



## Reduction of Carbon Dioxide Greenhouse Gas Using Activated Carbon Adsorbent Synthesized from Oleaster Seed

M. J. Athari<sup>1</sup>, M. Tahmasebpour<sup>2\*</sup>

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, University of Tabriz

2- Associate Professor of Chemical Engineering, University of Tabriz

Email: tahmasebpour@tabrizu.ac.ir

### Abstract

*Increasing the concentration of carbon dioxide in the atmosphere has forced governments to place this issue among their most important problems. There are different methods to capture carbon dioxide. One of the most important ones is adsorption that employs adsorbents such as activated carbon, which can be synthesized from various bio-wastes. In this research, activated carbon was synthesized from Oleaster seed to adsorb CO<sub>2</sub> by investigating various effective parameters as well as its stability during adsorption/regeneration cycles. The CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the adsorbents was investigated utilizing thermogravimetric analysis (TGA). The adsorbent synthesized in the weight ratio of KOH: biomass as 2:1, with the adsorption capacity of 2.78 mmol/g was introduced as the selected sample. Results indicated that with the increase in temperature from 25 to 50°C, at CO<sub>2</sub> concentration of 90%, the amount of adsorption decreased from 2.78 to 1.79 mmol/g, due to the endothermic nature of CO<sub>2</sub> adsorption process. It was also found that by reducing the entering concentration of CO<sub>2</sub> from 90 to 10%, the CO<sub>2</sub> adsorption rate of the selected adsorbent decreased from 2.78 mmol/g to 1.03 mmol/g, regarding less contact between the adsorbent particles and CO<sub>2</sub> molecules. It was concluded that the adsorbent synthesized from Oleaster seed shows an acceptable capability to adsorb CO<sub>2</sub>. This adsorbent also showed an excellent stability during the cycles, which makes us to introduce it as a good candidate for industrial applications.*

Received: 15 September 2023

Accepted: 29 January 2024

Page Number: 65-78

### Keywords:

Carbon Dioxide,  
Adsorption Process,  
Activated Carbon,  
Oleaster Seed

Please Cite this Article Using:

Athari, M. J., & Tahmasebpour, M. (2025). Reduction of Carbon Dioxide Greenhouse Gas Using Activated Carbon Adsorbent Synthesized from Oleaster Seed. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(138), 65-78, [In Persian].



# کاهش گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن با استفاده از جاذب کربن فعال سنتز شده از هسته سنجد

میر جمال‌الدین اطهاری<sup>۱</sup>، مریم طهماسب پور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

پیام نگار: tahmasebpour@tabrizu.ac.ir

## چکیده

افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو، دولت‌ها را مجبور کرده‌است تا این مسأله را در بین مشکلات پر اهمیت خود قرار دهند. روش‌های مختلفی برای جداسازی دی‌اکسید کربن وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، روش جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های کربنی مانند کربن فعال است که می‌تواند از ضایعات زیستی مختلف سنتز شود. هدف از این تحقیق، سنتز کربن فعال برای اولین بار از زیست‌توده هسته سنجد به منظور جذب  $CO_2$  و بررسی مشخصه‌های مختلف بر ظرفیت جذب آن و همچنین مطالعه پایداری جاذب طی چندین چرخه جذب و احیا است. در این تحقیق، ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن جاذب‌ها به کمک آنالیز توزین حرارتی انجام پذیرفت. جاذب سنتز شده در نسبت وزنی عامل فعال‌ساز هیدروکسید پتاسیم به زیست‌توده برابر با ۲ به ۱، با ظرفیت جذب  $2/78 \text{ mmol/g}$  به عنوان جاذب منتخب معرفی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۲۵ به ۵۰ درجه سلسیوس، در غلظت ۹۰ درصدی از گاز دی‌اکسید کربن، با توجه به ماهیت گرماگیر بودن فرایند جذب دی‌اکسید کربن، میزان جذب جاذب منتخب از  $2/78$  به  $1/79 \text{ mmol/g}$  کاهش یافت. همچنین با کاهش غلظت دی‌اکسید کربن ورودی به سامانه از ۹۰ به ۱۰ درصد، میزان جذب  $CO_2$  جاذب در دمای محیط، به علت تماس کمتر ذرات جاذب با مولکول‌های  $CO_2$  در غلظت‌های پایین، از  $2/78$  به  $1/03 \text{ mmol/g}$  کاهش پیدا کرد. با بررسی‌های به عمل آمده، نتیجه‌گیری شد که جاذب سنتز شده با هسته سنجد دارای ظرفیت جذب قابل قبول است. همچنین، جاذب تهیه شده از پایداری بسیار خوبی برخوردار است و می‌تواند به عنوان یک جاذب مناسب برای مصارف صنعتی معرفی شود.

## کلیدواژه‌ها:

دی‌اکسید کربن،  
فرایند جذب،  
کربن فعال،  
هسته سنجد

\* تبریز، دانشگاه تبریز، گروه مهندسی شیمی

## استناد به مقاله:

اطهاری، میر جمال‌الدین، و طهماسب پور، مریم. (۱۴۰۴). کاهش گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن با استفاده از جاذب کربن فعال سنتز شده از هسته سنجد، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴ (۱۳۸)، ۶۵-۷۸.

هیدروژل‌ها یکی از مهم‌ترین نیازهای انسان، داشتن هوای پاک است. گسترش فعالیت‌های صنعتی در جهان و همچنین افزایش جمعیت، نیاز روزافزون بشر به استفاده از سوخت‌های فسیلی را بیشتر کرده است که این امر منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای شده که گرم‌شدن زمین را در پی دارد. سه نوع گاز، که بالاترین درصد را در بین گازهای گلخانه‌ای به خود اختصاص داده،  $\text{CO}_2$ ،  $\text{CH}_4$  و  $\text{N}_2\text{O}$  است؛ به طوری که از این میان، گاز  $\text{CO}_2$  بالاترین سهم را در تغییرات مربوط به جو ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای دارا است. علاوه بر این، گاز  $\text{CO}_2$  در بین سایر گازهای گلخانه‌ای بیشترین زمان ماند را در جو در اختیار دارد [۱،۲]. با توسعه صنایع مختلف هم‌چون پتروشیمی، فولاد، سیمان و افزایش توان نیروگاه‌های حرارتی، حجم بسیار زیادی از گاز  $\text{CO}_2$ ، تولید می‌شود و مصرف این گاز در صنایع ذکر شده پاسخگوی میزان بسیار بالای تولید آن نیست و حجم بالایی از این گاز وارد جو می‌شود [۳،۴]. بنابراین، نیاز به استفاده از روش‌های مختلف به منظور جذب این گاز برای جلوگیری از آثار نامطلوب انتشار آن، مسأله‌ای مهم برای محققان در سال‌های اخیر بوده است [۵،۶]. انواع روش‌های مختلف مانند روش جذب شیمیایی<sup>۱</sup>، جداسازی غشایی<sup>۲</sup>، سرمایشی<sup>۳</sup> و جذب سطحی<sup>۴</sup> برای جداسازی دی‌اکسید کربن در فرایندها استفاده می‌شود که از این میان، روش جذب سطحی با در نظر گرفتن برتری‌هایی هم‌چون برگشت‌پذیر بودن فرایند، مقرون به صرفه بودن، داشتن قابلیت به کارگیری در طیف وسیعی از دما و فشارهای مختلف و غیره روش مورد علاقه بسیاری از محققان در سال‌های اخیر بوده است [۷]. با این حال موفقیت این روش وابسته به ویژگی‌های جاذب مانند هزینه، ظرفیت جذب، سهولت فرایند احیا، ماندگاری، گزینش‌پذیری و پایداری جاذب طی چندین چرخه جذب و دفع است [۸،۹]. جاذب‌های جامد امیدوارکننده متعددی در سال‌های اخیر توسعه یافته است که دارای ویژگی‌های مطلوبی مانند ظرفیت جذب بالا، عدم حساسیت به رطوبت، هزینه کم، انتخاب‌پذیری مناسب برای  $\text{CO}_2$ ، فرایند احیای آسان و قابلیت استفاده مجدد است که نمونه‌ای از این جاذب‌ها، جاذب‌های کربنی است [۵،۱۰]. جاذب‌های کربنی، انواع مختلفی از جاذب‌ها را شامل

می‌شود که کربن فعال از مهم‌ترین آن‌ها است. کربن فعال، ماده‌ای میکرومتخلخل با ویژگی‌های منحصربه‌فرد مانند ظرفیت جذب بالا، هزینه‌ی کم تولید، قابلیت اصلاح ویژگی‌های شیمیایی یا ساختاری و سطح ویژه بالا است که منجر به کاربردهای متنوعی از آن در بازیافت حلال، جذب دی‌اکسید کربن، جذب رنگ و جداسازی بو و مزه‌های غیر دلخواه از آب در عملیات خانگی و صنعتی می‌شود [۱۱،۱۲]. این ماده پرارزش می‌تواند از ضایعات زیستی طی فرایندهای کربنیزاسیون و فعال‌سازی به دست آید [۱۳،۱۴]. در سال‌های اخیر از انواع زیست‌توده<sup>۵</sup> مانند تفاله چای [۱۴]، پوسته برنج [۱۵]، زغال سنگ [۱۶]، پوسته نارگیل [۱۷]، مخروط کاج [۱۸] و غیره برای سنتز کربن فعال استفاده شده است. در سال ۲۰۱۷ توپراک<sup>۶</sup> و همکاران [۱۸] فرایند جذب دی‌اکسید کربن را به وسیله جاذب زغال سنگ فعال شده با مواد شیمیایی مختلف نظیر  $\text{KOH}$ ،  $\text{NaOH}$  و  $\text{ZnCl}_2$  بررسی کردند و تأثیر دمای فعال‌سازی و نسبت عامل فعال‌ساز به زغال سنگ را به ترتیب در محدوده دمایی  $600-800^\circ\text{C}$  و نسبت فعال‌سازی ۱ به ۱ تا ۶ به ۱ تجزیه و تحلیل کردند. نتایج جذب  $\text{CO}_2$ ، نشان داد که بیشترین ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن برابر با  $28/57\% \text{ wt}$  و  $26/65\% \text{ wt}$  به ترتیب با نمونه‌های سنتز شده در دمای  $800^\circ\text{C}$  به وسیله عوامل فعال‌ساز  $\text{KOH}$  و  $\text{NaOH}$  در نسبت جرمی ۴ به ۱ به دست آمده است. در بین عوامل فعال‌ساز،  $\text{KOH}$  به عنوان بهترین عامل فعال‌ساز شیمیایی انتخاب شد. در سال ۲۰۱۸ اوگونگ بنرو<sup>۷</sup> و همکارانش [۱۹] جذب دی‌اکسید کربن را به وسیله کربن فعال تهیه شده از هسته خرما بررسی کردند. در این تحقیق، از روش فعال‌سازی فیزیکی تحت اتمسفر  $\text{CO}_2$  استفاده شده و تأثیر دمای پیرولیز زیست‌توده در محدوده دمایی  $600-900^\circ\text{C}$  بررسی شد. هم‌چنین، به منظور دستیابی به شرایط بهینه فعال‌سازی جاذب، زمان و دمای فعال‌سازی جاذب به ترتیب در محدوده  $0/3-0/75$  ساعت و  $600-900^\circ\text{C}$  آزمایش شد. نتایج نشان داد که بیشینه ظرفیت جذب  $\text{CO}_2$  برابر با  $14/14 \text{ mg/g}$  به وسیله جاذبی به دست می‌آید که زیست‌توده آن در دمای  $800^\circ\text{C}$  پیرولیز شده و به مدت ۱ ساعت در دمای فعال‌سازی  $900^\circ\text{C}$  تحت اتمسفر  $\text{CO}_2$  سنتز شده است. در

5. Biomass  
6. Toprak  
7. Ogungbenro

1. Chemical Absorption  
2. Membrane Separation  
3. Cryogenic  
4. Adsorption

سال ۲۰۲۰ اوگونگ بنرو و همکاران [۲۰] مطالعه‌ای دیگر را بر روی جذب CO<sub>2</sub> با کربن فعال تهیه‌شده از هسته خرما انجام دادند. آن‌ها برای سنتز جاذب از دو عامل فعال‌ساز KOH و H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> در نسبت‌های جرمی مختلف عامل فعال‌ساز به زیست‌توده (برای هیدرواکسید پتاسیم نسبت‌های ۳ به ۱، ۴ به ۱ و ۵ به ۱ برای اسید سولفوریک نسبت‌های ۵/۱ به ۱، ۱ به ۱ و ۲ به ۱) استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش نسبت عامل فعال‌ساز، بازده جذب در مورد نمونه‌های تهیه‌شده به کمک KOH، به طرز چشم‌گیری کاهش می‌یابد؛ این در حالی بود که افزایش نسبت عامل فعال‌ساز در مورد نمونه‌های تهیه‌شده به کمک H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> تغییر چندانی در میزان جذب CO<sub>2</sub> ایجاد نمی‌کرد. علاوه بر این‌ها نتایج نشان داد که نمونه‌های تهیه‌شده با اسید سولفوریک از عملکرد نسبی بهتری در مقایسه با نمونه‌های تهیه‌شده با هیدرواکسید پتاسیم برخوردار است. با وجود اینکه در مطالعات اخیر از انواع زیست‌توده برای سنتز جاذب کربن فعال و کاربرد آن در فرایند جذب دی‌اکسید کربن استفاده شده، با این حال در هیچ‌یک از این مطالعات، زیست‌توده هسته سنجد موضوع بررسی نبوده است. بر همین اساس، اصلی‌ترین هدف و نوآوری این تحقیق تولید جاذب کربن فعال با استفاده از زیست‌توده هسته سنجد (به‌عنوان یک زیست‌توده فراوان در کشور ایران) به منظور جذب دی‌اکسید کربن است. هم‌چنین، بررسی تأثیر عامل فعال‌ساز هیدرواکسید پتاسیم بر بازده جذب جاذب‌های تولیدشده و تعیین بهینه نسبت عامل فعال‌ساز به زیست‌توده مصرفی از دیگر اهداف این تحقیق است. علاوه بر این‌ها، تأثیر غلظت دی‌اکسید کربن و دمای جذب بر میزان جذب دی‌اکسید کربن جاذب سنتز شده و بررسی پایداری جاذب طی چندین چرخه جذب و دفع CO<sub>2</sub> نیز از جمله اهداف دیگر این تحقیق به‌شمار می‌رود.

## ۲. بخش تجربی

### ۲-۱ مواد

سنجد مورد نیاز برای سنتز جاذب کربن فعال از بازار تبریز، هیدرواکسید پتاسیم از شرکت مجللی و اسید هیدروکلریک از شرکت Merck تهیه شد. در تمامی مراحل شست‌وشو از آب مقطر استفاده شد.

### ۲-۲ روش سنتز نمونه‌ها

جزئیات انتخاب شرایط عملیاتی برای تهیه کربن فعال در تحقیقات قبلی این گروه ارائه شده است [۲۱، ۲۲]. به‌طور خلاصه در اولین قدم، اجزای مختلف سنجد (پوسته، گوشت و هسته) از یکدیگر جدا و سپس ناخالصی‌های موجود بر روی سطح هسته‌ها با شست‌وشو حذف شد. هسته‌های شسته‌شده در دمای ۱۰۰°C به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون خشک شد. زیست‌توده خشک‌شده برای انجام فرایند پیرولیز به مدت ۲ ساعت در کوره تحت دمای ۶۰۰°C حرارت داده و سپس در هاون خرد شد و در نهایت برای دستیابی به اندازه ذرات ۲۰۰ میکرونی الک شد. لازم به ذکر است که محصول به‌دست‌آمده در این مرحله P نام‌گذاری شد. پس از انجام فرایند پیرولیز، روش فعال‌سازی دومرحله‌ای برای انجام فرایند کربنیزاسون کامل زیست‌توده‌ها به کار رفت. به‌منظور سنتز کربن فعال، ۵ گرم از زیست‌توده پیرولیز شده با عامل فعال‌ساز (KOH) در نسبت‌های جرمی متفاوت (به ترتیب ۲ به ۱، ۳ به ۱ و ۴ به ۱ از عامل فعال‌ساز به زیست‌توده پیرولیز شده) مخلوط شد و در دمای ۹۰°C با همزن مغناطیسی به مدت ۳ ساعت همزده شد. برای حذف آب موجود در نمونه، محلول به مدت ۲۱ ساعت در دمای ۹۰°C داخل آون قرار گرفت. در مرحله بعد، ماده جامد به‌دست‌آمده به مدت ۱ ساعت داخل کوره در دمای ۶۰۰°C قرار گرفت تا فرایند فعال‌سازی کامل شود. پس از سرد شدن تا دمای اتاق، برای حذف عامل فعال‌ساز اضافی و انجام فرایند خنثی‌سازی، کربن فعال تهیه‌شده با HCl ۳ مولار و آب مقطر شسته شد. در نهایت نیز محصول به‌دست‌آمده در دمای ۹۵°C به مدت یک روز خشک و سپس الک شد تا کربن فعال با اندازه ذرات ۲۰۰ میکرونی به‌دست آید. لازم به ذکر است که محصول نهایی تولیدشده به صورت ACK<sub>x</sub>P<sub>y</sub> نام‌گذاری شد که در آن x و y به ترتیب نشان‌دهنده نسبت عامل فعال‌ساز و زیست‌توده در فرایند تولید است؛ به طوری که جاذب سنتز شده در نسبت جرمی ۲ به ۱، ۳ به ۱ و ۴ به ۱ از عامل فعال‌ساز KOH به زیست‌توده پیرولیز شده به ترتیب ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub>، ACK<sub>3</sub>P<sub>1</sub> و ACK<sub>4</sub>P<sub>1</sub> نام‌گذاری شد.

### ۲-۳ آنالیزهای مورد بررسی

برای بررسی گروه‌های عاملی موجود در سطح جاذب‌ها و پی‌بردن به ماهیت شیمیایی آن‌ها از دستگاه FTIR موجود در دانشگاه تبریز

نتایج حاصل از آنالیز FTIR نمونه‌های P و  $ACK_2P_1$  ارائه شده است. از لحاظ گروه‌های عاملی موجود در سطح، نمونه پیرولیز شده هسته سنج (نمونه P) نسبت به نمونه‌های فعال شده و اصلاح شده آن، غنی‌تر و شامل پیک‌های زیادی است؛ زیرا در طی عمل فعال‌سازی بر اثر حرارت زیاد، برخی از مواد فرار موجود در نمونه تجزیه شده، منجر به حذف پیک‌های متنوع موجود در نمونه اولیه می‌شود [۲۲]. پیک‌های مشاهده شده در محدوده  $2800-3000\text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش کششی گروه‌های آلیفاتیک اشاره دارد [۲۳]. همچنین طیف‌های ایجاد شده در محدوده  $3000-4000\text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده کشش OH ناشی از رطوبت و نیز گروه‌های هیدروکسیل موجود در نمونه‌ها است. پیک‌های ظاهر شده در نمونه P در نواحی  $871$  و  $1550\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب به باندهای کششی C-H و C=C اشاره دارد [۲۴، ۲۵]. به علاوه، قله نسبتاً قوی ایجاد شده در  $1694\text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده باند C=O موجود در گروه‌های کربوکسیل است [۲۶]. در نمونه  $ACK_2P_1$  قله ظاهر شده در  $1559\text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش کششی C=C نسبت داده می‌شود. به علاوه، قله ظاهر شده در  $2855\text{ cm}^{-1}$  نمایانگر گروه‌های کششی آلیفاتیک (-CH) است [۲۳].

### ۳-۱-۲ آنالیز SEM<sup>۲</sup>

شکل (۲) ریخت‌شناسی نمونه‌های کربن فعال تهیه شده را به همراه نمونه فعال نشده (پیرولیز شده) نشان می‌دهد. چنان‌که به وضوح دیده می‌شود، نمونه فعال نشده (شکل ۲-ا)، دارای سطحی صاف و بدون تخلخل و حفره است، در حالی که نمونه‌های فعال شده با عامل

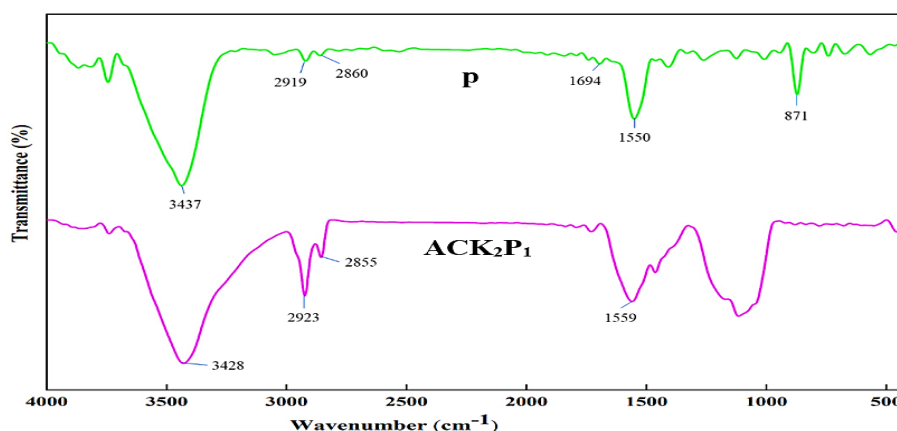
استفاده شد. همچنین، برای بررسی ریخت‌شناسی سطح جاذب‌ها و تجزیه و تحلیل شیمیایی عناصر موجود در نمونه‌های تهیه شده، به ترتیب از دستگاه SEM و EDS موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز بهره گرفته شد. به علاوه، آزمون‌های مربوط به بررسی ظرفیت جذب و پایداری جاذب‌ها با دستگاه آنالیز حرارتی Setaram TGA-92 موجود در کشور اسپانیا انجام شد. برای این منظور، نمونه‌ها در مرحله اول در دمای  $120^\circ\text{C}$  با هدف حذف رطوبت اولیه و گازهای احتمالی جذب شده (به خصوص گاز دی‌اکسید کربن)، تحت جریان گاز نیتروژن قرار داده می‌شود. سپس دمای سامانه تا دمای مورد نظر برای فرایند جذب ( $25^\circ\text{C}$  و  $50^\circ\text{C}$ )، کم می‌شود و در لحظه رسیدن به دمای مورد نظر جذب، گاز ورودی به سامانه از حالت نیتروژن خالص به مخلوط گاز دی‌اکسید کربن و نیتروژن با دبی گاز ورودی  $50\text{ cm}^3/\text{min}$  تغییر می‌کند و فرایند جذب روی جاذب آغاز می‌شود. شایان یادآوری است که در این مطالعه دو درصد مختلف دی‌اکسید کربن شامل ۱۰ و ۹۰ درصد (مخلوط شده با گاز نیتروژن) بررسی شده و فرایند جذب و دفع طی سه چرخه متوالی مطالعه شده است.

### ۳. یافته‌ها

#### ۳-۱-۱ شناسایی خصوصیات جاذب‌ها

##### ۳-۱-۱-۱ آنالیز FTIR<sup>۱</sup>

برای بررسی ماهیت شیمیایی سطح جاذب و تجزیه و تحلیل گروه‌های عاملی موجود در سطح آن، از آنالیز FTIR استفاده شد. در شکل (۱)

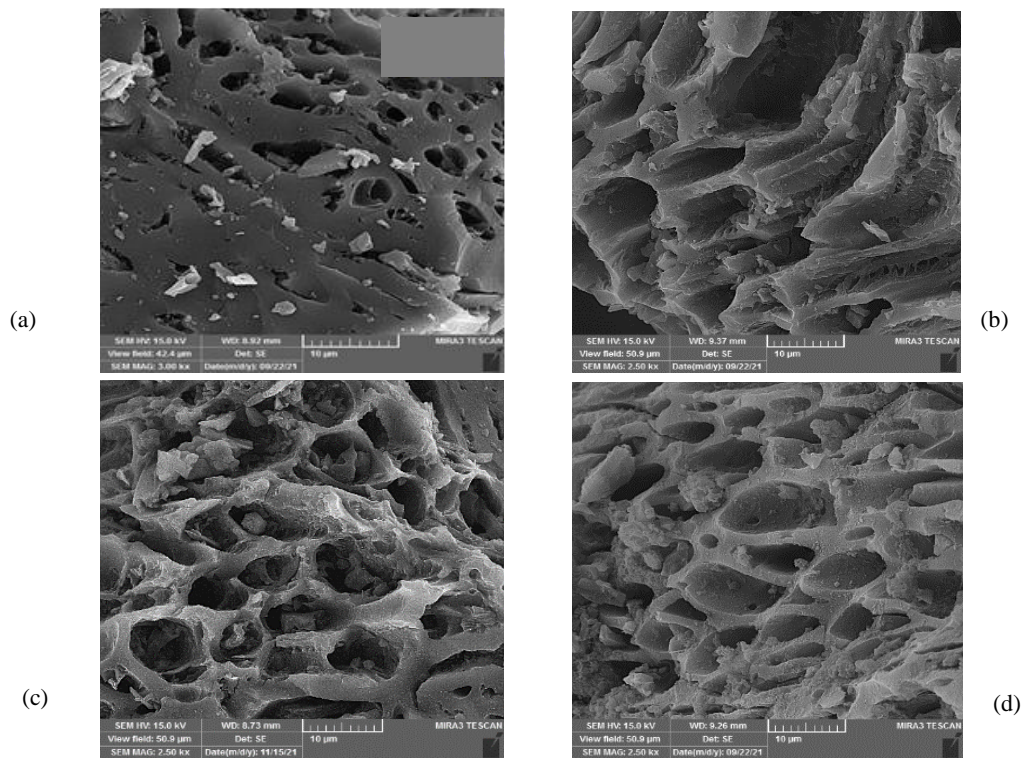


شکل ۱. نتایج آنالیز FTIR نمونه‌های (a) هسته پیرولیز شده (P)، (b) هسته فعال‌سازی شده ( $ACK_2P_1$ ).

Figure 1. FTIR spectra of pyrolyzed seed (P) and activated seed ( $ACK_2P_1$ ) samples.

1. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy

2. Scanning Electron Microscope



شکل ۲. تصاویر SEM نمونه‌های (a) P، (b)  $ACK_2P_1$ ، (c)  $ACK_3P_1$ ، (d)  $ACK_4P_1$ .

Figure 2. SEM images of (a) P, (b)  $ACK_2P_1$ , (c)  $ACK_3P_1$ , (d)  $ACK_4P_1$  samples.

است تأثیر منفی بر ظرفیت جذب داشته باشد. بنابراین باتوجه به ویژگی‌های ذکر شده در مورد نمونه  $ACK_2P_1$ ، انتظار می‌رود که این نمونه جذب بهتری را درمقایسه با سایر نمونه‌ها داشته باشد. همان‌طور که پیدا است، سطح نمونه  $ACK_2P_1$  از حفره‌های زیادی تشکیل شده که همین امر پیش‌بینی رفتار بهتر این جاذب را درمقایسه با سایر جاذب‌های تهیه شده آسان‌تر می‌کند.

### ۳-۱-۳ آنالیز EDS

برای بررسی و تجزیه و تحلیل شیمیایی عناصر موجود در نمونه‌های پیرولیزشده و فعال شده از آنالیز EDS استفاده شد. شکل (۳) نتایج آنالیز EDS نمونه‌های P (a) و  $ACK_2P_1$  (b) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود عنصر کربن بالاترین درصد را در بین همه نمونه‌های تهیه شده داشته و در واقع، نشان می‌دهد که این زیست توده از قابلیت خوبی برای تبدیل شدن به جاذب کربن فعال برخوردار است. بعد از عنصر کربن، عناصر نیتروژن و اکسیژن بالاترین فراوانی را از نظر درصد وزنی در بین عناصر موجود در نمونه‌ها دارد.

فعال‌ساز KOH ساختاری حفره‌ای و متخلخل را درمقایسه با نمونه پیرولیزشده از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، با مقایسه نمونه‌های تهیه شده با نسبت عامل فعال‌ساز متفاوت (شکل ۲- (b,c,d)، ملاحظه می‌شود که نمونه فعال شده با نسبت عامل فعال‌ساز به زیست توده پیرولیزشده برابر با ۲ به ۱، از تخلخل و ریزحفرات بیشتری درمقایسه با نمونه‌های تهیه شده با نسبت عامل فعال‌ساز بیشتر، برخوردار است. در نمونه  $ACK_2P_1$  مشاهده می‌شود که حفره‌های ریزتر درون حفره‌های بزرگتر تشکیل شده که این مورد در هیچ یک از نمونه‌ها ملاحظه نمی‌شود. با کمی دقت در تصاویر نمونه‌های فعال شده، پیدا است که نمونه  $ACK_2P_1$ ، از منافذ و ترک خوردگی‌های بازتری برخوردار است؛ این در حالی است که برخی حفره‌های تشکیل شده در نمونه‌های  $ACK_3P_1$  و  $ACK_4P_1$  به وسیله عامل فعال‌ساز مازاد اشغال شده است و همین ماده مازاد اشغال شده، هنگام شست‌وشو با اسید و آب مقطر، به طور کامل از منافذ و حفره‌ها تخلیه نشده است. همچنین با مقایسه تصاویر نمونه‌های فعال شده (شکل ۲- (b,c,d)، دیده می‌شود که اشغال حفره‌ها با افزایش نسبت عامل فعال‌ساز، بیشتر می‌شود که ممکن

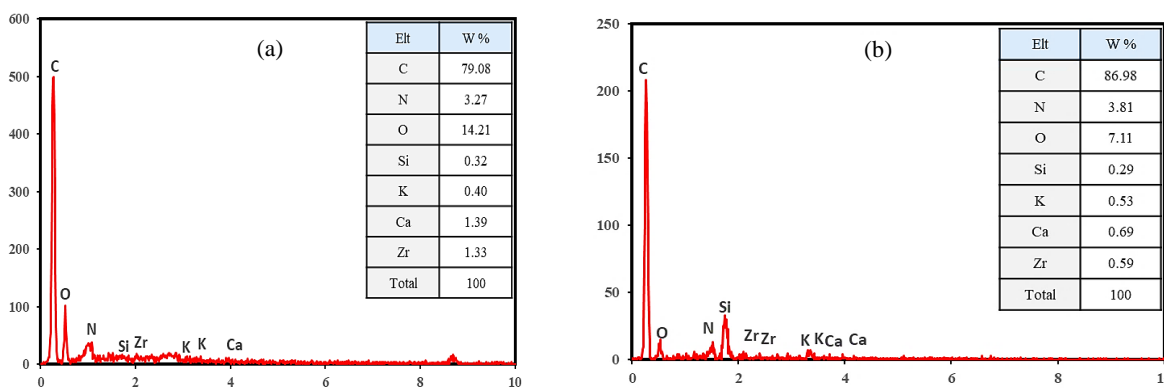
۱۰ و ۹۰ درصد (مخلوط شده با گاز نیتروژن) طی سه چرخه متوالی جذب و دفع مطالعه شد تا بهترین نسبت عامل فعال ساز برای سنتز کربن فعال و همچنین بهترین شرایط برای انجام آزمون‌های جذب تعیین شود. شکل (۴) نمودار میزان  $CO_2$  جذب شده با جاذب‌های مختلف را بر حسب زمان در دو دمای جذب ۲۵ و  $50^{\circ}C$  و دمای احیای  $120^{\circ}C$  و در غلظت‌های مختلف از گاز دی‌اکسید کربن نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مرحله اول با افزایش دما تا  $120^{\circ}C$ ، رطوبت و گازهای جذب شده به وسیله جاذب قبل از انجام آزمون‌های جذب، حذف شده و افت شدیدی در وزن نمونه‌ها رخ داده است. علاوه بر این، به وضوح مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت  $CO_2$  ورودی به سامانه، میزان جذب  $CO_2$  نیز به وسیله نمونه‌ها بیشتر می‌شود که علت این امر، افزایش تماس ذرات جاذب با گاز دی‌اکسید کربن در اثر افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تزریقی به سامانه است. همچنین، با توجه به پیش‌بینی‌های انجام گرفته با آنالیز SEM (شکل (۴))، ملاحظه می‌شود که میزان جذب  $CO_2$  با افزایش نسبت عامل فعال ساز KOH، کاهش یافته که علت این اتفاق مازاد بودن مقدار عامل فعال ساز است که قسمتی از حفره‌ها را اشغال کرده و پس از چندین بار شست‌وشو هنگام سنتز جاذب‌ها، به‌طور کامل از حفره‌ها تخلیه نشده است. نیز، ملاحظه می‌شود که در تمامی نمونه‌ها، افزایش دما منجر به کاهش میزان جذب شده که این پدیده حاکی از ماهیت گرم‌مازایی جذب فیزیکی دی‌اکسید کربن در جاذب‌های با سازوکار جذب سطحی است [۲۷، ۲۸].

نتایج حاصل از این آنالیز نشان داد که با انجام فرایند فعال‌سازی به وسیله عامل فعال ساز KOH، میزان کربن در نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌ی پیرولیز شده، افزایش پیدا می‌کند. همچنین، مشاهده شد که با انجام فرایند فعال‌سازی تغییرات محسوسی در میزان نیتروژن موجود در نمونه‌ها دیده نمی‌شود. درصد وزنی اکسیژن نیز پس از فرایند فعال‌سازی به میزان چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است، که این نشان می‌دهد که در طی فرایند فعال‌سازی، حرارت‌دهی باعث حذف ترکیبات فرار حاوی این عنصر شده است [۱۶].

#### ۴. بحث

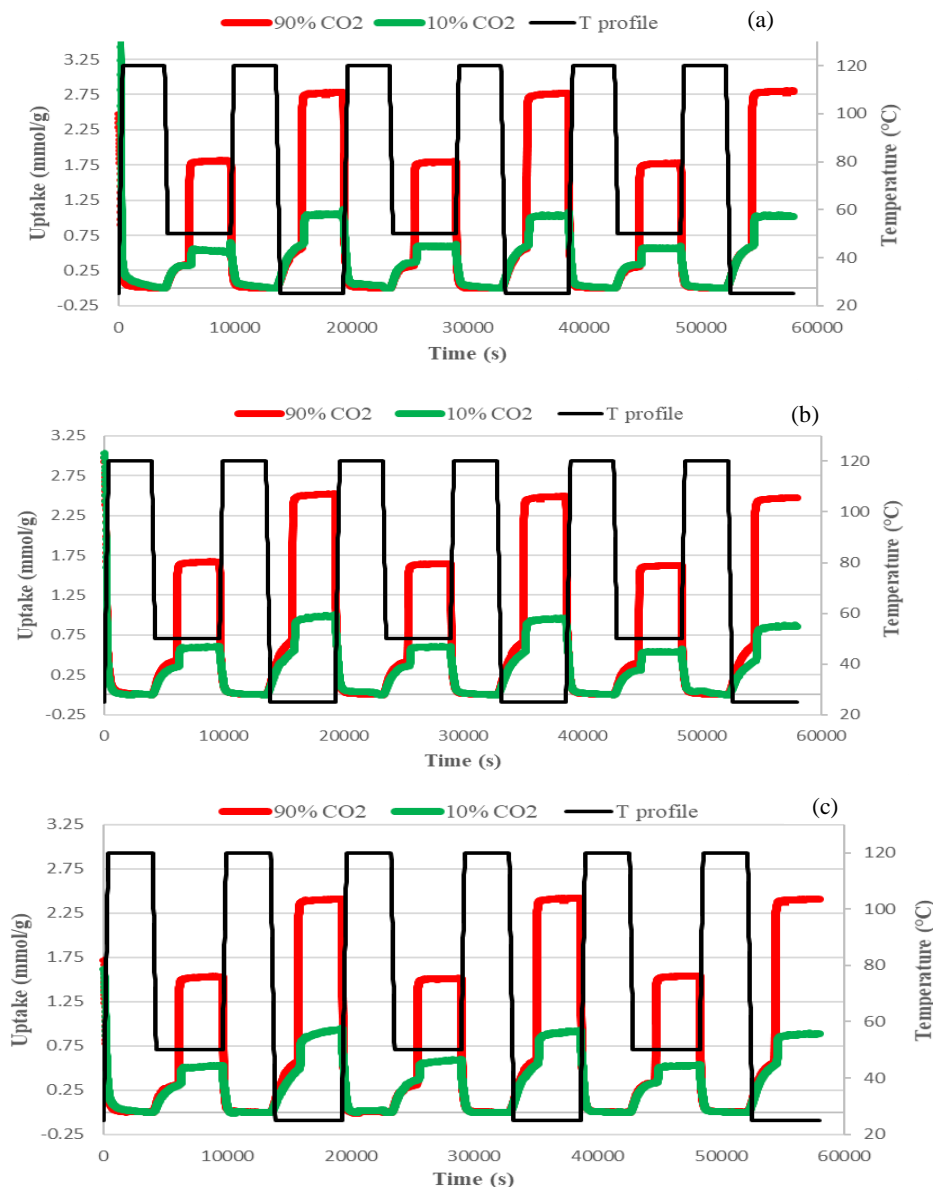
##### ۴-۱ بررسی ظرفیت جذب جاذب‌های سنتز شده

برای انجام آزمون‌های مربوط به جذب  $CO_2$ ، نمونه‌ها در مرحله اول در دمای  $120^{\circ}C$  با هدف حذف رطوبت اولیه و گازهای احتمالی جذب شده (به خصوص گاز دی‌اکسید کربن)، تحت جریان گاز نیتروژن قرار داده می‌شود. سپس دمای سامانه تا دمای مورد نظر برای فرایند جذب کم می‌شود و در لحظه رسیدن به دمای مورد نظر جذب، گاز ورودی به سامانه از حالت نیتروژن خالص به مخلوط گاز دی‌اکسید کربن و نیتروژن تغییر می‌کند و فرایند جذب بر روی جاذب، آغاز و منحنی میزان دی‌اکسید کربن جذب شده بر حسب زمان رسم می‌شود. عملکرد جذب نمونه‌های تهیه شده با نسبت جرمی KOH به زیست‌توده پیرولیز شده برابر با ۲ به ۱، ۳ به ۱ و ۴ به ۱ در دو دمای جذب ۲۵ و  $50^{\circ}C$  در دبی گاز ورودی  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$  و در درصدهای مختلف از دی‌اکسید کربن شامل



شکل ۳. نتایج حاصل از آزمون EDS بر روی نمونه‌های (a) P، (b)  $ACK_2P_1$ .

Figure 3. Results of EDS analysis on (a) P, (b)  $ACK_2P_1$ .

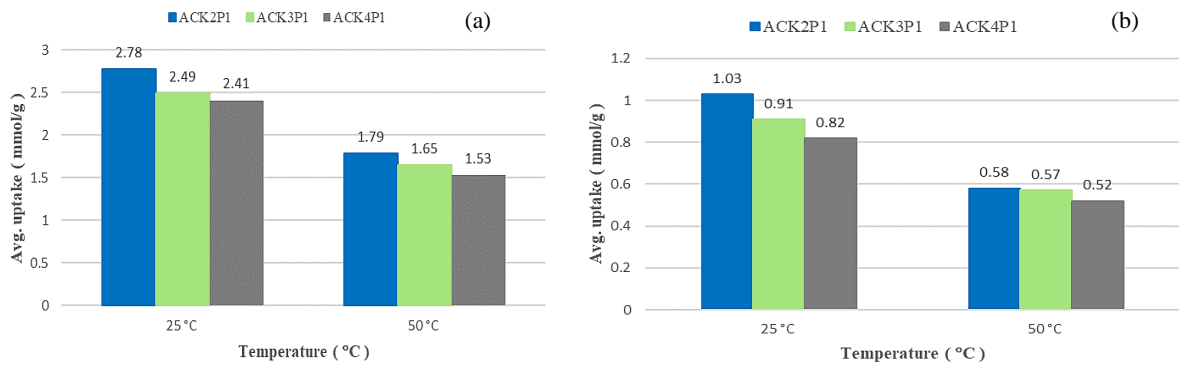


شکل ۴. نتایج TGA نمونه‌های (a)  $ACK_2P_1$ , (b)  $ACK_3P_1$ , (c)  $ACK_4P_1$  طی سه چرخه در دماهای جذب ۲۵ و ۵۰ °C و دمای احیای ۱۲۰ °C در غلظت‌های ۹۰ و ۱۰ درصد از گاز  $CO_2$ .

Figure 4. TGA results of (a)  $ACK_2P_1$ , (b)  $ACK_3P_1$ , (c)  $ACK_4P_1$  samples during three cycles at adsorption temperatures of 25 and 50 °C and regeneration temperature of 120 °C in  $CO_2$  gas concentrations of 90 and 10%.

کربن نمونه‌های  $ACK_2P_1$ ،  $ACK_3P_1$  و  $ACK_4P_1$  به ترتیب ۳۵/۶۱، ۳۳/۷۳ و ۳۶/۵۱ درصد در غلظت ورودی ۱۰ درصد به ترتیب ۴۳/۶۸، ۳۷/۳۶ و ۳۶/۵۸ درصد کم شده که علت این امر گرم‌سازی فرایند جذب دی‌اکسید کربن با جاذب کربن فعال است. هم‌چنین، ملاحظه می‌شود که در هر دو دمای جذب و در تمامی نسبت‌های عامل فعال‌ساز به زیست‌توده، میزان جذب  $CO_2$  انجام‌گرفته در غلظت دی‌اکسید کربن ورودی ۹۰ درصد، بیشتر از میزان جذب

شکل‌های (a,b-(۵)) متوسط ظرفیت جذب نمونه‌های  $ACK_2P_1$ ،  $ACK_3P_1$  و  $ACK_4P_1$  را طی سه چرخه در دماهای جذب ۲۵ و ۵۰ °C و دمای احیای ۱۲۰ °C در غلظت دی‌اکسید کربن ورودی به سامانه، به ترتیب برابر با ۹۰ و ۱۰ درصد نشان می‌دهد. در هر دو شکل کاهش میزان جذب دی‌اکسید کربن با اعمال افزایش دما از ۲۵ به ۵۰ °C، به‌وضوح دیده می‌شود، به‌طوری‌که با افزایش دما از ۲۵ به ۵۰ °C در غلظت ورودی ۹۰ درصد، میزان جذب دی‌اکسید



شکل ۵. ظرفیت جذب متوسط نمونه‌های ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub>، ACK<sub>3</sub>P<sub>1</sub> و ACK<sub>4</sub>P<sub>1</sub> طی سه چرخه در دماهای جذب ۲۵ و ۵۰°C و دمای احیای ۱۲۰°C در غلظت (a) ۹۰ درصد از گاز CO<sub>2</sub>، (b) ۱۰ درصد از گاز CO<sub>2</sub>.

Figure 5: The average adsorption capacity of (a) ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub>, (b) ACK<sub>3</sub>P<sub>1</sub>, (c) ACK<sub>4</sub>P<sub>1</sub> samples during three cycles at adsorption temperatures of 25 and 50 °C and regeneration temperature of 120 °C in CO<sub>2</sub> gas concentrations of a) 90% b) 10%.

تصاویر SEM نیز ملاحظه شده بود (شکل (۲))، نمونه P از سطحی صاف با تخلخل کم برخوردار است؛ لذا می‌توان استنباط کرد که قبل از انجام آزمون جذب در دمای مورد نظر، نمونه P به دلیل داشتن سطح صاف و ساختار نامنظم با میزان تخلخل کم، میزان گاز و رطوبت کمتری را جذب خود کرده و به همین علت، افت وزنی کمتری را در مقایسه با نمونه‌های ACK<sub>x</sub>P<sub>y</sub> در مرحله ابتدایی انجام آزمون‌های جذب داشته است.

مقایسه ظرفیت جذب نمونه‌های فعال شده به همراه نمونه پیرولیز شده طی سه چرخه جذب و دفع متوالی در جدول (۱) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نمونه فعال شده با KOH در نسبت ۲ به ۱، ظرفیت جذب بالاتری را در همه چرخه‌های جذب و دفع CO<sub>2</sub>، نسبت به سایر نمونه‌های فعال شده و زیست‌توده پیرولیز شده دارد و این امر به خوبی با نتایج به دست آمده از آنالیز SEM همخوانی دارد.

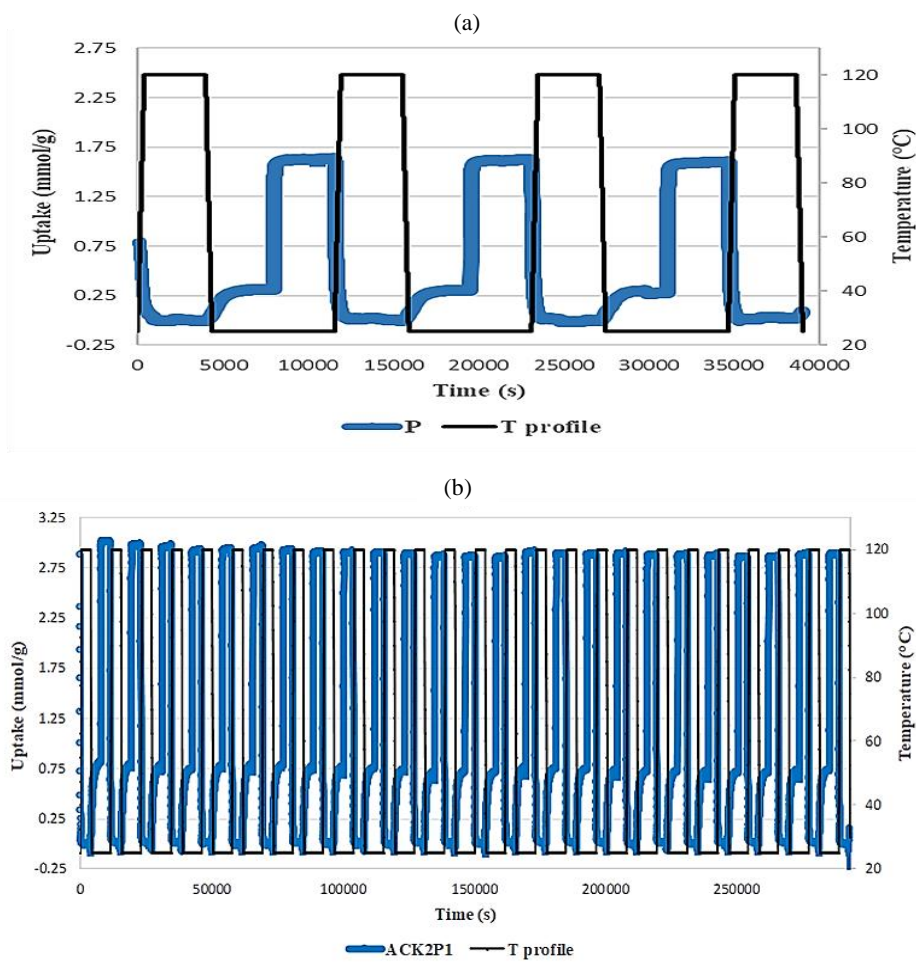
باتوجه به نتایج، جاذب ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub> انتخاب و در ادامه به بررسی پایداری این جاذب در طی ۲۵ چرخه متوالی جذب در دمای ۲۵°C و احیا در دمای ۱۲۰°C پرداخته شد. هم‌چنین، غلظت ورودی به سامانه جذب و احیا CO<sub>2</sub>، ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. شکل (۶-b) عملکرد جاذب ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub> را طی ۲۵ چرخه جذب و احیا CO<sub>2</sub> نشان می‌دهد. چنان‌که پیدا است با انجام ۲۵ چرخه جذب و احیا، میزان جذب CO<sub>2</sub> از ۳/۰۱۴ mmol/g به ۲/۸۸۴ mmol/g می‌رسد که این امر نشان می‌دهد که در طی ۲۵ چرخه، جاذب مورد نظر تنها ۴ درصد افت در میزان جذب دی‌اکسید کربن داشته که گویای این است که این جاذب از پایداری فوق‌العاده برای انجام چرخه‌های متعدد جذب CO<sub>2</sub> برخوردار است.

دی‌اکسید کربن در غلظت ورودی ۱۰ درصد است. مقایسه شکل‌های (۵-a,b) نشان می‌دهد که اختلاف میزان جذب جاذب‌های ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub>، ACK<sub>3</sub>P<sub>1</sub> و ACK<sub>4</sub>P<sub>1</sub> در غلظت دی‌اکسید کربن تزریقی ۹۰ درصد و ۱۰ درصد در دمای ثابت ۲۵°C، به ترتیب ۱/۷۵، ۱/۵۸ و ۱/۵۹ mmol/g است. این در حالی است که اختلاف میزان جذب جاذب‌ها در غلظت دی‌اکسید کربن تزریقی ۹۰ درصد و ۱۰ درصد در دمای ثابت ۵۰°C به ترتیب ۱/۲۹، ۱/۰۸ و ۱/۰۱ mmol/g است؛ لذا ملاحظه می‌شود که در همه نسبت‌های وزنی عامل فعال‌ساز به زیست‌توده پیرولیز شده، اختلاف میزان جذب جاذب‌ها در غلظت دی‌اکسید کربن تزریقی ۹۰ درصد و ۱۰ درصد در دمای ثابت ۲۵°C کمتر از میزان اختلاف در دمای ثابت ۵۰°C است که می‌توان نتیجه گرفت که میزان جذب CO<sub>2</sub> در غلظت ۹۰ درصدی از گاز تزریقی به سامانه، در هر شرایطی بیشتر از میزان جذب CO<sub>2</sub> در غلظت ۱۰ درصدی از گاز CO<sub>2</sub> تزریقی به سامانه است. لذا، باتوجه به نتایج، در انجام آزمون جذب سایر نمونه‌ها از دمای جذب ۲۵°C و غلظت دی‌اکسید کربن ۹۰ درصد به عنوان شرایط بهینه استفاده شد. برای مقایسه عملکرد کربن فعال‌های سنتز شده با عامل فعال‌ساز KOH نسبت به زیست‌توده پیرولیز شده، عملکرد زیست‌توده پیرولیز شده نیز طی سه چرخه جذب و دفع در شرایط بهینه بررسی شد. شکل (۶-a) عملکرد زیست‌توده پیرولیز شده را در غلظت دی‌اکسید کربن ورودی ۹۰ درصد و دمای جذب ۲۵°C نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، در مرحله اول با افزایش دما تا ۱۲۰°C، وزن نمونه کم شده ولی میزان کاهش وزن این نمونه در مقایسه با نمونه‌های فعال شده (شکل (۴)) کمتر است. چنان‌که از

جدول ۱. ظرفیت جذب نمونه‌های فعال شده به همراه نمونه پیرولیز شده طی سه چرخه در دمای جذب ۲۵°C و دمای احیای ۱۲۰°C در غلظت ۹۰ درصد از گاز CO<sub>2</sub>.

Table 1. Adsorption capacity of activated samples along with pyrolyzed sample during three cycles at adsorption temperatures of 25 °C and regeneration temperature of 120 °C in CO<sub>2</sub> gas concentrations of 90%.

Sample	Adsorption capacity unit	Adsorption rate			
		First cycle	Second cycle	Third cycle	Average
P	(mmol/g)	1.63	1.62	1.60	1.62
	(wt %)	7.18	7.14	7.06	7.13
ACK <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	(mmol/g)	2.78	2.77	2.80	2.78
	(wt %)	12.23	12.17	12.32	12.24
ACK <sub>3</sub> P <sub>1</sub>	(mmol/g)	2.52	2.49	2.47	2.49
	(wt %)	11.09	10.96	10.88	10.98
ACK <sub>4</sub> P <sub>1</sub>	(mmol/g)	2.41	2.42	2.41	2.41
	(wt %)	10.59	10.63	10.59	10.60



شکل ۶. نتایج TGA نمونه‌های (a) P طی سه چرخه، (b) ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub> در طی ۲۵ چرخه جذب در دمای ۲۵°C و احیا در دمای ۱۲۰°C و غلظت دی‌اکسید کربن ۹۰ درصد.

Figure 6. TGA results of (a) P during 3 cycles (b) ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub> during 25 cycles at adsorption temperatures of 25 °C and regeneration temperature of 120 °C in CO<sub>2</sub> gas concentrations of 10%.

#### ۴-۲ مقایسه نتایج با تحقیقات دیگر

ملاحظه می‌شود که ظرفیت جذب برخی از کربن فعال‌ها مانند کربن فعال تولیدشده از گیاه بامبو یا پوست میوه آرگان از ظرفیت جذب به‌دست‌آمده به‌وسیله جاذب منتخب در این تحقیق بیشتر است. اما باید این نکته را در نظر گرفت که دسترسی به زیست‌توده اولیه این جاذب‌ها در ایران مشکل است و بر همین اساس سنتز کربن فعال از این زیست‌توده‌ها هزینه زیادی می‌طلبد. علاوه‌بر این، مشاهده می‌شود که آزمون جذب کربن فعال سنتز شده با گیاه بامبو در دمای پایین‌تر نسبت به کربن فعال سنتز شده به کمک هسته سنج انجام شده است. بنابراین، باتوجه به این که با افزایش دما ظرفیت جذب CO<sub>2</sub> کاهش می‌یابد، میزان جذب بالای زخم داده با کربن فعال تهیه شده از گیاه بامبو درمقایسه با کربن فعال تهیه شده از هسته سنج پرواضح است. ازسوی دیگر، ازجمله اهداف مهم این تحقیق معرفی جاذبی ارزان‌قیمت با زیست‌توده اولیه در دسترس بود؛ لذا استفاده از زیست‌توده‌های گیاه بامبو یا پوست میوه آرگان برای سنتز کربن فعال، منطقی به نظر نمی‌رسد. بنابراین، باتوجه به نتایج، کربن فعال سنتز شده در این تحقیق درمقایسه با اکثر جاذب‌ها به‌عنوان جاذبی با ظرفیت جذب خوب و با هزینه تولید کمتر معرفی می‌شود.

میزان جذب جاذب منتخب ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub> در غلظت ورودی دی‌اکسید کربن ۹۰ درصد و دمای جذب ۲۵°C با میزان جذب کربن فعال‌های سنتز شده در مطالعات مشابه، مقایسه و نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. باتوجه به نتایج ملاحظه می‌شود که کربن فعال ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub> از عملکرد نسبی بهتری درمقایسه با اکثر جاذب‌های سنتز شده در مطالعات اخیر، برخوردار است. واضح است که میزان جذب برخی جاذب‌ها در شرایط غلظت ورودی دی‌اکسید کربن خالص، تقریباً با میزان جذب جاذب منتخب سنتز شده در این مطالعه برابری می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تزریقی به سامانه، میزان جذب CO<sub>2</sub> افزایش می‌یابد؛ لذا باتوجه به این که میزان جذب CO<sub>2</sub> کربن فعال‌های سنتز شده در مطالعات اخیر ارائه شده در جدول (۲)، در غلظت دی‌اکسید کربن ۱۰۰ درصدی گزارش شده و با در نظر گرفتن این که در مطالعه حاضر از غلظت ۹۰ درصدی دی‌اکسید کربن در گاز ورودی استفاده شده، می‌توان پیش‌بینی کرد که میزان جذب CO<sub>2</sub> کربن فعال سنتز شده در این مطالعه از میزان جذب برخی از جاذب‌های ذکر شده در جدول (۲) در شرایطی که غلظت دی‌اکسید کربن ورودی ۱۰۰ درصد باشد، بیشتر خواهد بود. علاوه‌بر این،

جدول ۲. مقایسه عملکرد جذب CO<sub>2</sub> جاذب منتخب ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub> سنتز شده در این مطالعه با کربن فعال‌های سنتز شده در تحقیقات مشابه.

Table 2. Comparison of the CO<sub>2</sub> adsorption performance of selected adsorbent ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub> synthesized in this study with activated carbons synthesized in similar researches.

Type of synthesized activated carbon	CO <sub>2</sub> Concentration	Adsorption temperature (°C)	CO <sub>2</sub> adsorption amount (mmol/g)	Reference
Activated carbon prepared from oleaster seed with Potassium hydroxide activator agent	90%	25	2.78	This study
Activated carbon synthesized from almond shell with O <sub>2</sub> activator agent	100%	25	2.11	[29]
Activated carbon synthesized from Cherry core with CO <sub>2</sub> activator agent	100%	25	2.60	[30]
Activated carbon synthesized from Cladophora with N <sub>2</sub> activator agent	100%	25	2.64	[31]
Activated carbon synthesized from Coffee grounds with CO <sub>2</sub> activator agent	100%	25	2.40	[32]
Activated carbon synthesized from rice husk with ZnCl <sub>2</sub> activator agent	100%	25	1.30	[33]
Activated carbon prepared from Argan fruit peel with Potassium hydroxide activator agent	100%	25	5.63	[12]
Activated carbon synthesized from Olive stone waste with CO <sub>2</sub> activator agent	100%	25	2.43	[34]
Activated carbon prepared from Bamboo with Potassium hydroxide activator agent	100%	0	7.00	[35]

## ۵. نتیجه‌گیری

جاذب‌های کربنی از جمله جاذب‌های امیدوارکننده است و انواع مختلف جاذب‌ها را شامل می‌شود که کربن فعال از مهم‌ترین آن‌ها است. کربن فعال ماده‌ای میکرومتخلخل با ویژگی‌های منحصربه‌فرد؛ مانند ظرفیت جذب بالا، هزینه کم تولید، قابلیت تغییر ویژگی‌های شیمیایی یا ساختاری و سطح ویژه بالا است که می‌تواند از ضایعات زیستی طی فرایندهای کربنیزاسیون و فعال‌سازی به‌دست آید. در همین راستا، در این تحقیق کربن فعال از زیست‌توده هسته سنجید، طی فرایند کربنیزاسیون و فعال‌سازی با عامل فعال‌ساز KOH سنتز شد و مشخصه‌های مختلف، نظیر نسبت عامل فعال‌ساز به زیست‌توده پیرولیز شده (۲ به ۱، ۳ به ۱ و ۴ به ۱)، دمای جذب و هم‌چنین درصد دی‌اکسید کربن تزریقی به سامانه در فرایند جذب بررسی شد و جاذب منتخب براساس مشخصه‌های تعیین‌شده، مشخص شد. نتایج گویای این بود که با افزایش دما از ۲۵ تا ۵۰°C، میزان جذب CO<sub>2</sub> به‌علت ماهیت گرم‌مازایی فرایند جذب بر روی جاذب کربن فعال، به‌میزان چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین، مشخص شد که با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تزریقی به سامانه از ۱۰ درصد تا ۹۰ درصد، میزان جذب CO<sub>2</sub> به‌علت افزایش تماس ذرات جاذب با گاز دی‌اکسید کربن، افزایش پیدا می‌کند. بر همین اساس، دمای ۲۵°C و غلظت دی‌اکسید کربن ۹۰ درصد به‌عنوان شرایط بهینه معرفی شد. هم‌چنین مشخص شد که در شرایط بهینه، جاذب سنتز شده با عامل فعال‌ساز KOH در نسبت وزنی عامل فعال‌ساز به زیست‌توده برابر با ۲ به ۱، بیشترین ظرفیت جذب برابر با ۲/۷۸ mmol/g را دارا است که درمقایسه با تحقیقات مشابه میزان قابل‌توجهی است. علاوه بر این‌ها، با بررسی پایداری نمونه منتخب (ACK<sub>2</sub>P<sub>1</sub>) مشخص شد که در طی ۲۵ چرخه، جاذب مورد نظر در دمای جذب ۲۵°C و دمای احیا ۱۲۰°C و غلظت ۹۰ درصدی CO<sub>2</sub> ورودی به سامانه، تنها ۴ درصد افت در میزان جذب CO<sub>2</sub> دارد که نشان داد جاذب مورد نظر علاوه بر جذب CO<sub>2</sub> بالا، از پایداری فوق‌العاده‌ای نیز برخوردار است.

## ۶. تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از دانشگاه تبریز به‌سبب حمایت‌های مالی، تقدیر و تشکر می‌کنند.

## ۷. ملاحظات اخلاقی

نویسندگان همه نکات اخلاقی را از جمله عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی در این مقاله رعایت کرده‌اند.

## مراجع

- [1] Zhang, Y., Chi, Y., Zhao, C., Liu, Y., Zhao, Y., Jiang, L., & Song, Y. (2018). CO<sub>2</sub> adsorption behavior of graphite oxide modified with tetraethylenepentamine. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 63(1), 202-207.
- [2] Sreńscek-Nazzal, J., & Kielbasa, K. (2019). Advances in modification of commercial activated carbon for enhancement of CO<sub>2</sub> capture. *Applied Surface Science*, 494, 137-151.
- [3] Nguyen, P., Carey, J. W., Viswanathan, H. S., & Porter, M. (2018). Effectiveness of supercritical- CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> huff-and-puff methods of enhanced oil recovery in shale fracture networks using microfluidic experiments. *Applied energy*, 230, 160-174.
- [4] Imani, M., Tahmasebpour, M., & Sánchez-Jiménez, P. E. (2023). Metal-based eggshell particles prepared via successive incipient wetness impregnation method as a promoted sorbent for CO<sub>2</sub> capturing in the calcium looping process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110584.
- [5] Bornas, M., & Esfandiari, N. (2022). Experimental Study Extraction Active Ingredients of Eryngium Billardieri Using Supercritical Carbon Dioxide. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(122), 52-62.
- [6] Kamarudin, K., Zaini, N., & Khairuddin, N. (2018). CO<sub>2</sub> removal using amine-functionalized kenaf in pressure swing adsorption system. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(1), 549-559.
- [7] Ogungbenro, A. E., Quang, D. V., Al-Ali, K. A., Vega, L. F., & Abu-Zahra, M. R. (2020). Synthesis and characterization of activated carbon from biomass date seeds for carbon dioxide adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104257.
- [8] Abd, A. A., Naji, S. Z., Hashim, A. S., & Othman, M. R. (2020). Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104142.
- [9] Borhan, A., Yusup, S., Lim, J. W., & Show, P. L. (2019). Characterization and modelling studies of activated carbon produced from rubber-seed shell using KOH for CO<sub>2</sub> adsorption. *Processes*, 7(11), 855.

- [10] Correia, L. B., Fiuza, R. A., de Andrade, R. C., & Andrade, H. M. (2018). CO<sub>2</sub> capture on activated carbons derived from mango fruit (*Mangifera indica* L.) seed shells: a TG study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131, 579-586.
- [11] Melouki, R., Ouadah, A., & Llewellyn, P. L. (2020). The CO<sub>2</sub> adsorption behavior study on activated carbon synthesized from olive waste. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 42, 101292.
- [12] Boujibar, O., Souikny, A., Ghamouss, F., Achak, O., Dahbi, M., & Chafik, T. (2018). CO<sub>2</sub> capture using N-containing nanoporous activated carbon obtained from argan fruit shells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1995-2002.
- [13] Athari, M. J., & Tahmasebpoor, M. (2023). Experimental study on the crystal violet dye removal from water using activated carbon prepared from oleaster seed and peel. *Journal of Color Science and Technology*, 16(4), 325-341.
- [14] Rattanaphan, S., Rungrotmongkol, T., & Kongsune, P. (2020). Biogas improving by adsorption of CO<sub>2</sub> on modified waste tea activated carbon. *Renewable Energy*, 145, 622-631.
- [15] Li, D., Ma, T., Zhang, R., Tian, Y., & Qiao, Y. (2015). Preparation of porous carbons with high low-pressure CO<sub>2</sub> uptake by KOH activation of rice husk char. *Fuel*, 139, 68-70.
- [16] Arami-Niya, A., Rufford, T. E., & Zhu, Z. (2016). Activated carbon monoliths with hierarchical pore structure from tar pitch and coal powder for the adsorption of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>. *Carbon*, 103, 115-124.
- [17] Chen, J., Yang, J., Hu, G., Hu, X., Li, Z., Shen, S., Radosz, M., & Fan, M. (2016). Enhanced CO<sub>2</sub> capture capacity of nitrogen-doped biomass-derived porous carbons. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(3), 1439-1445.
- [18] Li, K., Tian, S., Jiang, J., Wang, J., Chen, X., & Yan, F. (2016). Pine cone shell-based activated carbon used for CO<sub>2</sub> adsorption. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(14), 5223-5234.
- [19] Ogungbenro, A. E., Quang, D. V., Al-Ali, K., & Abu-Zahra, M. R. (2017). Activated carbon from date seeds for CO<sub>2</sub> capture applications. *Energy Procedia*, 114, 2313-2321.
- [20] Maleki Kakelar, M., Hosseini, S., & Mohammadi, A. (2023). Feasibility of Using Carbonic Anhydrase in Bio Sequestration of Carbon Dioxide: Challenges and Opportunities. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(125), 7-21.
- [21] Athari, M.-J., Tahmasebpoor, M., Azimi, B., Heidari, M., & Pevida, C. (2023). Waste oleaster seed-derived activated carbon mixed with coarse particles of fluid catalytic cracking as a highly-efficient CO<sub>2</sub> adsorbent at low temperatures. *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 580-594.
- [22] Iranvandi, M., Tahmasebpoor, M., Azimi, B., Heidari, M., & Pevida, C. (2023). The novel SiO<sub>2</sub>-decorated highly robust waste-derived activated carbon with homogeneous fluidity for the CO<sub>2</sub> capture process. *Separation and Purification Technology*, 306, 122625.
- [23] Aimikhe, V. J., Anyebe, M. S., & Ibezim-Ezeani, M. (2022). Development of composite activated carbon from mango and almond seed shells for CO<sub>2</sub> capture. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
- [24] Şahin, Ö., Saka, C., Ceyhan, A. A., & Baytar, O. (2015). Preparation of high surface area activated carbon from *Elaeagnus angustifolia* seeds by chemical activation with ZnCl<sub>2</sub> in one-step treatment and its iodine adsorption. *Separation Science and Technology*, 50(6), 886-891.
- [25] Saha, A., Basak, B. B., & Ponnuchamy, M. (2020). Performance of activated carbon derived from *Cymbopogon winterianus* distillation waste for scavenging of aqueous toxic anionic dye Congo red: Comparison with commercial activated carbon. *Separation Science and Technology*, 55(11), 1970-1983.
- [26] Noormohammadi, M., Faghihi, M., & Zabihi, M. (2022). Design and Synthesis of Ceramic Nanocomposites on Modified Gamma Alumina Substrate to Remove Organic Contaminants from Wastewater. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(121), 85-100.
- [27] Gomez-Delgado, E., Nunell, G. V., Cukierman, A. L., & Bonelli, P. R. (2020). Development of microporous-activated carbons derived from two renewable precursors for CO<sub>2</sub> capture. *Carbon Letters*, 30, 155-164.
- [28] Jang, E., Choi, S. W., Hong, S.-M., Shin, S., & Lee, K. B. (2018). Development of a cost-effective CO<sub>2</sub> adsorbent from petroleum coke via KOH activation. *Applied Surface Science*, 429, 62-71.
- [29] Plaza, M., González, A., Pis, J., Rubiera, F., & Pevida, C. (2014). Production of microporous biochars by single-step oxidation: Effect of activation conditions on CO<sub>2</sub> capture. *Applied energy*, 114, 551-562.
- [30] Álvarez-Gutiérrez, N., Victoria Gil, M., Rubiera, F., & Pevida, C. (2015). Cherry-stones-based activated carbons as potential adsorbents for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation: effect of the activation parameters. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 5(6), 812-825.
- [31] Xu, C., Ruan, C. Q., Li, Y., Lindh, J., & Strømme, M. (2018). High-performance activated carbons synthesized from nanocellulose for CO<sub>2</sub> capture and

- extremely selective removal of volatile organic compounds. *Advanced Sustainable Systems*, 2(2), 1700147.
- [32] Plaza, M., González, A., Pevida, C., Pis, J., & Rubiera, F. (2012). Valorisation of spent coffee grounds as CO<sub>2</sub> adsorbents for postcombustion capture applications. *Applied Energy*, 99, 272-279.
- [33] Boonpoke, A., Chiarakorn, S., Laosiripojana, N., Towprayoon, S., & Chidthaisong, A. (2011). Synthesis of activated carbon and MCM-41 from bagasse and rice husk and their carbon dioxide adsorption capacity. *J. Sustain. Energy Environ*, 2(2), 77-81.
- [34] Plaza, M., Pevida, C., Arias, B., Feroso, J., Casal, M., Martín, C., Rubiera, F., & Pis, J. (2009). Development of low-cost biomass-based adsorbents for postcombustion CO<sub>2</sub> capture. *Fuel*, 88(12), 2442-2447.
- [35] Wei, H., Deng, S., Hu, B., Chen, Z., Wang, B., Huang, J., & Yu, G. . (2012). Granular bamboo-derived activated carbon for high CO<sub>2</sub> adsorption: the dominant role of narrow micropores. *ChemSusChem*, 5(12), 2354-2360.