

بررسی پارامترهای مؤثر بر هیدرودینامیک بستر پر شده دوآر به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

شمس‌الدین قوره جیلی^۱ و علیرضا میراولیایی^{۲*}

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>بسترهای پر شده دوآر در بسیاری از فرایندهای مهندسی شیمی، از جمله تقطیر، جذب، تهیه نانوذرات، شیرین‌سازی گاز ترش استفاده می‌شود. آنالیز جریان سیال در این تجهیزات برای به دست آوردن اطلاعات هیدرودینامیکی و بررسی پدیده انتقال در آن‌ها لازم است. در این مقاله، شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان‌های تک‌فازی و دوفازی درون بستر پر شده دوآر با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام می‌شود. اثر برخی پارامترها از قبیل سرعت چرخش، دبی‌های گاز و مایع، اثر تعداد روزنه‌های روتور و وجود بافل ثابت و متحرک، بر افت فشار بررسی می‌شوند. آنالیز جریان تک‌فازی نشان داد که مؤلفه سرعت مماسی نسبت به مؤلفه‌های سرعت شعاعی و محوری، تأثیر بیشتری بر مقدار سرعت دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش دبی گاز، افت فشار برای هر دو حالت بستر خشک و بستر مرطوب افزایش می‌یابد، به طوری که متوسط خطای نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی در حالت بدون بافل و با بافل به ترتیب برابر ۵/۳ و ۳/۶ درصد است. همچنین مشخص شد افزایش دبی مایع، تأثیر کمی بر افت فشار دارد. مشاهده شد که با افزایش سرعت چرخش و تعداد روزنه‌های روتور، افت فشار بستر دوفازی افزایش می‌یابد. وجود بافل متحرک درون بستر، سبب کاهش ۱۴ درصدی افت فشار بستر مرطوب شد.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳</p>
	<p>واژگان کلیدی: افت فشار، آنالیز جریان، بافل ثابت و متحرک، بستر پر شده دوآر، دینامیک سیالات محاسباتی.</p>

۱- مقدمه

گریز از مرکز که توسط چرخش روتور ایجاد می‌شود، سبب افزایش سطح مشترک گاز-مایع، کاهش افت فشار، افزایش نفوذ مولکولی و جابه‌جایی، افزایش سطح تماس و در نهایت، افزایش ضریب انتقال جرم می‌گردد [۱۱]. در این بسترها جریان مایع از یک توزیع‌کننده به مرکز پرکن‌ها وارد می‌شود. مایع از مرکز پرکن‌ها به سمت بیرون بستر و گاز از بیرون به داخل بستر وارد شده، در نتیجه، تماسی غیر مستقیم بین گاز-مایع ایجاد می‌گردد. شکل (۱) نمایی از یک RPB را نشان می‌دهد.

مشخصات جریان دوفاز گاز و مایع در این بسترها تأثیر زیادی بر میزان انتقال جرم و بازده آن‌ها دارد. به عبارت

بستر پر شده دوآر^۲ (RPB) به‌عنوان یکی از تجهیزات جدید در صنایع مهندسی شیمی از جمله جذب، دفع، تقطیر، کریستالیزاسیون، تولید و آماده‌سازی نانو ذرات، شیرین‌سازی گاز، پلیمریزاسیون، سولفورزایی و حذف آلاینده‌های آب و محیط زیست، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۸]. این تجهیزات دارای حجم و هزینه عملیاتی کمتر نسبت به بستر پر شده معمول^۳ (PB) هستند. همچنین به دلیل اینکه طغیان در این بسترها نسبت به PB در دبی‌های بالاتری اتفاق می‌افتد، در شدت جریان‌های بالای گاز و مایع به‌راحتی استفاده می‌شوند [۹-۱۰]. RPB به کمک نیروی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amiroliaei@uma.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

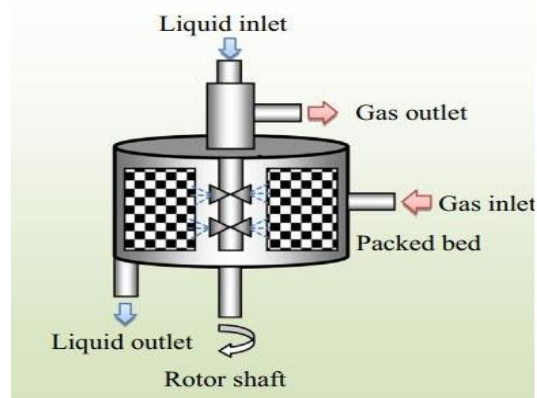
۲. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

² Rotating packed bed

³ Packed bed

در جریان ناهمسو است. یانگ و همکاران [۱۸]، اثر پارامترهای عملیاتی، از قبیل سرعت چرخش و دبی گاز را بر افت فشار بستر خشک به کمک دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افت فشار در بستر خشک، وابستگی کمی به سرعت چرخش دارد. همچنین نشان دادند دبی فاز گاز در یک سرعت چرخش معین، تأثیر بیشتری بر افت فشار بستر خشک دارد. سانگ و چن [۱۹]، اثر شرایط عملیاتی، از قبیل سرعت چرخش، دبی گاز و دبی مایع را بر افت فشار گاز و ضریب انتقال جرم بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند افزایش دبی گاز و سرعت چرخش، سبب افزایش افت فشار می‌شود و همچنین دبی مایع، تأثیر زیادی بر افت فشار گاز ندارد. مدل‌سازی رایزر فرایند کراکینگ کاتالیستی بستر سیال توسط یحیی‌زاده ساروی و همکاران [۲۰] انجام شد. آن‌ها تغییرات قطر کلاستر در طول رایزر را در مدل‌سازی خود در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها مطابقت خوبی با داده‌های صنعتی نشان داد. حامدی استخرسر و رفعی [۲۱] پارامترهای مؤثر بر عملکرد مدل برهم‌کنش ادی و قطره در قطره‌گیرهای زیگزاگی را با استفاده از روش اولبری- لاگرانژی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد تعریف یک مقدار ثابت زمانی برای عمر ادی‌ها در تمام سرعت‌های جریان گاز، مناسب نیست و این مقدار با تغییر سرعت جریان گاز، تغییر می‌کند. شی و همکاران [۲۲]، توزیع مایع در RPB را به کمک CFD در حالت دوبعدی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند افزایش سرعت چرخش و سرعت اولیه مایع، سبب کاهش زمان ماند مایع در RPB می‌شود. رفتار دانه کاتالیست در فرایند واکنش جفت شدن اکسایشی متان با استفاده از CFD توسط یعقوبی و همکاران [۲۳] بررسی شد. آن‌ها کانتورها و پروفایل‌های دمای درون کاتالیست را به خوبی نشان دادند. نتایج آن‌ها با نتایج تجربی منتشرشده در مراجع هم‌خوانی داشت. کثیری و همکاران [۲۴] اثر مدل‌های اغشاش را روی هیدرودینامیک سینی غربال بررسی کردند. شبیه‌سازی‌های آن‌ها نشان داد مدل RNG نسبت به سایر مدل‌ها نتایج بهتری می‌دهد. سانگ و همکاران [۲۵]، توزیع مایع در ناحیه داخلی بین روتور و پوسته در RPB را بررسی کردند. آن‌ها تغییرات الگوی جریان مایع را از حالت فیلمی به حالت قطره به دست آوردند. همچنین اثر پارامترهایی از قبیل

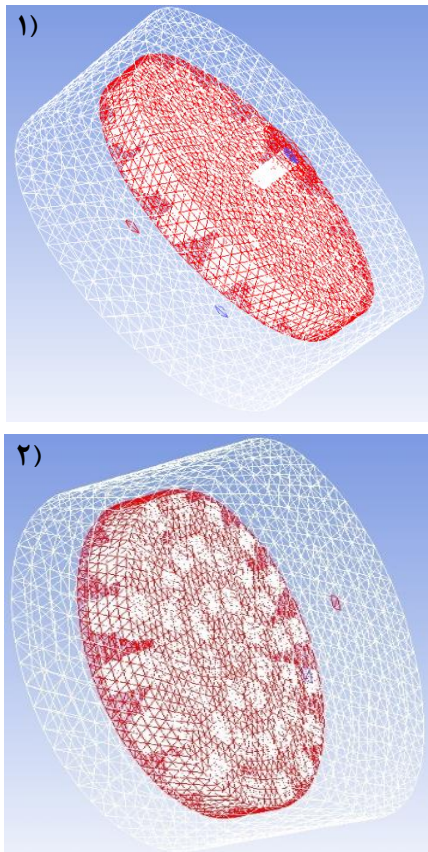
دیگر، توزیع مناسب هریک از جریان‌ها درون بستر و ایجاد سطح تماس بیشتر بین دو فاز گاز و مایع، سبب افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود. از عوامل تأثیرگذار بر هیدرودینامیک این بسترها می‌توان به شرایط عملیاتی، از قبیل دبی گاز، دبی مایع، سرعت چرخش و شرایط فیزیکی، از قبیل جنس پرکن‌ها و وجود بافل اشاره کرد.



شکل ۱: نمایی از یک RPB [۱۲]

بسیاری از محققان، هیدرودینامیک و ضریب انتقال جرم را در این بسترها به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بررسی کردند. به عنوان مثال، کیوانی و گاردنیر [۱۳]، افت فشار در بسترهای پرشده دوار را به صورت آزمایشگاهی روی سیستم آب-هوا انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که افت فشار بستر خشک و بستر مرطوب با مربع سرعت چرخش و دبی گاز متناسب است. برن و همکاران [۱۴]، ماندگی مایع در RPB را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که توزیع مایع در RPB به صورت فیلم و قطرات مایع است. بررسی آن‌ها نشان داد که سرعت چرخش، سبب کاهش ماندگی مایع می‌شود و ویسکوزیته مایع، تأثیر کمی بر ماندگی مایع دارد. گئو و همکاران [۱۵] با تعبیه یک دوربین در روتور و با کمک آنالیز تصویری، ضخامت فیلم مایع بر روی سطح پرکن‌ها را محاسبه کردند. لین و ژانگ [۱۶] به صورت آزمایشگاهی، انتقال جرم و افت فشار را در RPB بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که RPB با پرکن‌های تخت دارای بازده انتقال جرم مناسب‌تر و افت فشار کمتر نسبت به پرکن‌های انتخابی و پرکن‌های ساختاری دارد. ژائو و همکاران [۱۷]، افت فشار و ضریب انتقال جرم را برای دو حالت مختلف جریان به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افت فشار در جریان متقاطع کمتر از افت فشار

¹ Computational fluid dynamics



شکل ۲: هندسه شبیه‌سازی شده به همراه شبکه: (۱) بدون بافل، (۲) با بافل

۲-۲- معادلات حاکم

معادلات مربوط، شامل معادلات پیوستگی و مومنوم است. از آنجا که جریان در سیستم مورد مطالعه، حالت متلاطم دارد، علاوه بر معادلات پیوستگی و مومنوم، معادلات آشفتگی نیز در نظر گرفته شدند. از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استفاده شد. این مدل، نرخ گسترش جت‌های دوآر و صفحه‌ای را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین عملکرد بهینه برای لایه مرزی تحت گرادیان‌های فشار معکوس شدید و جدایش و جریان چرخشی را فراهم می‌کند. در شبیه‌سازی‌های جریان دوفازی از مدل مخلوط استفاده شد که یکی از مدل‌های چندفازی است. در این مدل معادلات پیوستگی، مومنوم برای مخلوط، معادله کسر حجمی برای فاز ثانویه و همچنین روابط جبری برای سرعت‌های نسبی که به صورت زیر بیان شده، حل می‌شوند [۲۹]:

معادله پیوستگی برای مخلوط، عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

سرعت چرخش، سرعت اولیه مایع، شعاع خارجی پرکن، ویسکوزیته مایع، کشش سطحی را بر اندازه قطرات مایع و توزیع مایع بررسی کردند. ژئی و همکاران [۲۶]، آنالیز جریان در نواحی مختلف RPB را برای فاز مایع در حالت دوبعدی با استفاده از CFD بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش سرعت چرخش، سبب کاهش ماندگی مایع و نیز توزیع بهتر مایع می‌شود. لیو و همکاران [۲۷] با کمک CFD افت فشار بستر خشک و آنالیز جریان را در یک RPB بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد بخش داخلی روتور، بیشترین سهم را در افت فشار دارد. لو و همکاران [۲۸] شبیه‌سازی دوبعدی RPB را با ارائه مدل محیط متخلخل جدید با استفاده از مدل چندفازی اولری انجام دادند. آن‌ها با مقایسه مدل پیشنهادی و مدل‌های ارائه شده قبل، بیان کردند که مدل جدید به خوبی نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند.

در این پژوهش، اثر پارامترهای عملیاتی از قبیل دبی گاز، دبی مایع، سرعت چرخش، تعداد روزنه‌های روتور و وجود بافل ثابت و متحرک روی هیدرودینامیک RPB با استفاده از CFD در حالت سه‌بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲- شبیه‌سازی CFD

۲-۱- هندسه RPB

هندسه استفاده شده در شبیه‌سازی، مطابق کار آزمایشگاهی سانگ و چن [۱۹] است. RPB شامل دو صفحه است که به فاصله دو سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند. پرکن‌ها از نوع تیغه‌ای روی صفحه دوآر و بافل‌ها روی صفحه ثابت قرار دارند. پرکن‌ها در سه ردیف به ترتیب به تعداد ۸، ۱۶ و ۱۶ استفاده شدند. شعاع داخلی و خارجی روتور به ترتیب ۱/۸ و ۷/۸ سانتی‌متر است. فاصله بین هر مجموعه از پرکن‌ها ۱/۲ سانتی‌متر است. پرکن‌ها از جنس فولاد ضد زنگ با پهنای ۱/۲ و ارتفاع ۱/۸ سانتی‌متر هستند. فضای خالی پرکن‌ها ۰/۹۹ است. بافل‌ها به ترتیب دارای پهنای و ارتفاعی برابر ۰/۶ و ۱/۵ سانتی‌متر هستند. شعاع قسمت ثابت ۹ سانتی‌متر است. مایع توسط توزیع‌کننده‌ای که شامل روزنه‌هایی به قطر ۰/۵ میلی‌متر است، به درون پرکن‌ها پاشیده می‌شود. سرعت چرخش روتور rpm ۶۰-۱۸۰۰ است.

نمایی از RPB بدون بافل و با بافل همراه با شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است.

در رابطه (۸)، شتاب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = g - (v_m \cdot \nabla) v_m - \frac{\partial v_m}{\partial t} \quad (11)$$

در جریان‌های مغشوش، سرعت نسبی، شامل ترم نفوذ ناشی از پراکندگی در معادله مومنتوم برای فاز پراکنده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_{pq} = \frac{(\rho_p - \rho_m) d_p^2}{18 \mu_q f_{drag}} \alpha - \frac{v_m}{\alpha_p \sigma_D} \nabla_{\alpha q} \quad (12)$$

در رابطه فوق، v_m ، ویسکوزیته سینماتیکی آشفتگی مخلوط و σ_D ، ضریب پراکندگی پراکتل است. همچنین با استفاده از معادله پیوستگی، معادله کسر حجمی فاز ثانویه P، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p v_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p v_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (n_{qp} - n_{pq}) \quad (13)$$

در مدل $k - \varepsilon$ Realizable دو پارامتر انرژی جنبشی آشفتگی (k) و شدت پراکندگی آشفتگی (ε) با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۹]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (15)$$

$$+ \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}}$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon)$$

که μ_t ویسکوزیته آشفتگی است. مقادیر ثابت مدل عبارتند از:

$$c_1 = 1/44, c_2 = 1/92, c_\mu = 0/09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1/30$$

۲-۳- شرایط مرزی و روش حل عددی معادلات

از روش عددی حجم محدود و نرم‌افزار ANSYS FLUENT برای حل معادلات مذکور استفاده شد. در شبیه‌سازی‌ها، هوا به عنوان فاز پیوسته و آب به عنوان فاز

ρ_m و \vec{v}_m به ترتیب سرعت متوسط جرمی و دانسیته متوسط مخلوط هستند و با روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$v_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

در روابط فوق α_k کسر حجمی فاز k است.

معادله مومنتوم مخلوط از مجموع معادله مومنتوم همه فازها به دست می‌آید و به صورت زیر بیان شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m v_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot (\mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)) + \rho_m g + F + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{dr,k} v_{dr,k}) \quad (4)$$

که در آن، n تعداد فازها، \vec{F} نیروی حجمی و μ_m ویسکوزیته مخلوط است.

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

کسر جرمی فاز k عبارت است از:

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (6)$$

سرعت راندگی و سرعت نسبی (\vec{v}_{qp}) با رابطه زیر به هم مرتبط می‌شوند:

$$v_{dr,p} = v_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k v_{qk} \quad (7)$$

رابطه سرعت نسبی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \alpha \quad (8)$$

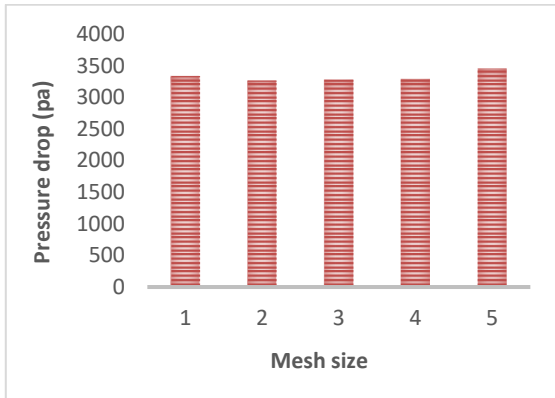
که در آن، τ_p زمان آسایش ذره است.

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q} \quad (9)$$

d_p قطر ذرات فاز پراکنده است. برای تابع درگ، از رابطه Naumann و Schiller به صورت زیر استفاده شد:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (10)$$

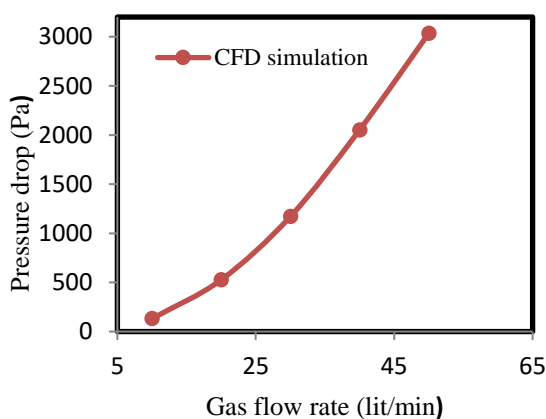
بافل نیز بر سیستم افزایش یابد. از طرفی، افزایش نیروی درگ باعث افزایش سرعت گاز می‌گردد و در نتیجه سرعت کل افزایش می‌یابد. همچنین افزایش بافل، باعث می‌شود ذرات در داخل RPB تغییر جهت داده، در نتیجه، نیروی درگ ذرات گاز به یکدیگر بیشتر می‌شود و در نهایت، ذرات گاز در داخل بستر با چرخش کمتری می‌چرخند.



شکل ۳: اثر اندازه شبکه بر افت فشار در دبی گاز ۵۰ lit/min و سرعت چرخش ۸۰۰ rpm

به طور کلی افت فشار گاز در RPB ناشی از سه عامل است: ۱. افت فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز؛ ۲. افت فشار ناشی از نیروی درگ پرکن‌ها و بافل؛ ۳. افت فشار ناشی از مومنوم ذرات گاز.

نتایج افت فشار جریان تک‌فاز درون RPB در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی گاز، افت فشار گاز افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش دبی گاز، نیروی درگ و در نتیجه ضریب درگ افزایش یافته، سبب می‌شود افت فشار ناشی از نیروی درگ پرکن‌ها افزایش یابد که در نهایت، سبب افزایش افت فشار کل گاز می‌شود.



شکل ۵: اثر دبی گاز بر افت فشار بستر خشک در سرعت چرخش ۸۰۰ rpm

پراکنده فرض شدند. شرایط مرزی استفاده‌شده در حل معادلات، عبارت‌اند از:

$$Q_G = 10-40 \text{ lit/min}$$

$$Q_L = 0.1-0.4 \text{ lit/min}$$

$$\omega = 600-1800 \text{ rpm}$$

$$\text{۴. شرط مرزی فشار در خروجی (۱ اتمسفر)}$$

$$\text{۵. شرط عدم لغزش برای دیواره‌ها}$$

از الگوریتم SIMPLE برای جفت شدن سرعت-فشار و روش گسسته‌سازی بالادست مرتبه دو^۱ برای افزایش دقت نتایج استفاده شد. معیار هم‌گرایی برای باقیمانده‌ها در تمام معادلات، برابر 10^{-6} در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

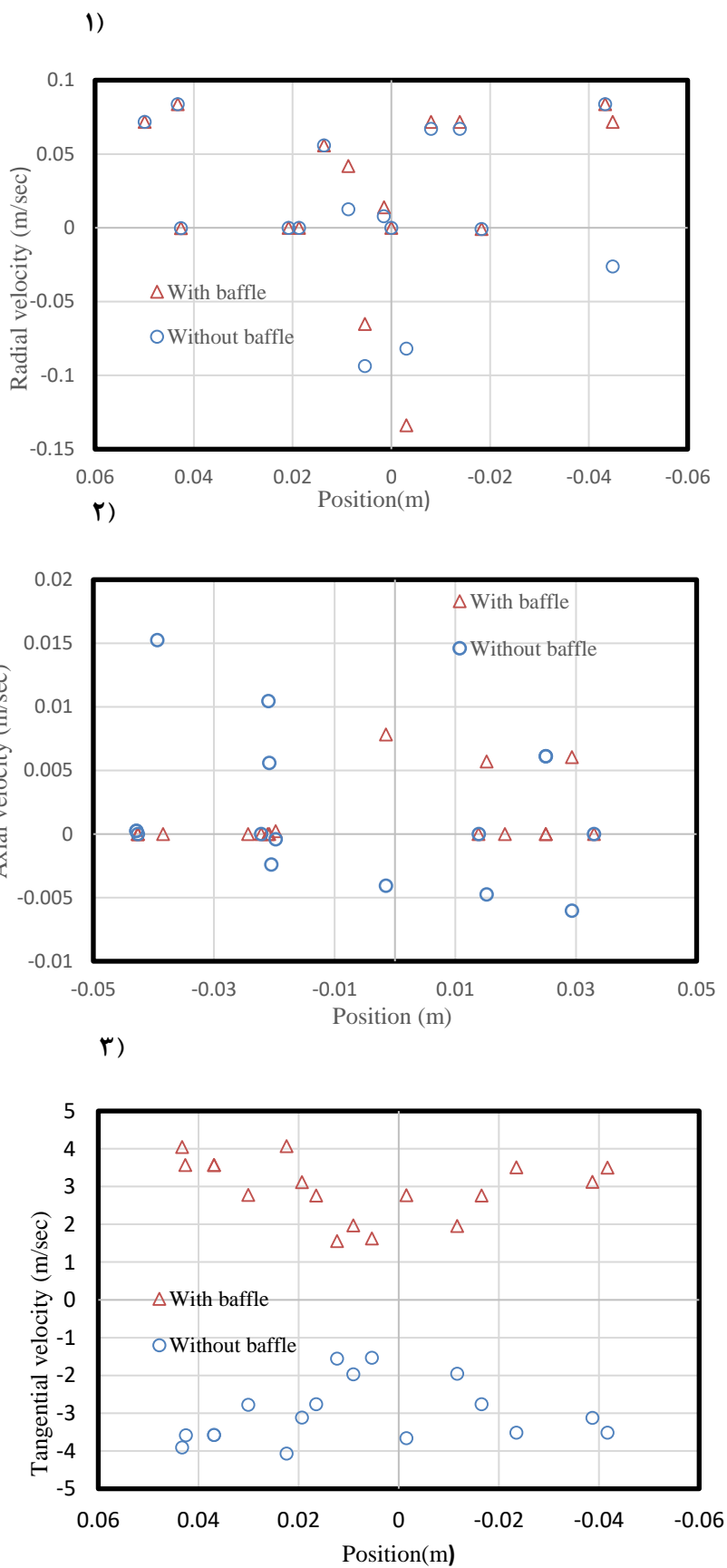
نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای سه حالت بستر خشک، بستر مرطوب بدون بافل و بستر مرطوب با بافل ثابت و متحرک بیان می‌شوند. ابتدا تأثیر سه مؤلفه سرعت و دبی گاز بر افت فشار بستر خشک بررسی شده، سپس اثر پارامترهای عملیاتی مؤثر از قبیل سرعت چرخش، دبی گاز، دبی مایع، تعداد روزنه‌های روتور و وجود بافل ثابت و متحرک بر افت فشار بستر مرطوب، تجزیه و تحلیل و با داده‌های تجربی، اعتبارسنجی می‌شوند.

۳-۱- شبیه‌سازی بستر خشک

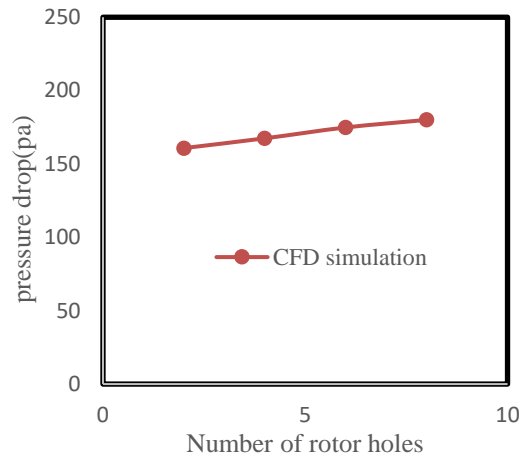
برای انجام فرایند شبیه‌سازی، ابتدا بهترین شبکه با بررسی عدم وابستگی نتایج افت فشار به شبکه، مورد بررسی قرار گرفت. پنج اندازه شبکه به ترتیب به تعداد ۴۱۰۴۰ المان، ۴۱۶۲۴ المان، ۶۷۸۳۹ المان، ۲۷۳۹۶۷ المان و ۳۱۴۳۱۷ المان در نظر گرفته شد و اثر آن‌ها روی افت فشار بررسی شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده که در شکل (۳) نشان داده شده، به دلیل اینکه اختلاف افت فشار بین سه شبکه ۲، ۳ و ۴ کمتر از یک درصد است، از تعداد ۴۱۶۲۴ المان برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

تأثیر سرعت چرخش و وجود بافل روی سه مؤلفه شعاعی، محوری و مماسی سرعت، در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود بافل، تأثیر زیادی بر مؤلفه‌های سرعت شعاعی و محوری ندارد؛ اما مشاهده می‌شود که وجود بافل، سبب افزایش سرعت مماسی شده است؛ زیرا قرار دادن بافل در سیستم، سبب می‌شود علاوه بر نیروی درگ پرکن‌ها، نیروی درگ ناشی از

^۱ Second order upwind discretization

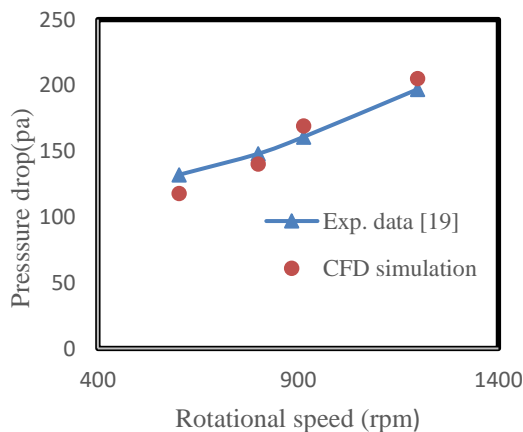


شکل ۴: اثر بافل بر مؤلفه‌های سرعت در سرعت چرخش 800 rpm: (۱) در جهت شعاعی، (۲) در جهت محوری، (۳) در جهت مماسی



شکل ۷: اثر تعداد روزنه‌های روتور بر افت فشار در دبی گاز برابر ۲۰ lit/min و دبی مایع برابر ۰/۳ lit/min در سرعت چرخش ۸۰۰ rpm

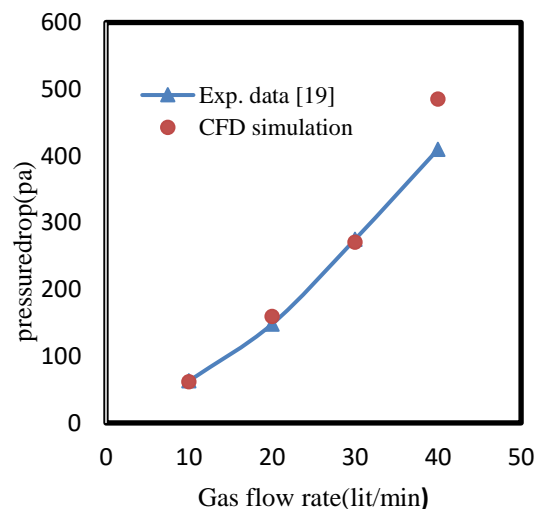
با بررسی اثر سرعت چرخش روی افت فشار جریان گاز در حالت دوفازی، مطابق شکل (۸)، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت چرخش در دبی ثابت گاز و مایع به دلیل افزایش نیروی گریز از مرکز بر ذرات گاز و مایع و خروج سریع‌تر مایع از مرکز روتور، افت فشار افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش سرعت چرخش، افت فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز بر ذرات گاز بیشتر شده، در نتیجه، افت فشار کل افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش انرژی جنبشی ذرات گاز، نیروی درگ وارد شده از طریق ذرات گاز به ذرات مایع بیشتر می‌شود. بنابراین برآیند نیروی مومنتوم ذرات مایع و نیروی محرکه گاز با نیروی گریز از مرکز ذرات مایع باعث می‌شود ذرات مایع بر سطح پرکن‌ها در داخل بستر بچسبند. همچنین ذرات مایع به دلیل کشش سطحی بیشتر نسبت به گاز، به سطح پرکن‌ها می‌چسبند و سبب افزایش افت فشار می‌شوند.



شکل ۸: اثر سرعت چرخش بر افت فشار در دبی گاز برابر ۲۰ lit/min و دبی مایع برابر ۰/۳ lit/min

۳-۲- شبیه‌سازی بستر مرطوب بدون بافل

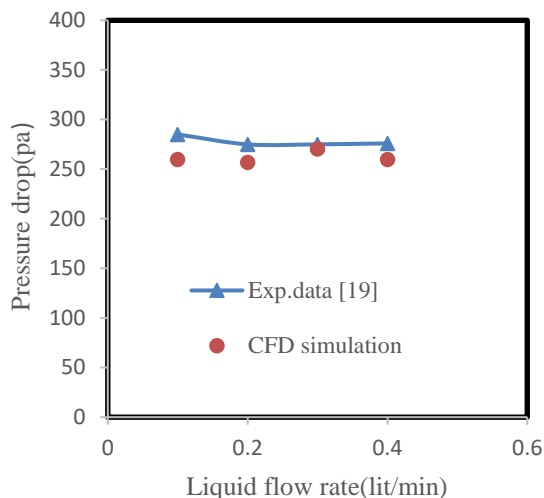
شرایط عملیاتی در نظر گرفته شده در این قسمت، مطابق کار آزمایشگاهی سانگ و چن [۱۹] برای سرعت چرخشی $\omega = 600-1800 \text{ rpm}$ ، دبی گاز برابر ۱۰-۴۰ lit/min و $Q_G =$ دبی مایع برابر $0.1-0.4 \text{ lit/min}$ است. اثر تغییر دبی گاز بر افت فشار گاز درون RPB در دبی ثابت مایع برابر ۰/۳ lit/min و سرعت چرخش ۸۰۰ rpm در شکل ۶ نشان داده شده است. به طوری که در شکل مشاهده می‌شود، افزایش دبی گاز، سبب افزایش افت فشار گاز می‌شود؛ زیرا افزایش دبی گاز موجب افزایش افت فشار اصطکاکی گاز می‌گردد. به عبارت دیگر، اثر نیروی درگ پرکن‌ها بر جریان گاز، با افزایش دبی گاز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی گاز، ذرات بیشتری از گاز به پرکن‌ها برخورد کرده، نیروی درگ ذرات گاز بر یکدیگر نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند سبب افزایش افت فشار گاز شود. متوسط خطا بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی ۵/۳ درصد است.



شکل ۶: اثر تغییر دبی گاز بر افت فشار در دبی ثابت مایع برابر ۰/۳ lit/min و سرعت چرخش ۸۰۰ rpm

اثر تعداد روزنه‌های روتور که یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار روی افت فشار گاز است، در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد روزنه‌ها، افت فشار گاز افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش تعداد روزنه‌ها، مقدار مایع و در نتیجه، زمان ماند مایع در روتور به‌ویژه در ناحیه داخلی آن بیشتر می‌شود که سبب شده چرخش گاز در بستر بیشتر به تأخیر بیفتد و افت فشار افزایش یابد.

فشار گاز و سپس باعث افزایش آن می‌شود؛ زیرا ماندگی مایع در بستر در سرعت چرخش ثابت افزایش می‌یابد.



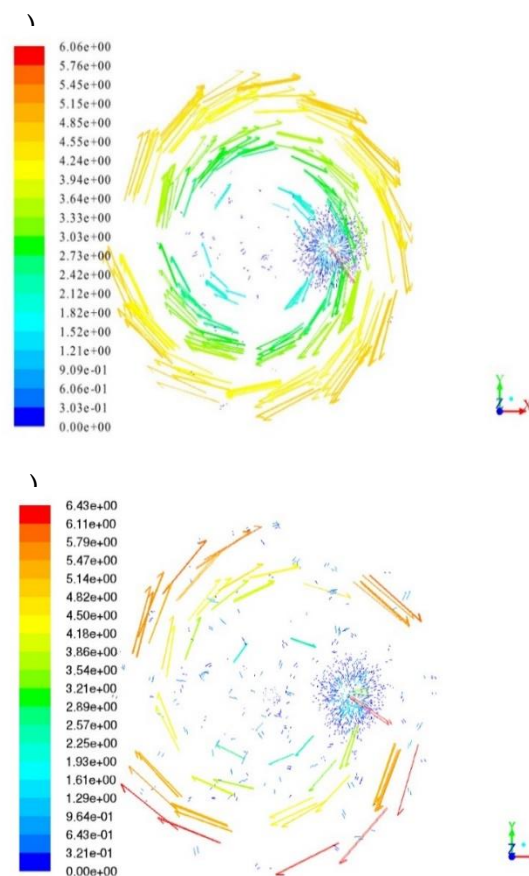
شکل ۱۰: اثر دبی مایع بر افت فشار در دبی گاز برابر lit/min و سرعت چرخش ۸۰۰ rpm

۳-۳- شبیه‌سازی بستر مرطوب با بافل

در این قسمت اثر بافل ثابت و متحرک بر افت فشار با تغییر دبی گاز و سرعت چرخش بررسی می‌شود. دبی گاز و سرعت چرخش استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها همانند قبل، بدون بافل، می‌باشند. بافل‌ها در میان پرکن‌ها قرار داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، افزایش دبی گاز همانند RPB بدون بافل، سبب افزایش افت فشار گاز می‌شود، اما این افزایش افت فشار نسبت به حالت بدون بافل، کمتر است؛ زیرا افزودن بافل ثابت به RPB نسبت به حالت بدون بافل، باعث افزایش نیروی درگ بر ذرات گاز شده، در نتیجه، افت فشار ناشی از نیروی درگ پرکن و بافل افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، وجود بافل، باعث تأخیر چرخش ذرات گاز در داخل روتور و در نتیجه، کاهش سرعت زاویه‌ای و سرعت مماسی ذرات گاز می‌شود و افت فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز را کاهش می‌دهد. در مجموع، وجود بافل سبب می‌شود افت فشار کل گاز نسبت به حالت بدون بافل کاهش یابد. چنین نتایجی در کار تجربی سانگ و چن [۱۹] نیز مشاهده شد. آن‌ها مشاهده کردند که کاهش افت فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز، بسیار کمتر از افزایش افت فشار ناشی از نیروی درگ حاصل از بافل است. متوسط خطا تقریباً برابر ۳/۶ درصد بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی، تأییدکننده مطالب ذکر شده است.

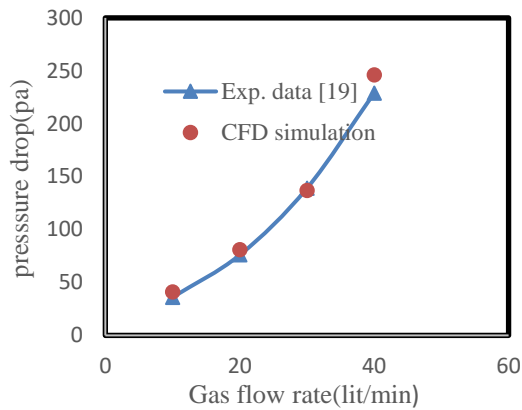
دلیل احتمالی دیگر این است که با افزایش نیروی گریز از مرکز، زمان ماند ذرات در ناحیه داخلی پرکن‌ها افزایش می‌یابد که باعث افزایش افت فشار نیروی گریز از مرکز در بستر می‌گردد. بنابراین علاوه بر افت فشار ناشی از نیروی درگ و ناحیه داخلی پرکن‌ها، افت فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز بیشتر می‌شود و در نتیجه، افت فشار کل گاز افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج CFD با داده‌های آزمایشگاهی، خطای کمتر از ۴ درصد را نشان می‌دهد.

همچنین با توجه به بردارهای سرعت درون بستر که در شکل (۹) نشان داده شده است، می‌توان استنباط کرد که با افزایش سرعت چرخش، بردارهای سرعت به‌صورت کیفی و کمی افزایش می‌یابند که سبب افزایش نیروی گریز از مرکز بر ذرات گاز و در نتیجه، افزایش افت فشار گاز درون بستر می‌شود.



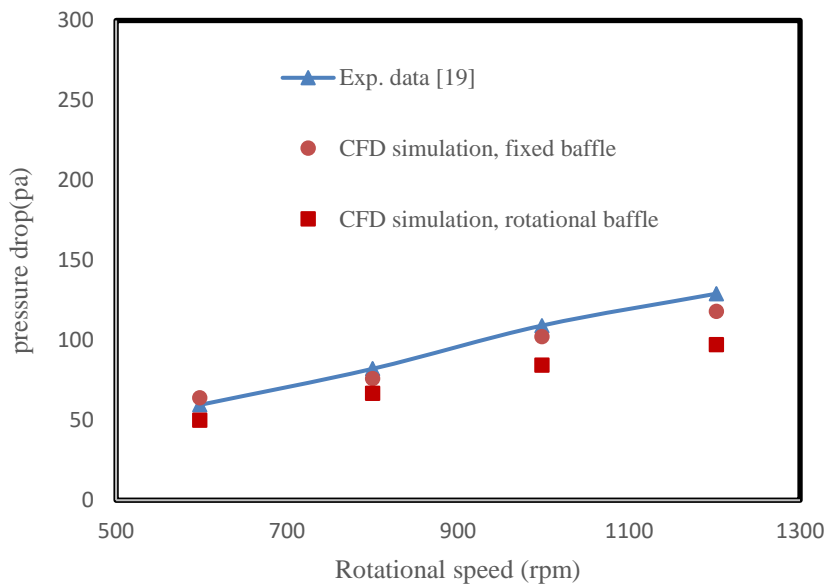
شکل ۹: بردارهای سرعت درون بستر در دبی گاز برابر lit/min و ۲۰ دبی مایع برابر lit/min :۰/۳) سرعت چرخش rpm (۱، ۶۰۰) سرعت چرخش rpm (۲، ۸۰۰)

اثر دبی مایع بر افت فشار در دبی ثابت گاز و سرعت چرخش ثابت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش دبی مایع، ابتدا سبب کاهش ناچیز افت



شکل ۱۱: اثر دبی گاز بر افت فشار در دبی مایع برابر ۰/۳ lit/min و سرعت چرخش ۸۰۰ rpm

اثر چرخش بافل، بافل متحرک، روی افت فشار گاز درون RPB با تغییر سرعت چرخش در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، افت فشار گاز در حالت چرخش بافل‌ها ۱۴ درصد کمتر از حالت بافل‌های ثابت است؛ زیرا ضخامت فیلم مایع در سطح پرکن‌ها و بافل‌ها بیشتر کاهش می‌یابد. در نتیجه، سرعت لغزش بین گاز و فیلم مایع موجود در سطح پرکن‌ها بیشتر می‌شود که سبب کاهش افت فشار گاز می‌گردد.



شکل ۱۲: مقایسه افت فشار برای بافل ثابت و متحرک در دبی گاز برابر ۲۰ lit/min و دبی مایع برابر ۰/۳۰ lit/min

۴- نتیجه گیری

در PB نیروی محرکه مؤثر بر جریان مایع، تنها نیروی گرانش است که سبب می‌شود سطح پرکن‌ها به طور کامل تر نشوند، اما در RPB به دلیل نیروی گریز از مرکز بسیار بزرگ که توسط روتور اعمال می‌شود، سطح تماس گاز-مایع افزایش یافته، توزیع یکنواخت‌تر مایع درون بستر ایجاد می‌شود. به دلیل پیچیدگی هندسه این بسترها درک جریان با روش‌های آزمایشگاهی به‌سختی انجام می‌شود، اما با کمک CFD به‌آسانی می‌توان آنالیز جریان سیالات را در نقاط دلخواه انجام داد. نتایج حاصل از بررسی انجام‌شده، به شرح زیر بیان می‌شود:

- پارامتر مؤثر بر افت فشار دبی گاز است.
- مشخص شد که در جریان تک‌فاز، بافل بیشترین تأثیر را روی مؤلفه مماسی سرعت دارد.
- افت فشار بستر مرطوب برای دو حالت بدون بافل و با بافل، با افزایش دبی گاز افزایش یافت.
- افزایش سرعت چرخش، سبب افزایش افت فشار بستر مرطوب بدون بافل و با بافل شد.
- مشاهده شد که با افزایش تعداد روزنه‌های روتور، افت فشار بستر مرطوب افزایش می‌یابد.
- در جریان دوفازی مشاهده شد که توزیع مایع در جهت شعاعی، با افزایش سرعت چرخش بهبود می‌یابد. همچنین مشخص گردید که در سرعت

- بررسی جریان تک‌فاز در RPB نشان داد که تنها

- های پایین، تأثیر شتاب گریز از مرکز بر میزان توزیع مایع، کم است.
- بافل متحرک سبب کاهش ۱۴ درصدی افت فشار بستر مرطوب نسبت به حالت بافل ثابت شد.

مراجع

- [1] A. Mondal, A. Pramanik, A. Bhowal and S. Datta, "Distillation studies in rotating packed bed with split packing", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 90, No. 4, 2012, pp. 453-457 .
- [2] L. Xiuping, L. Youzhi, L. Zhiqiang and W. Xiaoli, "Continuous distillation experiment with rotating packed bed", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 16, No. 4, 2008, pp. 656-662.
- [3] W. Wei, Z. Haikui, C. Guangwen, Y. XIANG, P. Han and C. Jianfeng, "Effects of assistant solvents and mixing intensity on the bromination process of butyl rubber", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 22, No. 4, 2014, pp. 398-404 .
- [4] W. Wang, H. Zou, G. Chu, Z. Weng and J. Chen, "Bromination of butyl rubber in rotating packed bed reactor", *Chemical engineering journal*, Vol. 240, 2014, pp. 503-508
- [5] C. Tsai and Y. Chen, "Effective interfacial area and liquid-side mass transfer coefficients in a rotating bed equipped with baffles", *Separation and purification technology*, Vol. 144, 2015, pp. 139-145 .
- [6] C. Lin and Lin, "Feasibility of using a rotating packed bed with blade packings to produce ZnO nanoparticles", *Powder Technology*, Vol. 313, 2017, pp. 60-67.
- [7] C. Lin, T. Wei, S. Hsu and W. Liu, "Performance of a pilot-scale cross-flow rotating packed bed in removing VOCs from waste gas streams", *Separation and purification technology*, Vol. 52, No. 2, 2006, pp. 274-279.
- [8] C. Tan and J. Chen, "Absorption of carbon dioxide with piperazine and its mixtures in a rotating packed bed", *Separation and purification technology*, Vol. 49, No. 2, 2006, pp. 174-180.
- [9] M. Lockett, "Flooding of rotating structured packing and its application to conventional packed-columns", *Chemical engineering research and design*, Vol. 73, No. 4, 1995, pp. 379-384.
- [10] C. Lin, B. Chen, Y. Chen and S. Hsu, "Feasibility of a cross-flow rotating packed bed in removing carbon dioxide from gaseous streams", *Separation and purification technology*, Vol. 62, No. 3, 2008, pp. 507-512.
- [11] B. Zhao, W. Tao, M. Zhong, Y. Su and G. Cui, "Process, performance and modeling of CO₂ capture by chemical absorption using high gravity: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65, 2016, pp. 44-56.
- [12] B. Zhao, Y. Su and W. Tao, "Mass transfer performance of CO₂ capture in rotating packed bed: dimensionless modeling and intelligent prediction", *Applied Energy*, Vol. 136, 2014, pp. 132-142 .
- [13] M. Keyvani and N. Gardner, "Operating characteristics of rotating beds", *Chemical engineering progress*, Vol. 85, No. 9, 1989, pp. 48-52.
- [14] J. Burns, J. Jamil and C. Ramshaw, "Process intensification: operating characteristics of rotating packed beds—determination of liquid hold-up for a high-voidage structured packing", *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, No. 13, 2000, pp. 2401-2415.
- [15] K. Guo, F. Guo, Y. Feng, J. Chen, C. Zheng and N. Gardner, "Synchronous visual and RTD study on liquid flow in rotating packed-bed contactor", *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, No. 9, 2000, pp. 1699-1706.
- [16] C. Lin and G. Jian, "Characteristics of a rotating packed bed equipped with blade packings", *Separation and purification technology*, Vol. 54, No. 1, 2007, pp. 51-60.
- [17] W. Jiao, Y. Liu and G. Qi, "Gas pressure drop and mass transfer characteristics in a cross-flow rotating packed bed with porous plate packing", *Industrial and engineering chemistry research*, Vol. 49, No. 8, 2010, pp. 3732-3740.
- [18] W. Yang, Y. Wang, J. Chen and W. Fei, "Computational fluid dynamic simulation of fluid flow in a rotating packed bed", *Chemical engineering journal*, Vol. 156, No. 3, 2010, pp. 582-587.

- [19] W. Sung and Y. Chen, "Characteristics of a rotating packed bed equipped with blade packings and baffles", Separation and purification technology, Vol. 93, 2012, pp. 52-58.
- [۲۰] فاطمه یحیی‌زاده ساروی، محمدرضا قاسمی و علی حکمت‌ناظمی، «مدل‌سازی بستر سیال فرایند FCC بر مبنای تغییر اندازه ذرات کلاستر در طول رایزر»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال دهم، شماره ۳۰، پاییز ۱۳۹۱، صفحه ۸۷-۹۷.
- [۲۱] محمدهادی حامدی استخری سر و روح‌الله رفعی، «بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر عملکرد مدل برهم‌کنش ادی و قطره برای کاربرد در قطره‌گیر زیگزاگی ساده با ضخامت موج‌دار»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال دهم، شماره ۳۱، زمستان ۱۳۹۱، صفحه ۶۹-۸۴.
- [22] X. Shi, Y. Xiang, L. Wen and J. Chen, "CFD analysis of liquid phase flow in a rotating packed bed reactor", Chemical engineering journal, Vol. 228, 2013, pp. 1040-1049.
- [۲۳] نکیسا یعقوبی، رامین مغریب و سیاوش سیدنژادیان، «سینتیک و پدیده‌های انتقال در جفت شدن اکسایشی متان: مدل‌سازی CFD در مقیاس دانه‌ای»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۹، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۲۳-۱۴۱.
- [۲۴] نورالله کثیری، محمد ذات‌خواهی، محمدحسن خان‌اف و جواد ایوک‌پور، «بررسی اثر مدل اغشاش بر هیدرولیک سینی غربال»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال سیزدهم، شماره ۴۲، پاییز زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۷۹-۸۶.
- [25] L. Sang, Y. Luo, G. Chu, J. Zhang, Y. Xiang and J. Chen, "Liquid flow pattern transition, droplet diameter and size distribution in the cavity zone of a rotating packed bed: A visual study", Chemical Engineering Science, Vol. 158, 2017, pp. 429-438.
- [26] P. Xie, X. Lu, X. Yang, D. Ingham, L. Ma and M. Pourkashanian, "Characteristics of liquid flow in a rotating packed bed for CO₂ capture: A CFD analysis", Chemical Engineering Science, Vol. 172, 2017, pp. 216-229.
- [27] Y. Liu, Y. Luo, G. Chu, J. Luo, M. Arowo and J. Chen, "3D numerical simulation of a rotating packed bed with structured stainless steel wire mesh packing", Chemical Engineering Science, Vol. 170, 2017, pp. 365-377.
- [28] X. Lu, P. Xie, D.B. Ingham, L. Ma and M. Pourkashanian, "A porous media model for CFD simulations of gas-liquid two-phase flow in rotating packed beds", Chemical Engineering Science, Vol. 189, 2018, pp. 123-134.
- [29] ANSYS FLUENT 12.0.16, Theory Guide, ANSYS Inc., 2009.