

# مروری کوتاه بر جاذب‌های مورد استفاده در جداسازی دی‌اکسید کربن از گاز دودکش‌ها

حسین دلاوری امرئی، محمد رضا مهرنیا\*، محمد مهدی منتظر رحمتی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی

پیام نگار: mmehrnia@ut.ac.ir

## چکیده

دی‌اکسید کربن یکی از مهمترین گازهای گلخانه‌ای است که به طرز گسترده‌ای از گاز دودکش خروجی از صنایع مختلف در اتمسفر انتشار می‌یابد. در این مقاله جاذب‌هایی که قابلیت استفاده به منظور جداسازی دی‌اکسید کربن از جریان‌های گازی خروجی از دودکش‌ها را دارند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بنا بر نتایج تحقیقات کربن‌های فعال مختلف، زئولیت‌ها، MCM، HTlc، اکسید فلزات و نانولوله‌های کربنی جاذب‌های مناسبی بوده‌اند. آلومین بازی و HTlc در دماهای بالا و فشارهای اتمسفری میزان جذب قابل توجهی را نشان داده‌اند. در همین شرایط، کربن فعال نیز نتایج مناسبی را نشان داده است. همچنین بارورسازی کربن فعال توسط عوامل بازی باعث افزایش در میزان جذب آن می‌شود. هر چند کربن فعال در دماهای زیاد میزان جذب کمتری را نسبت به آلومین بازی و HTlc نشان داده است، به طور کلی با توجه به قیمت جاذب، میزان در دسترس بودن ماده اولیه تولید آن و همچنین میزان جذب مطلوب جاذب، کربن فعال نسبت به دیگر جاذب‌ها گزینه مناسبی به نظر می‌رسد که البته نوع ماده اولیه برای تولید آن و نوع روش‌های فعال‌سازی و بارورسازی این جاذب در میزان جذب تاثیر زیادی دارد.

کلمات کلیدی: دی‌اکسید کربن، گاز دودکش، جذب سطحی، جاذب‌ها، دمای زیاد، فشار اتمسفری

## ۱- مقدمه

فعالیت‌هایی مانند ایجاد صنایع شیمیایی به وجود می‌آیند که شامل دی‌اکسید کربن و  $CH_4$  و  $NO_x$  می‌باشند [۱]. امروزه بیش از ۹۰٪ انرژی مورد نیاز دنیا از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود که این واقعیت موجب افزایش میزان دی‌اکسید کربن به عنوان گاز گلخانه‌ای شده است. میزان این گازها در اتمسفر با رشد اقتصادی، سریعاً افزایش پیدا می‌کند، زیرا برای تولید الکتریسته، گرمساز، سردسازی و سایر انواع انرژی به‌دست آمده از سوخت‌های زغال سنگ و گاز طبیعی، مورد نیاز می‌باشد. با توجه به اینکه دی‌اکسید کربن مهمترین گاز گلخانه‌ای است و به تنهایی

انرژی فرستاده شده از خورشید به سطح زمین به طور طبیعی و در هر لحظه تقریباً مساوی انرژی بازتابیده به فضا می‌باشد ولی پدیده گازهای گلخانه‌ای موجب می‌شود تا قسمتی از انرژی بازتابیده جذب جو زمین شود که این پدیده موجب بالا رفتن دمای زمین می‌گردد. بسیاری از گازها دارای خواص گلخانه‌ای می‌باشند. بعضی از این گازها در طبیعت موجودند و بعضی دیگر نیز به‌طور گسترده توسط

1. Mesoporous Crystalline Material
2. Hydrotalcite-Like Compound
3. Impregnation

شیمیایی دیگر استفاده می‌کنند. استفاده از روشهای جدید در جداسازی دی‌اکسید کربن در حال توسعه است که از آن جمله می‌توان به جداسازی دی‌اکسید کربن در فرایند تولید هیدروژن در صنایع پالایش و همچنین تولید آمونیاک اشاره کرد [۳ و ۵]. انتخاب یک روش مناسب برای جداسازی دی‌اکسید کربن در یک کاربرد خاص به عوامل متعددی از قبیل، فشار جزئی دی‌اکسید کربن در جریان، میزان مطلوب بازیابی دی‌اکسید کربن از جریان، حساسیت نسبت به وجود ناخالصیهایی مانند گازهای اسیدی و ذرات معلق، میزان مجاز دی‌اکسید کربن موجود در جریان جداسازی شده، میزان سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های عملیاتی جداسازی، هزینه مواد افزودنی برای جلوگیری از پدیده‌هایی مانند جرم‌گرفتگی و خوردگی بستگی دارد [۳ و ۴].

روش‌های مورد استفاده در جداسازی دی‌اکسید کربن را می‌توان در ۴ دسته کلی: شستشو با حلالهای (فیزیکی - شیمیایی)، فرایند جذب سطحی، فرایندهای برودتی و غشایی تقسیم بندی کرد، که هر یک از این روش‌ها دارای ویژگی‌های خاص خود می‌باشد [۳ و ۴]. در فرایند جذب سطحی، انتقال جرم به علت وجود سطح تماس زیاد بین فازها، مقاومت کم در مقابل نفوذ و اختلاط محوری زیاد، دارای بازدهی بالایی می‌باشد [۷] و با توجه به اینکه جاذب‌های جامد مورد استفاده در این روش، مشکلات خوردگی، مسمومیت زایی و تعویض جاذب‌های مایع را ندارند، به نظر می‌رسد که این روش، راهکار مناسبی برای جداسازی دی‌اکسید کربن در صنعت می‌باشد. با توجه به وجود انواع مختلفی از فرایندهای جذب سطحی و جاذب‌های مورد استفاده، در این مقاله به بررسی جاذب‌های مختلف مورد استفاده در جذب دی‌اکسید کربن و تاثیر بارورسازی جاذب‌ها در افزایش میزان جذب دی‌اکسید کربن پرداخته شده است.

## ۲- بررسی جاذب‌ها

جاذب‌های متفاوتی برای جداسازی گاز دی‌اکسید کربن از مخلوط‌های مختلف گازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یک جاذب مناسب علاوه بر میزان جذب زیاد و امکان دفع آسان ماده جذب شده از روی آن باید دارای استحکام مکانیکی و انتخاب پذیری زیادی نیز باشد [۸]. در مورد مخلوط گاز خروجی از دودکش، دمای زیاد گاز نیز در انتخاب جاذب تاثیر بسزایی دارد. در ادامه، به بررسی

حدود ۸۲٪ گازهای گلخانه‌ای را شامل می‌شود، کنترل میزان دی‌اکسید کربن موجود در جو بسیار ضروری است و امروزه اهمیت آن برای کشورهای در حال توسعه بیشتر از کشورهای توسعه یافته می‌باشد [۲]. با توجه به حجم فعالیتهای صنعتی نفت و گاز و پتروشیمی در ایران، کشور ما نیز از این قاعده مستثنی نیست و بنابراین، بررسی و به‌کارگیری روشهای مرسوم و همچنین روشهای جدید برای جداسازی دی‌اکسید کربن از جریانهای گازی مختلف نظیر گاز دودکش صنایع، امری اجتناب‌ناپذیر است.

معمولاً جریانهای خروجی از دودکش دارای فشاری در حد اتمسفر و یا کمی بیشتر از اتمسفر می‌باشند [۱ و ۳]. میزان حضور دی‌اکسید کربن در این جریانها معمولاً در محدوده (۳-۱۵)٪ حجمی است. بسته به نوع دیگ بخار و یا سیستم احتراقی به کار گرفته شده، این میزان، متفاوت است. در جدول (۱) غلظت اجزای خروجی از دودکش دیگ‌های بخار با دو سوخت متفاوت ارائه شده است. محدوده دمای خروجی از دودکشها نیز متفاوت است و می‌توان آن را در یک محدوده بزرگ  $100-800^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفت [۲ و ۴].

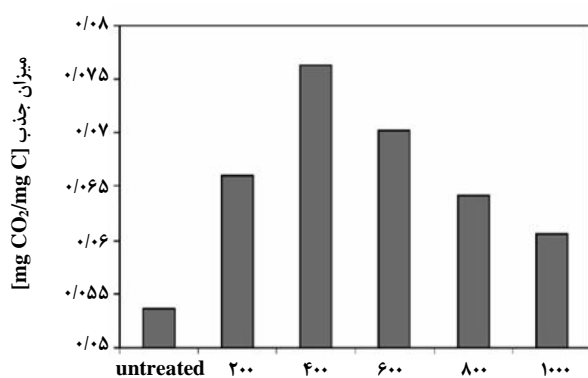
جدول ۱- غلظت اجزای گاز خروجی از دودکش دیگ‌های بخار با سوخت‌های متفاوت [۲].

اجزای خروجی	زغال سنگ	گاز طبیعی
دی اکسید کربن	۱۴٪ (حجمی)	۴٪ (حجمی)
N <sub>2</sub>	۸۱٪ (حجمی)	۸۱٪ (حجمی)
O <sub>2</sub>	۵٪ (حجمی)	۱۵٪ (حجمی)
NO <sub>x</sub>	۱۰۰-۱۰۰۰ ppm	۱۰۰-۵۰۰ ppm
SO <sub>x</sub>	۳۰۰-۳۰۰۰ ppm	۱ ppm >
ذرات معلق	۱۰۰-۱۰۰۰ mg/m <sup>3</sup>	۱۰ mg/m <sup>3</sup>

بیشتر روشهای مورد استفاده در جداسازی دی‌اکسید کربن روشهایی قدیمی می‌باشند. حلالهای شیمیایی مخصوص بیش از ۶۰ سال است که مورد استفاده و توسعه قرار دارند و از دیرباز در جداسازی دی‌اکسید کربن از جریان گازهای طبیعی مورد استفاده بوده‌اند. علاوه بر این، بسیاری از نیروگاههای تولید برق و واحدهای صنعتی دیگر با استفاده از این حلالها به جداسازی دی‌اکسید کربن از جریان گازها پرداخته و از آن در مصارفی همچون صنایع غذایی و واحدهای

روش‌های بارورسازی کربن فعال برای افزایش میزان جذب دی‌اکسید کربن می‌توان به بارورسازی به روش هالوژن‌دار کردن، نشانیدن فلزات، نشانیدن گروه‌های نیتروژن دار و برخی دیگر از گروه‌های بازی بر روی سطح کربن فعال اشاره کرد [۱۱-۱۳].

نتایج حاصل از بارورسازی به وسیله خوابانیدن جاذب در محلول ۲۵٪ وزنی آمونیاک، ۷-۵٪ افزایش در میزان جذب را نشان داد که میزان این افزایش به مدت خوابانیدن کربن فعال در آمونیاک بستگی دارد [۱۴]. با توجه به اینکه آمونیاک در حالت محلول نسبت به حالت گازی بیشتر موجب مسدود شدن حفرات جاذب می‌شود، بارورسازی کربن فعال به وسیله عبور گاز آمونیاک از درون آن نتایج مناسب‌تری را به همراه داشته است. دمای بارورسازی در این روش، عامل مهمی در کیفیت بارورسازی به منظور افزایش میزان جذب است (شکل (۲)) [۱۳].



شکل ۲- تغییرات میزان جذب (دی‌اکسید کربن خالص بر روی کربن فعال) با دمای بارورسازی (به وسیله گاز آمونیاک) در دمای ۳۶ °C [۱۳]

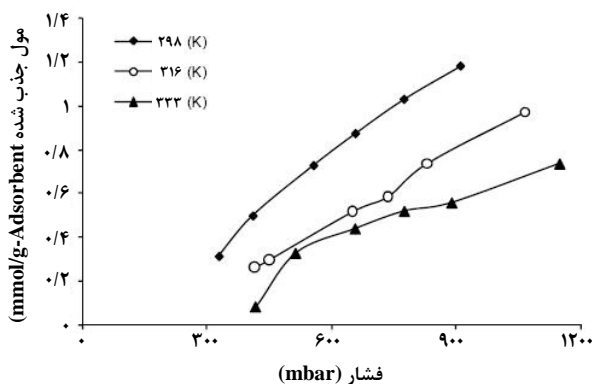
همچنین فلز نشانی بر روی کربن فعال نشان داد که نشانیدن اکسید کروم به روش دوغابی و استات وانادیم به روش محلولی آن، به ترتیب، ۲۰٪ و ۳۰٪ میزان جذب را افزایش می‌دهد. از بین فلزات نشانیده شده بر روی سطح کربن فعال به روش دوغابی، فلز آهن، افزایش بسیار کمتری در میزان جذب از خود نشان داده است. شستشوی نمونه‌ها در روش فلز نشانی دوغابی سبب افزایش در میزان جذب می‌شود که با باز شدن دهانه مسدود شده حفرات در اثر بارور سازی توجیه می‌شود. همچنین کربن فعال بارور شده توسط فلز

انواع جاذب‌های مورد استفاده در جداسازی گاز دی‌اکسید کربن از گاز دودکش پرداخته می‌شود.

## ۱-۲ کربن فعال

کربن فعال به صورت گسترده در جداسازی دی‌اکسید کربن مورد استفاده قرار گرفته و همچنین میزان جذب مناسبی را از خود در فشار اتمسفری و دمای زیاد نشان داده است [۸]. خواص جذبی کربن فعال اصولاً به میزان سطح داخلی آن بستگی دارد که این کمیت برای گونه‌های صنعتی موجود، در محدوده (۱۵۰۰-۵۰۰ m<sup>2</sup>/g) قرار دارد [۹].

میزان جذب دی‌اکسید کربن توسط کربن فعال در سه دمای متفاوت در شکل (۱) ارائه شده است؛ که نشان می‌دهد این جاذب در دماهای بیشتر از دمای محیط نیز میزان جذب مناسبی دارد. همچنین منحنی‌های تک‌دمای برآزش شده در دماهای مختلف، متفاوت می‌باشند [۱۰]. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، افزایش دما باعث کاهش میزان جذب دی‌اکسید کربن بر روی کربن فعال می‌شود. مشخصات مربوط به این نوع کربن فعال در جدول (۲) آورده شده است.

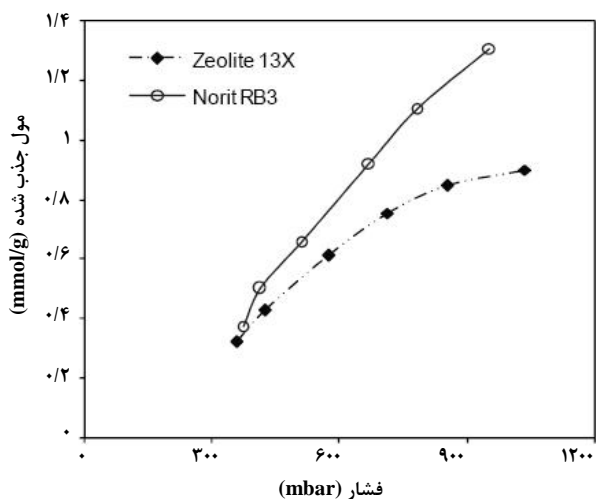


شکل ۱- تغییرات میزان جذب دی‌اکسید کربن خالص با دما بر روی جاذب کربن فعال [۱۰].

جدول ۲- مشخصات جاذب کربن فعال (Norit RB3) [۱۶].

قطر دانه (mm)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	چگالی ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )
۳	۱۱۰۰	۰/۵۱

بارورسازی جاذب چه در حین فرایند ساخت و چه پس از ساخته شدن آن، تاثیر مثبتی در افزایش میزان جذب خواهد داشت. از انواع



شکل ۳- تغییرات میزان جذب دی‌اکسیدکربن خالص با فشار بر روی جاذب کربن فعال و زئولیت 13X در دمای ۳۰۰ K [۱۶].

## ۲-۳ اکسید فلزات

دی‌اکسیدکربن، یک گاز اسیدی است که قابلیت جذب بر روی مکان‌های بازی جاذب را دارا می‌باشد. مولکولهای دی‌اکسیدکربن می‌توانند بر روی مکان‌های سطحی مثبت و منفی اکسید فلز جذب شوند. هنگامی که دی‌اکسید کربن بر روی برخی از فلزات خاص مانند اکسید کلسیم و اکسید منیزیم جذب می‌شود، می‌توان ظرفیت جذب را به صورت برگشت پذیر به دست آورد. البته برای برخی از این جاذب‌ها، همانند زئولیت‌ها، دمای بالایی برای احیای جاذب، مورد نیاز می‌باشد [۲۰].

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که از بین جاذب‌های اکسید فلزات، اکسیدهای قلیایی فلزی ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )، اکسیدهای قلیایی خاکی ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) و آلومین، میزان جذب قابل توجهی را در دماهای زیاد نشان داده‌اند (شکل (۴)). میزان زیاد جذب این جاذب‌ها به علت خاصیت اسیدی دی‌اکسیدکربن و خاصیت ضعیف بازی این جاذب‌ها می‌باشد. نکته جالب اینکه بارورسازی یا اصلاح آلومین توسط اکسید فلز، موجب افزایش قابل توجهی در میزان احیای جاذب در دمای بالا می‌شود [۸]. همچنین همان‌طور که در بخش (۱-۱) بیان شد بارورسازی کربن فعال توسط اکسیدهای فلزی نیز باعث افزایش جذب می‌شود که می‌توان آن را به دلیل ایجاد سطح در دسترس بیشتر به علت توزیع مناسب اکسید فلز بر روی آن دانست، هر چند که در این مورد، جذب توسط خود کربن فعال نیز قابل توجه است.

آهن در حالتی که از محلول استات آن استفاده می‌شود، نتایج بهتری را در مقایسه با حالتی که از اکسید آهن استفاده می‌شود نشان داد [۱۵ و ۱۶].

ماده اولیه مورد استفاده برای کربن فعال، عامل مهمی در تولید صنعتی و میزان جذب مطلوب این ماده است. میزان در دسترس بودن ماده اولیه و قیمت آن دو عامل مهم در این زمینه می‌باشند. البته نباید از اثر بارورسازی کربن فعال در این زمینه غافل شد. یکی از این منابع، خاکستر حاصل از سوختها در دودکش است که بسیار ارزان قیمت می‌باشد. والر و همکاران [۱۷] و همچنین آرنیلاس و همکاران [۱۸] میزان جذب دی‌اکسیدکربن را بر روی کربن فعال تولید شده از خاکستر دودکش نیروگاهها اندازه‌گیری کرده‌اند؛ که نتایج مطلوبی توسط آنها ارائه شده است. همچنین نشانند برخی از گروه‌های آمینی بر روی این مواد، بسته به درصد بارورسازی، به میزان قابل توجهی باعث افزایش در میزان جذب شده است.

## ۲-۲ زئولیت

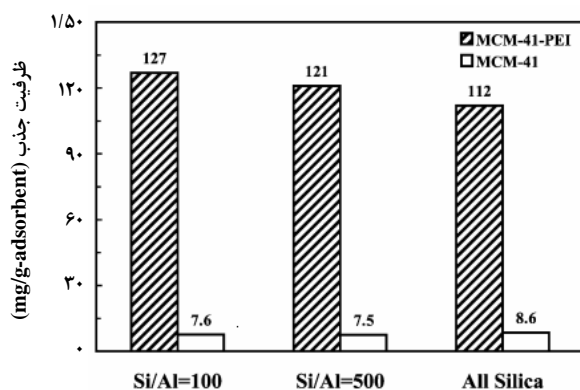
انواع مختلف جاذب زئولیت به صورت طبیعی وجود دارند. همچنین در دهه اخیر، گونه‌های جدیدی از آن توسط محققان ساخته شده و خواص جذب آنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از بین انواع مختلف این جاذب، زئولیت 13X نتایج قابل توجهی را در جذب دی‌اکسیدکربن نشان داده است. البته باید به این نکته توجه کرد که جداسازی دی‌اکسیدکربن جذب شده (احیای جاذب) نیاز به فرایندی با دمای زیاد دارد. به نظر می‌رسد که بتوان با تغییر ساختار اینگونه زئولیت‌ها، میزان جذب را حتی به مقادیر بیشتر نیز افزایش داد. به علت ظرفیت جذب زیاد آب به وسیله زئولیت‌ها، در صنعت از این جاذب‌ها در مقایسه با کربن فعال کمتر استفاده می‌شود [۱۹].

به‌طور کلی از زئولیت‌ها در مواردی استفاده می‌شود که جذب دی‌اکسیدکربن با رویکرد مصرف مقدار کم جاذب (به علت ظرفیت زیاد بعضی از آنها در جذب دی‌اکسیدکربن) مورد توجه است. از جمله این موارد می‌توان به تصفیه هوا در سفینه‌های فضایی اشاره کرد [۱۹]. در شکل (۳) میزان جذب بر روی یک نمونه کربن فعال (Norit RB3)، و زئولیت 13X، در محدوده فشاری جریان خروجی از دودکش، مقایسه شده‌اند [۱۶]. در این مورد، سطح ویژه زئولیت 13X برابر  $840 \text{ (m}^2/\text{g)}$  است.

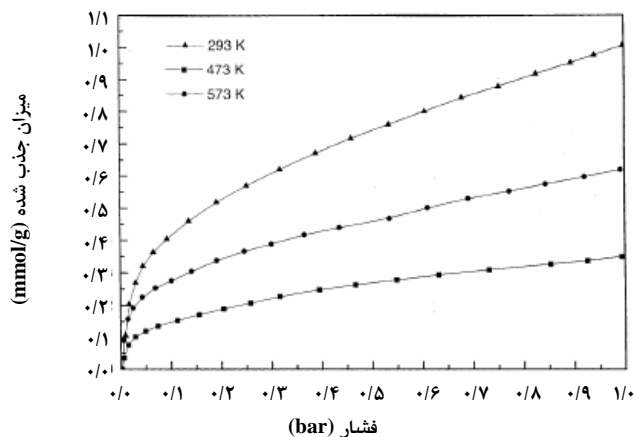
## ۲-۵ MCMها

این جاذب‌ها دسته‌ای از غربال‌های مولکولی ژئولیتی هستند که دارای حفره‌های مزو<sup>۱</sup> می‌باشند. اینگونه جاذب‌ها در صورت بارورسازی با گروه‌های عاملی مناسب می‌توانند در فرایند جداسازی دی‌اکسید کربن، بخصوص در دمای زیاد، به کار روند. لازم به اشاره است که در دمای زیاد، میزان جذب دی‌اکسیدکربن بر روی جاذب‌های کربن و ژئولیت‌ها بسیار کم است و از دمای حدود  $30^{\circ}\text{C}$  میزان جذب بر روی این جاذب‌ها افت شدیدی پیدا می‌کند و عملاً در دماهای  $200^{\circ}\text{C}$  و بیشتر هیچ گونه جذبی بر روی این جاذب‌ها صورت نمی‌گیرد [۲۴]. مزیت استفاده از MCM‌های تغییر یافته، امکان جذب مقادیر قابل توجه دی‌اکسیدکربن در دماهای نسبتاً زیاد در مقایسه با کربن‌های فعال و ژئولیت‌هاست. بهر حال پودری بودن جاذب و در نتیجه افت فشار ایجاد شده در برج جذب و نیز هزینه بهبود خواص از محدودیت‌های به‌کارگیری آنهاست [۲۶ و ۲۵].

در شکل (۶) تغییرات میزان جذب برای دو نوع جاذب MCM-41 و بهبود یافته آن توسط PEI<sup>۲</sup> با توجه به نسبت سیلیس به آلومینیم در آن ارائه شده است. البته مشکلات متعددی در استفاده از جاذب‌های MCM وجود دارد. به عنوان مثال، پایداری حرارتی آنها به‌منظور قرار گرفتن در چرخه‌های متناوب، بخصوص بدلیل تغییرات ایجاد شده ناشی از نشانیدن گروه‌های عاملی، بحث اساسی و تعیین‌کننده‌ای است، همچنین، ملاحظات اقتصادی و سادگی سنتز نیز در انتخاب نهایی عوامل، تاثیرگذار می‌باشند [۲۷].



شکل ۶- تغییرات میزان جذب با توجه به نسبت سیلیس به آلومینیم برای دو نوع MCM در دمای  $75^{\circ}\text{C}$  و شدت جریان عبوری  $100\text{ ml/min}$  برای دی‌اکسیدکربن خالص [۲۶]

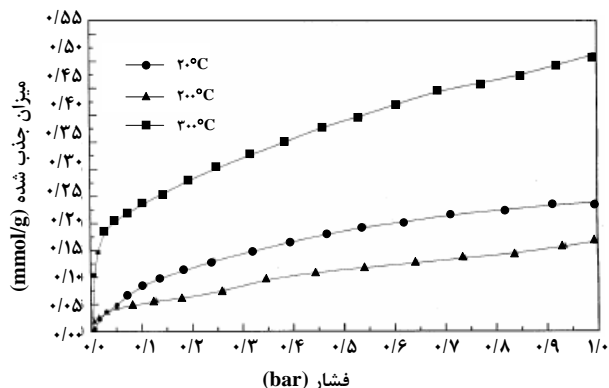


شکل ۴- تغییرات میزان جذب دی‌اکسیدکربن خالص با دما بر روی آلومین بازی [۲۱]

## ۲-۴ HTLcs

این ترکیبات، طبقه وسیعی از خاک‌های یونی و اسیدی را شامل می‌شوند. اخیراً این مواد به طور گسترده‌ای مورد توجه واقع شده‌اند، که به علت کاربرد وسیع این مواد به عنوان کاتالیزگر، ماده اولیه و پایه کاتالیزگر، تبادلگر یونی، صافی، عامل کلرزدا و جاذب‌های صنعتی می‌باشد [۸].

میزان جذب دی‌اکسیدکربن بر روی این جاذب‌ها در دمای زیاد مورد بررسی قرار گرفته است (شکل (۵)). در این تحقیقات، به بررسی اثر میزان آلومینیم، نوع آنیون موجود، دما و عامل اصلاح‌کننده شیمیایی پرداخته شده است. با توجه به نوع آنیون مصرفی، میزان جذب در برخی از موارد، حتی تا  $100\%$  نیز افزایش نشان داده است. این جاذب‌ها در دمای زیاد میزان جذب بیشتری در مقایسه با کربن‌های فعال و ژئولیت‌ها داشته‌اند [۲۲ و ۲۳].



شکل ۵- تغییرات میزان جذب دی‌اکسیدکربن خالص با فشار بر روی یک نمونه از HTLcs [۲۲]

1. Mesopores  
2. Polyethylenimine

## ۲-۶ نانولوله‌های کربنی

دو برابر ظرفیت جذب کربن فعال است که البته با توجه به قیمت بالای آنها، استفاده از این مواد، محدود به فرایندهای خاص زیستی و نانو حسگرها شده است [۳۲].

بر اساس تحقیقات انجام شده استفاده از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره، ابزاری موثر جهت جداسازی گاز دی اکسیدکربن از گاز نیتروژن است. نتایج نشان می‌دهند که این مواد برای جداسازی دی اکسیدکربن از گازهای خروجی دودکش در دماها و فشارهای زیاد مؤثر می‌باشند. علاوه بر این، نتایج تجربی نشان می‌دهند که سیستم غشایی متشکل از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره را می‌توان بر مبنای مکانیسم مایع شدن دی اکسیدکربن درون منافذ نانو لوله‌ها مورد استفاده قرار داد. از آنجا که جذب دی اکسیدکربن با افزایش دما و غلظت دی اکسیدکربن در جریان گاز، افزایش می‌یابد، این مواد برای جذب دی اکسیدکربن در دماهای زیاد، از جریان گازهای خروجی دودکش، مناسب به نظر می‌رسند. همچنین بستر پر شده نانو لوله‌های کربنی چند دیواره، یک جداکننده مؤثر دی اکسیدکربن از نیتروژن است و استفاده از رویکرد جدیدی را جهت انجام این جداسازی ارائه می‌کند [۳۱].

## ۳- نتیجه‌گیری

مطالعه جذب سطحی دی اکسیدکربن بر روی مواد جاذب در دماهای زیاد برای حل مشکل سیستم‌های انرژی و زیست محیطی تاثیر بسزایی بر رشد اقتصادی و شرایط اجتماعی دارد. ولی در پژوهش‌ها، اطلاعات زیادی راجع به این موضوع یافت نمی‌شود. از بین جاذب‌های مورد بررسی، آلومین بازی و HTICs میزان جذب مطلوبی را در دمای زیاد از خود نشان داده‌اند. جاذب ارزان قیمت کربن فعال نیز در این زمینه نتایج قابل توجهی داشته است. نانو لوله کربنی چند دیواره نیز میزان جذب مناسبی را در دمای زیاد داشته است که هزینه زیاد تولید این جاذب منجر به توجه عدم استفاده از آن در صنعت می‌شود. ویژگی‌های جذب و اقتصادی بودن جاذب‌های مختلف با توجه به توضیحات ارائه شده، در جدول (۳) ارائه شده‌اند. به منظور ساخت جاذب‌هایی که بتوانند دی اکسیدکربن را در دمای زیاد جذب کنند نیاز به مطالعات کتابخانه‌ای و تجربی زیادی است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: شناختن مکانیسم جذب دی اکسیدکربن بر روی جاذب‌های مختلف، بررسی عوامل بارورسازی

این نوع جاذب‌ها دارای مزایایی هستند که استفاده از آنها را در جذب دی اکسید کربن مورد توجه قرار می‌دهد. از آن جمله می‌توان به زیاد بودن سطح در دسترس در این گونه مواد اشاره کرد. نانو لوله‌های کربنی را می‌توان به دو دسته تک دیواره<sup>۱</sup> و چند دیواره<sup>۲</sup> تقسیم بندی کرد. برای تولید نانو لوله‌های کربنی روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن میان، روش تخلیه قوس الکتریکی<sup>۳</sup>، روش تبخیر لیزری<sup>۴</sup> و روش نشانیدن بخار شیمیایی<sup>۵</sup> بیشتر مورد توجه محققین و دانشمندان قرار گرفته است. اگر چه دو روش اول یعنی روش تخلیه قوس الکتریکی و روش تبخیر لیزری برای تولید نانو لوله‌های با کیفیت عالی و خلوص بالا مناسبند، اما فرایند آنها برای تولید نانو لوله‌ها در مقیاس بزرگ و ارزان، مناسب نیست. به عقیده بسیاری از محققان، تنها روش سوم، یعنی روش نشانیدن بخار شیمیایی، قابلیت تولید نانو لوله‌ها در مقیاس بزرگ و ارزان برای کاربردهایی مانند ذخیره سازی هیدروژن، استفاده در کامپوزیت‌ها، پایه کاتالیزورها و کاربردهای دیگری را دارا می‌باشد. در این روش، اولاً مواد اولیه، ارزان و در دسترس است، ثانیاً فرایند آن، آسان است و ثالثاً امکان تولید محصول به صورت پیوسته وجود دارد [۳۱-۲۸].

تغییرات خواص جذبی نوع تک دیواره، با افزایش دما، الگوی رفتاری شبیه دیگر جاذب‌ها دارد، در حالیکه در نانو لوله‌های کربنی چند دیواره، افزایش دما منجر به الگوی رفتاری متفاوتی می‌شود [۳۱]. هزینه سنتز نانو لوله‌های کربنی بسیار زیاد است و به نظر می‌رسد تهیه آنها تنها در مقادیر کم و جهت مصارف آزمایشگاهی به صرفه می‌باشد.

اخیراً محققین، فرایند جذب گاز دی اکسید کربن بر روی نانولوله‌های کربنی تک دیواره در دماهای  $200^{\circ}\text{C}$  - را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۲]. وجود ذرات فلزی و اکسید فلزات بر روی خواص جذبی نانولوله‌های کربنی تک دیواره تأثیر عمده ای دارد. نمونه ای با خلوص بالا، جذب فیزیکی خوبی از خود نشان می‌دهد. در نمونه تک دیواره ظرفیت جذب با افزایش دمای جذب، کاهش می‌یابد. ظرفیت جذب دی اکسید کربن در نانولوله کربنی تک دیواره تقریباً

1. Single Wall Carbon Nanotube
2. Multi Wall Carbon Nanotube
3. Electric Arc Discharge
4. Laser Ablation / Vaporization
5. Chemical Vapor Deposition (CVD)

#### ۴- تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی معاونت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران تشکر و قدردانی می‌شود.

مختلف به منظور یافتن بهترین عامل و شرایط بارورسازی، مطالعه سینتیک جذب و دفع دی‌اکسید کربن بر روی جاذب‌ها و همچنین انتخاب یک فرایند بهینه به منظور صنعتی کردن مطالعات انجام شده.

جدول ۳- ویژگی جاذب‌های مختلف که تاکنون در جذب دی‌اکسید کربن، کارساز بوده‌اند.

نام جاذب	ظرفیت جذب در دمای زیاد	قابلیت احیا	هزینه تولید	کاربرد در صنعت
کربن فعال	متوسط و یا کم (در صورت بارورسازی، بیشتر هم می‌شود)	نیاز به دمای بالا ندارد	کم	مناسب
اکسید فلز	زیاد	دمای بالا	کم	مناسب
زئولیت	متوسط	دمای بالا	کم	نامناسب (به علت ظرفیت بالای جذب آب)
HTICs	متوسط	دمای بالا	متوسط	مناسب
MCM	متوسط و یا کم (در صورت بارورسازی بیشتر می‌شود)	دمای بالا	متوسط	نامناسب (افت فشار زیادی در بسترهای جذب ایجاد می‌کند)
نانو لوله کربنی	تنها در مورد چند دیواره میزان جذب مناسبی مشاهده شده است	بسته به گروه‌هایی دارد که حین فرایند خالص‌سازی بر روی سطوح نانو لوله نشست‌اند	زیاد	نامناسب

#### مراجع

- [1] Official Energy Statistics from the U. S. Government, <http://www.eia.doe.gov>.
- [2] Orchard, S., Cheltenham, A., "Greenhouse Gases from Major Industrial Sources", Report ph3/23, April 2006, IEA Greenhouse Gas Program, UK (2006).
- [3] Gupta, M., Coyle, I., Thambimuthu, K., "CO<sub>2</sub> Capture Technologies and Opportunities in Canada", 1<sup>st</sup> Canadian CC&S Technology Roadmap Workshop, Calgary, Alberta, Canada (2003).
- [4] Chakravarti, S., Gupta, A., Hunek, B., "Advanced Technology for the Capture of Carbon Dioxide from Flue Gases", First National Conference on Carbon Sequestration, Washington, DC (2001).
- [5] Chakravarti, S., Gupta, A., Hunek, B., "Advanced Technology for The Capture of Carbon Dioxide from Flue Gases." First National Conference on Carbon Sequestration, Washington, DC, (2001).
- [6] Arthur, K., Richard, N., "Alkanolamines for Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide Removal.", 1<sup>st</sup> Ed., Gulf Publishing Co., P. 87 (1997).
- [7] Prasetyo, I., Do, D. D. "Adsorption rate of Methane and Carbon Dioxide on Activated Carbon by The Semibatch Constant Molar Flow Rate Method.", Chemical Engineering Science, 53, 3459- 3467 (1997).
- [8] Yong, Z., Mata, V., Rodrigues, A. E., "Adsorption of Carbon Dioxide at High Temperature - A Review", Separation and Purification Technology 26, 195-205 (2002).

- [9] Bansal, R. C., Goyal, M., "Activated Carbon Adsorption", 1<sup>st</sup> Ed., Taylor & Francis group, P. 207 (2005).
- [10] Delavari Amrei, H., Mehrnia, M., Montazer-Rahmati, M., Ghanizadeh, A., Safari, M., Somy, A., "Effect of Temperature on Adsorption Isotherms of Carbon Dioxide on Activated Carbon", ICHEC, Iran, Kish (2008).
- [11] Al-Khatib, M. F., Iyuke, S. E., Abu Bakar, M., Daud, W. R. W., Kadhum, A. A. H., Shariff, A. M., Yarmo, M. A., "The Effect of Impregnation of Activated Carbon with SnCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O on its Porosity, Surface Composition and CO Gas Adsorption". Carbon 40, 1929-1936 (2002).
- [12] Avim-Ferraz, M.C.M., Todo-Bom Gaspar, C.M., "Impregnated Active Carbons to Control Atmospheric Emissions". Journal of Colloid and Interface Science 259, 133-138 (2003).
- [13] Przepioński, J., Skrodzewicz, M., Morawski, A.W., "High Temperature Ammonia Treatment of Activated Carbon for Enhancement of CO<sub>2</sub> Adsorption", Applied Surface Science, 225, 235-242 (2004).
- [14] Mehrnia, M., Montazer-Rahmati, M., Safari, M., Delavari Amrei, H., Ghanizadeh, A., "Different Adsorption Isotherm of Carbon Dioxide on Raw and Impregnated Activated Carbon", ECCE, Copenhagen, Denmark (2007).
- [15] Somy, A., Mehrnia, M., Delavari Amrei, H., Ghanizadeh, A., Safari, M., "Adsorption of Carbon Dioxide Using Impregnated Activated Carbon Promoted by Zinc", International Journal of Greenhouse Gas Control, 3, 249-254 (2009).
- [۱۶] دلاوری امرئی، ح.، "بررسی تجربی و مدلسازی جذب سطحی دی‌اکسیدکربن از گاز مدل دودکش"، پایان نامه کارشناسی ارشد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی، بهمن (۱۳۸۷).
- [17] Maroto-Valer, M. M., Andrése, J. M., Zhang, Y., Lu, Z., "Development of Fly Ash Derived Sorbents to Capture CO<sub>2</sub> From Flue Gas of Power Plants", patent (subcontract 98-166-PSU Ptoject #01-CBRC-E9), U. S. Department of energy (2003).
- [18] Arenillas, A., Smith, K.M., Drage, T.C., Snape, C.E., "CO<sub>2</sub> Capture Using Some Fly Ash-derived Carbon Materials", Fuel 84, 2204-2210 (2005).
- [19] Dyer A., "An Introduction to Zeolite Molecular Sieves", 1st Ed., John Wiley, P. 109 (1988).
- [20] Auroux, A., Gervasini, A., "Microcalorimetric study of the acidity and basicity of metal oxides surface", J. Phys. Chem. 94, 6371-6379 (1990).
- [21] Yong, Z., Mata, V., Rodrigues, A. E., "Adsorption of Carbon Dioxide on Basic Alumina at High Temperatures", J. Chem. Eng. Data 45, 1093-1095 (2005).
- [22] Yong, Z., Mata, V., Rodrigues, A. E., "Adsorption of Carbon Dioxide on to Hydrotalcite-like Compounds (HTlcs) at High Temperatures", Ind. Eng. Chem. Res., 40 204-209 (2001).
- [23] Gang, M., Tsuji, M., Tamaura, Y., "Synthesis and CO<sub>2</sub> Adsorption Features of Hydrotalcite-like Compound of The Mg<sup>2+</sup>-Al<sup>3+</sup>-Fe(CN)<sub>6</sub><sup>4-</sup> System with High Layer-Charge Density, Clays Clay Miner.", 41, 731-737 (1993).
- [24] Xu, X., Song, C., Miller, G., Scaroni, A. W., "Adsorption Separation of Carbon Dioxide from Flue Gas of Natural Gas-Fired Boiler by Novel Nanoporous 'Molecular Basket' Adsorbent", Fuel Processing Technology, 86, 1457-1472 (2005).
- [25] Christiano, C. R., Deovaldo, d. Jr., Seleude, W. d., Marcio, G. B., "Ammonia Adsorption in a Fixed Bed of Activated Carbon", Bioresource Technology, 98, 886-891 (2007).
- [26] Xu, X., Song, C., Andrése, J. M., Miller, B. G., Scaroni, W.A., "Preparation and Characterization of Novel CO<sub>2</sub> "molecular basket" Adsorbents Based on Polymer-Modified Mesoporous Molecular sieve MCM-41", Microporous and Mesoporous Materials, 62, 29-45 (2003).
- [27] Schweitzer, P.A., "Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers", 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill, P. 421 (1997).
- [28] Merkoci, A., "Carbon Nanotubes in Analytical Sciences", Microchim Acta, 152, 157-174 (2006).
- [29] Rakov, E. G., "Method for preparation of carbon nanotubes", Russian Chemical Reviews, 69, 35-52 (2000).
- [30] Vahlas, C., Caussat, B. G., Serp, P., Angelopoulos, G. N., "Principles and applications of CVD powder technology", Materials Science and Engineering R, 53, 1-72 (2006).
- [31] Andrews, R., "Separation of CO<sub>2</sub> from Flue Gases by Carbon-MultiWall Carbon NanoTube Membrane", Final Technical Report for U.S. Department of Energy (2001).
- [32] Cinke, M., Li, J., Bauschlicher Jr., C.W., Ricca, A., Meyyappan, M., "CO<sub>2</sub> adsorption in single-walled carbon nanotubes". Chem. Phys. Lett. 376, 761-766 (2003).