

## بررسی تجربی سطح تماس ویژه در بستر آکنده‌ی دوار ناهمسو

فریبا زارعی، محمودرضا رحیمی\*<sup>+</sup>

آزمایشگاه تحقیقاتی تشدید فرایندها، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

**چکیده:** با توجه به بازده چشمگیر بسترهای آکنده دوار، در این پژوهش ضمن تشریح کامل روش تعیین تجربی سطح تماس ویژه (با در نظر گرفتن واکنش شیمیایی)، تأثیر عامل‌هایی چون غلظت محلول جاذب ورودی و کسر مولی جذب شونده‌ی موجود در فاز گاز (توأم با شدت جریان دو فاز گاز - مایع و سرعت چرخش بستر) بر میزان تجربی سطح تماس ویژه مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا، اثرپذیری عامل سطح تماس از متغیرهای عملیاتی مطرح شده (با هدف بهبود مجموعه متغیرهای عملیاتی موثر در دست‌یابی به بیش‌ترین میزان بازدهی سامانه) بر پایه ۳۲۴ داده تجربی اندازه‌گیری شده بررسی شد. مطابق با نتیجه‌های به‌دست آمده بر خلاف تصور مرسوم دو عامل جدید مطرح شده در این مطالعه (غلظت جاذب و جذب شونده ورودی) به میزان چشمگیری بر مقدار تجربی سطح تماس ویژه و به دنبال آن ضریب کلی انتقال جرم، بازدهی و اندازه‌های بهینه سامانه عملیاتی اثرگذار بودند. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که این دو متغیر به عنوان عامل‌های مهم و اثرگذار در مطالعه تجربی و مدل‌سازی این پارامتر (سطح تماس ویژه) در طراحی سامانه عملیاتی مطرح هستند.

**واژه‌های کلیدی:** مطالعه تجربی؛ فرایند جذب؛ سطح تماس ویژه؛ جریان ناهمسو؛ بستر آکنده‌ی دوار.

**KEYWORDS:** Experimental study; Absorption; Effective interfacial area; Countercurrent flow; Rotating packed bed.

### مقدمه

تبلور [۱۱، ۱۰] دارند. بنابراین، با توجه به اهمیت تعیین میزان مقاومت انتقال جرم و همچنین سطح تبادل جرم بین دو فاز د ر سامانه‌های شامل بستر پر شده، پیش‌بینی مناسب آن در بسترهای آکنده دوار نیز دارای اهمیت است. بدین منظور، تاکنون روش‌های بسیاری برای تعیین تجربی این پارامتر مورد استفاده قرار گرفته است که به‌طور کلی این روش‌ها را می‌توان به دو روش کلی فیزیکی و شیمیایی تقسیم بندی کرد. در روش فیزیکی، سطح تماس ویژه تابعیتی از ویژگی‌های فیزیکی دو فاز مایع و گاز جریان یافته در سامانه را دارد [۱۵ - ۱۲] و روش شیمیایی که بر اساس مطالعه سنتیک واکنش شیمیایی صورت گرفته است

افزایش سطح تبادل جرم میان دو فاز درگیر در فرایندهای جداسازی از مهم‌ترین دغدغه‌های طراحان سامانه‌های صنعتی است. در این راستا، تاکنون تلاش‌های بسیاری توسط پژوهشگران گوناگون صورت گرفته است. بسترهای آکنده‌ی دوار یکی از سامانه‌های آرایه شده در این زمینه است که اولین بار در سال ۱۹۸۱ میلادی توسط رامشا و ملیسون ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت [۱]. این سامانه‌ها به واسطه بهره‌گیری از نیروی گریز از مرکز سطح تماس بین دو فاز را به میزان چشمگیری بهبود دادند [۲] و امروزه کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های گوناگون مانند جذب [۶ - ۳]، جریان سازی [۷]، تقطیر [۹، ۸] و

\*عقد دار مکاتبات

+E-mail: mrrahimi@yu.ac.ir

از جمله پژوهش‌های دیگر انجام شده در این حوزه، مطالعه صورت گرفته توسط گو<sup>(۴)</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی بود که به منظور تعیین سهم آکنه‌های احاطه شده در روتور در سطح تماس کل ایجاد شده، انجام شد [۲۵]. پس از آن چن<sup>(۵)</sup> و تسای<sup>(۶)</sup> در سال ۲۰۱۵ میلادی با اصلاح وضعیت روتور و آکنه‌های مورد استفاده، صفحه‌هایی را در بخش‌های میانی روتور تعبیه کردند. آن‌ها طی این پژوهش، ضمن تأیید تأثیر استفاده از این صفحه‌ها در افزایش سطح تماس ویژه، مقادیرهای اندازه‌گیری شده‌ی خود را گزارش کردند [۲۶]. همچنین، چیو<sup>(۷)</sup> و همکاران در همان سال میزان سطح تماس ویژه مربوط به یک سامانه سری متشکل دو بستر آکنده دوار ناهمسو را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از تعیین میزان درصد جذب کربن دی اکسید در هریک از مرحله‌ها، سطح تماس ویژه هر یک از بسترهای آکنده دوار مورد استفاده را تعیین و گزارش کردند [۲۷]. همچنین، مطالعه‌های انجام شده توسط لو<sup>(۸)</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی از تازه‌ترین تلاش‌های صورت گرفته در این حوزه است. آن‌ها در این پژوهش با طراحی نوع خاصی از آکنه‌های منظم با استفاده از فولاد ضد زنگ میزان سطح تماس ویژه را اندازه‌گیری و مقادیرهای به‌دست آمده سطح تماس ویژه در شرایط عملیاتی همانند را برای چهار نوع آکنه دیگر مورد بررسی قرار دادند [۲۸]. با این حال، با وجود تعدد مطالعه‌های انجام شده، عدم ارایه شفاف روش تعیین پارامترهای مورد نیاز در تعیین تجربی سطح تماس ویژه و همچنین اجتناب از مطالعه اثرپذیری غلظت جذب شونده ورودی در فاز گاز (به عنوان عامل اثرگذار بر میزان سطح تماس به‌دست آمده) از بیش‌ترین خلاهای موجود در این حوزه می‌باشد که در این پژوهش برای برطرف کردن آن تلاش شده است. در این راستا، در این مطالعه روش تعیین تجربی سطح تماس ویژه و پارامترهای مورد استفاده در محاسبه‌های مربوط به این عامل به‌طور کامل تبیین شد. همچنین، پس از آن ۳۲۴ داده تجربی با در نظر گرفتن مجموعه پنج عضوی از متغیرهای عملیاتی مؤثر (شدت جریان فاز گاز و مایع ورودی، غلظت جاذب و جذب شونده موجود در جریان‌های ورودی و سرعت چرخش بستر) اندازه‌گیری و گزارش شد.

و در آن سطح تماس ویژه سامانه به‌صورت تابعی از شدت جذب صورت گرفته قابل بررسی است [۲۰ - ۱۶]. در نتیجه این روش‌ها و به دنبال آن تعیین میزان سطح تماس ویژه بین دوقاز، بررسی مقاومت کلی هر یک از دو فاز امکان پذیر است. معادله‌ی (۱) نشان دهنده تابعیت میزان مقاومت و ضریب کلی انتقال جرم از سطح تماس ویژه است [۲۱]. مطابق با این رابطه، در صورت افزایش میزان سطح تماس دو فاز (به دنبال آن افزایش میزان انتقال جرم صورت گرفته) ضریب کلی انتقال جرم و میزان مقاومت حاکم در فاز مورد نظر کم‌تر می‌شود.

$$\frac{1}{K_g a} = \frac{1}{k_g a} + \frac{1}{Hk_l a} = \frac{1}{HK_L a} \quad (1)$$

با این حال ارایه مجموعه جامعی از متغیرهای مؤثر و همچنین شفاف سازی مراحل آزمایشگاهی در تعیین تجربی این پارامتر (با توجه به تأثیر چشمگیر تعیین دقیق سطح تماس ویژه در سامانه‌های جداسازی) دارای اهمیت است. در این راستا، تاکنون مطالعه‌های گسترده‌ای توسط پژوهشگران گوناگون انجام شده است. فعالیت‌های انجام شده توسط مونجال<sup>(۱)</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۹ میلادی از اولین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه بود. آن‌ها با استفاده از سامانه جذب کربن دی اکسید در محلول آبی هیدروکسید سدیم، تابعیت سطح تماس ویژه از عامل‌هایی چون سرعت چرخش بستر و شدت جریان دو فاز مایع و گاز را مورد بررسی قرار دادند و داده‌های تجربی و رابطه ریاضی پایانی به‌دست آمده خود را ارایه کردند [۲۲]. همچنین در سال ۲۰۱۱ میلادی یانگ<sup>(۲)</sup> و همکاران طی بررسی‌های خود سهم هریک از ناحیه‌های بخش دوار در میزان کل سطح تماس ایجاد شده را مشخص کردند و نتیجه‌های اندازه‌گیری خود را ارایه کردند. مطابق با نتیجه‌های به‌دست آمده در این پژوهش، سهم ۷۰ درصدی بخش پر شده در سطح تماس کل ایجاد شده، بیانگر تأثیر چشمگیر نوع آکنه مورد استفاده است [۲۳]. پس از آن لو<sup>(۳)</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی به منظور افزایش میزان سطح تماس ویژه در بخش پر شده بستر آکنده دوار طی بررسی‌هایی به اصلاح ساختار و طراحی آکنه‌های مورد استفاده پرداختند [۲۴].

(۱) Munjal

(۲) Yang

(۳) Luo

(۴) Guo

(۵) Chen

(۶) Tsai

(۷) Chu

**بخش نظری****رابطه‌های نظری**

که  $C_{CO_3^-}$  و  $C_{OH^-}$  به ترتیب غلظت دو یون هیدروکسید و کربنات موجود در نمونه مایع خروجی از سامانه است که با استفاده از تیتراسیون با شناساگر (تیتراسیون هدایت سنجی نمونه به دست آمده) تعیین شد. در این مطالعه با بهره‌گیری از تیتراسیون در حضور شناساگرهای متیل اورانژ و فنل فتالین، غلظت دو یون هیدروکسید و بی کربنات مطابق معادله‌های (۱۳) و (۱۴) به دست آمد. افزون بر این، در معادله‌ی (۵) پارامتر  $H$  ضریب حلالیت کربن دی‌اکسید در محلول سود است که بر اساس معادله‌های زیر قابل محاسبه است:

$$\log\left(\frac{H}{H_0}\right) = -\sum hI \quad (9)$$

$$H_0 = 2.82 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{2044}{T}\right) \quad (10)$$

$$I = \sum C_i Z_i^2 \quad (11)$$

$$h = h_+ + h_- + h_G \quad (12)$$

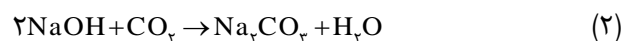
$$C_{OH^-} = \frac{V_{ph}}{V_0} \times C_{HCL} \quad (13)$$

$$C_{CO_3^-} = \frac{V_m - V_{ph}}{V_0} \times C_{HCL} \quad (14)$$

**روش آزمایشگاهی**

سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش مطابق شکل ۱ بود. در این مطالعه از بستر آکنده دواری با جریان ناهمسو با شعاع داخلی ۳ و شعاع خارجی ۶ و ارتفاع ۴ سانتیمتر استفاده شد که دارای بخش دواری با میزان تخلخل ۰/۹ و سطح ۱۴۰۰ مترمربع بر متر مکعب برای بخش پر شده، بود. سرعت چرخش بستر، نرخ جریان گاز و شدت جریان محلول جاذب ورودی، در کنار غلظت محلول جاذب و کسر مولی جذب شونده از جمله متغیرهای عملیاتی مورد بررسی بود که بازه‌ی تغییرهای هر یک از متغیرهای مورد بحث در جدول ۱ مشهود است. مطابق با آن ۳۲۴ داده تجربی اندازه‌گیری و به منظور مطالعه اثرپذیری سطح تماس ویژه از هر یک از عامل‌های مطرح شده، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین شایان ذکر است که نتیجه‌های گزارش شده در فشار ۱ اتمسفر و دمای ۱۹ درجه سلسیوس

همان‌گونه که مطرح شد، در این پژوهش سطح تماس ویژه با استفاده از روش شیمیایی و بررسی سینتیک واکنش جذب کربن دی‌اکسید در محلول سود به شرح زیر قابل اندازه‌گیری است:



بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته در منابع و مراجع گوناگون، معادله‌ی مربوط به میزان شدت جذب به دست آمده بر اساس این واکنش، به صورت زیر است [۲۳، ۲۴]:

$$N_1 = AC_1 \sqrt{Dk_1 + k_1^2} \quad (3)$$

که در آن رابطه غلظت به صورت حاصل ضرب ثابت هنری در فشار جزئی کربن دی‌اکسید است [۲۹].

$$\left(\frac{N_1}{HP_{CO_2}}\right)^2 = A^2 Dk_1 + A^2 Dk_1^2 = A^2 Dk_1 \left(1 + \frac{1}{r^2}\right) \quad (4)$$

موهانتی<sup>(۱)</sup> و همکاران [۳۰] طی بررسی‌های خود نشان دادند که در صورت بیش‌تر بودن پارامتر  $\gamma$  از ۳ می‌توان از نسبت  $\frac{1}{r^2}$  در برابر ۱ صرف نظر کرد. همچنین، در معادله‌ی (۴)،  $N_i$  نشان دهنده‌ی میزان شدت جذب تجربی به دست آمده و  $k_1$  ثابت سرعت مربوط به واکنش شیمیایی صورت گرفته است که بر اساس معادله‌های زیر تابعیت دمایی آن مشهود است:

$$k_1 = k_2 C_{OH^-} \quad (5)$$

$$\log\left(\frac{k_2}{k_2^\infty}\right) = 0.19871 - 0.01212 \quad (6)$$

$$\log(k_2^\infty) = 11.895 - \frac{2382}{T} \quad (7)$$

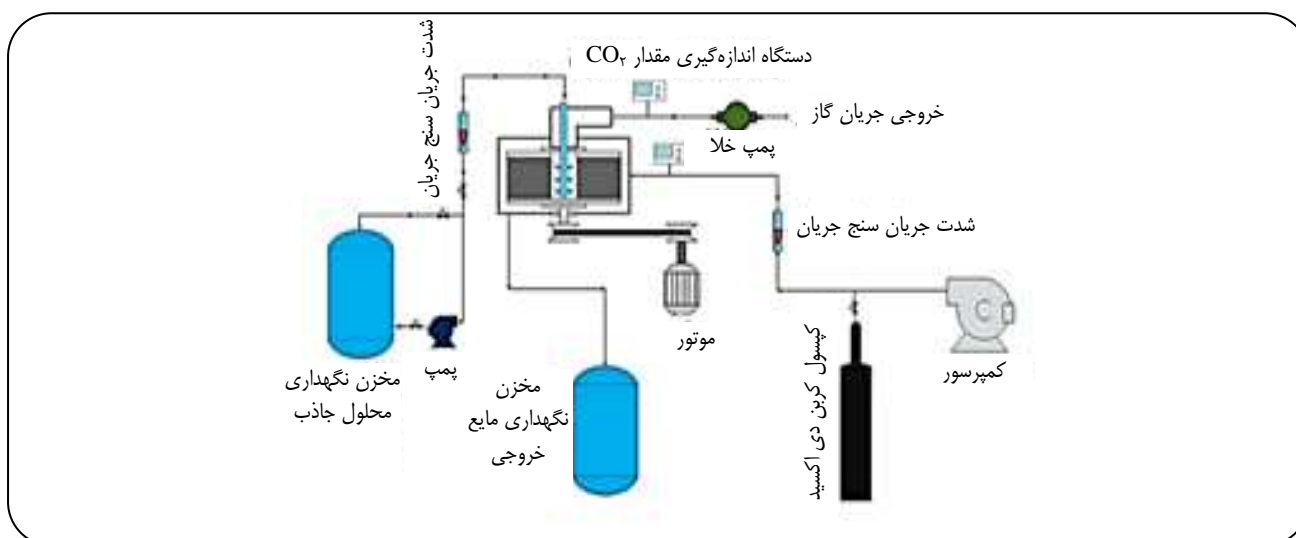
در نتیجه، با در نظر گرفتن فشار جزئی به صورت میانگین لگاریتمی و همچنین ضریب نفوذ مربوط به جذب کربن دی‌اکسید در محلول سود با استفاده از معادله‌ی (۸)، روند تعیین تجربی میزان سطح تماس ویژه به طور کامل مشهود است.

$$D = 1.97 \times 10^{-9} \left(1 - 0.129 C_{OH^-} - 0.261 C_{CO_3^-}\right) \quad (8)$$

(1) Muhanti

جدول ۱- بازه‌ی تغییر پارامترهای عملیاتی.

پارامتر عملیاتی	محدوده‌ی تغییرها
سرعت چرخش بستر	۴۰۰-۱۵۰۰ دور بر دقیقه
شدت جریان فاز مایع ورودی	۰/۲ - ۰/۴ لیتر بر دقیقه
نرخ جریان گاز ورودی	۱۰-۳۰ لیتر بر دقیقه
غلظت محلول جاذب ورودی	۰/۲-۲ مول بر لیتر
کسر مولی دی‌اکسید کربن ورودی	۰/۱-۰/۱۱



شکل ۱- نمای کلی سامانه آزمایشگاهی بستر آکنده‌ی دوار.

(با توجه به روابط ارائه شده در بخش پیش) مشخص است. بنابراین، با توجه به افزایش میزان نیروی گریز از مرکز اعمالی به محلول جاذب ورودی (به دنبال آن کاهش ضخامت فیلم و اندازه‌ی قطره‌های مایع موجود در اثر افزایش سرعت چرخش بستر) میزان سطح تماس ویژه اندازه‌گیری شده افزایش یافت. همچنین در شکل ۲ علاوه بر بررسی تأثیر سرعت چرخش بستر، تأثیر افزایش نرخ جریان گاز ورودی نیز بر میزان سطح تماس ویژه، بررسی شد. در این راستا افزایش نرخ جریان گاز ورودی موجب بالا رفتن سرعت ظاهری جریان گاز جاری در سامانه شد. در نتیجه، میزان آشفستگی فاز پیوسته در بستر بیش‌تر شد و به دنبال آن میزان انرژی انتقال یافته بین دو فاز درگیر افزایش یافت. بنابراین تأثیر فاز پیوسته در شکستن فیلم‌های نازک مایع و قطره‌های بزرگ به قطره‌هایی با اندازه‌های کوچک‌تر بیش‌تر شد. به عبارت دیگر، سطح تبادل جرم

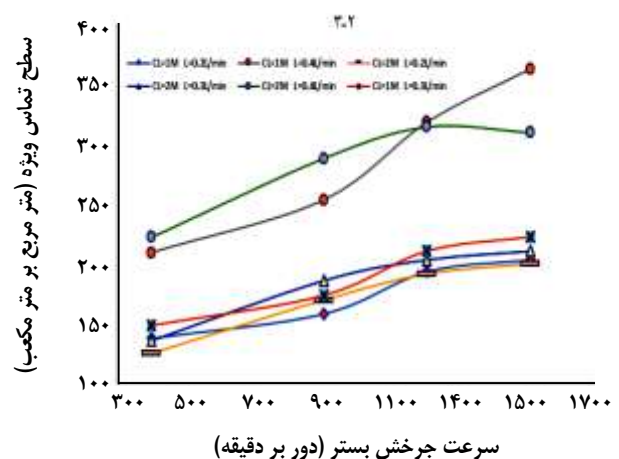
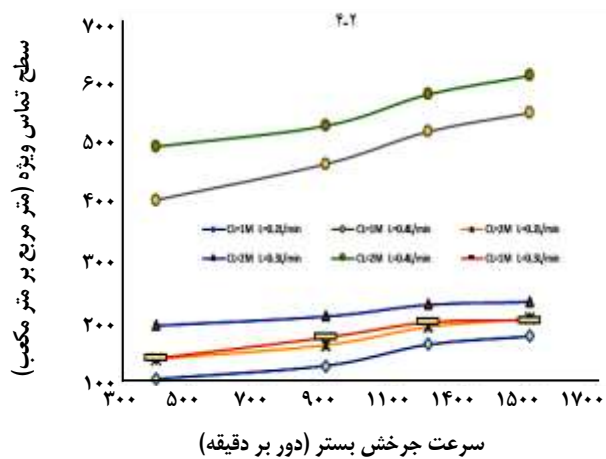
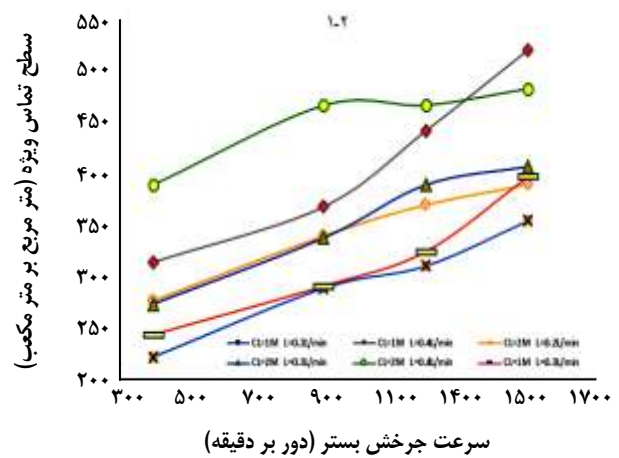
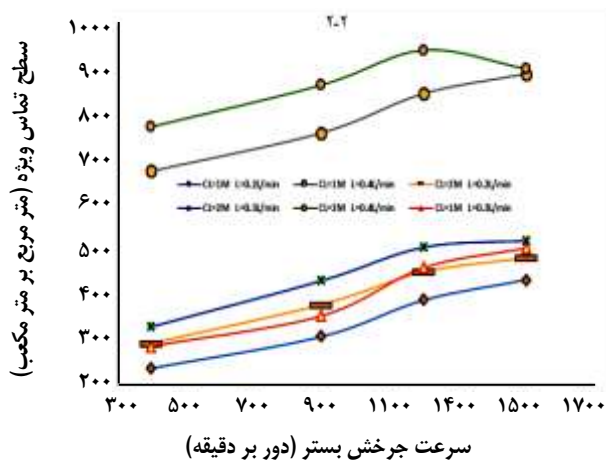
اندازه‌گیری شد که دقت هر یک از متغیرهای عملیاتی در جدول ۲ مشهود است.

## نتیجه‌ها و بحث

شکل ۲ نشان‌دهنده اثر پذیری تغییر سطح تماس ویژه از سرعت چرخش بستر است. مطابق نتیجه‌های گزارش شده در منابع علمی گوناگون، افزایش سرعت چرخش بستر و نرخ جریان دو فاز ورودی در افزایش میزان سطح تماس ویژه به‌طور چشمگیری اثرگذار است. این روند در نتیجه‌های ارائه شده در نمودارهای شکل ۲ به روشنی مشهود بود به‌طوری که با افزایش هر یک از دو عامل یاد شده با توجه به سایر شرایط عملیاتی، مقدار سطح تماس تا حدود ۷۶ درصد (با افزایش شدت جریان مایع) و ۲۰ درصد (در اثر افزایش سرعت چرخش بستر) افزایش یافت. تابعیت مستقیم سطح تماس ویژه از شدت جذب واکنش شیمیایی

جدول ۲- دقت اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی.

متغیر عملیاتی	وسیله اندازه‌گیری	دقت	واحد
شدت جریان مایع	روتامتر	۰/۰۱	لیتر بر دقیقه
شدت جریان گاز	روتامتر	۱	لیتر بر دقیقه
سرعت چرخش بستر	تاچومتر	۱	دور بر دقیقه
کسر مولی کربن دی اکسید	CO <sub>2</sub> متر دیجیتالی	۱	ppm حجمی
غلظت محلول جاذب ورودی	ترازو دیجیتالی	۰/۰۰۱	گرم
	استوانه مدرج	۰/۰۰۱	لیتر



شکل ۲- تغییر سطح تماس ویژه بر حسب سرعت چرخش بستر در نرخ جریان گاز و غلظت متفاوت:  
 (۱-۲) نرخ جریان گاز ۱۰ لیتر بر دقیقه و درصد مولی کربن دی اکسید در فاز گاز ۱٪ (۲-۲) نرخ جریان گاز ۳۰ لیتر بر دقیقه و درصد مولی کربن دی اکسید در فاز گاز ۱٪ (۳-۲) نرخ جریان گاز ۱۰ لیتر بر دقیقه و درصد مولی کربن دی اکسید در فاز گاز ۱۰٪ (۴-۲) نرخ جریان گاز ۳۰ لیتر بر دقیقه و درصد مولی کربن دی اکسید در فاز گاز ۱۰٪.

معادله‌های (۱۶) تا (۱۸) امکان بررسی تأثیر متغیرهای عملیاتی بر میزان ماندگی فاز مایع و به دنبال آن سطح تماس ویژه را فراهم کرد.

$$(15) \quad \text{ماندگی جریان مایع} \times 6 = \frac{\text{قطر متوسط قطره‌ها}}{\text{مخصوص تماس سطح}}$$

تعریف عمومی میزان ماندگی جریان مایع در بستریهای آکنده‌ی دوار در معادله‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شد [۳۱].

$$(16) \quad \varepsilon_L = 0.7^{0.39} \left( \frac{\omega r}{g_0} \right)^{-0.5} \left( \frac{u}{u_0} \right)^{0.6} \left( \frac{g}{g_0} \right)^{0.22}$$

$$(17) \quad u = \frac{L_f}{\varepsilon_L}$$

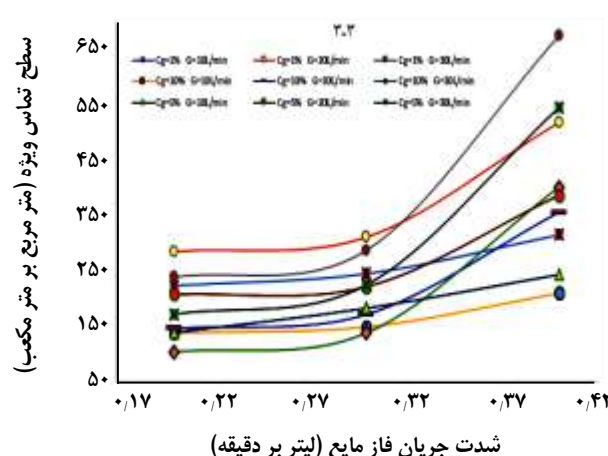
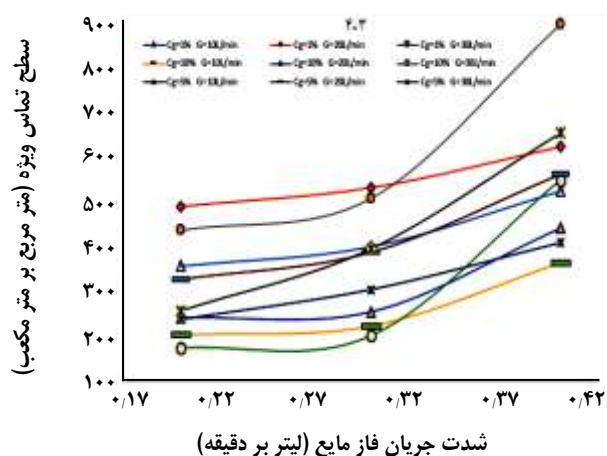
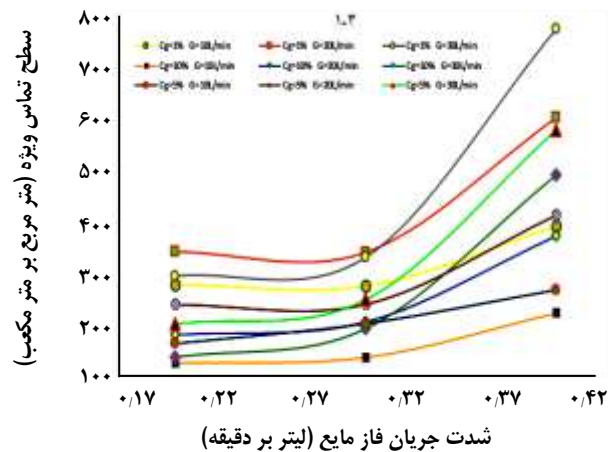
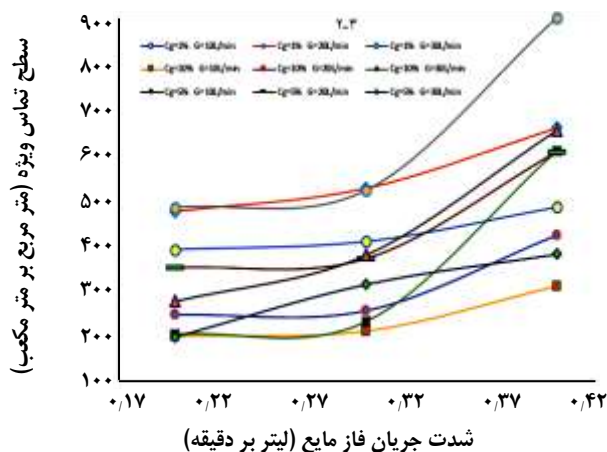
همچنین اندازه متوسط قطر قطره‌های موجود در بخش پر شده با استفاده از تعریف عدد بدون بعد وبر در حالت بحرانی (که دارای مقدار ثابتی برابر با ۷ می‌باشد) مطابق با معادله‌ی (۱۸) تعریف شد [۲۱].

$$(18) \quad We_{crit} = \frac{u_{\lambda}^2 \rho_L d_{max}}{\sigma}$$

مطابق با این معادله‌ها با افزایش سرعت دوارنی اعمالی به بستر میزان ماندگی جریان مایع با توان ۱- و اندازه متوسط قطره‌ها با توان ۰.۵- کاهش یافت که در نتیجه برهمکنش میان این دو پارامتر، سرانجام سطح تماس ویژه با افزایش سرعت چرخش بستر بیش‌تر شد. علاوه بر این، افزایش شدت جریان مایع ورودی مطابق معادله‌ی (۱۷) منجر به افزایش عامل  $u$  و به دنبال آن افزایش ماندگی جریان مایع و سطح تماس ویژه شد. به عبارت دیگر روند دیده شده در شکل‌های ۲ و ۳ افزون بر رابطه‌های مطرح شده در تعیین تجربی سطح تماس ویژه و با استفاده از مبانی نظری (تعریف نظری سطح تماس ویژه و تابعیت آن از میزان ماندگی فاز مایع) نیز قابل تحلیل و تأیید بود.

شکل‌های ۲ و ۳ افزون بر نشان دادن تغییرهای سطح تماس ویژه در اثر سرعت چرخش بستر و شدت جریان‌های ورودی دو فاز، تأثیر غلظت محلول جاذب و میزان جذب شونده‌ی حمل شده در فاز گاز ورودی را نیز نشان داد. مطابق نتیجه‌های گزارش شده و معادله‌های مطرح شده، افزایش غلظت محلول جاذب موجب بالا رفتن ظرفیت جذب صورت گرفته شد. به عبارت دیگر در اثر افزایش میزان سدیم هیدروکسید ورودی به بستر،

میان دو فاز پراکنده و پیوسته (در نتیجه‌ی افزایش تنش بین دوفاز) آشفته‌گی فاز پیوسته و کاهش اندازه‌های فاز پراکنده افزایش یافت که این شرایط در نتیجه افزایش سرعت چرخش بستر و یا نرخ دو فاز ورودی قابل حصول بود. بنابراین، روند دیده شده برای افزایش سطح تماس ویژه در اثر بالا رفتن سرعت چرخش و نرخ جریان گاز ورودی به بستر با مبانی نظری حاکم بر سامانه عملیاتی به‌طور کامل همخوانی داشت. همچنین شکل ۳ نشان دهنده تأثیر تغییر شدت جریان محلول جاذب ورودی بر میزان سطح تماس ویژه است. همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، مایع ورودی به بستر به‌صورت قطره‌های کوچک و فیلم‌های نازک مایع (به وسیله‌ی توزیع کننده‌ی تعبیه شده در مسیر ورودی) است. در این راستا افزایش شدت جریان مایع ورودی موجب شد که توزیع کننده با میزان محلول بیش‌تری در واحد زمان تغذیه شود که در نتیجه‌ی آن محلول با کیفیت بهتری در بستر توزیع شد. بنابراین ضخامت فیلم و قطره‌های ورودی به بستر کاهش یافت و در نتیجه آن سطح تماس بین دو فاز پیوسته و پراکنده بیش‌تر شد. با این حال، مطابق با این شکل جهش چشمگیری در تغییرهای غلظت از ۰.۳ به ۰.۴ لیتر بر دقیقه وجود داشت که این امر با توجه به شرایط عملیاتی تشریح شده برای بستر آکنده دوار قابل درک است. از آنجایی که بیش‌ترین تأثیر افزایش شدت جریان مایع ورودی در بهبود عملکرد توزیع کننده بود، در اثر افزایش نرخ جریان از ۰.۳ لیتر بر دقیقه به ۰.۴ لیتر بر دقیقه توزیع کننده به‌طور کامل از محلول جاذب تغذیه شد. در نتیجه تمامی فضای درون آن با مایع ورودی پر شد که این امر موجب توزیع مایع ورودی به بستر با بالاترین کیفیت ممکن شد. در حالی که در افزایش نرخ جریان از ۰.۲ به ۰.۳ مولار با توجه به کم‌تر بودن میزان مایع ورودی به توزیع کننده این شرایط به‌طور کامل ایجاد نشد و در نتیجه‌ی آن تأثیر توزیع کننده در کاهش ضخامت فیلم و اندازه‌های قطره‌های مایع موجود در بستر به مراتب کم‌تر بود. افزون بر این، اثرپذیری سطح تماس ویژه از دو عامل یاد شده (سرعت چرخش بستر و شدت جریان دو فاز ورودی)، با استفاده از بررسی ارتباط میان مفهوم عام سطح تماس میان دو فاز و ماندگی فاز مایع (افزون بر رابطه‌های داده شده در محاسبه تجربی سطح تماس ویژه) نیز قابل اثبات بود. معادله‌ی (۱۵) نشان دهنده تعریف عام سطح تماس ویژه است [۲۹]. تابعیت این پارامتر از میزان ماندگی و اندازه‌ی قطر متوسط قطره‌های ایجاد شده در سامانه در این رابطه به روشنی قابل دیدن است. ترکیب این معادله و



شکل ۳- تغییر سطح تماس ویژه بر حسب شدت جریان مایع ورودی در سرعت چرخش بستر و غلظت فاز مایع متفاوت:

(۱-۳) سرعت چرخش ۴۰۰ دور بر دقیقه و محلول جاذب ۲ مولار (۲-۳) سرعت چرخش ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و محلول جاذب ۲ مولار

(۳-۳) سرعت چرخش ۴۰۰ دور بر دقیقه و محلول جاذب ۱ مولار (۴-۳) سرعت چرخش ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و محلول جاذب ۱ مولار.

از آنجایی که سطح تماس ویژه به‌طور مستقیم تحت تأثیر شدت جذب کربن دی‌اکسید قرار دارد و کاهش میزان کربن دی‌اکسید ورودی به سامانه باعث شد که در واکنش جذب، کربن دی‌اکسید در جایگاه واکنش دهنده‌ی محدود کننده قرار گیرد و در نتیجه آن، سامانه در صورت داشتن زمان کافی سعی در استفاده بیش‌تری از جذب شونده موجود در محیط کند. بنابراین نسبت میزان کربن دی‌اکسید موجود در جریان گاز خروجی به ورودی در کسر مولی‌های پایین‌تر، کم‌تر بود. بنابراین با تعریف میزان مناسب کسر مولی جذب شونده مورد نظر در فاز گاز ورودی، سطح تماس ویژه تا میزان ۴۰٪ قابل بهبود بود. از سویی روند دیده شده با بررسی رابطه‌های تجربی مورد استفاده نیز

غلظت یون‌های موجود در فضا نیز دستخوش تغییر شد. به‌طوری که در غلظت ۲ مولار نسبت به ۱ مولار، میزان یون سدیم و هیدروکسید (همچنین یون بی‌کربنات تولیدی در نتیجه انجام واکنش جذب) در فضا بیش‌تر شد که در نتیجه آن پارامترهای وابسته به غلظت یون‌های موجود را تحت تأثیر قرار گرفت. برآیند کلی تأثیر غلظت محلول جاذب بر میزان سطح تماس ویژه به‌دست آمده در شکل‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود. مطابق این نمودارها در اثر افزایش غلظت محلول جاذب مورد استفاده سطح تماس ویژه تا میزان ۷۲٪ (در شرایط عملیاتی مشخص) افزایش یافت. همچنین تأثیر کاهش غلظت فاز گاز ورودی در افزایش سطح تماس ویژه نیز در شکل‌های ارائه شده دیده می‌شود.

تشریح شده و مجموعه جامع متغیرهای عملیاتی مؤثر یاد شده در این پژوهش، گزارش شد که مطابقت چشمگیر این مقادارها با منطق و اصول حاکم بر سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده و همچنین رابطه‌های نظری - تجربی گزارش شده در مطالعه‌های پیشین خود شاهد دیگری بر اهمیت و کیفیت نتیجه‌های گزارش شده در این مطالعه است.

### فهرست نمادها

A	سطح تماس کلی گاز - مایع در بستر، $m^2$
$C_{OH^-}$ و $C_{CO_3^{2-}}$	غلظت یون‌های بی‌کربنات و هیدروکسید
	در نمونه تهیه شده از مایع خروجی، mol/L
D	ضریب نفوذ مریب دی اکسید در محلول جاذب، $m^2/s$
$H_0$ و H	ضریب حلالیت کربن دی اکسید در محلول الکترولیت و آب خالص، $kmol/m^3Mpa$
$h_G$ و $h_+$ و $h_-$	ثابت یونی
I	قدرت یونی
$k_1$	ثابت سرعت واکنش درجه اول، $1/s$
$k_2$	ثابت سرعت واکنش درجه دوم بین کربن دی اکسید و هیدروکسید، $m^3/kmol.s$
$k_p^\infty$	ثابت سرعت واکنش در محلول رقیق سود، $m^3/kmol.s$
$N_i$	شدت جذب کربن دی اکسید، $m^3/kmol.s$
$y_{CO_2}^i$ و $y_{CO_2}^o$	کسر مولی کربن دی اکسید در جریان گاز خروجی و ورودی به سامانه
V	حجم بستر، $m^3$
$Z_i$	ظرفیت یونی

قابل دست یابی بود. از آنجایی که مقدار میانگین فشار جزئی کربن دی اکسید در کسر مولی‌های پایین کمتر است (مطابق معادله‌ی (۸))، بنابراین با توجه به رابطه وارون میان فشار جزئی میانگین و سطح تماس ویژه در اثر کاهش غلظت کربن دی اکسید موجود در فاز گاز، سطح تماس مخصوص بستر افزایش یافت.

### نتیجه‌گیری

آنچه که می‌توان از آن به عنوان هدف اصلی این پژوهش یاد کرد، نشان دادن تابعیت سطح تماس ویژه از پارامترهای عملیاتی تعریف شده (غلظت محلول جاذب ورودی و درصد مولی کربن دی اکسید موجود در فاز گاز تزریقی به سامانه، سرعت چرخش بستر و نرخ جریان گاز و مایع ورودی به بستر) بود که تاکنون در تمامی مطالعه‌های انجام شده از بررسی همزمان پنج پارامتر یاد شده اجتناب شده بود. نتیجه‌های به‌دست آمده در این پژوهش نشان داد که تعیین شرایط بهینه سامانه عملیاتی بستر آکنده دوار (به منظور دست‌یابی به میزان بیش‌تر سطح تماس ویژه) اعمال تأثیر میزان غلظت واکنش دهنده‌های ورودی از اهمیت بالایی برخوردار بود. بنابراین لزوم در نظر گرفتن اثرگذاری مجموعه پنج عضوی از متغیرهای عملیاتی مطرح شده در این پژوهش بر میزان سطح تماس ویژه در مطالعه‌های تجربی و همچنین مدل‌سازی‌های ارایه شده دارای اهمیت است. همچنین در این پژوهش روش تعیین تجربی سطح تماس ویژه به‌طور کامل تشریح شد و رابطه‌های مربوط به تعیین تمامی عامل‌های مؤثر در محاسبه‌های این پارامتر (بر خلاف سایر مطالعه‌های منتشر شده) به تفصیل مطرح شد که این امر از دیگر نقطه‌های قوت این پژوهش است. سرانجام مجموعه گسترده‌ای از نتیجه‌های تجربی اندازه‌گیری شده که با بهره‌گیری از روش تجربی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱/۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

### مراجع

- [1] Ramshaw C., Mallinson R.H., *Mass Transfer Process*, U.S. Patent 4, US4283255A pp. 255-283 (1981).
- [2] Zeng Q., Guo Y., Niu Z., Lin W., *The Absorption Rate of CO<sub>2</sub> by Aqueous Ammonia in a Packed Column*, *Fuel Processing Technology*, **108**: 76-81 (2013).
- [3] Lin C.C., Chen B.C., Chen Y.S., Hsu S.K., *Feasibility of a Cross-Flow Rotating Packed Bed in Removing Carbon Dioxide from Gaseous Streams*, *Sep. Purif. Technol.*, **62**: 507-512 (2008).



- [4] Chiang C.Y., Liu Y.Y., Chen Y.S., Liu H.S., [Absorption of Hydrophobic Volatile Organic Compounds by a Rotating Packed Bed](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **51**: 9441-9445 (2012).
- [5] Zhang L.L., Wang J.X., Sun Q., Zeng X.F., Chen J.F., [Removal of Nitric Oxide in Rotating Packed Bed by Ferrous Chelate Solution](#), *Chem. Eng. J.*, **181-182**: 624-629 (2012).
- [6] Yu C.H., Wu T.W., Tan C.S., [CO<sub>2</sub> Capture by Piperazine Mixed with Non-Aqueous Solvent Diethylene Glycol in a Rotating Packed Bed](#), *Int. J. Green. Gas Con.*, **19**: 503-509 (2013).
- [7] Gudena K., Rangaiah G.P., Lakshminarayanan S., [Optimal Design of a Rotating Packed Bed for VOC Stripping from Contaminated Groundwater](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **51**: 835-847 (2012).
- [8] Luo Y., Chu G.W., Zou H.K., Xiang Y., Shao L., Chen J.F., [Characteristics of a Two Stage Counter-Current Rotating Packed Bed for Continuous Distillation](#), *Chem. Eng. Process.*, **52**: 55-62 (2012).
- [9] Tai C.Y., Wang Y.H., Liu H.S., [A Green Process for Preparing Silver Nanoparticles Using Spinning Disk Reactor](#), *AIChE J.*, **54**: 445-452 (2008).
- [10] Yang Q., Wang J.X., Guo F., Chen J.F., [Preparation of Hydroxyapatite Nanoparticles by Using High-Gravity Reactive Precipitation Combined with Hydrothermal Method](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**: 9857-9863 (2010).
- [11] Chen Y.S., Liu H.S., [Absorption of VOCs in a Rotating Packed Bed](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**: 1583-1588 (2002).
- [12] York J.L., Stubbs H.E., [Photographic Analysis of Sprays](#), *Trans. ASME*, **74**: 1157-1161 (1952).
- [13] Copper K.D., Hewitt G.F., Pinchin B., [Photographic Method to Measure Interfacial Area in Liquid and Gas Dispersed System](#), *J. Photogr. Sci.*, **12**: 269-273 (1964).
- [14] Tan M., Ishii M., [A Method for Measurement of Local Specific Interfacial Area](#), *Int. J. Multiphase Flow*, **16**: 353-361 (1990).
- [15] Chang J.S., Morala E.C., [Determination of Two-Phase Interfacial Areas by an Ultrasonic Technique](#), *Nucl. Eng. Des.*, **122**: 143-154 (1990).
- [16] Kolev N., Nakov S., Ljutzkanov L., Kolev D., [Effective Area of a Highly Efficient Random Packing](#), *Chem. Eng. Process.*, **45**: 429-436 (2006).
- [17] Yue J., Chen G.w., Yuan Q., Luo L.G., Gonthier Y., [Hydrodynamics and Mass Transfer Characteristics in Gas-Liquid Flow Through a Rectangular Microchannel](#), *Chem. Eng. Sci.*, **62**: 2096-2108 (2007).
- [18] Mohanty K., Das D., Biswas M.N., [Mass Transfer Characteristics of a Novel Multi-Stage External Loop Airlift Reactor](#), *Chem. Eng. J.*, **133**: 257-264 (2007).
- [19] Mandal A., Kundu G., Mukherjee D., [Interfacial Area and Liquid-Side Volumetric Mass Transfer Coefficient in a Downflow Bubble Column](#), *Can. J. Chem. Eng.*, **81**: 212-219 (2003).
- [20] Yoshida F., Miura Y., [Effective Interfacial Area in Packed Columns for Absorption with Chemical Reaction](#), *AIChE Journal*, **9**(3): 331-337 (1963).

- [21] Shulman H.L., DeGouff J.J., [Mass Transfer Coefficients and Interfacial Areas for 1-Inch Raschig Rings](#), *Industrial & Engineering Chemistry*, **44**(8): 1915-1922 (1952).
- [22] Munjal S., Dudukovic M.P., Ramachandran P., [Mass Transfer in Rotating Packed Beds- II. Experimental Results and Comparison with Theory and Gravity Flow](#), *Chem. Eng. Sci.*, **44**: 2257-2268 (1989).
- [23] Yang K., Chu G., Zou H., Sun B., Shao L., Chen J.F., [Determination of the Effective Interfacial Area in Rotating Packed Bed](#), *Chem. Eng. J.*, **168**: 1377-1382 (2011).
- [24] Luo Y., Chu G.W., Zou H.K., Zhao Z.Q., Dudukovic M.P., Chen J.F., [Gas-Liquid Effective Interfacial Area in a Rotating Packed Bed](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **51**: 16320-16325 (2012).
- [25] Guo K., Zhang Z., Luo H., Dang J., Qian Z., [An Innovative Approach oh the Effective Mass Transfer Area in the Rotating Packed Bed](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**: 4052-40 (2014).
- [26] Tsai C.Y., Chen Y.S., [Effective Interfacial Area and Liquid-Side Mass Transfer Coefficients in a Rotating Bed Equipped with Baffles](#), *Sep. Purif. Technol.*, **144**: 139-145 (2015).
- [27] Chu G.W., Sang L., Du X.K., Luo Y., Zou H.K., Chen J.F., [Studies of CO<sub>2</sub> Absorption and Effective Interfacial Area in a Two-Stage Rotating Packed Bed with Nickel Foam Packing](#), *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **9**, 34-40 (2015).
- [28] Luo Y., Luo J.Z., Chu G.W., Zhao Z.Q., Arowo M., Chen J.F., [Investigation of Effective Interfacial Area in a Rotating Packed Bed with Structured Stainless Steel Wire Mesh Packing](#), *Chemical Engineering Science*, **170**: 347-354 (2016).
- [29] Li W., Wu W., Zou H., Chu G., Shao L., Chen J., [Process Intensification of VOC Removal From High Viscous Media by Rotating Packed Bed](#), *Journal Chinese Institute of Chemical Engineers.*, **17**: 389-393 (2009).
- [30] Mohanty K., Das D., Biswas M.N., [Mass Transfer Characteristics of a Novel Multi-Stage External Loop Airlift Reactor](#), *Chem. Eng. J.*, **133**: 257-264 (2007).
- [31] Cheng H.H., Tan C.S., [Carbon Dioxide Capture by Blended Alkanol Amines in Rotating Packed Bed](#), *Energy Procedia*, **1**: 925-932 (2009).