



دانشکده مهندسی انرژی

پروژه‌ی درس تحلیل سیستم‌های انرژی-کارشناسی ارشد

عنوان پروژه : جذب کربن

استاد : دکتر عباس رجبی قهنویه

دانشجویان : رقیه وفایی سورکی ، امیرحسین احمدی

**بهرام ماه 1400**

## چکیده

یکی از مهمترین عوامل پدیده تغییر آب و هوا که امروزه به یک معضل جهانی بدل شده است افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو است. از بین گازهای گلخانه‌ای  $\text{CO}_2$  مهمترین آنهاست و حدود 60٪ از آثار گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های بشر مربوط به انتشار  $\text{CO}_2$  است و طبق عهدنامه کیوتو کشورها موظفند از انتشار بی‌رویه این گاز به درون جو جلوگیری کنند. ایران با تولید ناخالص 450 میلیون تن  $\text{CO}_2$  در سال، بیشترین سهم را در انتشار این گاز در بین کشورهای خاورمیانه به خود اختصاص داده است و در رتبه‌ی چهاردهم جهان قرار دارد. گرفتن  $\text{CO}_2$  و ذخیره‌سازی آن، صرف نظر از استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند به عنوان یکی از گزینه‌های مهم برای کاهش انتشار گاز  $\text{CO}_2$  باشد. چرخه حذف و ذخیره‌سازی  $\text{CO}_2$  یک سری فرایند شامل جداسازی  $\text{CO}_2$  از منابع صنعتی و مرتبط با انرژی، انتقال به محل ذخیره‌سازی و ایزوله کردن طولانی مدت  $\text{CO}_2$  گرفته شده است از اتمسفر است. گرفتن  $\text{CO}_2$  پرهزینه‌ترین مرحله‌ی این زنجیره‌ها می‌باشد. در این پروژه به بررسی فناوری‌های متداول برای گرفتن گاز  $\text{CO}_2$  از گازهای خروجی از دودکش کارخانجات صنعتی پرداخته شده است.

کلمات کلیدی : حذف دی‌اکسیدکربن، مصرف انرژی، ذخیره کربن، گازهای گلخانه‌ای

## فهرست مطالب

1. معرفی پدیده گلخانه‌ای.....	1
2. پتانسیل گرمایش جهانی.....	1
2.1. خطرات .....	3
3. دی‌اکسیدکربن .....	4
4. پروتکل کیوتو .....	6
5. منابع انتشار CO <sub>2</sub> در صنعت و بررسی فرآیندهای مختلف برای آنها .....	9
5.1. منابع با خلوص بالا .....	10
5.2. منابع با خلوص پایین تا متوسط .....	11
5.2.1. صنایع تولید سیمان .....	11
5.2.1.1. فرآیند چرخه ی کلسیم ( ترکیب نیروگاه و واحد تولید سیمان ) .....	12
5.2.1.2. جداسازی واحد پیش کلساینر از محفظه ی احتراق.....	13
5.2.1.3. استفاده از سیمان تلف شده به عنوان خوراک .....	13
5.2.2. آهن و فولاد.....	14
5.2.2.1. کوره ی آهنگری ( کوره ی بلند ).....	14
5.2.2.2. احیاء گداز.....	15
5.2.3. صنایع پالایش و پتروشیمی .....	16
5.2.4. نیروگاه .....	16
6. CO <sub>2</sub> و سیستم کلی حذف آن .....	17
6.1. چرخه ی حذف و ذخیره ی CO <sub>2</sub> .....	17
6.1.1. فرآیندهای پسا احتراقی .....	19
6.1.2. فرآیندهای پیش احتراقی .....	20
6.1.3. فرآیندهای احتراق اکسیژن-سوخت (نیتروژن زدایی) .....	22
7. فناوری‌های موجود برای حذف CO <sub>2</sub> .....	24
7.1. جذب شیمیایی .....	24
7.2. جذب فیزیکی .....	26
7.3. فرایند تبرید ( سرد سازی ) .....	27
7.4. فرایند جذب سطحی .....	28

7.5. فرایند جداسازی غشایی ..... 29

8. مراجع ..... 31

## فهرست اشکال

- شکل 1 نحوه‌ی عملکرد گازهای گلخانه‌ای..... 3
- شکل 2 مکانیزم گرمایش کره زمین..... 4
- شکل 3 شماتیک ادغام نیروگاه با واحد تولید سیمان توسط چرخه‌ی کلسیم..... 13
- شکل 4 دورنمای فرآیند جداسازی محفظه‌ی احتراق از پیش کلساینر..... 13
- شکل 5 دورنمای فرآیند استفاده از سیمان تلف شده برای کاهش..... 14
- شکل 6 واحد حذف CO<sub>2</sub> اضافه شده به کوره های بلند متداول..... 15
- شکل 7 فرآیند متداول احیاء گداز..... 15
- شکل 8 زنجیره‌ی حذف و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> همچون بخشی از یک فرایند صنعتی..... 18
- شکل 9 ساختار کلی سیستم‌های پسا احتراقی حذف CO<sub>2</sub>..... 19
- شکل 10 ساختار کلی سیستم‌های پیش احتراقی حذف CO<sub>2</sub>..... 21
- شکل 11 ساختار کلی فرآیند حذف CO<sub>2</sub> توسط فناوری احتراق اکسیژن-سوخت..... 22
- شکل 12 طبقه‌بندی روش‌های جداسازی و مهار دی‌اکسیدکربن..... 23
- شکل 13 جذب با استفاده از حلالهای شیمیایی..... 25
- شکل 14 دورنمای کلی فرایند جذب فیزیکی..... 26
- شکل 15 دورنمای کلی فرایند سردسازی..... 27
- شکل 16 دورنمایی از فرآیند جذب سطحی..... 28
- شکل 17 دورنمایی از فرآیندهای غشایی..... 29

## فهرست جداول

- جدول 1 پتانسیل گرمایش جهانی گازهای گلخانه‌ای..... 2
- جدول 2 میزان آلاینده‌گی و انرژی سوخت‌های مختلف..... 7
- جدول 3 غلظت CO<sub>2</sub> در خروجی دودکش صنایع مختلف..... 8
- جدول 4 مقایسه فرایندهای جداسازی..... 24

## فهرست نمودار ها

- نمودار 1 تغییرات غلظت CO<sub>2</sub> در فاصله سالهای 1958–2008 (برگرفته از یخ‌های Hawaii Mauna Loa)..... 5
- نمودار 2 سهم صنایع مختلف در تولید گاز کربنیک در جهان..... 8
- نمودار 3 سهم بخش‌های مختلف صنعت در انتشار CO<sub>2</sub> در ایران..... 9
- نمودار 4 تولید گاز CO<sub>2</sub> از منابع با درجه خلوص بالا (2007)..... 10

## 1. معرفی پدیده گلخانه‌ای

جواطراف کره‌ی زمین نقش بسیار مهمی در جلوگیری از کاهش دمای آن ایفا می‌کند. به طوری که در صورت فقدان اتمسفر، متوسط درجه حرارت زمین به سطحی زیر دمای انجماد (19- درجه سانتی‌گراد) می‌رسید. امروزه ما با پدیده‌ی گرمایش کره زمین روبه‌رو شده‌ایم. به دلیل فعالیت‌های صنعتی بشر گازهایی تحت عنوان گازهای گلخانه‌ای اثرات منفی بر روی مکانیزم طبیعی ورود و خروج تابش‌های خورشیدی گذاشته‌اند که در صورت عدم مهار آن، عواقب نامطلوبی برای بشر در انتظار خواهد بود. تابش‌های خورشیدی که از جو زمین عبور کرده‌است، به سطح زمین می‌رسند. بخشی از این تابش‌ها جذب زمین شده و آن را گرم می‌کنند و بخشی دیگر با طول موج بلند از سطح زمین منعکس شده و در حالت طبیعی جو می‌بایستی بخش اعظم آن از جو خارج شوند. برخی از گازهای موجود در اتمسفر و از جمله مهمترین آن‌ها دی‌اکسیدکربن، همانند لایه‌ای در اطراف زمین عمل می‌کنند. اگر تراکم این گازها در جو زیاد شود کما اینکه امروزه با آن مواجهیم، به تابش‌های انعکاس یافته از سطح زمین اجازه عبور نداده و دوباره آن‌ها را باز می‌گرداند و درون جو محبوس می‌کند. به بیان دیگر این گازها که تحت عنوان گازهای گلخانه‌ای یاد میشوند در مقابل تابش خورشید همانند یک جسم شفاف و برای بازتاب این تابش از سطح زمین مانند جسم کدر عمل می‌کنند. گازهای گلخانه‌ای منجر به کاهش زخامت لایه ازن نیز خواهند شد که عوارض به خود را در پی خواهد داشت. گازهای گلخانه‌ای عبارتند از دی‌اکسیدکربن، منواکسید نیتروژن، متان، هیدروفلوئورکربن‌ها، پرفلوئورو کربن‌ها و سولفور هگزافلوراید.

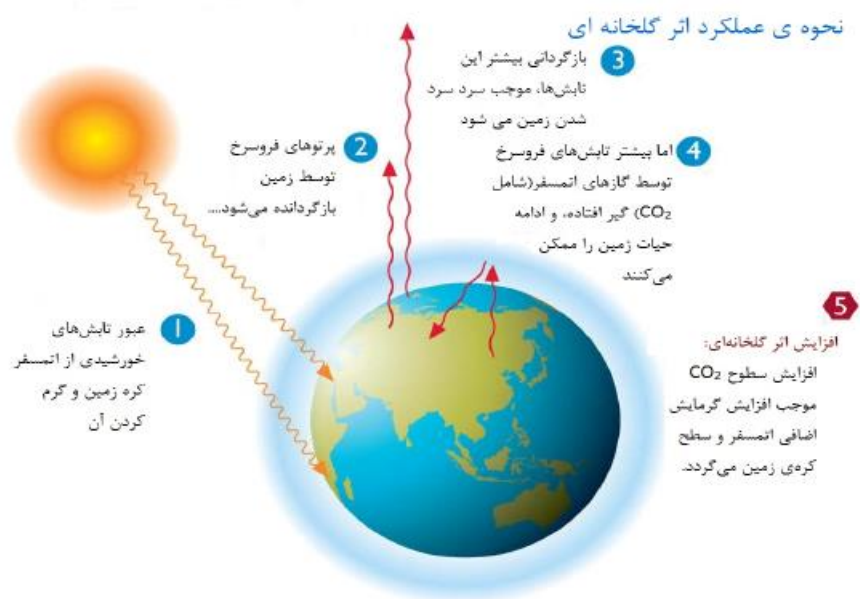
## 2. پتانسیل گرمایش جهانی

پتانسیل گرمایش جهان به منظور مقایسه نسبی بین گازهای گلخانه‌ای از لحاظ شدت تاثیرات گلخانه‌ای تعریف شده که عبارت است از میزان تاثیرات گلخانه‌ای یک گاز مبنای (دی‌اکسید کربن) در جرم‌های مساوی از هر دو گاز. این معیار مناسبی می‌تواند باشد برای دانشمندان و سیاست‌گذاران برای قیاس گازهای مختلف جهت شناسایی شدت تاثیرات منفی وارده توسط آنها بر گرمایش زمین. پتانسیل گرمایش جهان برای گازهای مهم گلخانه‌ای در جدول 1 آمده‌است.

نام گاز	فرمول شیمیایی	طول عمر جوی (سال)	پتانسیل گرمایش جهانی
دی اکسید کربن	CO <sub>2</sub>	متغیر	۱
متان	CH <sub>4</sub>	۱۲	۲۱
منواکسید نیتروژن	N <sub>2</sub> O	۱۲۰	۳۱۰
هگزاfluorید سولفور	SF <sub>6</sub>	۳۲۰۰	۲۴۰۰۰
هیدرو فلوئورو کربنها	HFCs	۱-۲۰۰	۱۴۰-۱۲۰۰۰

جدول 1 پتانسیل گرمایش جهانی گازهای گلخانه‌ای

فعالیت‌های تولیدی و اقتصادی بشر در سال‌های اخیر، عامل مهمی در افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو زمین بوده است. صنعتی شدن جوامع امروزی، منجر به بهره‌برداری بیشتر و فشرده‌تر از سوخت‌های فسیلی زغال‌سنگ، نفت و گاز به منظور استفاده در تولید و حمل‌ونقل شده است. احتراق این سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش غلظت این گاز از سال 1800 میلادی تا کنون تا مرز 33٪ افزایش یافته است. لذا بر اساس مذاکرات بین‌المللی در مورد موضوع تغییر اقلیم در سال 1998، چهارچوبی که برای بررسی پدیده گرم شدن زمین تعیین گردید به این صورت بیان شد که افزایش گازهای گل‌خانه‌ای در جو، درجه حرارت زمین به میزان 5 درجه سانتی بیشتر خواهد شد.

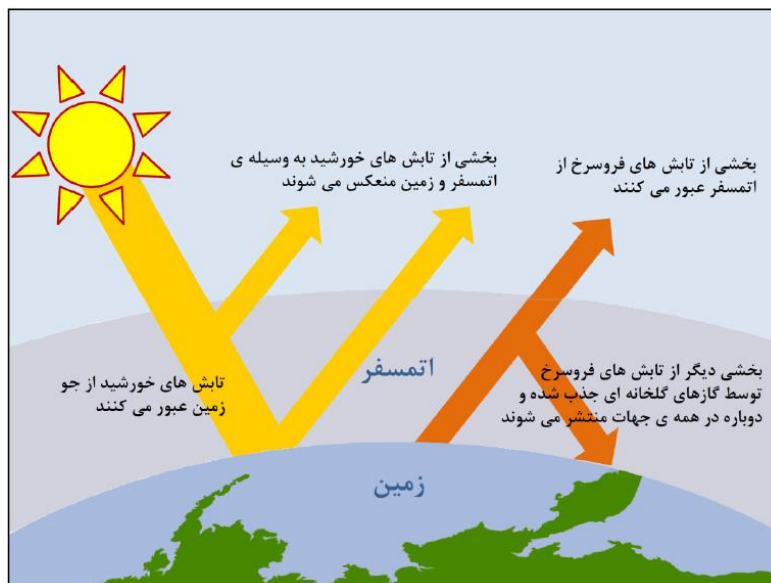


شکل 1 نحوه ی عملکرد گازهای گلخانه ای

## 2.1. خطرات

اکسیدهای گوگرد با ایجاد باران های اسیدی باعث خوردگی سطوح و آلودگی آب ها و خاک می شوند، این اکسیدها عامل ایجاد بیماری هایی مانند آسم و برونشیت هستند. همچنین اکسیدهای نیتروژن عامل تشکیل مه دود فتوشیمیایی می شوند که سوزش چشم، پوست و خطرات ابتلا به بیماری های قلبی و تنفسی را به همراه خواهند داشت. از جمله مواردی که در پی گرمایش کره زمین با آن مواجه خواهیم بود می توان به سوراخ شدن لایه ازن، بالا آمدن سطح آب دریاها به دلیل ذوب برف و یخ موجود در خشکی، کاهش بارش باران، اثرات منفی گرما بر روی سلامت بشر، طوفان، سیلاب، خشکسالی و از لحاظ اقتصادی به کاهش تولید ناخالص جهان بین 5 تا 20 درصد اشاره کرد. در حدود 60٪ از آثار گلخانه ای ناشی از فعالیت های بشر، به انتشار گاز دی اکسید کربن مربوط می باشد. منبع اصلی تولید این سوخت از احتراق سوخت های فسیلی بوده که در دنیای حاضر یکی از ملزومات اصلی تولید انرژی می باشد. در شکل 2 و جدول 2 سهم صنایع مختلف در تولید این گاز و غلظت این گاز در دودکش صنایع مختلف نشان داده شد.

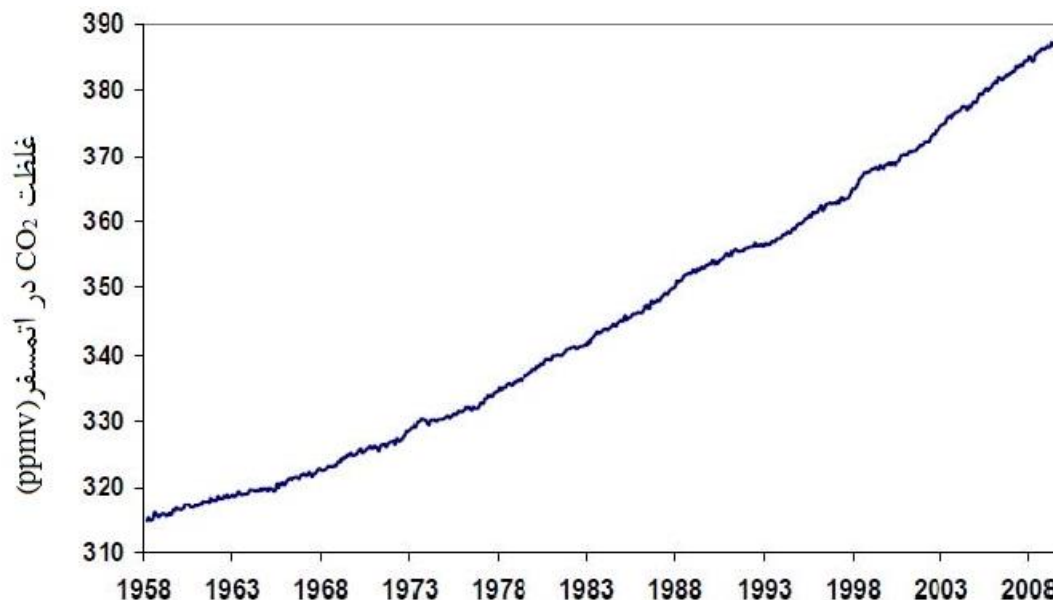




شکل 2 مکانیزم گرمایش کره زمین

### 3. دی اکسید کربن

دی اکسید کربن با توجه به آنکه درصد بسیار بالایی از گازهای موثر در پدیده گرم شدن زمین را عهده دار است، می توان گفت مهار این گاز به معنای کنترل کل جو زمین می باشد. منابع اولیه تولید دی اکسید کربن حاصل از فعالیت های بشری مربوط است به احتراق سوخت های فسیلی از صنایعی نظیر تولید برق، تولید سیمان، صنایع فولاد و ... . گاز دی اکسید کربن با غلظت 5٪ در هوا می تواند باعث کوتاه شدن نفس، سرگیجه، اختلال حواس، سردرد و بیهوشی شود. در غلظت 10٪ و در صورت عدم انتقال فرد به جای دیگر باعث مرگ می شود. در صورتی که افراد به مدت طولانی تحت تاثیر غلظت 1 تا 2 درصد این گاز قرار بگیرند موجب افزایش رسوب کلسیم در بافت های بدن شده و اختلال در سیستم بدن و تغییر رفتار را منجر می شود. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) آستانه اثرگذاری منفی این گاز را 10000 ppm برای 10 ساعت کار در روز و بیش از این مقدار را خطرناک اعلام کرده است. همچنین بر اساس استاندارد Occupational Safety And Health Act (OSHA) غلظت 15000 ppm حداکثر میزان مجاز این گاز در هوا می باشد. پیش از سده هجدهم (پیش از انقلاب صنعتی در اروپا)، متوسط غلظت دی اکسید کربن حدود 290 ppmv بوده و این در حالیست که امروز این میزان غلظت به 360 ppmv رسیده و با نرخ 0.3-0.4 ppmv/year در حال افزایش است. عامل اصلی این افزایش غلظت دی اکسید کربن به دلیل انقلاب صنعتی می باشد. با سوزاندن هر تن کربن، 3.4 ton دی اکسید کربن تولید می شود.



نمودار 1 تغییرات غلظت CO<sub>2</sub> در فاصله سالهای 1958-2008 (برگرفته از یخ‌های Hawaii Mauna Loa).

مصرف جهانی سوخت‌های فسیلی چیزی حدود 22 میلیارد تن دی‌اکسیدکربن را در هر سال به درون جو منتشر می‌کند که این مقدار نیز در حال افزایش است. هدف اتحادیه اروپا آن است که اجازه ندهد میانگین دمای هوا 2 درجه سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دمای هوای پیش از انقلاب صنعتی شود. این مقدار در حال حاضر 0.76 درجه سانتی‌گراد است. برنامه آن است که میزان ورود گاز دی‌اکسیدکربن تا سال 2020 از وضعیت روند صعودی خارج شده و تا سال 2050 سیر نزولی گرفته و به 50٪ میزان آن در سال 1990 برسد. هزینه این کار تا سال 2030 حدود 5٪ تولید ناخالص جهان را به خود اختصاص خواهد داد. مهمترین عامل انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط می‌شود به احتراق سوخت‌های فسیلی که تولید دی‌اکسیدکربن، منواکسید نیتروژن و متان را در پی دارد. تاسیسات صنعتی مهم مربوطه عبارتند از جوش‌آورها، کوره‌ها، توربین‌های گازی، زباله سوزها و فلرها. کشور ایران در سال 1999 با تولید مجموعاً 263 میلیون تن دی‌اکسیدکربن مقام نخست را در منطقه خاورمیانه دارا بوده‌است. که این مقدار تولید، رشد 45 درصدی نسبت به سال 1990 دارد. از این مقدار 22٪ مربوط است به صنایع شیمیایی، 25٪ مربوط به حمل‌ونقل جاده‌ای، 24٪ مربوط به نیروگاه‌ها و بقیه توسط سایر عوامل تولید می‌شوند.

#### 4. پروتکل کیوتو

میزان روند تغییرات آب‌وهوایی به حدی نگران کننده به نظر می‌رسد که جامعه بین‌المللی طی کنوانسیون تغییرات آب‌وهوا و پروتکل کیوتو، تصمیم به مهار این پدیده گرفته‌است. کنوانسیون تغییرات آب‌وهوا در سال 1992 در اجلاس ریو با هدف تثبیت غلظت گازهای گلخانه‌ای حاصل از فعالیت‌های صنعتی در سطحی که از آسیب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی بر زندگی انسان و حیات روی زمین بکاهد، تدوین شد و اجرایی شدن آن دو سال طول کشید. این کنوانسیون در سال 1994 در 50 کشور به اجرا درآمد و به فاصله تنها چند سال از تدوین آن، پروتکل کیوتو در سومین اجلاس اعضای متعهد به کنوانسیون تغییر آب‌وهوا در دسامبر 1997 در کیوتوی ژاپن تصویب شد و به مدت یک سال به منظور امضای کشورها و اعضای کنوانسیون مفتوح ماند تا این که با الحاق روسیه، این پروتکل در فوریه 2005 اجرایی شد. جمهوری اسلامی ایران در سال 1375 (1996) با تصویب مجلس شورای اسلامی و تایید شورای نگهبان به عضویت کنوانسیون تغییرات آب‌وهوا درآمد و قانون الحاق ایران به پروتکل کیوتو نیز در سال 1384 (2005) به تایید شورای نگهبان رسید. ایجاد ساختار اجرایی مناسب برای حصول به اهداف کنوانسیون و نیز تقویت تعهدات کشورهای پیوسته I کنوانسیون (کشورهای توسعه یافته) در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و انتقال کمک‌های فنی و مالی به کشورهای در حال توسعه و کشورهایی که به شدت متأثر از آثار تغییر اقلیم هستند، اهداف اصلی پروتکل را تشکیل می‌دهد. هر یک از اعضای پیوسته I به طور مستقل یا مشترک از سوی پروتکل کیوتو متعهد شده‌اند که انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا حد مشخصی حذف یا کاهش دهند. این در حالی است که کشور ما به دلیل قرار گرفتن در بین کشورهای در حال توسعه، در دوره اول تعهد 2008 تا 2012 اجباری به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ندارد. گازهای گلخانه‌ای که مدنظر پروتکل کیوتو هستند عبارتند از دی‌اکسیدکربن، متان، اکسید نیتروژن، هیدروفلوروکربن‌ها، پرفلوئوروکربن‌ها و سولفور هگزافلوراید. میزان تاثیر هر یک از این گازها در پدیده گلخانه‌ای باهم متفاوت است. این میزان تاثیر را با شاخصی به نام پتانسیل جهانی (GWP) نشان می‌دهند. مقدار این شاخص برای دی‌اکسیدکربن برابر واحد در نظر گرفته شد و GWP متان که 21 است نشان دهنده این است که یک تن متان معادل 21 تن دی‌اکسیدکربن اثر گلخانه‌ای دارد. پروتکل کیوتو مکانیزم‌هایی را برای اجرایی شدن این تعهدات پیش بینی نموده‌است. یکی از این مکانیزم‌ها، مکانیزم توسعه پاک (CDM) می‌باشد که طبق آن به کشورهای متعهد اجازه داده می‌شود کاهش گازهای گلخانه‌ای را با همکاری و در صنایع کشورهای در حال توسعه یا توسعه نیافته انجام دهند و به این ترتیب علاوه بر کاهش گازهای گلخانه‌ای، ضمن سرمایه‌گذاری و انتقال تکنولوژی و ایجاد اشتغال و ... به توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست در کشورهای در حال توسعه یا توسعه نیافته کمک

کنند.

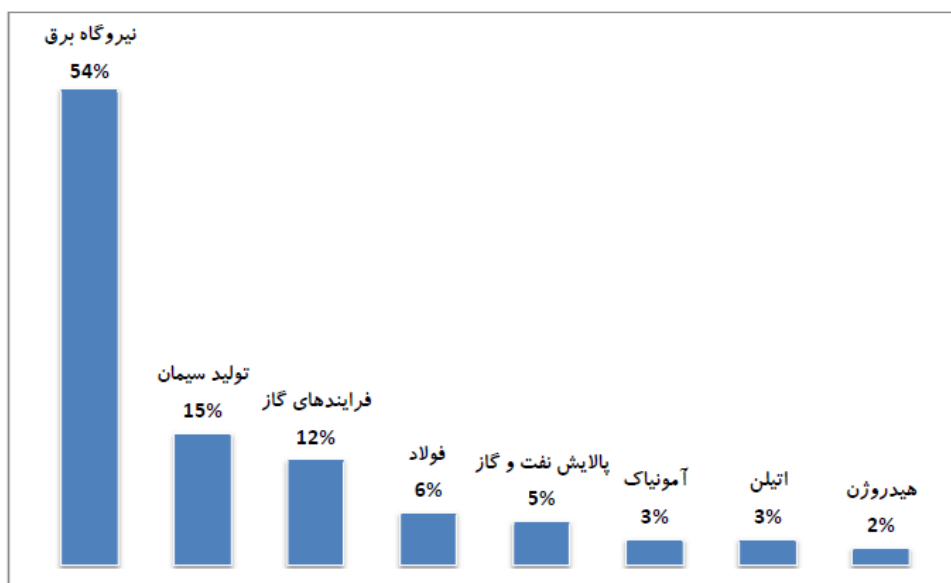
در روند اجرای مکانیزم توسعه پاک، گازهای گلخانه‌ای با اجرای طرحهایی نظیر کاهش مصرف سوخت، افزایش بهره‌وری انرژی در نیروگاه‌ها، شبکه انتقال، صنایع، جلوگیری از هدر رفت انرژی یا منابع انرژی، استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، جنگل‌کاری و ... صورت می‌گیرد. با اجرای این طرح‌ها کشورهای توسعه نیافته علاوه بر جذب سرمایه خارجی و فناوری بالاتر، درآمدهایی را نیز کسب می‌کنند. مقدار این درآمدها وابسته به شرایط و حدود طرح‌ها و توافق طرفین دارد لیکن برای کاهش هر تن گاز گلخانه‌ای پایه (دی‌اکسیدکربن) درآمدی حدود 10 یورو نصیب صاحب پروژه می‌شود. این درآمد جذاب موجب هجوم موسسات مالی و سرمایه‌گذاری و جهش سریع بازار تجارت کربن گردیده‌است. از سال 2005 تاکنون بیشتر از 1600 پروژه در سراسر جهان به ثبت رسیده که کشورهایی نظیر چین با بیش از 500 پروژه، هند با حدود 400 پروژه و برزیل با حدود 150 پروژه در راس استفاده از این فرصت بین‌المللی هستند و تاکنون از مجموع حدود 285 میلیون تن کاهش گاز گلخانه‌ای، چین به تنهایی با حدود 142 میلیون تن قریب به 50٪ بازار را به خود اختصاص داده‌است. مطابق اعلام سازمان ملل این تعداد پروژه ثبت شده، منجر به کاهش حدود 296 میلیون تن دی‌اکسیدکربن در سال می‌شود و درآمدهای سالیانه چند میلیارد دلاری برای صاحبان پروژه‌ها به همراه دارد. این بازار با روند افزایشی بی‌وقفه‌ای ادامه دارد. کشور ما با انتشار سالیانه بیش از 500 میلیون تن گاز گلخانه‌ای پتانسیل بسیار بالایی در بخش‌های مختلف برای پیاده نمودن طرح‌های مکانیزم توسعه پاک دارد و تحصیل درآمدهای چند صد میلیون دلاری قابل دسترس است. این درآمدها علاوه بر حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار، منجر به جذب سرمایه‌گذاری خارجی، کاهش مصرف منابع، ایجاد اشتغال و ... می‌شود.

سوخت	kg co <sub>2</sub> / kWh	kg co <sub>2</sub> / kg fuel	kg c / kg fuel	kWh / kg fuel
ذغال سنگ	0.37	2.3	0.75	7.5
بنزین	0.27	3.3	0.9	12.5
نفت سبک	0.26	2.6	0.7	11.7
گازوئیل	0.24	3.2	0.86	11.8
گاز مایع	0.24	3.0	0.82	12.3
گاز طبیعی	0.23	2.8	0.75	12

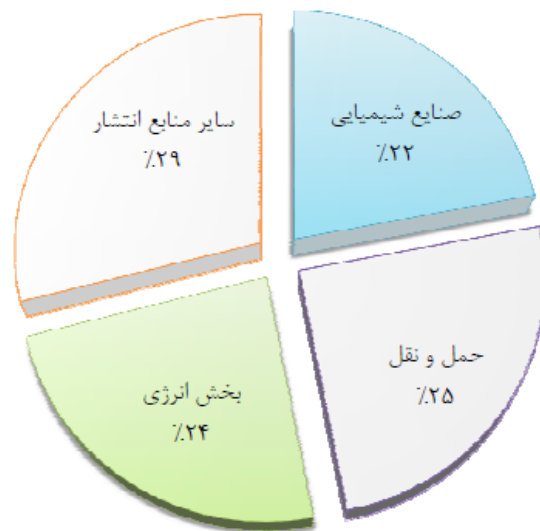
جدول 2 میزان آلاینده‌گی و انرژی سوخت‌های مختلف

نوع کارخانه	درصد گاز CO <sub>2</sub>
سیمان	۱۵ - ۲۵
نیروگاه	۸ - ۱۵
پتروشیمی	۸ - ۱۳
آهن و فولاد	۱۵ - ۲۰
پالایشگاه	۳ - ۱۸
آمونیاک	۸

جدول 3 غلظت CO<sub>2</sub> در خروجی دودکش صنایع مختلف



نمودار 2 سهم صنایع مختلف در تولید گاز کربنیک در جهان



نمودار 3 سهم بخش‌های مختلف صنعت در انتشار CO<sub>2</sub> در ایران

طبق نمودار بالا بیشترین سهم تولید دی‌اکسید کربن در جهان مربوط به نیروگاه‌های برق است که با وجود اینکه غلظت دی‌اکسید کربن در دودکش آنها به نسبت صنایع دیگر کمتر است اما به دلیل دبی بسیار بالای آن به عنوان بیشترین تولیدکننده این آلاینده محسوب می‌شود و بعد از آن صنایع سیمان تولیدکننده عمده دی‌اکسید کربن به شمار می‌رود.

## 5. منابع انتشار CO<sub>2</sub> در صنعت و بررسی فرآیندهای مختلف برای آنها

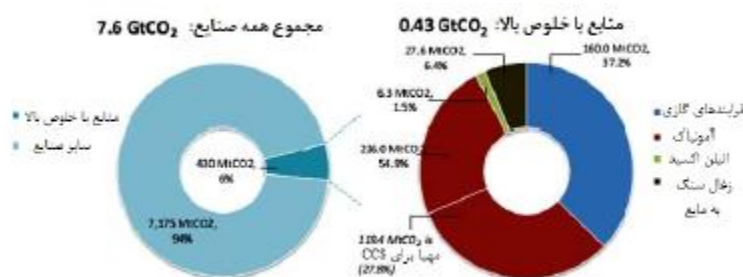
در حال حاضر حدود ۹۰٪ از انرژی اولیه مورد نیاز جهان توسط سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود، که موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGs) و نگرانی‌های مرتبط با گرم شدن کره‌ی زمین و تغییرات آب و هوایی است. تقریباً ۶۹٪ از انتشار گاز CO<sub>2</sub>، و ۶۰٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای، وابسته به مصرف انرژی می‌باشد. تولیدات صنعتی، بدون در نظر حذف موقعیت جغرافیایی آنها، حدود ۴۰٪ از انتشار جهانی CO<sub>2</sub> را تشکیل می‌دهند. برای کاهش حدود ۹٪ از انتشارهای گاز CO<sub>2</sub> مرتبط با بخش مصرف انرژی برای نصف کردن این انتشارات تا سال ۲۰۵۰، CCS می‌بایست سالانه میزان کاهش تا بیش از ۴ گیگا تن انتشار گاز CO<sub>2</sub> حاصل از فعالیت‌های صنعتی را به خود اختصاص دهد. برای رسیدن به این هدف، در سال ۲۰۵۰ می‌بایست حدود ۲۰٪ تا ۴۰٪ از تمام تاسیسات صنعتی با CCS مجهز گردند. در طرحی که با هدف تثبیت تولید گازهای گلخانه‌ای بر اساس گزینه‌هایی با هزینه‌هایی تا حدود ۵۰ دلار بر تن CO<sub>2</sub> در هر سال ۵/۱ گیگا تن از CO<sub>2</sub>

می بایست تا سال ۲۰۵۰ گرفته شده و ذخیره گردد، که ۱۴٪ از کل مقدار مورد نیاز برای تثبیت درجه حرارت جهانی است. به صورت کلی، منابع صنعتی (انسان تولید) انتشار  $\text{CO}_2$  را بر اساس غلظت  $\text{CO}_2$  موجود در گاز دودکش به دو دسته عمده تقسیم می کنند:

- منابع با خلوص بالای  $\text{CO}_2$  (بین ۳۰ تا ۹۵٪)
- منابع با خلوص پایین تا متوسط (بین ۳ تا ۲۵٪)

## 5.1. منابع با خلوص بالا

تعدادی از فرآیندهای مهم صنعتی و تولید سوخت، گاز خروجی با خلوص بالا، و با غلظت بالای  $\text{CO}_2$  تولید می کنند که این گازها می توانند به آسانی دهیدراته، فشرده، منتقل شده و ذخیره گردند. این فرآیندها شامل فرآیندهای گاز طبیعی، تولید هیدروژن (از جمله برای تولید کودهای مبتنی بر آمونیاک)، تولید سوخت ترکیبی (به عنوان مثال CTL، و یا گاز به مایع و همچنین طیف وسیعی از فرآیندهای تولید مواد شیمیایی آلی (مانند تولید اتیلن اکساید) می باشند. تمام فرآیندهای صنعتی ذکر شده در بالا جریان های گاز خروجی با غلظت  $\text{CO}_2$  بین ۳۰ تا ۱۰۰٪ تولید می کنند.



نمودار 4 تولید گاز  $\text{CO}_2$  از منابع با درجه خلوص بالا (2007)

در مقیاس جهانی، انتشار گاز  $\text{CO}_2$  از این فعالیت ها در مقایسه با انتشار گازهای گلخانه ای از فرآیندهای دیگر نسبتاً متوسط می باشد. با وجود غلظت بالای  $\text{CO}_2$  در گاز خروجی این صنایع، نرخ  $\text{CO}_2$  حاصل از این صنایع تنها حدود ۴۰۰-۴۵۰ میلیون تن (حدود ۶٪ از کل  $\text{CO}_2$  نشر شده از صنایع در سرتاسر جهان) می باشد، که در مقابل مقادیر  $\text{CO}_2$  تولیدی از صنایع عمده ی دیگر نسبتاً کم می نماید. جریان گاز  $\text{CO}_2$  خروجی از این صنایع دارای پتانسیل بالقوه ای برای پروژه هایی CCS در دوره ی کوتاه مدت می باشند و می تواند برای افزایش بهره وری از چاه های نفت با هزینه ای حدود ۱۰ یورو و یا کمتر مورد استفاده قرار گیرند.

به دلیل مهیا بودن روش های مناسب برای گاز خروجی از این سری از صنایع و همچنین کم بودن مقادیر گاز  $\text{CO}_2$

حاصل از آنها در مقایسه با منابع با خلوص متوسط -پایین ( صنایع عمده ای همچون نیروگاه ها، تولید سیمان، تولید آهن و فولاد و پالایشگاه و پتروشیمی ) در این رساله از بررسی روش های موجود برای آنها چشم پوشی می شود.

## 5.2. منابع با خلوص پایین تا متوسط

عمده ترین صنایع مصرف کننده ی انرژی و نیز از منابع اصلی انتشار  $CO_2$  توسط فعالیت های بشر، عبارت اند از:

- صنایع تولید سیمان
- آهن و فولاد
- نیروگاه های برق
- پالایش نفت و گاز
- صنایع شیمیایی و پتروشیمیایی
- صنایع چوب و کاغذ

در سال ۲۰۰۷، در بخش صنعت بالغ بر ۷/۶ گیگا تن به صورت مستقیم و ۳/۹ به دلیل استفاده از برق در صنایع، گاز  $CO_2$  منتشر شده است. صنعت تولید آهن و فولاد عامل ( ۳۰٪ ) از انتشار گازهای گلخانه ای  $CO_2$ ، سیمان ( ۲۶٪ ) و تولید مواد شیمیایی ( ۱۷٪ ) می باشند. انتشار گاز  $CO_2$  از صنعت پالایش نفت در ۲۰۰۲ در حدود ۰/۸ برآورد شده است.

### 5.2.1. صنایع تولید سیمان

از آنجایی که صنعت سیمان عامل تولید حدود ۷-۵٪ از  $CO_2$  منتشر شده در جهان می باشد که توسط انسان تولید می گردد، برای طراحی استراتژی های مناسب کاهش انتشار  $CO_2$  از صنایع، یکی از منابع مهم به شمار می آید. تولید سیمان دومین فرآیند صنعتی از لحاظ میزان انتشار گاز  $CO_2$  است که حدود ۲ گیگا تن بر سال، در سال ۲۰۰۷ در سرتاسر جهان منتشر کرده است ( و حدود ۱/۸ گیگا تن بر سال در سال ۲۰۰۵ برای سراسر جهان گزارش شده است ).

حجم بالای نشر گازهای  $CO_2$  در تولید سیمان نه تنها به دلیل نیاز شدید آن به انرژی، بلکه همچنین گاز  $CO_2$  از مواد خام آن نیز منتشر می شود. به طور کلی، بسته به نسبت سیمان بر کلینکر واحد مورد نظر، انتشار گازهای گلخانه ای از صنایع تولید سیمان عمدتاً به دلیل فرآیند کلسیناسیون سنگ آهک ( ۵۰٪ ) و سوزاندن سوخت در کوره ( ۴۰٪ ) و نیز از انتشار غیر مستقیم این گازها از بخش های تولید برق ( ۵٪ ) و حمل و نقل ( ۵٪ ) ناشی می شود. نشر خالص  $CO_2$  برای هر تن سیمان حدود ۰.۹-۱.۰ تن و در مواردی حدود ۰.۷۲-۰.۹۸ تن گزارش شده است ( انرژی و مواد خام ترکیبی ).



غلظت  $\text{CO}_2$  در گاز دودکش کارخانه سیمان عموماً حدود ۱۵-۳۰٪ می باشد.

برای تولید سیمان فرآیندی های متفاوتی طراحی شده است: فرآیند مرطوب، فرآیند نیمه مرطوب، فرآیند نیمه خشک، فرآیند خشک. این مسیرهای فرآیندی توسط درصد (مقدار) رطوبت خوراک ورودی به کوره متمایز می شوند. بهترین فناوری موجود برای تولید سیمان در حال حاضر بر اساس فرآیند خشک می باشد.

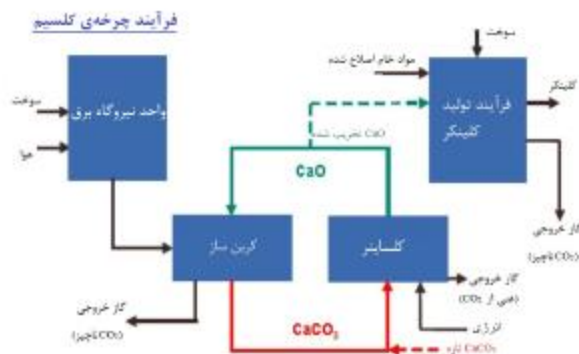
با این حال، در آینده نیاز به تدابیر بیشتری برای کاهش قابل توجه  $\text{CO}_2$  تولید شده در صنعت سیمان احساس می شود. بنابراین رویکردهای مدیریت انتشار  $\text{CO}_2$  از صنعت سیمان نیز مد نظر قرار گرفته اند، که تعدادی از آنها به صورت زیر می باشند:

- حذف و ذخیره سازی  $\text{CO}_2$  گاز دودکش
- تاسیسات ترکیبی تولید سیمان-انرژی
- کاهش نسبت کلینکر به سیمان با افزایش افزودنی ها

#### 5.2.1.1. فرآیند چرخه ی کلسیم ( ترکیب نیروگاه و واحد تولید سیمان )

گزینه ی دیگری که برای کاهش  $\text{CO}_2$  وجود دارد، ادغام واحد تولید سیمان با یک نیروگاه برق مجهز به فرایند حذف  $\text{CO}_2$  توسط چرخه ی کلسیم می باشد. توسط چرخه ی کلسیم، محتویات  $\text{CO}_2$  گاز احتراق توسط  $\text{CaO}$  برای تشکیل  $\text{CaCO}_3$  در محفظه ی کربناسیون در دماهای بالا جذب می شود. این چرخه مبتنی بر جداسازی  $\text{CO}_2$  با استفاده از سنگ آهک به عنوان یک جاذب خوب و با تشکیل  $\text{CaCO}_3$  می باشد. در مرحله ی بعدی  $\text{CaCO}_3$  تولید شده به محفظه ی کلسیناسیون فرستاده می شود و در آنجا  $\text{CaO}$  برای چرخه های بعدی کربناسیون بازیابی شده و جریان گاز غنی از  $\text{CO}_2$  تولید می شود.

فرآیند کربناسیون می تواند هم در محفظه ی احتراق و هم در محفظه ی کربناسیون که در پایین دست محفظه ی احتراق قرار دارد، انجام گیرد و هر دو مورد برای ترکیب نیروگاه های برق با صنایع سیمان مورد بررسی قرار گرفته اند.

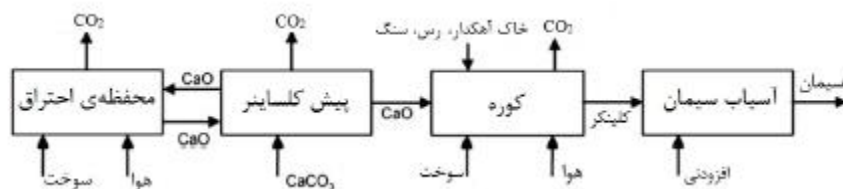


شکل 3 شماتیک ادغام نیروگاه با واحد تولید سیمان توسط چرخه ی کلسیم

تخمین زده اند که اگر همه ی نیروگاه های زغال سنگ در UK و USA با واحد حذف  $\text{CO}_2$  توسط چرخه ی کلسیم مجهز شوند، مقدار جاذب  $\text{CaO}$  مصرفی ۳ برابر سطح تولید ملی سیمان آنها افزوده خواهد شد.

### 5.2.1.2. جداسازی واحد پیش کلساینر از محفظه ی احتراق

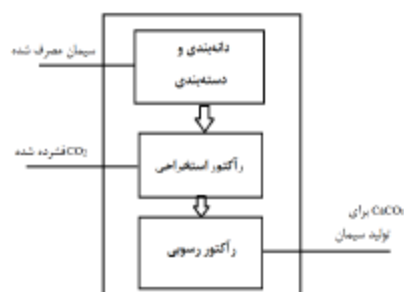
روش حذف پیشرفته دیگری که می تواند برای حذف  $\text{CO}_2$  از واحدهای تولیدی سیمان استفاده شود، این است که محفظه ی احتراق از پیش-کلساینر جدا شود، در حالی که کلسیم اکسید را به عنوان حامل گرما استفاده می کند.



شکل 4 دورنمای فرآیند جداسازی محفظه ی احتراق از پیش کلساینر

### 5.2.1.3. استفاده از سیمان تلف شده به عنوان خوراک

مطالعه ی دیگری فرآیندی برای تولید  $\text{CaCO}_3$  طی فرآیند رسوب گذاری سیمان تلف شده توسط استفاده از  $\text{CO}_2$  تحت فشار، پیشنهاد میدهد که منجر به کاهش مصرف سنگ آهک طبیعی و بالطبع آن کاهش نشر گاز  $\text{CO}_2$  می شود.



شکل 5 دورنمای فرآیند استفاده از سیمان تلف شده برای کاهش

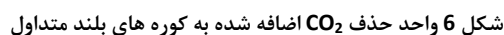
فرآیند پیشنهاد شده همچنین انتشار سولفور موجود در گاز خروجی را کاهش می دهد.  $\text{CaCO}_3$  تولید شده از خلوص بالایی برخوردار است که می تواند به عنوان کربنات کلسیم سنگین یا عامل سولفورزدایی استفاده شود.

## 5.2.2. آهن و فولاد

صنعت آهن و فولاد به عنوان یکی از سه بخش عمده ی مصرف کننده ی انرژی و نیز تولید کننده ی گاز  $\text{CO}_2$ ، یکی از بخش های مورد توجه در بخش صنعت برای کاهش انتشار این گاز می باشد. کاهش انتشار  $\text{CO}_2$  ناشی از آهن و صنعت فولاد نه تنها به عنوان یک راه حل برای مقابله با مشکل گرم شدن کره زمین و کاهش انتشار  $\text{CO}_2$  در نظر گرفته می شود، بلکه مسیری برای توسعه پایدار خود این صنعت نیز به حساب می آید. در سال ۲۰۰۵ بر مبنای تولید فولاد از سنگ آهن، به ازای تولید هر تن فولاد خام ۱-۳.۵ تن  $\text{CO}_2$  انتشار یافته است. بخش آهن و فولاد در سراسر جهان، در سال ۲۰۰۷ به تنهایی ۲.۳ گیگا تن  $\text{CO}_2$  منتشر کرده است. دو روش معمول برای تولید آهن و فولاد روش کوره های ذوب آهن و احیاء گداز می باشند.

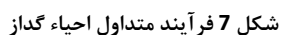
### 5.2.2.1. کوره ی آهنگری ( کوره ی بلند )

کوره های بلند بزرگترین منبع انتشار آلاینده های مستقیم  $\text{CO}_2$  در فرآیند ساخت فولاد می باشند، و در حال حاضر CCS تنها گزینه ی فنی برای کاهش موثر این آلاینده به نظر می رسد. در فرآیندهای مبتنی بر کوره ی بلند حدود ۷۰٪ از  $\text{CO}_2$  ورودی به جریان های فرآیندی به واسطه ی BF می باشد. انتشار گاز  $\text{CO}_2$  در کوره عمدتاً به دلیل استفاده از کربن به عنوان احیاء کننده می باشد.



- سوختن با استفاده از فناوری اکسیژن سوخت برای تولید گاز خروجی غنی از CO<sub>2</sub>
- استفاده از گرمای اتلاف شده برای فناوری جذب شیمیایی
- جایگزین کردن کک و زغال سنگ با برق و یا هیدروژن

حذف CO<sub>2</sub> از گاز فرایند احیا گذار، به دلیل غلظت CO<sub>2</sub> بالاتر گاز خروجی آن از لحاظ هزینه بسیار عملی تر از حذف آن از گاز کوره ی بلند (BF) با دمش هوا می باشد.



پروژه‌ی درس تحلیل انرژی - دانشکده مهندسی انرژی - دانشگاه صنعتی شریف - دکتر عباس رجبی قهنویه - بهمن 1400

مستقیم آهن مبتنی بر گاز، نیز برای کاهش انتشار  $\text{CO}_2$  از صنعت آهن و فولاد مناسب می نماید. فرایند DRI شامل تبدیل مستقیم سنگ آهن به آهن با استفاده از کاهش گاز می باشد، که به طور معمول گاز طبیعی است که از نظر شیمیایی به هیدروژن و  $\text{CO}$  و  $\text{CO}_2$  تبدیل شده است. همانند آنچه برای مورد BF گفته شد،  $\text{CO}_2$  می تواند خواه مستقیماً از گاز فرآیند گداختن و یا پس از تبدیل  $\text{CO}$  به  $\text{CO}_2$ ، از گاز گرفته شود.

### 5.2.3. صنایع پالایش و پتروشیمی

حدود ۱۱٪ از انتشار  $\text{CO}_2$  حاصل از صنایع، توسط صنایع شیمیایی و پتروشیمیایی تولید می شود. پالایشگاه های نفت نیز از منابع مهم انتشار  $\text{CO}_2$  هستند. علاوه بر منابع حاصل از احتراق ( همانند دیگ های بخار و گرمکن های فرآیندی )، در این صنعت منابع عمده دیگری همچون واحدهای کراکینگ کاتالیستی سیال، واحد تولید هیدروژن، واحد بازیابی سولفور و غیره سهم چشمگیری در انتشار  $\text{CO}_2$  دارند. در مقیاس جهانی برای پالایش هر ۳۰۰۰ بشکه نفت در سال، حدود ۰.۸ تا ۴.۲ میلیون تن  $\text{CO}_2$  در سال تولید می شود.

### 5.2.4. نیروگاه

تولید برق ۳۲٪ از مجموع جهانی مصرف سوخت های فسیلی و حدود ۴۱٪ از کل انرژی مرتبط با انتشار گاز  $\text{CO}_2$  را به خود اختصاص داده است. نیروگاه های با سوخت فسیلی یکی از منابع عمده انتشار  $\text{CO}_2$  در اتمسفر به حساب می آیند، و در بین سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۷ بخش تولید انرژی حدود ۱۲ گیگا تن  $\text{CO}_2$  تولید کرده است که چیزی حدود ۵۴ تا ۶۰٪ از کل انتشار  $\text{CO}_2$  حاصل از بخش صنعت ( با احتساب نیروگاه ها ) را به خود اختصاص داده است. بنابراین بخش تولید برق می بایست در مرکز توجه هر گونه تلاشی برای کاهش انتشار  $\text{CO}_2$  قرار گیرد. بهبود بهره وری تولید، تغییر به سوخت های فسیلی با کربن پایین تر، افزایش تولید برق از انرژی های تجدیدپذیر و هسته ای و احداث سیستم های CCS همه و همه می توانند تا حدودی در ایجاد تحولات اساسی در بخش تولید برق نقش مهمی بازی کنند.

## 6. CO<sub>2</sub> و سیستم کلی حذف آن

CO<sub>2</sub> گازی بی‌رنگ و بی‌بو با یک مولکول خطی با پیوند دوگانه بین اتم‌های کربن و اکسیژن می‌باشد. این ماده در اتمسفر با غلظت حجمی 0.039٪ در دسامبر 2010 گزارش شده‌است. جان ستورات و همکارانش در طی یک تحقیق میدانی تغییر غلظت گاز CO<sub>2</sub> را در یخچال‌های مونا لوا مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که در طی سده‌ی اخیر شیب افزایش غلظت این گاز در اتمسفر کره‌ی زمین به شدت افزایش یافته و چندین برابر مقادیر آن در قرون گذشته می‌باشد.

طبق یک قانون تجربی، هر چقدر نسبت H/C سوختی بیشتر باشد، میزان کمتری کربن‌دی‌اکسید توسط آن سوخت تولید می‌شود. این نسبت در گاز طبیعی در حدود 4، در نفت 2-1/8 و در ذغال سنگ 1/2-0/8 است. در این راستا کربن‌زدائی سوخت، قبل از احتراق می‌تواند روش مناسبی باشد. یک روش جایگزین دیگر نیز استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، زیست‌توده‌ها، زمین‌گرمایی و انرژی باد است که در مکانیزم توسعه‌ی پاک نیز به عنوان گزینه‌های کاهش CO<sub>2</sub> در نظر گرفته شده‌اند. البته باید دسترسی به این انرژی‌ها و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بازدهی آنها نیز مدنظر قرار گیرد.

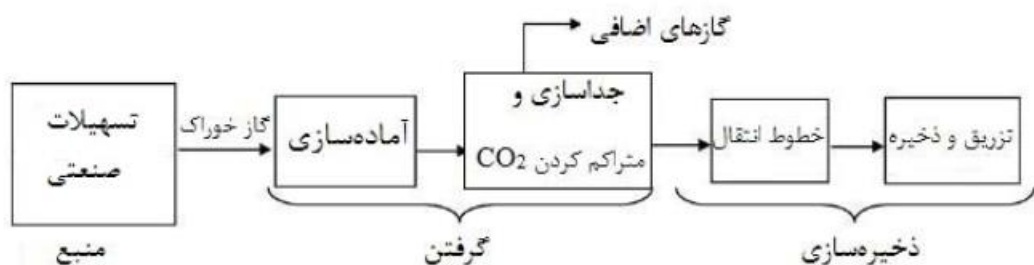
### 6.1. چرخه‌ی حذف و ذخیره‌ی CO<sub>2</sub>

علیرغم طراحی سیستم‌های جدید، دنیای امروز هنوز هم نیازمند استفاده از منابع کربنی برای تولید مواد شیمیایی آلی با پایه‌ی کربنی در حوزه‌ی وسیعی از کاربردهای خانگی، تجاری و صنعتی می‌باشد. بنابراین استفاده از CO<sub>2</sub> در فرایندهای شیمیایی و یا فیزیکی، کاربردهای صنعتی برای تولید مواد شیمیایی با ارزش افزوده بالا، استفاده از آن به عنوان یک سیال مناسب در بازیافت انرژی، نگهداری غذاها، اطفای حریق و استفاده در گلخانه‌ها و بسیاری از کاربردهای دیگر می‌تواند زمینه دیگری در بهره‌برداری از آن باشد.

در این بین روش‌های مختلفی نیز برای به دام انداختن گازهای منتشر شده از صنایع مختلف و نیز به دلیل مصرف سوخت‌های فسیلی که اجتناب ناپذیر می‌نمایند ارائه شده‌است. حذف CO<sub>2</sub> و ذخیره‌سازی آن، صرف نظر از استفاده از فناوری‌های نوینی همچون انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از انرژی هسته‌ای، بهبود در بازده انرژی و تغییر سخوت از ذغال سنگ به گاز طبیعی، می‌تواند به عنوان یکی از گزینه‌های مهم برای کاهش انتشار گاز CO<sub>2</sub> باشد. CCS یک سری فرایند شامل حذف و جدا سازی CO<sub>2</sub> از منابع صنعتی و مرتبط با انرژی، انتقال به محل ذخیره‌سازی و ایزوله کردن طولانی مدت CO<sub>2</sub> گرفته شده از اتمسفر است. بر اساس این تعریف، CCS شامل سه مرحله اساسی است :

- جداسازی CO<sub>2</sub>
- انتقال به محل ذخیره‌سازی
- ذخیره‌سازی

شکل زیر دورنمایی از فرایند حذف CO<sub>2</sub> و ذخیره‌سازی آن را نشان می‌دهد.



شکل 8 زنجیره‌ی حذف و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> همچون بخشی از یک فرایند صنعتی

در این راهکار، بسته به نوع فناوری به کار رفته در بخش موردنظر، می‌توان CO<sub>2</sub> را از برخی از نقاط زنجیره‌ی تبدیل انرژی خارج نمود. پس از جداسازی، CO<sub>2</sub> حذف شده در فرایندهای شیمیایی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد و یا اینکه در یک مکان مناسب به مدت طولانی ذخیره و نگهداری خواهد شد. حذف CO<sub>2</sub> پرهزینه‌ترین مرحله‌ی زنجیره‌های CCS می‌باشد. فناوری‌های حذف CO<sub>2</sub> را بر اساس چارچوب زمانی می‌توان در دو دسته تقسیم بندی نمود :

- فناوری‌های کوتاه‌مدت یا میان‌مدت
- فناوری‌های بلندمدت

به صورت کلی به آن دسته از فناوری‌هایی که اجرا و یا بررسی آن‌ها در بازه‌ی زمانی بین 15-20 سال پیش‌بینی شده باشند فناوری‌های کوتاه‌مدت و یا میان‌مدت در نظر گرفته می‌شوند. فناوری‌های کوتاه و یا میان‌مدت به عنوان فناوری‌هایی که در حال حاضر در مرحله‌ی نیمه صنعتی شدن و تجاری‌سازی می‌باشند فرض می‌گردند.

همچنین آن دسته از فناوری‌هایی که مطالعه و مرحله‌ی عملیاتی شدن آن‌ها در بازه‌ی زمانی بالای 20 سال پیش‌بینی شده باشند فناوری‌های بلندمدت در نظر گرفته می‌شوند، که این جستار به همان صورت فناوری‌های بلندمدت نوشته می‌شوند. فناوری‌هایی که به عنوان کوتاه و یا میان‌مدت طبقه بندی می‌شوند آنهایی هستند که همه‌ی اجزا آنها از لحاظ تجاری امروزه در دسترس باشند، حتی در صورتی که خود فرآیند آن به طور کامل تست و عملیاتی نشده باشد. همه‌ی فناوری‌های دیگری که در حال حاضر در قاز آزمایشگاهی و یا مدلسازی می‌باشند، به عنوان فناوری‌های بلندمدت فرض می‌شوند.

همچنین فناوری‌های حذف CO<sub>2</sub> را به لحاظ فنی و موقعیت جابجایی آنها در صنایع مختلف به سه دسته تقسیم

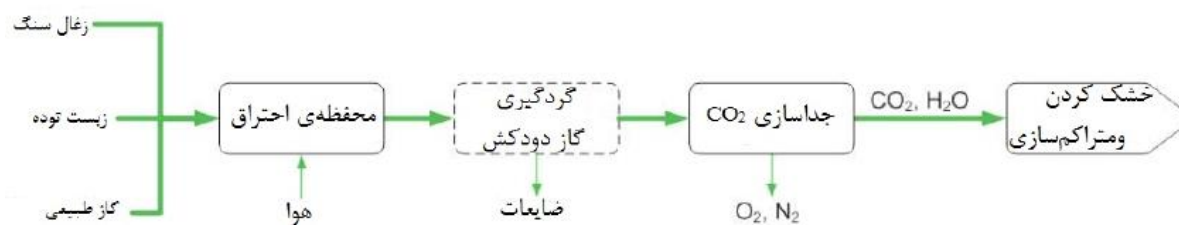
می‌کنند :

- فرآیندهای پسا احتراقی
- فرآیندهای پیش احتراقی
- فرآیندهای اکسیژن-سوخت (نیتروژن زدایی)

### 6.1.1. فرآیندهای پسا احتراقی

امروزه اکثر صنایع مهم در سراسر دنیا از احتراق سوخت‌های فسیلی، به ویژه زغال سنگ و گاز طبیعی، برای تولید و تأمین انرژی استفاده می‌کنند. البته در بعضی صنایع همانند سیمان انتشارات گاز CO<sub>2</sub> منابع دیگری به غیر از احتراق سوخت‌های فسیلی نیز دارد. به طور کلی در اکثر صنایع، از هوا (که تقریباً 78٪ آن نیتروژن است) برای احتراق استفاده می‌شود و گازهای دودکش تولید شده معمولاً در فشار یک اتمسفر بوده و غلظت CO<sub>2</sub> در آنها معمولاً بین 3-15٪ حجمی می‌باشد. در این سری از فرآیندها (جذب پسا احتراقی) که بیشترین پیشرفت را به لحاظ فنی و اقتصادی تاکنون داشته است، در واقع جداسازی CO<sub>2</sub> از گاز دودکش حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، گاز طبیعی، نفت و زیست توده توسط هوا می‌باشد. گاز حاصل از احتراق بعد از پشت سر گذاشتن مراحل تصفیه اولیه به عنوان خوراک بخش جداسازی CO<sub>2</sub> از گازهای دودکش به کار می‌رود.

گاز خروجی، عموماً در اثر تماس مستقیم آب قبل از ورود به دمنده‌ی طراحی شده برای غلبه بر افت فشار سیستم جذب، سرد می‌شود. پس از فرآیند آماده‌سازی اولیه گازهای خروجی از دودکش (سردسازی تا دمای مناسب و تنظیم فشار برای فرآیند جداسازی موردنظر)، این گازها به واحد جداسازی (حذف) گاز CO<sub>2</sub> انتقال داده می‌شوند. شکل زیر دورنمای کلی فرآیندهای پسا احتراقی حذف CO<sub>2</sub> را نشان می‌دهد:



شکل 9 ساختار کلی سیستم‌های پسا احتراقی حذف CO<sub>2</sub>

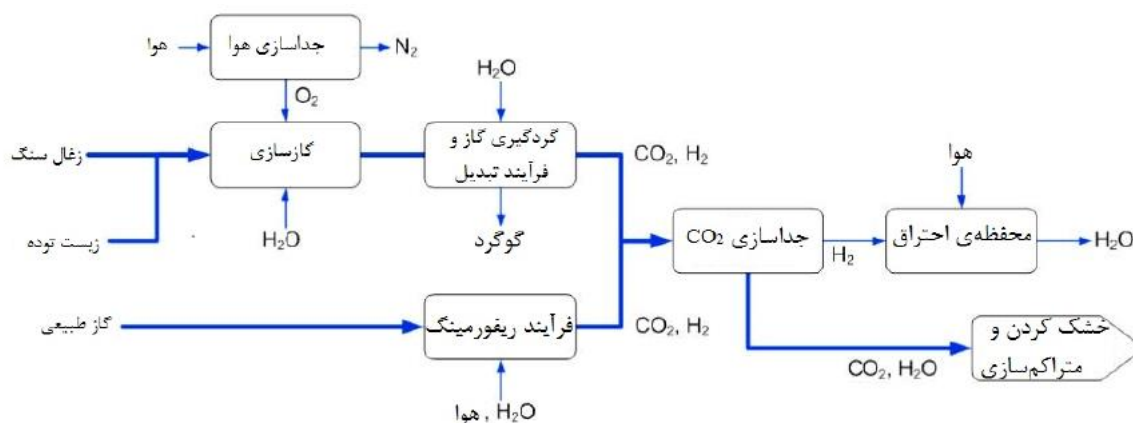


حذف پسا احتراقی یک فرایند پایین دستی است که به دلیل غلظت کم  $\text{CO}_2$  در گاز دودکش غالباً از جذب شیمیایی (همانند سولفور زدایی از گاز طبیعی) برای جداسازی آن استفاده می‌شود. حلال مورد استفاده برای حذف گاز  $\text{CO}_2$  می‌تواند فیزیکی، شیمیایی و یا مواد واسطه باشند، اما تاکنون حلال‌های شیمیایی معروف به حلال‌های آمینی، کاربرد بیشتری در جذب پسا احتراقی داشته‌اند. جذب شیمیایی روشی آزمایش شده می‌باشد که ده‌ها سال است به کار می‌رود. این روش به صورت تجاری به خوبی توسعه یافته و هم برای کارخانه‌های جدید و هم بازسازی کارخانه‌های موجود مناسب می‌باشد. سیستم‌های جذب پسا احتراقی به اکثر نیروگاه‌های موجود، که عامل دو سوم  $\text{CO}_2$  انتشار یافته به اتمسفر هستند، می‌توانند به سادگی افزوده گردند. این روش بدون ایجاد تغییر در اصل فرآیند واحد مورد نظر در مقایسه با سایر روش‌ها، به حذف  $\text{CO}_2$  کمک می‌کند و قابلیت انعطاف بالایی دارد.

## 6.1.2. فرآیندهای پیش احتراقی

در اکثر فرآیندهای سوختن از هوا به عنوان اتمسفر احتراق استفاده می‌شود و از آنجایی که بخش اعظم هوا از نیتروژن تشکیل شده است، غلظت گاز  $\text{CO}_2$  در گازهای حاصل از احتراق بسیار کم می‌باشد و حذف آن توسط فرآیندهای شیمیایی مستلزم استفاده از حجم بالایی از حلال‌های قوی می‌باشد. همچنین بازیابی حلال‌های شیمیایی به انرژی بالایی نیاز خواهد داشت و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی برای چنین فرآیندهایی زیاد می‌باشد.

همچنین غلظت کم  $\text{CO}_2$  موجود در حجم عظیمی از گاز دودکش باعث می‌شود تا اندازه تجهیزات مورد نیاز برای جداسازی مقدار مشخصی از  $\text{CO}_2$  و بالطبع آن هزینه سرمایه‌گذاری به مقدار قابل ملاحظه افزایش یابد. با افزایش غلظت و فشار جزئی  $\text{CO}_2$  می‌توان تجهیزات جذب  $\text{CO}_2$  را کوچکتر نمود. برای این منظور باید از فناوری‌های حذف پیش احتراقی  $\text{CO}_2$  بهره جست. در شکل زیر دورنمای کلی فرآیندهای پیش احتراقی حذف  $\text{CO}_2$  نشان داده شده است :



شکل 10 ساختار کلی سیستم‌های پیش احتراقی حذف CO2

در جذب پیش احتراقی، ابتدا سوخت به گاز سنتز که عمدتاً از CO<sub>2</sub> و هیدروژن تشکیل شده، تبدیل می‌گردد. همانگونه که در شکل بالا دیده می‌شود، سوخت ابتدا در طی یک فرآیند ریفرمینگ (برای گاز طبیعی) و یا گازسازی (برای ذغال سنگ و زیست توده) به صورت مخلوطی از این دو گاز خواهد شد، سپس با استفاده از فرآیند انتقال آب-گاز در یک راکتور گاز سنتز را به صورت مخلوطی از هیدروژن و CO<sub>2</sub> تبدیل می‌کنند. برای تولید گاز سنتز چندین روش وجود دارد که مهمترین آنها «تبدیل با بخار آب» و «اکسیداسیون جزئی» می‌باشند.

فشار بالای جریان گاز حاصل، حذف CO<sub>2</sub> را تسهیل می‌کند. پس از جداسازی CO<sub>2</sub> محصول هیدروژن می‌تواند در توربین‌های گاز سوزانده شده و برای بازیابی گرمایی و تولید بخار مورد استفاده قرار گیرد و یا می‌توان از آن برای کاربردهایی همچون پیل‌های سوختی استفاده نمود. غلظت CO<sub>2</sub> در مخلوط H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> چیزی حدود 60-15٪ (مبنای خشک) است و فشار کل معمولاً 2-7 Mpa می‌باشد. CO<sub>2</sub> جداسازی شده، دارای فشار بالایی است و برای جذب توسط حلال‌های فیزیکی در حجم کم و با هزینه‌ی کمتر مناسب می‌باشد. در جذب پیش احتراقی معمولاً درصد CO<sub>2</sub> بالا می‌باشد.

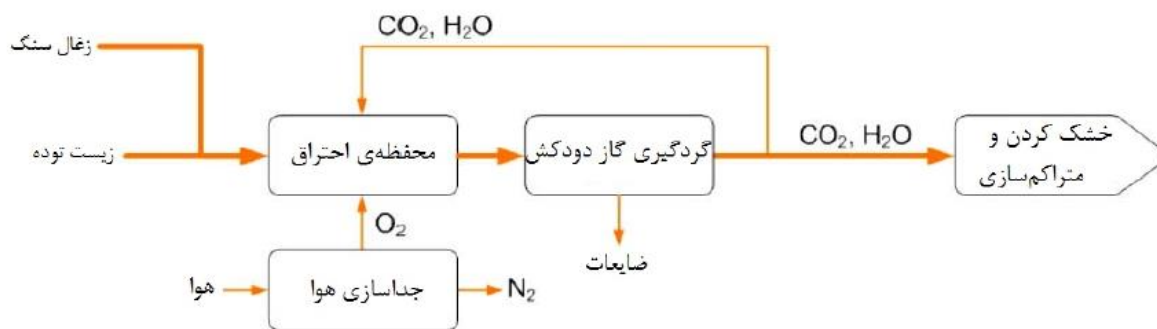
با استفاده از فناوری پیش احتراقی علاوه بر اینکه اندازه تجهیزات مورد استفاده کوچکتر می‌شود، استفاده از حلال فیزیکی مقصور گشته و این امر بر ارزیابی نسبتی حلال‌های فیزیکی نسبت به حلال‌های شیمیایی، هزینه بازیابی حلال را نیز به شدت می‌کاهد. به طور کل این روش از روش مهار پس از احتراق ارزانتر است.

به طور کلی این روش به عنوان گزینه‌ای بلندمدت محسوب می‌شود و فناوری آن هنوز در مرحله مطالعه و تکامل می‌باشد. این روش به دلیل استفاده از طراحی چرخه ترکیبی جذابیت خاص خود را دارد که اساس در چرخه رانکین که توسط نیروگاه‌های برق با سوخت ذغال پودری به کار می‌رود موثرتر خواهد بود. یکی از مزایای جنبی این روش تولید هیدروژن حین فرآیند و کاهش قیمت جهانی آن می‌باشد. در کل این روش برای واحدهای جدید مناسب خواهد بود زیرا استفاده از این فناوری مستلزم اصلاح فرآیند اصلی واحد صنعتی و نیز بهبود و تغییر تاسیسات می‌باشد.

### 6.1.3. فرآیندهای احتراق اکسیژن-سوخت (نیتروژن زدایی)

یکی از دلایلی که جداسازی  $\text{CO}_2$  را از گازهای خروجی واحدهای صنعتی سخت می‌کند، غلظت پایین آن درون دودکش می‌باشد، که این خود به خاطر وجود مقادیر نیتروژن درون گاز خروجی می‌باشد. برای رفع این مشکل می‌توان محتوای نیتروژن هوای ورودی به محفظه احتراق را جدا نمود و یا به عبارتی دیگر سوخت را در اتمسفر غنی از اکسیژن سوزاند. به این فناوری در اصطلاح فرآیند اکسیژن-سوخت اطلاق می‌شود. در حذف اکسیژن-سوخت، سوخت با جریان اکسیژنی که حاوی مقدار بسیار کمی نیتروژن است یا اصلاً نیتروژنی در آن وجود ندارد، می‌سوزد. در نتیجه به جای جداسازی  $\text{CO}_2$  از گاز دودکش، اکسیژن قبل از احتراق، از هوا جدا می‌شود.

به این منظور اکسیژن به دست آمده از واحد جداسازی هوا، درون محفظه‌ی احتراق در یک اتمسفر  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  سوزانده می‌شود، که مقداری از گاز خروجی که غنی از  $\text{CO}_2$  می‌باشد-برای کاهش دمای شعله-بازگردانده می‌شود. دمای شعله احتراق با اکسیژن حدود 3000 تا 3500 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این دما برای تجهیزات معمولی نیروگاه‌ها و صنایع بسیار بالاست و به همین جهت برای تعدیل دمای شعله احتراق مقداری از گاز دودکش (حدود 70٪ جریان گاز خروجی) را به محفظه باز می‌گردانند. با استفاده از جریان بازگشتی گاز خروجی، دمای شعله مشابه دمای شعله در محفظه احتراق می‌گردد که با هوای معمولی کار می‌کند. در شکل زیر دورنمای کلی این فرآیند نشان داده شده است.



شکل 11 ساختار کلی فرآیند حذف  $\text{CO}_2$  توسط فناوری احتراق اکسیژن-سوخت

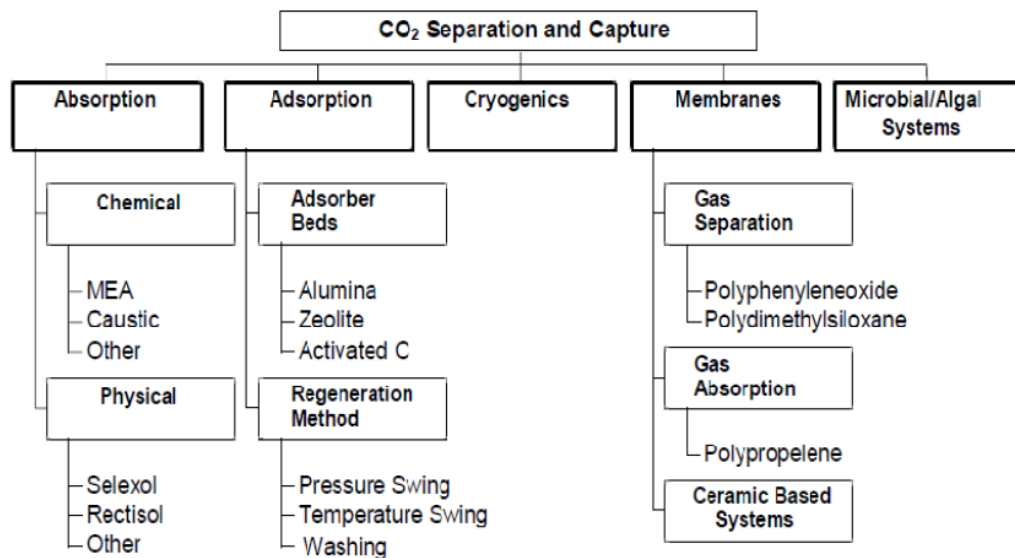
در فرآیند احتراق با اکسیژن علاوه بر اینکه اندازه تاسیسات فرآیندی واحد جداسازی کوچکتر خواهد شد (به دلیل حذف نیتروژن که بخش اعظم هوای ورودی را تشکیل می‌داد)، پس از جداسازی ذرات معلق خاکستر، گاز دودکش تنها شامل بخار آب و  $\text{CO}_2$  به علاوه مقادیر کمی از آلاینده‌هایی از قبیل دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن می‌باشد، مادامیکه رطوبت از گاز

دودکش حذف شود، غلظت  $\text{CO}_2$  در آن معمولاً بیشتر از 90٪ می‌گردد (در احتراق با هوا غلظت  $\text{CO}_2$  در گاز دودکش 15-14٪ خواهد بود)، بنابراین فقط یک خالص‌سازی ساده برای  $\text{CO}_2$  لازم می‌باشد. ایراد این فرآیند این است که تولید اکسیژن گران است، هم از لحاظ هزینه‌های کلی و هم مصرف انرژی. همچنین برای این فرآیند باید واحد جداسازی هوا نیز به تاسیسات کارخانه افزوده شود. در این فناوری کوچکترین نشتی‌ها نیز می‌توانند عملکرد فرآیند را به شدت تحت تاثیر قرار دهند. پیشرفت‌هایی در فرآیند تولید اکسیژن خالص مانند غشاهای جدید و بهبود یافته کار در دماهای بالا را دارند، می‌توانند بازده کل را افزایش دهند و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد. استفاده از این فناوری مستلزم اصلاح فرآیند اصلی واحد صنعتی و نیز بهبود و تغییر تاسیسات می‌باشد.

انواع فرایندهای جداسازی دی‌اکسیدکربن

از روش‌های مورد استفاده در جداسازی دی‌اکسیدکربن از گازهای دودکش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- فرایند جذب شیمیایی
- فرایند جذب فیزیکی
- جذب سطحی
- استفاده از غشا
- روش برودتی



شکل 12 طبقه‌بندی روش‌های جداسازی و مهار دی‌اکسیدکربن

نوع فرایند	نیازمندی سیستم	مزایا	معایب
جذب شیمیایی	دارای دو بخش اصلی ستون جذب و احیاء به همراه حلال شیمیایی	مناسب برای جریانهای رقیق از CO <sub>2</sub> . قابلیت مناسب در دما و فشار معمولی	حرارت بازیابی حلال بالا. اتلاف حلال و خوردگی
جذب فیزیکی	دارای دو بخش اصلی جذب و احیاء به همراه حلال فیزیکی	حرارت مورد نیاز بازیابی اندک. مقاومت حلال برابر ناخالصی ها در گاز	نیاز به فشار عملیاتی بالا. مناسب برای جریانهای غنی از CO <sub>2</sub>
جذب سطحی	بستر جذب سطحی	قابلیت جداسازی بسیار بالا	هزینه مربوط به فشار عملیاتی بالا
غشاء	فیلتر غشایی	حجم کم سیستم. فرایندی امیدبخش در آینده	فشار عملیاتی بالا. نیاز به عملیات چندمرحله ای

جدول 4 مقایسه فرایندهای جداسازی

## 7. فناوری‌های موجود برای حذف CO<sub>2</sub>

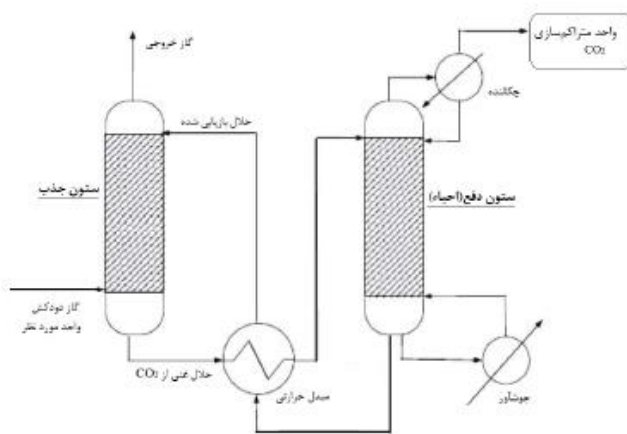
بسته به غلظت و شرایط ترمودینامیکی گاز خروجی از دودکش و نیز واحد صنعتی مورد نظر، فناوری های مختلفی برای به دام اندازی و حذف CO<sub>2</sub> پیشنهاد شده اند. در این بخش به بررسی برخی از فناوری هایی که بیشتر مورد بررسی قرار گرفته اند و برای حذف گاز CO<sub>2</sub> از گازهای خروجی از دودکش مناسبتر به نظر می رسند، پرداخته می شود. البته باید متذکر شد که این فناوری ها اغلب در سیستم های پسا احتراقی مورد استفاده قرار می گیرند.

### 7.1. جذب شیمیایی

در حال حاضر معمول ترین روش برای حذف پسا احتراقی CO<sub>2</sub> از گازهای حاصل از احتراق می باشد. در این روش از حلالهای شیمیایی مختلفی جهت واکنش با CO<sub>2</sub> استفاده می شود. حلال هایی همچون منو، دی و تری اتانول آمین، دی ایزوپروپانول آمین، دی گلیکول آمین و کربنات سدیم از پرکاربردترین حلال های موجود برای این روش می باشند. همچنین حلال های آمینی جدیدی همچون KS-1 و KS-2 که دارای ممانعت فضایی می باشند، نیز در فاز آزمایشگاهی در حال

مطالعه می باشند که عملکرد خوبی را از خود نشان داده اند. این حلالها توسط شرکتهای کانسای الکتریک و صنایع سنگین میتسوبیشی در حال توسعه هستند. این حلال ها نسبت به آمین های متداول، با دبی های گردشی پایین تر برای همان میزان گاز دودکش عملکرد مناسب تری از خود نشان داده و نیز دمای بازیابی آنها پایین بوده و خوردندگی بسیار کمتری از آمین های دیگر داشته و گرمای واکنش آنها بسیار کمتر می باشد.

قبل از شروع فرآیند حذف  $\text{CO}_2$ ، ابتدا گاز دودکش توسط یک ستون تماس مستقیم سرد شده و ناخالصی و غبار همراه آن تا حد امکان حذف می گردد. سپس گاز دودکش به درون یک ستون جذب پر شده وارد شده، و در آنجا طی یک تماس ناهمسو با حلال و با استفاده از یک سری واکنش شیمیایی بین حلال و  $\text{CO}_2$ ، گاز دودکش گرفته می شود. ستون جذب به طور معمول در محدوده دمایی  $40-45^\circ\text{C}$  در قسمت بالای ستون و  $50-60^\circ\text{C}$  در قسمت پایینی آن، بسته به فشار و ترکیب گاز ورودی به ستون عمل می کند. پس از عاری سازی، گاز عاری از  $\text{CO}_2$  از بالای ستون وارد اتمسفر می شود. حلال غنی از  $\text{CO}_2$  از پایین ستون جذب به درون ستون احیاء حلال انتقال می یابد، و در این ستون در اثر تماس با بخار آب و حرارت بالا (و با انجام سری واکنش های دفع)  $\text{CO}_2$  خود را از دست می دهد و دوباره به ستون جذب باز گردانده می شود.  $\text{CO}_2$  جدا شده از حلال از بالای ستون احیاء خارج شده و سپس برای انتقال به محل ذخیره سازی متراکم می گردد. دمای درون ستون احیاء از  $40-70^\circ\text{C}$  در بالای ستون تا  $120-130^\circ\text{C}$  در پایین ستون تغییر می کند. در شکل دورنمایی کلی از این فرآیند نشان داده شده است.



شکل 13 جذب با استفاده از حلالهای شیمیایی

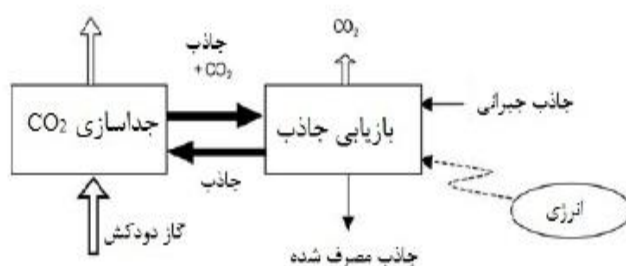
در این روش بازیابی  $\text{CO}_2$  معمولاً حدود 95-98٪ می باشد، امکان جداسازی با خلوص 99٪ از  $\text{CO}_2$  موجود در گاز دودکش وجود دارد. فرایند جذب آمینی بالغ بر 60 سال است که در صنایع شیمیایی و نفت جهت جداسازی  $\text{CO}_2$  و سولفید

هیدروژن در جریان گازهای طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه این تجارب بیشتر برای حذف گازهای شیمیایی از جریان گاز طبیعی و یا گاهی از صنایع شیمیایی وابسته می باشد، اما امروزه موارد زیادی وجود دارد که از فناوری جذب شیمیایی (جذب آمینی) برای کاهش میزان  $\text{CO}_2$  برای کاهش میزان  $\text{CO}_2$  از گازهای دودکش استفاده می کنند.

از مزایای این روش می توان به مواردی همچون در دسترس بودن فناوری و تجهیزات مورد نیاز، شدت واکنش پذیری بسیار بالای حلال های شیمیایی، قابلیت اجرا برای جریانهای گاز با غلظت بسیار اندک  $\text{CO}_2$ ، تولید محصول با غلظت بسیار بالا، قابل استفاده برای دی های بسیار بالا اشاره نمود. اما در عوض مصرف انرژی بالا جهت بازیابی حلال، تخریب حلال در اثر حرارت بخصوص منواتانول آمین در حضور اکسیژن، دی اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد و نیز خوردگی تجهیزات توسط آن باعث شده که جذابیت این روش تا حدودی کاسته شود.

## 7.2. جذب فیزیکی

این روش بر اساس جذب فیزیکی گاز  $\text{CO}_2$  بر روی جاذب مطابق قانون هنری می باشد. این روش مستلزم استفاده از حلال های فیزیکی مناسبی همچون متانول سرد ( فرایند رکتیسول )، 2- متیل پیرولیدون، پلی اتیل گلاکول دی متیل اتر ( طی فرایند سلکسول ) و پروپیلن کربنات ( با فرایند فلور ) و سولفونات می باشد. حلال مورد استفاده را می توان با استفاده از حرارت و یا کاهش مرحله به مرحله ی فشار و یا استفاده از هر دو بازیابی نمود. از این فرایند برای خالص سازی گازهایی با غلظت  $\text{CO}_2$  بالای 15٪ که فشار جزئی  $\text{CO}_2$  در آنها بالای 5 atm است، استفاده می شود. فشار کل گاز دودکش در این فرایند معمولاً بین 2-7 mbar می باشد. حلال های فیزیکی معمولاً حلالیت ناچیزی نسبت به اکسیدهای نیتروژن دارند، درحالی که دی اکسید گوگرد را به خوبی جذب می کنند، لذا برای حداقل کردن اتلاف حلال در حین فرایند باید غلظت دی اکسید گوگرد را به 1 ppm کاهش داد. در شکل دورنمای کلی فرایند جذب فیزیکی نشان داده شده است.



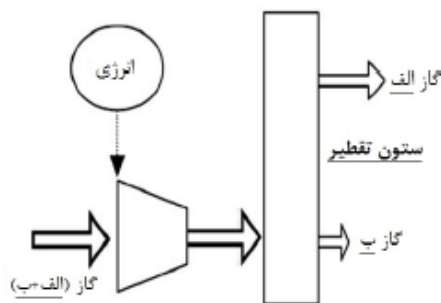
شکل 14 دورنمای کلی فرایند جذب فیزیکی

در نیروگاههای تولید برق IGCC مبتنی بر زغال سنگ، غلظت  $\text{CO}_2$  در گاز دودکش نزدیک 40٪ بوده و فشار کل

هم حدود 20 bar می باشد، که این ارقام فراتر از حالت نیروگاه های برق معمولی هستند .بنابراین استفاده از این روش تنها برای گازهای غنی از CO<sub>2</sub> مانند گاز دودکش نیروگاه های برق یکپارچه IGCC قابل استفاده بوده و هزینه افزایش و کاهش فشار و دما در این فرایند برای گازهای دودکش نیروگاه های معمولی و دیگر کارخانجات مقرون بصرفه نخواهد بود. همچنین استفاده از حلال های فیزیکی در روش اکسیژن- سوخت نیز بسیار مناسب بنظر می رسد چرا که غلظت CO<sub>2</sub> در آن حالت به چیزی حدود 80٪ الی 95٪ رسیده و این امر شرایط را برای استفاده از حلال فیزیکی مهیا می سازد.

### 7.3. فرایند تبرید ( سرد سازی )

چنانچه یک مخلوط گازی شامل ترکیبات با نقطه ی جوش متفاوت باشد، می توان آن را با سردکردن تا دمای جوش هر ترکیب ، به فازهای مختلف جداسازی نمود .فرایند برودتی بر همین اساس تکنیک جداسازی مخلوط گازی با فشرده سازی و کاهش دمای مخلوط در چند مرحله به منظور ایجاد یک فاز جدای CO<sub>2</sub> می باشد. CO<sub>2</sub> را می توان با سرد کردن تا نقطه ی جوش آن ( °C -78 ) از محتویات گاز دودکش جدا نمود. از معایب عمده استفاده از این روش نیاز به انرژی فوق العاده بالا جهت سرمایش گاز بویژه مخلوط های رقیق، و همچنین تشکیل خوشه های CO<sub>2</sub> و یخ حاصل از انجماد بخار آب نام برد .مزیت اصلی این روش تشکیل یک فاز خالص و تفکیک شده از CO<sub>2</sub> است، که روند انتقال و ذخیره سازی آن را بسیار آسان می کند. در شکل دورنمایی از فرایند برودتی برای حذف CO<sub>2</sub> نشان داده شده است.



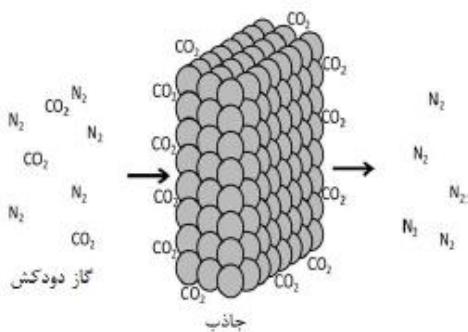
شکل 15 دورنمای کلی فرایند سردسازی

البته استفاده از این روش در غلظت های بالای CO<sub>2</sub> ( بالاتر از 90٪ ) می باشد. بنابراین در شرایط موجود یعنی غلظت کمتر از 15٪ از این روش استفاده نخواهد شد. این روش البته برای فناوری های نوین جداسازی پیش احتراقی و فرایند اکسیژن - سوخت بدلیل وجود جریان گاز با نسبت بالای CO<sub>2</sub> بسیار امید بخش خواهد بود.



#### 7.4. فرایند جذب سطحی

برخی مواد جامد با سطح ویژه بالا همچون کربن فعال، غریال ملکولی زئولیت و هیدروکاتالیست های ارتقاء یافته با ایجاد یک نیروی بین ملکولی قوی با ملکول های  $\text{CO}_2$  می توانند برای جداسازی این گاز از جریان گاز دودکش مورد استفاده قرار گیرند. از این جاذب ها معمولا برای جداسازی  $\text{CO}_2$  از مخلوط هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن در حضور رطوبت استفاده می شود. در این روش در یک مرحله عملیات جذب سطحی و در مرحله بعد عملیات بازیابی جاذب صورت می گیرد. در مرحله اول گاز وارد بستر پر شده می شود و سپس با جذب  $\text{CO}_2$  توسط جاذب جریان گاز عاری از  $\text{CO}_2$  از فرایند خارج می گردد. سپس هنگامی که جاذب ها از  $\text{CO}_2$  اشباع شدند، خوراک وارد بستر پر شده تمیز دیگر شده و بستر اشباع شده قبلی وارد مرحله بازیابی و دفع  $\text{CO}_2$  می شود. از عوامل مثبت در این روش می توان به دمای کم فرایند، سطح فعال بالا و اندازه کم جاذب مصرفی اشاره کرد. در شکل دورنمایی از فرآیند جذب سطحی برای حذف  $\text{CO}_2$  نشان داده شده است.



شکل 16 دورنمایی از فرآیند جذب سطحی

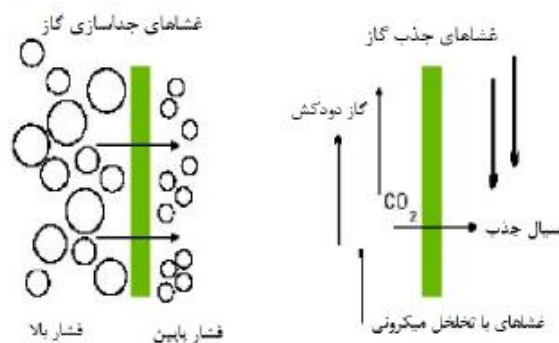
این سری فرآیند به سه دسته ی جذب با کاهش فشار ( PSA )، جذب با افزایش دما ( TSA )، و جذب با عبور جریان الکتریکی ( ESA )، تقسیم شده اند. در حالت PSA با افزایش فشار برای مخلوط گازی موجود در بستر شرایط را برای رسیدن به میزان جذب مطلوب رسانده و پس از رسیدن به حالت تعادل و اشباع با کاهش فشار ( تا نزدیک فشار خلاء )  $\text{CO}_2$  جذب شده دفع می گردد. در حالت TSA فشار در طی فرایند ثابت بوده و دما متغیر است بطوریکه در مرحله جذب دما پایین و در مرحله دفع دما بالا می رود. استفاده از روش TSA هزینه بالاتری نسبت به PSA دارد. فشار برج جذب نیز در حد اتمسفر قرار دارد. در این فرآیند بسته به جاذب مورد استفاده دما می تواند در محدوده های مختلفی تغییر کند. در حالت

ESA بر اساس اثر ژول با عبور یک جریان الکتریکی با ولتاژ اندک از طریق یک رسانا، از میان جاذب ها عمل دفع میسر می شود. از لحاظ اقتصادی روش های PSA و TSA عمدتاً کاربرد بیشتری مخصوصاً در فرایندهای تولید هیدروژن و جداسازی CO<sub>2</sub> از گاز طبیعی دارند. این سری فرایند برای استفاده در دوره های کوتاه مدت و میان مدت، تنها بصورت ترکیبی از فناوری های دیگری برای مهار CO<sub>2</sub> مناسب خواهد بود.

## 7.5. فرایند جداسازی غشایی

فرایند جداسازی غشایی بر اختلاف برهم کنش های فیزیکی و شیمیایی بین ملکول های گاز و غشاء که منجر به عبور سریعتر یک جزء نسبت به بقیه اجزا از میان غشاء می شوند، متکی می باشد. پنج مکانیسم احتمالی برای جداسازی غشایی وجود دارد که شامل نفوذ نودسن، غربال مولکولی، جداسازی مبتنی بر نفوذ - حلالیت، نفوذ سطحی و چگالش مویین، می باشند. فرایندهای جداسازی غشایی گازی، به صورت گسترده ای برای بازیابی هیدروژن در سنتز آمونیاک، حذف CO<sub>2</sub> از گاز طبیعی، و جداسازی نیتروژن از هوا مورد استفاده قرار گرفته است، اما تاکنون هیچ پروژه ای به صورت تجاری برای حذف CO<sub>2</sub> از گازهای خروجی از دودکش کارخانجات مختلف تعریف نشده است.

در فرایند جداسازی توسط غشاء برای دستیابی به جداسازی مطلوب باید از چند مرحله جداسازی و از جریان برگشتی استفاده نمود. در عین حال میبایست از پیچیدگی فرایند و افزایش مصرف انرژی و هزینه اجتناب نمود، زیرا در مقیاس بزرگ استفاده از این روش هزینه بیشتری در مقابل روش های دیگر خواهد داشت. غشاهای متخلخل غیرآلی، غشاهای پلاذیوم، غشاهای پلیمری و ژئولیت ها از انواع غشاهایی هستند که در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرند. در شکل دورنمایی از فرایندهای غشایی برای حذف CO<sub>2</sub> نشان داده شده است.



شکل 17 دورنمایی از فرایندهای غشایی

غشاهای جداسازی گاز و غشاهای جذب گاز در واقع دو نوع فرایند مختلف را شامل می شوند. امروزه، حذف CO<sub>2</sub> از گازهای دودکش با استفاده از فرایند غشایی بدلیل فشار کم جریان گاز دودکش و نیاز آن به انرژی مضاعف برای افزایش فشار جریان، هنوز زیاد جذاب به نظر نمی رسد.

از مزایای این روش می توان به جلوگیری از تماس مستقیم دو فاز و بالطبع پرهیز از مشکلاتی همچون کف کردن طغیان سیال، کاناله شدن سیال و غیره که عملکرد جداسازی را کاهش می دهند، و همچنین تاسیسات با اندازه کوچکتر، انجام فرآیند جداسازی در دماهای پایین، و عدم استفاده از مواد شیمیایی ( و کاهش مشکلات زیست محیطی آنها ) اشاره نمود.

## 8. مراجع

1. A. Florides G., Christodoulides P., Global warming and carbon dioxide through sciences, *Environment International*, 35 (2009), 390–401.
2. Keeling C.D., Whorf T.P, Ridge O., Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SiO air sampling network, *A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory (U. S. Department of Energy), TN, 2005.*
3. Halmann M.M., Steinberg M., Greenhouse gas carbon dioxide mitigation: science and Technology, Lewis Publishers, Boca Raton, (1999), 568-572.
4. Song Ch., Global challenges and strategies for control, conversion and utilization of CO<sub>2</sub> for sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing, *Catalysis Today*, 115 (2006), 2–32.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report, Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, New York, 2005.
6. Global Climate & Energy Project (GCEP): Energy Assessment Analysis, an Assessment of Carbon Capture Technology and Research Opportunities, spring 2005.
7. Feron P.H.M., Hendriks C.A., CO<sub>2</sub> Capture Process Principles and Costs, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 60 (2005), 451-459.
8. da Silva E.F., Computational Chemistry Study of Solvents for Carbon Dioxide Absorption, Norwegian University of Science and Technology, Doctoral Thesis, August 2005.
9. Favre E., Carbon dioxide recovery from post-combustion processes: Can gas permeation membranes compete with absorption, *Journal of Membrane Science*, 294 (2007), 50–59.
10. F.Wall T., Combustion processes for carbon capture, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 (2007), xxx-xxx.
11. Kuramochi T., Faaij A., Ram rez A., Turkenburg W., Prospects for cost-effective postcombustion CO<sub>2</sub> capture from industrial CHPs, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4 (2010), 511–524.
12. Naranjo M., T.Brownlow D., Garza A., CO<sub>2</sub> Capture and Sequestration in the Cement Industry, *Energy Procedia*, 4 (2011), 2716–2723.
13. T.Hoa M., Allinson G.W., Wiley D.E., Comparison of MEA capture cost for low CO<sub>2</sub> emissions sources in Australia, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5 (2011), 49–60.
14. Kothandaraman A., Carbon Dioxide Capture by Chemical Absorption: A Solvent Comparison Study, University of Mumbai; Department of Chemical Engineering, Ph.D. thesis, May 2010.

15. McCoy S., Carbon Capture and Sequestration: Framing the Issues for Regulation; an Interim Report from the CCSReg Project, January 2009.
16. T.Hoa M., Allinson G.W., Wiley D.E., Comparison of MEA capture cost for low CO<sub>2</sub> emissions sources in Australia, International Journal of Greenhouse Gas Control, 5 (2011), 49–60.
17. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report, Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, New York, 2005.
18. Kuramochi T, et al., Comparative assessment of CO<sub>2</sub> capture technologies for carbonintensive industrial processes, Progress in Energy and Combustion Science, xxx (2011), 1-26
19. Moresa P., Scennaa N., Mussatia S., A rate based model of a packed column for CO<sub>2</sub> absorption using aqueous monoethanolamine solution, International Journal of Greenhouse Gas Control, 6 (2012), 21–36.
20. Figueroa J., Fout T., Plasynski S., McIlvried H., Srivastava R., Advances in CO<sub>2</sub> capture technology, The U.S. Department of Energy Carbon Sequestration Program; International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 9-20.