

## مروری بر ضریب نفوذ و ضرایب انتقال جرم در نانوسیالات و کاربرد آن در فرایند جذب گاز

مانده پهلوانی نژاد<sup>۱</sup>، نسرین اعتصامی<sup>۲\*</sup>، محسن نصر اصفهانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۴/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۱/۲۲

پیام نگار: netesami@cc.iut.ac.ir

### چکیده

جذب گاز از طریق فاز مایع از روش‌های متداول برای جداسازی یک جزء از مخلوط گازی است. تحقیقات گسترده‌ای برای افزایش بازده این فرایند مانند روش‌های مکانیکی، افزودن مواد فعال‌کننده، میکروذرات و نانوذرات به فاز مایع و نهایتاً اعمال میدان خارجی انجام شده است. این مقاله ابتدا به مطالعه اثر بهره‌گیری از نانوذرات برای بهبود انتقال جرم سیستم گاز-مایع پرداخته و سپس اثر استفاده همزمان از نانوذرات و اعمال میدان مغناطیسی را مورد مطالعه قرار می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که جریان‌های میکرونی ایجاد شده در سیال از طریق حرکت‌های براونی نانوذرات، اثر گریزینگ، و افزایش زمان نگهداشت گاز در نانوسیال، نسبت به سیال پایه و بهبود انتقال گرما از عوامل توجیه‌کننده افزایش انتقال جرم در نانوسیالات است. وارد آوردن میدان مغناطیسی نیز باعث برقرار شدن گشتاور در نانوذرات مغناطیسی می‌شود که به افزایش حرکت‌های نانوذرات می‌انجامد و نهایتاً اختلاط داخل لایه مرزی افزایش می‌یابد که به کاهش مقاومت و بهبود انتقال جرم خواهد انجامید.

**کلیدواژه‌ها:** جذب گاز، ضریب نفوذ، ضرایب انتقال جرم، نانوسیال، میدان مغناطیسی، حرکت‌های براونی

### ۱- مقدمه

حل شدن یک یا چند جزء آن در فاز مایع تعریف می‌شود. خالص‌سازی جریان گاز از یک جزء، در صنعت کاربردهای زیادی دارد، از آن جمله می‌توان از به دام انداختن گازهای گلخانه‌ای به خصوص گاز کربن دی‌اکسید از جریان‌های گازی، فرایند جذب آمونیاک/آب در چرخه‌های تبرید و سردسازی، جذب گاز کربن دی‌اکسید و یا هیدروژن سولفید از مخلوط گازها به وسیله محلول‌های آمین و مواد دیگر یاد کرد [۱]. همان‌طور که گفتیم،

تحقق عملیات انتقال جرم، مانند رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی، تقطیر، جذب و دفع گاز در فرایندهای صنعتی در کنار انتقال حرارت، امری اجتناب‌ناپذیر است. در میان این عملیات، فرایند جذب گاز<sup>۱</sup> از نظر صنعتی اهمیت چشمگیری دارد و دارای کاربردهای بسیاری است. این فرایند به عنوان تماس مخلوطی از گازها با فاز مایع به منظور

\* اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی

1. Gas Absorption

*استفاده از نانوذرات:* اخیراً تحقیقات زیادی در زمینه نانوفناوری، بخصوص در حوزه نانوسیال انجام شده است. واژه نانوسیال اولین بار توسط چوی [۴] در سال ۱۹۸۷ با افزودن نانوذرات فلزی مس به آب برای بهبود انتقال حرارت معرفی شد. نانوسیال به محلول سوسپانسیونی (آویزشی) گفته می شود که در آن نانوذرات در فاز مایع به حالت تعلیق در آورده شده اند. نانو سیال دارای دو جزء اصلی است: (الف) سیال پایه، منظور از سیال پایه، سیالی است که به آن نانوذره افزوده خواهد شد؛ و (ب) جزء دوم نانوسیال را نانوذرات تشکیل می دهند.

بر خلاف آویزشهای حاوی ذرات میلی یا میکرومتری به کار رفته در گذشته، نانوذرات می توانند از پایداری نسبتاً طولانی (با ته نشینی کمی بر اثر گرانش) برخوردار باشند. مواد به کار رفته معمولاً برای نانوذرات شامل اکسیدهای فلزی مانند: آلومینیوم اکسید، سیلیکا، تیتانیوم اکسید و آهن اکسید و نیز فلزاتی چون طلا و مس هستند. موادی که به عنوان سیال پایه استفاده می شوند، معمولاً آب یا سیال های آلی مانند اتانول و اتیلن گلیکول اند و کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه معمولاً زیر ۵٪ حجمی است.

**برقراری میدان خارجی:** روش دیگری که می تواند موجب افزایش و یا گاهی بنا به شرایط حاکم، کنترل انتقال حرارت و جرم شود، برقراری میدان است. این میدان می تواند مغناطیسی یا الکتریکی باشد. مطالعات انجام شده در زمینه بررسی اثر میدان خارجی بر انتقال جرم انگشت شمار است. در ادامه، مروری بر مطالعات پیشین انجام شده در زمینه استفاده از نانوذرات و اعمال میدان خارجی برای افزایش یا کنترل ضریب انتقال جرم خواهیم داشت.

## ۲- استفاده از نانوسیال در زمینه انتقال جرم

به طور کلی رویکرد استفاده از نانوذرات با هدف بهبود انتقال جرم در دو زمینه است؛ یکی بهبود ضریب نفوذ جرمی و دیگری در زمینه بهبود ضریب انتقال جرم در نانوسیالات است.

### ۲-۱ ضریب نفوذ در نانوسیال

مطالعات انجام شده در زمینه اثر نانوذرات در ضریب نفوذ نانوسیال کم دامنه تر از پژوهش های انجام شده در زمینه بهبود ضریب انتقال جرم در نانوسیالات است.

در این فرایندها انتقال جرم از فاز گاز به فاز مایع صورت می گیرد. مقاومت اصلی انتقال جرم در فرایند جذب در فاز گاز صورت می گیرد. در یک سامانه جذب، جذب کننده مهم ترین و پرهزینه ترین عامل محسوب می شود. دستیابی به آهنگ انتقال حرارت و جرم بالا در جذب کننده در کمینه سازی هزینه های سیستم و بهبود بازده انرژی بسیار مهم است. بنابراین، دستیابی به روش هایی که بتوان از طریق آنها انتقال جرم یا حرارت را افزایش داد، به یک خواسته جهانی تبدیل شده است. از این رو رسیدن به روش هایی که بتوان این دو پدیده را بنا به موقعیت موجود افزایش داد و یا کنترل کرد، به یک هدف مهم تبدیل شده است. جستجو و مطالعه منابع بیانگر آن است که روش های متداول افزایش و یا کنترل انتقال حرارت و جرم عبارتند از:

۱- روش های مکانیکی

۲- روش های شیمیایی

۳- بهره گیری از نانوذرات

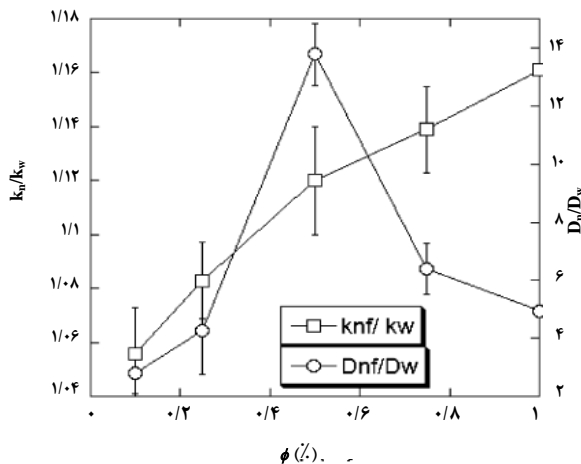
۴- برقرار کردن میدان خارجی

که در اینجا این روشها را به اختصار توضیح خواهیم داد.

**روش های مکانیکی:** در این روش عملکرد از طریق اصلاح کردن شکل، سطح و ساختار سیستم بهبود می یابد. چن و همکارانش [۲] عملکرد یک جذب کننده غشایی از نوع الیاف تو خالی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاربرد یک جذب کننده جدید در سیستم جذب آمونیاک ضریب عملکرد را تا ۱۴/۸ افزایش می دهد.

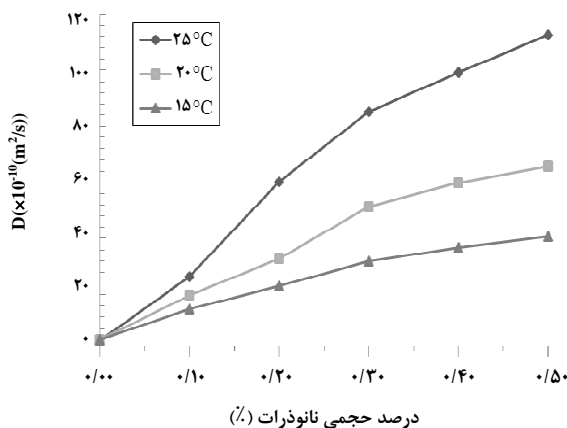
**روش های شیمیایی:** در روش های شیمیایی فعال کننده های سطحی و مواد افزودنی را به محلول اضافه می کنند تا عملکرد را بهبود بخشند. کیم و همکاران [۳] آزمایش هایی برای بررسی جذب بخار آب در محلول لیتیم برمید در یک دستگاه فیلم ریزان انجام دادند. آنها تفاوت های چشمگیری در طبیعت فیلم جاری در حضور و غیاب مواد افزودنی گزارش کردند. آنها سطح این فیلم را در غیاب مواد افزودنی آرام و گاهی موج دار مشاهده کردند اما در حضور این مواد، شکل جویباری همراه با اغتشاش شدید در فصل مشترک مشاهده می شد و شدت اغتشاش ایجاد شده در حضور این مواد در طول لوله تغییر می کرد. آنان نتیجه گرفتند که جابه جایی مارانگونی<sup>۱</sup> عامل افزایش مشاهده شده است. در واقع، جابه جایی مارانگونی حرکت سطح مایع به واسطه گرادیان کشش سطحی صورت می گیرد.

1. Marangoni Convection



شکل ۱. مقایسه میزان افزایش نفوذ مولکولی و رسانش حرارتی در نانوسیال حاوی نانوذرات  $Al_2O_3$  با اندازه  $20\text{ nm}$  [۵].

همان گونه که آشکار است، در غلظت ثابت نانوسیال با افزایش دما ضریب نفوذ نیز افزایش می‌یابد. آنان علت را از این قرار بیان کردند که با افزایش دما، اثر حرکت‌های براونی و جریان‌های میکرونی نانوذرات بیشتر شده و به افزایش ضریب نفوذ می‌انجامد. در دمای ثابت با افزایش غلظت نانوسیال، ضریب نفوذ نیز افزایش یافته است.



شکل ۲. ضریب نفوذ Rodamine B در نانوسیال آب/مس [۶].

تورانوو و همکارانش [۷] ضریب خود نفوذی حلال آب (SDC) را در نانوسیال آب/سیلیکا تعیین کردند. نتایج حاکی از این بود که با افزایش کسر حجمی نانوذرات سیلیکا، ضریب نفوذ آب کاهش می‌یابد. آنان این مشاهدات را به حبس شدن آب توسط نانوذرات نسبت دادند.

چند روش برای اندازه‌گیری ضریب نفوذ در محلول متداول است که از آن جمله می‌توان به روش‌های ۱) غشایی، ۲) روش پراکندگی تیلور، ۳) روش پخش نور و ۴) روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای اشاره کرد. در میان این روش‌ها، روش پراکندگی تیلور کم‌هزینه‌ترین روش به‌شمار می‌آید. در این روش، ضریب نفوذ از طریق تزریق مقدار اندکی ماده حل‌شونده در محلول و اندازه‌گیری تغییرات غلظت آن با زمان در اثر نفوذ در طول محلول به‌دست می‌آید.

کریشنامورسی و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۶ پراکندگی یک نقطه رنگی فلئوئورسانس را در محلول آب-اتانول در حضور و غیاب نانوذره آلومینیوم اکسید با ابعاد  $20\text{ nm}$  و پایدارکننده Tween-80 بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که نفوذ رنگ در نانوسیال نسبت به آب سریع‌تر است و سرعت نفوذ به غلظت نانوذره بستگی دارد. در غلظت  $0.5\text{ wt\%}$ ، نسبت ضریب نفوذ موثر ماده رنگی در نانوسیال به سیال پایه،  $(\frac{D_{nf}}{D_w})$ ، بیشینه است. همچنین، به ازای غلظت‌های کمتر از  $0.5\text{ wt\%}$ ، سازوکار نفوذ مولکولی و در غلظت‌های  $0.5\text{ wt\%}$  و  $1\text{ wt\%}$  نفوذ مولکولی به همراه ایجاد آشفستگی در سیال، بر اثر حرکت‌های براونی نانوذرات، در افزایش سطح رنگ موثر است. بنابراین شکل (۱)، مقدار افزایش ضریب نفوذ در انتقال جرم بسیار بیشتر از افزایش ضریب رسانش گرمایی در انتقال گرماست. دلیل تغییر شیب در منحنی  $\frac{K_{nf}}{K_w}$  و نیز وجود قله در منحنی  $\frac{D_{nf}}{D_w}$ ، به‌طور قطعی مشخص نیست، به احتمال زیاد، با افزایش غلظت ذرات و در پی آن کم شدن فاصله بین آنها انباشت نانوذرات افزایش می‌یابد و باعث ایجاد خوشه‌های بزرگ نانوذرات، کم شدن حرکت‌های براونی، و در نتیجه کم شدن ضرایب نفوذ در نانوسیالات می‌شود.

فنگ و همکارانش [۶] آزمایش‌هایی در زمینه نفوذ جرمی ماده رداین B<sup>۵</sup> در نانوسیال آب/مس به‌منظور بررسی اثر این ذرات در محلول نانوسیال انجام دادند. آنان در آزمایش‌های خود ضریب نفوذ این ماده را در نانوسیال به روش پراکندگی تیلور اندازه گرفتند و با مقدار آن در سیال پایه و در غیاب این ذرات مقایسه کردند. در آزمایش‌های آنها دو پارامتر دمای نانوسیال و غلظت نانوسیال بررسی شد. نتایج به‌دست آمده را در شکل (۲)، مشاهده می‌کنید؛

1. Membrane Cell
2. Taylor Dispersion
3. Light Scattering
4. Nuclear Magnetic Resonance
5. Rodamine B

6. Solvent Self-Diffusion Coefficient

پیمودن همان مسیر توسط ذرات نانو نیاز است، کمتر خواهد بود. بنابراین، استنباط می‌شود که حرکت‌های براونی به طور مستقیم در افزایش ضریب نفوذ نقش ندارند. به بیان دیگر، نانوذرات نمی‌توانند مولکول‌ها را هل دهند و باعث نفوذ بیشترشان شوند؛ بلکه، این افزایش به دلیل تقویت و افزایش اختلاط در مقیاس نانو در فاز مایع است که حرکت‌های براونی آن را تقویت می‌کند. زمان مورد نیاز برای جریان‌های جابه‌جایی به‌منظور پیمودن مسافتی به اندازه قطر ذرات عبارت است از [۱۱]:

$$t_c = \frac{d^2}{2v} \quad (3)$$

که در آن  $d$  قطر ذره بر حسب  $(m)$  و  $v$  گرانشی جنبشی  $(\frac{m^2}{s})$  در دستگاه SI است. با محاسبه زمان یادشده در بالا، مشاهده خواهد شد که این زمان از دو زمان قبلی کوتاهتر است. پس می‌توان عامل اصلی افزایش ضریب نفوذ را جریان‌های جابه‌جایی ناشی از حرکت‌های براونی ذرات دانست که موجب افزایش اختلاط در مقیاس نانو در سیال پایه می‌شوند. اما، افزایش غلظت تا حد مشخصی می‌تواند به افزایش اختلاط در سیال انجامد، به طوری که اگر غلظت بیش از حد مربوطه افزایش داده شود، کاهش پدیده نفوذ مشاهده خواهد شد.

اگر سرعت براونی ذرات  $(\frac{m}{s})$  از معادله زیر پیروی کند [۹]:

$$V_n = \sqrt{\frac{3k_b T}{m_n}} \quad (4)$$

که در آن  $m_n$  جرم نانوذرات بر حسب  $(kg)$ ،  $k_b$  ثابت بولتزمن بر حسب  $(\frac{J}{K})$ ،  $T$  دما بر حسب  $(K)$  است، افزایش غلظت نانوذرات از حدی به بعد، انباشت آنها را در فاز مایع افزایش می‌دهد و این به معنای افزایش  $d$  و  $m_n$  است و طبق فرمول بالا  $V_n$  کاهش می‌یابد و در نتیجه آن حرکت‌های جابه‌جایی مایع در مقیاس‌های بسیار کوچک<sup>۳</sup> کند می‌شود، چون منجر به ایجاد ذرات با توده جرم بالا و سنگین می‌شود که سرعت کمی دارند.

فنگ و همکاران [۶] در بررسی ضریب نفوذ رنگ در نانوسیال نسبت به مقدار آن در سیال پایه مشاهدات خود را از این قرار توجیه کردند

اشرف منصوری و همکاران [۸] تاثیر نانوذره سیلیکا را بر ضریب خودنفوذی آب و ضریب نفوذ تترابوتانول در آب، به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای بررسی کردند. غلظت نانوسیال سیلیکا از ۰.۰۵٪ تا ۱٪ حجمی است. نتایج افزایش ناچیزی را (کمتر از ۱۰٪) در ضریب خودنفوذی آب و ضریب نفوذ تترابوتانول در آب، در حضور نانوذرات سیلیکا نشان داده است. آنان علت این افزایش را حرکت‌های براونی و ریزجابه‌جایی‌های<sup>۱</sup> نانوذرات دانستند و بیان کردند حضور نانوذرات سیلیکا فضاهایی را از سیال اشغال می‌کند، از این رو حجم آزادی که در مسیر نفوذ هر مولکول قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد.

## ۱-۱-۲ سازوکارهای مطرح شده در مورد نفوذ مولکولی در نانوسیال

کریشناامورسی و همکارانش [۵] روند تغییرات ضریب نفوذ رنگ در حضور نانو ذرات را به صورت زیر توجیه کردند: زمان مورد نیاز برای آن که مولکول‌های رنگ (ماده نفوذ کننده) مسیری به اندازه قطر ذرات را طی کنند، عبارت است از [۹ و ۵]:

$$t_m = \frac{d^2}{2D} \quad (1)$$

که در آن  $D$  ضریب نفوذ رنگ در آب بر حسب  $(\frac{m^2}{s})$  و  $d$  قطر نانوذره بر حسب  $(m)$  است.

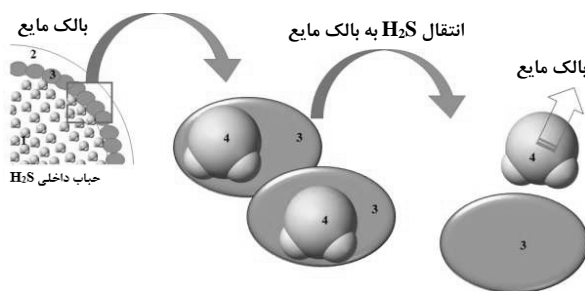
زمان مورد نیاز ذرات برای پیمودن مسیری معادل با قطرشان که همان حرکت براونی<sup>۲</sup> است، با ترکیب معادله‌ی بالا و معادله نفوذ استوکس - اینشتین [۱۰] از این قرار به دست می‌آید:

$$t_b = \frac{3\pi\eta d^3}{2k_b T} \quad (2)$$

که در رابطه بالا  $k_b$  ثابت بولتزمن بر حسب  $(\frac{J}{K})$ ،  $T$  دما بر حسب  $(K)$ ،  $d$  قطر ذره بر حسب  $(m)$  و  $\eta$  گرانشی در دستگاه SI است. با محاسبه این دو زمان برای یک حالت خاص، مشاهده می‌شود که  $t_b$  بزرگتر از  $t_m$  خواهد بود. پس زمانی که طول می‌کشد تا رنگ مسافتی به اندازه قطر ذرات را طی کند نسبت به زمانی که برای

1. Microconvection  
2. Brownian Motion

3. Micro Convection and Nano Convection



شکل ۳. طرح کلی اثر خراش: ۱- حباب گاز داخلی؛ ۲- فیلم مایع پیرامون حباب؛ ۳- نانوذرات گرافن اکسید در سطح تماس گاز-مایع؛ ۴- مولکول  $H_2S$  [۱۳].

سدیم هیدروکسید، با بهره‌گیری از روش الکتروشیمی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ضریب انتقال جرم در نانوسیالات، با افزایش غلظت نانوذرات ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. آنان غلظت حجمی بهینه نانوسیال آلومینیوم اکسید را  $0.01\%$  معرفی کردند که در این غلظت  $16/8\%$  افزایش در ضریب انتقال جرم مشاهده شده است. آنان علت این افزایش را حرکت‌های براونی نانوذرات دانسته‌اند که به ایجاد ریز جابه‌جایی و به تبع آن مهاجرت نانوذرات درون لایه غلظتی و کاهش ضخامت لایه غلظتی و سرانجام افزایش انتقال جرم می‌انجامد. همچنین، در غلظت‌های بالاتر از غلظت بهینه، با افزایش غلظت نانوذرات انباشت آنها بیشتر شده و احتمال چسبیده شدن ذرات به یکدیگر افزایش می‌یابد. در نتیجه، ذرات با اندازه بزرگ‌تر و حجیم‌تر نسبت به نانوذره تولید می‌شود. ذرات بزرگ حرکت‌های براونی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند و آن را کاهش می‌دهند و به تبع آن ریز جابه‌جایی‌ها و انتقال جرم کاهش می‌یابد.

کیم و همکارانش [۱۵] تاثیر نوع نانوذرات و غلظت آنها را به عنوان پارامترهای موثر بر سرعت جذب گاز آمونیاک در آب، در یک جذب‌کننده حبابی بررسی کردند. نانوذرات به‌کار رفته در این مطالعه، مس، مس اکسید و آلومینیوم اکسید با اندازه  $50\text{ nm}$  است. آنان نتیجه گرفتند که میزان جذب با حضور نانوذرات مس تا حداکثر  $3/21$  برابر افزایش می‌یابد و با افزایش غلظت نانوذرات میزان جذب بیشتر می‌شود. آنان به این موضوع هم پی بردند که با افزایش غلظت اولیه آمونیاک در نانوسیال، نسبت جذب موثر (نسبت جذب در حالتی که نانوذره اضافه شده به حالتی که جذب بدون نانوذره اتفاق افتاده) افزایش می‌یابد، که بیانگر مؤثر بودن حضور نانوذرات در

که حرکت‌های براونی، ریز جابه‌جایی را در محلول تقویت می‌کنند. دیدگاه میکروسکوپیکی پدیده‌های انتقال حرارت و جرم در داخل نانوسیال در مدت زمان طولانی به صورت رسانش گرمایی و یا نفوذ مولکولی باقی نمی‌ماند بلکه دارای سازوکار ریز جابه‌جایی‌اند. افزایش در کسر حجمی ذرات نانو تا حد معینی در محلول نانوسیال به طور چشمگیری شدت و بسامد این میکرو آشوب را در داخل ذرات معلق افزایش می‌دهد و به افزایش ضریب نفوذ و ثابت رسانایی گرمایی نانوسیالات می‌انجامد.

## ۲-۲ ضریب انتقال جرم در نانوسیال

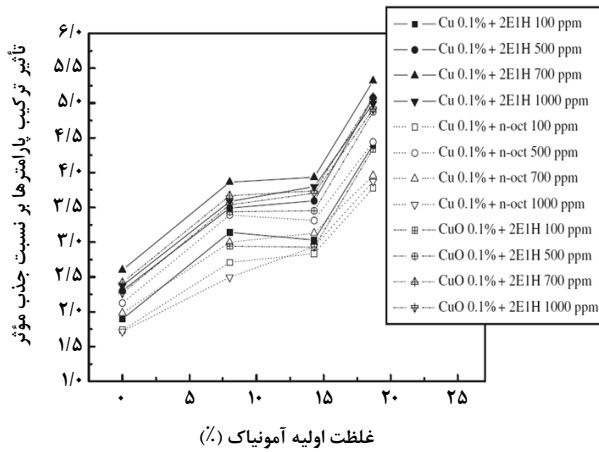
به طور کلی، مطالعات انجام شده در زمینه بهره‌گیری از نانو سیالات در انتقال جرم چندان گسترده نیست. هرچند سازوکار عملکرد نانوذرات در افزایش ضریب انتقال جرم همچنان مبهم است، اما در اکثر مطالعات، عمدتاً حرکت‌های براونی نانوذرات را عامل این افزایش می‌دانند.

داگاونکار [۱۲] نتیجه گرفت که وجود ذرات میکرومتری  $TiO_2$ ، میزان جذب  $CO_2$  در آب، هگزادکان، و روغن آفتابگردان را افزایش می‌دهد. در سیستم‌های کلوییدی، اثر تغذیه<sup>۱</sup> باعث افزایش جذب گاز در مایع می‌شود. در این سیستم‌ها ذرات جامد بین سطح تماس دو فاز گاز و مایع و توده مایع حرکت می‌کنند و بعد از جذب مولکول‌های گاز (جذب سطحی) در لایه مرزی، در بالک مایع این مولکول‌ها را دفع می‌کنند و از این طریق انتقال جرم را افزایش می‌دهند.

اسماعیلی و همکاران [۱۳] جذب گاز  $H_2S$  را در نانوسیال گرافن اکسید در یک برج جذب حبابی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که جذب گاز  $H_2S$  در نانوسیال گرافن اکسید در غلظت بهینه  $0.02\%$  جرمی تا  $40\%$  افزایش یافته است. آنان علت اصلی این افزایش را اثر خراش نانوذرات دانسته‌اند. در شکل (۳)، طرح کلی اثر خراش را مشاهده می‌کنید؛ به این صورت که ابتدا مولکول‌های گاز توسط نانوذرات در فصل مشترک گاز-مایع جذب سطحی می‌شود و با گذر از لایه مرزی غلظت، انتقال گاز به داخل بالک مایع اتفاق می‌افتد.

بیکو و همکاران [۱۴] اثر افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید را بر انتقال جرم محلول پایه پتاسیم فرو-فری سیانید و

1. Grazing Effect

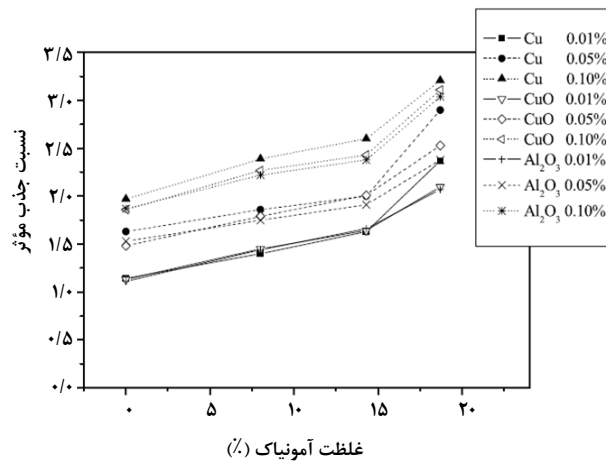


شکل ۵. تاثیر نوع نانوذرات و غلظت‌های متفاوت فعال‌کننده سطحی بر جذب آمونیاک در آب [۱۶].

انتقال گرما و جرم افزایش می‌یابد. آنان از بین دو نانو ذره CNT و آهن نیز، نانو ذره CNT را گزینه بهتر و مناسب‌تری برای جذب آب/لیتیم برمید یافتند. در شکل (۶)، سه نتیجه یادشده را مشاهده می‌کنید. در این شکل، دو پارامتر  $\frac{m_{absn}}{m_{abs0}}$  و  $\frac{Q_n}{Q_0}$  به ترتیب، نسبت انتقال گرمای موثر و نسبت جذب موثر می‌باشد. وو و همکارانش [۱۸] اثر نانوذرات نقره را بر انتقال جرم و گرما در سیستم جذب حبابی آب/ آمونیاک بررسی کردند. آنان به افزایش جذب با نسبت موثر ۱/۵۵ رسیدند. این افزایش در غلظت حجمی اولیه آمونیاک ۲۰٪ و غلظت حجمی نانوذرات نقره ۰.۲٪/۰ اتفاق افتاد.

قاسمی [۱۹] فرایند جذب گاز کربن‌دی‌اکسید در آب را با افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید به آب در دمای ۲۵°C و فشار ۶۱۰ mmHg درون واکنشگاه همزن‌دار بررسی کرد. در این پژوهش، با افزودن نانوذرات  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  به سیال پایه، ضریب انتقال جرم حجمی ( $k_{LA}$ ) در فرایند جذب افزایش یافت. ضریب انتقال جرم در غلظت‌های حجمی ۰/۰ تا ۰/۰۵ به ازای سرعت‌های گوناگون همزن ۱۱۵۰ rpm و ۱۴۰۰ با دبی گاز عبوری  $\frac{1}{\text{min}}$  ۱/۰ اندازه‌گیری شده است. بیشترین افزایش در ضریب انتقال جرم در سرعت پروانه ۱۱۵۰ rpm و ۱۴۰۰ در جزء حجمی ۰/۰۵ نانوذرات، به ترتیب، معادل ۲/۲۵ و ۱/۸ به دست آمده است. این نتایج را در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌کنید.

نیرو محرکه (اختلاف غلظت آمونیاک) پایین در افزایش جذب است. همچنین، در این پژوهش نانو ذره مس به عنوان موثرترین نانوذره در جذب آمونیاک در آب شناخته شد. در شکل (۴) خلاصه نتایج بیان شده را مشاهده می‌کنید، باید گفت که محور عمودی این نمودار نسبت جذب موثر است.



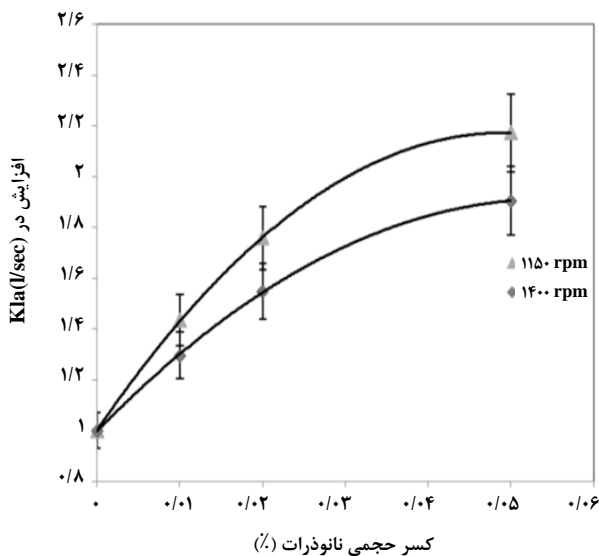
شکل ۴. تاثیر نوع و غلظت‌های متفاوت نانوذرات بر نسبت جذب موثر آمونیاک در آب [۱۵].

در مطالعه دیگری که کیم و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۰۷ در ادامه‌ی تحقیق پیشین انجام دادند، علاوه بر بهره‌گیری از نانوذرات مس، مس اکسید و آلومینیوم اکسید، همزمان از ۲- اتیل ۱- هگزانول و n- اکتانول و ۲- اکتانول نیز به عنوان فعال‌کننده سطحی<sup>۱</sup> استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن همزمان نانوذرات و فعال‌کننده سطحی عملکرد جذب را تا حدود ۵/۳۲ برابر بهبود می‌بخشد، در واقع، استفاده از فعال‌کننده سطحی با پراکنده کردن نانوذرات در سیال پایه تاثیر حضور نانوذرات را افزایش می‌دهد. شکل (۵) نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. محور عمودی بیانگر نسبت جذب موثر است.

کینگ و همکاران [۱۷] تاثیر نانولوله‌های کربنی (CNT)<sup>۲</sup> و آهن را بر روی انتقال گرما و انتقال جرم در یک فرایند فیلم ریزان برای سامانه جذب آب/ لیتیم برمید بررسی کردند. آنان پی بردند که افزایش حاصل در انتقال جرم بر اثر وجود این ذرات محسوس‌تر و بیشتر از انتقال گرماست و با افزایش غلظت نانوذره، هر دو پدیده

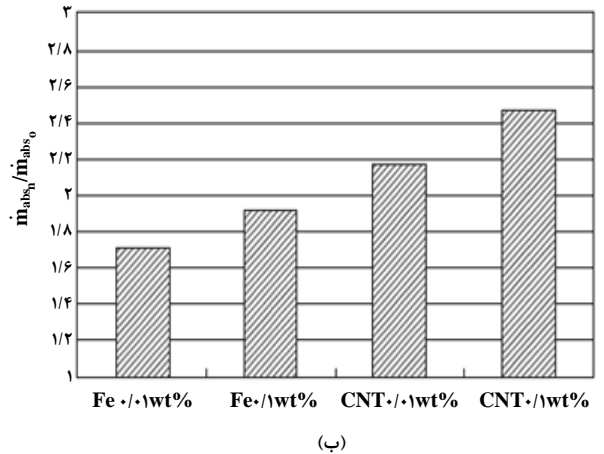
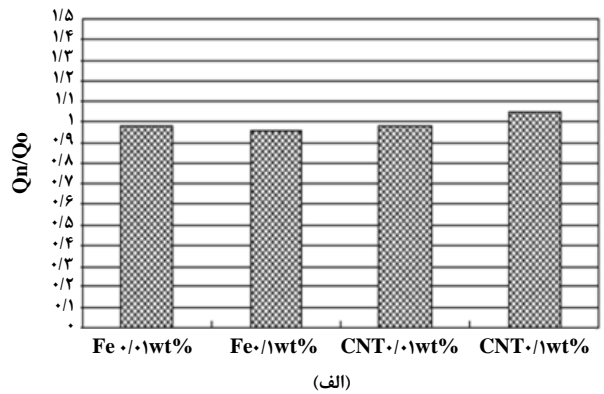
1. Surfactant  
2. Carbon Nano Tube

سطح انتقال جرم و ضریب انتقال جرم حجمی می‌شود. با کاهش قطر حباب‌ها، فشار داخلی حباب گاز و به تبع آن غلظت اشباع در سطح تماس دو فاز افزایش، و در نتیجه سرعت انتقال جرم افزایش می‌یابد.

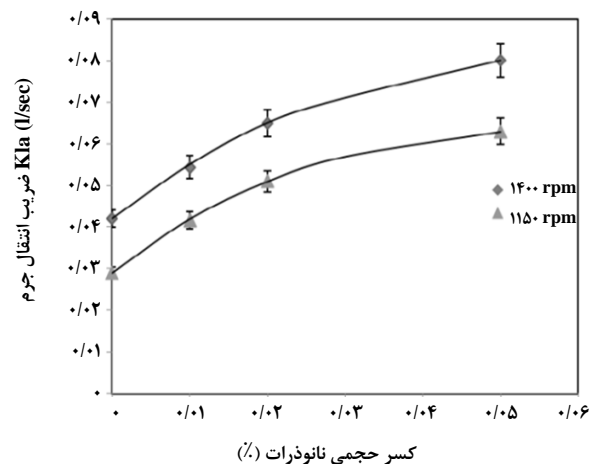


شکل ۸. تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی بر حسب غلظت نانوسیال در سرعت‌های همزن rpm ۱۱۵۰، ۱۴۰۰ به ازای دبی گاز  $1/19$  l/min.

یانگ و همکارانش [۲۰] اثر نانوذرات آلفا آلومینیوم اکسید و گاما آلومینیوم اکسید را در فرایند جذب آب-آمونیاک در سیستم فیلم ریزان بررسی کردند. آنان در آزمایش‌های خود از دو نوع فعال‌کننده سطح پلی‌اکریلیک اسید (PAA) و سدیم دودسیل بنزن (SDBS) سود جستند. بنابر مشاهدات آنان، اثر نانوذرات  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  بر جذب آمونیاک ضعیف بوده ولی نانوذرات  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  باعث افزایش جذب آمونیاک می‌شود، زیرا با ساختار متفاوت، ویژگی‌های سطح تغییر می‌کند که سبب می‌شود توانایی جذب آمونیاک نیز متفاوت باشد. در غلظت اولیه ۱۵ درصد از آمونیاک و در حضور نانوذرات  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  و ماده فعال‌کننده سطح PAA، آهنگ جذب ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. آنان گزارش کردند که نوع نانوذره و مواد فعال سطحی موجود در نانوسیال و غلظت آمونیاک در سیال پایه بر آهنگ جذب تاثیر می‌گذارد. در شکل (۹)، نتایج به دست آمده از این پژوهش را مشاهده می‌کنید.



شکل ۶. الف) انتقال گرما؛ ب) انتقال جرم در سیستم جذب آب/لیتیم برمید با غلظت‌های متفاوت نانوذرات CNT و آهن [۱۷].



شکل ۷. افزایش ضریب انتقال جرم حجمی بر حسب غلظت نانوسیال در سرعت‌های همزن rpm ۱۱۵۰، ۱۴۰۰ به ازای دبی گاز  $1/19$  l/min.

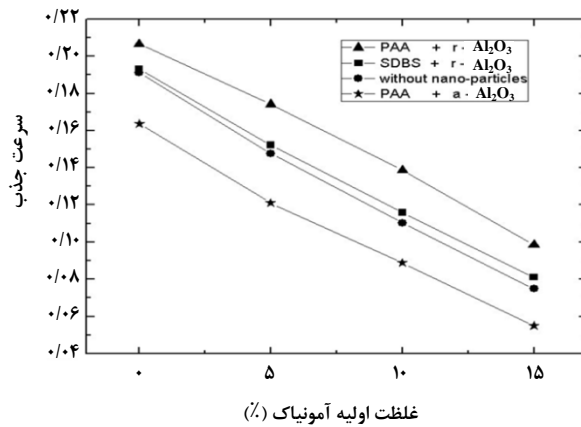
قاسمی به این تحلیل اشاره کرد که افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث شکستن حباب‌ها و کاهش اندازه حباب‌ها، و در نتیجه افزایش

سیستم دو فازي تغيير در ضريب نفوذ، كشش سطحی و هیدرودینامیک سیستم (اندازه و حرکت حباب‌ها) از عوامل تأثیرگذار به شمار می‌آید که برای كشش سطحی محلول در حضور و غیاب نانوذرات نشان داده است که سطح تماس ویژه در حضور نانوذرات به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد.

جین کی لی و همکارانش [۲۳] اثر نانوذرات  $Al_2O_3$  و نانولوله‌های کربنی (CNT) را بر جذب گاز  $NH_3$  با سیال پایه آب بررسی کردند. در این مطالعه غلظت و نوع نانوذرات به عنوان پارامترهای موثر بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که در غلظت حجمی  $0.02\%$  از نانوسیال CNT و  $Al_2O_3$ ، نسبت جذب، به ترتیب،  $16\%$  و  $18\%$  افزایش می‌یابد؛ بنابراین، نانوذره  $Al_2O_3$  در فرایند جذب گاز  $NH_3$ ، عملکرد بهتری داشته و نسبت جذب موثر بزرگتر از یک، بیانگر بهبود فرایند جذب توسط نانوذرات است. برای این سیستم غلظت حجمی  $0.02\%$  نیز غلظت بهینه است و بعد از این غلظت شدت جذب به آرامی کاهش می‌یابد.

جائی ون لی و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۱ با بهره‌گیری از یک برج حبابی، عملیات جذب گاز کربن دی اکسید را در نانوسیال‌های متانول /  $Al_2O_3$  و متانول /  $SiO_2$  بررسی کردند. آنان موفق شدند مقدار جذب را در دمای  $20^\circ C$  برای نانوسیال  $Al_2O_3$  با درصد حجمی  $0.01\%$  تا  $0.05\%$  و برای  $SiO_2$  در درصد حجمی  $0.01\%$  تا  $0.05\%$  و دمای  $20^\circ C$  - افزایش دهند. آنان همچنین یک غلظت بهینه را برای هر یک از نانوذرات بدست آوردند که این غلظت حجمی برای هر دو نانوذره به کار رفته  $0.01\%$  است. بعد از این غلظت بهینه، آهنگ انتقال جرم کاهش می‌یابد. آنان علت افزایش انتقال جرم را تا قبل از غلظت بهینه از این قرار بیان کردند که نانوذرات با شکستن حباب‌های گاز، باعث افزایش سطح و اختلاط بهتر گاز با نانوسیال و در نتیجه جذب بهتر می‌شود و علت کاهش انتقال جرم را پس از غلظت بهینه، بواسطه به هم چسبیدن نانوذرات بیان کردند که باعث سنگین شدن نانوذرات و کاهش میدان سرعت آنها در جریان‌های ریز جابه‌جایی در سیال می‌شود.

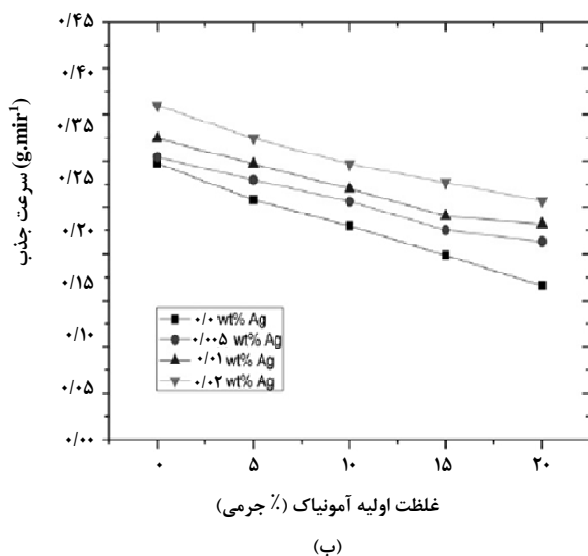
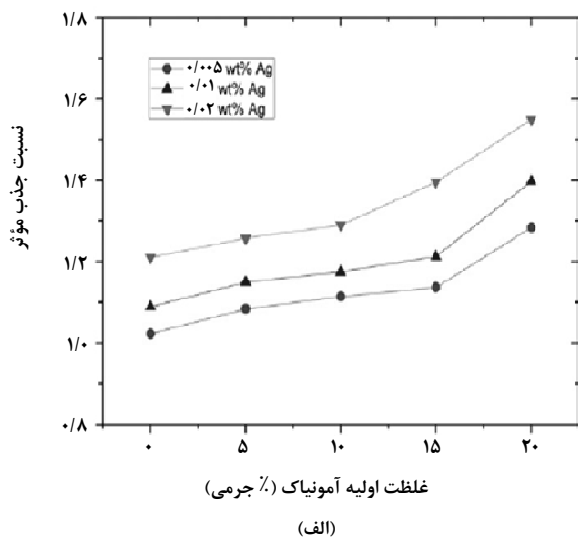
پهلوانی نژاد و همکاران [۲۵] فرایند جذب گاز  $CO_2$  توسط نانوسیال آب /  $Fe_3O_4$  را در یک سیستم فیلم ریزان در حضور و غیاب پایدارکننده بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش غلظت نانوسیال، میزان جذب گاز افزایش می‌یابد. همچنین نانوسیال



شکل ۹. آهنگ جذب آمونیاک در نانوسیال با غلظت‌های اولیه مختلف آمونیاک [۲۰].

در مطالعه دیگری، یانگ و همکارانش [۲۱] اثر سه نوع نانوذره متفاوت آلومینیوم اکسید، آهن اکسید و فریت زینک را در سیستم جذب آب / آمونیاک در یک دستگاه فیلم ریزان بررسی کردند. آنها پی بردند که با افزایش کسر جرمی این نانوذرات و نیز فعال‌کننده سطحی، در گرانیروی نانوسیال افزایش چشمگیری رخ نمی‌دهد و در عین حال سرعت پدیده جذب افزایش می‌یابد که این افزایش در پدیده جذب به پدیده انتقال گرما قابل استناد خواهد بود. آنان نوع نانوذره و کسر جرمی آن، گرانیروی و پایداری نانوسیال و کسر جرمی آمونیاک در سیال پایه را به عنوان پارامترهای کلیدی کار خود بررسی کردند. نتایج حاکی از این بود که نسبت جذب موثر در غلظت اولیه  $15\%$  آمونیاک برای نانوسیال آهن اکسید  $70\%$ ، آلومینیوم اکسید  $30\%$  و فریت زینک تا  $50\%$  افزایش می‌یابد. برای هر کدام از نانوذرات و فعال‌کننده‌های سطحی یک کسر جرمی بهینه معرفی کردند.

شعبانی و همکارانش [۲۲] اثر افزودن نانوذرات سیلیکا را بر جذب گاز کربن دی‌اکسید در محلول نرمال متیل دی اتانول آمین فعال شده با پایپرازین (amDEA) در واکنشگاه هم‌زمان مطالعه کردند. نتایج آزمایش‌های انجام شده بیانگر این نکته است که با افزایش نانوذرات به سیال پایه در غلظت‌های حجمی کمتر از  $0.02\%$ ، میزان جذب گاز نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد. کاهش غلظت حجمی نانوسیال از  $0.02\%$  تا  $0.01\%$  نیز سبب افزایش دو برابری جذب گاز می‌شود و در غلظت بهینه  $0.01\%$  حجمی،  $42\%$  افزایش در جذب گاز نسبت به سیال پایه دیده می‌شود. در زمینه انتقال جرم در



شکل ۱۰. (الف) تغییرات نسبت جذب موثر؛ (ب) تغییرات آهنگ جذب بر حسب غلظت جرمی اولیه آمونیاک و غلظت جرمی نانوذره نقره [۲۷].

حضور سامانه خنک کننده بود. همچنین، شکسته شدن حباب‌های گاز به حباب‌های کوچکتر توسط نانوذرات و بهبود انتقال گرما را، دو علت بهبود انتقال جرم گزارش کردند. در واقع، انتقال گرمای بهتر در سطح تماس دو فاز، باعث کاهش دما در این سطح و به دنبال آن افزایش پتانسیل جذب خواهد شد. نکته دیگری هم که می‌توان به آن اشاره کرد از این قرار است که با افزایش غلظت آمونیاک محلول در ورودی، غلظت آمونیاک خروجی زیاد می‌شود بنابراین، در غلظت‌های آمونیاک ورودی بیشتر، نسبت جذب موثر افزایش و

بدون پایدارکننده شدت جذب بالاتری نسبت به نانوسیال با حضور پایدارکننده دارد، به گونه‌ای که برای تمام غلظت‌های نانوسیال بدون پایدارکننده، نسبت جذب موثر بیشتر از ۱ بوده و سرانجام در غلظت حجمی ۰/۰۵٪ به ۲/۱۹ می‌رسد؛ در حالی که برای نانوسیال حاوی پایدارکننده، این نسبت از غلظت حجمی ۰/۰۱٪ به بیشتر از ۱ و در نهایت در غلظت حجمی ۰/۰۵٪ به ۱/۷۵ می‌رسد. این نتایج نمایانگر تاثیر پایدارکننده بر فرایند جذب است، به این ترتیب که کانونهای فعال برای جذب در نانوسیال بدون پایدارکننده بیشتر از نانوسیال حاوی پایدارکننده است و به همین علت جذب بیشتری انجام می‌شود. مهم‌ترین علت افزایش ضریب انتقال جرم در نانوسیال نیز، حرکت براونی نانوذرات است که با ایجاد گرادیان سرعت در لایه مرزی، انتقال تکانه را افزایش می‌دهد و بنابر تشابه موجود میان پدیده‌های انتقال تکانه و جرم، افزایش انتقال جرم را نیز در پی خواهد داشت. حرکت براونی سبب ایجاد حرکت جابه‌جایی عناصر مایع در لایه مرزی نیز می‌شود و میزان نفوذ را افزایش می‌دهد و در نهایت به افزایش انتقال جرم می‌انجامد.

پنگ و همکاران [۲۶] اثر افزودن نانوذرات  $Al_2O_3$  را بر فرایند جذب گاز  $NH_3$  در آب در یک جذب کننده حبابی مطالعه کردند. گستره تغییرات کسر جرمی نانوذره  $Al_2O_3$  از ۰/۲ تا ۰/۱ و گستره تغییرات غلظت اولیه آمونیاک در محلول از صفر تا ۲۰٪ است. نتایج آنها نشان داد که نسبت جذب موثر در تمامی آزمایش‌ها بیشتر از یک است و با افزایش غلظت اولیه آمونیاک افزایش می‌یابد. زمانی که غلظت اولیه آمونیاک ۲۰٪ و کسر جرمی نانوذرات  $Al_2O_3$  ۰/۵٪ است، نسبت جذب موثر به بیشینه مقدار خود، ۲/۰۱۷ می‌رسد.

پنگ و همکارانش [۲۷] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲، تاثیر نانوذره نقره را بر انتقال جرم فرایند جذب گاز  $NH_3$  در آب در یک برج جذب حبابی مطالعه کردند. آزمایش‌ها به دو شکل انجام شد؛ در یک دسته از آزمایش‌ها آب به عنوان خنک کننده به کار رفته است و در دسته دیگری، از خنک کننده استفاده نشده است. در شکل (۱۰) نتایج حاصل از آزمایش‌ها در حضور سیستم خنک کننده و در شکل (۱۱) مقایسه بین دو دسته آزمایش را مشاهده می‌کنید. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که افزایش انتقال جرم در حضور نانوذرات با استفاده از سامانه خنک کننده بیشتر است. بیشترین میزان افزایش جذب ۵۵٪ و در غلظت جرمی ۰/۰۲٪ نانوذره نقره در

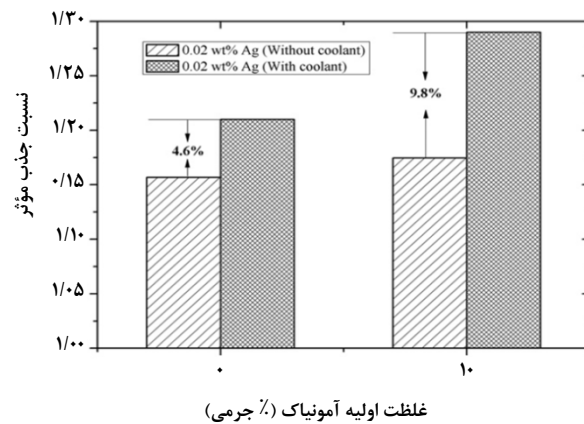
در انتقال جرم مشاهده نکردند. آنان این نتیجه متفاوت با دیگر پژوهش‌ها را مربوط به اثر گرانیروی محلول و اثر انسداد و نفوذناپذیری نانوذرات دانستند و تحلیل کردند که حرکت‌های براونی و جریان‌های میکرونی نانوذرات نمی‌توانند باعث افزایش یا کنترل انتقال جرم و گرما شوند.

جائی‌ون‌لی و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۱۳ اثر نانوذره  $Al_2O_3$  را در بهبود جذب گاز  $CO_2$  در محلول آبی  $NaCl$  بررسی کردند. آنان غلظت نانوذره را در گستره ۰/۰۵ تا ۰/۱ درصد حجمی تغییر دادند و غلظت حجمی ۰/۰۱٪ را به عنوان غلظت بهینه  $Al_2O_3$  معرفی کردند که در این غلظت میزان حلالیت و جذب  $CO_2$ ، به ترتیب، ۱۱٪، ۱۲/۵٪ و ۸/۷٪ در دماهای ۲۰، ۳۰ و ۱۰ درجه سلسیوس افزایش یافته است.

جیانگ و همکاران [۳۲]، در سال ۲۰۱۳، تاثیر نانوذرات را بر فرایند جذب شیمیایی  $CO_2$  در محلول مونواتانول آمین مطالعه کردند. آنان در این پژوهش از نانوذرات  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  بهره بردند و به این نتیجه رسیدند که یک غلظت بهینه برای نانوذرات وجود دارد و نسبت جذب موثر را در غلظت جرمی ۰/۰۶٪  $SiO_2$  تا ۰/۸٪ افزایش می‌دهد. آنان تاثیر اندازه و غلظت نانوذره  $SiO_2$  را بر فرایند جذب نیز بررسی کردند. نتایج حاکی از این بود که هرچه ابعاد نانوذرات کوچکتر باشد، انتقال جرم بهتر صورت می‌گیرد. آنان این نتایج را به کمک سه سازوکار توجیه کردند. اثر خراش که قبلاً توضیح داده شد، نخستین سازوکار مؤثر است که با کاهش اندازه نانوذرات، سطح و تعداد ذرات افزایش می‌یابد و می‌تواند میزان گاز بیشتری را در فصل مشترک جذب کند، ولی بعد از غلظت بهینه، افزایش تعداد نانوذرات به عنوان مانعی در مقابل انتقال جرم عمل می‌کند. دومین سازوکاری که تا غلظت بهینه باعث افزایش جذب می‌شود، حرکت‌های براونی است که به ایجاد جریان‌های میکرونی (ریز) می‌انجامد و انتقال جرم را افزایش می‌دهد؛ سومین عاملی که مورد توجه قرار گرفته، گرانیروی نانوذرات است که با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد و اثر منفی بر انتقال جرم گاز- مایع می‌گذارد.

هیوندائی کیم و همکاران [۳۳]، تاثیر نانوذرات  $SiO_2$  را بر انتقال گرما و جرم در یک سامانه فیلم ریزان برای سامانه جذب آب/لیتیم برمید بررسی کردند. آنان غلظت اولیه لیتیم برمید در سیال پایه، غلظت حجمی نانوذرات  $SiO_2$  در محلول و اثر افزودن

میزان جذب کاهش می‌یابد زیرا نیرومحرکه انتقال جرم (اختلاف فشار آمونیاک در سطح تماس گاز- مایع) کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱. تغییرات نسبت جذب موثر بر حسب غلظت جرمی اولیه آمونیاک در غلظت جرمی ۰/۰۲٪ نانوذره نقره در حضور و غیاب خنک‌کننده [۲۷].

پیندا و همکاران [۲۸]، در سال ۲۰۱۲ اثر نانوذرات  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  را بر جذب گاز  $CO_2$  با سیال پایه متانول در یک برج سینی‌دار بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اثر نانوذرات  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  شدت جذب را، به ترتیب، ۹/۴ و ۹/۷ درصد افزایش می‌دهد. آنان به این نتیجه رسیدند که نانوذره  $SiO_2$  در فرایند جذب بهتر از نانوذره  $Al_2O_3$  است. غلظت بهینه برای هر دو نانوذره معادل ۰/۰۵٪ حجمی به دست آمد. بعد از این غلظت، شدت جذب کاهش می‌یابد. آنان علت کاهش انتقال جرم پس از این غلظت را کاهش ضریب خودنفوذی سیال پایه اعلام کردند. ضریب خودنفوذی همان ضریب نفوذ است هنگامی که گرادیان پتانسیل شیمیایی معادل صفر باشد. جانگ و همکارانش [۲۹] با هدف افزایش میزان جذب گاز  $CO_2$  در متانول، از نانوذرات  $Al_2O_3$  سود جستند. آنان برای این سیستم مقدار ۰/۰۱٪ را غلظت حجمی بهینه معرفی کردند و در آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که آهنگ جذب  $CO_2$  توسط این نانوسیال در غلظت حجمی ۰/۰۱٪ تا ۰/۰۳٪ نسبت به محلول متانول خالص، افزایش می‌یابد.

فنگ و همکارش [۳۰] در سال ۲۰۱۲، تاثیر نانوذرات  $SiO_2$  را بر فرایند جذب گاز اکسیژن در محلول اکسیژن/  $NaCl$  بررسی کردند؛ نتایج آنان با نتایج کار تورانو [۷] تطابق دارد و هیچ گونه بهبودی

$Al_2O_3$  باعث بهبود جذب  $CO_2$  نمی‌شوند، بلکه با افزایش غلظت این ریزذرات کاهش جذب رخ می‌دهد. از سویی، اضافه کردن نانوذرات  $Al_2O_3$  بر بهبود میزان جذب  $CO_2$  تأثیر ضعیفی دارد، که دلیل آن آب‌دوست بودن ذرات  $Al_2O_3$  است؛ به این صورت که در یک محلول آبی سطح ذرات  $Al_2O_3$  توسط مولکول‌های قطبی آب پر می‌شود و ظرفیت جذب  $CO_2$  را بر ذرات  $Al_2O_3$  کاهش می‌دهد. اما AC و CNT میزان انتقال جرم را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند و این امر به دلیل آب‌گریز بودن ذرات AC و CNT است. هنگامی که در یک محلول آبی قرار می‌گیرند به علت آب‌گریز بودن، ظرفیت جذب آنها کاهش نمی‌یابد. با افزایش سرعت همزن نیز نتایج متفاوتی از این دو ذره به دست آمد، به طوری که افزایش سرعت همزن باعث کاهش اثر بهبود انتقال جرم برای ریزذرات AC و افزایش انتقال جرم برای CNT شد که بیانگر متفاوت بودن سازوکارهای بهبود انتقال جرم در ذرات با سایز نانو و میکرون است. در واقع، با افزایش سرعت همزن، از انباشت و خوشه‌ای شدن نانوذرات جلوگیری و نانوذرات به خوبی در واکنشگاه پخش می‌شوند. افزایش سرعت همزن، باعث کاهش زمان ماند ذرات در سطح تماس گاز- مایع نیز می‌شود، و ذرات کافی برای سازوکار جذب را تا قبل از ترک سطح تماس ندارند. سرانجام، با تأثیر این عوامل بر هم، با افزایش سرعت همزن میزان جذب ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. نتیجه دیگری که گرفته شد آن بود که اندازه و نوع ذرات بر انتقال جرم در فرایند جذب مؤثر است. آنان تأثیر اندازه ذرات را با حرکت‌های براونی و ایجاد جریان‌های میکرونی توجیه کردند.

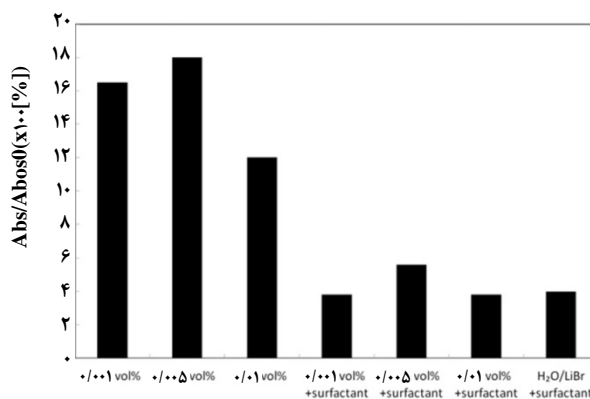
## ۲-۱-۲ سازوکارهای موجود در زمینه ضریب انتقال جرم در

### نانوسیال

کوماتی و ساراش [۳۵] در بررسی ضریب انتقال جرم گاز دی‌اکسید کربن در محلول متیل دی اتانول آمین<sup>۱</sup> (MDEA) در برج با جداره مرطوب ادعا کردند که اگر اندازه ذرات افزوده شده به فاز مایع از ضخامت فیلم مایع کوچکتر باشد (ذرات در حد نانومتر باشند)، انباشت این ذرات در فیلم مایع موجب کاهش مقاومت انتقال جرم در فاز مایع و به افزایش انتقال جرم منجر می‌شود. هرچه این اختلاف اندازه بیشتر باشد، ذرات بیشتری در منطقه مقاومت انتقال جرم واقع می‌شوند و این به نفع انتقال جرم

2. Methyl Di Ethanol Amine

فعال‌کننده سطحی را به عنوان پارامترهای کلیدی کار خود بررسی کردند و پی بردند که غلظت حجمی نانوذرات  $SiO_2$  باید کمتر از ۰/۰۱٪ باشد؛ بیشینه مقدار بهبود نسبت انتقال گرما و جرم مؤثر در غلظت حجمی ۰/۰۵٪ نانوذره  $SiO_2$  نیز، به ترتیب، ۴۶/۸٪ و ۱۸٪ است. به علاوه، افزودن نانوذرات  $SiO_2$  به تنهایی اثر بیشتری نسبت به افزودن همزمان نانوذرات و فعال‌کننده سطحی، بر بهبود انتقال جرم می‌گذارد. آنان نتیجه یادشده را از این قرار تحلیل کردند که حرکت‌های انتقالی ناشی از نانوذرات مانند حرکت‌های براونی اثر زیادی بر عملکرد جذب در نانوسیالات دارد و فعال‌کننده‌های سطحی اثر این حرکت‌های انتقالی نانوذرات را ضعیف می‌کند. در شکل (۱۲) نتایج یادشده را مشاهده می‌کنید. باید گفت که نتایج گزارش شده در این پژوهش با نتایج کنگ [۱۷] در تضاد است. هر دو پژوهش تأثیر نانوذرات را بر جذب آب/ لیتیم برمید در سیستم فیلم ریزان بررسی کردند، اما تفاوت نانوذرات استفاده شده نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. کنگ میزان افزایش انتقال جرم با استفاده از نانوذرات را محسوس‌تر از افزایش انتقال گرما مشاهده کرد، در حالی که کیم خلاف این نتیجه را گزارش داد.



شکل ۱۲. تغییرات نسبت جذب مؤثر بر حسب دبی جرمی محلول و غلظت جرمی نانوذره  $SiO_2$  و فعال‌کننده سطحی [۳۳].

سامین و همکارانش [۳۴] در سال ۲۰۱۳ اثر نانوذرات  $Al_2O_3$  و CNT را بر فرایند جذب گاز  $CO_2$  در آب در یک واکنشگاه همزن‌دار بررسی کردند. آنان نتایج خود را با نتایج به‌دست آمده از اضافه کردن ریزذرات  $Al_2O_3$  (۱۵-۱۰) و کربن فعال<sup>۱</sup> (AC) (۱۰-۵) مقایسه کردند. نتایج حاکی از آن بود که ریزذرات

1. Active Carbon

بیان کردند:

$$V = \sqrt{\frac{18 k_b T}{\rho_p d_p^3}} \quad (5)$$

$$Re = \sqrt{\frac{18 k_b T}{\rho_p v^2 d_p}} \quad (6)$$

که در روابط بالا  $k_b$  ثابت بولتزمن بر حسب  $(\frac{J}{K})$ ،  $d_p$  و  $\rho_p$  به ترتیب، قطر و چگالی ذرات در دستگاه SI و  $T$  دما بر حسب (K) و  $v$  گرانشی بر حسب  $(\frac{m}{s})$  است. فاصله میان ذرات کروی طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۳۹]:

$$L = d_p \left( \frac{0.81}{\varepsilon^3} - 1 \right) \quad (7)$$

که در آن  $\varepsilon$  درصد حجمی ذرات است. اگر فرض کنیم مقدار  $\varepsilon$  معادل با ۰/۰۱ باشد، در آن صورت  $L = 2.76 d_p$ . این فاصله ( $L$ ) از ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی اطراف ذرات کمتر است که به آن معناست که حتی در نانوسیال‌هایی با موجودی کم ذرات، میدان جریان پیرامون ذرات نانو موثر واقع خواهد شد و می‌تواند سبب افزایش انتقال تکانه، مطابق با افزایش گرادیان سرعت در لایه مرزی ذرات نانو شود و در نتیجه آن انتقال جرم را در فاز مایع (نانوسیال) افزایش دهد.

حرکت براونی ذرات نانو که در همسایگی یک ذره قرار دارد، می‌تواند سبب ایجاد حرکت‌های جابه‌جایی نانوسیال در لایه مرزی آن ذره شوند و این اثر می‌تواند میزان انتقال جرم به سمت توده مایع را افزایش دهد. در واقع حرکت براونی باعث ایجاد گرادیان سرعت در لایه مرزی می‌شود و در نتیجه باعث افزایش انتقال تکانه می‌شود، طبق تشابه موجود میان پدیده‌های انتقال تکانه و جرم، افزایش انتقال جرم را نیز در پی خواهد داشت. همچنین حرکت براونی سبب ایجاد حرکت جابه‌جایی در مایع در لایه مرزی شده و میزان نفوذ را افزایش و در نهایت موجب افزایش انتقال جرم می‌شود.

ما و همکارانش [۴۰] اثر نانوذرات CNT را در فرایند جذب حبایی گاز آمونیاک/ آب بررسی و برای افزایش فرایند جذب حبایی از طریق نانوسیال عوامل زیر را گزارش کردند:

۱- میکرو(ریز) جابه‌جایی ایجاد شده از جانب حرکت‌های براونی

نانوذرات که پدیده نفوذ جرم را بهبود می‌بخشد؛

خواهد بود. در واقع، مقاومت اصلی در فیلم مایع، در ناحیه‌ای در نزدیکی فصل مشترک است. وجود ذرات در این ناحیه به خصوص در هنگام برقرار شدن میدان، به ایجاد حرکت‌های اضافی در این ذرات می‌انجامد و این حرکات اضافه مانند همزن‌های کوچک عمل و در داخل لایه مرزی اختلاط<sup>۱</sup> ایجاد می‌کنند و این خود باعث کاهش مقاومت می‌شود.

ریچرت و همکارانش [۳۶] اظهار داشتند که انتقال جرم در یک سامانه همزده با ذرات معلق، به حالت تعلیق ذرات بستگی دارد. در سامانه‌ای که در آن ذرات کاملاً به حالت تعلیق در آمده‌اند، افزایش سرعت همزن سبب نازک‌تر شدن فیلم مایع آرام چسبیده به ذرات می‌شود و این امر افزایش انتقال جرم را به بار می‌آورد. پس، انتقال جرم با سرعت نسبی ذرات نسبت مستقیم دارد. منظور از سرعت نسبی (لغزشی)، سرعت متوسط میان ذره و محیط سیال پیرامونی است. در عمل، دستیابی به این پارامتر ناممکن است، از این رو برای آن تقریب‌هایی در نظر گرفته شده است. به عنوان یک تقریب می‌توان از سرعت ته نشینی ایستا<sup>۲</sup> یاد کرد که این پارامتر مقدار کمینه سرعت نسبی را به دست می‌دهد. در چنین سیستمی، با تولید آشوب توسط ابزارهایی مثل تیغه‌ها، می‌توان به افزایش بیشتری در انتقال جرم دست یافت. افزایش سرعت نسبی به نازک شدن ضخامت لایه مرزی آرام نیز منجر می‌شود و این خود به بهبود انتقال جرم و گرما کمک خواهد کرد. ایجاد حرکت چرخشی از طریق وارد آوردن یک میدان مغناطیسی متناوب می‌تواند موثر واقع شود. وارد آوردن میدان به ذرات معلق، در آنها ایجاد یک گشتاور می‌کند که این گشتاور به حرکت‌های شدید اضافی در ذرات می‌انجامد و چون این ذرات به طور همگن و یکنواخت در سرتاسر محلول پخش شده‌اند، این حرکات باعث می‌شوند که ذرات به عنوان یک همزن در مقیاس ریز (میکرو) در سرتاسر محلول عمل کنند.

پراشر و همکاران [۳۷ و ۳۸]، تاثیر دو عامل را در انتقال جرم در نانوسیال مهم و حائز اهمیت شمردند:

۱. حرکت براونی نانوذرات

۲. حرکت جابه‌جایی عناصر مایع در جریان پیوسته مایع ناشی از

حرکت براونی نانوذرات

آنان سرعت براونی ذرات و عدد رینولدز ذرات نانو را به صورت زیر

1. Mixing
2. Stationary Settling Velocity

بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که اعمال میدانی الکتریکی قادر است به طور چشمگیری سبب تقویت فرایند جذب در سیال پایه شود و ضریب انتقال جرم را افزایش دهد. اما در حضور ذرات نانو در فاز مایع، اعمال میدانی سبب کاهش سرعت انتقال جرم می‌شود. بیشترین مقدار افزایش ضریب انتقال جرم فرایند جذب گاز در آب ۰/۴۵٪ و بیشترین مقدار کاهش آن ۶۳/۵٪ در نانوسیال ۰/۰۵ است و هر دو در شدت میدانی الکتریکی  $\frac{kV}{m}$  ۲۶۶ مشاهده شد. در تحلیل نتایج به دست آمده، از گرانشی و ضریب نفوذ به عنوان دو عامل موثر بر ضریب انتقال جرم نام برده شده است، به این ترتیب که گرانشی و نانوسیال تحت میدانی الکتریکی افزایش می‌یابد. افزایش گرانشی سبب افزایش مقاومت در برابر انتقال جزء جذب شونده از ناحیه فصل مشترک به داخل توده مایع، کاهش دبی مایع، افزایش ضخامت فیلم ریزان، و در نتیجه کاهش ضریب انتقال جرم می‌شود. همچنین ضریب نفوذ در نانوسیال تحت تأثیر میدانی الکتریکی نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش شار انتقال جرم در جهت عمود بر فیلم ریزان می‌شود.

### ۳-۲ اثر برقراری میدان مغناطیسی بر انتقال جرم

در این بخش به بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد میدان مغناطیسی به صورت مجزا و همراه با نانوسیال می‌پردازیم. ریچرت و همکارانش [۳۶] اثر میدانی مغناطیسی متناوب بر میزان انتقال جرم در واکنش خنثی‌سازی محلول سدیم هیدروکسید در حضور ذرات مغناطیسی با ابعاد میکرون (میکرومتر) را در یک مخزن همزده بررسی کردند. پارامترهای متغیر در آزمایش‌های آنها سرعت همزن و شدت میدان مغناطیسی بود. آنها توانستند به افزایش ۲۰٪ در ضریب انتقال جرم دست یابند. در شکل (۱۳) طرح کلی این مخزن همزده و جهت‌گیری ذرات مغناطیسی را تحت تأثیر میدان نشان می‌دهد. آنان این افزایش را در اثر تکانه‌ای دانستند که تحت تأثیر میدان مغناطیسی برقرار شده و باعث جابه‌جایی نانوذرات می‌شود. در واقع، جابه‌جایی نانوذرات سبب افزایش سرعت نسبی بین سطح ذرات و سیال پیرامون آن می‌شود. به بیان دیگر، آنها ایجاد جریان‌های میکرونی در سیال را علت این افزایش دانستند. برقراری میدان روی ذرات معلق، در آنها ایجاد یک گشتاور می‌کند که این گشتاور به حرکات شدید اضافی در ذرات می‌انجامد و چون

۲- اثر خراش که همان جذب سطحی مولکول‌های گاز توسط نانوذرات در فصل مشترک گاز-مایع و گذر از لایه مرزی غلظت و انتقال گاز به داخل بالک مایع است؛

۳- افزایش نگهداشت گاز در نانوسیال نسبت به سیال پایه در دبی یکسانی از گاز که منجر به افزایش ناحیه فصل مشترک گاز-مایع می‌شود و پدیده جذب را بهبود می‌بخشد؛

۴- افزایش ثابت رسانش گرمایی نانوسیال نسبت به سیال پایه، به افزایش انتقال گرما می‌انجامد و در نتیجه دمای سطح مشترک گاز-مایع را کاهش می‌دهد و این امر پتانسیل جذب در فاز مایع را افزایش می‌دهد.

### ۳- مطالعات انجام شده در زمینه اثر اعمال میدان خارجی بر انتقال جرم

پژوهش در منابع مطالعه آنها نشان می‌دهد که تحقیقات انگشت‌شماری در زمینه‌ی افزایش میزان جذب و ضریب انتقال جرم با استفاده‌ی همزمان از نانوسیال و وارد آوردن میدان خارجی انجام شده است. پژوهش‌ها در زمینه برقراری میدان خارجی به دو دسته میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی تقسیم می‌شوند.

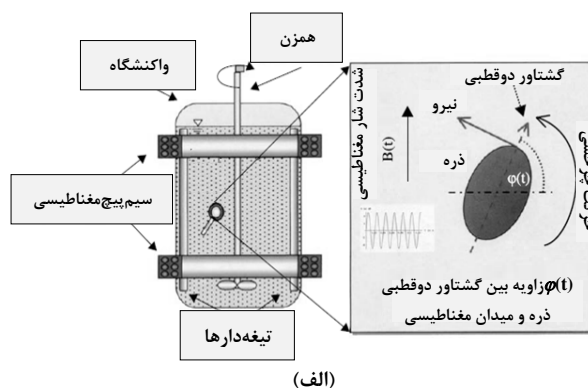
#### ۳-۱ اثر برقراری میدان الکتریکی بر انتقال جرم

جستجوی منابع نمایانگر آن است که مطالعات در زمینه برقراری میدان الکتریکی محدودتر از بررسی‌های انجام شده در زمینه اعمال میدان مغناطیسی بر انتقال جرم است.

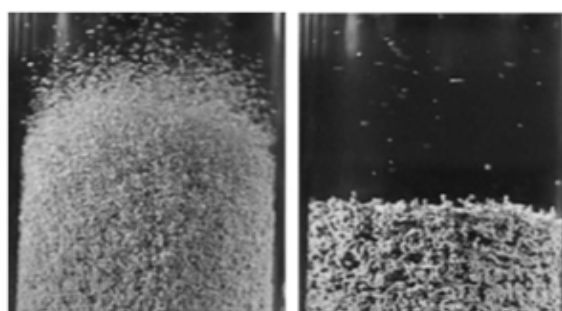
هاکر و احمدزاده [۴۱] تأثیر میدانی الکتریکی بر انتقال جرم گاز/مایع را در فرایند تبخیر استون از سطح قطره به داخل جریان گاز نیتروژن بررسی کردند. فاز مایع محلول ۵۰٪ استون-آب بود که پس از عبور از شیپوره به وسیله دو الکتروود تحت میدانی الکتریکی قرار می‌گرفت. آنان در آزمایش‌های خود به افزایش ۵۰٪ در سرعت تبخیر دست یافتند. آنان این افزایش را به عدد رینولدز افزایش یافته تحت برقراری میدان، به جای افزایش جریان داخلی و آشوب در فصل مشترک نسبت دادند. باید گفت که در این پژوهش از نانوذرات استفاده نشده و تنها اثر میدانی الکتریکی بررسی شده است.

حسینی و همکاران [۴۲] تأثیر میدانی الکتریکی را بر ضریب انتقال جرم فرایند جذب گاز کربن دی‌اکسید در نانوسیال آب/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

این ذرات به طور همگن و یکنواخت در همه محلول پخش شده‌اند، این حرکات باعث می‌شوند که ذرات به عنوان یک همزن در مقیاس میکرو در سرتاسر محلول عمل کنند.



(الف)



(۲)

(ب)

(۱)

شکل ۱۳. (الف) طرح کلی مخزن همزده مجهز به میدان مغناطیسی؛ (ب) جهت‌گیری ذرات مغناطیسی؛ (۱) در غیاب میدان مغناطیسی؛ (۲) در حضور میدان مغناطیسی [۳۶].

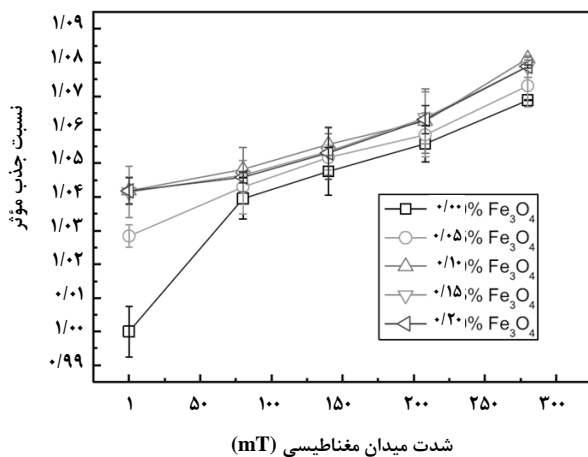
فیلم ریزان پارامترهای یادشده کاهش می‌یابند. نتایج حاصل از اعمال میدان ثابت و همسو با جهت فیلم ریزان حاکی از آن است که میزان جذب گاز آمونیاک در حضور میدان مغناطیسی بیشتر است. میزان جذب در غلظت‌های آمونیاک بیشتر در ورودی، نیز کاهش می‌یابد و این امر به دلیل آن است که وقتی غلظت آمونیاک محلول در ورودی افزایش می‌یابد، فشار جزئی آمونیاک بیشتر می‌شود و اختلاف فشار آمونیاک در سطح تماس گاز- محلول و فشار جزئی آمونیاک حل شده در محلول کاهش می‌یابد و نیروی محرکه انتقال جرم، برای عملیات جذب کاهش می‌یابد. همچنین لازم به ذکر است که این روند کاهشی در حضور یا غیاب میدان مغناطیسی برقرار است ولی در حضور میدان مغناطیسی این کاهش جذب کمتر است. نتایج حاصل از برقراری میدان مغناطیسی با شدت‌های مختلف همسو با جهت فیلم ریزان نشان می‌دهد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، میزان جذب گاز آمونیاک افزایش می‌یابد.

سارش و بالرائو [۴۴] اثر افزودن نانوذرات مغناطیسی را به یک سامانه گاز- مایع بررسی و رفتار ذرات را با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی متناوب دست کاری کردند. آنان انتظار داشتند که ذرات مغناطیسی به خاطر تمایلی که به دنبال کردن میدان دارند، سبب ایجاد یک اختلاط در نزدیکی ناحیه فصل مشترک دو فاز شوند و در نتیجه افزایشی در میزان جذب رخ دهد. آنان این بررسی را در هندسه ستون حبابی و نیز ستون با جداره مرطوب انجام دادند و افزایشی در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد در میزان جذب مشاهده کردند. این پژوهشگران گزارش کردند که افزایش میزان جذب در حضور میدان بیشتر از حالت غیاب میدان است.

کوماتی و سارش [۳۵] نیز اثر غلظت‌های مختلف نانوذره مغناطیسی  $Fe_3O_4$  را بر میزان جذب گاز  $CO_2$  توسط متیل دی‌اتانول آمین در یک برج با جداره مرطوب بررسی کردند. آنان مشاهده کردند که با افزایش غلظت نانوذرات در فاز مایع، میزان جذب افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش در حدود ۹۲/۸٪ در غلظت حجمی ۰/۳۹٪ بود. آنان در سیستم خود تاثیر چندانی بر میزان جذب با برقراری میدان مغناطیسی متناوب خارجی با شدت ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ گاوس و بسامد ۵۰ تا ۱۰۰ هرتز در غلظت‌های حجمی بین ۰/۳۹ تا ۰/۰۲ درصد مشاهده نکردند.

در آخرین مطالعات انجام شده در سال ۲۰۱۳، وو و همکارانش [۴۵]

نیو و همکارانش [۴۳]، تاثیر میدان مغناطیسی را بر جذب گاز آمونیاک در آب درون برج با جداره مرطوب مطالعه و بررسی کردند. باید گفت که در این پژوهش اثر میدان مغناطیسی بدون حضور نانوذرات در سیستم مطالعه شده و میدان مغناطیسی ثابت و متغیر با شدت‌های مختلف و در دو جهت مخالف و همسو با جهت فیلم ریزان برقرار شد و مقدار بهینه پارامترهای عملیاتی بر میزان جذب به دست آمده است. نتایج نشان داد که غلظت محلول آمونیاکی خروجی از پایین برج، دمای خروجی آب خنک کننده و میزان انتقال جرم و انتقال گرما در حضور میدان مغناطیسی هم جهت با فیلم ریزان نسبت به حالتی که میدان اعمال نشده است، افزایش می‌یابد و در حضور میدان مغناطیسی خلاف جهت



شکل ۱۴. نسبت جذب موثر برحسب غلظت‌های مختلف نانوفروسیال در محلول، تحت میدان مغناطیسی و غلظت جرمی اولیه ۲۰٪ آمونیاک [۴۵].

می‌دهد که مطالعات محدودی در زمینه افزایش میزان جذب و ضریب انتقال جرم در سیستم گاز-مایع با بهره‌گیری از نانوسیال و اعمال میدان خارجی انجام شده است. همچنین، نتایج موجود گاه تفاوت‌هایی را نشان می‌دهند که لزوم انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه را ایجاب می‌کند. در مجموع، مطالعه تحقیقات انجام گرفته در این زمینه غالباً نشان‌دهنده افزایش ضریب انتقال جرم با استفاده از نانوسیالات است. همان‌طور که گفته شد، سازوکار عملکرد نانوذرات در افزایش ضریب انتقال جرم همچنان تا حدودی مبهم است اما حرکت‌های براونی نانوذرات، اثر خراش و افزایش زمان ماند فاز گاز در نانوسیالات از جمله عواملی‌اند که این بهبود را توجیه می‌کنند. همچنین، مطالعات انجام شده حاکی از آن است که بهره‌گیری از میدان مغناطیسی خارجی تنها زمانی باعث افزایش انتقال جرم خواهد شد که میدان اعمال شده هم جهت با حرکت نانوسیال باشد. در واقع، اعمال میدان مغناطیسی در حضور نانوذرات در آنها ایجاد یک گشتاور می‌کند که این گشتاور به تشدید حرکت‌های اضافی در ذرات منجر می‌شود و چون این ذرات به طور همگن و یکنواخت در سرتاسر محلول پخش شده‌اند، این حرکات باعث می‌شوند که ذرات به عنوان یک همزن در سرتاسر محلول عمل کنند و باعث اختلاط داخل لایه مرزی می‌شوند که این خود باعث کاهش مقاومت و بهبود انتقال جرم خواهد شد.

تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایند جذب گاز آمونیاک در آب/نانوفروسیال Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> با هندسه جذب حبابی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش حاکی از این بود که به کارگیری همزمان فروسیال همراه با برقراری میدان مغناطیسی، جذب آمونیاک در آب را افزایش می‌دهد. همچنین، در شرایط مشابه، افزایش میزان جذب با به کارگیری همزمان هر دو عامل (فروسیال و میدان مغناطیسی)، بیشتر از افزایش میزان جذب گاز به ازای بهره‌گیری از هر کدام به تنهایی است. در این تحقیق، اثر غلظت فروسیال و شدت میدان مغناطیسی بررسی شده است و در یک گستره ثابت شدت میدان مغناطیسی، غلظت فروسیالی را که در آن بیشترین مقدار افزایش جذب اتفاق می‌افتد، به دست آورده‌اند. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی در غلظت ثابت فروسیال، میزان جذب نیز افزایش می‌یابد. آنان مشاهده کردند که تحت شرایط آدیاباتیک در غلظت جرمی ۲۰٪ آمونیاک و غلظت جرمی ۱۰٪ فروسیال و شدت میدان مغناطیسی ۲۸۰ تسلا، بیشترین نسبت جذب موثر ۱/۰۸۱۲ است. در شکل (۱۴)، نتیجه یادشده را مشاهده می‌کنید. با توجه به شکل (۱۴)، می‌توان نتیجه گرفت که کمترین نسبت جذب موثر یا غلظت جرمی نهایی زمانی رخ داده است که از میدان مغناطیسی و نانوفروسیال استفاده نشده و تنها جذب آمونیاک در آب اتفاق افتاده است. همچنین، برای تمامی غلظت‌های فروسیال Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> با افزایش شدت میدان، نسبت جذب موثر افزایش یافته است. باید گفت که فروسیال به نوعی سوسپانسیون گفته می‌شود که در آن نانوذرات مغناطیسی مانند مگنتیت (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)، مگهمیت (γ-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)، کبالت، نیکل و مانند آنها در داخل یک سیال مانند آب یا روغن هیدروکربنی به حالت پایدار پراکنده شده باشد. ویژگی مهم این سیال‌ها از این قرار است که وقتی تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، خواص جریان‌شناسی آنها از جمله گرانشی تغییر می‌کند [۴۶].

#### ۴- نتیجه‌گیری کلی

تحقیقات انجام شده در زمینه اثر افزودن نانوذرات بر ضریب نفوذ بیانگر آن است که حرکت‌های براونی نانوذرات، جریان‌های میکرونی را در محلول افزایش می‌دهد و باعث افزایش ضریب نفوذ نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌شود. علاوه بر این، جستجوی منابع نشان

- [1] Treybal, R. E., Mass Transfer Operations, McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> ed, Singapore, pp275-341, (2001).
- [2] Chen, J. H., Chang, H., Chan, S. R., "Simulation study of a hybrid absorber-heat exchanger using hollow fiber membrane module for the ammonia-water absorption cycle", International Journal of Refrigeration, Vol. 29, pp 1043-1052, (2006).
- [3] Kim, K. J., Berman, N. S., Wood, B. D., "The interfacial turbulence in falling film absorption: effect of additives", International Journal of Refrigeration, Vol. 19, pp 322-330, (1996).
- [4] Yu, W., France, D. M., Choi, S. U. S., Routbort, J. L., "Review and National Laboratory", Technical Report, ANL/SED/07-9, (2007).
- [5] Krishnamurthy, S., Bhattacharya, P., Phelan, P. E., "Enhanced mass transport in nanofluids", NanoLetters, Vol. 6, pp 419-423, (2006).
- [6] Feng, X., Xuan, Y., Li, Q., "Experimental investigation on enhanced mass transfer in nanofluids", Applied Physics Letters, Vol. 95, pp 203108-1-2-3, (2009).
- [7] Turanov, A. N., Tolmachev, Y. V., "Heat- and mass-transport in aqueous silica nanofluids", Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp 1583-1588, (2009).
- [8] Ashrafmansouri, S. S., Nasr Esfahany, M., Azimi, Gh., Etesami, N., "Experimental investigation of water self-diffusion coefficient and tracer diffusion coefficient of tert-butanol in water-based silica nanofluids", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 86, pp 166-174, (2014).
- [9] Einstein, A., Investigations on the Theory of Brownian movement, Dover Publications, first ed, New York, pp 371-381, (1956).
- [10] Miller, Ch., "The Stokes-Einstein for diffusion in solution", the Royal society of London, Vol. 106, No. 740, pp 724-749, (1924).
- [11] Prasher, R. S., Bhattacharya, P., Phelan, P. E., "Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (Nanofluids)", Physical Review Letters, Vol. 94, (2005).
- [12] Dagaonkar, M. V., Heeres, H. J., Beenackers, A. A. C. M., Pangarkar, V. G., "The application of fine TiO<sub>2</sub> particles for enhanced gas absorption", Chemical Engineering Journal, Vol. 92, pp 151-159, (2003).
- [13] 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, Vol. 43, pp 16851-16858, (2014).
- [14] Beiki, H., Nasr Esfahany, M., Etesami, N., "Laminar forced convective mass transfer of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/electrolyte nanofluid in a circular tube", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 64, pp 251-256, (2013).
- [15] Kim, J. K., Jung, J. Y., Kang, Y. T., "The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid", International Journal of Refrigeration, Vol. 29, pp 22-29, (2006).
- [16] Kim, J. K., Jung, J. Y., Kang, Y. T., "Absorption performance enhancement by nano-particles and chemical surfactants in binary nanofluids", International Journal of Refrigeration, Vol. 30, pp 50-57, (2007).
- [17] Kang, Y. T., Kim, H. J., Lee, K., "Heat and mass transfer enhancement of binary nanofluids for H<sub>2</sub>O/LiBr falling film absorption process", International Journal of Refrigeration, Vol. 31, pp 850-856, (2008).
- [18] Wu, W. D., Pang, C. W., Sheng, W., "Enhancement on NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O Bubble Absorption in Binary Nanofluids by Mono Nano Ag", Journal of Chemical Industry and Engineering, Vol. 65, No. 1, pp 1112-1117, (2010).
- [۱۹] قاسمی فلاورجانی، م.، نصرافهانی، م.، اعتصامی، ن.، "افزایش ضریب انتقال جرم حجمی در راکتور همزن‌دار در فرآیند جذب گاز کربن دی‌اکسید در آب با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم"، چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی، دانشگاه شریف، تهران، (۱۳۹۱).
- [20] Yang, L., Du, K., Cheng, B., Jiang, Y., "The influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid on the falling film absorption with ammonia-water", the Natural Science Foundation of China (No. 50876020), (2010).
- [21] Yang, L., Du, K., Niu, X. F., Cheng, B., Jiang, Y. F., "Experimental study on enhancement of ammonia-water falling film absorption by adding nano-particles", International Journal of Refrigeration, Vol. 34, pp 640-647, (2011).
- [۲۲] شعبانی، ن.، نصرافهانی، م.، فیض، ا.، اعتصامی، ن.، "بررسی آزمایشگاهی اثر افزودن نانوذرات سیلیکا به محلول متیل دی‌اتانول آمین فعال شده در فرآیند جذب گاز دی‌اکسید کربن"، چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی، دانشگاه شریف، تهران، (۱۳۹۱).
- [23] Lee, J. K., Koo, J., Hong, H., Kang, Y. T., "The effects of nanoparticles on absorption heat and mass transfer performance in NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O binary nanofluids", International Journal of Refrigeration, Vol. 33, pp 269-275, (2010).
- [24] Lee, J. W., Jung, J. Y., Lee, S. G., Kang, Y. T., "CO<sub>2</sub> bubble absorption enhancement in methanol-based nanofluids", International Journal of Refrigeration, Vol. 34, pp 1727-1733, (2011).
- [۲۵] پهلوانی‌نژاد، م.، اعتصامی، ن.، نصرافهانی، م.، "بررسی ضریب انتقال جرم فرآیند جذب گاز CO<sub>2</sub> توسط نانوسیال آب/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> در حضور و عدم حضور پایدارکننده"، پانزدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۹۳.
- [26] Pang, Ch., Wu, W., Wu, R., Chen, Sh., "The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O bubble absorption performance in binary nanofluids", IEEE (International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring), pp 1398-1401, (2011).

- [27] Pang, Ch., Wu, W., Sheng, W., Zhang, H., Kang, Y. T., "Mass transfer enhancement by binary nanofluids ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O} + \text{Ag}$  Nanoparticles) for bubble absorption process", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp 2240-2247, (2012).
- [28] Pineda, I. T., Lee, J. W., Jung, I., Kang, Y. T., "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*, Vol. 35, pp1402-1409, (2012).
- [29] Jung, J. Y., Lee, J. W., Kang, Y. T., "CO<sub>2</sub> absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, pp 2285-2290, (2012).
- [30] Feng, X., Johnson, D. W., "Mass transfer in SiO<sub>2</sub> nanofluids: a case against purported nanoparticle convection effects", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp 3447-3453, (2012).
- [31] 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*, Vol. 53, pp 206-211, (2013).
- [32] Jiang, J., Zhao, B., Cao, M., Wang, Sh., Zhuo, Y., "Chemical absorption kinetics in MEA solution with nano-particles", *Energy Procedia*, Vol. 37, pp 518-524, (2013).
- [33] Kim, H., Jeong, J., Kang, Y. T., "Heat and mass transfer enhancement for falling film absorption process by SiO<sub>2</sub> binary nanofluids", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp 645-651, (2012).
- [34] Sumin, L., Min, X., Yan, S., Xiangjun, D., "Experimental and theoretical studies of CO<sub>2</sub> absorption enhancement by nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and carbon nanotube particles", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 21(9), pp 983-990, (2013).
- [35] Komati, S., Suresh, A. K., "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*, Vol. 83, pp 1094-1100, (2008).
- [36] Reichert, C., Hoell, W. H., Franzreb, M., "Mass transfer enhancement in stirred suspensions of magnetic particles by the use of alternating magnetic fields", *Powder Technology*, Vol. 145, pp 131-138, (2004).
- [37] Prasher, R. S., Phelan, P. E., Bhattacharya, P., "Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid)", *Nanoletters*, Vol. 6, No.7, pp 1529-1534, (2006a).
- [38] Prasher, R. S., Bhattacharya, P., Phelan, P. E., "Brownian-Motion-based convective-conductive model for the effective thermal conductivity of nanofluids", *Transactions of the ASME*, Vol. 128, pp 588-595, (2006b).
- [39] Nagy, E., Hadik, P., "Three-Phase mass transfer: effect of the size distribution", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 42, pp 5363-5372, (2003).
- [40] Ma, X., Su, F., Chen, J., Bai, T., Han, Z., "Enhancement of bubble absorption process using aCNTs-Ammonia binary nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp 657-660, (2009).
- [41] Harker, J. H., Ahmadzadeh, J., "Effect of electric field on mass transfer from falling drops", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 17, pp 1219-1225, (1974).
- [42] Hoseini, N., Nasr Esfahani, M., Fadaei, E., Etesami, N., "Experimental investigation of mass transfer coefficient of gas absorption in nanofluid in the presence of electric field", 7<sup>th</sup> International Chemical Engineering Congress & Exhibition, Kish, Iran, 21-24 November, (2011).
- [43] Niu, X. F., Du, K., Xiao, F., "Experimental study on Ammonia-Water falling film absorption in external magnetic fields", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, pp 686-694, (2010).
- [44] Suresh, A. K., Bhalerao, S., "Rate intensification of mass transfer process using ferrofluids", *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, Vol. 40, pp 172-184, (2001).
- [45] Wu, W. D., Liu, G., Chen, Sh. X., Zhang, H., "Nanoferrofluid addition enhances Ammonia/Water bubble absorption in an external magnetic field", *Energy and Buildings*, Vol. 57, pp 268-277, (2013).

[۴۶] قاسمی، ا.، میرحبیبی، ع.، ادیسی، م.، "بررسی تأثیر دما بر خواص سیالیتفروسیال مغناطیسی بر پایه مگنتیت"، ششمین کنگره سرامیک ایران، تهران، (۱۳۸۶).