

# بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر میزان جذب کربن دی‌اکسید با استفاده از نانوسیال آب-آلومینا در برج دیواره مرطوب با استفاده از روش سطح - پاسخ

حامد رشیدی\*، سجاد ممیوند

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

**چکیده:** امروزه استفاده از حلال‌های حاوی نانوذره‌ها برای بهبود نرخ جذب گازهای اسیدی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این مطالعه جذب فیزیکی کربن دی‌اکسید در نانوسیال بر پایه آب حاوی نانوذره‌های آلومینا در برج دیواره مرطوب مورد بررسی قرار گرفته است. از روش سطح-پاسخ با طراحی مرکب مرکزی برای تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد سیستم نانوسیال استفاده شد. در این راستا عملکرد فرایند با اندازه‌گیری ضریب انتقال جرم فاز مایع براساس متغیرهای مستقل، غلظت نانوذره‌ها (۰-۱ g/l)، شدت جریان سیال (۱۰۰-۳۰۰ ml/min) و دمای سیال (۲۵-۴۵ °C) ارزیابی شد. با استفاده از تحلیل واریانس، یک مدل درجه دو جهت پیش‌بینی ضریب انتقال جرم در نانوسیال آب-آلومینا با  $R^2$  برابر ۰/۹۷۷ ارائه شد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که ضریب انتقال جرم در حضور نانوذره‌های آلومینا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. با اضافه کردن ۱ و ۵/۰ گرم در لیتر از نانوذره‌های آلومینا در سیال پایه آب نرخ جذب گاز ۴۷ و ۱۹ درصد افزایش پیدا می‌کند. طبق نتیجه‌های بدست آمده افزایش غلظت نانوذره‌ها و شدت جریان سیال بیشترین تاثیر را بر ضریب انتقال جرم دارند.

**کلمات کلیدی:** نانوسیال، نانوذره‌ها آلومینا، جذب، ضریب انتقال جرم

**KEYWORDS:** Nanofluid, Alumina Nanoparticle, Absorption, Mass Transfer Coefficient.

## مقدمه

خود جذب قابل توجهی دارند. این نانوذره‌ها را می‌توان از مواد گوناگون از جمله: روی اکسید، تیتانیم اکسید، مس اکسید، آلومینا اکسید، سیلیس اکسید انتخاب نمود. مطالعات اخیر بهبود جذب کربن دی‌اکسید با استفاده از نانوسیال‌ها را نشان می‌دهد [۴، ۵]. رشیدی و سهرابی به بررسی اثر حضور نانوذره‌های تیتانیم دی‌اکسید در فرایند جذب کربن دی‌اکسید در برج دیواره مرطوب پرداختند. نتیجه‌های این مطالعه نشان می‌دهد که ضریب انتقال جرم فاز مایع در حضور نانو ذره‌های

افزایش دمای کره زمین در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و غلظت رو به افزایش آن‌ها از مهمترین مسائل زیست محیطی به شمار می‌رود که سبب بروز تغییراتی در شرایط آب و هوایی جهانی شده است. در این میان گاز کربن دی‌اکسید بیشترین تاثیر را به خود اختصاص می‌دهد. در سال‌های اخیر، فناوری نانو به یک روش قابل توجه برای افزایش انتقال جرم و گرما تبدیل شده است [۱-۳]. نانوذره‌های اکسید فلزی به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد

\*E-mail: h\_rashidi@kut.ac.ir

\* عهده‌دار مکاتبات

تا به حال بررسی نشده است.

هدف از این مطالعه بررسی جامع فرایند جذب کربن دی‌اکسید توسط نانوسیال آب - آلومینا در برج دیواره مرطوب با استفاده از روش سطح - پاسخ و مطالعه دقیق ضریب انتقال جرم فاز مایع می‌باشد. در این تحقیق، علاوه بر اثر غلظت نانوذره‌ها، اثر پارامترهای عملیاتی از جمله شدت جریان نانوسیال و دما نیز در نظر گرفته شده است. سپس یک مدل جهت تخمین ضریب انتقال جرم با استفاده از تحلیل واریانس و روش سطح - پاسخ مرکزی جهت تحلیل بهتر نتیجه‌ها و برهمکنش‌های بین پارامترها ارائه شده است.

## مواد و آزمایش‌ها

### شرح دستگاه

در این مطالعه جذب گاز کربن دی‌اکسید خالص در جاذب نانوسیال به وسیله‌ی برج دیواره مرطوب بررسی شده است. شکل ۱ نمایی از برج دیواره مرطوب ساخته شده را نمایش می‌دهد. قطر بیرونی برج ۰/۹۵ سانتی‌متر، ارتفاع سطح تماس گاز-مایع ۱۱/۵ سانتی‌متر و سطح تماس مشترک گاز - مایع برای تشکیل فیلم مایع برابر با سطح جانبی استوانه و براساس قطر و طول استوانه برابر ۳۲/۳ سانتی‌متر مربع می‌باشد. مشخصات و نحوه عملکرد دستگاه در پژوهش قبلی انجام شده، شرح داده شده است [۶]. مطابق شکل ۱، ابتدا یک کیسه آزمایشگاهی گاز آ با فشار اتمسفریک از گاز کربن دی‌اکسید پر می‌شود. سپس، خروجی کیسه با عبور از کالیبراتور حباب صابون به برج وصل می‌شود تا برج عاری از هوا شود. در مرحله بعد، با جریان یافتن سیال بر روی سطح برج و تشکیل فیلم و با ایجاد جریان یکنواختی از سیال و توزیع گاز کربن دی‌اکسید انتقال جرم صورت می‌گیرد. مایع خروجی از برج وارد مخزن شده و دوباره در سیستم گردش پیدا می‌کند. برای اندازه‌گیری جریان گاز جذب شده از یک کالیبراتور حباب صابون استفاده شده است. کالیبراتور حباب صابون از یک ستون شیشه‌ای مدرج و یک حباب‌ساز تشکیل شده است. حباب‌ساز وظیفه تولید حباب در داخل ستون را دارد. با عبور جریان گاز با فشار اتمسفریک از درون ستون شیشه‌ای کالیبراتور، حباب صابون شروع به حرکت در داخل ستون می‌کند. با اندازه‌گیری زمان و مقدار حرکت حباب، سرعت حرکت حباب در داخل ستون مشخص و نرخ حجمی جذب گاز بدست می‌آید. قابل ذکر است که محفظه شماره ۱ فاقد خروجی گاز است و گاز در آن محبوس است. در این تحقیق، هدف اصلی بررسی ضریب انتقال جرم فاز مایع یا همان نانوسیال می‌باشد.

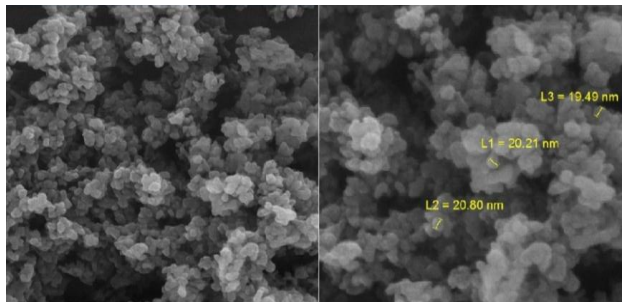
تیتانیم دی‌اکسید افزایش چشمگیری دارد [۶]. پریاسامی و همکار عملکرد انتقال جرم نانوسیال آلومینا با کسر حجمی ۱-۲/۰ درصد از نانوذره آلومینا را برای جذب کربن دی‌اکسید در یک برج دیواره مرطوب<sup>۱</sup> را بررسی کردند. گزارش آنها نشان می‌دهد که کسر حجمی ۰/۶ بیشترین تاثیر در افزایش شار انتقال جرم دارند [۷]. دوآکی و توماس گزارش دادند که افزودن ۰/۰۱ درصد حجمی از نانوذره آلومینا به سیال پایه آب منجر به افزایش ۲۲/۳ درصدی ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید در آب می‌شود [۸]. پیندا و همکاران با استفاده از نانوذره‌های اکسید آلومینا، یک تحقیق آزمایشگاهی برای حذف کربن دی‌اکسید در یک ستون سینی‌دار انجام دادند. در این پژوهش با استفاده از نانوسیال متانول/آلومینا افزایش ۱۰ درصد در میزان جذب کربن دی‌اکسید مشاهده شد [۹]. لو و همکاران نشان دادند که افزایش غلظت نانوذره‌های آلومینا به سیال پایه آب تاثیر معناداری در افزایش نرخ جذب کربن دی‌اکسید و افزایش ضریب انتقال جرم دارد [۱۰]. لی و همکاران نرخ جذب کربن دی‌اکسید را در محلول آبی سدیم کلراید که حاوی نانوذره‌های آلومینا بود بررسی کردند. آزمایشات آنها در غلظت‌های ۰/۱-۰/۰۵ و در دمای ۳۰°C صورت گرفت و در غلظت ۰/۰۱ درصد حجمی به افزایش ۱۱ درصدی از نرخ جذب رسیدند [۱۱]. سرانجام، صمدی و همکاران تاثیر غلظت نانوذره‌های آلومینا و شدت جریان مایع را در میزان جذب کربن دی‌اکسید در آب را در یک برج دیواره مرطوب بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد افزودن ۱ درصد حجمی از نانوذره‌های آلومینا به آب منجر به افزایش ۵۸ درصدی ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید در آب می‌شود [۱۲].

مروری بر مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که افزودن نانوذره‌های سیال پایه می‌تواند تاثیر چشم‌گیری در بهبود افزایش نرخ جذب داشته باشد. اگرچه، رفتار نانوذره‌ها در سیال ممکن است تحت تاثیر پارامترهای عملیاتی دیگر قرار بگیرد.

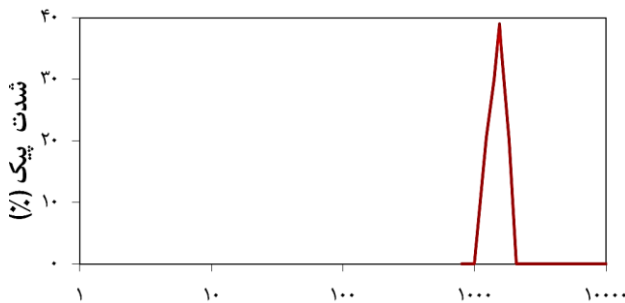
بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اصلی‌ترین روش آزمایشگاهی برای ارزیابی تأثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد نانوسیال بر پایه آلومینا در برج دیواره مرطوب، روش کلاسیک است که میزان تأثیر هر یک از متغیرهای عملیاتی را به صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌کند. یعنی در آزمایش‌های گوناگون تنها یک پارامتر تغییر داده می‌شود در حالی که پارامترهای دیگر ثابت است. بدین ترتیب بررسی هرگونه تعامل احتمالی بین متغیرها امکان‌پذیر نخواهد بود [۱۳]. از طرف دیگر تاثیر دما بر عملکرد نانوسیال بر پایه آلومینا در برج دیواره مرطوب

(۱) Wetted wall column

(۲) Gas Sampling Bag



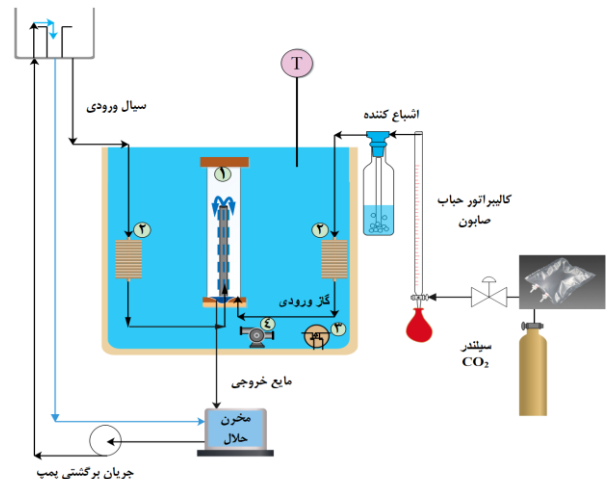
شکل ۲- تصویر SEM از نانوذره‌های آلومینا.



شکل ۳- توزیع اندازه خوشه‌های نانوذره‌های آلومینا در غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر در نانوسیال.

به مدت ۱ ساعت در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  در داخل  $700$  میلی‌لیتر سیال پایه آب دو بار تقطیر با دستگاه اولتراسونیک شرکت ROHS (مدل DSA1000SK<sub>2</sub>) با فرکانس  $40$  KHz، معلق شدند. شکل ۲ تصویر SEM از نانوذره‌های آلومینیوم اکسید را نشان می‌دهد. آلومینا اکسید یکی از مهم‌ترین مواد سرامیکی با ویژگی‌های از قبیل سختی بالا، پایداری بالا، مقاومت به سایش بالا، میزان آبدوستی بالا و شفاف بودن است. آلومینا همچنین به طور گسترده‌ای در ضد حریق، کاتالیست، عایق، پوشش محافظ سطح و مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود [۱۴]. همانطور که از شکل ۲ مشخص است اندازه میانگین ذره‌ها تقریباً  $20$  نانومتر است. برای بررسی نحوه توزیع نانو ذره‌ها در سیال و پایداری محلول از دستگاه زتاسایزر (Malvern Instruments, Nano series, Nano-ZS, UK) استفاده شده است. شکل ۳ توزیع اندازه خوشه نانوذره‌ها در نانوسیال آب - آلومینا با غلظت  $0/5$  گرم بر لیتر را نشان می‌دهد. میانگین اندازه خوشه‌های توزیع شده در نانوسیال  $1540$  نانومتر می‌باشد. به طور کلی، در محلول‌های کلوتیدی، برخورد ناپایدار بین ذره‌ها باعث ایجاد خوشه می‌شود. بنابراین، اندازه نانوذره‌ها در حالت جامد در مقایسه با نانوسیال آلومینا افزایش می‌یابد. مقدار PDI آن  $0/547$  می‌باشد که نشان دهنده توزیع نسبتاً مناسب اندازه ذره‌ها است [۱۵].

آزمایشات در محدوده دمایی  $25-45^{\circ}\text{C}$  با غلظت‌های گوناگونی از ذره‌های نانو از  $1-300$  گرم بر لیتر محلول با جریان سیال از  $100-300$



شکل ۱- طرح‌واره کلی از برج دیواره مرطوب: ۱: WWC، ۲: کویل، ۳: هیتر، ۴: پمپ.

برای همین منظور در فاز گاز از کربن دی‌اکسید خالص استفاده شده است تا مقاومت انتقال جرم در فاز گاز حذف شود. تنها راه خروج گاز کربن دی‌اکسید از محفظه شماره ۱، جذب توسط نانوسیال است. بنابراین با اندازه‌گیری حجم گاز جذب شده و تبدیل آن به مول با استفاده از قانون گاز ایده‌آل می‌توان تعداد مول‌های جذب شده در واحد زمان را بدست آورد. در نهایت، با تقسیم تعداد مول‌های جذب شده در واحد زمان بر سطح انتقال جرم (سطح جانبی استوانه) شار انتقال جرم بصورت آزمایشگاهی از رابطه ۱ بدست می‌آید:

$$N_A = \frac{PQ_g}{RTA} \quad (1)$$

که  $P$  فشار محیط،  $Q_g$  نرخ حجمی جریان گاز،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $T$  دما و  $A$  سطح جانبی استوانه است.

### آماده سازی نانوسیال

یکی از عوامل مهم در بهینه شدن خواص نانوسیالات مسئله پایداری آن‌ها است. تهیه سوسپانسیون یکنواخت و پایدار تأثیر به‌سزایی در بهبود خواص حرارتی و سطح تماس نانوسیال‌ها دارد. یکی از مواردی که بر پایداری نانوسیال تأثیر می‌گذارد پدیده تشکیل خوشه یا تجمع است. عوامل گوناگونی بر این پدیده تأثیر گذارند؛ اندازه ذره‌ها، نوع ذره‌ها، ویژگی‌های سیال پایه، و روش تهیه نانوسیال از جمله این عوامل هستند. برای ایجاد محلول پایدار روش‌های گوناگونی وجود دارد. استفاده از هر کدام از این روش‌ها باید با دقت خاصی انجام شود تا بهترین نتیجه‌ها به دست آید [۱۱]. در این مطالعه برای کاهش تجمع ذره‌ها در سیال پایه، نانوذره‌ها

جدول ۱- مقادیر واقعی و کدگذاری شده متغیرهای مستقل طراحی آزمایش.

متغیرهای مستقل	کد	واحد	سطح بالا	سطح پایین
دما	A:T	°C	۴۵	۲۵
شدت جریان مایع	B:Q <sub>L</sub>	ml/min	۳۰۰	۱۰۰
غلظت نانوذرها	C:C	g/l	۱	۰

$$N_A = k_L^{\text{experimental}} (C_{A_i} - C_{A_L}) \quad (۶)$$

که  $C_{A_i}$  غلظت کربن دی‌اکسید در فصل مشترک و  $C_{A_L}$  غلظت در حلال است. همانطور که اشاره شد، سیال پایه آب دیونیزه است؛ بنابراین مقدار کربن دی‌اکسید ۲ در نانوسیال آب/آلومینا در لحظه‌های ابتدایی انجام آزمایش صفر می‌باشد. با اندازه‌گیری مقدار حجمی گاز جذب شده ( $Q_g$ ) از طریق کالیبراتور حباب صابون و با استفاده از معادله (۱) می‌توان شار انتقال جرم را در هر آزمایش بدست آورد. سپس، با استفاده از معادله (۶) می‌توان ضریب انتقال جرم را در لحظه‌های ابتدایی محاسبه نمود.

### طراحی آزمایش

در تحقیق حاضر، از روش سطح - پاسخ بر اساس طراحی مرکب مرکزی برای مدل‌سازی سیستم استفاده شد. همچنین اثر ۳ متغیر مستقل، هر کدام در ۳ سطح مورد بررسی قرار گرفت. جهت تحلیل و تجزیه نتیجه‌ها از روش سطح - پاسخ استفاده شد. بر اساس طرح مرکب مرکزی  $k_L$  به عنوان تنها پاسخ آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. اطلاعاتی که به عنوان پاسخ اولیه از آزمایش‌ها جمع‌آوری گردید، دمای محیط، دمای سیال، دبی حلال، تغییرات حجمی گاز هستند. سه متغیر مستقل طراحی، یعنی دما، شدت جریان حلال و غلظت نانوذرها، با مقادیر واقعی و کدگذاری شده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

### نتیجه‌ها و بحث

#### اعتبار سنجی

در شکل ۴ مقایسه بین داده‌های تجربی ضریب انتقال جرم فاز مایع بدست آمده از رابطه (۶) با مقادیر پیش‌بینی شده توسط تئوری نفوذ هیگبی از رابطه (۳) برای آب خالص نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتیجه‌های آزمایشات جذب کربن ی اکسید در برج دیواره مرطوب با تئوری نفوذ وجود دارد. به این ترتیب، اعتبار نتیجه‌های بدست آمده در برج جذب دیواره مرطوب آزمایشگاهی مورد استفاده برای جذب کربن دی‌اکسید تایید شده و می‌توان برای محاسبات ضریب انتقال جرم از آن استفاده کرد.

میلی‌لیتر بر دقیقه انجام گرفت. کربن دی‌اکسید استفاده شده ۹۹/۹۹ درصد از شهرک صنعتی فرامان تامین گردید.

### بررسی‌های تئوری

#### برج دیواره مرطوب

قبل از اندازه‌گیری نرخ انتقال جرم کربن دی‌اکسید در نانوسیال، لازم است برج دیواره مرطوب با آب خالص اعتبار سنجی شود و ضریب انتقال جرم تجربی مایع را با ضریب انتقال جرم بدست آمده از رابطه تئوری هیگبی [۱۶] مقایسه کرد. ضریب نفوذ کربن دی‌اکسید در آب خالص و حلالیت کربن دی‌اکسید در آب خالص از طریق روابط ورستیگ، طبق معادلات ۲ و ۳ بدست آمده است [۱۷].

$$D_{CO_2}^{H_2O} (m^2/s) = 2.35 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{2119}{T_{H_2O}(K)}\right) \quad (۲)$$

$$C_{CO_2-H_2O} (\text{mole}/m^3 \cdot \text{pa}) = 3.54 \times 10^{-7} \times \exp\left(\frac{2044}{T_{CO_2}(K)}\right) \quad (۳)$$

بررسی نرخ جذب کربن دی‌اکسید در آب نیازمند یکسری خواص فیزیکی از سیال شامل دانسیته، ویسکوزیته، انحلال پذیری، ضریب نفوذ در دماهای گوناگون و در فشار محیط می‌باشد.

#### ضریب محلی انتقال جرم

بر اساس تئوری هیگبی ضریب انتقال جرم فاز مایع برابر است با:

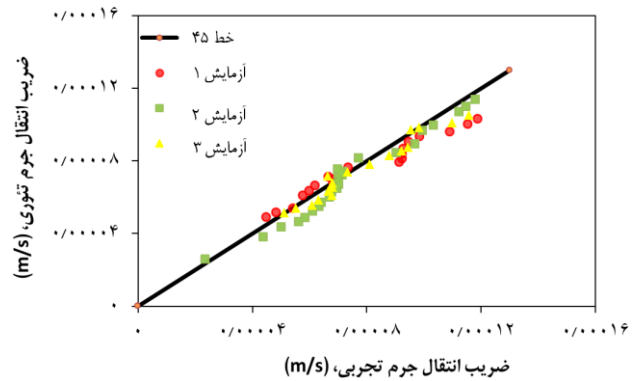
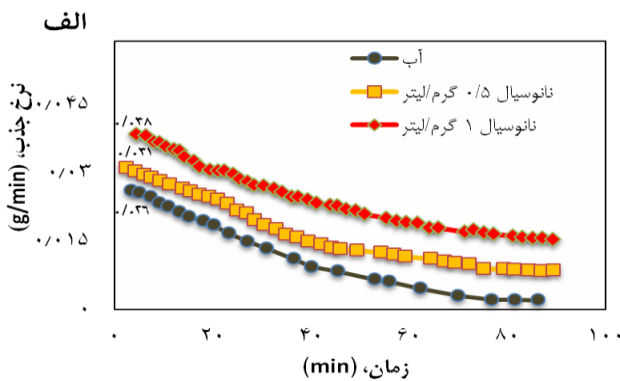
$$k_L^{\text{Theoretica}} = 2 \sqrt{\frac{D_{CO_2-H_2O}}{\pi \times \tau}} \quad (۴)$$

که زمان تماس،  $\tau$ ، از رابطه برد [۱۸] بدست می‌آید.

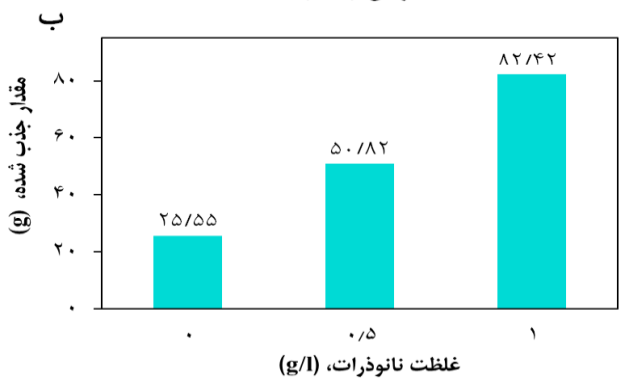
$$\tau = 3h \left(\frac{\rho_l g}{\mu_l}\right)^{-1/3} \left(\frac{3Q_l}{W}\right)^{-2/3} \quad (۵)$$

که  $h$  و  $w$  به ترتیب طول و محیطی از برج دیواره مرطوب،  $\mu$  و  $\rho$  به ترتیب چگالی و ویسکوزیته نانوسیال هستند. با توجه به کم بودن غلظت نانوذرها در سیال پایه آب، می‌توان پارامترهای فیزیکی نانوسیال را پارامترهای سیال پایه آب را در نظر گرفت.

شار انتقال جرم در واقع همان میزان کربن دی‌اکسید جذب شده در واحد سطح برج جذب می‌باشد. در پدیده انتقال جرم، می‌توان شار انتقال را برابر حاصل ضریب انتقال جرم در نیرو محرکه (اختلاف غلظت) تعریف کرد. شار انتقال جرم ( $N_A$ ) و ضریب انتقال جرم محلی ( $k_L$ ) در آزمایشات مطابق معادلات (۱) و (۶) محاسبه می‌گردد.



شکل ۴- مقایسه ضریب انتقال جرم محلی بدست آمده از داده‌های تجربی و تئوری هیگبی.



شکل ۵- نرخ جذب کربن دی‌اکسید در آب و نانوسیال در دمای ۳۵ °C و شدت جریان ۲۰۰ ml/min

### نرخ جذب کربن دی‌اکسید در نانوسیال

شکل ۵-الف یک نمونه از نتیجه‌های بدست آمده آزمایش جذب کربن دی‌اکسید در دمای ۳۵°C و شدت جریان حلال ۲۰۰ ml/min در سه غلظت متفاوت نانوسیال را نشان می‌دهد. نرخ جذب بدست آمده در این شکل حاصل ضرب سطح در شار انتقال جرم از رابطه (۵) می‌باشد. منحنی جذب در شکل ۵-الف نشان می‌دهد که جذب کربن دی‌اکسید با گذشت زمان در یک سیستم بسته کاهش پیدا می‌کند. این امر به دلیل افزایش غلظت کربن دی‌اکسید در حلال و اشباع شدن مایع با گذشت زمان می‌باشد. برای محاسبه ضریب انتقال جرم از اطلاعات بدست آمده در لحظه‌های ابتدایی آزمایش و رابطه (۶) استفاده می‌شود. نرخ جذب در نانوسیال آب - آلومینا در ۴ دقیقه‌ی اول بطور متوسط برای غلظت ۱ و ۰/۵ گرم بر لیتر به ترتیب ۰/۰۳۹ و ۰/۰۳۱ گرم بر دقیقه است. در صورتی که برای آب خالص ۰/۰۲۶ گرم بر دقیقه است. این بدان معناست که ضریب انتقال جرم کربن دی‌اکسید در نانوسیال به ترتیب ۴۷ و ۱۹ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین شکل ۵-ب مقدار کربن دی‌اکسید جذب شده در سیال پایه آب را در طول ۹۰ دقیقه آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵-ب مشاهده می‌شود با اضافه کردن ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر از نانوذره‌های آلومینا به آب؛ میزان جذب کربن دی‌اکسید به ترتیب از ۲۵/۵۵ به ۵۲/۸۲ و ۸۲/۴۲ افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۲- نتیجه‌های حاصل از جذب کربن دی‌اکسید در نانوسیال آب/آلومینا در کلیه آزمایشات

پاسخ	شرایط عملیاتی		
	ضریب انتقال جرم فاز مایع (m/s)	غلظت نانوذره‌ها (g/l)	شدت جریان سیال (ml/min)
۰/۰۰۰۰۴۰۳۶	۰	۲۰۰	۳۵
۰/۰۰۰۰۴۶۵۶	۰/۲۵	۱۵۰	۳۵
۰/۰۰۰۰۹۸۷۱	۰/۲۵	۲۵۰	۳۰
۰/۰۰۰۰۴۶۷۴	۰/۲۵	۱۵۰	۳۰
۰/۰۰۰۰۹۲۰۳	۰/۲۵	۲۵۰	۴۰
۰/۰۰۰۱۱۰۸۹	۰/۵	۲۰۰	۴۰
۰/۰۰۰۰۶۴۷	۰/۵	۱۰۰	۲۵
۰/۰۰۰۰۷۴۶	۰/۵	۲۰۰	۳۵
۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۵	۳۰۰	۳۵
۰/۰۰۰۱۲۰۸	۰/۵	۲۰۰	۳۵
۰/۰۰۰۰۸۹۲	۰/۷۵	۱۵۰	۴۵
۰/۰۰۰۰۱۱۹	۰/۷۵	۲۵۰	۳۰
۰/۰۰۰۱۰۸۹	۰/۷۵	۱۵۰	۳۰
۰/۰۰۰۱۲۹۳	۰/۷۵	۲۵۰	۴۰
۰/۰۰۰۱۱۰۵	۱	۲۰۰	۴۰

نتیجه‌های بدست آمده ضریب انتقال جرم برای کلیه آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر ضریب انتقال جرم بدست آمده در این جدول در محدوده مقادیر گزارش شده در فرایند جذب کربن دی‌اکسید با نانوسیال آب - تیتانیوم دی‌اکسید می‌باشد [۶].

**تحلیل واریانس**

به منظور مدل سازی نتیجه‌ها از معادله درجه‌ی دوم استفاده شده است. مقادیر آنالیز واریانس برای مدل درجه دوم به دست آمده جهت تخمین ضریب انتقال جرم در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این جدول، مقدار  $F$ ،  $۴۱۳/۶۱$  می‌باشد. که از لحاظ آماری معنی‌دار می‌باشد. همچنین مقادیر کمتر از  $۰/۰۵$  برای  $p$ -value نشان دهنده معیار مناسب مدل است. در مورد اثر گذاری پارامترها و نوع اثر گذاری پارامترها بر روی فرایند نتیجه‌ها نشان می‌دهد غلظت نانوذره‌ها و شدت جریان مایع به ترتیب بیشترین تاثیر را بر ضریب انتقال جرم دارند.  $R^2$  کیفیت برازش داده‌های آزمایشی را با مدل مشخص می‌کند. مقدار این پارامتر آماری برای تخمین ضریب انتقال جرم  $۰/۹۷۷۲$  است. با این حال، مشکل این پارامتر آماری این است که برای تعیین مدل، تعداد درجه آزادی را در نظر نمی‌گیرد. برای رفع این نقص، ضریب اصلاح شده ( $R^2$ -Adjusted)، برای تعدیل تعداد گوناگون درجه آزادی در مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر نشان می‌دهد که  $R^2$  و  $R^2$ -adjusted برای مدل تفاوت چندانی ندارد و مدل پارامترهای بی اثر را پوشش نداده است. مقادیر پیش بینی شده  $R^2$  برای ضریب انتقال جرم  $۰/۹۷۷۲$  است که در مقایسه با  $R^2$  تنظیم شده  $۰/۹۷۵۴$  مطابقت قابل قبولی را دارا هستند.

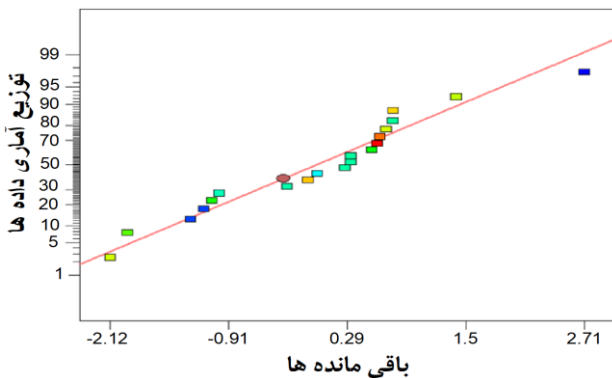
با استفاده از روش آماری سطح-پاسخ، معادله برازش شده بین ضریب انتقال جرم فاز مایع با مدل بدست می‌آید که یک رابطه تجربی بین ضریب انتقال جرم و متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. همان‌طور که از معادله (۷) مشخص است فاکتورهای کد گذاری شده به عنوان متغیر مستقل، و پاسخ طراحی به عنوان متغیر وابسته گزارش شده است.

$$k_L = 5.25 \times 10^{-4} - 2.87 \times 10^{-5}T - 2.3 \times 10^{-7}Q_L + 3.75 \times 10^{-5}C - 8.11 \times 10^{-9}TQ_L + 3.65 \times 10^{-6}TC - 4.71 \times 10^{-7}CQ_L + 4.15 \times 10^{-7}C^2 + 2.78 \times 10^{-9}Q_L^2 + 4.43 \times 10^{-6}C^2 \quad (7)$$

توزیع‌های آماری باقیمانده‌ها در مقابل متغیرهای مستقل نقش مهمی را در تایید توزیع خطای نرمال و ارزیابی مدل نهایی ایفا می‌کند. در این راستا، توزیع آماری داده‌ها و باقی مانده‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نقاط باقی‌مانده نشان می‌دهد که توزیع خطا طبیعی بوده و هیچ تغییری در پاسخ نیاز نیست.

**جدول ۳- تحلیل واریانس مدل تخمین ضریب انتقال جرم فاز مایع نانوسیال**

منبع	مجموع مربعات (۱۰ <sup>۹</sup> )	درجه آزادی	میانگین مربعات (۱۰ <sup>۹</sup> )	F مقدار	P مقدار	معنی‌دار
مدل	۱۵/۴	۹	۱۵/۴	۴۱۳/۶۱	< ۰/۰۰۰۱	معنی‌دار
A	۰/۱۱۸	۱	۰/۱۱۸	۲۸/۵۳	۰/۰۰۰۳	
B	۵/۵۶	۱	۵/۵۶	۱۳۴۳/۰۴	< ۰/۰۰۰۱	
C	۵/۷۳	۱	۵/۷۳	۱۳۸۳/۴۴	< ۰/۰۰۰۱	
AB	۰/۰۳۳	۱	۰/۰۳۳	۷/۹۴	۰/۰۱۸۲	
AC	۰/۱۶۷	۱	۰/۱۶۷	۴۰/۳۳	< ۰/۰۰۰۱	
BC	۰/۲۷۸	۱	۰/۲۷۸	۶۷/۰۶	< ۰/۰۰۰۱	
A <sup>2</sup>	۲/۷۱	۱	۲/۷۱	۶۵۵/۲۶	< ۰/۰۰۰۱	
B <sup>2</sup>	۱/۲۴	۱	۱/۲۴	۲۹۸/۳۷	< ۰/۰۰۰۱	
C <sup>2</sup>	۰/۰۰۱	۱	۰/۰۰۱	۰/۴۷	۰/۵۱	
عدم برازش	۰/۰۳۴	۵	۰/۰۰۷	۵/۰۵	۰/۰۵	بی معنی



**شکل ۶- نمودار توزیع آماری داده‌ها بر حسب باقی‌مانده**

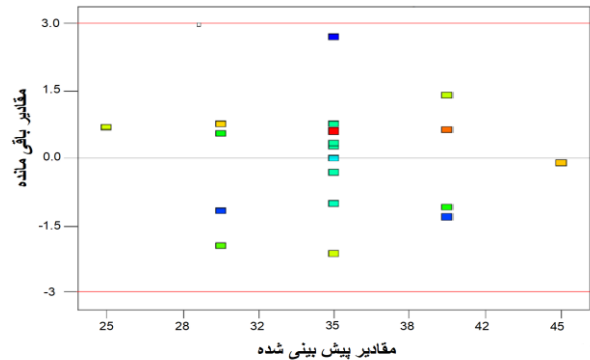
در شکل ۷ نمودار مقدار مانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی شده مدل آورده شده است. نمودار باید دارای پراکندگی تصادفی باشد که نشان‌دهنده طیف ثابت مانده‌ها در سراسر نمودار است.

**اثر متغیرهای مستقل بر روی ضریب انتقال جرم فاز مایع**

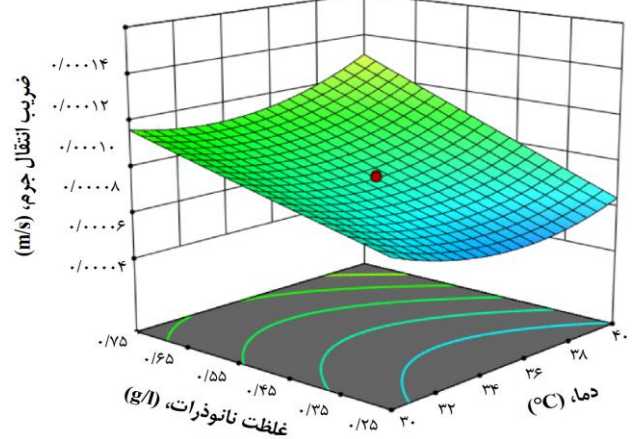
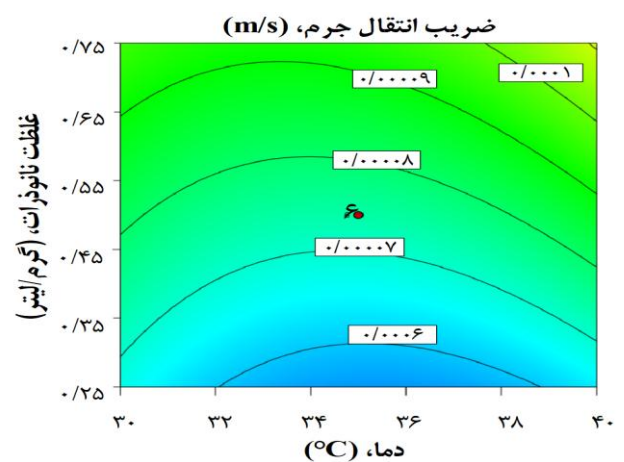
شکل ۸ اثر دما و غلظت ذره‌های نانو را بر ضریب انتقال جرم نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، افزایش غلظت نانو ذره‌ها باعث

یا شاتل در طول فرایند انتقال جرم گاز در نانو سیال موثر می‌باشد [۱۹]. در مکانیسم اثر شاتل، نانوذره‌های پراکنده در سیال در فصل مشترک گاز - مایع مولکول‌های گاز را جذب کرده و در محیط مایع آن را دفع می‌کند. در واقع جذب سطحی و واجذب مولکول‌های گاز در سطح نانو ذره‌ها باعث افزایش انتقال جرم می‌باشد. بیشتر مشاهدات تجربی از سیستم‌های نانوسیال نشان می‌دهد که ضریب انتقال جرم با افزایش درصد ذره‌ها به نسبت چشمگیری افزایش می‌یابد [۲۰]. مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش جریان سیال، ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد. هرچه جریان سیال افزایش پیدا کند حلال، سرعت بیشتری جریان پیدا می‌کند که منجر به افزایش ضریب انتقال جرم، میزان جذب و شار انتقال جرم می‌شود.

در دماهای پایین شیب افزایش انتقال جرم با افزایش شدت جریان بیشتر است. بطور کلی دما یک پارامتر مهم در جذب کربن دی‌اکسید می‌باشد. در جذب فیزیکی، افزایش دما موجب کاهش جذب می‌شود. افزایش دما، افزایش ضریب هنری را در پی دارد که این افزایش موجب کاهش انحلال‌پذیری کربن دی‌اکسید در حلال می‌گردد و مانع از انتقال کربن دی‌اکسید از فاز گاز به مایع می‌شود. با توجه به شکل ۸ و ۹ به نظر می‌رسد که در محدوده دمایی مورد مطالعه اثر دما نسبت به سایر متغیرهای مورد مطالعه ضعیف‌تر است. البته مقادیر  $F$  گزارش شده در جدول ۳ نیز مؤید این مطلب می‌باشد. اثر تغییرات غلظت نانو ذره‌ها در جریان حلال در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است سرعت انتقال جرم با افزایش غلظت ذره‌های نانو و شدت جریان سیال به‌طور مداوم افزایش می‌یابد. در غلظت‌های پایین نانوذره‌ها، با افزایش جریان نانوسیال، ضریب انتقال جرم با شیب بیشتری افزایش پیدا می‌کند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش جریان حلال از  $150 \text{ ml/min}$  به  $250 \text{ ml/min}$ ، در غلظت‌های پایین نانوسیال، مقدار ضریب انتقال جرم از  $0.000381$  به  $0.000868$  متر بر ثانیه می‌رسد. در واقع حرکت براونی<sup>۲</sup> مولکول‌های مایع و برخورد با نانوذره‌ها، باعث شده که نانوذره‌ها حرکت زیگزاگی پیدا کرده و با سرعت حرکت کنند که منجر به ایجاد اغتشاش لایه‌های اطراف ذره‌های نانو می‌شود و یک حرکت همزنی در مقیاس کوچک ایجاد می‌شود و ریز همرفت‌ها به بهبود نفوذ کمک می‌کنند [۲۱]. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، اثر شاتل و حرکت براونی نانوذره‌ها دو مکانیزم برجسته هستند که باعث افزایش جذب گاز در نانوسیال‌ها می‌شود [۱۹]. در جریان‌های پایین، با افزایش غلظت نانوذره‌ها سرعت افزایشی ضریب انتقال بیشتر خواهد شد.



شکل ۷- نمودار باقی مانده‌ها نسبت به پاسخ‌های پیش بینی شده ضریب انتقال جرم کربن دی‌اکسید در نانوسیال آلومینا - آب



شکل ۸- اثر دما و غلظت نانو ذره‌ها بر ضریب انتقال جرم فاز مایع در شدت جریان  $200 \text{ ml/min}$

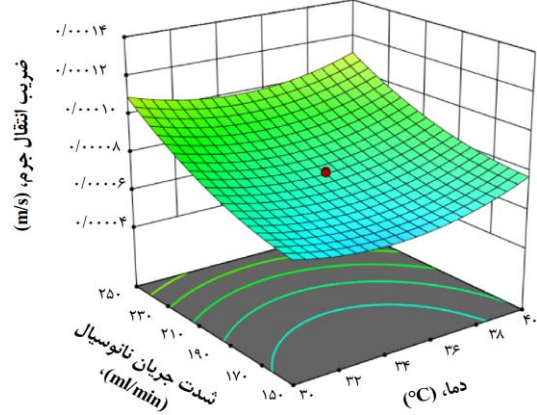
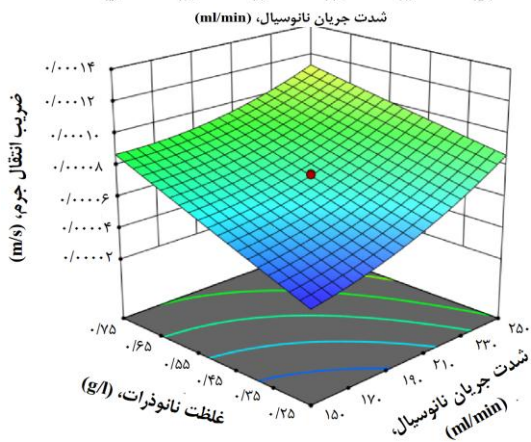
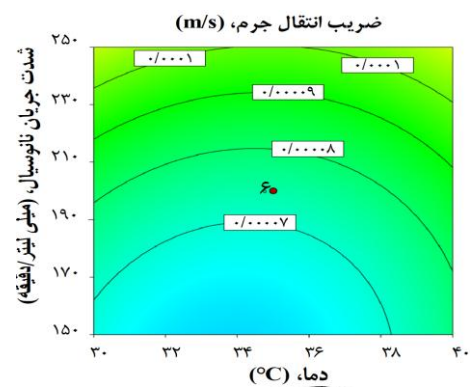
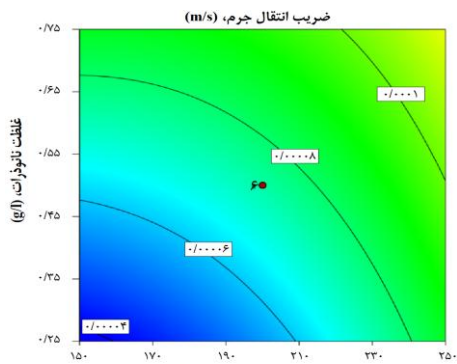
افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود. به‌طوری‌که به‌عنوان مثال برای دمای  $30^\circ\text{C}$  با افزایش غلظت نانو ذره‌ها از  $0.25$  تا  $0.75$  گرم بر لیتر، ضریب انتقال جرم  $0.42$  افزایش یافته است. مکانیسم اثر گرزینگ<sup>۱</sup>

(۱) Grazing Effect

(۲) Brownian motion

جدول ۴- مقایسه ضریب انتقال جرم بدست آمده در این مطالعه با سایر مطالعات

مرجع	شرایط عملیاتی	ضریب انتقال جرم	حلال	راکتور
[۲۲]	۲۰۰ و ۴۰۰ میلی لیتر مخزن تحت تست از متانول خالص تحت غلظت‌های ۰، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ درصد حجمی	۲۶٪ افزایش ضریب انتقال جرم با ۰/۰۱ درصد حجمی از نانوذره‌های آلومینا	متانول- آلومینا	برج حبایی
[۲۳]	۱۰۰۰ میلی لیتر آب خالص تحت غلظت‌های ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۱ و ۵ درصد وزنی از نانوذره	۱۱۷٪ افزایش ضریب انتقال جرم با افزودن نانوذره‌های آلومینا	آب- آلومینا	برج حبایی
[۱۲]	نرخ جریان مایع و گاز به ترتیب در محدوده ۴۰۰-۱۸۰ و ۵۰۰۰-۱۰۰۰ میلی لیتر بر دقیقه؛ تحت غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد حجمی از نانوذره	۵۸٪ افزایش ضریب انتقال جرم در ۱ درصد حجمی از نانوسیال آلومینا	آب-آلومینا	برج دیواره مرطوب
این مطالعه	نرخ جریان مایع ۱۰۰-۳۰۰ میلی لیتر بر دقیقه؛ تحت غلظت‌های ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ گرم بر لیتر از نانوذره با دمای بین ۲۵-۴۵ °C	۴۷٪ و ۱۹٪ افزایش ضریب انتقال جرم با افزودن به ترتیب ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر از نانوذره آلومینا	آب-آلومینا	برج دیواره مرطوب



شکل ۱۰- اثر جریان و غلظت ذره‌های نانو بر ضریب انتقال جرم

شکل ۹- اثر جریان و دما بر میزان ضریب انتقال جرم. با  $k_L$  غلظت ثابت ۰/۵ g/l

مشابه را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۴ غلظت نانوذره‌ها تحت شرایط عملیاتی گوناگون می‌تواند نقش مهمی در افزایش ضریب انتقال جرم داشته باشد.

به طوری که در جریان ثابت ۱۵۰ ml/min با افزایش غلظت نانو ذره از ۰/۲۵ به ۰/۷۵ گرم بر لیتر مقدار ضریب انتقال جرم ۱/۳ برابر می‌شود. انتظار می‌رود که افزایش غلظت نانوذره‌ها اثر شاتل را افزایش دهد که منجر به افزایش میزان انتقال جرم می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه بررسی جامع و عملیاتی اثر نانوذره‌های آلومینا بر میزان جذب کربن دی‌اکسید نسبت به سیال پایه آب و بدست آوردن

تعدای از تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن نانوذره‌ها به سیال پایه منجر به افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود. جدول ۴ مقایسه از ضریب انتقال جرم بدست آمده در این مطالعه و سایر کارهای



(۲) تمام عوامل موثر، اثرات متقابل متغیرهای عملیاتی با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه مشخص گردید که افزایش غلظت نانوذره‌ها و افزایش شدت جریان مایع بیشترین تاثیر را بر ضریب انتقال جرم دارند.

ضریب انتقال جرم در برج دیواره مرطوب انجام گردید. علاوه بر تاثیر غلظت نانوذره‌های آلومینا در میزان جذب گاز، اثر دما و شدت جریان سیال نیز در این آزمایشات بررسی شد. نتیجه‌های حاصل از تحقیق به صورت زیر است:

(۱) نتیجه‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانو ذره‌های آلومینا با غلظت ۱ و ۰/۵ گرم بر لیتر به سیال پایه آب در دمای ۳۵°C به ترتیب باعث افزایش ۴۷ درصدی و ۱۹ درصدی نرخ جذب در ۴ دقیقه اول نسبت به سیال پایه آب می‌شود. مکانیزم دقیقی برای این افزایش جذب در نانوسیال‌ها وجود ندارد اما می‌توان این افزایش را با مکانیزم حرکت براونی و اثر شاتل تفسیر کرد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

## منابع

- [1] Zhang Z., Cai J., Chen F., Li H., Zhang W., Qi W., "Progress in Enhancement of CO<sub>2</sub> Absorption by Nanofluids: A Mini Review of Mechanisms and Current Status," *Renewable Energy*, **118**: 527-535 (2018).
- [۲] رضانی پور، حمید؛ قائمی، احد؛ فن‌آزاده گیلانی، حسین، مطالعه تجربی و بهینه‌سازی جذب سطحی گاز کربن دی‌اکسید توسط جاذب پلیمری میکرو-متخلخل، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۴۰(۲): ۹۵ تا ۱۰۴ (۱۴۰۰).
- [۳] بنیادی، محمد؛ درست، مینا؛ شریفی فرد، حکیمه، بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوسیال حاوی نانوذرات کربن فعال در جذب دی‌اکسید کربن، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۴۱(۱): ۱۵۳ تا ۱۶۳ (۱۴۰۱).
- [4] Lee J.W., Torres Pineda I., Lee J.H., Kang Y.T., "Combined CO<sub>2</sub> Absorption/Regeneration Performance Enhancement by Using Nanoabsorbents," *Applied Energy*, **178**: 164-176 (2016).
- [5] Rahmatmand B., Keshavarz P., Ayatollahi S., "Study of Absorption Enhancement of CO<sub>2</sub> by SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNT, and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles in Water and Amine Solutions," *Journal of Chemical & Engineering Data*, **61(4)**: 1378-1387 (2016).
- [6] Rashidi H., Sohrabi R., "Detailed Performance Model of Carbon Dioxide Absorption Utilizing Titanium Dioxide Nanoparticles in a Wetted Wall Column," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **38(6)**: 13211 (2019).
- [7] Manikandan A.P., Akila S., Deepapriya N., "Mass Transfer Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids for CO<sub>2</sub> Absorption in a Wetted Wall Column," *International Research Journal of Engineering and Technology*, **6**: 1329-1331 (2019).
- [8] Devakki B., Thomas S., "Experimental Investigation on Absorption Performance of Nanofluids for CO<sub>2</sub> Capture," *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, **28(02)**: 2050017 (2020).
- [9] Pineda I.T., Choi C.K., Kang Y.T., "CO<sub>2</sub> Gas Absorption by CH<sub>3</sub>OH Based Nanofluids in an Annular Contactor at Low Rotational Speeds," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **23**: 105-112,(2014).

- [10] Lu S., Song J., Li Y., Xing M., He Q., "Improvement of CO<sub>2</sub> Absorption Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids in a Stirred Thermostatic Reactor," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **93(5)**: 935-941 (2015).
- [11] Lee J.W., Kang Y. T., "CO<sub>2</sub> Absorption Enhancement by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles in NaCl Aqueous Solution," *Energy*, **53**: 206-211 (2013).
- [12] Samadi Z., Haghshenasfard M., Moheb A., "CO<sub>2</sub> Absorption Using Nanofluids in a Wetted Wall Column With External Magnetic Field," *Chemical Engineering & Technology*, **37(3)**: 462-470 (2014).
- [13] Moradi G., Ahmadpour J., Yaripour F., "Systematic Investigation of the Effects of Operating Conditions on the Liquid-Phase Dimethyl Ether (LPDME) Process," *Energy & fuels*, **22(6)**: 3587-3593 (2008).
- [14] Piriya Wong V., Thongpool V., Asanithi P., Limsuwan P., "Preparation and Characterization of Alumina Nanoparticles in Deionized Water Using Laser Ablation Technique," *Journal of Nanomaterials*, 2012 (2012).
- [15] Valeh-e-Sheyda P., Afshari A., "A Detailed Screening on the Mass Transfer Modeling of the CO<sub>2</sub> Absorption Utilizing Silica Nanofluid in a Wetted Wall Column," *Process Safety and Environmental Protection*, **127**: 125-132 (2019).
- [16] Higbie R., "The Rate of Absorption of a Pure Gas Into a Still Liquid During Short Periods of Exposure," *Trans. AIChE*, **31**: 365-389 (1935).
- [17] Versteeg G.F., Van Swaaij W.P., "Solubility and Diffusivity of Acid Gases (Carbon Dioxide, Nitrous Oxide) in Aqueous Alkanolamine Solutions," *Journal of Chemical & Engineering Data*, **33(1)**: 29-34 (1988).
- [18] Bird R.B., "Transport Phenomena," *Appl. Mech. Rev.*, **55(1)**: R1-R4 (2002).
- [19] Esmaili Faraj S.H., Nasr Esfahany M., Jafari-Asl M., Etesami N., "Hydrogen Sulfide Bubble Absorption Enhancement in Water-Based Nanofluids," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **53(43)**: 16851-16858 (2014).
- [20] Kim W.-g., Kang H. U., Jung K.-m., Kim S. H., "Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO<sub>2</sub> Absorption," *Separation Science and Technology*, **43(11-12)**: 3036-3055 (2008).
- [21] Xuan Y., Li Q., Hu W., "Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids," *AIChE Journal*, **49(4)**: 1038-1043 (2003).
- [22] Kim J. H., Jung C. W., Kang Y. T., "Mass Transfer Enhancement During CO<sub>2</sub> Absorption Process in Methanol/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **76**: 484-491 (2014).
- [23] Karamian S., Mowla D., Esmailzadeh F., "The Effect of Various Nanofluids on Absorption Intensification of CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> in a Single-Bubble Column," *Processes*, **7(7)**: 393 (2019).