

## مدلسازی جداسازی ذرات غبار در بسترهای پرشده‌ی دوار با استفاده از روش برنامه نویسی ژنتیک

ندا عسگری حسنونند، امیراحسان فیلی منفرد\*

دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده	مشخصات مقاله
<p>در سال‌های اخیر راندمان بالای غبارزدایی از گازها، توسط بسترهای پرشده‌ی دوار، مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته است. اما فرآیند طراحی این تجهیزات با استفاده از روش‌های تجربی و یا شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی، به علت پیچیدگی این بسترها و تعدد پارامترهای موثر در بازدهی آنها، بسیار پرهزینه و زمانبر خواهد بود. از این رو در این پژوهش عملکرد روش برنامه نویسی ژنتیک در مدلسازی این بسترها مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این مبنای ۵۶۱ داده‌ی تجربی گردآوری و با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک معادلات مختلفی برای تخمین بازدهی این دستگاه‌ها برآزش شد. از میان مدل‌های ایجاد شده، معادله‌ای با کمترین میزان پیچیدگی و بیشترین دقت انتخاب شد. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که معادله‌ی بدست آمده، با ضریب همبستگی ۰/۹۷۱۴، میانگین مربعات خطا ۳/۷۹ و بیشترین درصد خطا ۱/۵۱، از دقت بالایی جهت طراحی این بسترها برخوردار بوده است. همچنین تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نیز انجام شده و نتایج نشان داد که اندازه ذرات، سرعت دورانی و دبی مایع بیشترین تاثیر مثبت را بر بازدهی این بسترها خواهند داشت.</p>	<p>تاریخچه مقاله: دریافت: ۵ مهر ۱۴۰۱ دریافت پس از اصلاح: ۱۷ بهمن ۱۴۰۱ پذیرش نهایی: ۶ اسفند ۱۴۰۱</p> <p>کلمات کلیدی: غبارزدایی بسترهای پرشده‌ی دوار برنامه نویسی ژنتیک بازدهی مدل سازی</p>
	<p>* عهده دار مکاتبات Ehsan.monfared@outlook.com</p>
<p>حقوق ناشر محفوظ است..</p>	

## ۱- مقدمه

مواد شیمیایی خطرناک موجود در هوا مانند مونوکسیدکربن (CO)، دی‌اکسیدگوگرد (SO<sub>2</sub>)، اکسیدهای نیتروژن (NO<sub>x</sub>)، فلزات سنگین و ذرات معلق قابل تنفس از جمله موادی هستند که بصورت کوتاه مدت یا بلند مدت وارد هوا شده و سلامت انسان و محیط زیست را تحت تاثیر قرار میدهند

. با توجه به اینکه ذرات غبار با غلظت‌های مختلف در هوا وجود دارند، در سال‌های اخیر برخی کشورهای صنعتی با توجه به جداسازی دشوار و همچنین تحرک این ذرات در هوا با تدوین استانداردهایی، میزان غلظت مجاز این ذرات با قطر ۲/۵ میکرون را در هوای آزاد کمتر از ۳ mg/Nm<sup>3</sup> بیان نموده‌اند [۱].

با توجه به ضرورت موضوع، طی سال‌های متمادی روش‌های مختلفی برای حذف و جذب ذرات غبار از هوا مورد استفاده قرار گرفته است که ازین دست میتوان به رسوب دهنده‌های الکترواستاتیک، غبارگیرهای تر، سیکلون‌ها و فیلترهای کیسه‌ای اشاره نمود که بسته به نوع و اندازه ذرات، آنها را از هوا جداسازی میکنند [۲-۵].

با اینکه در سال‌های گذشته این تجهیزات برای جداسازی گردوغبار مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما بعلت پیشرفت صنایع و افزایش مقدار گردوغبار، به نظر می‌رسد که استفاده از پروژه‌های قدیمی در مقیاس بزرگ امری پر هزینه خواهد بود [۶]، امروزه با تلاش پژوهشگران در سراسر دنیا تجهیزاتی مبتنی بر انتقال جرم حداکثری با استفاده از نیروی گریز از مرکز<sup>۱</sup> (پروژه‌هایی که HIGEE نیز نامیده می‌شوند) توسعه یافتند [۷] با استفاده از این تکنولوژی‌ها، فرآیندهایی همچون غبارزدایی [۸]، تقطیر [۹] و ... با موفقیت انجام شده‌است.

از جمله‌ی این تکنولوژی‌ها می‌توان به استفاده از بسترهای پرشده‌ی دوار<sup>۲</sup> (RPB) اشاره کرد که با استفاده از نیروی گریز از مرکز، بازده انتقال جرم مایع-گاز را به طرز چشمگیری افزایش داده است [۶].

راندمان بالای RPB ها در جداسازی ترکیبات آلی فرار [۱۰]، حذف سولفیدهیدروژن از گازکک [۱۱] و تجزیه‌ی فاضلاب حاوی نیتروبنزن [۱۲] به وسیله‌ی RPB ها اهمیت استفاده از این دستگاه‌ها را بیش از پیش مشخص کرد.

با اینکه تشدید فرآیند انتقال جرم به‌وسیله‌ی RPB ها در سال‌های اخیر بصورت تجربی ثابت شده است، اما به علت مشخصات ساختاری و تعدد پارامترهای دخیل در طراحی این تجهیزات مهم (قطر داخلی، قطر خارجی، دبی مایع غبارگیر، دبی هوای ورودی و ...) ساخت این دستگاه‌ها و سپس آزمایش کارکرد آنها امری بسیار هزینه‌بر خواهد بود [۱۳-۱۶]. از همین رو مدلسازی و شبیه‌سازی این تجهیزات به روش‌های مختلف انجام شده است، که در ادامه به آنها پرداخته شده است. ساخت مدل ریاضی برای شبیه‌سازی جذب دی‌اکسیدکربن توسط محلول بنفیلد [۱۷] (محلول کربنات پتاسیم داغ تقویت شده با آمین)، به عنوان جاذب در RPB ها که نشان داد این مدل فقط تا ۱۰٪ با داده‌های تجربی و عملیاتی انحراف دارد. دانشمندان از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی فرآیند انتقال جرم در RPB ها استفاده کرده‌اند [۱۸]. همچنین شبیه سازی جذب دی‌اکسید کربن توسط محلول مونو اتانول آمین (MEA) به عنوان جاذب، با نرم افزار Aspenplus [۱۹] و تقطیر خلا [۲۰] توسط بسترهای پرشده‌ی دوار با Aspen، نیز انجام شد و اهمیت مدلسازی و شبیه سازی این دستگاه‌ها را بیش از پیش آشکار کرده و محققان را به

<sup>2</sup> Rotating packed Bed

<sup>1</sup> Centrifugal Mass Transfer Contactor

گرچه مدل شبکه عصبی پیشنهاد شده در پژوهش ذکر شده، عملکرد خوبی در پیشبینی بازدهی غبارزدایی این دستگاه دارد با این حال ایراد اصلی این روش این است که تمام اطلاعات شبکه‌ی توسعه داده شده در جعبه سیاه شبکه باقی می‌ماند و عملاً برای عموم قابل استفاده نیست لذا استفاده از روشی که در آن نحوه تاثیر و تاثیر پارامترها روشن باشد، مناسبتر خواهد بود چرا که برای مثال در این حالت میتوان با استفاده از قواعد مشتق‌گیری یا دیگر روش‌های تحلیلی ریاضی به بهینه‌سازی ابعاد طراحی نیز پرداخت، امکانی که در روش‌هایی نظیر شبکه‌های عصبی وجود ندارد.

از همین رو هدف اصلی از این پژوهش ارائه‌ی معادله‌ای است که بتواند بازدهی بسترهای پرشده‌ی دوار را در جداسازی غبار به خوبی پیشبینی نماید. ارائه‌ی چنین معادله‌ای با توجه به تعدد پارامترهای موثر بر عملکرد دستگاه و ارتباط پیچیده و غیر خطی میان آنها، با استفاده از روش‌های متداول برازش منحنی امکان پذیر نبوده و لذا از برنامه‌نویسی ژنتیک برای این منظور استفاده خواهد شد. در واقع در مطالعه‌ی پیش رو با روش GP معادله‌ای برای تخمین بازدهی حذف ذرات غبار از هوا در بسترهای پرشده‌ی دوار ارائه خواهد شد.

به تازگی و در سال ۲۰۲۲ نیز مطالعات جدیدی در زمینه‌ی شبیه‌سازی و مدلسازی این دستگاه‌ها انجام شده است مانند شبیه‌سازی حذف CO<sub>2</sub> در RPB [۲۸] که نشان داد ثابت سرعت واکنش بیشترین تاثیر را در افزایش عملکرد این بسترها دارد. همچنین مدلسازی حذف CO<sub>2</sub> توسط محلول آمین و متیل دی اتانول آمین (MDEA) در نرم افزار متلب، که تحلیل مدلسازی‌ها نشان داد سرعت چرخش روتور بیشترین تاثیر را در راندمان جذب کربن دی اکسید خواهد داشت [۲۹].

باید توجه داشت که در گذشته پژوهش‌های فراوانی در شاخه‌های مختلف مهندسی با استفاده از روش برنامه نویسی ژنتیک صورت گرفته که از جمله آنها میتوان به [۳۰] و [۳۱] اشاره نمود.

استفاده از روش‌های دیگری مانند مدلسازی به روش‌های هوش مصنوعی ترغیب نمود. در همین خصوص پژوهش‌های متعددی نیز برای مدلسازی این دستگاه‌ها با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی انجام شد که از جمله می‌توان به پیشبینی ضریب انتقال جرم در یک بسترآکنده‌دوار [۲۱] و پیش‌بینی افت فشار در RPB ها [۲۲] اشاره کرد.

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۷ انجام شد لی و همکاران [۲۳] جداسازی گردوغبار را در بسترهای پرشده‌ی دوار به روش شبکه‌عصبی مدل کردند. در این مطالعه از سه شبکه‌ی عصبی FFBPNN و EFBPNN و CFBPNN برای مدلسازی استفاده شد. همچنین پارامترهای بی بعد عدد رینولدز گاز، عدد رینولدز چرخشی، عدد رینولدز مایع، نسبت غلظت ذرات معلق به چگالی گاز و نسبت جرمی ذرات به قطرات مایع به عنوان ورودی و بازدهی کلی سیستم در جداسازی غبار از هوا به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. هرچند در پژوهش ذکر شده به ضریب همبستگی بالای ۰/۹۹ دست یافتند اما لازم به ذکر است که استفاده از اعداد بدون بعد در این پژوهش بدون ارائه‌ی استدلال لازم صورت گرفته و استفاده از اعداد بعددار برای مدلسازی مناسب تر خواهد بود.

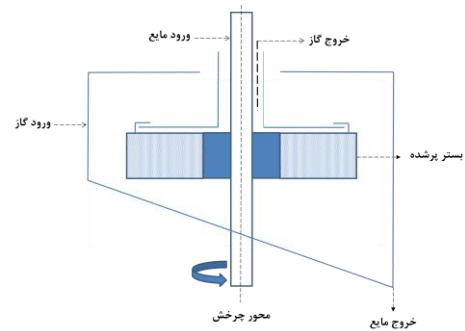
در سال ۲۰۱۹ پژوهشی [۲۴] برای پیشبینی ضریب انتقال جرم فرآیند جذب اوزون در RPB ها به کمک روش ANN<sup>3</sup> انجام شد و مدل پیشنهاد شده توسط پژوهشگران از ضریب همبستگی ۰/۹۸۹۶ برخوردار بود. همچنین در سال ۲۰۲۰ مطالعه‌ای برای مدلسازی، شبیه سازی و بهینه سازی دقیق جذب RPB برای جذب کربن انجام شد [۲۵]. همچنین در مطالعه‌ای مشابه مدلسازی RPB برای جداسازی آمونیاک از فاضلاب [۲۶] انجام شد.

در پژوهشی دیگر فیلی منفرد و صرافی [۲۷] با استفاده از اعداد بعددار به مدلسازی جداسازی ذرات غبار در این بسترها پرداختند که در نهایت نیز به ضریب همبستگی ۰/۹۹ دست یافتند.

## ۲- بسترهای پرشده‌ی دوار و مدل سازی:

### ۱-۲- بسترهای پرشده‌ی دوار:

در شکل ۱، سازوکار بسترهای پرشده‌ی دوار مشاهده می‌شود. مایع غبارگیر از یک سمت و هوای حاوی مقدار مشخصی غبار از سمت دیگر وارد دستگاه میشود. دستگاه به نحوی ساخته شده است که قطرات آب روی هوای حاوی غبار ریخته شود و به علت نیروی گریز از مرکز ایجاد شده بوسیله‌ی چرخش روتور، سطح تماس قطرات آب با ذرات غبار به شدت افزایش یافته و سبب جذب ذرات غبار توسط مایع غبارگیر می‌شود [۳۲].



شکل ۱: سازوکار یک بستر پرشده‌ی دوار

بطور کلی پارامترهای موثر بر دستگاه را می‌توان به دو گروه پارامترهای ساختاری و ابعادی و متغیرهای کاری تقسیم نمود. پارامترهای ساختاری و ابعادی عبارت است از: قطر داخلی بستر ( $R_i$ )، قطر خارجی بستر ( $R_o$ ) و ارتفاع بستر یا طول محوری ( $L$ ) و متغیرهای کاری را می‌توان به غلظت ذرات ورودی ( $C_i$ )، دبی گاز ورودی ( $Q_g$ )، دبی مایع غبارگیر ( $Q_l$ )، سرعت دورانی بستر دستگاه ( $\omega$ ) و اندازه ذرات معلق ورودی به سیستم ( $dp$ ) تقسیم نمود [۳۳-۳۶].

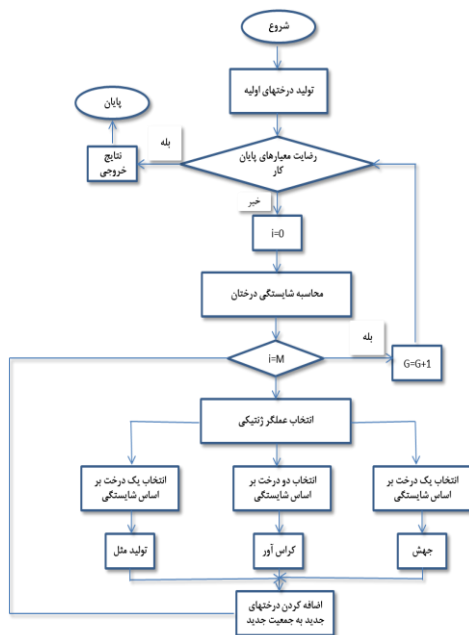
### ۲-۲- برنامه نویسی ژنتیک:

برنامه نویسی ژنتیک یا  $GP^4$  یکی از روش‌های هوش مصنوعی است که با استفاده از تکنیک‌های محاسباتی پیچیده و

همچنین به کمک توابع ریاضی مختلف موجود در بانک اطلاعاتی خود، به رایانه اجازه می‌دهد رابطه‌ی بین پارامترهای مختلف دخیل در مسائل را بصورت خودکار حدس زده و مسائل را حل کند. [۳۷]

این روش ابتدا توسط آقای کرامر [۳۸] ابداع و سپس توسط آقای جان کوزا گسترش یافت. GP بطور کلی یک روش مبتنی بر الگوریتم وراثتی است که بطور مکرر از جمعیتی از معادلات و برنامه‌های کامپیوتری و تعدادی عملیات ژنتیکی، برای برآزش منحنی‌های چند بعدی و پیچیده و حل مسائل استفاده می‌کند. منظور از عملیات ژنتیک در جمله‌ی بالا: نوترکیبی جنسی (کراس اور)، جهش، تولیدمثل، تکرار ژن و حذف ژن [۳۹] است.

این برنامه در واقع دارای بانکی از توابع مختلف ریاضی است که روابط ریاضی حاکم بین پارامترهای ورودی و خروجی را تخمین زده و با استفاده از توابع موجود در بانک خود، معادلات (ژن‌ها) را کنار هم قرار داده و معادله‌ای درختی متشکل از توابع و ژن‌های مختلف به ما ارائه می‌دهد [۳۹]. در شکل ۲ معماری برنامه نویسی ژنتیک نشان داده شده است.



شکل ۲: روندنمای روش برنامه نویسی ژنتیک

### ۳- روش انجام کار:

#### ۳-۱- برنامه نویسی ژنتیک:

همین رو برای دست یابی به پاسخ‌های دقیق‌تر و در عین حال کمتر پیچیده، الگوریتم ۱۵۰ بار اجرا شده و سپس از میان آنها بهترین پاسخ‌ها انتخاب شدند.

در جدول ۲ تعداد نسل عبارت است از تعداد دفعاتی که جمعیت جدید ایجاد میشود و تمام عملیات ژنتیکی بر روی آن انجام می‌شود. همچنین اندازه جمعیت در واقع تعداد ژن‌های اولیه برای شروع هر نسل است.

به منظور یافتن معادله‌ای جهت تخمین راندمان جذب غبار در بسترهای آکنده‌ی دوار، مجموع ۵۶۱ داده‌ی تجربی از مقالات [۲۷] و [۳۳-۳۶] استخراج شد. سپس به منظور تحلیل‌های بعدی و بررسی دقت مدل ایجاد شده، داده‌ها به دو دسته داده‌های آموزش و تست تقسیم بندی شدند. این تقسیم بندی بصورت تصادفی و به نسبت ۰/۷ و ۰/۳ انجام شد.

جدول ۱ تحلیل آماری داده‌های استخراج شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: محدوده‌ی داده‌های گردآوری شده

عنوان پارامتر	محدوده تغییرات	میانگین	نما
شعاع داخلی ( $r_i$ )	(m) ۰/۱۹ -- ۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۱
شعاع خارجی ( $r_o$ )	(m) ۰/۳۷۵ -- ۰/۱۲۵	۰/۲۵	۰/۱۲
طول محوری (l)	(m) ۰/۴ -- ۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۵
غلظت ذرات ( $C_i$ )	( $m^3/s$ ) ۰/۴۵ -- ۰/۰۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲
دبی گاز (Qg)	( $m^3/s$ ) ۰/۴ -- ۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۷
دبی مایع (Ql)	( $m^3/s$ ) $۱/۶۴e^{-۴}$ -- $۱/۶۴e^{-۵}$	$۱/۶۴e^{-۴}$	$۲۳e^{-۵}$
سرعت دورانی ( $\omega$ )	(rpm) ۴۰۰ -- ۱۵۰۰	۹۱۳	۸۰۰
اندازه ذرات (dp)	( $\mu m$ ) ۵/۵۳ -- ۰/۲۴۵	۱/۶۶	۰/۸۶

جدول ۲: تنظیمات انجام شده در برنامه نویسی ژنتیک

نوع پارامتر تنظیمی	محدوده
تعداد نسل	۲۰۰۰ - ۳۰۰۰
اندازه جمعیت	۱۰۰۰ - ۲۰۰۰
نرخ جهش	۰/۰۴ - ۰/۲۸
کراس‌آور	۰/۷ - ۰/۹۴
حداکثر تعداد درختان (ماکس نود)	۶ - ۸
حداکثر عمق	۵ - ۸
درصدی از افراد که بدون تغییر به نسل بعد منتقل میشوند	۰/۱۵
تورنومنت پارتو	۰/۵

منظور از جهش یک تغییر ژنتیکی است که صفات برخی از افراد یک گونه را تغییر می‌دهد. کراس اور، تبادل ماده ژنتیکی در طی تولید مثل بین قسمت‌هایی از یک کروموزوم است که منجر به ایجاد ژن (کروموزوم) نوترکیب می‌شود. حداکثر تعداد درختان نیز نشان دهنده‌ی حداکثر تعداد ژن‌هایی است که می‌توانند با یکدیگر جمع شده و تشکیل یک معادله را بدهند. منظور از حداکثر عمق، حداکثر عمق گره‌هایی است که میتواند در یک درخت ایجاد شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش پانزده درصد از بهترین افراد هر نسل بدون تغییر برای نسل بعد کپی میشوند. همچنین از تورنومنت پارتو<sup>۵</sup> برای حذف قطعاتی از ژن برای جلوگیری از طولیل شدن معادله و کم کردن زمان پردازش معادله بدون تاثیر منفی در دقت آن، استفاده شده است [۴۰].

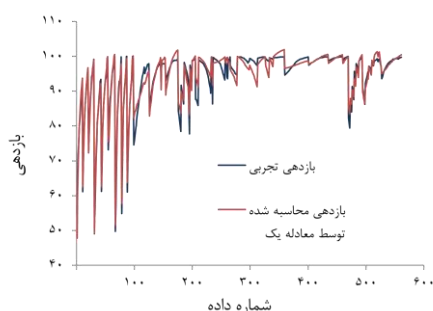
در ادامه، جهت انجام مدل سازی‌ها، از الگوریتم‌های نوشته شده در محیط متلب نسخه R2021a استفاده شد. بطور کلی عملکرد مناسب الگوریتم‌های برنامه نویسی ژنتیک مستلزم تنظیم طیفی از پارامترهایی است که تغییر هر یک میتواند بر پاسخ‌های بدست آمده اثر چشمگیری داشته باشد. جدول ۲ خلاصه‌ای از مهمترین تنظیمات مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل ذات تصادفی الگوریتم برنامه نویسی ژنتیک، هر بار اجرای برنامه منجر به پاسخ‌های جدیدی میشود. این پاسخ‌ها از جهت دقت عملکرد و همچنین پیچیدگی آن‌ها، عموماً با یکدیگر متفاوتند. از



۴-۲- بررسی معادله منتخب:

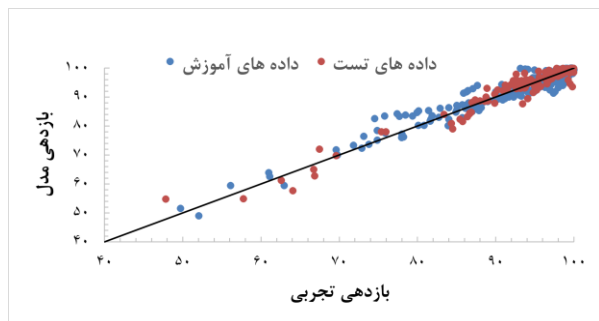
در این قسمت معادله‌ی ۱ به عنوان معادله‌ی منتخب انتخاب شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل های ۴ و ۵ و ۶ به ترتیب نمودارهای مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده توسط معادله، نمودار ترسیم متقاطع (کراس پلات) بازدهی و نمودار مقایسه‌ی وزن هر ژن از معادله‌ی منتخب را نشان می‌دهند.



شکل ۴: نمودار بازدهی تجربی (آبی) و محاسبه شده (قرمز)

شکل ۴ نشان می‌دهد که مقدار بازدهی های تجربی و بازدهی های محاسبه شده توسط معادله‌ی منتخب در واقع اختلاف زیادی باهم ندارند و ضریب همبستگی ۰/۹۷۱۴ نشان‌دهنده‌ی عملکرد نزدیک به واقعیت معادله‌ی منتخب است. شکل ۵ نمودار ترسیم متقاطع (کراس پلات) بازدهی مدل و بازدهی تجربی را نشان می‌دهد.



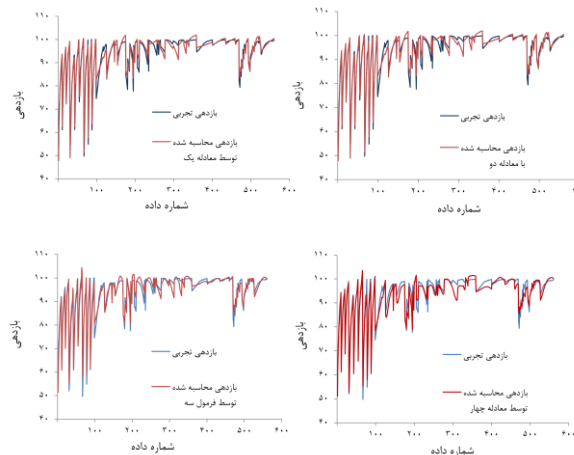
شکل ۵: نمودار ترسیم متقاطع بازدهی مدل و بازدهی تجربی

چنانچه از شکل مشخص است، تجمع داده‌ها در اطراف خط  $y=x$ ، نزدیکی مقادیر تجربی و محاسبه شده و کارایی مناسب

جدول ۴: خطاهای محاسبه شده برای معادلات یک تا چهار

معادلات	MAE	MPE	MAPE	MSE	R	پیچیدگی
یک	۱/۳۶	۱/۵۱	۱۴/۳۸	۳/۸۰	۰/۹۷۱۴	۲۰۳
دو	۱/۴۰	۱/۵۵	۱۳/۷۲	۳/۸۶	۰/۹۷۱۱	۱۹۶
سه	۱/۴۶	۱/۶۳	۱۴/۱۴	۳/۹۴	۰/۹۷۰۴	۲۱۴
چهار	۱/۶۳	۱/۸۱	۱۰/۶۵	۴/۸۱	۰/۹۶۸۶	۲۰۱

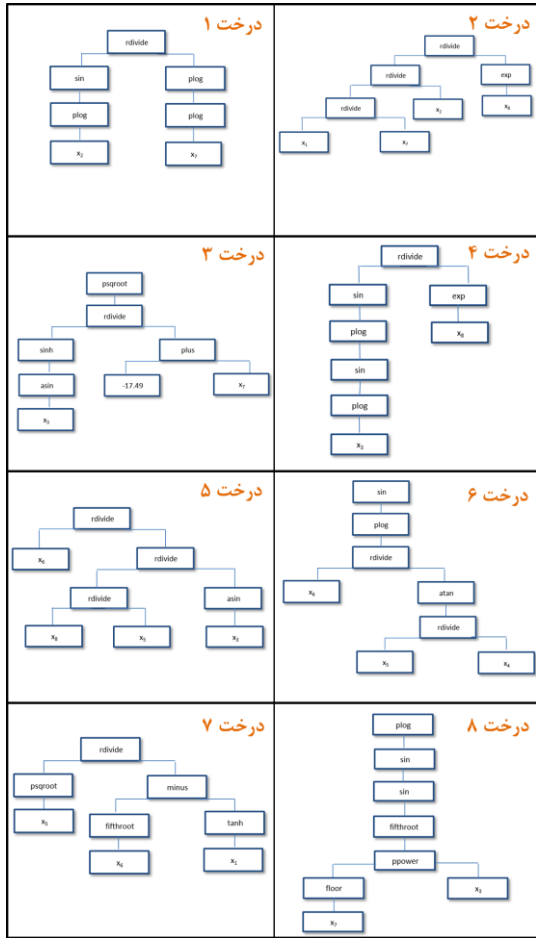
برای مقایسه‌ی چهار معادله‌ی بدست آمده، نمودارهای بازدهی بر حسب شماره داده نیز برای هر معادله بصورت جداگانه رسم شده است (شکل ۳).



شکل ۳: نمودارهای بازدهی تجربی (آبی) و محاسبه شده (قرمز)

در شکل ۳، نمودار الف مربوط به معادله یک، نمودار ب مربوط به معادله دو، نمودار ج مربوط به معادله سه و نمودار د مربوط به معادله چهار می‌باشد. چنانچه مشاهده می‌شود همپوشانی مقادیر بازدهی تجربی و بازدهی محاسبه شده توسط معادلات، در معادله‌ی یک و دو بیشتر از معادلات سه و چهار است.

همانطور که از جدول ۴ و نمودارهای شکل ۳ برمی‌آید معادله‌ی یک و معادله‌ی دو دارای کمترین مقادیر خطا و همچنین بهترین ضریب همبستگی هستند. لازم به ذکر است که این معادلات بر حسب تابعی از تمام پارامترهای ورودی ساخته شده‌اند. با مقایسه‌ی خطاهای گزارش شده مطابق با جدول ۴، معادله‌ی ۱ بهترین معادله از نظر ضریب همبستگی خواهد بود.



شکل ۷: نمودار درختی معادله منتخب

۳-۴- مقایسه معادله پیشنهادی با مدل شبکه عصبی

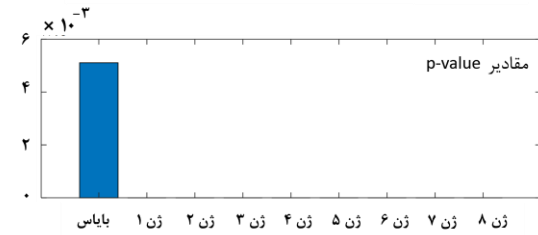
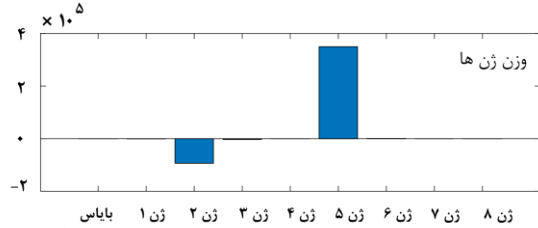
به منظور درک بهتر دقت معادله ارائه شده در این پژوهش، عملکرد آن با مدل شبکه عصبی پیشنهاد شده در مطالعه قبلی [۲۷] در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مقایسه خطاهای شبکه عصبی و GP

روش	MAE	MPE	MAPE	MSE	R
شبکه عصبی	۰/۴۵	۷/۵۶	۰/۵	۱/۱۲	۰/۹۹
GP	۱/۳۶	۱/۵۱	۱۴/۳۸	۳/۸۰	۰/۹۷

به طور کلی، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با توجه به ضریب همبستگی ۰/۹۹ محاسبه شده در مدل شبکه عصبی، این مدل دقت بالاتری در مقایسه با معادله پیشنهادی در این مطالعه دارد. اما از سوی دیگر باید توجه داشت که مدل شبکه

معادله‌ی بدست آمده در محاسبه‌ی بازدهی و همچنین طراحی بسترهای آکنده‌دوار را نشان می‌دهد.



ضریب همبستگی = ۰/۹۷۱۴

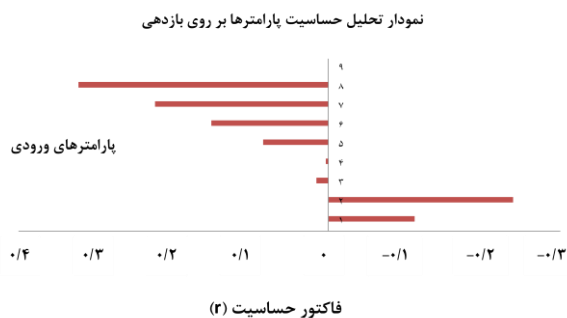
شکل ۶: نمودار وزن و اثربخشی هر ژن از معادله‌ی منتخب

در شکل ۶ اثربخشی هر بخش از معادله در کارایی بهتر آن مشخص شده است. از بین هشت ژن موجود در معادله، ژن پنج بالاترین اثر را در کارکرد بهتر معادله برعهده دارد.

نمودار درختی معادله‌ی منتخب نیز برای درک بهتر جدول ۳، در شکل ۷ آورده شده است. هر درخت نشان دهنده‌ی یک ژن است و از کنار هم قرار گرفتن این ژن‌ها، معادله‌ی منتخب ساخته شده است. هر ژن سهم مشخصی در کارکرد معادله دارد.



باید توجه داشت که در تحلیل فوق هر چه مقدار مطلق  $r$  محاسبه شده برای پارامتری بیشتر باشد، بیانگر تاثیر بیشتر آن پارامتر خواهد بود. بر همین اساس نمودار مقادیر بدست آمده از رابطه ۶ در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸: نمودار تحلیل حساسیت ۸ پارامتر ورودی روی بازدهی

همانگونه که از شکل ۸ مشخص است اندازه ذرات، سرعت دورانی و دبی مایع بیشترین تاثیر مثبت را بر بازدهی بستر خواهند داشت.

### ۶- نتیجه گیری:

در این پژوهش برای بدست آوردن معادله‌ای به منظور تخمین بازدهی بسترهای پرشده‌ی دوار از برنامه نویسی ژنتیک استفاده شد. به همین جهت از مجموعه‌ای شامل ۵۶۱ داده تجربی جمع‌آوری شده شامل ۸ پارامتر ورودی (شعاع داخلی، شعاع خارجی، دبی مایع، دبی گاز، اندازه ذرات ورودی، غلظت ذرات، طول محوری، سرعت دورانی) و یک خروجی (بازدهی) استفاده شد. چهار معادله با کمترین خطا و بیشترین ضریب همبستگی به دست آمد سپس از بین آنها بهترین معادله با ضریب همبستگی ۰/۹۷۱۴ به عنوان معادله‌ی منتخب معرفی شد. تحلیل آنالیز حساسیت معادله‌ی منتخب نیز انجام شد و نتایج نشان داد که از بین ۸ پارامتر موثر، اندازه ذرات، سرعت دورانی و دبی مایع بیشترین تاثیر مثبت را بر بازدهی بسترهای پرشده‌ی دوار خواهند داشت.

عصبی یک روش جعبه سیاه است که امکان دسترسی به معادله و ارزیابی نقش پارامترها در آن بطور ساده وجود ندارد. همچنین چنانچه بهینه یابی طراحی بستر، مد نظر قرار گیرد، در مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی، امکان استفاده از روش-های تحلیلی بهینه سازی فراهم نخواهد بود. این در حالیست که برای معادلات بدست آمده از روش GP (چنانچه معادله حاصل مشتق پذیر باشد) در صورت لزوم می‌توان از انواع روش‌های تحلیلی گرادبان محور جهت بهینه‌سازی استفاده نمود.

### ۵- آنالیز حساسیت

به منظور بررسی کمی تاثیر پارامترهای ورودی بر بازدهی، تحلیل حساسیت relevancy factor نیز بر روی مدل استخراج شده انجام شد [۴۲، ۴۳]. به همین منظور، ضریب  $r$  از رابطه ۶ محاسبه گردید:

$$r(pi, \epsilon) = \frac{\sum_{i=1}^n (pl, i - \bar{pl})(ei - \bar{e})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (pl, i - \bar{pl})^2 \sum_{i=1}^n (ei - \bar{e})^2}} \quad (6)$$

در رابطه ی ۶  $e$ ، نشان دهنده ی بازدهی است و  $pi$  نشان دهنده ی هر پارامتر ورودی است.  $pl, i$  و  $\bar{pl}$  به ترتیب نشانگر مقدار هر ورودی و مقدار متوسط ورودی مورد نظر خواهند بود.  $ei$  و  $\bar{e}$  نیز به ترتیب نشانگر مقدار بازدهی و مقدار متوسط بازدهی تخمین زده شده خواهند بود. جدول ۶ نام گذاری عددی هر یک از پارامترها را نشان میدهد.

جدول ۶: نام گذاری عددی پارامترهای موجود در شکل ۸

شماره پارامتر	نام پارامتر
۱	شعاع داخلی
۲	شعاع خارجی
۳	طول محوری
۴	غلظت ذرات
۵	دبی گاز
۶	دبی مایع
۷	سرعت دورانی
۸	اندازه ذرات

## ۷-منابع :

14. Chen, Y.-S., C.-C. Lin, and H.-S. Liu,(2005) "Mass transfer in a rotating packed bed with various radii of the bed." *Industrial & engineering chemistry research*, **44**(2): p. 7868-7875.
15. Tan, C.-S. and J.-E. Chen, (2006)"Absorption of carbon dioxide with piperazine and its mixtures in a rotating packed bed". *Separation and purification technology*,. **49**(2): p. 174-180.
16. Jassim, M.S., et al.(2007)," Carbon dioxide absorption and desorption in aqueous monoethanolamine solutions in a rotating packed bed." *Industrial & engineering chemistry research*,. **46**(9): p. 2823-2833.
17. Yi, F., et al.(2009), "Modeling and experimental studies on absorption of CO<sub>2</sub> by Benfield solution in rotating packed bed". *Chemical Engineering Journal*,. **145**(3): p. 377-384.
18. Yang, Y., et al.,(2016) "CFD modeling of gas-liquid mass transfer process in a rotating packed bed". *Chemical Engineering Journal*,. **294**: p. 111-121.
19. Thiels, M., et al.(2016), "Modelling and design of carbon dioxide absorption in rotating packed bed and packed column". *IFAC-PapersOnLine*,. **49**(7): p. 895-900.
20. Li, W., et al.(2017), "Modelling of vacuum distillation in a rotating packed bed by Aspen." *Applied Thermal Engineering*, **119**: p. 322-329.
21. Saha, D.,(2009) "Prediction of mass transfer coefficient in rotating bed contactor (Higee) using artificial neural network". *Heat and mass transfer*,. **45**(4): p. 451-457.
22. Lashkarbolooki, M., B. Vaferi, and D. Mowla,(2012) "Using artificial neural network to predict the pressure drop in a rotating packed bed" *Separation Science and Technology*,. **47**(16): p. 2450-2459.
23. Li, W., et al.(2017), "Modelling of dust removal in rotating packed bed using artificial neural networks (ANN)". *Applied Thermal Engineering*,. **112**: p. 208-213.
24. Liu, T., et al.(2019), "Artificial neural network modeling on the prediction of mass transfer coefficient for ozone absorption in RPB." *Chemical Engineering Research and Design*,. **152**: p. 38-47.
25. Im, D., H. Jung, and J.H. Lee,(2020)" Modeling, simulation and optimization of the rotating packed bed (RPB) absorber and stripper for MEA-based carbon capture." *Computers & Chemical Engineering*,. **143**: p. 107102.
26. Li, W., et al.,(2020) "Modelling of ammonia recovery from wastewater by air stripping in rotating packed beds." *Science of The Total Environment*,. **702**: p. 134971.
27. Feili Monfared, A.E. and A. Sarrafi,(2020) "Modeling and Design of Rotating Packed Beds by the employment of Artificial Intelligence Methods". *Journal of Separation Science and Engineering*,. **12**(1): p. 79-96.
28. Yu, C.-H., et al.(2022), "Process Modeling of CO<sub>2</sub> Absorption with Monoethanolamine Aqueous Solutions Using Rotating Packed Beds." *Industrial & Engineering Chemistry Research*,.
29. Esmaeili, A., et al(2022) ,"Modeling of carbon dioxide absorption by solution of piperazine and
1. Development, N. and M.o.E.P.o.C. Reform Commission of China,(2014) "The upgrade and transformation action plan for coal-fired power energy saving and emission reduction" (2014– 2020). *National Energy Administration of China, NDRC, MEP, and NEA Beijing, China*.
2. Olaguer, E.P.,(2012) "The potential near-source ozone impacts of upstream oil and gas industry emissions." *Journal of the Air & Waste Management Association*,. **62**(8): p. 966-977.
3. Ray, M.B., et al.,(1998) "Improving the removal efficiency of industrial-scale cyclones for particles smaller than five micrometre." *International journal of mineral processing*,. **53**(1-2): p. 39-47.
4. Martin Jr, S.B. and E.S.(2000) Moyer, "Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects". *Applied occupational and environmental hygiene*, **15**(8): p. 609-617.
5. Weng, G. (2016)"Problems and Solutions of Baghouse in Power Plants. in 2nd International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology "(ICCIA 2017) .(Atlantis Press.
6. Zhou, Q., et al.,(2019) "Preparation of hollow B-SiO<sub>2</sub>@ TiO<sub>2</sub> composites and their photocatalytic performances for degradation of ammonia-nitrogen and green algae in aqueous solution." *Chinese Journal of Chemical Engineering*,. **27** : (1) p. 2535-2543.
7. Wang, C., et al.(2018), "Up-scaled flash nano-precipitation production route to develop a MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst with enhanced activity and H<sub>2</sub>O resistant performance for NO<sub>x</sub> selective catalytic reduction with NH<sub>3</sub>." *Chemical Engineering Research and Design*,. **134**: p. 476-486.
8. Schneiderman, I., et al.(2012), "Oxytocin during the initial stages of romantic attachment: relations to couples' interactive reciprocity." *Psychoneuroendocrinology*,. **37**(8): p. 1277-1285.
9. Chu, G.-W., et al.(2013)," Distillation studies in a two-stage counter-current rotating packed bed". *Separation and Purification Technology*,. **102**: p. 62-66.
10. Chen, Y.-S. and H.-S. Liu,(2002) "Absorption of VOCs in a rotating packed bed." *Industrial & engineering chemistr.research* : (7) p. 1583-1588.
11. Zou, H., et al.(2017), "Removal of hydrogen sulfide from coke oven gas by catalytic oxidative absorption in a rotating packed bed". *Fuel*,. **204**: p. 47-53.
12. Qiao, J., et al.(2019)," Degradation of nitrobenzene-containing wastewater by ozone/persulfate oxidation process in a rotating packed bed." *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*,. **99**: p. 1-8.
13. Lin, C.C. and W.T. Liu,(2003)" Ozone oxidation in a rotating packed bed". *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*,. **78**(2-3): p. 138-141.

37. O'Neill, M., Riccardo Poli, William B. Langdon, Nicholas F. McPhee:(2009) "a field guide to genetic programming"., Springer.
38. Cramer, N.L.(1985)." A representation for the adaptive generation of simple sequential programs. in Proceedings of the first international conference on genetic algorithms" ..
39. Koza, J.R. and R. Poli,(2005) "Genetic programming, in Search methodologies"., Springer. p. 127-164.
40. Ekart, A. and S.Z. Nemeth,(2001)" Selection based on the pareto nondomination criterion for controlling code growth in genetic programming". *Genetic Programming and Evolvable Machines*,. **2**(1): p. 61-73
41. Le, N., et al.(2016) "Complexity measures in genetic programming learning": *a brief review in 2016 IEEE congress on evolutionary computation (CEC)*.. *IEEE*.
42. Chen, G., et al.(2014), "The genetic algorithm based back propagation neural network for MMP prediction in CO<sub>2</sub>-EOR process". *Fuel*, 2014. **126**: p. 202-212.
43. Benamara, C., et al.,(2020) "Prediction of wax appearance temperature using artificial intelligent techniques". *Arabian Journal for Science and Engineering*,. **45**(2): p. 1319-1330.
- methyldiethanolamine in a rotating packed bed". *Chemical Engineering Science*,. **248**: p. 117118.
30. Andre, D., F.H. Bennett III, and J.R. Koza,(1996) "Discovery by genetic programming of a cellular automata rule that is better than any known rule for the majority classification problem." *Genetic programming*,. **96**: p. 3-11.
31. da Rocha Leite, C.F.M.(2022)," Genetic Programming Approaches for Solving Transportation Problems."
32. Eimer, D.(2014) ,"Gas treating: absorption theory and practice" .: John Wiley & Sons.
33. Yanhui, Z., L. Laishuan, and L. Youzhi, (2003)"Experimental study on flue gas dedusting by hypergravity rotary bed". *Environmental Engineering*,. **21**(6): p. 42-43.
34. Yunhua, S., et al.,(2003)" Research on particle Chemical Industry and Engineering Progress,. **22**(5): p. 499-502.
35. Junhua, L. and L. Youzhi,(2007) "Experimental study of removal dust from flue gas by high gravity technology and its mechanism". *Chemical Production and Technology*,.
36. Fu, J.,(2015) "Studies on technology of wet dust collection under high gravity". North University of China,.

# Separation modeling in rotating packed beds using Genetic programming method

Neda Asgari Hasanvand, Amir Ehsan Feili Monfared\*

Department of Chemical Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

---

## ABSTRACT

In recent years, the high efficiency of dust removal from gases by Rotating Packed Beds has attracted the attention of various industries. However the design process of this equipment using experimental methods and their computational fluid dynamics simulations, Due to the complexity of these beds and the number of parameters affecting their efficiency, using experimental methods for design will be very costly and time-consuming. This research evaluated the performance of Genetic Programming method in modelling these beds. Based on this, with 561 experimental data and using genetic programming, various equations were developed to estimate the system's efficiency. Among the created models, an equation with the least complexity and the most accuracy was selected. Results showed that the obtained equation, with a correlation coefficient of 0.9714, a mean square error of 3.79 and a maximum percentage of error of 1.51, had high accuracy for the design of these Rotating packed beds. Sensitivity analysis of the selected equation was also conducted and the results showed that particle size, rotational speed and liquid flow rate would have the most positive effect on efficiency of these beds.

All right reserved.

---

## ARTICLE INFO

---

### Article history:

Received: September 27, 2022

Received in revised form: February 6, 2023

Accepted: February 25, 2023

---

### Key words:

Dust removal  
Rotating packed bed  
Genetic programming  
Efficiency  
Modeling

\* Corresponding author  
Ehsan.monfared@outlook.com

---