

بررسی تجربی مکانیسم‌های انتقال جرم و مدل سطح پاسخ جذب گاز کربن دی‌اکسید در نانو سیال آب - آلومینیوم هیدروکسید

سید زهیر بلورچیان تبریزی، احد قائمی*، شاهرخ شاه‌حسینی

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده: با افزایش نشر گازهای اسیدی و لزوم حذف گاز کربن دی‌اکسید یکی از گازهای اسیدی با نشر فزاینده، نانو سیالات به‌عنوان سیالاتی با قابلیت انتقال جرم بالا برای بهبود جذب گاز پیشنهاد و مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش نانو سیال آب - آلومینیوم هیدروکسید که از نانوذره‌های آب‌دوست با قابلیت بهبود پایداری نانو سیال تشکیل شده‌اند استفاده و با بررسی اثر بارگذاری نانوذره‌ها بر بهبود جذب، افزایش و سپس کاهش جذب دیده شد. برای توجیه بهبود ایجاد شده، از مکانیسم‌های اثر براوانی، شاتل و هیدرودینامیک و برای توجیه افت روی داده از اثر افزایش گرانیوی نانو سیال استفاده شد و با توجه به ویژگی‌های سطحی نانوذره مورد استفاده، اثربخشی مکانیسم‌های بهبوددهنده تفکیک و اثبات شد. با انتخاب مقادیرهای بهینه برای مدل سطح پاسخ با در نظرگیری آنالیز حساسیت نسبت به درصد بارگذاری ذره‌ها، اثر فشار، دور همزن و درصد بارگذاری در بازه‌های دقیق‌تر مطالعه و نتیجه‌ها نشانگر تأثیرگذاری منفی پارامتر فشار، و تأثیر افزایشی و سپس کاهش پارامتر شدت هم‌زدن و درصد بارگذاری می‌باشد به طوری که مقدار بیشینه فاکتور بهبود جذب در مقدار ۳۹/۰۱۲ درصدی به دست آمد.

کلمات کلیدی: جذب، نانو سیال، آلومینیوم هیدروکسید، انتقال جرم.

KEYWORDS: Absorption, Nanofluid, $Al(OH)_3$, Mass transfer.

مقدمه

مورد استفاده قرار گرفته است [۷-۱۲]. با توجه به نقش مؤثر نانو سیالات در بهبود انتقال گرما، استفاده از چنین سیال‌هایی با هدف بهبود نرخ انتقال جرم مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۱۳-۱۵]. کیم و همکاران با بررسی اثر استفاده از نانوذره‌های SiO_2 در قطره‌های ۷۰، ۳۰ و ۱۲۰ نانومتری با حلال پایه آب و نیز حلال ترکیبی آب، پیرازین و پتاسیم کربنات، دیدند که جذب گاز کربن دی‌اکسید در حلال اول ۲۴ و در حلال دوم ۱۲ درصد بهبود می‌یابد. تحلیل آنان در مورد بهبود جذب، مبتنی بر خرد شدن حباب‌های گاز و افزایش سطح

با توجه به تغییرهای آب و هوایی متأثر از نشر گازهای اسیدی در جو کره زمین، کاهش نشر گازهای اسیدی و از جمله گاز کربن دی‌اکسید، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مشکل‌های محیط زیستی، در دهه اخیر از اهمیت بالایی برخوردار شده است. در حال حاضر روش‌هایی مانند جذب شیمیایی توسط آمین‌ها یا جذب فیزیکی توسط مواد متخلخلی مانند کربن فعال و زئولیت برای حذف از کربن دی‌اکسید از خروجی صنایع پیشنهاد شده است [۱-۶]. فرایندهای حذف کربن دی‌اکسید با حلال شیمیایی و جذب توسط نانو جاذب‌های سطحی اخیر بیش‌تر

* E-mail: aghaemi@iust.ac.ir

* عهده‌دار مکاتبات

با افزودن نانوذره‌ها، جذب به دلیل افزایش گرانی و بروز ممانعت‌ها کاهش خواهد یافت [۲۰]. در این پژوهش با بررسی تأثیر بارگذاری نانوذره‌های آلومینیوم هیدروکسید در حلال پایه آب مقطر و تحلیل نمودار به دست آمده و نیز بررسی اثر شرایط عملیاتی فشار و شدت هم زدن بر روی درصد جذب در نانوسیالات، مقادیرهای بهینه عملیاتی مدل سطح پاسخ جذب کربن دی‌اکسید توسط نانو سیال آب - آلومینیوم هیدروکسید ارائه شده است.

بخش تجربی

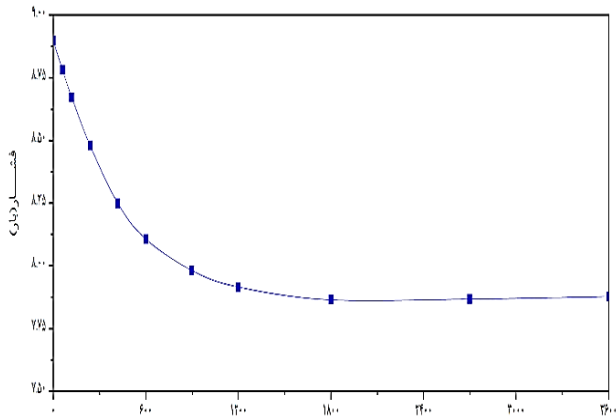
مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، نانوذره‌های آلومینیوم هیدروکسید با خلوص ۹۹/۹ درصد، ساخت شرکت نانوگرافی^۱ با قطر تقریبی ۸ الی ۱۸ نانومتر و سطح آب دوست تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. نانوسیالات در بارگذاری‌های ۰/۰۱ و ۰/۱ درصد وزنی با حلال پایه آب دو بار تقطیر تهیه و برای ایجاد پایداری و توزیع مناسب در نانوسیالات مورد استفاده، از پرآب فراصوت ساخت شرکت فناوری ایرانیان پژوهش نصیر با توان ۱۰۰ وات استفاده شد. در روش پایدارسازی نانو سیال توسط امواج فراصوت، با تهیه بارگذاری مناسب از نانوذره در حلال پایه، امواج فراصوت به مدت ۲ ساعت و در بازه‌های نیم‌ساعته برای توزیع مناسب ذره‌ها در حلال پایه اعمال شد. پارامتر مورد مطالعه برای سنجش میزان جذب و نیز بهبود ایجاد شده، به صورت درصد جذب اولیه گزارش می‌شود که در معادله‌های (۱) تا (۴) روش محاسبه آن و فاکتور بهبوددهنده اولیه آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، این رابطه‌ها بر مبنای میزان مولی گاز جذب شده در حلال محاسبه و سنجیده می‌شوند. با توجه به اهمیت استفاده از نانو سیالات برای بهبود نیروی محرکه انتقال جرم، مدت زمان آزمایش جذب، برای خواندن مقادیرها باید کم‌تر از زمان تعادل سامانه باشد تا بیش‌ترین نرخ انتقال جرم ممکن به دست آید و در نتیجه با توجه به جذب کربن دی‌اکسید در آب خالص، زمان ۱۰ دقیقه برای ثبت مقادیرهای پیشنهاد و مورد استفاده می‌باشد. مبنای تعیین زمان بهینه ۱۰ دقیقه‌ای برای ثبت مقادیرها، مطالعه نمودار جذب گاز CO₂ توسط حلال خالص و در نظر گرفتن زمان‌های اولیه با بیش‌ترین نرخ جذب به جای در نظرگیری همه بازه زمانی جذب تا رسیدن به تعادل می‌باشد که در شکل ۱ به آن اشاره شده است. در این شکل، افت فشار گاز کربن دی‌اکسید در زمان جذب توسط آب خالص در دمای استاندارد و فشار ۹ بار برای دیدن روند و تعیین نقطه مناسب برای سنجش، ترسیم شده است. مقدار درصد جذب با استفاده از قانون گاز غیر ایده‌ال، با اندازه‌گیری افت فشار ناشی از جذب CO₂ محاسبه شده است.

انتقال جرم بود [۱۴]. جیانگ و همکاران با مطالعه اثر نانوذره‌های TiO₂ و Al₂O₃ در محلولی آمینی، گزارش نمودند که با استفاده از نانوذره‌های SiO₂ جذب کاهش یافته و در سایر موارد، افزودن نانوذره‌ها منجر به بهبود و سپس افت جذب بوده است. ایشان نیز دلیل بهبود را در خرد شدن حباب‌های گاز و علت اصلی پسرقت را در بروز ممانعت‌های انتقال جرمی دانستند [۱۵]. صمدی و همکاران با بررسی فرایند جذب توسط نانوسیالات تشکیل شده از آب و Al₂O₃، TiO₂ و Fe₃O₄ در ستونی دیواره مرطوب، متوجه تأثیرگذاری حرکت براونی ذره‌ها و نیز اثر شاتل بر روی بهبود جذب توسط نانوسیالات شدند. حرکت براونی ذره‌ها با افزایش آشفستگی محلی و بهبود ضریب انتقال جرم و نیز اثر شاتل با جذب سطحی گاز توسط نانوذره‌های حاضر در سطح و بازگشت به سیال جهت دفع آن و تکرار این حرکت بر بهبود انتقال جرم تأثیر می‌گذارند. از نظر ایشان، اصلی‌ترین علت افت جذب، افزایش گرانی و ناشی از حضور مازاد نانوذره‌ها در سیال و در نتیجه افزایش ضخامت لایه مرزی نفوذ و افت انتقال جرم بوده است [۱۶]. در پژوهشی دیگر، لی و همکاران به بررسی جذب توسط نانوسیالات آب - SiO₂ و آب - Al₂O₃ پرداخته و نشان دادند بهترین مقدار جذب در مقدار ۰/۰۱ درصد حجمی نانوذره رخ داده و به مقدار ۲۳/۵ درصد بهبود جذب نسبت به سیال خالص ایجاد می‌شود. دلیل ایشان برای توجیه بهبود ایجاد شده مبتنی بر اثرهای خرد شدن حباب‌های گاز، شاتل و لایه هیدرودینامیکی بود. در اثر لایه هیدرودینامیکی، با توجه به حرکت براونی ذره‌ها در نزدیکی سطح حباب و ایجاد اغتشاش محلی، لایه مرزی هیدرودینامیکی نازک تر شده و از آنالوژی پدیده‌های انتقال، با کاهش ضخامت لایه مرزی انتقال جرم، مقدار انتقال بهبود می‌یابد [۱۷].

کیم و همکاران با ایجاد نانوسیال متانول - Al₂O₃، با مطالعه تأثیر آن بر جذب و نیز ویژگی‌های فیزیکی نانوسیال ایجاد شده پرداخته و دیدند با افزایش بارگذاری نانوذره‌ها افزون بر افزایش گرانی سیال، تنش سطحی و حجم حباب‌ها کاهش و سرعت خیزش آن‌ها افزایش می‌یابد [۱۸]. کریمی و همکاران با استفاده از نانوذره‌های Fe₃O₄ برای ایجاد نانوسیال، نتیجه گرفتند که در صورت استفاده از میدان مغناطیسی، با کاهش ضخامت لایه مرزی، جذب افزایش می‌یابد [۱۹]. وانگ و همکاران در پژوهشی، با استفاده از نانوذره‌های SiO₂، TiO₂ و Al₂O₃ در حلال ۳۰ درصد وزنی منو اتانول آمینی، به بررسی میزان بهبود انتقال جرم پرداختند و بیان داشتند که در بارگذاری‌های پایین نانوذره، به دلیل کنترل‌کنندگی مکانیسم نفوذ، جذب بهبود یافته ولی با افزایش حضور یون‌ها و افزایش مقدار نانو ذره‌ها، به دلیل تغییر مکانیسم کنترل‌کنندگی به واکنش، جذب ثابت و سرانجام

(۱) Nanographi

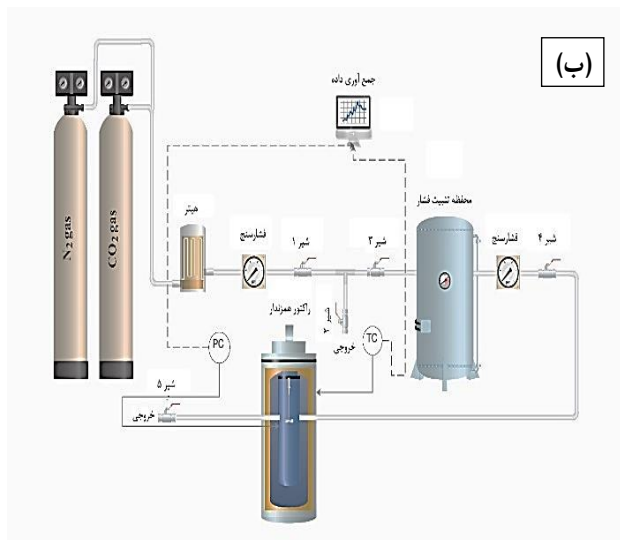


زمان جذب (ثقیه)

شکل ۱- روند افت فشار گاز کربن دی‌اکسید در جذب توسط آب خالص



(الف)



(ب)

شکل ۲- دستگاه آزمایشگاهی جذب گاز کربن دی‌اکسید و نمودار جریان فرایندی آن

$$C_g = \frac{P}{R \times T \times z} \quad (1)$$

$$n_g = C_g \times V_{Rg} \quad (2)$$

$$R = \frac{n_{g, to} - n_{g, ti}}{n_{g, to}} \times 100 \quad (3)$$

$$E = 100 \times \frac{R_{ti, \text{نانو سیال}}}{R_{ti, \text{سیال}}} \quad (4)$$

دستگاه جذب

شکل ۲، الف دستگاه آزمایشی مورد استفاده و شکل ۲، ب نیز نمودار جریان فرایندی آن را نشان می‌دهد. راکتور مورد استفاده در فرایند، راکتوری ناپیوسته است که از فولاد ضدزنگ ساخته شده است. حجم درونی راکتور با استفاده از روش جابه‌جایی آب، ۱۶۰ سانتی متر مکعب اندازه‌گیری شده است. راکتور با مقدار مناسب از حلال به صورتی که ورود همزن باعث ایجاد گردابه نشود بارگذاری شده، فشار گاز در محفظه‌ای تثبیت شده و سپس فشار و دمای عملیاتی تنظیم شده است. دمای راکتور با استفاده از یک کنترلر زنجیره‌ای^۱ کنترل شده و با باز شدن شیر ورودی گاز، گاز کربن دی‌اکسید وارد محفظه اولیه شده و سپس، وقتی دمای راکتور به دمای مورد نظر رسید و فشار گاز در محفظه اولیه تثبیت شد، گاز وارد راکتور شده و پس از گذشت زمان مورد نیاز، برای جذب، کربن دی‌اکسید در حلال جذب می‌شود. با پایان فرایند، شیر خروجی گاز به حالت باز درآمده و گاز باقیمانده خارج می‌شود. در طول زمان جذب، داده‌های فشار و دما در هر ثانیه توسط دستگاه یکپارچه جذب، ثبت و برای محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای کاهش میزان خطا و اطمینان از نتیجه‌ها، هر آزمایش ۲ بار انجام و با وجود تغییرهای اندک، مقدار متوسط داده‌های به دست آمده استفاده شده است. بازه فشار ۱ تا ۹ بار و بازه اندازه‌گیری دما ۳۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس بوده است.

نتیجه‌ها و بحث

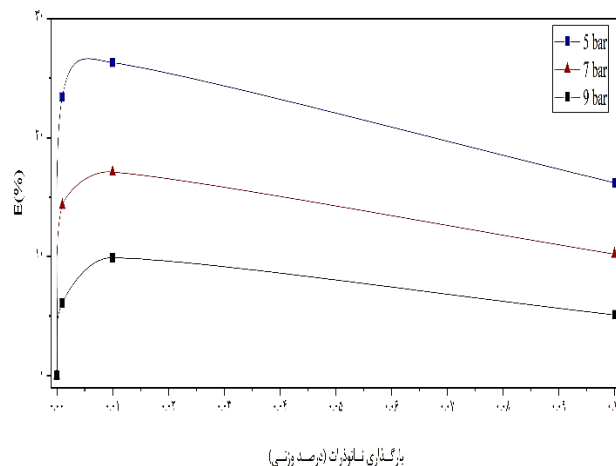
برای بررسی مکانیسم‌های بهبوددهنده انتقال جرم در صورت استفاده از نانو سیال آب - آلومینیوم هیدروکسید و دستگاه همزن دار ناپیوسته، نخست اثرهای تغییر درصد وزنی بارگذاری نانو ذره‌های روی میزان فاکتور بهبوددهنده مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. این نتیجه‌ها به صورت شکل ۳ برای شرایط دمای ۳۰ درجه سلسیوس و دور همزن ۲۰۰ دور بر دقیقه نشان داده شده است.

(۱) Cascade

می‌توان با توجه به آنچه پیش‌تر بیان شد به اثر شاتل و لایه‌مرزی هیدرودینامیک نسبت داد.

با توجه به شکل ۳ دیده می‌شود که اگر افزودن نانوذره‌ها همچنان ادامه داشته باشد، با بالا رفتن درصد وزنی نانوذره‌ها در نانو سیال، مطابق با مدل‌های پیش‌بینی تأثیرپذیری گرانیوزی از حضور نانوذره‌ها، گرانیوزی نانوسیال افزایش یافته [۲۷، ۲۸] و ضخامت لایه‌مرزی هیدرودینامیکی نیز با افزایش همراه بوده و مطابق با آنالوژی پدیده‌های انتقال، در صورت افزایش این ضخامت، ضخامت لایه‌مرزی انتقال جرم نیز با افزایش همراه بوده که منجر به افت انتقال می‌شود [۲۹]. در شرایط فشار ۹ بار نسبت به شرایط ۵ بار، با توجه به بالا بودن نیروی محرکه انتقال، مرتبه اثربخشی نانوذره‌ها افت و در نتیجه تغییرهای نرم‌تری را برای فاکتور بهبوددهنده نسبت به افزودن درصد وزنی نانوذره‌ها شاهد خواهیم بود که نتیجه‌های شکل ۳ نیز مؤید این واقعیت می‌باشند. کم‌تر بودن میزان جذب در فشارهای بالاتر را می‌توان ناشی از ثابت ماندن مقدار نانوسیال و متناسب نبودن مقدار آن با مول‌های زیاد گاز در فشار بالا دانست که به دلیل قابلیت مقایسه نتیجه‌ها از نظر حجم نانوسیال مورد استفاده، انجام پذیرفته است. مربوط به درصد جذب، افزون بر این موردها، با توجه به شکل ۳، در شرایط عملیاتی یادشده، بهترین بهبود درصد انتقال جرم به مقدار ۲۶/۳ درصد برای حالت ۰/۰۱ درصد وزنی نانوذره و فشار ۵ بار حاصل می‌شود. با تغییر دمای عملیاتی به ۵۰ درجه سلسیوس و با توجه به کاهش انحلال گاز کربن دی‌اکسید در دماهای بالاتر، افت عملکرد جذب مورد انتظار خواهد بود. با توجه به شکل ۴، تغییرهای فاکتور بهبوددهنده جذب برای بارگذاری‌های گوناگون نانوذره آلومینیوم هیدروکسید در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ۲۰۰ دور بر دقیقه هم زدن نشان داده شده است.

با توجه به تغییر فاکتور بهبوددهنده جذب در شکل ۴، روند کلی تغییرها مطابق شکل ۳ و مکانیسم‌های مؤثر نیز منطبق بر تحلیل مورد ارایه برای شرایط ۳۰ درجه سلسیوس خواهد بود. در شرایط عملیاتی ۵۰ درجه سلسیوس، بهترین بهبود برای ۰/۰۱ درصد وزنی نانوذره و به مقدار ۱۰/۶ درصد بهبود نسبت به جذب حلال پایه خالص گزارش شده است. برای پیش‌بینی میزان بهبود جذب در بازه منتخب از شکل ۳ و ۴ برای درصد بارگذاری نانوذره‌ها در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ درصد وزنی و بازه تغییر فشار ۱ تا ۵ بار و هم زدن ۱۰۰ تا ۳۰۰ دور بر دقیقه برای دمای ۳۰ درجه سلسیوس، از روش سطح پاسخ استفاده شد. این شرایط عملیاتی با توجه به این واقعیت انتخاب شد که با افت دما، نرخ جذب گاز بهبود یافته و دمای ۳۰ درجه سلسیوس، با توجه به شرایط محیطی و تسهیلات دستگاه،



شکل ۳- تأثیر بارگذاری نانوذره‌ها بر بهبود جذب در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و ۳۰۰ دور بر دقیقه هم زدن

همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده، تأثیر افزودن درصد وزنی نانوذره‌ها در سیال پایه، نخست به شدت افزایشی و سپس کامل کاهش می‌باشد. با تقسیم نمودار به سه روند کلی افزایش شدید اولیه، افزایش کند و سرانجام افت E، تحلیل مکانیسم‌های مؤثر قابل‌ارایه خواهد بود. در دو بازه اولیه تا درصد وزنی ۰/۰۱ نانوذره‌ها، به دلیل وقوع پدیده‌ها بهبوددهنده انتقال جرم مانند حرکت براوانی [۲۱، ۲۲]، اثر شاتل [۱۴]، اثر لایه‌مرزی [۱۷] و خرد شدن حباب‌ها [۱۵]، بهبود شدیدی در میزان انتقال جرم رخ می‌دهد. اثر شاتل که با جذب سطحی گاز توسط نانوذره‌ها در سطح انتقال و سپس واجذب گاز به حلال و تکرار این عمل رخ می‌دهد نیازمند حضور گسترده نانوذره‌ها در سطح بوده که با توجه به خاصیت آب‌دوستی نانوذره‌های آلومینیوم هیدروکسید و وجود گروه‌های آب‌دوست در سطح که منجر به بهبود پایداری آنان با توزیع بهتر در سیال می‌شود در درصد‌های وزنی بسیار پایین یعنی در ناحیه افزایش شدید فاکتور بهبود نمی‌تواند محتمل باشد [۲۳-۲۵]. اثر لایه‌مرزی هیدرودینامیکی نیز به دلیل ترکیب اثرهای شاتل و حرکت براوانی و با توجه به کارکرد ضعیف‌تر اثر شاتل در درصد‌های وزنی بسیار پایین نمی‌تواند عامل اصلی بهبود در کم‌ترین بارگذاری نانوذره فرض شود. با توجه به تأثیرگذاری حرکت براوانی در درصد‌های وزنی پایین نانوذره‌ها به علت توزیع ذره‌ها و حرکت‌های آزاد آنان که منجر به افزایش آشفتگی محلی و در نتیجه باعث کاهش ضخامت لایه‌مرزی هیدرودینامیکی و لایه‌مرزی انتقال جرم می‌شود، می‌توان از شکل ۳ نتیجه گرفت که مکانیسم غالب انتقال جرم در این نانوسیال برای ناحیه اول، حرکت براوانی و اثر میکروکانوکتیو ناشی از آن بوده است [۲۶]. در حالی که پس از گسترش حضور نانوذره‌ها در سطح و تا بارگذاری ۰/۰۱ درصد وزنی از نانوذره، این مکانیسم غالب را

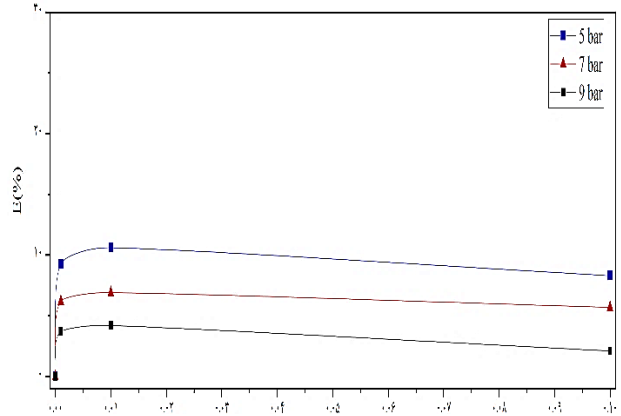
جدول ۱- ماتریس بهینه‌سازی فرایند جذب کربن دی‌اکسید توسط نانو سیال آب - آلومینیوم هیدروکسید

نماد	A	B	C	E
شماره آزمایش/ پارامتر	بار	درصد وزنی	دور بر دقیقه	درصد
۱	۵	۰/۰۰۳	۱۰۰	۱۷/۳
۲	۵	۰/۰۰۵	۲۰۰	۲۳/۶
۳	۵	۰/۰۰۳	۳۰۰	۲۱/۳
۴	۵	۰/۰۰۳	۲۰۰	۲۷/۶
۵	۹	۰/۰۰۳	۲۰۰	۱۳/۱
۶	۵	۰/۰۰۳	۲۰۰	۲۷/۳
۷	۹	۰/۰۰۵	۳۰۰	۵/۸
۸	۱	۰/۰۰۱	۳۰۰	۳۵/۳
۹	۵	۰/۰۰۳	۲۰۰	۲۷/۰
۱۰	۵	۰/۰۰۳	۲۰۰	۲۷/۱
۱۱	۵	۰/۰۰۳	۲۰۰	۲۷/۶
۱۲	۱	۰/۰۰۳	۲۰۰	۳۸/۶
۱۳	۵	۰/۰۰۳	۲۰۰	۲۷/۳
۱۴	۹	۰/۰۰۱	۱۰۰	۱/۷
۱۵	۱	۰/۰۰۵	۱۰۰	۲۳/۲
۱۶	۵	۰/۰۰۱	۱۰۰	۲۶/۳
۱۷	۱	۰/۰۰۱	۱۰۰	۲۹/۱
۱۸	۹	۰/۰۰۱	۳۰۰	۶/۱
۱۹	۹	۰/۰۰۵	۱۰۰	۳/۳
۲۰	۱	۰/۰۰۵	۳۰۰	۲۶/۶

جدول ۲- جدول (ANOVA) تجزیه واریانس خطا برای روش سطح پاسخ

منبع	مجموع مربعات	مقدار P
مدل	۲۰۹۲/۵۹	۰/۰۰۰۱ <
A	۱۵۰۷/۹۸	۰/۰۰۰۱ <
B	۲۵/۶۰	۰/۰۰۰۱ <
C	۴۲/۰۳	۰/۰۰۰۱ <
AB	۳۱/۶	۰/۰۰۰۱ <
AC	۰/۹۱۱۲	۰/۰۳۳۱
BC	۲/۷۶	۰/۰۰۱۶
A ₂	۳/۵۲	۰/۰۰۰۷
B ₂	۱۱/۳۵	۰/۰۰۰۱ <
C ₂	۱۶۲/۲۸	۰/۰۰۰۱ <
باقی‌مانده	۱/۴۹	
نقص برازش	۱/۱۹	۰/۰۸۲۸

کربن دی‌اکسید توسط نانو سیال آب - آلومینیوم هیدروکسید می‌باشد.



بارگذاری نانو سیال (درصد وزنی)

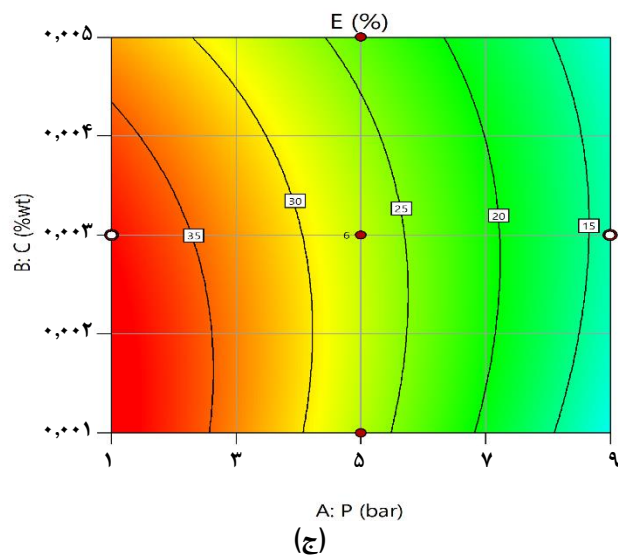
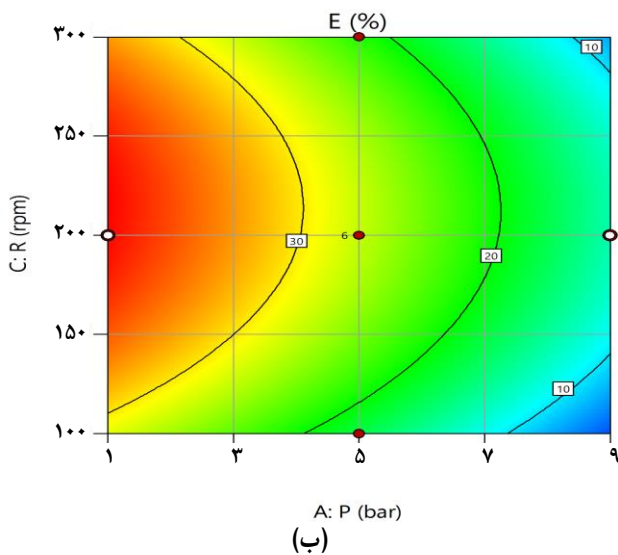
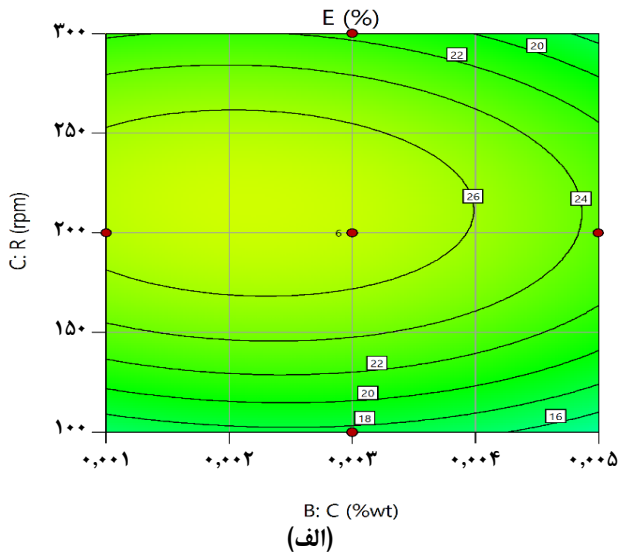
شکل ۴- تأثیر بارگذاری نانو ذره‌ها بر بهبود جذب در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ۳۰۰ دور بر دقیقه هم زدن

بهینه‌ترین حالت قابل انتخاب بوده و با شرایط محیطی، اقلیمی در تناسب است. از سویی بازه ۵ تا ۹ بار برای فشار با توجه به بازه عملیاتی دستگاه تا فشار ۹ بار و لزوم تقلیل آن به نزدیک‌ترین بازه پیرامون شرایط استاندارد محیطی برای حفظ دقت روش سطح پاسخ و نیز توجیه اقتصادی طرح با توجه به هزینه‌ی بالای عملیات در فشارهایی بالا در صنعت انتخاب شد. استفاده از روش سطح پاسخ به وسیله طرح مرکب مرکزی، منجر به ایجاد یک مدل آماری پیوسته که دقت و اطمینان بالایی را به شرط درج دقیق مقادیر خواهد داشت، می‌شود [۳۰]. مقادیرهای متغیرهای ورودی و خروجی برای ۲۰ آزمایش در جدول ۱ مشخص شده است.

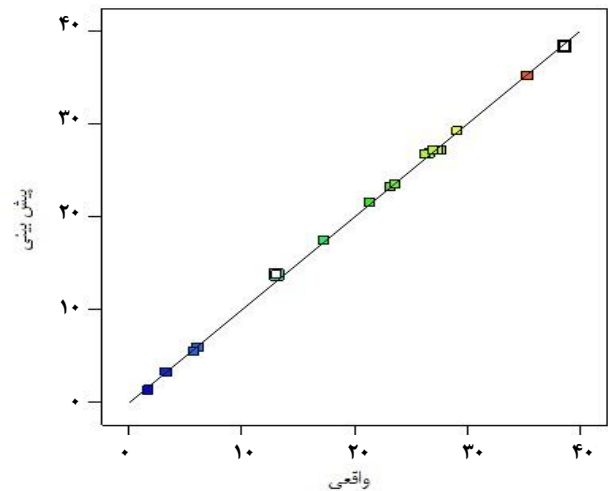
جدول شماره ۲ نشان‌دهنده اثرهای بر روی مقدار E می‌باشد. در جدول یادشده مقادیرهای P معیاری برای تشخیص بامعنی بودن اثرهای بر روی پاسخ هستند. برای قرارگیری پاسخ در سطح اطمینان ۹۵ درصدی، اگر P کمتر از مقدار ۰/۰۰۵ باشد، مطابق با موردی‌های بالا، تأثیرگذاری پارامتر AC بی‌معنی است. لیکن سایر پارامترها معنی‌دار هستند. برای مدل‌سازی پاسخ موجود در این پژوهش از مدل کاهش‌ی مرتبه دوم استفاده شده است. میزان E این مدل با استفاده از معادله (۵) قابل محاسبه می‌باشد.

$$E = A + 1593.04B + 0.340804C + 248.438 AB - 0.00084375AC - 2.9375 BC - 0.0707386 A^2 - 507955 B^2 - 0.000768182 C^2$$

مقادیرهای ضریب همبستگی و نیز ضریب همبستگی اصلاحی برای مدل سطح پاسخی به‌دست‌آمده به ترتیب ۰/۹۹۹۳ و ۰/۹۹۸۶ بوده و مدل در پیش‌بینی پاسخ‌ها از دقت بالایی برخوردار است. نمودار مقادیرهای پیش‌بینی شده توسط مدل و نیز مقادیرهای عملی در شکل ۵ نشان داده شده و بیانگر پیش‌بینی صحیح مدل از فرایند جذب گاز



شکل ۶- نمودار شمارنده تأثیر پارامترها بر روی پاسخ در روش سطح پاسخ



شکل ۵- نمودار تطابق مقادیرهای پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی

نمودار شمارنده پاسخ فاکتور بهبوددهنده جذب، در شکل ۶ نشان داده شده است. نمودار شکل ۶ الف نشان دهنده قرارگیری بیشینه مقدار جذب در مرکزیت بازه انتخابی برای مدل سازی سطح پاسخی در فشار ۵ بار و برای پارامترهای درصد وزنی نانوذره و دور همزن بوده. برخلاف این مورد، برای شکل ۶ ب و شکل ۶ ج دیده می شود که با افزایش فشار، مقدار بهبود با کاهش همراه بود. دلیل این امر را می توان در افزایش نیروی محرکه انتقال جرم با افزایش فشار و کاهش اثربخشی وجود نانوذرها دانست. در این تصویر نیز مطابق انتظار تغییر دور همزن اثری افزایشی و سپس کاهشی داشته که دلیل این امر را می توان در ایجاد گردابه در دوره های بالا و دفع گاز بر اثر اختلاط شدید سیال دانست.

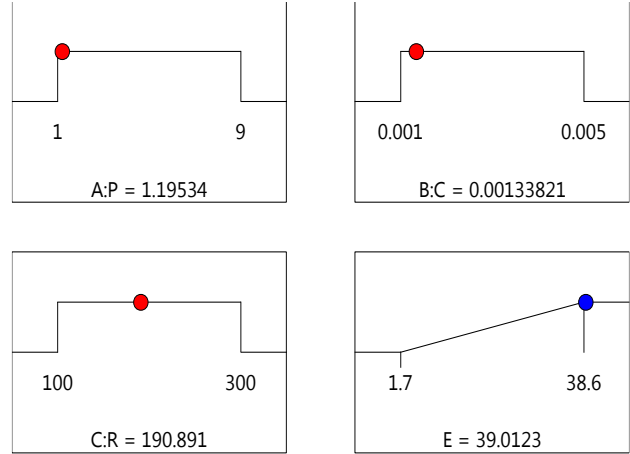
برای بهینه سازی مقدار پارامتر E، نتیجه های روش سطح پاسخ نشانگر لزوم استفاده از فشارهای پایین و نیز دور همزن میانی بوده که این نتیجه ها در شکل ۷ نشان داده شده اند. با توجه به مقدار بهینه برای درصد بارگذاری نانوذرها، نتیجه های به دست آمده از شکل ۳ و شکل ۴ در بازه ای دقیق تر تأیید می شوند. برای اطمینان از درستی مدل، آزمایش در مقادیر بهینه انجام و فاکتور بهبود اولیه جذب به مقدار ۳۸/۷۶ درصد به دست آید. علت بهینه نبودن دور همزن در عددی بالا را می توان به اختلاط شدید و دفع گاز جذب شده به صورت فیزیکی در اثر تشدید برخوردها دانست. از سویی کم بودن فشار بهینه با توجه به آنچه پیشتر به آن اشاره شد، می تواند ناشی از ثابت ماندن میزان حلال در همه ی فشارها و در نتیجه کم بودن ظرفیت آن برای فشارهای بالاتر و در نتیجه تعداد مول های بالاتر گاز باشد.

براونی، اثر شاتل و هیدرودینامیکی برای توجیه بهبود به دست آمده و افزایش گرانیوی سیال برای توجیه افت فاکتور بهبوددهنده پیشنهاد می‌شوند. بازه مدل‌سازی RSM دیدن مقادیرهای بهینه به دست آمده تعیین و نتیجه‌های مدل با رسیدن به ضریب همبستگی 0.9993 از دقت بالایی برخوردار بوده و در بهترین حالت، مقدار بهبود $39/012$ درصد را برای فشار $1/195$ ، درصد بارگذاری $0/001$ نانوذره و 190 دور بر دقیقه هم زدن را پیش‌بینی می‌کنند.

فهرست نمادها

Cg	غلظت کربن دی‌اکسید در فاز گازی
P	فشار
T	دما
R	ثابت جهانی گازها
z	فاکتور تراکم‌پذیری
ng	مول کربن دی‌اکسید در فاز گازی
VRg	حجم فاز گازی
ng,t0	مول کربن دی‌اکسید در فاز گازی و زمان شروع جذب
ng,ti	مول کربن دی‌اکسید در فاز گازی و زمان پایانی خواندن مقادیرها در جذب
R	درصد جذب اولیه
E	فاکتور بهبود اولیه جذب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۲



شکل ۷- نمودار شرایط بهینه برای بیشینه‌سازی فاکتور بهبود جذب توسط نانو سیال آب - آلومینیوم هیدروکسید

نتیجه‌گیری

با توجه به نتیجه‌های پژوهش، تأثیر افزایش درصد وزنی نانوذره‌ها بر روی بهبود انتقال جرم به صورت افزایشی تا درصد وزنی $0/001$ و سپس نزولی تا $0/1$ درصد وزنی بوده و علت‌های اصلی بهبود در جذب، نخست ناشی از حرکت براوانی نانوذره‌ها و با افزایش حضور ذره‌ها، ناشی از اثر شاتل و اثر هیدرودینامیک بوده و عامل اصلی در افت جذب، افزایش گرانیوی سیال به دلیل حضور فزاینده نانوذره‌ها بوده است. بیشینه مقدار بهبود ایجادشده در این بررسی، $26/3$ درصد برای فشار 5 بار، دمای 30 درجه سلسیوس و غلظت $0/001$ درصد وزنی نسبت به حلال آب خالص به دست می‌آید. اثرهای حرکت

مراجع

- [1] Naeem S., Ghaemi A., Shahhosseini S., *Experimental Investigation of CO₂ Capture Using Sodium Hydroxide Particles in a Fluidized Bed*, *Korean J. Chem. Eng.*, **33**:1278-1285 (2016).
- [2] Karbalaei Mohammad N., Ghaemi A., Tahvildari K., *Hydroxide Modified Activated Alumina as an Adsorbent for CO₂ Adsorption: Experimental and Modeling*, *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **88**: 24-37 (2019).

[۳] نیوشا کربلایی محمدی، احد قائمی، مقایسه عملکرد جاذب‌های اصلاح شده کربن فعال و آلومینا با محلول‌های هیدروکسیدی برای افزایش شدت جذب کربن دی‌اکسید، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۲) ۴۰: ۸۹ تا ۹۶ (۱۴۰۰).

[۴] فاطمه فشی، احد قائمی، پیمان مرادی، مقایسه عملکرد جاذب‌های زئولیت و آلومینا با محلول پپیرازین برای افزایش شدت جذب کربن دی‌اکسید، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۲) ۳۹: ۹۹ تا ۱۱۰ (۱۳۹۹).

- [۵] زهرا رستگار، احد قائمی، منصور شیروانی، مطالعه تجربی کربن دی اکسید با استفاده از محلول آبی پتاسیم هیدروکسید، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۴۰: ۱۱۵ تا ۱۲۶ (۱۴۰۰).
- [۶] مرضیه مهدی زاده، احد قائمی، مدل سازی و شبیه سازی ستون بستر ثابت جذب واکنش دار کربن دی اکسید توسط پلی اسپارتامید، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۳۸: صفحه ۱۸۹ تا ۱۹۸ (۱۳۹۸).
- [7] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., [Experimental Investigation of CO₂ Removal Using Piperazine Solution in a Stirrer Bubble Column](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **63**: 226-240, (2017).
- [8] Taheri F.S., Ghaemi A., Maleki A., Shahhosseini S., [High CO₂ Adsorption on Amine-Functionalized Improved Mesoporous Silica Nanotube as an Eco-Friendly Nanocomposite](#), *Energy and Fuels*, **33**: 5384-5397 (2019).
- [9] Karbalaei Mohammad N., Ghaemi A., Tahvildari K., Mehrdad Sharif A.A., [Experimental Investigation and Modeling of CO₂ Adsorption Using Modified Activated Carbon](#), *Iran.J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **39(1)**: 177-192 (2020).
- [۱۰] حمید رمضانی پورپنجاه، احد قائمی، حسین قنادزاده گیلانی، مطالعه تجربی و بهینه سازی جذب سطحی کربن دی توسط جاذب پلیمری میکرو متخلخل، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۴۰: ۹۵ تا ۱۰۴ (۱۴۰۰).
- [11] Norouzbahari S., Shahhosseini S., Ghaemi A., [Chemical Absorption of CO₂ into an Aqueous Piperazine \(PZ\) Solution: Development and Validation of a Rigorous Dynamic Rate-Based Model](#), *RSC Advances*, **6**: 40017-40032 (2016).
- [12] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., [Modeling and Experimental Study on the Solubility and Mass Transfer of CO₂ Into Aqueous DEA Solution Using A Stirrer Bubble Column](#), *RSC Advances*, **6**: 108075-108092, (2016).
- [13] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., Heydarifard M., [Experimental Investigation of the Effect of Nano Heavy Metal Oxide Particles in Piperazine Solution on CO₂ Absorption Using a Stirrer Bubble Column](#), *Energy and Fuels*, **32**: 2037-2052 (2018).
- [14] Kim W.-G., Kang H. U., Jung K.-M., Kim S.H. [Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO₂ Absorption](#). *Sep. Sci. Technol.* **43**: 3036-3055 (2008).
- [15] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., Hydarifard M. [Experimental Investigation of the Effect of Nano Heavy Metal Oxide Particles in Piperazine Solution on CO₂ Absorption Using a Stirrer Bubble Column](#). *Energy Fuels*, **32(2)**: 2037-2052 (2018).
- [16] Samadi Z., Haghshenasfard M., Moheb A., [CO₂ Absorption Using Nanofluids in a Wetted-Wall Column with External Magnetic Field](#). *Chem. Eng. Technol.* **37**: 462-470 (2014).
- [17] Lee J. S., Lee J. W., Kang Y. T. [CO₂ Absorption/Regeneration Enhancement in DI Water with Suspended Nanoparticles for Energy Conversion Application](#). *Appl. Energy* **143**: 119-129 (2015).
- [18] Kim J.H., Jung C. W., Kang, Y.T., [Mass Transfer Enhancement During CO₂ Absorption Process in Methanol/Al₂O₃ Nanofluids](#). *Int. J. Heat Mass Transf.* **76**: 484-491 (2014).

- [19] Karimi Darvanjooghi M.H., Pahlevaninezhad M., Abdollahi A., Davoodi S.M., [Investigation of the Effect of Magnetic Field on Mass Transfer Parameters of CO₂ Absorption Using Fe₃O₄ - Water Nanofluid](#). *AIChE J.* doi:10.1002/aic.15571, (2016).
- [20] Wang, T. *et al.* [Enhanced CO₂ Absorption and Desorption by Monoethanolamine \(MEA\)-Based Nanoparticle Suspensions](#). *Ind. Eng. Chem. Res.* **55**: 7830-7838 (2016).
- [21] Rahmatmand B., Keshavarz P., Ayatollahi S. [Study of Absorption Enhancement of CO₂ by SiO₂, Al₂O₃, CNT, and Fe₃O₄ Nanoparticles in Water and Amine Solutions](#). *J. Chem. Eng. Data* **61**: 1378-1387 (2016).
- [22] Nabipour M., Keshavarz P., Raeissi S., [Experimental Investigation on CO₂ Absorption in Sulfinol-M Based Fe₃O₄ and MWCNT Nanofluids](#). *Int. J. Refrig.* **73**: (2016).
- [23] Lu S., Song J., Li Y., Xing M., He Q., [Improvement of CO₂ Absorption Using AL₂O₃ Nanofluids in a Stirred Thermostatic Reactor](#). *Can. J. Chem. Eng.* **93**: 935-941 (2015).
- [24] Jorge L., Coulombe S., Girard-Lauriault P.-L., [Nanofluids Containing MWCNTs Coated with Nitrogen-Rich Plasma Polymer Films for CO₂ Absorption in Aqueous Medium](#). *Plasma Process. Polym.* **12**: n/a-n/a (2015).
- [25] Lu S., Zhao Y., Song J., Li Y., [Experimental Studies of CO₂ Absorption Enhancement in Water-Based Nanofluids of Carbon Nanotubes](#). *Brazilian J. Chem. Eng.* **34**: 597-606 (2017).
- [26] Farzani Tolesorkhi, S., Esmailzadeh, F. & Riazi, M. [Experimental and Theoretical Investigation of CO₂ Mass Transfer Enhancement of Silica Nanoparticles in Water](#). *Pet. Res.* **3**: 370-380 (2018).
- [27] Li S., Ding Y., Du K., Zhang X., [Measurement of Thermophysical Properties of TiO₂-MDEA-H₂O Nanofluids](#). *Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal Jiangsu Univ. (Natural Sci. Ed)*. **34**: (2013).
- [28] Bardool, R., Bakhtyari A., Esmailzadeh F., Wang X., [Nanofluid Viscosity Modeling Based on the Friction Theory](#). *J. Mol. Liq.* **286**: 110923 (2019).
- [29] Zhang N., Zhang X., Pan Z., Zhang Z., [A Brief Review of Enhanced CO₂ Absorption by Nanoparticles](#). *Int. J. Energy and Clean Environ.* **19**: 201-215 (2018).
- [30] Saeidi M., Ghaemi A., Tahvildari K., Mehrdad Sharif A.A., [Exploiting Response Surface Methodology \(RSM\) as a Novel Approach for the Optimization of Carbon Dioxide Adsorption by Dry Sodium Hydroxide](#). *J. Chinese Chem. Soc.*, 1-11(2018).