

# بررسی نظریه آشفتگی کولموگروف و تعیین ضریب نفوذ داری در بستر آکنده دوار

فریبا زارعی، محمودرضا رحیمی\*

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

**چکیده:** بستر آکنده دوار به عنوان یکی از برجسته‌ترین تجهیزات تشدید فرایند مستلزم مطابقت با نظریه‌های انتقال جرم حاکم بر سامانه‌های جداسازی است. در این میان رابطه‌ی داری به عنوان یکی از مطرح‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی سرعت حرکت سیال در محیط‌های متخلخل و نظریه آشفتگی کولموگروف (با توجه به شرایط خاص عملیاتی این سامانه مانند سرعت دورانی بالا) از مناسب‌ترین نظریه‌ها برای بررسی وضعیت هیدرودینامیکی بستر آکنده دوار است. مطالعه تجربی - نظری صورت گرفته در این پژوهش بر پایه مبانی نظری مدل داری و همچنین نظریه آشفتگی کولموگروف است که با هدف مطالعه وضعیت افت فشار و اندازه قطره‌های موجود در سامانه (با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی حاکم بر بستر آکنده دوار) انجام شد. معادل سازی عامل‌های اساسی هریک از این دو نظریه در این سامانه سرانجام منجر به پیش‌بینی قطر متوسط قطره‌های موجود در بخش پر شده و ارایه مدلی برای ضریب نفوذ داری شد. در این راستا، پس از بررسی اثرپذیری افت فشار از سه متغیر عملیاتی (سرعت چرخش بستر و نرخ جریان دو فاز ورودی درگیر در فرایند) عملکرد مدل ارایه شده در تعیین ضریب نفوذ داری ارزیابی شد. مقدار ۰٫۹۵ برای عامل همبستگی در این مقایسه به روشنی بیانگر دقت قابل پذیرش فرضیه‌ها و معادل‌سازی‌های صورت گرفته بود که در نتیجه آن درستی رابطه به‌دست آمده در پیش‌بینی نظری میزان افت فشار بسترهای آکنده دوار (بدون نیاز به انجام آزمایش‌های هیدرودینامیکی) تأیید شد. افزون بر این، مقایسه مقدارهای تجربی در دسترس قطر متوسط قطره‌های موجود در بستر (گزارش شده توسط سایر پژوهشگران در پژوهش‌های پیشین) و همچنین مقدارهای محاسبه شده با بهره‌گیری از مدل‌های ارایه شده با نتیجه‌های به‌دست آمده با استفاده از مبانی نظری آشفتگی کولموگروف انجام شد که مطابق با آن قابلیت پذیرش بالاتر این نظریه نسبت به سایر رابطه‌ها و مدل‌های ارایه شده در پیش‌بینی مقدارهای نزدیک‌تر با داده‌های تجربی به روشنی مشهود بود.

**واژه‌های کلیدی:** نظریه آشفتگی کولموگروف؛ افت فشار؛ ضریب نفوذ داری؛ بستر آکنده دوار.

**KEYWORDS:** Kolmogorov turbulence theory; Pressure drop; Darcy permeability coefficient; Rotating Packed Bed.

## مقدمه

حذف ناکارآمدی‌هایی چون میزان طغیان و افت فشار بالا در بسترهای پر شده معمولی طراحی و ارایه شد. این سامانه‌ها

ایده ساخت بستر آکنده‌ی دوار برای اولین بار در سال ۱۹۸۱ میلادی توسط رامشاو و ملیسون [۱] مطرح شد. این سامانه با هدف

\*E-mail: mrrahimi@yu.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

ویژه عملیاتی بستر آکنده دوار (مانند اهمیت قابل توجه پارامتر سرعت) برجسته‌ترین عامل مورد نظر بود. در این میان، نظریه آشفستگی کولموگروف به عنوان یکی از محدود مدل‌های ارائه شده مطرح است که به میزان چشمگیری با شرایط ویژه بسترهای آکنده دوار مطابقت داشت. تأثیر چشمگیر پارامتر سرعت نسبت به سایر متغیرهای موثر و همچنین اهمیت بالای این عامل در بسترهای آکنده دوار خود شاهدهی بر این مدعا است. در نتیجهی مباحث مطرح شده، بالا بودن حجم مطالعه‌های صورت گرفته در این حوزه، طی سالیان اخیر (با توجه به کیفیت چشمگیر این سامانه‌ها و اهمیت تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی و طراحی در آن‌ها) دور از انتظار نیست. لیو و همکاران در سال ۱۹۹۶ میلادی با استفاده از سامانه عریان‌سازی اتانول، به منظور بررسی افت فشار ایجاد شده در بسترهای آکنده دوار گام مهمی در زمینه مطالعه هیدرودینامیک این سامانه‌ها برداشتند. پژوهش صورت گرفته توسط این گروه از پژوهشگران سرانجام منجر به ارائه یک رابطه‌ی نیمه تجربی به منظور محاسبه و پیش‌بینی افت فشار در بسترهای آکنده دوار شد [۳۱]. پس از آن در سال ۲۰۰۷ میلادی لی و چان با استفاده از آکنه‌های تیغه ای برای دو فرایند اکسیژن‌زادی از آب و جذب ایزوپروپیل الکل از جریان گاز، افت فشار ایجاد شده در بستر را بررسی کردند [۳۲]. افت فشار و ویژگی‌های انتقال جرمی مربوط به بسترهای آکنده دوار در سال ۲۰۱۰ میلادی توسط بیوژی و ژپیک مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در این مطالعه ضمن بهره‌گیری از سامانه الکل و آب و نوعی ویژه‌ای از آکنه‌ها موسوم به Fin baffle packing، تأثیر پارامترهایی چون متوسط ضریب گرانش، نسبت جریان برگشتی مایع و شدت خوراک را بر میزان افت فشار بررسی کردند [۳۳]. جیاو و همکاران در همان سال با استفاده از دو نوع آکنه‌ی متخلخل ویژگی‌های هیدرودینامیکی سامانه را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش میزان افت فشار بستر با بهره‌گیری از سامانه مخلوط هوا و کربن دی‌اکسید و محلول آبی سدیم هیدروکسید بررسی شد [۳۴]. از دیگر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به نتیجه‌های به‌دست آمده توسط سانگ و چن در سال ۲۰۱۲ میلادی اشاره کرد که در این پژوهش با ابداع نوع جدید از بستر، افت فشار به دست آمده تا حدود ۵۳٪ کاهش پیدا کرد [۳۵]. در این میان تعداد محدودی از پژوهش‌ها نیز بر مطالعه نظری سطح تماس ویژه و اندازه‌های متوسط قطره‌های جاری در بستر معطوف شده است. مدل فن‌گو پذیرفته شده ترین رابطه موجود در این زمینه است

با گذشت زمان با توجه به برتری‌های چشمگیری خود نسبت به برج‌های پر شده معمولی (مانند اندازه‌های کوچک‌تر همراه با هزینه‌های عملیاتی و نگهداری کم‌تر، قابلیت پذیرش شدت جریان‌های بالاتر و همچنین گسترده‌تر بودن بازه‌ی گرانروی سیال‌های ورودی [۲]) جایگاه خود را در فرایندهای بسیار جداسازی مانند تقطیر، جذب، عریان‌سازی، اکسید کردن اوزون و اختلاط-ته‌نشینی در سامانه‌های امولوسیون [۲۶ - ۳] پیدا کردند. با این حال، بازده بیشینه این سامانه‌ها به شدت تحت تأثیر طراحی مناسب و بهینه آن‌ها است. به طوری که لزوم پیش‌بینی مناسب عامل‌های اساسی طراحی به منظور تعیین میزان بهینه اندازه، شدت جریان‌های ورودی و سرعت چرخش بستر دارای اهمیت است. در این میان، افت فشار یکی از اصلی‌ترین مشخصه‌های طراحی در این سامانه‌ها است. تأثیر این پارامتر بر میزان انرژی مصرفی پمپ و سایر تجهیزات مورد استفاده و همچنین میزان طغیان و حمل مایع چشمگیر است [۲۷]. در نتیجه، بازه‌ی عملیاتی شدت جریان‌های دو فاز و همچنین هزینه‌های عملیاتی به شدت تحت تأثیر مقدار افت فشار است [۲۸]. بنابراین این عامل یکی از اثرگذارترین پارامترها در طراحی سامانه‌های عملیاتی (به ویژه سامانه‌های شامل بخش پر شده) است [۲۹] که میزان بازدهی بخش پر شده را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۰]. در این راستا، پیش‌بینی مناسب آن با توجه به اثرپذیری این پارامتر از فیزیک بستر و عامل‌های عملیاتی (عامل‌هایی مانند ارتفاع و نوع آکنه‌های مورد استفاده در بخش پر شده و سرعت حرکت دو فاز در محیط) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نتیجه، نظریه داری به عنوان یکی از مناسب‌ترین مدل‌های موجود در پیش‌بینی میزان افت فشار در محیط‌های متخلخل در این پژوهش به تفصیل مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، ضریب داری (K) به عنوان یکی از عامل‌های برجسته در این نظریه (که له شدت تابع نوع محیط متخلخل است) به واسطه بهره‌گیری از نتیجه‌های تجربی افت فشار اندازه‌گیری شده (با هدف پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر افت فشار فاز گاز) محاسبه و ارزیابی شد. افزون بر این، با توجه به اهمیت ارائه نظریه مناسب (با توجه به شرایط خاص عملیاتی حاکم در بسترهای آکنده دوار) از میان نظریه‌های مرسوم انتقال جرم منتشر شده، مطالعه مطابقت شرایط عملیاتی این سامانه با نظریه‌های انتقال جرم در دسترس، از دیگر بررسی‌های انجام شده در این پژوهش است. در این بررسی که با هدف فراهم آمدن امکان مطالعه وضعیت جریان‌های جاری در بستر و همچنین نوع تبادل جرم میان دو فاز انجام شد، شرایط

روند تأثیر عدد رینولدز بر میزان آشفستگی، به تفصیل در مورد تأثیر اندازه‌ی گردابه‌های موجود در سیال بر میزان و چگونگی تبادل انرژی در جریان آشفته پرداخت. مطابق این نظریه تقسیم‌بندی بر اساس اندازه‌ی گردابه‌ها ارایه شد که می‌توان به واسطه‌ی آن چگونگی تبادل انرژی و میزان پایداری گردابه‌ها را پیش‌بینی کرد. پارامتر کلیدی تعریف شده در این نظریه نرخ اتلاف انرژی است که بر اساس آن محاسبه‌های مربوط به سرعت آشفستگی و پیش‌بینی طول گردابه‌ها در سیال آشفته انجام شد. همچنین، از آنجایی که عمده تفاوت بسترهای آکنده دوار با بسترهای پر شده معمولی در اعمال نیروی دوارنی به سامانه است، بررسی این عامل در مطالعه وضعیت جریان جاری در این سامانه‌ها دارای اهمیت است. در این راستا، معادله‌ی معرف مفهوم کلی عامل اتلاف انرژی است که نشان دهنده اثرپذیری چشمگیر این نظریه از سرعت حرکت دو فاز است. این پارامتر به صورت نسبت میزان انرژی مصرفی جرم  $m$  از سیال در طی مسیر انتقال جرم است، که با استفاده از آن در مقدار بحرانی عدد وبر، متوسط قطر قطره‌های موجود در بسترهای آکنده دوار تعیین شد. بنابراین، (با توجه به تعریف ارایه شده) عامل اتلاف انرژی به صورت میزان انرژی انتقال یافته از فاز مایع به گاز (به منظور تماس میان دو فاز در کل مسیر انتقال جرم تعریف شده) بر واحد جرم است. با فرض آن که انرژی از دست رفته جریان مایع در این مسیر به صورت کامل توسط فاز گاز دریافت شده است، می‌توان معادله‌ی مربوط به پارامتر اتلاف انرژی را به صورت نسبت تغییرهای انرژی جنبشی جریان مایع بر واحد جرم بیان کرد.

$$\varepsilon = \frac{\text{energy}}{\text{mass}} = \frac{\frac{1}{2} \dot{m}_L V_f^2 - \frac{1}{2} \dot{m}_L V_i^2}{m_L} \quad (1)$$

بنابراین با توجه به اهمیت این پارامتر عمده بررسی‌های صورت گرفته درباره این عامل است.

### تعیین تجربی افت فشار و تئوری دارسی

معادله (۲) تعریفی از سرعت در محیط‌های متخلخل با استفاده از نظریه دارسی را نشان می‌دهد که مطابق با آن تابعیت این پارامتر از میزان افت فشار سامانه به طور کامل مشهود است.

$$Q = \frac{-kA}{\mu L} \nabla P \quad (2)$$

مقدارهای تجربی افت فشار فاز گاز پس از تعیین بازه‌ی عملیاتی شدت جریان دو فاز ورودی گاز و مایع و همچنین

که در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط گروهی از پژوهشگران و با بهره‌گیری از نظریه تجدید سطح ارایه شد [۳۶]. از دیگر مطالعه‌های مهم صورت گرفته در این زمینه تلاش‌های انجام شده توسط فی و همکاران در سال ۲۰۰۹ میلادی بود که با استفاده از سامانه جذب کربن دی اکسید در محلول بیفیل انجام شد. آن‌ها طی این پژوهش اندازه متوسط قطره‌های موجود در محیط بسترهای آکنده دوار را بر حسب فاصله از توزیع کننده مورد بررسی قرار دادند [۳۷]. با این حال ارایه نکردن مدل مناسب برای مطالعه و پیش‌بینی دو عامل افت فشار و اندازه متوسط قطره‌های مایع جاری در بستر به عنوان ضعف عمده مطالعه‌های صورت گرفته تا به امروز پابرجاست. در مطالعه حاضر میزان ضریب دارسی نسبی فاز گاز در محیط متخلخلی از جنس فولاد ضد زنگ تعیین و گزارش شد که در نتیجه آن امکان استفاده از این نظریه در بررسی افت فشار در بستر آکنده دوار (بدون نیاز به انجام آزمایش‌های هیدرودینامیکی) فراهم شد. همچنین، اهمیت دستیابی به مدل انتقال جرم مناسب (با توجه به مباحث مطرح شده) به طور کامل روشن است که در این راستا نظریه آشفستگی کولموگروف با هدف ارزیابی میزان مطابقت این نظریه با شرایط خاص بستر آکنده دوار (با در نظر گرفتن مبانی مطرح شده در آن) در این پژوهش بررسی شد که در نتیجه آن تابعیت سطح تبادل جرم از اندازه دو فاز پیوسته و پراکنده و به دنبال آن اثرپذیری میزان بازده نهایی سامانه عملیاتی از این پارامتر به طور تئوری قابل پیش‌بینی بود. بنابراین، مبانی نظری آشفستگی کولموگروف در این مطالعه به واسطه مطالعه شرایط عملیاتی سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت و به واسطه مقایسه نتیجه‌های به دست آمده برتری کارایی این نظریه اثبات شد. پس از آن نتیجه‌های مربوط به پیش‌بینی قطر متوسط ذره‌ها گزارش و به واسطه مقایسه با مقدارهای تجربی در دسترس (گزارش شده توسط سایر پژوهشگران) عملکرد این نظریه در سامانه مورد نظر (بستر آکنده دوار) ارزیابی شد.

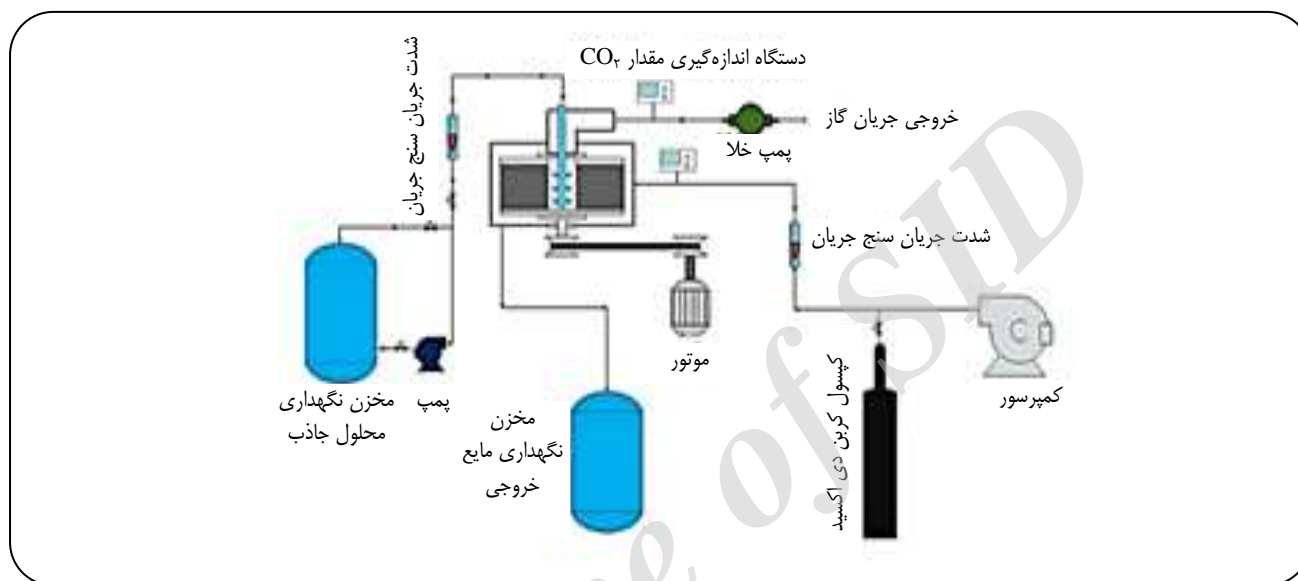
### بخش نظری

#### نظریه آشفستگی کولموگروف

نظریه آشفستگی کولموگراف که نتیجه‌ی مطالعه‌های انجام شده‌ی توسط آندری نیکولاویچ کولموگراف روسی در سال ۱۹۴۱ میلادی بود که طی چندین مقاله انتشار یافت. این نظریه را می‌توان مسبب ایجاد تحولات شگرفی در زمینه‌ی بررسی‌های صورت گرفته در حوزه‌ی مطالعه آشفستگی دانست [۳۸]. این نظریه ضمن بررسی

جدول ۱- 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
افت فشار	فشار سنچ دیجیتالی	۰/۰۱	پاسکال



شکل ۱- نمای کلی سامانه آزمایشگاهی بستر آکندهی دوار.

به واسطه استفاده از مقدارهای تجربی افت فشار در شدت جریان مشخص از فاز گاز و ایجاد فیزیکی بستر، مقدار ضریب نفوذ داری مطابق با معادله‌ی (۳) محاسبه شد که سرانجام ضریب نفوذ محاسبه شده با در نظر گرفتن مقدارهای مربوط به فاکتورهای عملیاتی تأثیرگذار (مانند شدت جریان دو فاز و سرعت چرخش بستر) و با بهره‌گیری از نرم افزار LABFIT مدل‌سازی شد.

$$v = \frac{-K}{\mu} \nabla P \quad (3)$$

## نتیجه‌ها و بحث

### افت فشار

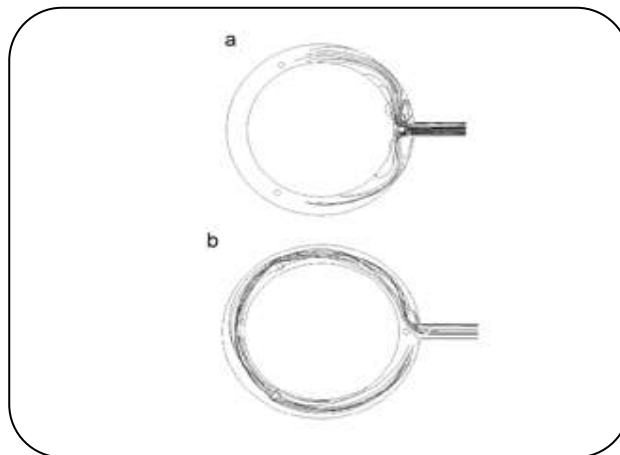
شکل ۱ نشان دهنده الگوی حرکت جریان گاز در بستر آکنده دوار است. جریان گاز با ورود به محیط سامانه تحت تأثیر سرعت گریز از مرکز ایجاد شده قرار گرفت که سرانجام منجر به حرکت منظم

سرعت چرخش بستر با هدف اجتناب از وقوع پدیده‌های طغیان و حمل مایع، اندازه‌گیری شد. بدین منظور، از سامانه عملیاتی مطابق شکل ۱ استفاده شد. شدت جریان دو فاز ورودی با استفاده از جریان سنچ‌های تعبیه شده در مسیر ورودی جریان (مطابق با شکل) و با دقت آرایه شده در مطابق با جدول ۱ تنظیم شد. بازه‌ی شدت جریان دو فاز، پس از انجام آزمایش‌های هیدرودینامیکی مشخص شد. مطابق نتیجه‌های به‌دست آمده بازه‌ی شدت جریان مایع از ۰/۲ تا ۰/۴ لیتر بر دقیقه و بازه‌ی عملیاتی نرخ جریان گاز ۱۰ تا ۳۰ لیتر بر دقیقه بود که این مقدارهای متناسب با اندازه‌های سامانه و نوع آکنه مورد استفاده به‌دست آمد.

همچنین، تعریف عام نظریه داری مطابق معادله‌ی (۲) است. محاسبه افت فشار در مقطع و مسافت تعریف شده با در دست داشتن مقدار ضریب داری محیط مورد نظر و همچنین شدت جریان حجمی فاز گاز ورودی قابل انجام است. بنابراین؛ در این مطالعه

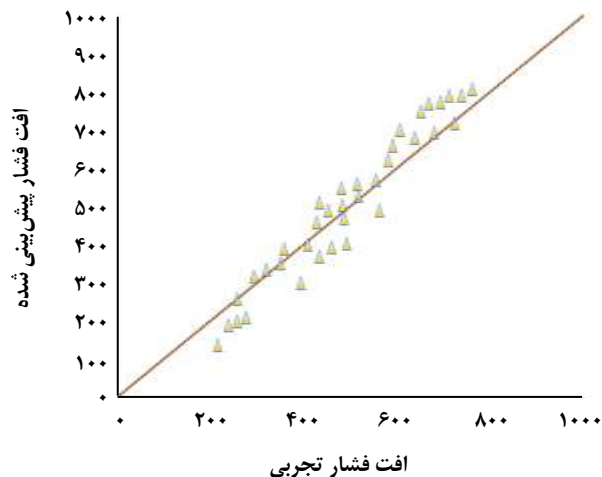
تابعیت افت فشار جریان گاز از سرعت چرخش بستر و همچنین نرخ جریان گاز به صورت افزایشنده بود. با این حال با توجه به پراکندگی بیش تر گازها نسبت به مایع‌ها و در نتیجه آن اثرپذیری کم تر سرعت ظاهری سیال‌های گازی از سرعت گریز از مرکز، شیب تغییرهای افت فشار به سرعت چرخش بستر نه سبت به نرخ جریان گاز ورودی به مراتب کمتر بود. از سوی دیگر حضور فاز مایع به عنوان فاز ثانویه در محیط سامانه و افزایش تنش مبادله شده در اثر تقابل دو فاز (و در نتیجه آن بیش تر شدن مجموع نیروهای ایجاد کننده افت فشار) این پارامتر عامل موثر دیگری در بررسی میزان افت فشار بود که در شکل ۲ بررسی شد. افزایش شدت جریان مایع ورودی موجب بیش تر شدن سرعت حرکت قطره‌ها و فیلم‌های مایع جاری در بستر شد. در نتیجه این امر و حرکت متقابل دو فاز گاز و مایع نسبت به هم، تنش مبادله شده بین دو فاز (در اثر برخورد فاز پیوسته و پراکنده) و همچنین اصطکاک وارد شده به جریان گاز افزایش یافت. بنابراین میزان افت فشار فاز گاز با اضافه شدن جریان مایع و همچنین بیش تر شدت شدت جریان ورودی آن به بستر بیش تر شد. بنابراین نتیجه‌های تجربی به دست آمده به روشنی تأثیر سه عامل عملیاتی مورد بحث (شدت جریان دو فاز و سرعت چرخش بستر) بر میزان افت فشار را نشان داد. پس از آن رابطه‌ی دارسی به عنوان یکی از مطرح ترین رابطه‌های در زمینه تعیین سرعت ظاهری سیال در محیط‌های متخلخل با استفاده از این نتیجه‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت. معادله (۳) نشان دهنده تابعیت ضریب خود نفوذی مدل دارسی از افت فشار، گرانی و سرعت ظاهری جریان گاز در محیط متخلخل است. بنابراین، با توجه به این رابطه و مقادیرهای مربوط به افت فشار اندازه‌گیری شده، امکان پیش‌بینی ضریب نفوذ نسبی رابطه‌ی دارسی (مربوط به سامانه دو فازی گاز-مایع در بسترهای آکنده دوار با آکنه‌های از جنس فولاد ضد زنگ) فراهم است.

معادله (۴) رابطه‌ی مربوط به تعیین ضریب نفوذ دارسی نسبی به صورت تابعی از سرعت چرخش بستر و نسبت جریان مایع به گاز ورودی را نشان است که با استفاده نرم افزار LABFIT و بهره‌گیری از نتیجه‌های اندازه‌گیری شده، مدل‌سازی شد. در این معادله، ضریب نفوذ نسبی به دست آمده بر اساس عامل‌های عملیاتی بحث شده به دست آمد که سرانجام مقدار افت فشار پیش‌بینی شده (به منظور ارزیابی عملکرد رابطه به دست آمده) از تلفیق این معادله ۳ و ۴ به ازای مقادیر مشخص از نرخ جریان دو فاز گاز و مایع ورودی و همچنین سرعت چرخش بستر محاسبه شد.



شکل ۲- الگوی جریان فاز گاز در بسترهای آکنده دوار در سرعت چرخش‌های گوناگون (a) دور موتور صفر (b) دور موتورهای ۸۷۰ دور بر دقیقه [۳۹].

نشان داده شده، شد. بنابراین روند تغییرهای افت فشار در بسترهای آکنده دوار نسبت به بسترهای پر شده متفاوت است. تأثیر چشمگیر سرعت دورانی اعمالی در ایجاد اختلاط و تبادل مومنتوم در فاز پیوسته، از برجسته‌ترین تفاوت‌های موجود بین این سامانه و بسترهای متداول است. با توجه به تعریف کلی افت فشار در بسترهای پر شده (که میزان افت فشار را به تنش ایجاد شده بین دو فاز درگیر در فرایند نسبت می‌دهد) در نتیجه اعمال سرعت میزان افت فشار افزایش می‌یابد. در این راستا، نتیجه‌های تجربی اندازه‌گیری شده تغییرهای افت فشار فاز گاز در بستر آکنده‌ی دوار (در سرعت چرخش بستر و شدت جریان‌های ورودی گوناگون) در شکل ۲ نشان داده شد. روند دیده شده در این شکل به طور کامل با وضعیت حرکت جریان گاز در سامانه مطابق بود. بر اساس تعاریف مرسوم ارایه شده در مورد بسترهای پر شده، اصطکاک از جمله مؤثرترین کمیت‌ها در تحلیل میزان افت فشار ایجاد شده در سامانه است. بنابراین بخش عمده مطالعه افت فشار را می‌توان به بررسی تغییرهای نیروی اصطکاک وارده نسبت داد. در این راستا، اثرپذیری هر یک از پارامترهای عملیاتی مورد بحث (سرعت چرخش بستر و نرخ جریان گاز و یا مایع ورودی) بر میزان اصطکاک وارده شده بر جریان گاز، بررسی شد. مطابق با بررسی هیدرودینامیکی انجام شده در بستر آکنده دوار، افزایش سرعت چرخش بستر و یا نرخ جریان گاز ورودی منجر افزایش سرعت ظاهری سیال (در مسیر ماریپیچی نشان داده شده) شد. بنابراین، نیروی اصطکاک وارد شده به جریان گاز در اثر افزایش سرعت حرکت جریان پیوسته (در اثر افزایش سرعت چرخش بستر و یا نرخ جریان گاز ورودی) افزایش یافت که در نتیجه آن



شکل ۳- مقایسه افت فشار تجربی و مقدارهای محاسبه شده با استفاده از معادله (۴) و معادله داریسی.

سرعت در ورودی بستر نسبت به سرعت قطره‌های مایع در شعاع خروجی به صورت معادله (۵) است:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m} V_v^r}{\dot{V} m} = \frac{\rho Q_L V_v^r}{\dot{V} \rho Q_L \tau} = \frac{\rho Q_L (\dot{V} \pi r \omega)^r}{\dot{V} \rho Q_L \tau} \quad (5)$$

از سویی زمان ماند جریان مایع در بستر را با استفاده از مفهوم سرعت ظاهری به صورت زیر است:

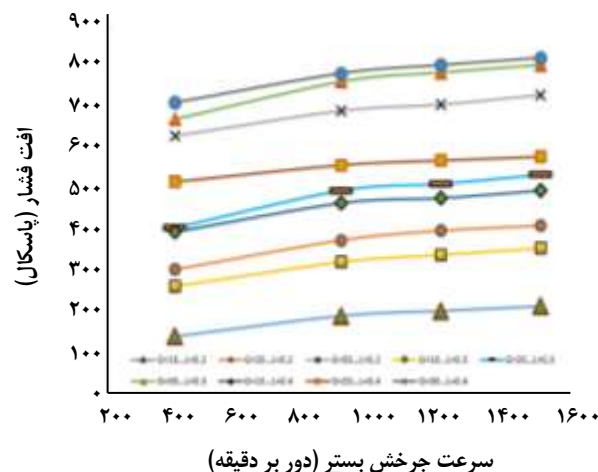
$$\tau = \frac{R}{V} = \frac{\zeta \times A \times B}{Q_L} = \frac{\zeta \times (\dot{V} \pi R L) \times R}{Q_L} \quad (6)$$

که در آن شعاع به صورت متوسط هندسی شعاع داخلی و خارجی بستر در نظر گرفته شد:

$$\bar{R} = \frac{R - R_i}{\ln\left(\frac{R}{R_i}\right)} \quad (7)$$

بنابراین با توجه به رابطه‌های تعریف شده در بالا می‌توان مقدار شدت اتلاف انرژی مربوط به بسترهای آکنده دوار را تعیین کرد. از طرفی قطر پایدار قطره‌ها را با توجه به تعریف عدد بدون بعد وبر در شرایطی که مقدار آن برابر با مقدار بحرانی ( $We_{crit} = \gamma$ ) [۴۰] است قابل دست‌یابی می‌باشد. معادله (۸) نشان دهنده تعریف عدد بدون بعد وبر است:

$$We_{crit} = F_\lambda / F_\sigma = \frac{u_\lambda^2 \rho_L d_{max}}{\sigma} \quad (8)$$



شکل ۲- بررسی اثر پذیری افت فشار در بستر آکنده دوار از سرعت جرخش بستر.

$$\kappa = (0.487 \times 10^{-10}) + (0.802 \times 10^{-14}) \omega + \quad (4)$$

$$(0.133 \times 10^{-7}) \left(\frac{L}{G}\right)^r$$

به منظور بررسی میزان مطلوبیت رابطه به دست آمده مقدارهای افت فشارهای تجربی و محاسبه شده با استفاده از این رابطه در شکل ۳ مقایسه شد که مطابق با این شکل نزدیکی نسبی توزیع نقاط به دست آمده حول خط نیم‌ساز نمودار خود شاهدهی بر این مدعا است و بیانگر کیفیت عملکرد این رابطه در پیش‌بینی مقدار مناسب ضریب خود نفوذی رابطه‌ی داریسی ( و نتیجه آن افت فشار فاز گاز) است.

### نظریه آشفته‌گی کولموگروف

مطابق مبانی نظری آشفته‌گی کولموگروف (که در مطالعه‌های بسیاری تشریح شده است) در ارزیابی‌های انجام شده بر اساس این نظریه، عامل اتلاف انرژی مهم‌ترین و اثرگذارترین پارامتر است. با توجه به تعریف ارائه شده این پارامتر به صورت میزان انرژی انتقال یافته از فاز مایع به گاز بر واحد جرم در کل مسیر انتقال جرم تعریف شده (به منظور تماس میان دو فاز) است. بنابراین، رابطه‌ی مربوط به پارامتر شدت اتلاف انرژی (با فرض دریافت انرژی از دست رفته جریان مایع در این مسیر توسط فاز گاز) به صورت نسبت تغییرهای انرژی جنبشی جریان مایع بر واحد جرم است. که این رابطه با فرض ناچیز بودن انرژی جنبشی ورودی جریان مایع در مقایسه با انرژی جنبشی در خروجی سامانه (با توجه به کم بودن

مقدارهای به دست آمده با استفاده از مدل فن گو انجام شد. در نتیجه، ارزیابی صورت گرفته (با توجه به مقدارهای گزارش شده در جدول ۲) مطابقت بیش تر نتیجه های به دست آمده با استفاده از نظریه کولموگروف را با نتیجه های تجربی گزارش شده توسط فی و همکاران نشان داد که همین امر شاهدی بر برقراری و هماهنگی مبانی این نظریه با اصول حاکم بر بسترهای آکنده دوار بود.

### نتیجه گیری

لزوم مطالعه افت فشار ایجاد شده در بسترهای آکنده (به عنوان یکی از مهمترین ویژگی های هیدرودینامیکی تجهیزات انتقال جرمی) و بررسی اثر پذیری آن از متغیرهای عملیاتی دارای اهمیت است. در این میان با توجه به قابلیت اثبات شده رابطه ی دارسی در محاسبه افت فشار و یا سرعت حرکت سیال در محیط متخلخل، تعیین ضریب نفوذ مربوط به این رابطه از مهم ترین نتیجه های گزارش شده در این مطالعه بود که در نتیجه آن امکان بررسی و پیش بینی افت فشار بسترهای آکنده دوار بدون نیاز به انجام آزمایش های هیدرودینامیکی و تنها با استفاده از رابطه گزارش شده میسر بود. بنابراین افت فشار و پارامترهای عملیاتی وابسته به آن به سادگی قابل تعیین بود. همچنین معرفی نظریه مناسب برای مطابقت با اصول حاکم بر بستر آکنده دوار با توجه به فرضیه های مطرح شده در هریک از نظریه های موجود از دیگر مطالعه های صورت گرفته از این پژوهش بود. شرایط خاص بسترهای آکنده دوار (مانند سرعت دوارنی بالا، برابر نبودن ضخامت لایه انتقال جرم هر دو فاز، وجود واکنش شیمیایی در سطح تبادل دو فاز و حضور بخش بزرگ مقاومت انتقال جرم در فاز گاز که در بیش تر فرایندهای جذب در این سامانه برقرار است) سرانجام موجب نبود کارایی برای نظریه های مرسوم انتقال جرم در این سامانه بود. در این راستا قطر متوسط قطره های موجود در بستر به واسطه اعمال مبانی نظریه آشفستگی کولموگروف محاسبه و گزارش شد. نتیجه های به دست آمده با استفاده از این نظریه با نتیجه های محاسبه شده با استفاده از مطرح ترین مدل های موجود در زمینه پیش بینی اندازه متوسط قطره های موجود در بستر آکنده دوار و نتیجه های تجربی گزارش شده، مقایسه شد. مطابقت چشمگیر به دست آمده شده از این مقایسه به روشنی بیانگر انعطاف پذیری بسترهای آکنده ی دوار نسبت به این نظریه بود. بنابراین، این نظریه مناسب ترین مدل موجود در زمینه مطالعه

از سویی، مطابق با پژوهش های صورت گرفته توسط پرینس و همکاران [۴۱] ارتباط میان سرعت قطره ها در محیط آشفته با شدت اتلاف انرژی بر اساس معادله زیر تعریف می شود.

$$u^2 = 2(\varepsilon d_{\max})^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

که سرانجام می توان قطر قطره های ایجاد شده در بسترهای آکنده دوار را (با بهره گیری از رابطه ها تعریف شده در بالا و استفاده از مفهوم های نظریه آشفستگی کولموگراف) با استفاده از معادله ی (۱۰) محاسبه کرد:

$$d_{\max} = 2.12 \left( \frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{\frac{2}{3}} \varepsilon^{-\frac{1}{3}} \quad (10)$$

این رابطه به عنوان نماینده نظریه آشفستگی کولموگروف در تعیین و پیش بینی اندازه ی متوسط قطره های ایجاد شده در محیط سامانه است. جدول ۲ مقایسه میان قطر محاسبه شده با استفاده از تحلیل های ارائه شده با بهره گیری از مفاهیم نظریه آشفستگی کولموگراف و میزان قطر قطره پیش بینی شده با استفاده از رابطه ی معروف فن گو (معادله ی (۱۱)) که در سال ۱۹۹۷ توسط وی و همکاران [۳۶] ارائه شده است، را نشان داد.

$$d = 0.72284 \left( \frac{\sigma}{\omega^2 R_{\rho_L}} \right)^{0.5} \quad (11)$$

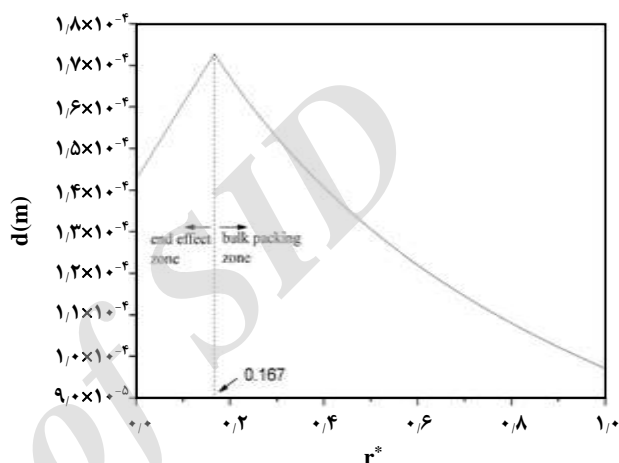
همان گونه که قابل دیدن است استقلال نتیجه های به دست آمده با استفاده از این نظریه از شدت جریان مایع ورودی با رابطه ی فن گو مطابقت چشمگیری داشت. با این حال اختلاف نتیجه های محاسبه شده با استفاده از این نظریه و رابطه ی فن گو قابل انکار نبود. بنابراین لزوم اعتبار سنجی نتیجه های به دست آمده با استفاده از نظریه کولموگروف در نتیجه ی ارائه شاخص مشخص و قابل اطمینان به منظور تأیید و یا رد نتیجه های به دست آمده به طور کامل دارای اهمیت بود. در این راستا نتیجه های تجربی مربوط به قطر متوسط قطره که توسط فی و همکاران [۳۷] گزارش شده بود در شکل ۴ ارائه شد. شکل ۴ نشان دهنده تغییرهای اندازه قطر متوسط قطره های ایجاد شده در بستر آکنده دوار در اثر تغییرهای شعاع روتور است که مطابق با این شکل بازه ی مربوط به میزان قطر متوسط در حدود ۱۶۰-۱۴۰ میکرو متر است. مقایسه این بازه با نتیجه های به دست آمده در اثر اعمال فرضیه های نظریه آشفستگی کولموگروف در بستر آکنده دوار و همچنین

جدول ۲- مقایسه قطر قطره پیش بینی شده با استفاده از تئوری کولموگراف و رابطه‌ی فن گو

دور موتور (دور بر دقیقه)	قطر محاسبه شده با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ (میکرو متر)	قطر پیش‌بینی شده با استفاده از تئوری آشفتگی کولموگراف (میکرومتر)
۴۰۰	۱۶,۳۳۳۵۳	۵۶۸,۹۸
۹۰۰	۷,۲۵۹۳۴۶	۲۱۵,۰۲
۱۲۰۰	۵,۴۴۴۵۰۶	۱۵۲,۲۴
۱۵۰۰	۴,۳۵۵۶۰۸	۱۱۶,۴۸

### فهرست نمادها

A	سطح عمود بر جهت جریان، $m^2$
$\dot{m}_L$	شدت جریان مایع ورودی، $kg/s$
$V_1$	سرعت فاز مایع در ورودی سامانه، $m/s$
$V_2$	سرعت فاز مایع در خروجی سامانه، $m/s$
$m_L$	جرم مایع موجود در بستر، $kg$
$\rho$	دانسیته فاز مایع، $kg/m^3$
$\sigma$	کشش سطحی فاز مایع، $N/m$
$d_{max}$	قطر متوسط قطره، $m$
$u_\lambda$	سرعت در محیط آشفته، $m/s$
$\varepsilon$	شدت اتلاف انرژی، $m^2/s^3$
Q	نرخ جریان مایع، $m^3/s$
$\tau$	زمان ماند، $s$
$\zeta$	تخلخل بستر
$R_o$ و $R_i$	شعاع داخلی و خارجی بستر پر شده، $m$
$\kappa$	ضریب خود نفوذی دارسی در محیط، $m^2$
$\Delta p$	افت فشار، $pa$
$\mu$	گرانروی، $pa.s$
L	طول مسیر، $m$



شکل ۴- تأثیر شعاع بستر بر میزان قطر قطره‌های ایجاد شده در سامانه [۳۷].

شرایط حاکم بر بسترهای آکنده دوار و پیش‌بینی سطح تماس بین دو فاز است. بنابراین در نتیجه این مطالعه (معادله‌ی (۴) در تعیین افت فشار و معادل‌سازی‌های انجام شده برای نظریه آشفتگی کولموگروف) امکان بررسی نظریه عامل‌های اساسی طراحی در بسترهای آکنده دوار (به عنوان تجهیزاتی نوظهور در زمینه جداسازی) میسر خواهد بود که در نتیجه آن کارایی این سامانه‌ها در فرایندهای گوناگون صنعتی (در نتیجه سادگی در طراحی و پیش‌بینی میزان عملکرد و بازدهی آن‌ها در شرایط عملیاتی گوناگون) به‌طور چشمگیری گسترش خواهد یافت.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

### مراجع

- [1] Ramshaw, Colin, Roger H. Mallinson. *Distillation*, U.S. Patent No. 4,283,255. 11 Aug. (1981).



- [2] Lin Ch.-CH., G.-Sh. Jian, [Characteristics of a Rotating Packed bed Equipped with Blade Packings](#), *Separation and Purification Technology*, **54**(1): 51-60 (2007).
- [3] Lin Ch.-Ch., Chen B.-C., [Carbon Dioxide Absorption in a Cross-Flow Rotating Packed Bed](#), *Chem. Eng. Res. Des.*, **89**(9): 1722-1729 (2011).
- [4] Cheng H.-H., -S. Tan Ch., [Removal of CO<sub>2</sub> from Indoor Air by Alkanolamine in a Rotating Packed Bed](#), *Sep. Puri. Technol.*, **82**: 156-166 (2011).
- [5] Yi F., Zou H.K., Chu G.W., Shao L., Chen J.F., [Modeling and Experimental Studies on Absorption of CO<sub>2</sub> by Benfield Solution in Rotating Packed Bed](#), *Chem. Eng. J.*, **145**: 377-384 (2009).
- [6] Chiang C.Y., Chen Y.S., Liang M.S., Lin F.Y., Tai C.Y., Liu H.S., [Absorption of Ethanol into Water and Glycerol/Water Solution in a Rotating Packed Bed](#), *J. Taiwan Inst. Chem. Engrs.*, **40**: 418 (2009).
- [7] Lin Ch.-C., Wei T.-Y., Hsu Sh.-K., Liu W.-T., [Performance of a Pilot-Scale Cross-Flow Rotating Packed Bed in Removing VOCs from Waste Gas Streams](#), *Separation and Purification Technology*, **52**(2): 274-279 (2006).
- [8] Nascimento J.V.S., Ravagnani T.M.K., Pereira J.A.F.R., [Experimental Study of a Rotating Packed Bed Distillation Column](#), *Braz. Jour. Chem. Eng.*, **26**(1): 219-226 (2009).
- [9] Yang H.-J., Chu G.-W., Zhang J.-W., Shen Zh.-G., Chen J.-F., [Micromixing Efficiency in a Rotating Packed Bed: Experiments and Simulation](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **44**(20): 7730-7737 (2005).
- [10] Xiuping L., Youzhi L., Zhiqiang L., Xiaoli W.A.N.G., [Continuous Distillation Experiment with Rotating Packed Bed](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **16**(4): 656-662 (2008).
- [11] Wang G.Q., Xu Z.C., Yu Y.L., Ji J.B., [Performance of a Rotating Zigzag Bed—a New HIGEE](#), *Chem. Eng. Process*, **47**: 2131-2139 (2008).
- [12] Tan C.S., Lee P.L., [Supercritical CO<sub>2</sub> Desorption of Activated Carbon Loaded with 2,2,3,3-Tetrafluoro-1-propanol in a Rotating Packed Bed](#), *Environ. Sci. Technol.*, **42**: 2150 (2008).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 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).

- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] Lin Ch.-Ch., Liu W.-T., [Mass Transfer Characteristics of a High-Voidage Rotating Packed Bed](#), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **13**(1): 71-78 (2007).
- [21] 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).
- [22] Chen Y. H., Chang C.Y., Su W.L., Chiu C.Y., Yu Y.H., Chiang P.C., Chang Ch-F., Shie J-H., Chiou Ch-S., Chiang, S-I., [Ozonation of CI Reactive Black 5 Using Rotating Packed Bed and Stirred Tank Reactor](#), *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **80**(1): 68-75 (2005).
- [23] Chen Y.H., Chiu C.Y., Chang C.Y., Huang Y.H., Yu Y.H., Chiang P.C., Shie J-L., Chiou C.S., [Modeling Ozonation Process with Pollutant in a Rotating Packed Bed](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **44**(1): 21-29 (2005).
- [24] Chen Y.-Sh., Lin Ch.-Ch., Liu H.-Sh., [Mass transfer in a Rotating Packed Bed with Viscous Newtonian and Non-Newtonian Fluids](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **44**(4): 1043-1051 (2005).
- [25] Chen Y.-Sh., Lin Ch.-Ch., Liu H.-Sh., [Mass Transfer in a Rotating Packed Bed with Various Radii of the Bed](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **44**(20): 7868-7875 (2005).
- [26] Lin Ch.-Ch., Liu W.-T., [Removal of an Undesired Component from a Valuable Product Using a Rotating Packed Bed](#), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **12**(3): 455-459 (2006).
- [27] Vollmari, K., Oschmann, T., Wirtz, S., Kruggel-Emden, H., [Pressure Drop Investigations in Packings of Arbitrary Shaped Particles](#), *Powder Technology*, **271**: 109-124 (2015).
- [28] Khooshechin, S., Safdari, J., Moosavian, M. A., Mallah, M. H., [Prediction of Pressure Drop in Liquid-Liquid Pulsed Packed Extraction Countercurrent Columns](#), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **44**: 684-691 (2013).
- [29] Mayerhofer M., Govaerts j., Parmentier N., Jeanmart H., Helsen L., [Experimental Investigation of Pressure Drop in Packed Beds of Irregular Shaped Wood Particles](#), *Powder Technology*, **205**(1): 30-35 (2011).
- [30] Koekemoer A., Luckos A., [Effect of Material Type and Particle Size Distribution on Pressure Drop in Packed Beds of Large Particles: Extending the Ergun Equation](#). *Fuel*, **158**: 232-238 (2015).
- [31] Liu Y., Gu D., Xu C., Qi G., Jiao W., [Mass Transfer Characteristics in a Rotating Packed Bed with Split Packing](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **23**(5): 868-872 (2015).

- [32] Lin C.C., Kuo Y.W., [Mass Transfer Performance of Rotating Packed Beds with Blade Packings in Absorption of CO<sub>2</sub> into MEA Solution](#). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **97**: 712-718 (2016).
- [33] Li X., Liu Y., [Characteristics of Fin Baffle Packing Used in Rotating Packed Bed](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **18**(1): 55-60 (2010).
- [34] Jiao, Wei Zhou, You Zhi Liu, and Gui Sheng Qi., [Gas Pressure Drop and Mass Transfer Characteristics in a Cross-Flow Rotating Packed Bed with Porous Plate Packing](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **49**(8): 3732-3740 (2010).
- [35] Sung, Wei-Der, Yu-Shao Chen., [Characteristics of a Rotating Packed Bed Equipped with Blade Packings and Baffles](#), *Separation and Purification Technology*, **93**: 52-58 (2012).
- [36] Guo F., Zheng Ch., Guo K., Feng Y., C. Gardner N., [Hydrodynamics and Mass Transfer in Cross-Flow Rotating Packed Bed](#), *Chemical Engineering Science*, **52**(21): 3853-3859 (1997).
- [37] Yi F., Zou H-K., Chu G-W., Chen J., [Modeling and Experimental Studies on Absorption of CO<sub>2</sub> by Benfield Solution in Rotating Packed Bed](#), *Chemical Engineering Journal*, **145**(3): 377-384 (2009).
- [38] Kolmogorov, Andrey Nikolaevich, [The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers](#), *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **30**(4): 9 - 13 (1941).
- [39] Llerena-Chavez, H., Larachi, F., [Analysis of Flow in Rotating Packed Beds via CFD Simulations—Dry Pressure Drop and Gas Flow Maldistribution](#), *Chemical Engineering Science*, **64**(9): 2113-2126 (2009).
- [40] Mastanaiah K., Ganic E.N., [Heat Transfer in Two-Component Dispersed Flow](#), *Journal of Heat Transfer*, **103**(2): 300-306 (1981).
- [41] Prince M.J., Blanch H.W., [Bubble Coalescence and Break-Up in Air-Sparged Bubble Columns](#), *AIChEJ*, **36**: 1485-1499 (1990).