولانی در خود ذخیره کنند. این روش همچنین بهبود وضعیت زیبا شناختی مناطق شهري و تأمین چوب بیشتر را که منبع تجدید شونده است به همراه دارد.

## 1.3.3 استفاده از کشاورزي حفاظتی

امروزه افزایش فعالیتهاي کشاورزي به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر انتشار گازهاي گلخانه‌اي منجر به تشدید پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی شده است. از آنجا که مصرف کودهاي شیمیایی و سوخت‌هاي فسیلی در عملیات کشاورزي دو منبع عمده تولید گازهاي گلخانه‌اي CH4، CO2 و NO2 می‌باشد. می‌توان با تغییر سامانه مدیریت خاکورزي به تکنولوژي خاکورزي حفاظتی، در مصرف گازوئیل و کود شیمیایی صرفه جویی کرد و در راستاي کاهش گرمایش جهانی اقدام کرد. آزاد شدن کربن به صورت گازهاي گلخانه‌اي یا مصرف این گازها توسط خاك در سال‌هاي اخیر تبدیل به یکی از کانون‌هاي مورد توجه کارشناسان محیط زیست شده است تا با اعمال مدیریت‌هاي خاص بتواند سبب کاهش روند رو به افزایش آلودگی گازهاي گلخانه‌اي شوند. عملیات مدیریتی مانند انتخاب گونه‌هاي محصولات زراعی، عملیات آماده‌سازي زمین و اضافه نمودن کودهاي شیمیایی از جمله عوامل اثرگذار بر جریان گلخانه‌اي می‌باشد. در این میان مدیریت بقایاي گیاهی نیز با اعمال اصول کشاورزي حفاظتی می‌تواند در ابعاد مختلف پایداري، محیط زیستی، زراعی و اقتصادي تاثیرگذار باشد. بنابراین به کارگیري کشاورزي حفاظتی یک گام کلیدي براي یک سیستم کشاورزي پایدار است که باروري و سودمندي را با حفاظت محیط زیست منطبق و سازگار نماید.

## 1.3.4 مدیریت پسماند به منظور کاهش گرمایش جهانی

اگرچه سهم پسماند از تولید گازهاي گلخانه‌اي تنها %4 در سطح جهان می‌باشد، ولی کنترل همین بخش کوچک نیز تاثیر به سزایی خواهد داشت. این بخش سهم انرژي تولید کالاي جایگزین را که ما به عنوان پسماند دور انداخته‌ایم مورد محا به قرس ار نمیدهد. تولید کالاي جدید آن هم به وسیله مواد خام مستلزم صرف انرژي بسیاري است. در واقع میزان تولید گازهاي گلخانه‌اي از طریق پسماند می‌بایست با بخش تولید کالا ادغام شده و آنجاست که مشخص میگردد این موضوع سهمی معادل %21 از ایجاد گازهاي گلخانه اي به خود اختصاص داده است. همچنین حجم بالاي گاز متان ایجاد شده در محل‌هاي دفن زباله هم معضل زیست محیطی بسیار جدي است. این گاز از طریق کمپوست نمودن پسماندهاي قابل بازیافت حاصل می‌شود. به منظور کاهش اینگونه گازهاي گلخانه‌اي ضروري است که بر کاهش تولید پسماند تمرکز کرد و توجه به این بخش نیز بدون در نظر گرفتن کاهش در میزان تولید بی‌فایده خواهد بود. از جمله اقداماتی که در مدیریت پسماند به منظور کاهش پدیده گرمایش جهانی می‌تواند انجام پذیرد عبارتند از:

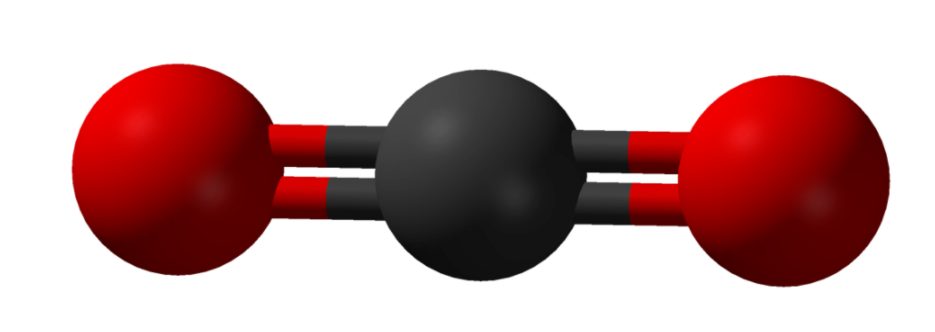
* نظارت بر تولید کالا ( شامل تولید، استفاده و زمان پس از استفاده از آن)
* بکارگیري تکنیک‌هاي بازیافت
* بهینه سازي فرآیند تصفیه فاضلاب
* بازیابی و تبدیل بیوگاز تولیدي به الکتریسیته
* استفاده از بیوگاز به عنوان سوخت
* جمع آوري صحیح پسماندها در شهرها و روستاها و انتقال به موقع آنها به محل دفع

# 1.4 کربن دی اکسید مهمترین گاز گلخانه ای و روش‌های بازیابی و ذخیره این گاز گلخانه‌ای

دی‌اکسید کربن یا گاز کربنیک با فرمول شیمیایی CO2 اولین بار توسط شیمی‌دانی به نام جان باتبسیت وان هلمونت در قرن هفدهم کشف شد. این گاز یک گاز گلخانه‌ای، بی رنگ با بوی تند ضعیف و طعمی ترش و مایل به اسیدی است. دی اکسید کربن گازی است که از یک قسمت کربن و دو قسمت[اکسیژن](https://www.jahaneshimi.com/11241/%da%af%d8%a7%d8%b2-%d8%a7%da%a9%d8%b3%db%8c%da%98%d9%86/) تشکیل شده است و %0.03 از هوا را تشکیل می‌دهد. یکی از مهمترین گازهای روی کره زمین است، البته علاوه بر سیاره زمین، دی اکسید کربن فراوان ترین گاز در جو  زمین و[مریخ](https://www.jahaneshimi.com/10637/%d8%b3%db%8c%d8%a7%d8%b1%d9%87-%d9%85%d8%b1%db%8c%d8%ae-%d8%b3%db%8c%d8%a7%d8%b1%d9%87-%d8%a8%d9%87%d8%b1%d8%a7%d9%85/) و زهره نیز است.

گاز CO2 در اثر سوختن سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، نفت و گاز، سوختن مواد آلی در مجاورت اکسیژن، تخمیر مایعات، تنفس گیاهان و جانوران و… در جو ما ایجاد می شود. این گاز با وزن مخصوص ۵۲ /۱ سنگین‌تر از هوا می‌باشد و به همین دلیل همیشه در طبقه پایین‌تر جو محیطی و نزدیک به زمین تولید و پخش می‌شود.

شکل 1: شکل اتمی گاز کربن دی اکسید



مولکول‌های این گاز شامل دو پیوند دوگانه بین یک اتم کربن و دو اتم اکسیژن می‌باشند. شکل فضایی آن به صورت خطی است و مولکولی غیر قطبی می‌باشد که اگر آن را در دمای پایین‌تر از ۷۸- درجه سانتی‌گراد قرار دهید متراکم می‌شود و جسم سفید رنگ جامدی به‌وجود می‌آورد که یخ خشک نامیده می‌شود. بیشتر مواقع به حالت گازی است و تنها تحت فشار خاصی دی‌اکسید کربن مایع ایجاد می‌شود. این گاز به میزان کمی در آب حل می‌شود و هنگامی که در آب حل شود یک اسید ضعیف به نام اسید کربنیک تولید می‌کند، که اگر این اسید را تجزیه کنند مقدار کمی بی‌کربنات و کربنات تفکیک شده از آن حاصل می‌شود.

یک گاز غیر قابل اشتعال در دما و فشار طبیعی است. اگرچه مقدار بسیار کمتری از نیتروژن و اکسیژن در جو زمین وجود دارد‌، اما دی اکسید کربن یکی از ترکیبات مهم هوای سیاره ماست. این گاز که یک گاز مهم گلخانه‌ای است در به دام انداختن گرما در [جو زمین](https://www.jahaneshimi.com/6481/%d8%ac%d9%88-%d8%b2%d9%85%db%8c%d9%86-%da%86%db%8c%d8%b3%d8%aa-%d9%88-%da%86%d9%87-%d8%a7%d9%87%d9%85%db%8c%d8%aa%db%8c-%d8%af%d8%b1-%d8%ad%d9%81%d8%b8-%d8%ad%db%8c%d8%a7%d8%aa-%d8%af%d8%a7%d8%b1/) کمک می‌کند و نقش سپر حرارتی ایفا می‌کند که بدون آن‌، سیاره ما بسیار سرد خواهد بود. با این حال، افزایش تدریجی غلظت CO2 در جو به گرم شدن کره زمین می‌انجامد و با افزایش تدریجی دمای جهانی، آب و هوای سیاره ما را گرم و بسیاری از عوامل طبیعی را مختل می‌کند.

## 1.4.1 آیا این گاز برای ما مزایا و کاربردی دارد؟ کاربردهای گاز دی اکسید کربن چیست؟کاربردها و مزایای گاز دی اکسید کربن کدامند؟

این گاز کاربردهای بسیار زیادی در طبیعت، صنعت و… دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در فتوسنتز که یک فرآیند بیوشیمیایی در گیاهان و برخی از موجودات میکروسکوپی است و باعث ایجاد غذا می‌شود، از دی اکسید کربن استفاده می‌شود. ارگانیسم‌های فتوسنتزی با ترکیب CO2 و آب (H2O) کربوهیدرات تولید می کنند (مانند قندها) و به عنوان محصول جانبی از خود اکسیژن ساطع می‌کنند، که اکسیژن در تنفس انسان و جانوران و تنفس سلولی گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین مکان‌هایی مانند جنگل‌ها و مناطقی از اقیانوس که موجودات میکروسکوپی فتوسنتزکننده دارد مانند دام‌های عظیم کربن عمل می‌کنند و از طریق فتوسنتز دی اکسید کربن را از جو می‌گیرند، کربن آن را جذب و اکسیژنش را آزاد می‌کنند. جو اولیه زمین در ابتدا میزان CO2 بسیار بالاتری داشت و تقریبا اکسیژن نداشت اما ظهور ارگانیسم‌های فتوسنتزی منجر به افزایش اکسیژن می‌شود که رشد موجودات تنفس کننده اکسیژن مانند؛ ما انسان‌ها را امکان پذیر می کند!



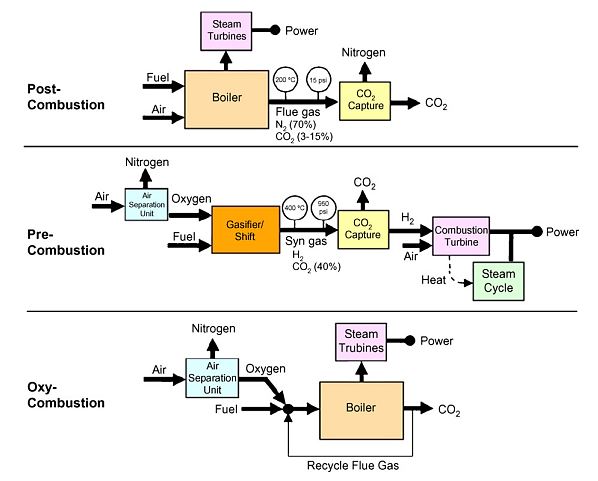
همان‌طور که گفته شد این گاز به صورت یک سپر حرارتی عمل می‌کند و مانع از خروج مقدار مشخصی از گرمای خورشید و سرد شدن کره زمین می‌شود.از قوطی‌های کوچک حاوی CO2 تحت فشار برای باد کردن لاستیک دوچرخه و جلیقه نجات و تأمین انرژی اسلحه‌های پینت بال استفاده می‌شود. گاز موجود در نوشابه گازدار توسط دی اکسید کربن تأمین می‌شود.این گاز در طی تخمیر توسط مخمر آزاد می‌شود و باعث ورآمدن خمیر نان می‌شود. دی ‌اکسید کربن سنگین است و بر روی آتش قرار می‌گیرد در نتیجه باعث خفگی آتش می‌شود و از این نظر برعکس اکسیژن عمل می‌کند، به همین دلیل از گاز CO2 در برخی از کپسول‌های آتش نشانی استفاده می‌شود.هنگام حل شدن در آب، اسید ضعیفی تشکیل به وجود می‌آورد که اسید کربنیک (H2CO3) نامیده می‌شود، این اسید کاربردهای بسیاری دارد. برای بی حرکت کردن حیوانات قبل از ذبح کردن از این گاز استفاده می‌شود.آمونیاک تحت فشار با دی اکسید کربن واکنش داده و کاربامات آمونیوم و سپس اوره را که  یک جز مهم در تولید [کودها](https://www.jahaneshimi.com/3347/%d9%81%d9%88%d8%a7%db%8c%d8%af-%d8%a7%d8%b3%d8%aa%d9%81%d8%a7%d8%af%d9%87-%d8%a7%d8%b2-%da%a9%d9%88%d8%af%d9%87%d8%a7%db%8c-%d8%b1%db%8c%d8%b2%d9%85%d8%ba%d8%b0%db%8c-%d8%af%d8%b1-%da%a9%d8%b4%d8%aa/)و پلاستیک‌هاست را تولید می‌کند.دی اکسید کربن نقشی اساسی در چرخه کربن زمین ایفا می‌کند.از نظر صنعتی برای بسیاری از برنامه‌های متنوع‌، گازهای دی اکسید کربن خارج شده از دودکش‌ را به عنوان یک محصول جانبی برای تهیه هیدروژن و سنتز آمونیاک بازیافت می‌کنند.در حالت مایع به عنوان یک حلال در کافئین و قهوه استفاده می‌شود.به عنوان یک گاز غیر مستقیم یا بی اثر از دی اکسید کربن در جوشکاری استفاده می‌شود.از این گاز در شرکت‌های نفتی برای بازیابی نفت استفاده می‌شود.

## 1.4.2 مضرات و عوارض گاز دی اکسید کربن

سوزاندن سوخت‌های فسیلی سبب افزایش انتشار گاز دی اکسید کربن می‌گردد، این موضوع باعث ایجاد شکافی در [لایه محافظ ازون](https://www.jahaneshimi.com/8620/%d9%84%d8%a7%db%8c%d9%87-%d8%a7%d9%88%d8%b2%d9%88%d9%86-%da%86%db%8c%d8%b3%d8%aa-%d9%88-%d8%a7%d8%b2-%d8%a7%d8%ab%d8%b1%d8%a7%d8%aa-%d8%ad%d9%81%d8%a7%d8%b8%d8%aa%db%8c-%d8%a2%d9%86-%da%86%d9%87/) که کره زمین را در برابر اشعه‌های مضر محافظت می‌کند، می‌شود. در نتیجه اشعه مادون قرمز بدون مانع به سطح زمین می‌رسد و دمای کره زمین افزایش می‌یابد به این فعل و انفعالات اثر گلخانه‌ای می‌گویند.از آنجا که CO2 در اثر سوختن سوخت‌های فسیلی در جو ما ایجاد می‌شود یک آلاینده جوی محسوب می‌شود و مقادیر بالای آن باعث گرم شدن هوای کره‌ زمین می‌شود، که این گرم شدن سبب تغییرات آب و هوایی بسیاری می‌شود و اثرات مخربی مانند؛ آب شدن یخچال‌های طبیعی، ذوب شدن برف در بالای کوه‌ها و دو قطب می‌شود که این امر باعث افزایش سطح آب دریا می‌شود، بنابراین برخی از شهرهای ساحلی و زیستگاه‌های جانوران غرق می‌شوند.قرار گرفتن انسان در معرض غلظت‌ بالای ۴ درصد دی اکسید کربن ممکن است ابتدا باعث احساس تنگی نفس و پس از مدت بسیار طولانی از طریق جایگزین شدن به جای اکسیژن، موجب بیهوشی، خفگی و در نهایت مرگ شود. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش سطح CO2، مردم در یادگیری، انجام کارهای ساده و پیچیده و حتی تصمیم گیری بسیار دچار مشکل می‌شوند و این اعمال برای آن‌ها دشوارتر خواهد شد. غلظت بالای گاز دی اکسیدکربن باعث بروز بیماری مخدر می‌شود و جریان خون مغزی و فشار داخل جمجمه را افزایش می دهد.

## 1.4.3 روش‌هاي تغليظ و حذف دي‌اكسيدكربن

هدف از تغليظ دي‌اكسيدكربن بدست آوردن يك جريان غليظ از دودكش كارخانجات براي انتقال به مكان‌هاي ذخيره يا مصرف آن مي باشد. معمولاً تغليظ دي‌اكسيدكربن در واحدهاي بزرگ صنعتي مانند نيروگاههاي برق و صنايع بزرگ امكان پذير و به صرفه مي باشد كه در نتيجه آن سوخت و برقي بدون توليد گاز دي‌اكسيدكربن براي استفاده در مقياس كوچك مانند حمل و نقل و يا استفاده خانگي در اختيار همگان قرار مي دهد. انرژي مورد نياز براي تغليظ دي‌اكسيدكربن باعث كاهش بازدهي توليد برق و يا ديگر فرآيندها شده و باعث مي شود ميزان مصرف سوخت، ضايعات جامد و ديگر اثرات زيست محيطي واحدهاي صنعتي افزايش يابد. اما با افزايش بازدهي نيروگاهها و ديگر واحدهاي صنعتي، اين ميزان انرژي و ضايعات براي جذب و تغليظ دي‌اكسيدكربن در اين واحدها با اثر آن در كاهش اثرات گلخانه اي و مخرب دي‌اكسيدكربن بر محيط زيست برابري مي كند. كاهش ميزان انرژي و هزينه مورد نياز براي جذب و تغليظ دي‌اكسيدكربن در كنار افزايش بازدهي واحدها يكي از اهداف مهم در زمينه كاهش گازهاي گلخانه اي مي باشد. امروزه دي‌اكسيدكربن در برخي از واحدهاي صنعتي مانند فرآيندهاي تصفيه گاز طبيعي و واحدهاي توليد آمونياك جدا مي شود. البته اين جدا سازي نه به منظور ذخيره سازي دي‌اكسيدكربن بلكه به علت نياز فرآيند به اين كار انجام مي شود. اما هنوز از اين روش‌هاي تغليظ براي جداسازي در واحدهاي بزرگ صنعتي مانند نيروگاهها كه منبع اصلي انتشار دي‌اكسيدكربن مي باشند، استفاده نشده است. هم اكنون سه روش اصلي براي تغليظ و جدا سازي دي‌اكسيدكربن مورد استفاده قرار مي گيرد که در شکل 2 نمایش داده شده است.



شكل 2: سيستم‌هاي جذب دي‌اكسيدكربن.

1. روش پس از احتراق[[1]](#footnote-1) : كه دي‌اكسيدكربن را از گازهاي خروجي حاصل از احتراق سوخت‌ها جداسازي ميکنند.
2. روش احتراق سوخت-اکسیژن[[2]](#footnote-2): سوخت كه به جاي هوا از اكسيژن براي احتراق استفاده مي كنند و در نتيجه گازهاي خروجي عمدتاً شامل بخار آب و دي‌اكسيدكربن مي باشند و جداسازي دي‌اكسيدكربن از نيتروژن مطرح نبوده و دي‌اكسيدكربن به راحتي با سرد كردن جدا ميشود. اين روش‌ها هم چنان در مرحله تحقيق و توسعه مي باشند.
3. روش‌هاي پيش احتراقي[[3]](#footnote-3):كه در يك فرآيند، سوخت اوليه را در يك راكتور تبديل به دي‌اكسيدكربن و هيدروژنمي كند كه دي‌اكسيدكربن جدا شده و هيدروژن به عنوان سوخت استفاده مي شود. براي نيروگاههاي توليد برق روش‌هاي تجاري جذب دي‌اكسيدكربن مي تواند ميزان انتشار آن را به حدود 90-80 %كاهش دهد و البته هزينه توليد برق براي يك نيروگاه سوخت زغال حدود 85-40، %براي يك واحد سوخت گاز طبيعي حدود 70-35 % افزايش میابد.

كمترين هزينه‌هاي جذب و تغليظ دي‌اكسيدكربن مربوط به واحدهاي توليد هيدروژن مي باشد. زيرا در اين واحدها به علت نياز فرآيند جداسازي مي شود. در همه موارد جذب تغليظ دي‌اكسيدكربن به شدت به فاكتورهاي فرآيندي، اقتصادي و مالي مربوط به طراحي و شرايط عملياتي واحدهاي عملياتي و سيستم‌هاي تغليظ دي‌اكسيدكربن وابسته است، بنابراين براي مقايسه دقيق تكنولوژيهاي مختلف از لحاظ اقتصادي بايد بسياري از پارامترها مشخص شوند. روش‌هاي تبديل بهبود يافته تغليظ دي‌اكسيدكربن مي توانند به ميزان قابل توجهي هزينه‌هاي تحميلي و مصرف انرژي اضافي را كاهش دهند. با وجود ابهام و عدم اطمينان قطعي مي توان تخمين زد كه در يك دهه آينده هزينه جذب دي‌اكسيدكربن به ميزان 30-20% كاهش يابد.

## 1.4.4 تكنولوژي‌هاي جذب و تغليظ دي‌اكسيدكربن

سيستم‌هاي تغليظ دي‌اكسيدكربن از تكنولوژي‌هاي شناخته شده براي جداسازي و جذب گاز استفاده مي كنند كه شامل موارد زير ميباشند:

* جداسازي بوسيله جاذب‌ها و حلال‌ها
* جداسازي توسط غشاء‌ها
* تقطير جريان گاز و جداسازي توسط سرد كردن
* سيستم‌هاي جذب واحدهاي صنعتي مانند شيرين سازي گاز طبيعي وصنايع توليد فولاد، صنايع توليد سيمان و صنايع توليد آمونياك.

# 1.5 روش‌هاي مصرف دي‌اكسيدكربن:

برخي از روشهايي كه اخيرا جهت مصرف دي‌اكسيدكربن پيشنهاد شده اند به شرح زير مي باشند:

1. تبديل به گاز ذغال سنگ توسط و تهيه گاز قابل احتراق منوكسيد كربن.
2. تبديل كاتاليستي متان با دي‌اكسيدكربن (تبديل خشك) به گاز سنتز كه در مرحله بعدي گاز سنتز مي تواند به محصولات پتروشيمي و يا هيدروكربن‌هاي مايع تبديل گردد.

# 1.6 روش‌هاي ذخيره سازي دي‌اكسيدكربن

## 1.6.1 ذخيره سازي دي‌اكسيدكربن در اعماق زمين

ذخيره سازي دي‌اكسيدكربن در اعماق زمين يكي از روشهاي جلوگيري از انتشار گاز دي‌اكسيدكربن به اتمسفر مي باشد. اين روش توسط جذب دي‌اكسيدكربن از منابع ثابت و انتقال آن عموماً به وسيله خطوط لوله و تزريق آن به عمق مناسبي از لايه‌هاي زمين امكان پذير مي باشد. درلایه زیر پوسته زمین منطقه منابع عظيمي از كربن شامل ذغال سنگ، نفت، گاز و سنگ‌هاي كربناتي وجود دارد. ذخيره سازي دي‌اكسيدكربن در لايه‌هاي زمين فرآيندي است كه براي صدها ميليون سال اتفاق افتاده است. دي‌اكسيدكربن حاصله از فعاليت‌هاي بيولوژيك، واكنش‌هاي شيميايي بين سنگ‌ها و تجمع سيالات در لايه‌هاي زمين بصورت كربنات‌ها، محلول، گازي و يا فوق بحراني جمع شده است. تزريق دي‌اكسيدكربن توسط بشر براي اولين بار در اوايل دهه 1970 در آمريكا به عنوان روشي براي ازدياد برداشت نفت انجام شد. حذف دي‌اكسيدكربن به عنوان يك گاز گلخانه اي به اين روش نيز در همين دهه پيشنهادگرديده اما تا سال 1990 تحقيقات كمي در اين زمينه انجام شده تا اينكه عملي بودن آن ثابت گرديد. در كمتر از يك دهه، ذخيره سازي دي‌اكسيدكربن از يك مفهوم در حال بررسي به يكي از پتانسيل‌هاي مهم براي جلوگيري از انتشار گازهاي گلخانه اي تبديل شد. دراين روش ابتدا دي‌اكسيدكربن بايد فشرده شود كه معمولاً سيال به صورت فوق بحراني در مي آيد. بر اساس سرعت تغييرات دما در لايه‌هاي زمين، دانسيته دي‌اكسيدكربن با افزايش عمق، افزايش مي يابد تا در عمق حدود 800 متر به حالت فوق بحراني مي رسد.

## 1.6.2 ذخيره سازي در اقيانوس‌ها

دي‌اكسيدكربن را مي توان با تزريق در اعماق اقيانوس‌ها براي قرن‌ها محبوس كرد. حدود 25 سال است كه محققين به صورت آزمايشگاهي و تئوري روي اين موضوع تحقيق مي‌كنند اما همچنان به صورت كاملا عملي انجام نشده است. افزايش غلظت دي‌اكسيدكربن در اتمسفر باعث مي‌شود كه سرعت جذب دي‌اكسيدكربن توسط اقيانوس‌ها به حدود 7 گيگا تن در سال برسد. در طي دويست سال گذشته اقيانوس‌ها حدود 500 گيگا تن از 1300 گيگا تن دي‌اكسيدكربن موجود در اتمسفر را جذب كرده‌اند كه باعث شده است كه PH در سطح اقيانوس‌ها حدود 0.1 كاهش يابد. در حالي كه در اعماق تغييري حاصل نشده است. اقيانوس‌ها در حدود%70 از سطح كره زمين را با عمق متوسط 3800 متر پوشانده‌اند. در نتيجه از لحاظ تئوري هيچ محدوديتي براي حجم دي‌اكسيدكربن قابل جذب توسط آنها وجود ندارد. اما ميزان دي‌اكسيدكربن ذخيره شده در مقياس هزاران سال بسته به تعادل اقيانوس‌ها با اتمسفر دارد. در طي هزار سال، دي‌اكسيدكربن تزريق شده به اعماق اقيانوس‌ها به تعادل با اتمسفر مي‌رسد. تزريق چند گيگا تن دي‌اكسيدكربن باعث تغييرات در شرايط شيميايي ناحيه تزريق مي‌شود اما در صورتي كه در مقياس صدها گيگا تن تزريق انجام شود، باعث مي‌شود كه كل حجم اقيانوس دچار تغييرات در برخي پارامترها شود .آزمايش‌ها نشان داده است كه دي‌اكسيدكربن اضافه شده باعث آسيب رسيدن به ارگانيسم‌هاي دريايي مي‌شود. اثرات افزايش ميزان دي‌اكسيدكربن حداكثر در مقياس چندين ماه مورد بررسي قرار گرفته است. پديده‌هاي مشاهده شده شامل كاهش سيركولاسيون اكسيژن در آب و افزايش مرگ و مير ميكروارگانيسم‌ها در طي مدت زمان نسبتا طولاني مي‌باشد. تغييرات حاصل از تزريق دي‌اكسيدكربن روي ميكروارگانيسم‌ها باعث ايجاد تغييراتي روي اكوسيستم مي شود كه در زمينه تغييرات احتمالي روي اكوسيستم اعماق اقيانوس آزمايشات زيادي انجام نشده است. اما پيش بيني مي شود كه با افزايش غلظت دي‌اكسيدكربن اين عوارض افزايش يابد. همچنين مشخص نمي شود كه كدام يك از اجزا اكوسيستم خود را با شرايط موجود مطابقت مي دهند.

با توجه به اهميت بحث گرم شدن كره زمين در اين کتاب به بررسي روشهاي جذب و ذخيره سازي دي‌اكسيدكربن به عنوان عامل اصلي پديده گلخانه اي پرداخته خواهد شد. در ابتدا روشهاي تغليظ دي‌اكسيدكربن در سه بخش روشهاي پيش احتراقي، روشهاي اكسيژن سوخت و روشهاي پس احتراقي مورد بررسي قرار گرفته است. بررسي‌ها نشان داده است كه بهترين گزينه براي اضافه كردن قسمت جداسازي دي‌اكسيدكربن در ایران، استفاده از واحدهاي ساخته شده روش پس احتراقي مي‌باشد كه از جمله اين روش‌ها مي توان به روش جداسازي با آمين و استفاده از سيكلهاي كربوناسيون و تكليس اكسيد كلسيم اشاره نمود. همچنين مسئله بعدي در اين زمينه مرحله ذخيره سازي پس از فرايند جداسازي مي‌باشد كه در اين زمينه نيز مخازن قديمي نفت و گاز و اعماق اقيانوس‌ها از جمله روش‌هاي پيشنهادي توسط محققين مي باشند كه مورد دوم به دليل اثرات گسترده زيست محيطي آن همچنان مورد ترديد مي باشد.

# 2. فرایندهای به دام اندازی(Capturing)

# 2.1 جذب(Absorption)

جذب فرایندی شیمیایی و فیزیکی است که در طی آن یک ماده بر دیگری می‌چسبد. اگر حلال با CO2 واکنش دهد و ترکیبات شیمیایی تشکیل دهد، این فرآیند به عنوان جذب شیمیایی شناخته می شود. از طرف دیگر، اگر حلال از نظر شیمیایی بی اثر باشد، با CO2 واکنش نشان نمی دهد که این فرآیند جذب فیزیکی نامیده می شود[[1](#_ENREF_1)]. باید توجه داشت که جذب گازی خود شامل جذب شیمیایی و فیزیکی می‌باشد که در این دو فرایند جای می‌گیرند. فرایندهای دیگری برای حذف کربن دی اکسید مثل جذب سطحی و جذب غشایی نیز وجود دارند.

## 2.1.1 جذب فیزیکی

به طور کلی عملیات جذب فیزیکی بر پایه قانون هنری می باشد . دی اکسید کربن تحت فشار بالا و دمای پایین ، جذب در فشار کم و دمای بالا ، بازیابی می گردد. این فن آوری به طور گسترده در بسیاری از فرآیندهای صنعتی از جمله سنتز گاز طبیعی و تولید هیدروژن همراه با میزان بالا ی دی اکسیدکربن کاربرد دارد که برخی از این فرآیندهای تجاری موجود عبارتنداز : فرآیند Selexol، فرآیند Rectisol، فرآیند Purisol، فرآیند Morphysorb و فرآیند Fluor . هر کدام از این فرآیندها جاذب‌های مخصوص به خود را دارند مانند جاذب دی متیل اثر یا پروپیلن گلایکول برای فرآیند Selexol متانول برای فرایند Rectisol - متیل پیرولیدون برای فرآیند Purisol ، مورفولین برای فرآیند Morphysorb و پروبیلی کربنات جهت فرآیند Fluor مورد استفاده قرار می گیرد[[2](#_ENREF_2)].

جذب فیزیکی از حلال‌های فیزیکی برای جذب CO2 بدون واکنش شیمیایی استفاده می کند. نیروی محرکه برای جذب CO2 در حلال به دلیل حلالیت است. به طور کلی حلالیت با افزایش فشار و کاهش دما افزایش می یابد. از این رو، بهترین شرایط برای فرآیند جذب CO2 در فشار بالا و دمای پایین است. معمولاً زمانی که فشار جزئی CO2 بیش از 3.5 بار است و حذف عمده CO2 مورد نیاز است، جذب فیزیکی در نظر گرفته می شود[[3](#_ENREF_3)]. سایر اجزای موجود در جریان گاز نیز بسته به غلظت و حلالیت در حلال‌ها جذب می شوند اهمیت دیگر داشتن غلظت CO2 بالا و فشار جزئی در گاز خوراک این است که تجهیزات جذب CO2 را می توان در اندازه کوچکتر و هدر رفت انرژی کمتری برای بازسازی در مقایسه با گاز تغذیه با غلظت CO2 کم و فشار جزئی ساخت. همچنین چندین مزیت دیگر استفاده از جذب فیزیکی به عنوان فناوری حذف CO2 وجود دارد. اولین و مهم ترین آن، این است که سرمایه و هزینه عملیاتی نسبتا پایینی دارد. علاوه بر این، خطوط لوله و تجهیزات نیازی به فولاد آلیاژی ندارند زیرا حلال خورنده نیست. این امر باعث کاهش بیشتر هزینه سرمایه شده است. علاوه بر این، هیچ گرمای خارجی برای فرآیند جذب مورد نیاز نیست و تنها مصرف انرژی قابل توجه به دلیل پمپ‌های بازیافت حلال و کمپرسور گاز بازیافت است. بنابراین، فرآیند عملیاتی را می توان با هزینه کم انجام داد، که آن را در مقایسه با سایر فناوری‌ها یک مزیت می کند. علاوه بر این، فرآیند بازسازی حلال را می توان به راحتی با کاهش فشار، حذف گاز بی اثر یا بازسازی حرارتی انجام داد. کاهش فشار و حذف گاز بی اثر فقط به حداقل انرژی نیاز دارد در حالی که بازسازی حرارتی ممکن است به مصرف انرژی بیشتر نیاز داشته باشد اما همچنان انرژی کمتری نسبت به جذب شیمیایی لازم دارد. به غیر از آن، جذب فیزیکی قادر به جذب انتخابی H2S است. ناخالصی‌های گاز جزئی مانندCOS و مرکاپتان‌ها نیز می توانند بدون تجزیه حلال جذب شوند. با این حال، عیب اصلی استفاده از فرآیند جذب فیزیکی، انرژی بالای مورد نیاز برای فشرده سازی گاز خوراک به فشار بالا است. این مشکل ممکن است برای برخی از کاربردها مانند جذب CO2 از چاه گاز طبیعی مشکلی نداشته باشد. جریان گاز ممکن است نیازی به فشرده سازی نداشته باشد زیرا منشا گاز ممکن است در فشار بالا (بیش از 100 بار) باشد.[[4](#_ENREF_4)]

تئوری جذب فیزیکی بدین گونه است که حلالیت CO2 در حلال در فشار بالا به مقدار بالاتری افزایش می یابد. این فرآیند در کنداکتور مایع گاز فشار بالا اتفاق می افتد. پس از آن، مایع با فشار کم به یک فلاش تانک فرستاده می شود که در آن حباب CO2 تشکیل شده و از حلال آزاد می شود. حالت اولیه فرآیند دفع در این نقطه اتفاق می افتد و در نهایت به تعادل می رسد که در آن CO2 در مایع فوق اشباع نمی شود[[5](#_ENREF_5)].

در اربطه با فرایندهای فوق‌الذکر گفتنی است که در فرآیند Selexol می توان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن را تحت یک عملیات با دمای پایین جذب و با کاهش فشار جاذب را احیا نمود . استفاده از فشار پایین ، سمیت و خوردگی کم حلال ، مزایای استفاده از این فرآیند هستند استفاده از روش Rectisol در تصفیه گاز حاوی گوگرد ، دارای خوردگی کمتـر حـلال و پایداری جـاذب بوده و به همین دلیل بیشتر مورد توجه قرار می گیرد . فرآیند Purisol به دلیل مصرف انرژی زیاد ، بسیار کم مورد استفاده قرار می گیرد روش Morphysorb فرآیند نسبتا جدیدی است که هزینه عملیاتی آن ۳۰ تا ۴۰ درصد روش Selexol مـی باشـد[[6](#_ENREF_6)]. بعـد از روش Selexol روش Fluor مورد استفاده می باشد که برای گازهای حاوی دی اکسید کربن با فشار نسبی بالاتر از psig ۶۰ مناسب بوده و حلالیست دی اکسید کرین در این فرآیند بالا می باشد[[2](#_ENREF_2)].

## 2.1.2 جذب شیمیایی

جذب شیمیایی برای فشارهای جزئی CO2 کم تا متوسط ​​ترجیح داده می شود. از آنجایی که CO2 یک گاز اسیدی است، جذب شیمیایی CO2 از جریان‌های گازی مانند گازهای دودکش به واکنش‌های خنثی سازی اسید باز با استفاده از حلال‌های اساسی بستگی دارد. CO2 با حلال‌های شیمیایی واکنش می دهد و یک ترکیب میانی با پیوند ضعیف ایجاد می کند که سپس با اعمال گرما تجزیه می شود و حلال اصلی را بازسازی می کند و یک جریان CO2 خالص تولید می کند. حلال‌های تخصصی بیش از 60 سال پیش برای حذف CO2 از گاز طبیعی ناخالص ساخته شدند و عملیات گاز طبیعی امروزه همچنان از این حلال‌ها استفاده می کند. علاوه بر این، چندین نیروگاه و سایر نیروگاه‌های صنعتی از حلال‌های مشابه یا یکسان برای بازیابی CO2 از گازهای دودکش برای کاربرد در صنایع غذایی و شیمیایی استفاده می‌کنند. در نهایت، انواع روش‌های جایگزین برای جداسازی CO2 از مخلوط گازهای دودکش در حین تولید هیدروژن برای پالایش نفت، تولید آمونیاک و سایر صنایع شیمیایی استفاده می‌شود. انتخاب یک فناوری برای یک کاربرد جذب معین به عوامل زیادی بستگی دارد، از جمله فشار جزئی CO2 در جریان گاز، میزان بازیابی CO2 مورد نیاز، بازسازی حلال، حساسیت به ناخالصی‌ها، مانند گازهای اسیدی، ذرات، خلوص محصول مورد نظر CO2، سرمایه و هزینه‌های عملیاتی فرآیند، هزینه مواد افزودنی لازم برای غلبه بر رسوب و خوردگی و در صورت لزوم، اثرات زیست محیطی[[7](#_ENREF_7)].

## 2.1.3 تکنولوژی جذب آمین

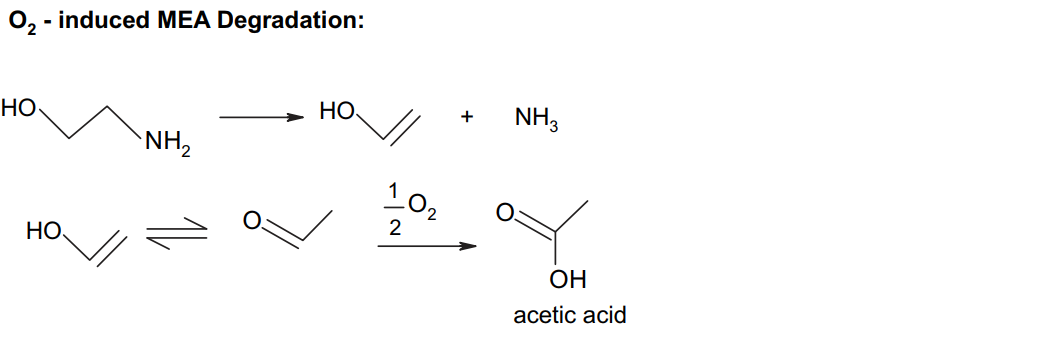
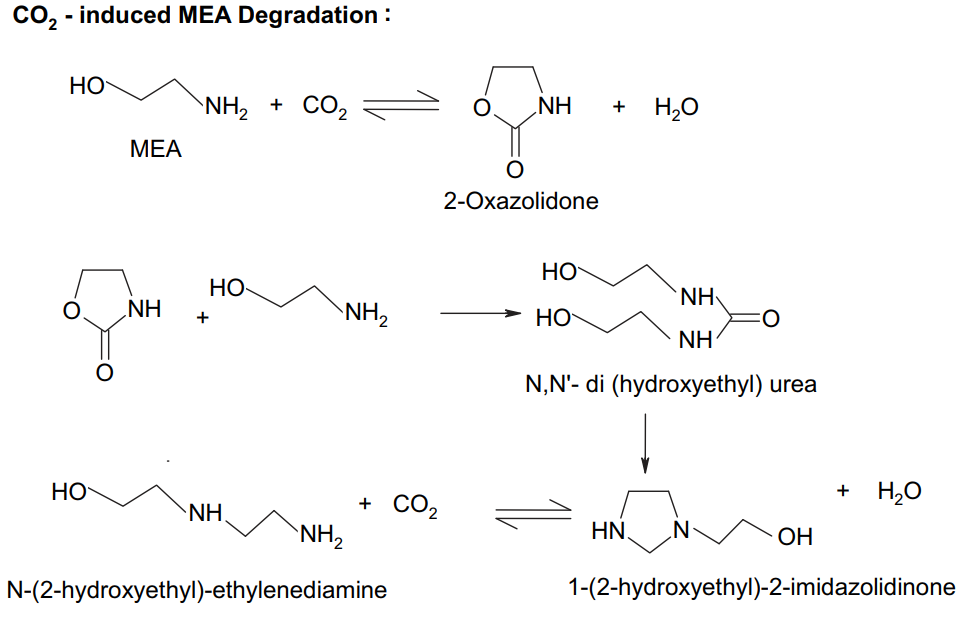
فن‌آوری جذب/عریان سازی(Stripping) با استفاده از محلول آمینی مانند مونو اتانول آمین (MEA)یک فناوری تجاری‌سازی شده است که به مدت 60 سال در صنعت گاز طبیعی استفاده می‌شود و به عنوان بالغ‌ترین فناوری در نظر گرفته می‌شود. صنعت گاز طبیعی از MEA برای جذب CO2 از گاز طبیعی استفاده می کند. فرآیندهای تجاری جذب MEA وجود دارد که با آن CO2 از جریان دود حاصل از احتراق حذف می شود. چنین فرآیندهایی اجازه می دهد تا محلول MEA با گاز دودکش در یک جاذب که در آن CO2 توسط محلول جذب می شود، تماس پیدا کند. هنگامی که در یک نیروگاه برای جذب CO2 استفاده می شود، گاز دودکش از طریق حلال در یک ستون جاذب بسته بندی شده حباب می شود. این عمل ترجیحا جایی که حلال، CO2 را از گاز دودکش حذف می کند انجام می‌شود. پس از آن، حلال از یک واحد احیاکننده عبور می کند، جایی که CO2 جذب شده با جریان مخالف بخار در 100 الی 200 درجه سانتیگراد از حلال جدا می شود. بخار آب متراکم می شود و یک جریان CO2 بسیار متمرکز (بیش از %99) ایجاد می کند که ممکن است برای استفاده تجاری یا ذخیره سازی فشرده شود. حلال بدون چربی تا دمای 40 الی 65 درجه سانتیگراد خنک می شود و در ستون جذب بازیافت می شود[[8](#_ENREF_8)]. این فرآیند به طور کلی غیراقتصادی است زیرا به اندازه تجهیزات بزرگ و ورودی انرژی فشرده نیاز دارد. نرخ بازیافت CO2 برای MEAحدود 98% است[[9](#_ENREF_9)]. واکنش اساسی برای این فرآیند عبارت است از:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

در طی فرآیند جذب، واکنش از چپ به راست ادامه می یابد. در طی بازسازی، واکنش از راست به چپ ادامه می یابد. فرآیند MEA با معایب زیر برای جداسازی CO2 از گازهای دودکش مشکل دارد:

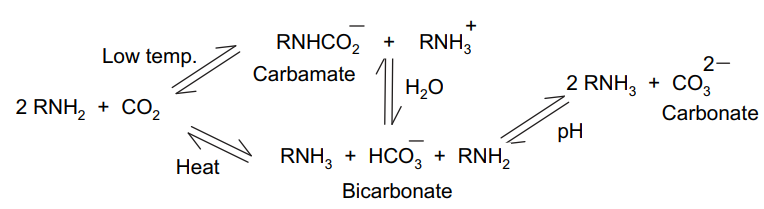
1. ظرفیت بارگیری دی اکسید کربن کم (گرم CO2 جذب شده و گرم جاذب)
2. نرخ خوردگی تجهیزات بالا
3. تخریب آمین توسطSO2، NO2، HCl و HF و اکسیژن در گاز دودکش که باعث ایجاد نرخ جذب بالا می شود.
4. مصرف انرژی بالا در طول بازسازی جاذب دمای بالا

هنگام جذب CO2 از زغال سنگ یا دود احتراق نفتی، فرآیند MEA مستلزم آن است که SO2 ابتدا از جریان گاز دودکش حذف شود، زیرا MEA توسط SO2 و اکسیژن تجزیه می شود و محصولات تجزیه شده برگشت ناپذیر را تشکیل می دهد همانطور که در طرح واکنش 1 نشان داده شده است:

تجزیه MEA توسط CO2 و O2

با اینکه بیشتر SO2 از گاز دودکش در یک واحد گوگرد زدایی گازهای دودکش بالادست حذف شده است اما به دلیل تخریب زیاد، هزینه بازسازی MEA زیاد است. NOx نیز باید در نهایت از گاز دودکش قبل از ورود در هوا حذف شود تا مشکلات انتشار گاز را در حال و آینده نداشته باشیم.

علاوه بر MEA، دی اتانول آمین (DEA) و متیل دی اتانول آمین (MDEA) اغلب به عنوان جاذب استفاده می شود. مکانیسم پیشنهادی واکنش بین CO2 و آمین‌ها در زیر نشان داده شده است (شکل 2).

شکل 2: توالی واکنش پیشنهادی برای جذب دی اکسید کربن توسط سیستم‌های مبتنی بر آمین مایع

طبق این مکانیسم، اکثر CO2 جذب شده منجر به تشکیل بی کربنات در سیستم جذب آمین مایع می شود. در محیط‌های آبی، برای تشکیل ترکیبات بی کربنات پایدار که منجر به جذب CO2 می شود، نیاز به 2 mole amine/mole CO2 وجود دارد.

گزارش شده است آمین‌های مخلوط کیفیت مطلوب آمین‌های تکی را به حداکثر می رساند. ایدم و همکاران [[10](#_ENREF_10)] کاهش قابل توجهی در انرژی مورد نیاز و کاهش متوسطی در نرخ گردش برای آمیزه‌های آمین نسبت به سیستم تک آمین مربوطه با غلظت آمین کل مشابه گزارش کرد. آنها عملکرد MEA آبی را با عملکرد MEA/MDEA آبی (نسبت مولی 4/1) با غلظت آمین کل به عنوان تابعی از زمان عملیات با استفاده از دو نیروگاه آزمایشی جذب CO2 مقایسه کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از یک محلول مخلوط MEA/MDEA به جای یک محلول MEA واحد در یک محیط صنعتی یک کارخانه جذب CO2، به کاهش زیادی از ظرفیت گرمایی دست یافت، اگرچه این مزیت بستگی به این دارد که آیا پایداری شیمیایی حلال می‌تواند حفظ شود یا خیر.

در سال‌های اخیر، تلاش زیادی برای توسعه راه‌حل‌های جذب جدید با عملکرد جذب CO2 افزایش یافته است. تمرکز در استفاده از آمین‌های دارای گروه استری، از جمله amino ether ، amino alcohol ، 2-substituted piperidine alcohol و مشتقات piperazine ، در محلول برای حذف دی اکسید کربن از گازهای اسیدی با فرآیند پاک‌سازی در فناوری جذب شیمیایی بوده است. آمین‌های دارای استر دارای یک گروه آمینو هستند که به یک گروه آلکیل حجیم متصل است، به عنوان مثال میتوان به2-amino-2-methyl-1-propanol اشاره کرد. نیتروژن به سرعت و به طور مستقیم با CO2 واکنش می دهد تا CO2 را مطابق توالی واکنش زیر به محلول برساند:

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

که در آن R یک گروه آلکانول است.

واکنش فوق سنگ بنای اختراع حاضر است، زیرا واکنشی است که توسط carbonic anhydrase سرعت بخشی می شود. سپس محصول واکنش، کاربامات (RNHCOO) ، را می توان بر اساس واکنش زیر بهbicarbonate (HCO3) هیدرولیز کرد:

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

واکنش‌های (2) و (3) نقش عمده‌ای در فرآیند جذب CO2 با استفاده از آمین‌های استری دارند.

بازیگران اصلی در عرصه آمین شامل صنایع سنگین میتسوبیشی (MHI) و فلور هستند که فرآیند Economine FG خود را ارائه می دهد. توسعه آمین استری به دلیل مزایای قابل توجهی که ارائه می دهد، که شامل ماهیت خورندگی بسیار کم و عدم نیاز به بازدارنده خورنده بر خلاف MEA، به عنوان یک پیشرفت در نظر گرفته می شود. علاوه بر این، جذب و احیا بهتر CO2، تجزیه کم‌تر، سرعت گردش کم‌تر و از دست دادن حلال کمتری در مقایسه با دیگر سیستم‌های مبتنی بر آمین دارد. همه این ویژگی‌ها منجر به کاهش هزینه عملیاتی می شود. نمونه‌هایی از آمین‌های استری عبارتند از

2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) و حلال‌های اختصاصی که توسط صنایع سنگین میتسوبیشی

، KS-1، KS-2 و KS-3 به بازار عرضه می‌شوند. تلاش‌های تحقیقاتی زیادی برای حلال‌های بهبودیافته برای بهبود بارگذاری CO2، کاهش انرژی مورد نیاز برای گردش و بازسازی حلال و غلبه بر تخریب حلال انجام شده است. شواهدی وجود دارد که کارایی فرآیند جذب را می توان با طراحی دقیق مخلوطی از حلال‌ها به طور قابل ملاحظه ای بهبود بخشید[[2](#_ENREF_2)].

## 2.1.3 جذب سطحی

با وجود اینکه فرآیندهای جذب توسط آمین دارای برخی معایب نظير ايجـاد سـطح تماس کم بین گاز و مایع ، بارگیری پایین دی اکسید کربن و خوردگی شدید جاذب می باشد، ممکن است فرآیندهای جذب سطحی یک جایگزین مناسب جهت دستیابی به هدف جذب بهتر دی اکسید کربن باشند. هر چند در این روش جهت کنترل سرعت انتقال جرم برای جذب دی اکسید کربن از گاز دودکش، منافذ جاذب مزوحفره سه برابر بزرگتر از روش جذب توسط آمین می باشد. برخی از مشکلات موجود در روش جذب سطحی مانند ظرفیت جذب پایین دی اکسید کربن در فشار کم و همچنین کاهش بازده در حضور بخار آب و گازهای دیگر، مانع از کاربرد عملی جذب سطحی دی اکسید کربن شده است.

با مروری گسترده بر مطالعاتی در زمینه جذب سطحی دی اکسید کربن می توان دریافت که یک جاذب مناسب جهت جذب بهتر باید دارای مواد اولیه کم هزینه، ظرفیت گرمایی پایین، سرعت، ظرفیت جذب و انتخاب پذیری بالای دی اکسید کربن و پایداری مکانیکی و حرارتی در کل فرایند باشد[[6](#_ENREF_6)].

## 2.1.4 مایع یونی

اخیرا مایعات یونی با توجه به مزیت‌های منحصر به فرد خود نظیر فشار بخار کم و پایداری حرارتی خوب، قطبیت بالا و غیر سمی بودن توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. مایع بونی به طور گسترده به عنوان حلال برای سنتز به کار گرفته می شود. به علاوه مایع یونی در جذب دی اکسید کربن به هر دو روش جذب فیزیکی و شیمیایی به کار می رود. در جذب فیزیکی، عوامل موثری بر حلالیت دی اکسید کرین در مایع بونی دخیل هستند که برای نمونه می توان حجم آزاد و اندازه آنیون و کاتیون مایع بونی را نام برد. به طور کلی آنیون در مایع بونی نسبت به کاتیون تأثیر بیشتری در حلالیت دی اکسید کـرین دارد.

آنتونی و همکاران [[11](#_ENREF_11)] در تحقیقی دریافتند که حلالیت کم دی اکسید کربن تحت تأثیر کاتیون‌هایی مانند آمونیوم و پیرولیدینیوم قرار دارد. به دنبال آن نشان دادند که حلالیت دی اکسید کربن در تری ‌فلورو‌متیل سولفونيل آميد (TF2N) بیشتر از از تترافلوروبرات (BF6) و هگزافلوروفسفات (PF6) می باشد و این امر نشان دهنده اثر قابل توجه آنیون در حلالیت دی اکسید کربن است.

جهت استفاده از مایع بونی در روش جذب شیمیایی، ساختار مایع بونی حاوی گروه عاملی آمینه که می تواند با دی اکسید کربن واکنش نشان دهد، مد منتظر می باشد . این نوع از مایع یونی، مایع یونی ویژه (Task Specific Ionic Liquid یا TSIL) نامیده می شود. این نامگذاری به دلیل ساختن منابع بونی جدید با خواص مطلوب است.

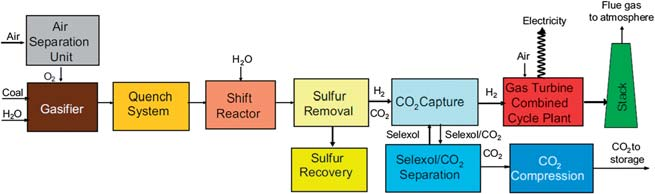
باتس و همکاران [[12](#_ENREF_12)] دریافتند که در روش جذب فیزیکی، ظرفیت جذب دی اکسید کربن در TSIL سه برابر بیشتر از مایع یونی می باشد. با این حال، محدودیت‌هایی از TSIL برای جذب دی اکسید کربن وجود دارد، همان ویسکوزینه بالای آن می باشد که ناشی از پیوند هیدروژنی بین آنیون و کاتیون است.

ژانگ و همکاران [[13](#_ENREF_13)] به منظور افزایش ظرفیت جذب دی اکسید کربن در مایع یونی، استفاده از مایعات یونی تقویت شده (SILs) را پیشنهاد کردند. ویسکوزیته مایع یونی با جذب دی اکسید کربن به طور قابل توجهی افزایش می یابد، به طوری که به بالاترین مقدار خود یعنی 0.2 مول از دی اکسید کرین در هر مول مایع بونی می رسد. با این حال زمانی که منافذ آن با سیلیکاژل تقویت شود ظرفیت جذب دی اکسید کربن را می توان به 1.2 مول دی اکسید کربن در هر مول از مایع یونی رساند. این تقویت کننده متخلخل نه تنها سطحی در حدود ۵۰۰ متر مربع بر گرم برای بارگذاری مایع یونی فراهم می کند بلکه شرایط جذب فیزیکی دی اکسید کربن روی این سطح را نیز، بوجود می آورد.

## 2.15 فرایند IGCC

سیستم‌های جمع‌آوری CO2 پیش از احتراق کنونی از حلال‌هایی استفاده می‌کنند که به طور انتخابی CO2 و سایر گازهای اسیدی مانند H2S را از جریان گاز جذب می‌کنند. جذب CO2 را می توان به جذب شیمیایی (مورد استفاده در جذب قبل و بعد از احتراق) و جذب فیزیکی (مورد استفاده در جذب قبل از احتراق) تقسیم کرد.

به عنوان مثال، در یک فرآیند IGCC زغال سنگ (شکل 7)، که برای جذب طراحی شده است، غلظت CO2 در فشار 20 بار یا بیشتر حدود 35 الی 40 درصد خواهد بود. بنابراین، حلال‌های فیزیکی، مانند سلکسول، می‌توانند برای جذب قبل از احتراق CO2 مورد استفاده قرار گیرند، در نتیجه،CO2 می‌تواند عمدتاً با کاهش فشار آزاد شود و از مصرف گرمای زیاد فرآیندهای شستشوی آمین جلوگیری شود. با این حال، کاهش فشار حلال همچنان باعث هدر رفتن انرژی قابل توجهی می شود. مطالعات نشان می دهد که فرآیندهای مبتنی بر جذب، در حال حاظر منجر به 10-30% از دست دادن انرژی‌های مزاحم(اصطکاکی)، 35-110% افزایش هزینه‌های سرمایه و 30-80% افزایش هزینه برق می شود. بر اساس شبیه سازی انجام شده توسط Padurean و همکاران، حلال دی متیل اترهای پلی اتیلن گلیکول، نسبت به سایر حلال‌های فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی، انرژی کارآمدتری دارد. استفاده از جذب دی‌اکسید کربن قبل از احتراق در کارخانه‌های IGCC، با استفاده از دی‌متیل اترهای پلی‌اتیلن گلیکول، منجر به افزایش هزینه سرمایه با حدود 19.55 درصد برای 70 درصد جذب CO2، 20.91 درصد برای 80 درصد جذب CO2 و 22.55 درصد برای 90 درصد جذب CO2 می‌شود.

 شکل 7: شماتیک ساده شده یک نیروگاه زغال سنگ سیکل ترکیبی گازی سازی یکپارچه (IGCC) با جذب CO2 پیش از احتراق با استفاده از یک راکتور انتقال آب-گاز و یک سیستم جداسازی CO2 سلکسول.

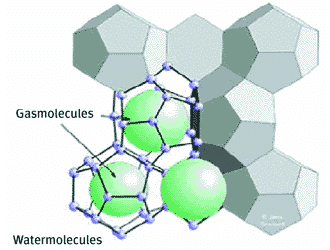
عوامل زیادی مانند ویژگی‌های خود حلال، فشار جزئی CO2 و دما، ظرفیت CO2 یک حلال را تعیین می کنند. معمولاً افزایش فشار و کاهش دما باعث افزایش ظرفیت CO2 می شود. یکی از بزرگترین چالش‌های استفاده از حلال‌های آمینی، خورندگی و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها است.

علاوه بر این، پایداری طولانی مدت حلال‌ها در فشار و دمای بالا بسیار مهم است. در فناوری فعلی سلکسول، حلال‌های آمین تنها ظرفیت جذب کافی را در دماهای پایین فراهم می‌کنند. بنابراین، جریان گاز سنتز با دمای بالا که از مخازن گازی سازی خارج می شود باید ابتدا خنک شود و سپس تصفیه شود، که ایده آل نیست.

محققان فعالانه سعی در اختراع حلال‌های جدید یا اصلاح حلال‌های فعلی دارند تا بتوانند CO2 را در دماهای بالاتر جذب کنند. در میان جایگزین‌های بالقوه حلال‌های آمینی، به نظر می‌رسد مایعات یونی نویدبخش است زیرا پتانسیل جذب CO2 بالایی دارند، اما در دمای بالای 250 درجه سانتیگراد تبخیر و تجزیه نمی‌شوند. و فشار بخار ناچیز از مزایای مایعات یونی است. اگر حلال‌های مایع یونی را بتوان در IGCC برای جذب CO2 بدون خنک کردن گاز سنتز استفاده کرد، اندازه و هزینه تجهیزات تا حد زیادی کاهش می یابد و مقدار قابل توجهی در انرژی صرفه جویی می شود. در نهایت جذب پیش احتراق با راندمان بالا حاصل خواهد شد[[14](#_ENREF_14)].

# 2.3 هیدرات گازی(Gas hydrate)

روش امیدوارکننده ای برای جذب دی‌اکسید کربن قبل از احتراق از طریق تبلور هیدرات گازی است. هیدرات‌های گازی ترکیبات یخ مانند هستند (نشان داده شده در شکل 1) که شامل مولکول‌های آب و میزان اندکی از مولکول‌های نیتروژن، کربن دی اکسید، هیدروژن و اکسیژن است. این مولکول‌های گاز کوچک در داخل حفره‌های مولکول‌های آب به دام می افتند اما باید توجه داشت غلظت گازهای مختلف در کریستال‌ها با غلظت آنها در مخلوط گاز اصلی متفاوت است[1]. نیروهای واندروالس کریستال‌های هیدرات گاز ظرفیت ترکیب مقادیر زیاد گاز را دارند لذا مولکول‌های مهمان(مانند CO2) به طور فیزیکی در شبکه‌های چند وجهی مولکول‌های آب به سادگی جذب میشوند.[2]



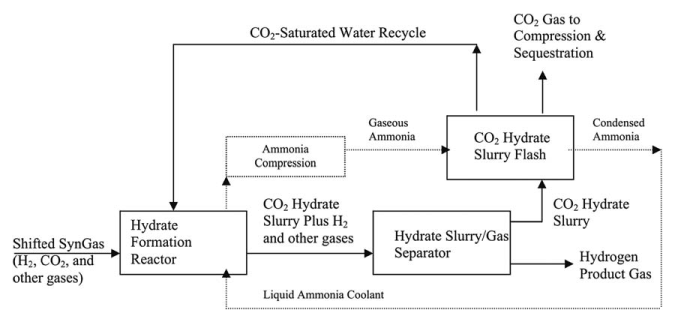
شکل1: محفظه‌های هیدرات گازی چند وجهی (متشکل از اب متصل به هیدروژن) که مولکول‌های مهمان را در بر میگیرد

روش اصلی جداسازی CO2، انتخاب CO2 از مخلوط گاز بین فاز جامد کریستال هیدرات و فاز گازی است که با تشکیل کریستال هیدرات انجام میشود. از نظر ترمودینامیکی، حداقل فشار برای تشکیل هیدرات در دمای 273.9 کلوین، 5.56 مگاپاسکال است. فشار گاز سنتز پس از واکنش جابجایی گاز آب معمولاً 2 تا 7 مگاپاسکال است، در حالی که گاز دودکش در پس احتراق تقریباً در فشار اتمسفر است بنابراین، جریان گاز برای افزایش سرعت تشکیل هیدرات نیاز به فشرده سازی دارد[1].

روش‌های مختلفی برای کاهش شرایط تعادل برای تشکیل هیدرات‌ها آزمایش شده اند. بیشترین روش مورد مطالعه، تتراهیدروفوران (THF) است. تعادل تشکیل هیدرات با افزودن THF در هر دما کاهش می یابد. افزایش غلظت THF باعث کاهش فشار تشکیل هیدرات تا غلظت بهینه تقریبا 1 mol% می شود به طوری که می توان از آن در جداسازی CO2 به صورت صنعتی بدون فشرده سازی قابل توجه گاز دودکش استفاده کرد. اگر 3.2 مول درصد پروپان به مخلوط CO2/O2 اضافه شود، فشار تعادل برای تشکیل هیدرات ممکن است 50٪ کاهش یابد[3].

برای مخلوط سوخت گازی در فرآیند پیش احتراق، شرایط تعادل فاز هیدرات با افزودن تترا (نرمال) بوتیل آمونیوم بروماید (TBAB) کاهش می یابد. شرایط تشکیل هیدرات با افزایش غلظت TBAB تا شرایط استوکیومتری کاهش می یابد که فراتر از آن با افزایش غلظت TBAB تعادل فاز افزایش می یابد. پارک و همکاران [3] اثر نمک‌های آمونیوم چهارتایی بر تشکیل هیدرات را بررسی کردند. آنها نشان دادند که تنها با استفاده از یک مرحله از تشکیل هیدرات می توان 95 درصد از CO2 را از یک IGCC گرفت[1].

در دهه‌های گذشته، تحقیقات بسیاری نشان داده‌اند که روش تبلور هیدرات یک روش امیدوارکننده برای CCS در نسل بعدی سیستم IGCC است. به عنوان مثال، فرآیند SIMTECH برای جداسازی و تحت فشار قرار دادن CO2 از نیروگاه‌های IGCC طراحی شده است. نمودار جریان بلوک فرآیند عملیاتی پیشنهادی در شکل 2 نشان داده شده است. این فرآیند انعطاف پذیر را می‌توان طوری پیکربندی کرد که انتشار CO2 را به میزان 65 تا 90 درصد یا بیشتر کاهش دهد. در این فرایند از این واقعیت استفاده میشود که فشار‌های زیادی در سیستم IGCCطراحی میشود که هم از نظر ملاحظاتگازسوز و هم از نظرتوربین گاز برانگیخته میشود. مزیت اصلی فرایند مبتنی بر هیدرات توانایی تولید CO2در فشار‌های بالا استکه هزینه ی فشرده سازی مورد نیاز برای تولید خط لوله گاز تحت فشار را تا حد زیادی کاهش میدهد. یکی دیگر از مزایای اینفرایند نسبت به تکنیک‌های جذب شیمیایی مانند فناوری selexolاین است که هیچ عوامل شیمیایی برای جذب CO2اضافه نمی شود[2].



شکل2 : نمودار جریان بلوک فرایند جذب SIMTECHE CO2(برای برنامه‌های IGCC) سنتز گاز با اب در تعامل است تا هیدراتهای گازی در راکتور تشکیل هیدرات تشکیل شود. سپس گاز غنی از H2 از نظر فیزیکی از مرحله SLURRY متراکم جدا میشود.( . دوغاب سپس با فشار‌های بالا در راکتور فلاش تجزیه میشود.

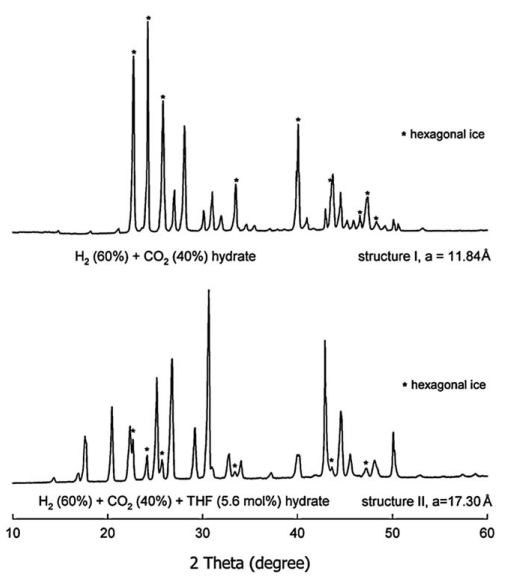
تشکیل هیدرات گاز شامل برخی مراحل انرژی بر است به طوری که تشکیل هیدرات گاز گرمازا است در حالی که تفکیک هیدرات گاز گرماگیر است. در این صورت، ادغام گرمای تولید شده با گرمای مورد نیاز برای بازسازی CO2 از تفکیک هیدرات می تواند منجر به یک فرآیند پرکارآمد و پر بازده شود.

سیستم تبرید طوری طراحی شده است که راکتور تشکیل هیدرات، تبخیر کننده است در حالی که واحد فلاش دوغاب، کندانسور می‌باشد. این طراحی یکپارچگی حرارتی عالی را بین عملکرد حرارتی واحد فرآیند فراهم می کند. تنها 10 درصد از گرمای فرآیند، که عمدتاً از فشرده سازی مبرد به دست می آید، باید در برج‌های خنک کننده مرطوب دفع شود. علاوه بر این، مرز تعادل فاز هیدرات-مایع-بخار به گونه ای است که 75-80% از کل CO2 حاصل از تجزیه هیدرات را می توان در 650-700 psi (4.48-4.83 مگاپاسکال) بازسازی کرد، و بقیه در psi300 - 275 بازسازی می شود(1.9-2.1 MPa). این یک مزیت بزرگ نسبت به فرآیندهای جذب رقیب است، که طبق گزارش‌ها CO2 را در 50-100 psia (0.34-0.69 مگاپاسکال) بازسازی می کند. بنابراین تلفات انرژی اهای اسطکاکی و انرژی‌های مزاحم مرتبط با انرژی فشرده سازی CO2 در فرآیند SIMTECHE را می توان تا حد زیادی کاهش داد.[2]

اخیراً، SIMTECHE و آزمایشگاه Los Alamos National با هم همکاری کردند و این فرآیند را در مقیاس کوچک آزمایشی نشان دادند. آنها با هم به طور کامل مسائل مربوط به انتقال گرما و انتقال جرم را در طول تشکیل هیدرات CO2 در یک راکتور جریان پیوسته لوله‌ای در شرایط عملیاتی مشابه با شرایط مورد استفاده در یک مدل در مقیاس صنعتی بررسی کردند. مطالعات نشان می‌دهد که سرعت بالای سیال در راکتور تشکیل هیدرات منجر به ترکیب بین فازی مؤثر می شود و بنابراین، انتقال جرم و حرارت بین فازهای گاز، مایع و جامد را در شرایط حجمی بالای گاز(بیش از 85٪) افزایش می دهد. با این حال ، حتی در صورت وجود مقاومت انتقال حرارتی ، سرعت تشکیل هیدرات بالا است. تحت شرایط مناسب پردازش صنعتی و سینتیک ظاهری هنوز هم میتوان به طور معقول با یک مدل ساده مرتبه اول به خوبی نشان داد ، که یک برآورد ساده اما مفید در طراحی مقیاس بندی فرآیند ، شبیه سازی و مطالعات ارزیابی ارائه میدهد.

از زمان کشف هیدرات‌های طبقه بندی شده توسط همفری دیوی در سال ،1810 علاقه به این مواد صرفا آکادمیک بود. هنگامی که مشخص شد این ترکیبات مسبب بسته شدن خطوط لوله گاز طبیعی هستند، تحقیقات گسترده ای در مورد هیدرات‌های گاز طبیعی توسط صنعت نفت و گاز انجام شد از این رو ، غلبه بر مشکل اتصال در فرآیند جذب هیدرات CO2 به یک چالش مهندسی تبدیل شده است. یانگ و همکارانش دریافتند که درصد حجمی بالای گاز(>85%) و سرعت بالای سیال(>10 m/s) دو پارامتر کلیدی برای به حداقل رساندن مشکل اتصال در طول فرآیند تشکیل هیدرات است[2].

برای افزایش بیشتر نیروی محرکه برای تشکیل هیدرات CO2، محققان ارتقا دهنده‌های مختلفی را برای کاهش فشار تعادل تشکیل هیدرات توسعه داده‌اند. در میان این پیش‌برنده‌ها، ناخالصی‌های گاز سنتز، مانند H2S، پروپان و …، به طور قابل ‌توجهی تشکیل هیدرات CO2 را کاهش می‌دهند. چندین مطالعه، کاهش قابل توجه فشارهای تعادلی تشکیل هیدرات را باافزودن مقدار کمی تتراهیدروفوران (THF) در یک دمای معین در فاز آبی گزارش داده اند. کانگ و همکاران و لینگا و همکاران دریافتند که فشار تعادلی هیدرات‌ها در حضور THF به طور قابل توجهی کمتر از حالت بدون افزودنی است. با وجود THF، ذخیره گاز CO2 را می توان تا 41 درصد افزایش داد. کیم و همکارانش اثرات جنبشی و ترمودینامیکی تترا (نرمال) بوتیل آمونیوم برومید **(**TBAB**)** را در فرایند جداسازی CO2از مخلوط گازی (40 : 60) CO2/H2 مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنهانشان داد که محلول 1.0 mol% TBABمنجر به بالاترین مقدار تشکیل هیدرات و محلول 3.0 mol% TBAB کمترین مقدار را منجر میشود. لی و همکارانش 76اثرات محلول 0.29 mol% TBAB روی هیدرات وقتی که با سیکلوپنتان (cp) مخلوط میشود را بر اساس CO2 جذب شده قبل از احتراق مطالعه کردند. آنها مقدار گاز جذب شده، کارایی جداسازی CO2 و زمان القای تشکیل هیدرات را در دماها و فشارهای مختلف اندازه گیری کردند. آنها گزارش دادند که افزودن CP به محلول TBAB باعث افزایش چشمگیر جداسازی CO2 و کوتاه شدن زمان القا میشود. آنها جذب گاز بیشتر از % 80 mol بعد از400 ثانیه در محدوده دمایی (274.65-277.65) کلوین و فشار 2.5-4.5 Mpa را بدست آوردند. لینگا و همکاران تشکیل کریستال هیدرات را از مخلوط CO2/H2 مورد مطالعه قرار دادند که در آن CO2 فاز هیدرات را ترجیح می دهد. آنها مقادیر ناچیزی از H2 را در فاز هیدرات مشاهده کردند و بازیابی CO2 را 42.5٪ و 36.1٪ به ترتیب در 7.5 مگاپاسکال و 8.5 مگاپاسکال گزارش کردند. پارک و همکاران خصوصیات ترمودینامیکی، جنبشی و ساختاری سیستم‌های هیدرات را که توسط مخلوط سوخت گازی (60% H2 + 40% CO2) با THF (5.6 mol%) و سیلیکاژل‌های متخلخل ( که با قطر منافذ اسمی 100 نانومتر تشکیل شده‌اند) مورد مطالعه قرار دادند[4]. بر اساس الگوهای PXRD و طیف‌های رامان، آنها اشاره کردند که مخلوط گاز 60% H2 + 40% CO2 هیدرات sI را تشکیل می‌دهد و گنجاندن THF در این هیدرات گازی منجر به انتقال ساختار به هیدرات sII می‌شود (شکل 3). افزودن تتراهیدروفوران (THF) منجر به افزایش قابل توجه شرایط پایداری هیدرات است. وجود سیلیکاژل باعث افزایش مصرف گاز هنگام تشکیل هیدرات گاز میشود که نشان دهنده تبدیل بیشتر آب به هیدرات گاز است[4].



شکل3: الگوهای PXRD هیدرات H2 60% + CO2 40% و هیدرات THF(5.6 mol%) + CO2 40% + H2 60%

علاوه بر اثرات فوق، گزارش شد که تشکیل هیدرات گاز در منافذ سیلیکاژل باعث افزایش اشغال محفظه CO2 می شود[2, 5]. این افزایش اشغال محفظه CO2 منجر به افزایش غلظت CO2 در جریان گاز بازیابی شده می‌شود، که مسیر امیدوارکننده‌ای را برای جذب قبل از احتراق CO2 از سوخت گازی، حتی در یک تشکیل یا تفکیک تک مرحله‌ای فراهم می‌کند. با استفاده از ستون سیلیکا ژل متخلخل حاوی آب اشباع شده در داخل منافذ، روش‌های بدون همزن می تواند جایگزین راکتورهای معمولی دارای مخزن همزن شود. با توجه به این نتایج، یک مرحله تشکیل هیدرات گاز و یک واحد جداسازی غشای اضافی پیشنهاد شد که انتظار می‌رود به یک فرآیند پیش از احتراق برای جذب CO2 از سوخت گازی تبدیل شود. با این حال، اکثر این کارها در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است و در مورد شرایط عملیاتی، روش‌ها و همچنین پارامتر‌های دقیق طراحی راکتور اطلاعات بیشتری مورد نیاز است.

# 2.6 مقایسه و نتیجه گیری روش‌ها

## 2.6.1 مقایسه روش‌ها

جذب کربن که نیاز به جداسازی CO2 دارد یک فرآیند قدیمی است و با کاربردهای مختلف در مقیاس کامل به حد خاصی رسیده است. مطالعات مدلسازی عددی و تجربی زیادی روی این فرآیندها انجام شده است. مزیت اصلی جذب پس از احتراق قابلیت ادغام آسان آن با نیروگاه‌های موجود است، اما فشار جزئی و غلظت CO2 در گازهای دودکش بسیار کم است. برای حمل و نقل و ذخیره سازی CO2 باید حداقل غلظت را بدست آورد. انرژی اضافی مورد نیاز و هزینه‌های اضافی جذب کربن برای دستیابی به حداقل غلظت مورد نیاز به طور قابل توجهی بالا است.

هنگام استفاده از فرآیند جذب شیمیایی برای جداسازی، تجزیه حلال و خوردگی شدید تجهیزات مورد استفاده رخ می دهد. بنابراین، هزینه هنگفتی برای حلال‌ها و سایر تجهیزات برای این فرآیند ضروری می شود تا CO2برای حمل و نقل و ذخیره سازی آماده شود. اینها ممکن است هزینه تولید برق را حدود 70 درصد افزایش دهند[1]. تحقیقات برای حلال‌های جدید برای کاهش هزینه جذب کربن ادامه دارد. اندازه تجهیزات بزرگ منجر به سرمایه و هزینه عملیاتی بالا در این روش می شود.

جذب کربن قبل از احتراق بیشتر در صنایع فرآیندی استفاده می شود. همچنین کارخانه‌های CCS در مقیاس کامل در برخی صنایع وجود دارد که از این روش استفاده می کنند. مقدار CO2در مخلوط گاز در این فرآیند بسیار بیشتر از مخلوط گازهای دودکش معمولی است. به دلیل فشار بیشتر و حجم گاز کمتر، در این فرآیند به انرژی کمتری نسبت به جذب پس از احتراق نیاز است، اما باز هم هدررفت انرژی بالاست. پیش احتراق عمدتاً در فناوری سیکل ترکیبی گازی سازی یکپارچه استفاده می شود. این فناوری به یک سیستم کمکی بزرگ برای عملکرد ساده و خوب نیاز دارد. بنابراین هزینه سرمایه ای این سیستم در مقایسه با سایر سیستم‌ها بسیار بالاست [2].

از سوی دیگر، فرآیندهای جذب کربن بدون نیاز به جداسازی در تولید برق نسبتاً جدید هستند. هیچ کارخانه عملیاتی در مقیاس کامل بر اساس این فرآیندها وجود ندارد. برخی عملیات‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و برخی از کارخانه‌ها در مقیاس جزئی با استفاده از احتراق سوخت اکسی در حال توسعه هستند. امیدوارکننده ترین گام در مورد احتراق سوخت اکسی، نیروگاه 50 مگاواتی است که در تگزاس توسط نت پاور با استفاده از مفهوم چرخه Allam ساخته شده است و انتشار نزدیک به صفر را تضمین می کند. این روش دارای مزایای دیگری مانند کاهش اندازه تجهیزات، سازگاری با انواع زغال سنگ و عدم نیاز به کارخانه شیمیایی در محل می باشد [3].

با این حال، این فرآیند به مقدار زیادی اکسیژن با خلوص بالا نیاز دارد. بنابراین، یک ASU پر انرژی برای تولید اکسیژن مورد نیاز است. فناوری مبتنی بر غشاء برای جداسازی هوا ممکن است با ASU برودتی از طریق درجه بالاتر ادغام در چرخه قدرت رقابت کند. به دلیل استفاده از واحد فشرده سازی ASU و CO2در این فرآیند، توان خالص خروجی به طور قابل توجهی کاهش می یابد. در کنار این موارد، برخی عدم قطعیت‌های فنی وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیشتری برای درک عملیات در مقیاس کامل است. با این حال، از آنجایی که هیچ هزینه اضافی برای جداسازی CO2مورد نیاز نیست، این فرآیند برای تولید برق با هزینه کمتر، در حالی که انتشار نزدیک به صفر را تایید می کند، روند امیدوارکننده ای باقی می ماند.

فرآیند CLC برای جذب کربن هنوز در مرحله مقدماتی است و هنوز در سطح تجاری اجرا نشده است. برای استفاده از این روش تحقیقات بیشتری لازم است. به دلیل عدم وجود شعله، هیچ NOx به صورت حرارتی تولید نمی شود و جریان خروجی راکتور هوا برای محیط زیست بی ضرر است. ایجاد یک حامل اکسیژن مناسب برای استفاده در CLC آن را نسبت به سایر فرآیندها جذاب تر می کند.

مقایسه بازده حرارتی نیروگاه‌ها با فرآیندهای مختلف جذب CO2در جدول 1 ارائه شده است. راندمان نشان داده شده در جدول بر اساس ارزش گرمایش کمتر سوخت است. زغال سنگ برای نیروگاه‌های مبتنی بر زغال سنگ به دلیل استفاده گسترده در تولید برق مورد توجه قرار می گیرد. فرآیند سلکسول برای جذب کربن پیش احتراق در یک گازساز نوع IGCC GE در نظر گرفته شده است. در مورد احتراق حلقه شیمیایی، ایلمنیت به عنوان حامل اکسیژن برای تولید برق مبتنی بر زغال سنگ استفاده شد در حالی که اکسید آلومینیوم نیکل برای تولید برق مبتنی بر گاز طبیعی استفاده شد.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| نوع سوخت | فرایند | بازدهی | قدرت(MW) |
| زغال سنگ | بدون جذب کربن | 44 | 758 |
| پیش احتراق | 31.5 | 676 |
| پس احتراق | 34.8 | 666 |
| اکسی احتراق | 35.4 | 532 |
| اکسی احتراق(چرخه Allam) | 51 | 226 |
| احتراق چرخه شیمیایی | 44 | 115.5 |
| گاز طبیعی | بدون جذب کربن | 55.6 | 776 |
| پیش احتراق | 41.5 | 690 |
| پس احتراق | 47.4 | 662 |
| اکسی احتراق | 44.7 | 440 |
| اکسی احتراق(چرخه Allam) | 59 | 303 |
| احتراق چرخه شیمیایی | 52.2 | 364 |

جدول1: مقایسه کارایی تولید برق با فرآیندهای مختلف جذب کربن [2]

هنگامی که زغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می شود،CLC همان کارایی را به عنوان فناوری احتراق پایه با استفاده از زغال سنگ پودر شده بدون هیچ گونه جذب نشان می دهد. کاهش راندمان در جذب کربن در پیش احتراق بالاترین میزان است. جذب کربن در پس احتراق و اکسی احتراق افت تقریباً مشابهی در راندمان نشان می دهد. مشاهده جالب در این مقایسه، کارایی چرخه Allam است. راندمان هدف سیکل Allam تقریباً با راندمان نیروگاه مرجع بدون جذب برابر است. اگر این چرخه بتواند به صورت تجاری در مقیاس بزرگتر اجرا شود، بازده کلی تولید برق افزایش می یابد و در عین حال جذب کل کربن را تضمین می کند.

هنگامی که گاز طبیعی به عنوان سوخت استفاده می شود، جذب کربن در پیش احتراق کاهش 14 درصدی راندمان را از نیروگاه مرجع نشان می دهد در حالی که جذب کربن در پس احتراق کاهش 8 درصدی را نشان می دهد. فرآیند اکسی احتراق بازده 44.7٪ را نشان می دهد. احتراق حلقه‌ای شیمیایی تنها افت 4 درصدی راندمان را از کارخانه مرجع نشان می‌دهد. چرخه Allam عملکرد فوق‌العاده‌ای را نشان می‌دهد که بازده آن بیش از 3 درصد بیشتر از چرخه ترکیبی مرجع بدون جذب CO2 است [2].

از مقایسه کارایی جدول 1، می توان نتیجه گرفت که احتراق حلقه‌ی شیمیایی و چرخه Allam انتظار می رود فناوری‌های پیشرو در آینده نزدیک برای تولید برق مبتنی بر سوخت فسیلی باشند. چرخه 50 مگاواتی Allam زمینه را برای استقرار تاسیسات در مقیاس بزرگ فراهم می کند. در حال حاضر 300 مگاوات نیروگاه گاز طبیعی در دست توسعه است. روش حلقه شیمیایی هنوز از نظر فنی برای پیاده سازی بر مبنای صنعتی آماده نیست و روش هنوز در مرحله بررسی است و داده‌های تجربی بیشتری قبل از تجاری سازی در مقیاس بزرگ ضروری می‌باشد.

فرآیند جذب کربن معمولی منجر به کاهش راندمان می شود. سوخت بیشتری در هر واحد تولید برق به دلیل این ناکارآمدی می سوزد که منجر به تولید بیشتر CO2 می شود. همچنین، فرآیندهای مورد استفاده برای جذب کربن دی اکسید ممکن است به روش‌های متفاوتی غیر از انتشار مستقیم CO2، محیط را تحت تاثیر قرار دهد. به عنوان مثال، مواد مختلف مورد استفاده برای جداسازی و جذب CO2 ممکن است اثرات نامطلوبی بر بدن و محیط زیست انسان داشته باشد. استفاده از جاذب جامد پوشیده شده با پوشش برای کاهش تشکیل غبار از این ماده آزمایش شد. همچنین این می تواند ظرفیت ماده برای جذب کربن دی اکسید را کاهش دهد. همچنین حذف حلال آلی از غشاها و جاذب‌ها برای جلوگیری از بوی نامطلوب پیشنهاد می شود. قبل از استفاده از جذب کربن، باید اطمینان حاصل شود که کاهش CO2 به قیمت سایر اثرات زیست محیطی حاصل نمی شود.

ارزیابی چرخه زندگی گیاهان برای درک صحیح اثرات زیست محیطی روش‌های جذب کربن ضروری است. Schreibar و همکاران [4] از روش ارزیابی چرخه حیات (LCA)[[4]](#footnote-4) برای جذب کربن در فرایند پس احتراق از MEA استفاده کرد که تأثیر آن بر محیط زیست و سلامت انسان برای پنج نیروگاه مورد بررسی قرار گرفت. پتانسیل گرمایش جهانی(GWP) [[5]](#footnote-5)، پتانسیل سمیت برای انسانی [[6]](#footnote-6)( (HTP، پتانسیل اسیدی شدن (AP)[[7]](#footnote-7)، پتانسیل تشکیل اکسیدان عکس، پتانسیل اوتروفیکاسیون (EP) [[8]](#footnote-8) به عنوان دسته‌های تاثیر در نظر گرفته شد. همانطور که انتظار می رفت،GWP با MEA در مقایسه با نیروگاه‌های بدون جذب بسیار کمتر بود در حالی که HTP با نیروگاه‌های MEA سه برابر بیشتر بود. Schreibar و همکاران [4] به این نتیجه رسیدند که فرآیندهای بالادستی و پایین دستی مانند انتشارات ناشی از تامین سوخت و مواد، دفع زباله و تصفیه آب بر اقدامات اثرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های با جذب کربن تأثیر می‌گذارند. Viebahn و همکاران [5] زمانی که جذب کربن پس از احتراق در یک نیروگاه اجرا شد، حدود 40 درصد افزایش درAP، EP و HTP را مشاهده کردند.

نتیجه مشابهی توسط Veltman و همکاران [6] پیدا شد. آنها نشان دادند که یک نیروگاه با فرایند جذب پس احتراق در مقایسه با یک نیروگاه بدون جذب 10 برابر افزایش اثرات سمی بر آب شیرین دارد و تأثیرات بر سایر مقوله‌ها ناچیز بوده است. تخریب MEA منجر به انتشار آمونیاک، استالدهید و فرمالدهید شد. Cuellar و همکاران [7] چرخه زندگی اثرات زیست محیطی جذب و ذخیره کربن را با جذب و استفاده کربن مقایسه کردند. اگر از کربن استفاده کنیم، GWP بسیار بیشتر از ذخیره سازی آن خواهد بود. بیشترین کاهش GWP برای نیروگاه‌های زغال سنگ پودر شده و IGCC با استفاده از روش جذب سوخت اکسیژن و همچنین نیروگاه‌های توربین گاز سیکل ترکیبی مجهز به فناوری جذب پس‌احتراق مشاهده شد.

Pehnt و همکاران [8] نشان دادند که یک نیروگاه معمولی که بر پایه زغال سنگ کار می کند با جذب کربن پس از احتراق می تواند منجر به افزایش اثرات زیست محیطی تقریباً در همه دسته‌ها به جز GWP شود. تخریب حلال و هدررفت انرژی ناشی از فرآیند جذب CO2 از دلایل اصلی این افزایش است. جذب پیش احتراق در مقایسه با یک نیروگاه معمولی، کاهشی را در تمام دسته‌های اثرات زیست ‌محیطی نشان داد. آنها احتراق اکسیژن را به عنوان بالقوه ترین فرآیند برای کاهش تمام دسته بندی‌های اثرات زیست محیطی در صورت امکان جذب مشترک سایر آلاینده‌ها شناسایی کردند.

Nie و همکاران [9] اثرات زیست محیطی نسبی جذب کربن پس از احتراق و اکسی احتراق را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل آنها نشان داد که تقریباً همه دسته‌های زیست‌محیطی به جز GWP با جذب کربن پس از احتراق افزایش می‌یابند. همین امر در مورد اکسی احتراق به جزGWP،AP و EP نیز صادق است. با این حال، میزان افزایش این دسته‌ها در اکسی احتراق در مقایسه با جذب کربن پس احتراق کمتر بود.

## 2.6.2 نتیجه گیری روش‌ها

علیرغم اثرات مضر آنها بر محیط زیست، سوخت‌های فسیلی همچنان منبع اصلی تولید برق خواهند بود. یک بحث جامع در مورد فن آوری‌های کاهش انتشار از سوخت‌های فسیلی در این بررسی ارائه شده است. فناوری جذب کربن پس از احتراق که نیاز به جداسازی دارد، بهترین فناوری برای مقاوم‌سازی نیروگاه‌های موجود با سوخت فسیلی است. جذب کربن قبل از احتراق در سیکل ترکیبی گازی سازی یکپارچه مناسب تر است. فرآیند جذب کربن پس از احتراق را می توان بدون تغییر زیاد در نیروگاه‌های در حال اجرا اعمال کرد.

جداسازی CO2 از جریان گاز در این فرآیندها نیاز به انرژی اضافی دارد که منجر به افزایش قیمت برق می شود. چندین فناوری برای جداسازی CO2 از جریان گاز موجود است. جداسازی در فرآیندهای پیش احتراق به دلیل فشار جزئی بالاتر CO2 در جریان گاز هزینه کمتری دارد. در میان فناوری‌های جداسازی، فرآیند جذب تقریباً معروف شده است، اما نیاز به توجه در رابطه با خوردگی تجهیزات و هزینه بالا برای بازسازی حلال دارد. یک فرآیند جذب برای جداسازی به دلیل جذب کم CO2 و ظرفیت و تأثیر گازها بر جاذب‌ها نمی تواند در مقیاس‌های بزرگ اعمال شود. جاذب‌های جدید باید برای حذف موانع ایجاد شوند. فناوری غشاء انرژی کمتری نسبت به سایر فرآیندها دارد، اگرچه در غلظت کم CO2 کمتر موثر است. همچنین، تحقیقات بیشتری برای تعیین رفتار غشا در ظرفیت بالا ضروری است. تشکیل هیدرات clathrate برای جداسازی CO2 از مخلوط گازی نیاز به توجه بیشتری دارد. افزودنی‌ها یا کنترل‌کننده‌های مناسب باید برای استفاده در فرآیند توسعه داده شوند تا این فرآیند رقابتی‌تر شود.

جذب کربن با تقطیر آب به دلیل طراحی ساده‌تر و راندمان بالاتر و جنبه‌های زیست‌محیطی بهتر برای چرخه زیست محیطی در مقایسه با روش‌های جمع‌آوری پیش احتراق و پس احتراق، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. LCA نشان می دهد که اکسی احتراق در مقایسه با روش‌های دیگر تأثیر بسیار کمتری بر محیط زیست دارد. ویژگی‌های احتراق در این مورد با احتراق سنتی متفاوت است. با توجه به ویژگی‌های مختلف، تحقیقات بیشتر برای رقابتی کردن این فناوری با سایرین ضروری است. هنوز دانش محدودی در مورد بسیاری از جنبه‌های مهم اکسی احتراق وجود دارد. در کنار دستاوردهای نظری، یافتن داده‌های تجربی بیشتری برای اعتبارسنجی مدل‌های نظری ضروری است.

تحقیقات بیشتر برای درک صحیح چرخه‌های قدرت با انتشار نزدیک به صفر مبتنی بر اکسی احتراق مانند چرخه Allam ضروری است. اجرای موفقیت آمیز تجاری این چرخه‌ها گام مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای خواهد بود و در نتیجه با چالش تغییرات آب و هوایی جهانی روبرو خواهد شد. احتراق حلقه‌ای شیمیایی نیز پتانسیل تبدیل شدن به روشی مقرون ‌به ‌صرفه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را دارد و به عنوان یک فناوری جدید در این بخش، نیازمند توجه است. در دسترس بودن حامل‌های اکسیژن مناسب و طراحی مناسب راکتورها می تواند این فرآیند را با سایرین قابل مقایسه کند [2].

1. Zhang, Z., T. Borhani, and M. El-Naas, *Carbon capture, Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*. 2018, Elsevier.

2. Sifat, N.S. and Y.J.E. Haseli, A critical review of CO2 capture technologies and prospects for clean power generation. 2019. **12**(21): p. 4143.

3. Theo, W.L., et al., Review of pre-combustion capture and ionic liquid in carbon capture and storage. 2016. **183**: p. 1633-1663.

4. Schreiber, A., P. Zapp, and W.J.T.I.J.o.L.C.A. Kuckshinrichs, Environmental assessment of German electricity generation from coal-fired power plants with amine-based carbon capture. 2009. **14**(6): p. 547-559.

5. Viebahn, P., et al., Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economic, and ecological aspects in Germany. 2007. **1**(1): p. 121-133.

6. Veltman, K., et al., Human and environmental impact assessment of postcombustion CO2 capture focusing on emissions from amine-based scrubbing solvents to air. 2010. **44**(4): p. 1496-1502.

7. Cuéllar-Franca, R.M. and A.J.J.o.C.u. Azapagic, Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. 2015. **9**: p. 82-102.

8. Pehnt, M. and J.J.I.J.o.G.G.C. Henkel, Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. 2009. **3**(1): p. 49-66.

9. Nie, Z., A. Korre, and S.J.E.P. Durucan, Life cycle modelling and comparative assessment of the environmental impacts of oxy-fuel and post-combustion CO2 capture, transport and injection processes. 2011. **4**: p. 2510-2517.

1. Sifat, N.S. and Y.J.E. Haseli, A critical review of CO2 capture technologies and prospects for clean power generation. 2019. **12**(21): p. 4143.

2. Kenarsari, S.D., et al., Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture. 2013. **3**(45): p. 22739-22773.

3. Kumar, R., H.-j. Wu, and P.J.F.p.e. Englezos, Incipient hydrate phase equilibrium for gas mixtures containing hydrogen, carbon dioxide and propane. 2006. **244**(2): p. 167-171.

4. Park, S., et al., International Journal of Greenhouse Gas Control Hydrate-based pre-combustion capture of carbon dioxide in the presence of a thermodynamic promoter and porous silica gels. 2013. **14**: p. 193-199.

5. Seo, Y. and S.-P.J.C.E.J. Kang, Enhancing CO2 separation for pre-combustion capture with hydrate formation in silica gel pore structure. 2010. **161**(1-2): p. 308-312.

1. Sifat, N.S. and Y.J.E. Haseli, A critical review of CO2 capture technologies and prospects for clean power generation. 2019. **12**(21): p. 4143.

2. Olajire, A.A.J.E., CO2 capture and separation technologies for end-of-pipe applications–a review. 2010. **35**(6): p. 2610-2628.

3. Nguyen, D.N. Carbon dioxide geological sequestration: technical and economic reviews. in SPE/EPA/DOE exploration and production environmental conference. 2003. OnePetro.

4. Newman, S., Acid and sour gas treating processes. 1985.

5. Ban, Z.H., L.K. Keong, and A. Mohd Shariff. *Physical absorption of CO2 capture: a review*. in *Advanced Materials Research*. 2014. Trans Tech Publ.

6. Veawab, A., et al., Influence of Process Parameters on Corrosion Behavior in a Sterically Hindered Amine− CO2 System. 1999. **38**(1): p. 310-315.

7. Reddy, M.S. and S.J.C.D.S.i.C.C.M. Joshi, Thapar Institute of Engineering & Technology, Patiala, India. 2018: p. 225.

8. Stewart, C., M.-A.J.E.C. Hessami, and management, A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration––the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach. 2005. **46**(3): p. 403-420.

9. Yamasaki, A.J.J.o.c.e.o.J., An overview of CO2 mitigation options for global warming—emphasizing CO2 sequestration options. 2003. **36**(4): p. 361-375.

10. Idem, R., et al., Pilot plant studies of the CO2 capture performance of aqueous MEA and mixed MEA/MDEA solvents at the University of Regina CO2 capture technology development plant and the boundary dam CO2 capture demonstration plant. 2006. **45**(8): p. 2414-2420.

11. Anthony, J.L., et al., *Anion effects on gas solubility in ionic liquids.* 2005. **109**(13): p. 6366-6374.

12. Bates, E.D., et al., *CO2 capture by a task-specific ionic liquid.* 2002. **124**(6): p. 926-927.

13. Zhang, Y., et al., Dual amino‐functionalised phosphonium ionic liquids for CO2 capture. 2009. **15**(12): p. 3003-3011.

14. Kenarsari, S.D., et al., Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture. 2013. **3**(45): p. 22739-22773.

1. Post-Combustion carbon capture [↑](#footnote-ref-1)
2. Oxy-combustion carbon capture [↑](#footnote-ref-2)
3. Pre-combustion carbon capture [↑](#footnote-ref-3)
4. Life cycle assessment [↑](#footnote-ref-4)
5. Global warming potential [↑](#footnote-ref-5)
6. Human toxicity potential [↑](#footnote-ref-6)
7. Acidification potential [↑](#footnote-ref-7)
8. Eutrophication potential [↑](#footnote-ref-8)