

## بررسی اثر میدان مغناطیسی بر جذب دیوکسید کربن توسط نانوسیالات مختلف در یک برج جذب حبابی

نگین محمدزاده<sup>۱</sup>، فرزانه رفیعیان<sup>۲</sup>، مسعود حق شناس فرد<sup>۱\*</sup>، محسن نصر اصفهانی<sup>۱</sup>، تورج توکلی<sup>۲</sup>

۱. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۲. گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: دریافت: ۲ مرداد ۱۳۹۸ دریافت پس از اصلاح: ۲۲ آذر ۱۳۹۸ پذیرش نهایی: ۲ بهمن ۱۳۹۸	اثر میدان مغناطیسی بر جذب دیوکسید کربن توسط آب دیونیزه و نانوسیالات آب/اکسید آهن و آب/اکسید آلومینیوم در یک ستون حبابی مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر شدت میدان مغناطیسی، اثر پارامترهای کلیدی مثل دبی جریان گاز، نوع نانوذره، جهت میدان و غلظت نانوسیال بر مقادیر ضریب و شار انتقال جرم بررسی شد. نتایج نشان داد با توجه به قطبی بودن ملکولهای آب، با افزایش شدت میدان مغناطیسی تا ۱۱۳۳ گوس، ضریب انتقال جرم در آب خالص به میزان ۶/۷٪ افزایش میابد. این افزایش در صورتی حاصل می گردد که جهت میدان همراستا با جهت حرکت فاز پیوسته باشد. در صورت اضافه نمودن نانوذرات به آب خالص، ضریب و شار انتقال جرم افزایش میابد. با افزایش غلظت نانوسیال آب/اکسید آهن ضریب انتقال جرم نیز افزایش یافت، ولی در مورد نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم با افزایش غلظت نانوسیال تا ۰/۰۰۵ درصد حجمی، ضریب انتقال جرم نسبت به آب خالص افزایش پیدا کرد، اما با افزایش غلظت، ضریب انتقال جرم کاهش یافت.
کلمات کلیدی: جذب گاز برج حبابی نانوسیال میدان مغناطیسی	
* عهده دار مکاتبات haghshenas@iut.ac.ir	حقوق ناشر محفوظ است.

## ۱- مقدمه

در نتیجه فعالیت انسان، تقریباً هر ساله ۷ گیگا تن کربن به اتمسفر زمین نشر می‌یابد. قسمت زیادی از این کربن به فرم گاز دیوکسید کربن هستند و تقریباً ۳۰٪ از این دیوکسید کربن از نیروگاه‌های با سوخت فسیلی حاصل می‌شوند. به علاوه با بالا رفتن سطح دیوکسید کربن اتمسفر، دمای زمین افزایش می‌یابد. باتوجه به اینکه دیوکسید کربن می‌تواند به عنوان تله حرارتی عمل کند کاهش انتشار دیوکسید کربن یکی از مباحث مهم پژوهشی است [۱-۳]. روش‌های حذف گاز دیوکسید کربن عبارتند از: جذب، جذب سطحی، روش‌های غشایی، روش برودتی، حلقه‌های شیمیایی و سایر روشها. تاکنون روش‌های استفاده از غشا، روش برودتی، حلقه‌های شیمیایی و ... در مرحله عملی گسترش نیافته‌اند و روش‌های جذب و جذب سطحی بیشترین استفاده را داشته‌اند، اگرچه روش جذب سطحی انرژی زیادی را برای عمل واجدبی نیاز دارد و برای سیستم‌های با مقیاس بزرگ مناسب نمی‌باشد [۴]. جذب گاز فرایندی است که طی آن یک مخلوط گازی جهت جداسازی در تماس با یک حلال مایع قرار می‌گیرد تا یک یا تعداد بیشتری از سازنده‌های آن از محلول گازی جدا شود [۵-۶]. مبنای روش جداسازی به روش جذب گاز، انتقال جرم بین فازها می‌باشد. بر مبنای این تحلیل، جزء جداشونده در فصل مشترک دو فاز و با سازوکار نفوذ مولکولی انتقال می‌یابد. در واقع در این روش یک یا چند جزء از توده‌ی فاز گاز به سمت فصل مشترک گاز و مایع نفوذ کرده و پس از وارد شدن به فاز حلال به سمت توده‌ی مایع حرکت می‌کنند [۷]. ضرایب انتقال جرم در طراحی دستگاه‌های انتقال جرم مانند برج‌های تقطیر، برج‌های جذب و دفع و برج‌های خنک‌کننده آب نقش مهمی دارند. افزایش ضریب انتقال جرم سبب افزایش راندمان، کاهش اندازه و هزینه ساخت تجهیزات می‌شود. دانشمندان از دیر باز به دنبال راهکارهایی برای افزایش ضریب انتقال جرم و بهبود فرایندهای انتقال بوده‌اند. در این راستا شناخت چگونگی انتقال جرم و پارامترهای موثر بر ضریب انتقال جرم مانند ماهیت مواد، ضریب نفوذ، ضخامت لایه نفوذ، تلاطم، اعمال میدان‌های خارجی (الکتریکی و مغناطیسی)، افزودن میکروذرات و نانوذرات به سیال پایه می‌تواند در بهبود انتقال جرم موثر باشند [۸-۱۱]. اخیراً تحقیقات زیادی در زمینه نانو تکنولوژی و به ویژه در خصوص استفاده از نانوسیالات انجام شده است. نانو سیال به

عنوان سیالی که نانوذرات در قطره‌های زیر ۱۰۰ نانومتر به صورت پایدار در سیال پایه معلق هستند، تعریف می‌شود [۱۲-۱۳]. افزودن نانوذرات به یک سیال نظیر آب، خواص سیال مانند ویسکوزیته، دانسیته، هدایت حرارتی، کشش سطحی و ضریب انتقال حرارت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. خواص نانوسیالات نسبت به سیال پایه سبب شده است که در صنایع مختلف کاربردهای متفاوتی داشته باشند. تشکیل سوسپانسیون پایدار و عدم کلوخه شدن، ضریب رسانش بالا، ضریب انتقال حرارت بالا، برخی از ویژگی‌های نانوسیالات است که پتانسیل کاربرد آن‌ها را در زمینه انتقال حرارت افزایش داده است [۱۴-۱۸]. از نانوسیال ابتدا برای افزایش انتقال حرارت توسط چوی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۵ استفاده شد [۱۹]. چوی گزارش کرد که ضریب حرارتی سیال پایه تا ۴۰ درصد با افزودن نانوذرات و نانوتیوپ‌ها افزایش می‌یابد. همچنین تحقیقات اخیر دانشمندان نشان داده است که نانوسیالات می‌توانند در تجهیزات انتقال جرم نیز سودمند واقع شوند [۲۰-۲۳]. با توجه به اهمیت فرایند جذب و هزینه‌های مربوط به تجهیزات، محققان همواره سعی کرده‌اند که روش‌هایی برای رسیدن به بیشترین مقدار جذب با کمترین هزینه‌ها ارائه دهند. نانوسیال مغناطیسی یا فروسیال یک سوسپانسیون کلئیدی پایدار از نانوذرات مغناطیسی است. وقتی که نانوسیال مغناطیسی در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، نیروی مغناطیسی به نانوذرات مغناطیسی اعمال می‌شود و تحت این شرایط ذرات در جهت میدان چرخش کرده تا ممان‌های مغناطیسی خود را در جهت میدان قرار دهند [۲۴]. صمدی و همکاران [۲۵] اثر نانوذره را بر روی جذب گاز با سیال پایه آب در یک برج جداره مرطوب بررسی کردند. شدت جرمی آب و گاز و غلظت نانوسیال به عنوان پارامترهای کلیدی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود و بیشترین افزایش در غلظت ۱ درصد حجمی مشاهده می‌شود که ضریب انتقال جرم ۵۵ درصد نسبت به آب خالص افزایش پیدا می‌کند.

در برخی از تحقیقات انجام شده در حوزه استفاده از نانوسیالات در انتقال جرم افزایش و در برخی کاهش انتقال جرم گزارش شده است [۲۶-۳۳]. هدف از مقاله حاضر انجام یک تحقیق دقیق و کامل جهت بررسی و تحلیل نقش شدت و جهت میدان مغناطیسی بر فرایند جذب توسط یک نانوسیال

<sup>۱</sup>Choi

مغناطیسی، منبع تغذیه، تعداد دور سیم، ارتفاع و ضخامت سیملوله، قطر و جنس سیم، مقاومت اهمی و در نهایت وزن و قیمت سیملوله، حالت بهینه انتخاب گردید. سیملوله از ۵۰۰۰ دور سیم مسی با قطر ۰/۸۵ میلی متر در ۵۵ لایه که در هر لایه حدود ۹۰ دور قرار دارد و با وزن ۸/۸ کیلوگرم ساخته شد. سیملوله توانایی تولید میدان مغناطیسی مستقیم با شدت ۱۱۳۳ گوس با بیشینه شدت جریان عبوری ۲/۴ آمپر را دارد.

برای محاسبه شدت میدان مغناطیسی در سیملوله از قانون بیو-ساوار استفاده گردید. معادله ۱ رابطه مربوط به میدان  $\vec{dB}$  ایجاد شده توسط عنصر  $d\vec{l}$  از یک سیم حامل جریان  $I$  را در فاصله  $r$  از آن عنصر را ارائه می دهد. این رابطه یک قانون عکس مجذور است که به قانون بیو - ساوار مشهور است.

$$\vec{dB} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

در این رابطه  $\mu_0$  تراوایی خلاء نام دارد و مقدار آن برابر  $4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$  است. جهت بردار  $d\vec{l}$  در راستای سیم و در جهت شدت جریان  $I$  و بردار  $\hat{r}$  از چشمه میدان (یعنی از عنصر جریان) به سوی نقطه مورد نظر است ( $\vec{r} = r\hat{r}$ ). میدان مغناطیسی کل  $\vec{B}$  در هر نقطه مورد نظر، برابر مجموع تمام میدانهای مغناطیسی عناصر شدت جریان موجود می باشد. با انتگرال گیری از رابطه ۱ و با داشتن تعداد دور سیم، تعداد لایه ها و قطر سیم لوله، شدت میدان بصورت زیر از رابطه ۲ بدست می آید.

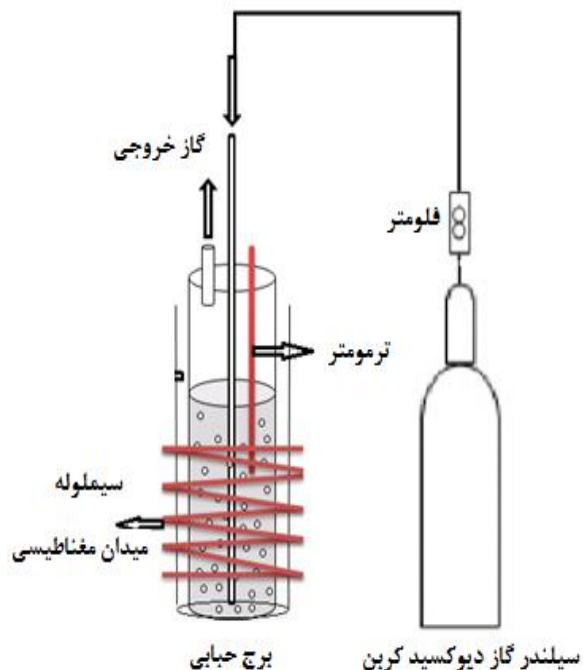
$$\vec{B}_x = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}} \quad (2)$$

جهت میدان مغناطیسی با توجه به جهت جریان الکتریکی می-تواند به سمت بالا یا پایین متغیر باشد. با تولید میدان مغناطیسی در سیملوله، قسمتی از انرژی الکتریکی به خاطر مقاومت اهمی آن، به انرژی گرمایی تبدیل می شود. با توجه به ساختار حلقوی سیملوله و تابعیت انرژی تولید شده با شعاع، بیشترین دما در سطح سیملوله مربوط به شعاع داخلی آن است. به همین منظور استوانه‌ای با شعاع ۵/۵ سانتی متر در اطراف ستون حبایی تعبیه شد تا آب در حال گردش آن گرمای منتقل شده از سیملوله را از سیستم بگیرد. در صورتی که گرمای تولید شده به محیط منتقل نشود، مقدار گرمای تولید شده با گذشت

مغناطیسی (آب و نانوذرات اکسید آهن) ، یک نانوسیال غیر مغناطیسی (آب و نانوذرات آلومینا) و یک سیال پایه بدون نانوذره (آب دیونیزه) می باشد. با مقایسه نتایج می توان به فهم دقیقی از نقش میدان مغناطیسی بر میزان انتقال جرم دست یافت.

## ۲- مواد و روشها

شماتیک سامانه آزمایشگاهی ساخته شده برای انجام آزمایشها در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک ستون شیشه‌ای با قطر ۴ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر می باشد که فرآیند جذب در این محفظه انجام می گیرد. حلال که می تواند آب بدون یون یا نانوسیال باشد درون برج قرار گرفته و گاز دیوکسید کربن از طریق کپسول پس از عبور از روتامتر از بالای برج وارد یک سیستم پخش کننده شعاعی گاز می گردد و بصورت حبابهای ریز درون فاز مایع پخش می شود. در هر تست ۲۰۰ سی سی نانوسیال مورد استفاده قرار گرفت که ارتفاع سیال درون ستون به حدود ۱۶ سانتی متر می رسد.



شکل ۱: شماتیک برج حبایی مجهز به میدان مغناطیسی

در این پژوهش با طراحی و ساخت سیملوله و اضافه نمودن آن به دستگاه، امکان بررسی اثرات میدان مغناطیسی بر روی فرآیند جذب گاز دیوکسید کربن فراهم گردید. با در نظر گرفتن پارامترهای مهم در طراحی سیملوله مانند شدت میدان

از شروع آزمایش)، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ دقیقه نمونه‌گیری انجام شد.

از روابط ذیل میتوان ضریب و شار انتقال جرم را در هر آزمایش محاسبه نمود:

$$\ln \left( \frac{C_{CO_2} - C_{CO_2, bulk}}{C_{CO_2} - C_{CO_2, 0}} \right) = -k_1 a t \quad (3)$$

$$Na = k_1 a (C_{CO_2} - C_{CO_2, 0}) \quad (4)$$

در روابط فوق  $kl$  ضریب انتقال جرم در فاز مایع،  $kg$  ضریب انتقال جرم در فاز گاز،  $C$  غلظت،  $t$  زمان و  $Na$  شار انتقال جرم می باشد.

برای اندازه‌گیری غلظت گاز دی‌اکسید کربن در آب یا نانوسیال از تیتراسیون غیر مستقیم با شناساگر رنگی استفاده شد.

## ۲-۱ روش طراحی آزمایش‌ها

در سال‌های اخیر محققان موفق به ارائه روشی برای انجام آزمایش‌ها شده‌اند که با استفاده از آن می‌توان به تعیین اثر عوامل در محدوده مورد بررسی، برهمکنش بین عوامل، به دست آوردن شرایط بهینه همراه با کاهش تعداد آزمایش‌ها رسید. در نتیجه، شیوه فوق کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان را به دنبال دارد. امروزه طراحی آزمایش‌ها برای به دست آوردن شرایط بهینه در مطالعات گوناگون کاربرد زیادی یافته است [۳۴-۳۵]. پارامترهایی که با توجه به امکانات موجود و مطالعات پیشین در این پژوهش اثرشان مورد بررسی قرار گرفت عبارتند از نوع نانوذره، دبی گاز ورودی، غلظت نانوسیال و شدت میدان مغناطیسی. در این پژوهش از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد این روش ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس برای تحلیل نتایج دارد. روش تاگوچی شامل روش طراحی آزمایش‌ها برای تعیین میزان تأثیر عوامل بر پاسخ و به دست آوردن شرایط بهینه سیستم می‌باشد [۳۶]. تأثیر درصد حجمی دی‌اکسید کربن ورودی، دمای گاز ورودی، دمای نانوسیال، فشار، نوع توزیع‌کننده‌ی گاز و نیز قطر و ارتفاع ستون در نظر گرفته نشده است. دمای سیستم در  $1 \pm 25^\circ C$  و فشار آن، فشار محیط (تقریباً ۱ اتمسفر) قرار داده شد. اثر دو نوع نانوذره (اکسید آلومینیوم و اکسید آهن) مورد بررسی قرار گرفت

زمان افزایش می‌یابد و این افزایش با گذشت زمان تسریع می‌گردد. برای تبدیل کردن جریان AC خروجی از منبع تغذیه به جریان DC، از یک پلی دیود استفاده شد. لازم به ذکر است با توجه به پایین بودن شدت میدان مغناطیسی حاصل از سیم لوله، اثرات جانبی بر سلامت فرد آزمایش‌کننده بسیار ناچیز می‌باشد، ضمن اینکه این میدان با افزایش فاصله با توان دوم کاهش می‌یابد. سه نوع حلال شامل آب بدون یون، نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم و نانوسیال آب/اکسید آهن با غلظتهای متفاوت جهت جداسازی گاز دی‌اکسید کربن مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهش برای تهیه نانوسیال از آب بدون یون به عنوان سیال پایه استفاده شد. نانوسیال اکسید آهن با پوشش دهنده سطحی اولئیک اسید و غلظت اولیه ۷ درصد حجمی ساخت شرکت Plasmachem GmbH آلمان برای انجام آزمایش‌ها انتخاب و خریداری گردید. متوسط قطر نانوذرات ۸ نانومتر و دانسیته آن ۵/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. نانوذرات اکسید آلومینیوم از شرکت Nanoamor آمریکا خریداری شده و به صورت غیر مستقیم یا دو مرحله ای با غلظت‌های مورد نظر به نانوسیال تبدیل شدند. متوسط قطر نانوذرات ۸۰ نانومتر و دانسیته آن ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. جهت توزیع یکنواخت و مناسب نانوذرات، پس از افزودن نانوذرات به سیال پایه محلول به مدت حدود یک ساعت زیر همزن مکانیکی قرار می‌گیرد. از این همزن جهت جلوگیری از کلوخه شدن نانوذرات در زمان اضافه شدن به سیال پایه استفاده می‌شود. برای همگن سازی محلول، از یک همزن مافوق صوت استفاده می‌شود. این دستگاه با ایجاد امواج شدید فشاری در محلول باعث تولید و انفجار حباب‌ها و تولید موج ضربه‌ای با انرژی کافی برای شکستن پیوند ها می‌شود. نیروی برشی حاصل از انفجار حباب و همچنین از جریان‌های اغتشاشی ناشی از ارتعاش صوتی برای همگن سازی نانوسیال استفاده می‌شود. پس از تهیه نانوسیال و آماده سازی ظروف نمونه‌گیری، نانوسیال به داخل ستون حبابی منتقل شده و گاز دی‌اکسید کربن از بالای ستون وارد می‌شود. از لحظه ورود گاز، زمان اندازه‌گیری می‌شود زیرا برای بدست آوردن ضریب انتقال جرم باید در فواصل زمانی مختلف، غلظت گاز درون نانوسیال اندازه‌گیری شود. در زمان‌های معین از محل خروج گاز توسط پیپت ۲ سی سی نمونه گرفته شده و به داخل ظرف نمونه منتقل می‌شود. در هر تست ۲۰۰ سی سی نانوسیال تهیه شده و از زمان ورود گاز در فواصل زمانی ۰ (قبل

بالا در آب خالص ملاحظه می‌شود. با افزایش دبی گاز ضمن زیاد شدن تلاطم سامانه، ضریب انتقال جرم ( $k_L$ ) افزایش می‌یابد و از سوی دیگر با افزایش ماندگی گاز ناشی از افزایش دبی آن فاز، سطح ویژه ( $a$ ) نیز روند صعودی خواهد داشت، لذا ضریب انتقال جرم حجمی که حاصل ضرب این دو پارامتر است با زیاد شدن دبی گاز بیشتر خواهد شد. با توجه به شکل ۲ ملاحظه می‌شود که زمانیکه جهت میدان از بالا به پایین یعنی در جهت حرکت فاز مایع است، با افزایش شدت میدان مغناطیسی، ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد و در جهت مخالف آن، با افزایش شدت میدان مغناطیسی، برای ضریب انتقال جرم روند کاهش وجود دارد. مولکول‌های آب قطبی هستند، هنگامی که تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند گشتاور دو قطبی‌های مغناطیسی تشکیل می‌شود که تمایل دارند در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرند و میدان مغناطیسی حرکت ثانویه به مولکول‌های آب وارد می‌کند. بنابراین در لایه مرزی اغتشاشی ایجاد می‌کند که باعث افزایش انتقال جرم می‌شود. بیشترین افزایش در ضریب انتقال جرم در حضور میدان مغناطیسی نسبت به حالتی که میدان اعمال نشده است در دبی  $0.28 \text{ Lit/min}$  و در شدت  $1133$  گوس به اندازه  $6/75\%$  مشاهده می‌شود.

و سه پارامتر دیگر در سه سطح مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور حفظ تعادل جدول طراحی آزمایش‌ها و با توجه به محدودیت مواد در دسترس، برای هر نوع نانوذره یک جدول با ۹ آزمایش با یک بار تکرار انتخاب شد. در جدول ۱ طراحی آزمایش برای هر دو نوع نانوذره ارائه شده است.

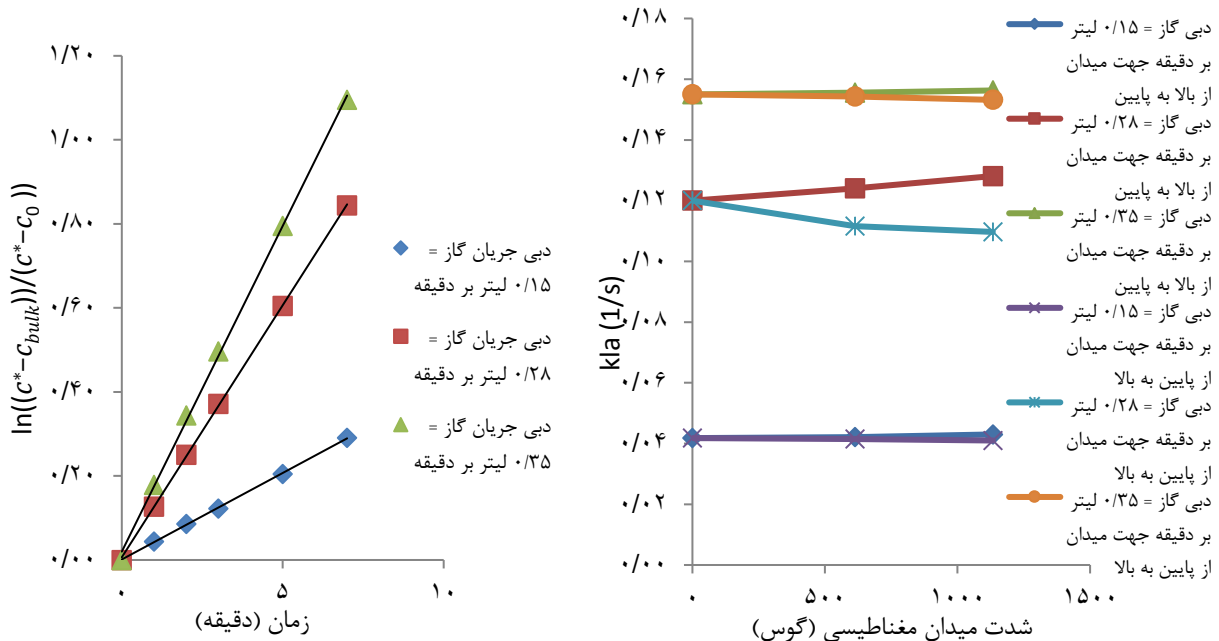
### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱ نتایج آزمایش‌ها با آب خالص

به منظور تست دستگاه و بررسی اثر دبی گاز و شدت میدان مغناطیسی و تهیه نمونه‌های شاهد، تست‌های ابتدایی بر روی آب خالص انجام شد. بدین صورت آزمایش‌ها در سه سطح دبی گاز ( $0.15$  و  $0.28$  و  $0.35 \text{ Lit/min}$ ) و سه سطح شدت میدان مغناطیسی ( $0$  و  $613$  و  $1133$  گوس) در دو جهت میدان از بالا به پایین و پایین به بالا انجام شد. با توجه به رابطه ۳ جهت یافتن ضریب انتقال جرم می‌بایست نمودار تغییرات لگاریتمی غلظت دی‌اکسید کربن در آب بر حسب زمان ترسیم شود. در شکل ۲ اثر تغییرات دبی گاز بر ضریب انتقال جرم (شیب نمودار لگاریتمی) و همچنین تغییرات  $k_L a$  بر حسب شدت میدان مغناطیسی در دو جهت بالا به پایین و پایین به

جدول ۱: جدول طراحی آزمایش‌ها برای هر دو نوع نانوسیال

شماره آزمایش	شدت میدان مغناطیسی (گوس)	غلظت نانوسیال (درصد حجمی)	دبی گاز ورودی (لیتر بر دقیقه)
۱	۰	۰/۰۰۵	۰/۱۵
۲	۶۱۳	۰/۰۱	۰/۱۵
۳	۱۱۳۳	۰/۱	۰/۱۵
۴	۶۱۳	۰/۰۰۵	۰/۲۸
۵	۱۱۳۳	۰/۰۱	۰/۲۸
۶	۰	۰/۱	۰/۲۸
۷	۱۱۳۳	۰/۰۰۵	۰/۳۵
۸	۰	۰/۰۱	۰/۳۵
۹	۶۱۳	۰/۱	۰/۳۵



شکل ۲: نمودار تغییرات لگاریتمی غلظت دی‌اکسید کربن در آب بر حسب زمان و تغییرات  $kLa$  بر حسب شدت میدان مغناطیسی

نمودارهای اثر سه پارامتر مورد بررسی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۳ ملاحظه می‌شود که افزایش دبی جریان گاز، افزایش ضریب انتقال جرم حجمی را به همراه دارد. علت آن نیز افزایش تلاطم در نانوسیال و افزایش سطح انتقال جرم می‌باشد. افزایش غلظت نانوذره در محدوده مورد بررسی، کاهش ضریب انتقال جرم حجمی را به همراه دارد. یکی از دلایلی که می‌توان بیان کرد ته نشینی نانوذرات و ناپایداری نانوسیال با افزایش غلظت نانوذرات می‌باشد. نتایج جراردی و همکارانش [۳۷] در مورد نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم نشان داده که با افزایش غلظت نانوسیالات ضریب نفوذ کاهش می‌یابد. تئوری که آن‌ها برای این حالت ارائه کردند بدین صورت است که در سیستم‌های کلوئیدی مثل نانوسیالات یک لایه نازک از سیال پایه روی ذرات می‌چسبد و همراه با ذره حرکت می‌کند. این ذرات نسبت به ذرات آزاد در سیال دارای ضریب نفوذ کمتری هستند. با افزایش غلظت نانوذرات تعداد این ذرات نیز بیشتر شده و ضریب نفوذ سیال کاهش می‌یابد. با توجه به شکل، افزایش شدت میدان مغناطیسی به مقدار بسیار کمی سبب افزایش ضریب انتقال جرم حجمی شده و میتوان گفت اثر میدان بر نانوسیال آب/آلومینیوم ناچیز است که این روند با توجه به جدول تحلیل واریانس نیز مشخص شد.

### ۲-۳- نتایج آزمایش‌ها با نانوسیال آب/اکسید

#### آلومینیوم

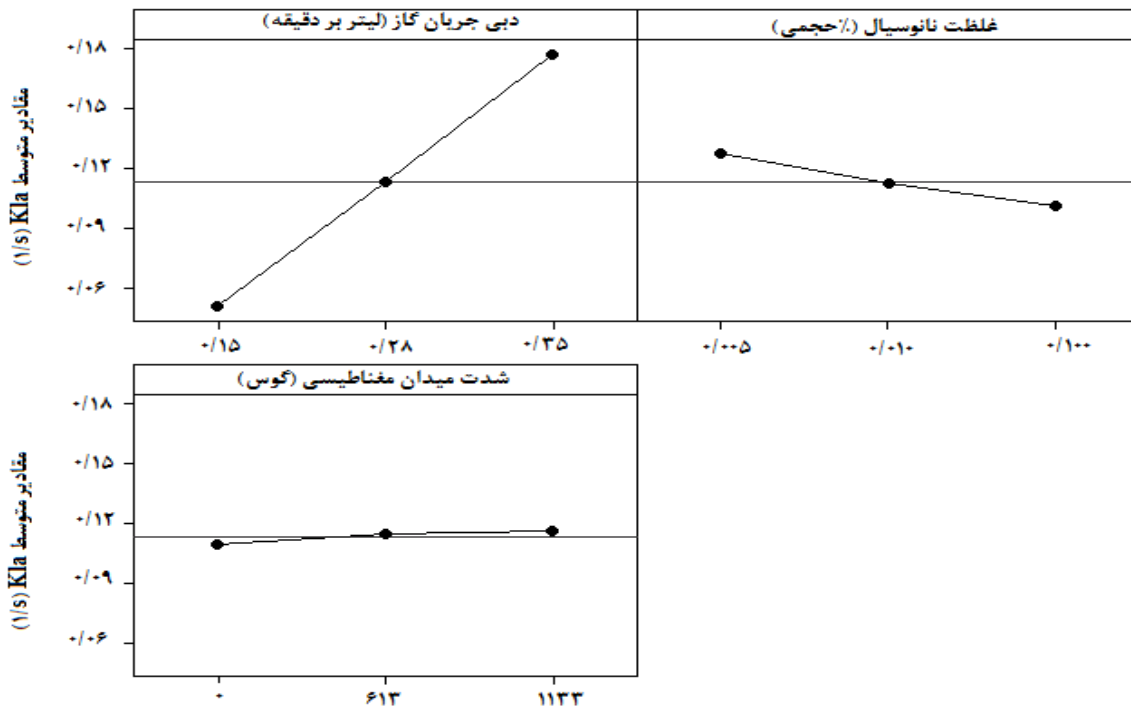
طبق طراحی آزمایش صورت گرفته به روش تاگوچی به منظور بررسی اثر سه پارامتر دبی گاز، غلظت نانوسیال و شدت میدان مغناطیسی، آزمایش‌ها در سطوح تعیین شده انجام شد. در جدول ۲ نتایج تحلیل واریانس که توسط نرم افزار minitab بدست آمده است، ارائه گردیده است. با توجه به سطح اطمینان که ۰/۹ انتخاب شده است، در صورتیکه مقدار P یک عامل از ۰/۱ کوچکتر باشد و نسبت F مربوطه از نسبت F بحرانی (بر اساس درجه آزادی هر عامل و درجه آزادی خطا از جدول آماری بدست می‌آید) بزرگتر باشد، آن پارامتر مهم تلقی می‌شود. با توجه به جدول ۲ دو پارامتر دبی جریان گاز و غلظت نانوذره مهم شناخته شده و پارامتر شدت میدان مغناطیسی کم اهمیت اعلام شد. بررسی اثر شدت میدان مغناطیسی بر روی ضریب انتقال جرم حجمی نانوسیال اکسید آلومینیوم به این دلیل در نظر گرفته شد که سیال پایه آن، آب بود و میدان مغناطیسی بر روی مولکول‌های قطبی آب تأثیرگذار است، ولی با توجه به دو پارامتر دیگر این پارامتر مهم اعلام نشد.

سطح غلظت نانوذره و بیشترین سطح دبی جریان گاز شاهدیم. حالت بهینه، آزمایش شماره ۷ جدول طراحی آزمایش‌ها می- باشد.

با توجه به این نمودارها ملاحظه می‌شود که با افزایش غلظت نانوذره، روند کاهشی در مقدار ضریب انتقال جرم حجمی مشاهده می‌شود و با افزایش دبی، روند افزایشی مشاهده می- شود. بیشترین افزایش در ضریب انتقال جرم را در پایین‌ترین

جدول ۲: تحلیل واریانس برای ضریب انتقال جرم حجمی نانوسیال اکسید آلومینیوم

پارامترها	درجه آزادی	میانگین مربعات خطا	متوسط مربعات خطا یا واریانس	نسبت F	F بحرانی	مقدار P	اهمیت
دبی گاز	۲	۰/۰۲۳۷۲۶	۰/۰۱۱۸۶۳	۲۲۸/۲۳	۹<	۰/۰۰۴	مهم
غلظت نانوسیال	۲	۰/۰۰۱۰۵۸	۰/۰۰۰۵۲۹	۱۰/۱۷	۹<	۰/۰۸۹	مهم
شدت میدان	۲	۰/۰۰۰۰۷۱	۰/۰۰۰۰۳۵	۰/۶۸	۹>	۰/۵۹۶	کم اهمیت
خطای باقیمانده	۲	۰/۰۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۰۵۲				
کل	۸	۰/۰۲۴۹۵۹					



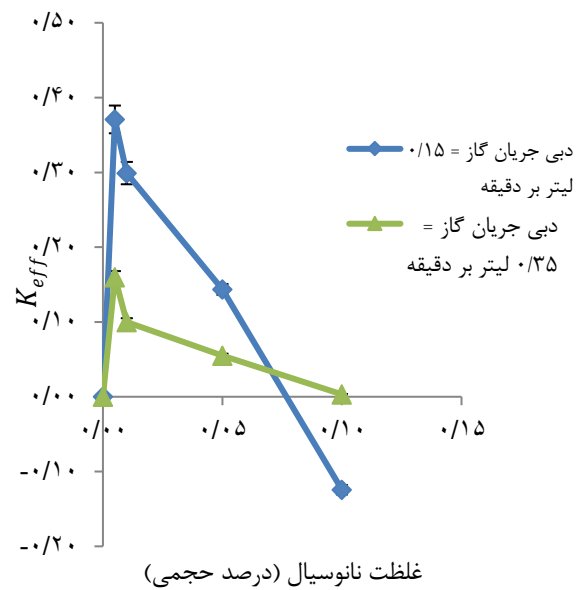
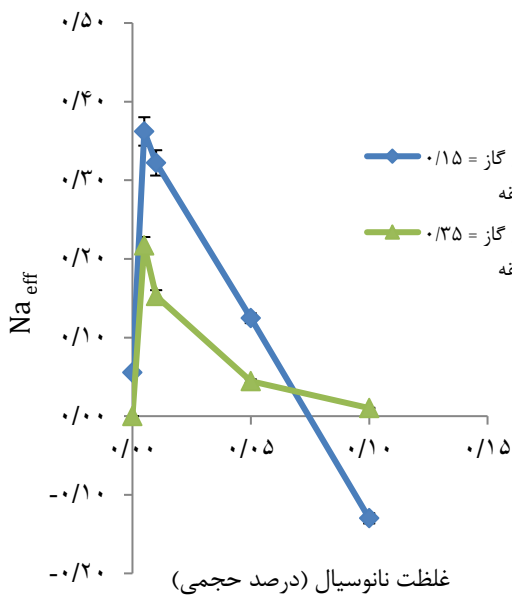
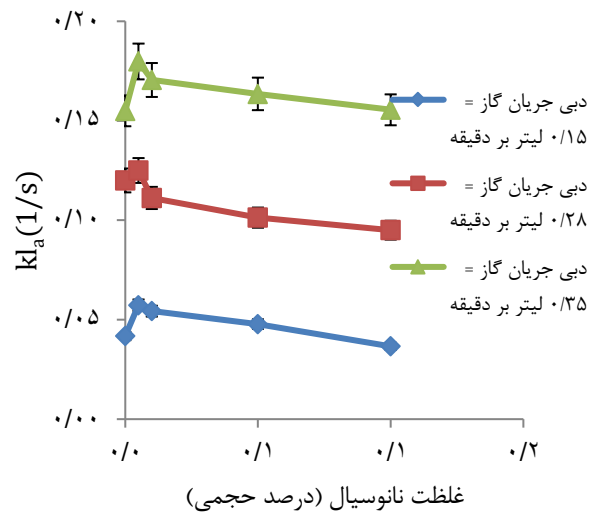
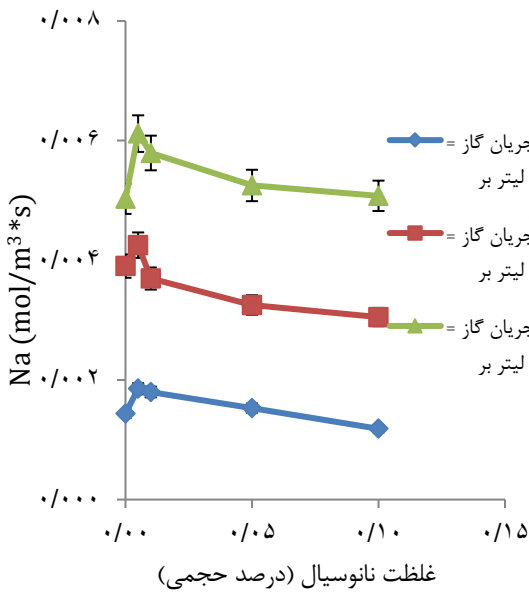
شکل ۳ اثر دبی گاز، غلظت نانوذره و میدان مغناطیسی بر ضریب انتقال جرم نانوسیال اکسید آلومینیوم

$$Na_{eff} = \frac{Na_{nf} - Na_{bf}}{Na_{bf}} \quad (6)$$

انتقال جرم نانوسیال و  $k_{la_{bf}}$  ضریب انتقال جرم موثر،  $k_{la_{nf}}$  ضریب انتقال جرم موثر،  $Na_{nf}$  شار انتقال جرم نانوسیال و  $Na_{eff}$  شار انتقال جرم موثر،  $Na_{bf}$  شار انتقال جرم نانوسیال و  $Na_{bf}$  شار انتقال جرم سیال پایه می‌باشد.

با توجه به اهمیت دو پارامتر دبی گاز و غلظت نانوذره، آزمایش‌های بیشتری خارج از طراحی آزمایش‌ها انجام شد و نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. روابط ذیل جهت تعریف ضریب انتقال جرم موثر و شار انتقال جرم موثر ارائه شدند:

$$k_{la_{eff}} = \frac{k_{la_{nf}} - k_{la_{bf}}}{k_{la_{bf}}} \quad (5)$$



شکل ۵ تغییرات شار و شار موثر انتقال جرم با غلظت نانوسیال

شکل ۴ تغییرات ضریب انتقال جرم و ضریب موثر انتقال جرم با غلظت نانوسیال



## ۳-۳- نتایج آزمایش‌ها با نانوسیال آب/اکسید

## آهن

طبق طراحی آزمایش صورت گرفته به روش تاگوچی به منظور بررسی اثر سه پارامتر دبی گاز، غلظت نانوسیال و شدت میدان مغناطیسی، آزمایش‌ها در سطوح تعیین شده انجام شده و نتایج آن‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. در جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس که توسط نرم افزار minitab بدست آمده است، ارائه گردیده است. محاسبات انجام شده بر اساس روش سیگنال به نویز توسط نرم افزار صورت گرفت.

با توجه به جدول ۳ هر سه پارامتر دبی جریان گاز، غلظت نانوسیال و شدت میدان مغناطیسی مهم اعلام شدند. در شکل ۶ نمودارهای اثر سه پارامتر مورد نظر نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جریان گاز، همانند آزمایش‌های آب و نانوسیال اکسید آلومینیوم، ضریب انتقال جرم افزایش میابد. در محدوده مورد بررسی غلظت نانوسیال اکسید آهن، با افزایش غلظت نانوسیال، شاهد افزایش در ضریب انتقال جرم حجمی هستیم. حرکت براونی و اثر شاتل یا اثر گریزنگ<sup>۴</sup> دو مکانیزم غالبی هستند که انتقال جرم و جذب در نانوسیالات را توجیه می‌نمایند [۴۰]. با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه حرکات براونی نانوذرات نیز افزایش می‌یابند. با افزایش حرکت براونی نانوذرات، گردابه‌ها و میکرو جابجایی درون نانوسیال نیز افزایش یافته و باعث ایجاد اغتشاش در لایه مرزی می‌شود. همچنین به دلیل برخورد حباب‌ها با نانوذرات و شکسته شدن آن‌ها و افزایش سطح انتقال جرم، افزایش ضریب انتقال جرم مشاهده می‌شود. مکانیسم دیگر مکانیزم شاتل نام دارد که به جذب سطحی در لایه ای اطراف نانوذرات در فصل مشترک گاز-مایع مربوط می‌باشد. بر طبق این مکانیزم، نانو ذرات در محیط فاز مایع، گاز را رها می‌کنند که همین پدیده باعث افزایش شدت انتقال جرم می‌شود [۴۱]. وی دونگ<sup>۵</sup> و همکاران علت افزایش ضریب انتقال جرم حجمی در حضور نانوذرات مغناطیسی را تجمع نانوذرات روی سطوح حباب‌ها بیان کردند که به همین دلیل تنش سطحی کاهش می‌یابد و گرادیان تنش سطحی شکل می‌گیرد و اثر جابجایی مارانگونی در محلول بیشتر اعمال می‌شود، که منجر به تلاطم شدید و بهبود فرآیند انتقال جرم می‌شود [۴۲]. زمانیکه نانوسیال مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، نانوذرات مغناطیسی که به واسطه انرژی حرارتی خود دارای

همان‌طور که در شکل ۴ نمایان است ضریب انتقال جرم نانوسیال ابتدا نسبت به آب افزایش میابد و با افزایش غلظت نانوذرات، ضریب و شار انتقال جرم کاهش می‌یابد. در غلظت ۰/۰۵٪ حجمی از نانوسیال اکسید آلومینیوم، ماکزیمم افزایش را در ضریب انتقال جرم مشاهده می‌کنیم و این غلظت، غلظت بهینه می‌باشد و در غلظت‌های بیشتر به دلیل گفته شده روند کاهش را در ضریب انتقال جرم حجمی و شار انتقال جرم مشاهده می‌کنیم. در غلظت بهینه به دلیل حرکت براونی نانوذرات که سبب به وجود آمدن گردابه و میکرو جابجایی درون نانوسیالات می‌گردد و همچنین باعث ایجاد اغتشاش در لایه مرزی می‌شود و به دلیل برخورد حباب‌ها با نانوذرات و شکسته شدن آن‌ها و افزایش سطح انتقال جرم، افزایش ضریب انتقال جرم حجمی و شار انتقال جرم را نسبت به آب خالص شاهدیم. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در دبی ۰/۱۵ Lit/min ضریب انتقال جرم موثر نسبتاً بزرگتر است و این به این دلیل است که در ستون حبابی نانوذرات پایدار با حباب‌های گاز برخورد کرده و حباب‌های گاز را به حباب‌های کوچکتر می‌شکنند و سبب افزایش سطح انتقال جرم می‌شوند [۱۲]. در دبی ۰/۱۵ Lit/min که قطر حباب‌ها نسبت به دبی‌های بیشتر بزرگتر است، اثر شکسته شدن حباب‌ها توسط نانوذرات نمایان‌تر می‌باشد. روند تغییرات شار انتقال جرم نیز همانند ضریب انتقال جرم حجمی می‌باشد. آزمایشات مشابهی توسط جانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۳۸] جهت ارزیابی میزان جذب دیوکسید کربن در نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب انجام شده است. روند افزایش-کاهش بصورت مشابه در کار تحقیقاتی جانگ نیز مشاهده می‌شود و غلظت بهینه نانوسیال آلومینا ۰/۰۱ درصد حجمی گزارش شده است. بصورت مشابه تحقیقاتی توسط پیندا<sup>۳</sup> و همکاران [۳۹] بر روی جذب دیوکسید کربن در نانوسیال آلومینا انجام شده است. بر طبق نتایج حاصل مشخص شد با افزایش غلظت نانوسیال شدت جذب گاز ابتدا افزایشی و سپس کاهش می‌یابد، ضمن اینکه انتقال جرم در نانوسیال آلومینا از آب خالص بیشتر می‌باشد. روند یکسان نتایج در کار تحقیقاتی حاضر با دیگر پژوهش‌ها نشان دهنده صحت نتایج حاصل در این کار تحقیقاتی می‌باشد.

<sup>5</sup> WeiDong<sup>2</sup> Jang et al.<sup>3</sup> Pineda et al.<sup>4</sup> Grazing

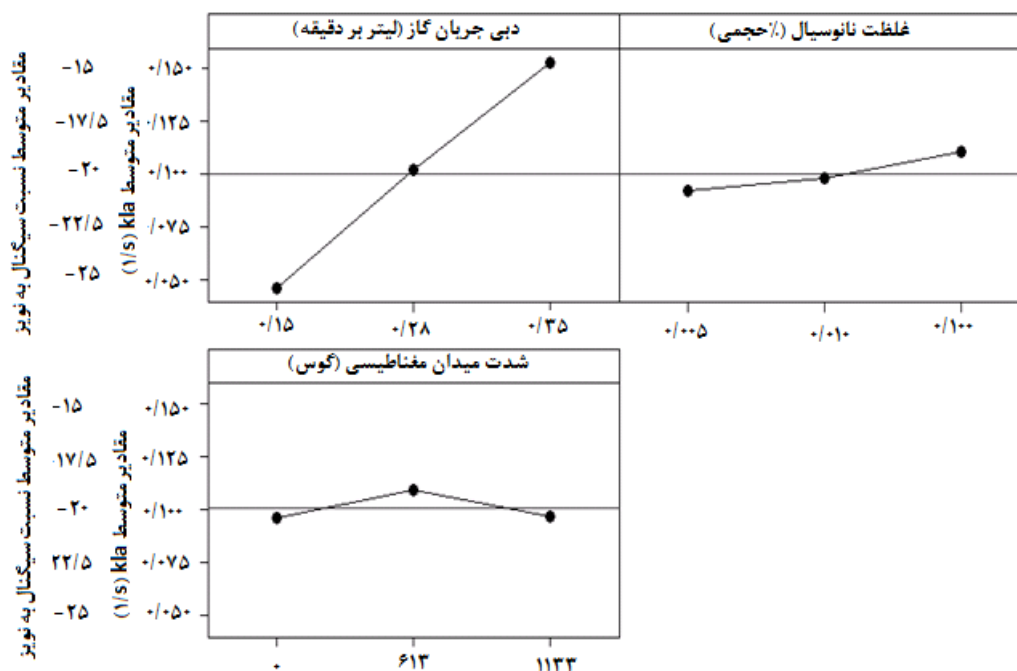
## بررسی اثر میدان مغناطیسی بر جذب $CO_2$ توسط نانوسیالات مختلف در یک برج جذب حبابی

نانوسیالات مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی را بخاطر کاهش کشش سطحی نانوسیال بیان کردند [۴۱]. با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، وقتی که انرژی برخورد دوقطبی مغناطیسی بر انرژی حرارتی غلبه کند، ذرات به یکدیگر نزدیک شده و با تغییر ساختار، زنجیره‌هایی از ذرات درون سیال شکل می‌گیرد که این زنجیره‌ها گاهی سبب ناپایداری و رسوب ذرات و کاهش انتقال جرم می‌شوند.

حرکت‌های براونی هستند، در جهت میدان چرخش کرده تا ممان‌های مغناطیسی خود را در جهت میدان قرار دهند. جهت میدان مغناطیسی در طی این پژوهش از بالا به پایین است و نانوذرات نیز ممان‌های مغناطیسی خود را در این جهت قرار می‌دهند و با حباب‌های گاز که به سمت بالا حرکت می‌کنند، برخورد کرده و سبب شکستن آن‌ها و افزایش سطح انتقال جرم می‌شوند. وی دونگ و همکاران علت افزایش شدت جذب

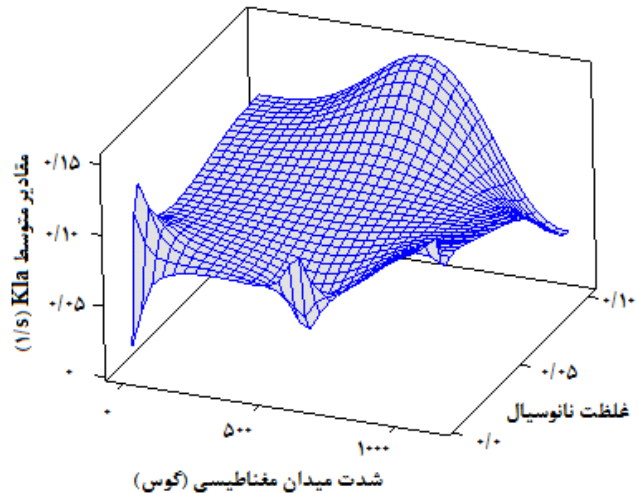
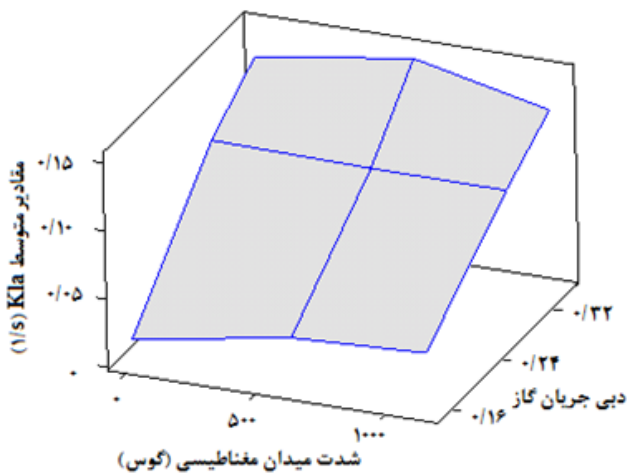
جدول ۳: تحلیل واریانس برای ضریب انتقال جرم حجمی نانوسیال اکسید آهن

پارامترها	درجه آزادی	میانگین مربعات خطا	متوسط مربعات خطا یا واریانس	نسبت F	F بحرانی	مقدار P	اهمیت
دبی گاز	۲	۱۷۰/۸۴۰	۸۵/۴۲۰۲	۱۴۳۹/۶	۹ <	۰/۰۰۱	مهم
غلظت نانوسیال	۲	۳/۸۷۲	۱/۹۳۵۸	۳۲/۶۲	۹ <	۰/۰۳	مهم
شدت میدان	۲	۲/۰۳۰	۱/۰۱۵۰	۱۷/۱۱	۹ <	۰/۰۵۵	مهم
خطای باقیمانده	۲	۰/۱۱۹	۰/۰۵۹۳				
کل	۸	۱۷۶/۸۶۱					



شکل ۶ اثر دبی گاز، غلظت نانوذره و میدان مغناطیسی بر ضریب انتقال جرم در نانوسیال اکسید آهن

شکل با افزایش غلظت نانوسیال، افزایش ضریب انتقال جرم دیده می‌شود و برای شدت میدان مغناطیسی در سطح ۶۱۳ گوس ماکزیمم ضریب انتقال جرم حجمی مشاهده می‌شود و با افزایش شدت میدان مغناطیسی به دلیل تشکیل زنجیره‌های نانوذرات مغناطیسی درون سیال پایه تحت میدان مغناطیسی بالا و افزایش ویسکوزیته، کاهش ضریب انتقال جرم را شاهد هستیم.



شکل ۷ نمودار سطح پاسخ برای تغییرات ضریب انتقال جرم نانوسیال اکسید آهن بر حسب دبی گاز و غلظت نانوسیال

عکس کاهش می‌یابد. افزایش نانوذرات به سیال پایه، ضریب و شار انتقال جرم را افزایش می‌دهد. این افزایش در مورد نانوسیال آب/اکسید آهن همیشه صعودی بود و با افزایش غلظت نانوسیال ضریب انتقال جرم نیز افزایش یافت. ولی در مورد نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم مشخص شد یک غلظت بهینه در افزایش ضریب انتقال جرم وجود دارد. بدین مفهوم که با افزایش غلظت نانوسیال تا ۰/۰۰۵ درصد حجمی، ضریب انتقال جرم نسبت به آب خالص افزایش پیدا کرد، اما با افزایش غلظت، ضریب انتقال جرم کاهش یافت. اعمال میدان مغناطیسی سبب افزایش انتقال جرم در هر دو نانوسیال گردید. در مورد نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم این افزایش کم بود و در مورد نانوسیال آب/اکسید آهن، ابتدا با اعمال میدان، میزان انتقال جرم افزایش و سپس با زیاد کردن شدت میدان، ضریب انتقال جرم کاهش یافت.

در حالت بهینه آزمایش‌های طراحی شده برای نانوسیال اکسید آلومینیوم (غلظت ۰/۰۰۵ درصد حجمی و دبی ۰/۳۵ لیتر بر دقیقه و شدت میدان مغناطیسی ۱۱۳۳ گوس) ۲۷/۸٪ افزایش در ضریب انتقال جرم نسبت به سیال پایه مشاهده

در شکل ۷ نمودارهای سطح پاسخ پارامترهای دبی جریان گاز و شدت میدان مغناطیسی نشان داده شده‌اند. با توجه به این اشکال افزایش دبی جریان گاز، افزایش ضریب انتقال جرم را به همراه دارد اما برای شدت میدان مغناطیسی حالت بهینه وجود دارد و در سطح ۶۱۳ گوس و دبی جریان گاز Lit/min ۰/۳۵ بیشینه ضریب انتقال جرم مشاهده می‌شود. در شکل ۷ همچنین نمودار سطح پاسخ بر اساس غلظت نانوسیال و شدت میدان مغناطیسی نیز نمایش داده شده است. با توجه به این

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر نانوسیالات آب/اکسید آهن و آب/اکسید آلومینیوم به عنوان حلال در فرایند جذب گاز دی‌اکسید کربن در یک ستون حبابی مجهز به میدان مغناطیسی بررسی و با آب خالص مقایسه شد. اثر پارامترهای کلیدی مثل شدت میدان مغناطیسی، دبی جریان گاز، نوع نانوذره و غلظت نانوسیال بر مقادیر ضریب و شار انتقال جرم مطالعه و تحلیل گردید.

نتایج نشان داد در مورد تمامی حلالها، افزایش دبی فاز گاز بیشترین اثر را بر روی افزایش ضریب انتقال جرم دارد. در مورد حلال آب بدون یون، با توجه به قطبی بودن ملکولهای آب، مشخص شد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی تا ۱۱۳۳ گوس، ضریب انتقال جرم به میزان ۶/۷٪ افزایش می‌یابد. در صورتیکه جهت میدان همراستا با جهت حرکت حلال باشد، ضریب انتقال جرم با اعمال میدان مغناطیسی افزایش و در جهت

[11] H. Daiguji, E. Hihara, T. Saito, (1977) "Mechanism of absorption enhancement by surfactant" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, 1743-1752

[12] J. K. Kim, J. Y. Jung, Y. T. Kang (2007) "Absorption performance enhancement by nano-particles and chemical surfactants in binary nanofluids", *International Journal of Refrigeration*, 30 (1) 50-57.

[13] J. W. Lee, J. Y. Jung, S. G. Lee, Y. T. Kang (2011) "CO<sub>2</sub> bubble absorption enhancement in methanol-based nanofluids", *International journal of refrigeration*, 34 (8), 1727-1733.

[14] S. Parvin, R. Nasrin, M. A. Alim, N. F. Hossain, A. J. Chamkha (2012) "Thermal conductivity variation on natural convection flow of water-alumina nanofluid in an annulus" *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55, 5268-5274.

[15] H. R. Ashorynejad, A. A. Mohamad, M. Sheikholeslami (2013) "Magnetic field effects on natural convection flow of a nanofluid in a horizontal cylindrical annulus using Lattice Boltzmann method" *International Journal of Thermal Sciences* 64, 240-250.

[16] C. H. Chon, K. D. Kihm, S. P. Lee, S. U. S. Choi (2005) "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) thermal conductivity enhancement" *Applied Physical Letter* 87, 153107.

[17] J. Koo, C. Kleinstreuer, (2004) "A new thermal conductivity model for nanofluids" *Journal of Nanoparticle Research*, 6, 577-588.

[18] A. G. A. Nnanna, (2007) "Experimental model of temperature-driven nanofluid" *Journal of Heat Transfer*, 129, 697-704

[19] S. U. S. Choi, and J. A. Eastman (1995) "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles" *Argonne National Lab., IL United States*, No. ANL/MSD/CP--84938; CONF-951135-29.

[20] S. Krishnamurthy P. Bhattacharya, P. E. Phelan (2006) "Enhanced Mass Transport in Nanofluids" *Nano Letters*, 6, 419-423.

[21] J. K., Kim, J. Y. Jung, Y.T. Kang (2006) "The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid" *International Journal of Refrigeration*, 29, 22-29.

[22] X. Ma et al., (2009) "Enhancement of bubble absorption process using a CNTs-ammonia binary nanofluid" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36 (7), 657-660.

[23] E. Nagya, T. Feczkoá, B. Koroknai (2007) "Enhancement of oxygen mass transfer rate in the presence of nanosized particles" *Chemical Engineering Science*, 62, 7391-7398.

[24] B. Olle, et al., (2006) "Enhancement of oxygen mass transfer using functionalized magnetic nanoparticles," *Industrial Engineering Chemical Research*, 45, 4355-4363.

[25] Z., Samadi, M. Haghshenasfard, A. Moheb, (2014) "CO<sub>2</sub> Absorption Using Nanofluids in a Wetted-Wall Column with External Magnetic Field" *Chemical Engineering Technology*, 37, 462-470.

[26] A. K. Suresh and S. Bhalerao (2001) "Rate intensification of mass transfer process using ferrofluids" *Indian journal of pure & applied physics*, 40, 172-1784.

[27] C. Reichert, W. H. Hoell, M. Franzreb (2004) "Mass transfer enhancement in stirred suspensions of magnetic particles by the use of alternating magnetic fields" *Powder Technology*, 145 (2), 131-138.

گردید. در حالت بهینه آزمایش‌های طراحی شده برای نانوسیال آب/اکسید آهن (غلظت ۰/۱ درصد حجمی و دبی ۰/۳۵ لیتر بر دقیقه و شدت میدان مغناطیسی ۶۱۳ گوس) ۱۵/۶٪ افزایش در ضریب انتقال جرم حجمی نسبت به سیال پایه مشاهده گردید.

با توجه به افزایش شار انتقال جرم در نانوسیالات می توان گفت در آینده، با استفاده از نانوذرات، تجهیزات انتقال جرم مثل برجهای جذب در ابعاد کوچکتر و با راندمان بالاتر طراحی و ساخته خواهند شد. علاوه بر افزایش بازده سیستمهای جداسازی، پسماندهای کمتری نیز تولید شده و آسیب کمتری به محیط زیست وارد خواهد شد.

## مراجع:

[1] B. Mandal and S. Bandyopadhyay (2005) "Simultaneous absorption of carbon dioxide and hydrogen sulfide into aqueous blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol and diethanolamine" *Chemical Engineering Science*, 60(22), 6438-6451.

[2] B. Metz (2005) *Carbon dioxide capture and storage: special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.

[3] H. Yang et al. (2008) "Progress in carbon dioxide separation and capture: A review" *Journal of environmental sciences* 20(1), 14-27.

[4] J. Adewole et al. (2013) "Current challenges in membrane separation of CO<sub>2</sub> from natural gas: A review" *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 17, 46-65.

[5] R. E. Treybal, (1980) *Mass transfer operations*, 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw Hill, New York.

[6] T. Sema et al. (2013) "Mass transfer of CO<sub>2</sub> absorption in hybrid MEA-methanol solvents in packed column" *Energy Procedia*, 37, 883-889.

[7] A. Dey and A. Aroonwilas (2009) "CO<sub>2</sub> absorption into MEA-AMP blend: mass transfer and absorber height index" *Energy Procedia*, 1(1), 211-215

[8] Y. T. Kang, J. Kim, J. K. Kim, C. K. Choi (2003) "Comparisons of mechanical, chemical and nano technologies for absorption applications" *Proceedings of the International Seminar on Thermally Powered Sorption Technology*, Fukuoka, Japan.

[9] Y. T. Kang, A. Akisawa, T. Kashiwagi (2000) "Analytical investigation of two different absorption modes: falling film and bubble types", *International Journal of Refrigeration*, 23 (6), 430-443.

[10] T. Kashiwagi (1988) "Basic mechanism of absorption heat and mass transfer enhancement by the Marangoni effect", *Newsletter IEA Heat Pump Center*, 6(4) 2-6.

- [35] G. Taguchi, (1987) *System of Experimental Design*, Unipub/Kraus, International Publication.
- [36] R. K. Roy (1990), *a primer on Taguchi method*, Van No strand Reinhold, New York.
- [37] Gerardi et al., (2007) "Nuclear magnetic resonance measurement of diffusion coefficients in alumina nanofluids" *Transactions of the American Nuclear Society* 96, 485-486.
- [38] J.Y. Jung, J. W. Lee, Y. T. Kang (2012) "CO<sub>2</sub> absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol" *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (8) 2285-2290.
- [39] I. T. Pineda, J. W. Lee, I. Jung, Y. T. Kang (2012) "CO<sub>2</sub> absorption enhancement by methanol-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> nanofluids in a tray column absorber" *International Journal of Refrigeration* 35, 1402-1409.
- [40] R. Bagheri et al., (2019) "Investigation of the CO<sub>2</sub> absorption in pure water and MDEA aqueous solution including amine functionalized multi-wall carbon nano tubes" *Journal of Molecular Liquid*, 293, 111431.
- [41] S. S. Ashrafmansouri and M. Nasr Esfahany (2014) "Mass transfer in nanofluids: A review" *International Journal of Thermal Sciences*, 82, 84-99.
- [42] Weidong Wu et al., (2013) "Nanofluid addition enhances ammonia/water bubble absorption in an external magnetic field" *Energy and Buildings*
- [28] S. Komati and A. K. Suresh (2008) "CO<sub>2</sub> absorption into amine solutions: a novel strategy for intensification based on the addition of ferrofluids" *Journal of chemical technology and biotechnology*, 83 (8), 1094-1100.
- [29] X. F. Niu, K. Du, F. Xiao (2010) "Experimental study on ammonia-water falling film absorption in external magnetic fields", *International journal of refrigeration*, 33 (4), 686-694.
- [30] W. D.Wu, G.Liu, S. X. Chen, H. Zhang (2013) "Nanofluid addition enhances ammonia/water bubble absorption in an external magnetic field" *Energy and Buildings*, 57, 268-277.
- [31] J. Salimi, M. Haghshenasfard, S. Gh. Etemad, (2015) "CO<sub>2</sub> absorption in nanofluids in a randomly packed column equipped with magnetic field, *Heat and Mass Transfer*, 51(6), 621-629.
- [32] K. Darvanjooghi et al., (2017) "Investigation of the effect of magnetic field on mass transfer parameters of CO<sub>2</sub> absorption using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-water nanofluid" *AIChE Journal*, 63 (6), 2176-2186.
- [33] D. Feng et al., (2018) "Mass transfer in ammonia-based CO<sub>2</sub> absorption in bubbling reactor under static magnetic field" *Chemical Engineering Journal*, 338, 450-456.
- [34] G. Taguchi, (1985) "Quality Engineering in Japan" *Bulletin of the Japan Society for Precision Engineering*, 19 (4), 237-242.

## Effects of magnetic field on the $CO_2$ absorption in nanofluids in a bubble column

Negin Mohammadzadeh<sup>1</sup>, Farzaneh Rafieian<sup>2</sup>, Masoud Haghshenasfard<sup>\*1</sup>, Mohsen Nasr Esfahany<sup>1</sup>, Touraj Tvakoli<sup>2</sup>

1- Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Faculty of Engineering, Chemical Engineering Group, University of Isfahan, Isfahan, Iran

---

### ABSTRACT

Effects of magnetic field on the  $CO_2$  absorption in deionized water, water/ $Fe_3O_4$ , and water/ $Al_2O_3$  nanofluids in a bubble column are studied. Effect of the other key parameters such as gas flow rate, nanoparticle type, magnetic field direction, and nanofluid concentration on the mass transfer rate and mass transfer coefficient has also been investigated. The results showed that according to the polar nature of the water molecules, by increasing the magnetic field to 1133 gauss, the mass transfer coefficient in pure water increases up to 6.7%. The enhancement can be achieved if the direction of the magnetic field is parallel to the direction of the continuous phase. By adding the nanoparticles to the pure water, the mass transfer coefficient, and the mass transfer rate increases. By increasing the water/ $Fe_3O_4$  concentration, the mass transfer coefficient increases, but in the water/ $Al_2O_3$  nanofluid, by increasing the nanofluid concentration up to 0.005%, the mass transfer coefficient increases, and then decreases.

---

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: July 24, 2019

Received in revised form: December 13, 2019

Accepted: January 22, 2020

---

#### Key words:

Gas absorption

Bubble column

Nanofluid

Magnetic field

\* Corresponding author  
haghshenas@iut.ac.ir

All right reserved.