

نانوکامپوزیت‌های پلیمری پیشرفته برای جذب انتخابی CO₂: از طراحی تا کاربرد در کاهش گازهای گلخانه‌ای

محمد خلیلی ماهانی*

کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی شیمی

چکیده ...

افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در اتمسفر به‌عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای، نیاز به فناوری‌های کارآمد و جدید جذب را ضروری ساخته است. روش‌های سنتی مانند جذب با آمین‌های مایع دارای معایبی مانند مصرف انرژی بالا، خوردگی تجهیزات و تخریب حلال هستند. در این میان، جاذب‌های جامد به‌ویژه نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌دلیل سطح ویژه بالا، قابلیت عاملیت‌دهی و سهولت بازیافت اهمیت گسترده‌ای یافته‌اند. در این مقاله مروری، اصول طراحی، سازوکارهای جذب (فیزیکی، شیمیایی و ترکیبی)، انواع ماتریس‌های پلیمری (پلی‌ایمید، پلی‌سولفون، پلی‌اتیلن‌ایمین) و نانوپرکننده‌های مؤثر (چارچوب‌های آلی فلزی، اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی، نانوسیلیکای متخلخل) بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با عاملیت‌دهی آمینی، انتخاب بهینه نانوپرکننده و همچنین، ترکیب هم‌زمان جذب فیزیکی و شیمیایی، می‌توان بهبود قابل‌توجهی در عملکرد مشاهده کرد. روش‌های ساخت شامل اختلاط محلولی، قالب‌گیری مذاب و پلیمری‌شدن درجا هستند. چالش‌های اصلی شامل پایداری در برابر رطوبت، هزینه بالای نانوپرکننده‌ها و مقیاس‌پذیری فرایند است. کاربردهای مهم این فناوری عبارتند از جداسازی دی‌اکسید کربن از دودکش نیروگاه‌ها، شیرین‌سازی گاز طبیعی و جذب مستقیم از هوا. با پیشرفت سنتز سبز و توسعه غشاهای ماتریس ترکیبی، نانوکامپوزیت‌های پلیمری چشم‌اندازی امیدبخش برای داشتن آینده‌ای کم‌کربن ارائه می‌دهند. بهینه‌سازی هم‌زمان اجزا و شرایط عملیاتی، کلید دستیابی به عملکرد صنعتی مطلوب خواهد بود.

واژه‌های کلیدی:

نانوکامپوزیت پلیمری،
جذب انتخابی،
دی‌اکسید کربن،
گازهای گلخانه‌ای،
عاملیت آمینی.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

khalilimahani80@gmail.com

۱ مقدمه

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، مهم‌ترین عامل گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر شناخته می‌شود. بر اساس گزارش‌های گوناگون، غلظت CO_2 اتمسفری به بیش از ۴۱۹ ppm رسیده است و میانگین دمای جهانی نسبت به دوران پیشاصنعتی حدود ۱/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این افزایش عمدتاً ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها، صنایع سیمان، پتروشیمی و حمل و نقل است. پیامدهای این پدیده شامل بالا آمدن سطح آب دریاها، افزایش رخدادهای اقلیمی شدید (سیل، خشکسالی، توفان) و کاهش تنوع زیستی است. در شکل ۱ تعدادی از معایب آلودگی هوا ناشی از وجود کربن دی‌اکسید در هوا برای بدن آورده شده است. نرخ انتشار سالانه CO_2 همچنان روند صعودی دارد و رسیدن به اهداف توافق پاریس را با چالش مواجه ساخته است. در این شرایط، توسعه فناوری‌های کارآمد برای کاهش انتشار CO_2 به یکی از اولویت‌های تحقیقاتی جهانی تبدیل شده است [۱ و ۲].

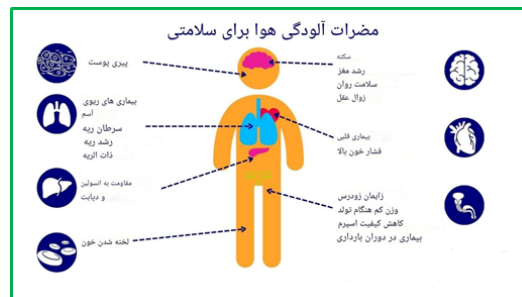
روش‌های سنتی جذب CO_2 به دو دسته کلی جذب با حلال‌های مایع (مانند آمین‌ها) و جذب با جاذب‌های جامد تقسیم می‌شوند. فرایند جذب با آمین‌های مایع (به‌ویژه مونواتانول آمین) اگرچه در مقیاس صنعتی متداول است، اما معایب قابل توجهی از جمله مصرف انرژی بالا برای بازتولید حلال، خوردگی تجهیزات، اکسایش و تخریب آمین و ایجاد پسماند مایع سمی دارد. از طرفی، جذب سطحی با جاذب‌های جامد متخلخل مانند زئولیت‌ها، کربن فعال و سیلیکاژل به دلیل مصرف انرژی کمتر و عدم تولید پسماند مایع مزیت دارد، اما این مواد اغلب ظرفیت جذب محدود (معمولاً کمتر از ۲ میلی‌مول بر گرم)، گزینش‌پذیری پایین نسبت به دی‌اکسیدکربن در حضور سایر گازها (مانند نیتروژن، اکسیژن و متان) و حساسیت به رطوبت از خود نشان می‌دهند [۳-۵].

در سال‌های اخیر، پلیمرها به دلیل وزن کم، سهولت فرآوری،

تنوع ساختاری و هزینه نسبتاً پایین به‌عنوان گزینه‌های جذاب برای ساخت جاذب‌های CO_2 مطرح شده‌اند. پلیمرهایی مانند پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) و پلی‌آمیدها قابلیت عاملیت‌دهی با گروه‌های آمینی را دارند که از طریق واکنش شیمیایی با دی‌اکسیدکربن می‌توانند جذب بالایی ایجاد کنند. با این حال، پلیمرهای خالص معمولاً سطح ویژه بسیار پایینی دارند (کمتر از ۱۰ مترمربع بر گرم) که دسترسی گروه‌های عاملی به مولکول‌های گاز را محدود می‌کند. همچنین، بسیاری از پلیمرهای آمینی در دماهای بالا دچار نشت آمین و افت ظرفیت می‌شوند. به عبارت دیگر، پلیمرها به‌تنهایی نمی‌توانند هم‌زمان الزامات سطح بالا، پایداری حرارتی و گزینش‌پذیری را برآورده سازند [۶-۸].

راهبرد مؤثر برای رفع محدودیت‌های فوق، ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. در این مواد، مقادیر اندکی از نانوپرکننده‌های معدنی یا آلی-فلزی با سطح ویژه بسیار بالا (چندصد تا چند هزار مترمربع بر گرم) درون ماتریس پلیمری پخش می‌شوند [۹]. نانوپرکننده‌هایی مانند چارچوب‌های آلی-فلزی (MOFها)، اکسیدگرافن (GO)، نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانوسیلیکای مزو متخلخل می‌توانند به‌طور چشمگیری سطح تماس و تعداد جایگاه‌های فعال را افزایش دهند. افزون بر این، خود نانوپرکننده‌ها را می‌توان با آمین‌های پلیمری عاملیت‌دهی کرد تا هم جذب شیمیایی و هم جذب فیزیکی را به‌طور هم‌زمان به کار گیرند. نتیجه این هم‌افزایی، دستیابی به ظرفیت جذب بالا، گزینش‌پذیری عالی و پایداری مناسب در چرخه‌های متعدد جذب و واجذب است [۱۰ و ۱۱]. از همه مهم‌تر، نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان به شکل غشاهای ماتریس ترکیبی درآورد که برای جداسازی پیوسته گازها در فرایندهای صنعتی بسیار کاربردی هستند [۱۲].

هدف از نگارش این مقاله مروری، ارائه نمای جامع و به‌روز از طراحی، سنتز، خواص و کاربردهای نانوکامپوزیت‌های پلیمری در جذب انتخابی CO_2 است. ابتدا سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی جذب تشریح می‌شوند و سپس انواع ماتریس‌های پلیمری و نانوپرکننده‌های مؤثر به همراه نقش هر یک در افزایش گزینش‌پذیری و ظرفیت جذب معرفی می‌شوند. در ادامه، روش‌های ساخت و عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد (درصد نانوپرکننده، دما، فشار، رطوبت) بررسی می‌شوند. همچنین چالش‌های پیش رو مانند پایداری طولانی‌مدت، هزینه و مقیاس‌پذیری مورد بحث قرار گرفته و در پایان، چشم‌انداز کاربردهای صنعتی به‌ویژه در جداسازی از دودکش نیروگاه‌ها، شیرین‌سازی گاز طبیعی و جذب مستقیم از هوا ارائه می‌شود. سازوکارهای جذب انتخابی CO_2 در نانوکامپوزیت‌های پلیمری



شکل ۱ معایب آلودگی هوا برای بدن.

جدول ۱ مقایسه سازوکار فیزیکی و شیمیایی.

ویژگی	جذب فیزیکی	جذب شیمیایی
گرمای جذب	۲۰-۴۰	۶۰-۱۰۰
گزینش پذیری	متوسط	بسیار بالا
انرژی بازتولید	کم	متوسط تا زیاد
تأثیر رطوبت	معمولاً کاهش	می‌تواند افزایش یا کاهش
نمونه مواد	کربن فعال، زئولیت و MOFها	نانوسیلیکا آمین‌دار شده

نظر اکسایش-کاهش (مانند $(\text{Cu}_3(\text{HHTP})_2)$)، فرایند جذب و دفع CO_2 بدون نیاز به گرمایش مستقیم صورت می‌گیرد که مصرف انرژی را به شدت کاهش می‌دهد [۱۷].

مواد تشکیل دهنده نانوکامپوزیت‌های پلیمری جاذب CO_2

نانوکامپوزیت پلیمری معمولاً از سه جزء تشکیل می‌شود: ماتریس پلیمری، نانوپرکننده و عاملیت‌دهنده سطحی (در صورت نیاز).

الف) ماتریس‌های پلیمری

انتخاب پلیمر مناسب باید بر اساس پایداری حرارتی، نفوذپذیری گازی، قابلیت فرآوری و هزینه باشد. پلیمرهای پرکاربرد عبارتند از: پلی‌ایمید، پلی‌سولفون، پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI)، سلولز استات و پلی‌استرهای آروماتیک [۱۸].

پلیمرهای دارای ریزحفره ذاتی (Polymers of Intrinsic Microporosity - PIMs)

پلیمرهای با ریزحفره ذاتی (PIMs) نسل جدیدی از پلیمرها هستند که ساختار سفت و پیچ‌خورده آن‌ها به دلیل عدم توانایی در بسته‌بندی محکم زنجیره‌ها، حفراتی در ابعاد نانومتر ایجاد می‌کنند. این پلیمرها سطح ویژه بسیار بالا (تا ۱۰۰۰ مترمربع بر گرم) و نفوذپذیری فوق‌العاده‌ای از خود نشان می‌دهند. PIM-1 به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین عضو این خانواده، توجه گسترده‌ای پیدا کرده است. در سال ۲۰۲۵، نشان داده شده است که تقویت پلاسما با هلیوم روی غشاهای PIM-1 می‌تواند گزینش‌پذیری CO_2/CH_4 را تا ۱/۶۵ برابر افزایش دهد در حالی که نفوذپذیری بالای ۴۰۰۰ Barrer حفظ می‌شود [۱۹]. همچنین نسخه آمین‌دار شده (PIM-1(-) آمین) گزینش‌پذیری CO_2 را در شرایط

جذب CO_2 توسط نانوکامپوزیت‌های پلیمری عمدتاً از دو مسیر فیزیکی و شیمیایی صورت می‌گیرد:

الف) جذب فیزیکی

در این سازوکار، مولکول‌های CO_2 به واسطه نیروهای واندروالسی و برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ بر روی سطوح حفرات ریز (کمتر از ۲ نانومتر) و مزو (۲-۵۰ نانومتر) جذب می‌شوند. این نوع جذب برگشت‌پذیر بوده و با کاهش فشار یا افزایش دما به راحتی واجذب صورت می‌گیرد. نانوپرکننده‌هایی با سطح بالا و ساختار متخلخل مانند MOFها و زئولیت‌ها عمدتاً از این مسیر عمل می‌کنند. هرچند گزینش‌پذیری جذب فیزیکی نسبی است، اما ترکیب اندازه حفره مناسب می‌تواند به گزینش‌پذیری کمک کند [۱۳].

ب) جذب شیمیایی

این سازوکار مبتنی بر تشکیل پیوند کووالانسی یا یونی بین مولکول CO_2 و گروه‌های عاملی بازی (عمدتاً آمین‌های اولیه و ثانویه) بر روی سطح جاذب است. این واکنش منجر به تشکیل کربامات می‌شود. جذب شیمیایی دارای گرمای جذب بالاتر (۶۰-۱۰۰ کیلوژول بر مول) و گزینش‌پذیری بسیار بالایی نسبت به CO_2 در حضور سایر گازها مانند نیتروژن، اکسیژن و متان است. با این حال، بازتولید جاذب به انرژی حرارتی بیشتری نیاز دارد. در نانوکامپوزیت‌ها، نانوپرکننده‌ها یا خود پلیمر میزبان با گروه‌های آمین (مانند پلی‌اتیلن‌ایمین و تتراتیلن‌پنتاآمین) عاملیت‌دهی می‌شوند [۱۵ و ۱۴].

جدول ۱ ویژگی‌های دو سازوکار فیزیکی و شیمیایی را مقایسه می‌کند.

ج) سازوکارهای ترکیبی

در بسیاری از نانوکامپوزیت‌های پیشرفته، ترکیبی از جذب فیزیکی و شیمیایی رخ می‌دهد. برای مثال، MOFهایی با حفره‌های منظم پس از عاملیت‌دهی با آمین، ابتدا CO_2 را به‌صورت فیزیکی درون حفرات جذب کرده و سپس واکنش شیمیایی با گروه‌های آمین انجام می‌شود. این هم‌افزایی منجر به افزایش ظرفیت و سرعت جذب می‌شود [۱۶].

د) جذب الکتروشیمیایی

در سال‌های اخیر، سازوکار نوینی تحت عنوان جذب الکتروشیمیایی معرفی شده است. در این روش، با اعمال جریان الکتریکی به جاذب‌هایی مانند چارچوب‌های آلی-فلزی فعال از

می دهد، بلکه امکان تبدیل الکتروشیمیایی مستقیم آن به محصولات بارزش مانند کربنات های حلقوی را نیز فراهم می کند.

• پلیمرهای آلی متخلخل (POPs) و پلیمرهای فوق هسته ای (HCPS): پلیمرهای آلی متخلخل به عنوان دسته جدیدی از مواد جاذب با سطح ویژه بالا، تخلخل قابل تنظیم، پایداری شیمیایی عالی و قابلیت عاملیت دهی آسان، توجه گسترده ای پیدا کرده اند. در میان زیرمجموعه های مختلف، پلیمرهای فوق هسته ای به دلیل هزینه تولید پایین و روش های سنتز ساده، قابلیت بالایی برای کاربردهای صنعتی دارند. در مطالعه پیشگامانه در سال ۲۰۲۵، سه نوع پلیمر آلی متخلخل مزدوج با نام های C-POP1 تا C-POP3 با سطح ویژه تا ۵۶۰ مترمربع بر گرم و جذب CO_2 حدود ۸۳ میلی گرم بر گرم در دمای ۲۷۳ کلوین گزارش شده است [۲۴]. HCPها به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی بالاتر نسبت به MOFها (به ویژه در برابر رطوبت) گزینه های مناسبی برای کاربردهای صنعتی در مقیاس بزرگ هستند.

• نانومواد دوبعدی (2DNMs) در غشاهای ماتریس ترکیبی: نانومواد دوبعدی مانند MXene و $g-C_3N_4$ به دلیل ضخامت اتمی، فاصله لایه ای قابل تنظیم و سطح ویژه بالا، انقلابی در طراحی غشاهای ماتریس ترکیبی ایجاد کرده اند. در سال ۲۰۲۵، نشان داده شده است که با لایه گذاری یونی، فاصله لایه های $g-C_3N_4$ از ۰/۳۳ نانومتر به ۰/۷۲ نانومتر افزایش می یابد و گزینش پذیری CO_2/CH_4 تا ۳۰۰ درصد بهبود می یابد. همچنین غشاهای MXene با پیوند کووالانسی پلی اتیلن گلیکول، نمره ترکیبی ۴/۲ برابر غشاهای سنتی دارند و پس از ۱۰۰۰ ساعت آزمایش، افت عملکرد کمتر از ۵ درصد است [۲۵].

روش های ساخت نانوکامپوزیت های پلیمری

برای دستیابی به پراکندگی همگن نانوذرات در ماتریس پلیمری و جلوگیری از کلوخه شدن، روش های مختلفی به کار می رود:

الف) اختلاط محلولی

نانوذرات در حلال مناسب (مانند DMF, THF، یا آب) پخش شده و سپس پلیمر حل می شود. پس از هم زدن و اعمال فراصوت، حلال تبخیر می شود. این روش ساده و مناسب مقیاس آزمایشگاهی است. همگن بودن نهایی به عواملی مانند زمان هم زدن، قدرت فراصوت و سازگاری سطحی بستگی دارد [۲۶].

ب) قالب گیری مذاب

مناسب برای پلیمرهای گرمانرم (مانند PE، PS، PP) نانوذرات

مخلوط گازی به طور قابل توجهی افزایش می دهد. کاربردهای نوین PIMها شامل تثبیت آنزیم کربنیک انیدراز برای دستگاه های اکسیژن رسانی غشای خارج بدنی (ECMO) نیز می شود. در نانوکامپوزیت ها، معمولاً پلیمر خواص مکانیکی و یکپارچگی ساختاری را تأمین می کند در حالی که نانوپرکننده نقش اصلی را در جذب ایفا می کند [۱۸].

ب) نانو پرکننده ها

• چارچوب های آلی-فلزی (MOF): MOF ها بلورهای متخلخلی هستند که از یون های فلزی و لیگاندهای آلی ساخته شده اند. سطح ویژه آن ها به ۷۰۰۰ مترمربع بر گرم نیز می رسد. MOFهای معروف مانند MIL-101، ZIF-8، HKUST-1 و iO-66 با جذب فیزیکی بالایی دارند. با عاملیت دهی آمینی (NH_2 -MIL-101) ظرفیت جذب تا ۴/۵ میلی مول بر گرم در فشار ۱ بار افزایش می یابد [۲۰]. چالش اصلی پایداری رطوبتی MOFهاست که با استفاده از پلیمرهای آب گریز در کامپوزیت تا حدودی حل می شود. پژوهش های بسیار جدید در سال ۲۰۲۵ نشان داده اند که با وارد کردن اسیدهای آمینه دوکاره به درون حفرات MOF، ظرفیت جذب به بیش از ۶ میلی مول بر گرم در فشار محیط می رسد. همچنین MOFهای مغناطیسی با ساختار هسته-پوسته (مانند $Fe_3O_4@MOF$) قابلیت بازیافت آسان با میدان مغناطیسی را فراهم کرده اند [۲۱].

• گرافن و اکسیدگرافن (GO): GO دارای صفحات دوبعدی با گروه های عاملی اکسیژن دار (کربوکسیل، هیدروکسیل، اپوکسی) است که به راحتی با آمین ها واکنش می دهد. نانوکامپوزیت های PEI/GO ظرفیت جذب تا ۲/۳ میلی مول بر گرم و گزینش پذیری CO_2/N_2 حدود ۷۰ گزارش شده است [۲۲]. گرافن احیاء شده (rGO) به دلیل رسانایی بالا برای ساخت حسگرهای CO_2 نیز استفاده می شود. جدیدترین پیشرفت در این زمینه، استفاده از آئروژل های rGO-PEI برای جذب مستقیم از هوا (DAC) با قابلیت بازتولید نوری (photo-swing) است. با تابش نور، CO_2 جذب شده آزاد می شود و نیاز به انرژی حرارتی حذف می شود.

• نانولوله های کربنی (CNT): CNTها دارای سطح ویژه بالا (۵۰۰-۲۰۰ مترمربع بر گرم) و استحکام مکانیکی فوق العاده هستند. با اکسایش اسیدی و سپس عاملیت دهی با PEI، جاذب هایی با ظرفیت جذب حدود ۲/۵ میلی مول بر گرم (در دمای ۲۵ درجه) و گزینش پذیری بسیار خوب حاصل می شود [۲۳]. قیمت بالای CNT خالص محدودیت اصلی است. راهبرد نوین دیگر، پوشش دهی نانولوله های کربنی با پلیمرهای یونی (نظیر پلی یونیک مایع) است که نه تنها جذب CO_2 را افزایش

دوکاره با استفاده از الکتروریسی دوطرفه است. در این روش، دو محلول پلیمری مجزا به‌طور هم‌زمان الکتروریسی می‌شوند تا الیافی با دو نیمه مجزا و عملکردهای مستقل تولید شود. در سال ۲۰۲۵، محققان نانوالیافی متشکل از پلی‌اتیلن‌اکسید (PEO) اصلاح‌شده با PEI برای جذب CO_2 در یک نیمه و حاوی نانوذرات مس (CuNP) برای کاتالیز CO_2 در نیمه دیگر ساخته‌اند. این نانوالیاف با استفاده از آب به‌عنوان حلال سبز تولید شده‌اند و گروه‌های امین، CO_2 را جذب کرده و سپس توسط نانوذرات مس در دمای پایین ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و با هیدروژن‌دارشدن، مستقیماً به متانول تبدیل می‌کنند [۳۱]. این نوآوری گامی مهم به سمت سامانه‌های یکپارچه «جذب و تبدیل» است.

ز) غشاهای نازک نانوکامپوزیت (TFN) و غشاهای بسیار نازک نانوکامپوزیت (NFN) مبتنی بر MOF
در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در طراحی غشاهای TFN و NFN حاصل شده است. چالش اصلی در این غشاهای تمایل MOFها به تجمع و ایجاد حفرات غیرانتخابی در فصل مشترک است. راهکارهای نوین شامل مهندسی سطح نانوذرات MOF، مهندسی نقص در ساختار MOF، بی‌شکل‌سازی (amor-phization) و تشکیل کامپوزیت با پلیمرها است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که MOFهای آمورف (بی‌شکل) به دلیل انعطاف‌پذیری ساختاری، پراکندگی یکنواخت‌تری دارند و گزینش‌پذیری CO_2/N_2 را تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهند [۱۸].

عوامل موثر بر عملکرد جذب انتخابی CO_2

عملکرد نانوکامپوزیت بستگی به چندین عامل دارد که در ادامه بررسی می‌شوند:

الف) درصد وزنی نانوپرکننده

به‌طور معمول با افزایش درصد نانوذرات، ظرفیت جذب ابتدا افزایش و سپس به دلیل کلوخه‌شدن و کاهش سطح فعال، کاهش می‌یابد. محدوده بهینه معمولاً ۱۰-۳۰ درصد است. در مورد PEI متصل به GO، غلظت ۲۰ درصد PEI بالاترین کارایی را نشان داده است [۲۲].

ب) دما و فشار

جذب فیزیکی با کاهش دما افزایش می‌یابد (فرایند گرماده)، در حالی که جذب شیمیایی در دماهای متوسط (۶۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد) به دلیل افزایش نفوذ مولکول‌ها به حفرات، بهینه

با پلیمر مذاب در داخل اکسترودر مخلوط می‌شوند. این روش بدون استفاده از حلال است، اما دماهای بالا ممکن است به آمین‌های عاملیت‌دهنده آسیب بزند. بنابراین بیشتر برای نانوپرکننده‌های غیرعاملی استفاده می‌شود [۲۷].

ج) پلیمری شدن درجا

در این روش، مونومر به همراه نانوذرات و آغازگر پلیمری می‌شود. این راهکار امکان کنترل بهتر بر روی مورفولوژی و اتصال شیمیایی بین نانوذره و پلیمر را فراهم می‌کند. برای مثال، پلی‌آمیدها یا پلی‌ایمیدها را می‌توان در حضور نانوسیلیکا سنتز کرد [۲۸].

د) تشکیل غشاهای ماتریس ترکیبی

در کاربردهای جداسازی گازی، نانوکامپوزیت به شکل غشای نازک (ضخامت ۲۰-۱۰۰ میکرومتر) تهیه می‌شود. روش ریخته‌گری محلول روی زیرلایه متخلخل رایج است. غشاهای ماتریس ترکیبی متشکل از MOF یا نانوسیلیکا درون پلی‌ایمید، عملکرد جداسازی CO_2 از CH_4 و N_2 را به شدت بهبود بخشیده‌اند [۱۲].

ه) الکتروریسی (Electrospinning)

الکتروریسی به‌عنوان روشی نوین و قدرتمند برای تولید نانوالیاف با نسبت سطح به حجم بسیار بالا، تخلخل زیاد و قابلیت عاملیت‌دهی آسان، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای پیدا کرده است. در این روش، با اعمال ولتاژ بالا به محلول پلیمری حاوی نانوپرکننده، الیافی با قطر ۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر تولید می‌شود که ساختاری سه‌بعدی و متخلخل ایجاد می‌کنند. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵، محققان غشاهای نانوکامپوزیتی پلی‌آکریلونیتریل (PAN) را با استفاده از نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) و نانوسیلیکا (SiO_2) به روش الکتروریسی تقویت کردند. نتایج نشان داد که غشای نانوکامپوزیت حاوی ۴ درصد وزنی MWCNT بهترین عملکرد جداسازی CO_2/N_2 را با نفوذپذیری CO_2 برابر $289/4$ Barrer و گزینش‌پذیری $6/3$ ارائه می‌دهد [۲۹]. همچنین نانوالیاف گرماسخت آمین-اپوکسی با قطر ۷۰۰-۵۰۰ نانومتر برای جذب مستقیم از هوا (DAC) ساخته شده‌اند که قابلیت دفع در دمای پایین و مقاومت حرارتی عالی دارند [۳۰].

و) الکتروریسی دوطرفه (Side-by-Side Electrospinning)

جدیدترین پیشرفت در این زمینه، توسعه نانوالیاف هیبریدی

می‌شود. فشار بالا (تا ۱۰ بار) جذب فیزیکی را تشدید می‌کند [۱۳ و ۱۴].

شهری توسعه یافته‌اند [۳۷].

جذب مستقیم از هوا (DAC) پیشرفته

در سال‌های اخیر، جذب مستقیم از هوا با استفاده از MOF‌های آمین‌دار به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌های کربن منفی (Negative Carbon Emission) مطرح شده است. در سال ۲۰۲۵، محققان با سنتز خانواده MOF‌های پورفیرینی با تخلخل سلسله‌مراتبی (HP-PMOF) حاوی چگالی بالایی از نقص‌های ساختاری و ترکیبی از ریزحفرات، مزوحفرات و ماکروحفرات، موفق به رفع محدودیت بارگذاری آمین شدند. این MOF‌ها پس از عاملیت‌دهی با آمین‌های زنجیره کوتاه (DETA و TEPA)، ظرفیت جذب CO₂ را تا ۱۴۰ برابر نسبت به MOF اصلاح‌نشده افزایش دادند. HP-PMOF-DETA با ظرفیت جذب ۱/۴۰ میلی‌مول بر گرم در شرایط ۴۰۰ ppm (مشابه غلظت اتمسفر) و حفظ ۸۴ درصد بازده بازتولید پس از ۱۰ چرخه، یکی از بهترین عملکردهای گزارش‌شده برای DAC است [۲۱]. همچنین آئروژل‌های سیلیکا و rGO-PEI نیز با قابلیت بازتولید نوری یا الکتریکی در حال توسعه هستند.

سامانه‌های یکپارچه جذب و تبدیل (Capture-to-Con-) (version)

رویکرد نوظهور «جذب و تبدیل» که CO₂ جذب‌شده را به سوخت یا مواد شیمیایی با ارزش در محل تبدیل می‌کند، می‌تواند مرکز هزینه را به منبع درآمد تبدیل کند. نانوالیاف دوکاره ساخته‌شده با الکتروریسی دوطرفه، نمونه‌ای از این فناوری است که CO₂ را جذب و مستقیماً به متانول تبدیل می‌کند [۳۱]. همچنین HCP‌ها و POP‌ها نیز در کاربردهای کاتالیزوری نوری و الکتروشیمیایی برای تبدیل CO₂ به محصولات با ارزش مانند کربنات‌های حلقوی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۴].

تحلیل هزینه و چشم‌انداز صنعتی‌سازی

یکی از مهم‌ترین سوالات در مسیر توسعه، هزینه اقتصادی و قابلیت صنعتی‌سازی است. بر اساس تحلیل‌های فنی-اقتصادی (TEA) و ارزیابی چرخه حیات (LCA) انجام شده در سال ۲۰۲۶، هزینه کاهش انتشار CO₂ با استفاده از فناوری‌های مبتنی بر نانومواد می‌تواند در شرایط مطلوب به ۸۰-۴۰ دلار به ازای هر تن CO₂ کاهش یابد که با بازارهای نوظهور کربن رقابتی است [۳۸]. نقشه راه پیشنهادی برای سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۳۵ شامل سه محور اصلی است: صدور گواهی‌نامه دوام و پایداری جذب‌ها، استقرار راهکارهای ماژولار بازسازی برای واحدهای

ج) رطوبت

وجود بخار آب تأثیر دوگانه دارد: از یک طرف، رطوبت، رقابت بر سر جایگاه‌های جذب را افزایش داده و جذب CO₂ را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، در جذب شیمیایی آمینی، آب می‌تواند به‌عنوان کاتالیزور واکنش کربامات عمل کرده و حتی از طریق تشکیل بی‌کربنات ظرفیت را افزایش دهد. اخیراً نانوکامپوزیت‌هایی طراحی شده‌اند که با حفظ ساختار آب‌گریز در عین حال که عاملیت آمینی دارند، در رطوبت نسبی ۵۰ درصد عملکرد بهتری نشان می‌دهند [۳۲]. رویکرد جدیدتر، طراحی جاذب‌های به اصطلاح بی‌آب (Water-Lean) است که در آن‌ها از حلال‌های آمینی بدون حضور آب استفاده می‌شود. این جاذب‌ها ضمن حفظ ظرفیت جذب بالا، انرژی بازتولید را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهند. همچنین نانوذرات توخالی با عامل آمینی (مانند نانوسیلیکای توخالی) پایداری فوق‌العاده‌ای در رطوبت ۸۰ درصد نشان داده‌اند. چارچوب‌های آلی کووالانسی آمونیه‌شده (Ammoniated COFs) نیز نمونه دیگری از این فناوری هستند.

د) گزینش‌پذیری نسبت به سایر گازها

در کاربردهای واقعی CO₂ با CH₄، N₂ و H₂ مخلوط است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری/آمین‌دارشده، گزینش‌پذیری بالایی نسبت به CO₂ نشان می‌دهند [۳۵-۳۳].

کاربردهای نانوکامپوزیت‌های پلیمری در جذب CO₂

نانوکامپوزیت‌های پلیمری کاربردهای متنوع و حیاتی در جداسازی انتخابی دی‌اکسیدکربن دارند. مهم‌ترین کاربرد آن‌ها، حذف CO₂ از دودکش نیروگاه‌های زغال سنگ و گاز طبیعی قبل از انتشار در اتمسفر است [۳۳]. دومین کاربرد، شیرین‌سازی گاز طبیعی است که طی آن CO₂ از جریان متان جدا می‌شود تا ارزش حرارتی افزایش یابد [۳۴]. سومین کاربرد، جذب مستقیم دی‌اکسیدکربن از هوای آزاد برای کاهش غلظت گلخانه‌ای است [۳۵]. همچنین این فناوری در سامانه‌های تهویه مطبوع ساختمان‌ها و فضاهای بسته مانند ایستگاه‌های فضایی به کار می‌رود. در صنایع غذایی، از این نانوکامپوزیت‌ها برای تولید بسته‌بندی‌های فعال استفاده می‌شود که گاز CO₂ را کنترل می‌کنند [۳۶]. در نهایت، حسگرهای CO₂ پلیمری بر پایه این مواد برای پایش لحظه‌ای غلظت CO₂ در محیط‌های صنعتی و

جایگاه‌های فعال را افزایش می‌دهد. عاملیت‌دهی آمینی روی نانوپرکننده‌ها، جذب شیمیایی را ممکن ساخته و گزینش‌پذیری را تا بیش از پنجاه برابر بهبود می‌بخشد. روش‌های ساخت مانند اختلاط محلولی و پلیمری‌شدن درجا، امکان تولید غشاهای ماتریس ترکیبی با پراکندگی همگن را فراهم می‌کنند. این غشاهای در کاربردهایی مانند جداسازی CO_2 از دودکش نیروگاه‌ها و شیرین‌سازی گاز طبیعی عملکرد عالی نشان داده‌اند. همچنین فناوری جذب مستقیم از هوا با استفاده از این مواد، راهکاری موثر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای است. با این حال، چالش‌هایی مانند پایداری در رطوبت و هزینه بالای نانوپرکننده‌ها همچنان باقی است. تحقیقات آینده باید بر سنتز سبز و مقیاس‌پذیری فرایند متمرکز شوند. توسعه غشاهای هیبریدی با استفاده از منابع بومی می‌تواند ایران را در این فناوری راهبردی توانمند سازد. بهینه‌سازی هم‌زمان شرایط عملیاتی و ترکیب مواد، کلید دستیابی به عملکرد صنعتی مطلوب خواهد بود. در مجموع، نانوکامپوزیت‌های پلیمری چشم‌اندازی روشن برای آینده‌ای کم‌کربن هستند.

صنعتی موجود، و اعتبارسنجی در مقیاس پایلوت. موفقیت این فناوری نه تنها به پیشرفت‌های علمی در سطح مولکولی بستگی دارد، بلکه به اثبات توانایی آن در عملکرد پایدار برای یک دهه در شرایط واقعی یک نیروگاه نیز وابسته است.

پیشرفت‌های کلیدی اخیر

با پیشرفت سنتز سبز، توسعه غشاهای ماتریس ترکیبی و سامانه‌های جذب و تبدیل، نانوکامپوزیت‌های پلیمری چشم‌اندازی امیدبخش برای داشتن آینده‌ای کم‌کربن ارائه می‌دهند. بهینه‌سازی هم‌زمان اجزا و شرایط عملیاتی، کلید دستیابی به عملکرد صنعتی مطلوب خواهد بود.

نتیجه‌گیری

نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌عنوان نسل جدید جاذب‌های جامد، توانایی بالایی برای جذب انتخابی دی‌اکسیدکربن دارند. ترکیب ماتریس پلیمری با نانوپرکننده‌هایی مانند چارچوب‌های آلی فلزی، اکسیدگرافن و نانوسیلیکای متخلخل، سطح ویژه و تعداد

مراجع

- Forster P.M., Smith C., Walsh T., Lamb W.F., Lamboll R., Hall B., Hauser M., Ribes A., Rosen D., Gillett N.P., Palmer M.D., Rogelj J., von Schuckmann K., Trewin B., Allen M., Andrew R., Betts R.A., Borger A., Boyer T., Zhai P., Indicators of Global Climate Change 2023: Annual Update of Key Indicators of the State of the Climate System and Human Influence. *Earth System Science Data*, 16, 6, 2625–2658, **2024**.
- Lee H., Romero J. (Eds.): Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC*, 35-115, **2023**.
- Dutcher B., Fan M., Russell A. G., Amine-Based CO₂ Capture Technology Development from the Beginning of 2013—A Review, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7, 2137-2148, **2015**.
- Wang Q., Luo J., Zhong Z., Borgna A., CO₂ Capture by Solid Adsorbents and Their Applications: Current Status and New Trends, *Energy & Environmental Science*, 4, 42-55, **2011**.
- Samanta A., Zhao A., Shimizu G.K., Sarkar P., Gupta R., Post-combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A Review, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 1438-1463, **2012**.
- Xu X., Song C., Andresen J. M., Miller B. G., Scaroni A. W., Novel Polyethylenimine-Modified Mesoporous Molecular Sieve of MCM-41 Type as High-capacity Adsorbent for CO₂ Capture, *Energy & Fuels*, 16, 1463-1469, **2002**.
- Lin Y.S., Polymer Nanocomposite Membranes for CO₂ Capture, *Journal of Membrane Science*, 639, 119763, **2021**.
- Hoffman J., Proaño L., Jones C.W., Role of Polymer Architecture in CO₂ Capture from Air Using Supported Poly(alkylenimine)s: Linear vs Branched Polymers. *ACS Applied Polymer Materials*, 7, 22, 15671–15681, **2025**.
- Furukawa H., Cordova K.E., O’Keeffe M., Yaghi O.M., The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks, *Science*, 341, 1230444, **2013**.
- Zhao D.L., Zhao Y.G., Graphene Oxide–Polyethylenimine Composite for CO₂ Capture: Effect of Loading and Crosslinking, *Journal of CO₂ Utilization*, 39, 101166, **2020**.
- Bai L., Jiang X., Deng Y., Wang S., Liu H., Amine-functionalized CNTs@mSiO₂ with Short Radical Mesochannels for Fast and Efficient CO₂ Capture, *Journal of Materials Chemistry A*, 13, 30065-30072, **2025**.
- Chung T.S., Jiang L.Y., Li Y., Kulprathipanja S., Mixed Matrix Membranes (MMMs) Comprising Organic Polymers with Dispersed Inorganic Fillers for Gas Separation, *Progress in Polymer Science*, 32, 483-507, **2007**.
- Samanta A., Zhao A., Shimizu G.K.H., Sarkar P., Gupta R., Post-Combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A Review, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 1438-1463, **2012**.
- Kishor R., Ghoshal A.K., Amine-Impregnated Mesoporous Silica for CO₂ Capture: A Review, *Chemical Engineering Journal*, 413, 127757, **2021**.
- Xu X., Song C., Andresen J.M., Miller B.G., Novel Polyethylenimine-Modified Mesoporous Molecular Sieve of MCM-41 Type as High-Capacity Adsorbent for CO₂ Capture, *Energy & Fuels*, 16, 1463-1469, **2002**.
- Zhang Z., Yao Z.Z., Xiang S., Chen B., Perspective of Microporous Metal-Organic Frameworks for CO₂ Capture and Separation, *Energy & Environmental Science*, 7, 2868-2899, **2014**.
- Pazanianjareghi, F., Singh S., Attia F., Munnangi V.S.R., Nsengiyumva E.M., Jiao Y., Lin H., Engineering MOFs for Thin-Film and Nanofilm Nanocomposite Membranes for CO₂ Separation. *Journal of Materials Chemistry A*, 14, 8, 4323–4343, **2026**.
- Robeson L.M., The Upper Bound Revisited, *Journal of Membrane Science*, 320, 390-400, **2008**.
- Huang, T., Wu Q., Dong Q., Yang F., Xie Y., Zhang G., Liu X., Liu G., Zhu H., Plasma-Treated Polymer of Intrinsic Microporosity Membranes for Enhanced CO₂/CH₄ Separation. *Separation and Purification Technology*, 376, 2, 134025, **2025**.
- Furukawa H., Cordova K.E., O’Keeffe M., Yaghi O.M., The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks, *Science*, 341, 1230444, **2013**.
- Chen, X., Leng J., Ma F., Wu J., Jin Y., He F., Yang C., Huang H., Liu X., Duan C., Shang S., Ye D., Constructing Amine-Functionalized Hierarchically Porous Porphyrin-Based Metal–Organic Frameworks for Highly Enhanced Direct Air Capture of CO₂, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17, 12, 17783-17793, **2025**.
- Zhao D.L., Zhao Y.G., Zhang Y.H., Graphene Oxide Polyethylenimine Composite for CO₂ Capture: Effect of Loading and Crosslinking, *Journal of CO₂ Utilization*, 39, 101166, **2020**.
- Su F., Lu C., Polyethylenimine Functionalized Multi-walled Carbon Nanotubes for CO₂ Capture, *Chemical Engineering Journal*, 215-216, 749-755, **2013**.
- Baig N., Shetty S., Wahed S.A., Hassan A., Das N., Alameddine, B., Promising CO₂ Capture and Effective Iodine Adsorption of Hyper-Cross-Linked Conjugated Porous Organic

- Polymers Prepared from a Cyclopentannulation Reaction. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17, 12, 17783–17793, **2025**.
25. Salehi Maleh M., Bahrami A., Sepehri Sadeghian M.S., Asadimanesh H., Sadrzadeh M., A Comprehensive Review on Two-Dimensional Nanomaterials Mixed Matrix Membranes for Sustainable CO₂ Separation: from Molecular Engineering Design to Efficient Modification Strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 173, 110-146, **2025**.
26. Ma P.C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.K., Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-Based Nanocomposites: A Review, *Composites Part A*, 41, 1345-1367, **2010**.
27. Pavlidou S., Papaspyrides C.D., A Review on Polymer-Layered Silicate Nanocomposites, *Progress in Polymer Science*, 33, 1119-1198, **2008**.
28. Liu Y., Wang J., Zhang Y., Wu H., In Situ Polymerization of Polyamide 6/Functionalized MWCNT Nanocomposites for CO₂ Separation, *Journal of Applied Polymer Science*, 137, 48956, **2020**.
29. Aletan D., Muthu J., Characterization of Electrospun PAN Polymer Nanocomposite Membranes for CO₂/N₂ Separation. *Journal of Composites Science*, 9(1), 21, **2025**.
30. Okada C., Hou Z., Imoto H., Naka K., Kikutani T., Takasaki M., Utilizing B-Stage Amine-Epoxy in Electrospinning of Amine-Epoxy/Poly(vinyl alcohol) Nanofiber Webs for Direct CO₂ Capture from the Air. *Journal of Fiber Science and Technology*, 81, 8, 118-129, **2025**.
31. Hengsbach R., Bychko I., Schwarz S., Strizhak P., Fahmi A., Sustainable Bifunctional Electrospun Hybrid Nanofibers for CO₂ Capture and Conversion. *Macromolecular Rapid Communications*, 46, 14, 1-8, **2025**.
32. Pang S.H., Lively R.P., Water-Enhanced CO₂ Capture by Solid Amine Sorbents, *ChemSusChem*, 12, 2121-2125, **2019**.
33. Jana A., Modi A., Recent Progress on Functional Polymeric Membranes for CO₂ Separation from Flue Gases: A Review, *Carbon Capture Science & Technology*, 11, 100204, **2024**.
34. Sun L., Li Q., Li K., Chu J., Li Y., Wang M., Chen Z., Ma X., Yi S., State of the Art Polymeric Membranes and Polymer Derived Membranes for Simultaneous CO₂ and H₂S Removal from Sour Natural Gas, *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 19, 5, 40, **2025**.
35. Robertson M., Qian J., Qiang Z., Polymer Sorbent Design for the Direct Air Capture of CO₂, *ACS Applied Polymer Materials*, 6, 23, 14169-14189, **2024**.
36. Sharma S., Panda J., Mishra A.K., Nath P.C., Nayak P.K., Mahapatra U., Sharma M., Chopra H., Mohanta Y.K., Sridhar K., Recent Advances in Sustainable Biopolymer-Based Nanocomposites for Smart Food Packaging: A Review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135583, **2024**.
37. Rahman M.M., Salimian F., Hemmati A., Ghaemi A., A Review of Nanostructured Carbon Dioxide Sensors Based on Electrical and Thermal Conductivity, *Results in Engineering*, 25, 102-118, **2025**.
38. Selvam D.C., Devarajan Y., Manjunath H.R., G.M.S., Acharya S.K., Tiwari A., Srivastava P., Mehar K., Review of Emerging Nanomaterials for CO₂ Capture and Capture to Conversion: Materials, Devices, and System-Level Perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, 101127, **2026**.

