

# بهینه سازی و پیش بینی فرآیند بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

محمد دلنواز<sup>\*</sup>، مهسا پیداد

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۳۰

## چکیده

**زمینه و هدف:** در این تحقیق بهینه سازی و پیش بینی راندمان راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) در تصفیه فاضلاب مصنوعی حاوی آنیلین با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بررسی شده است. **مواد و روش‌ها:** نتایج مدل‌سازی از راکتور به حجم تقریبی ۵ لیتر که با درصد پرشدگی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد با سنگدانه‌های سبک لیکا به عنوان محیط رشد میکروارگانیسم‌ها و تشکیل لایه بیوفیلم پر شده بود، استفاده گردید. برای تعیین شرایط بهینه در آزمایش‌های انجام شده و همچنین پیش‌بینی آزمایش‌های انجام نشده، سه عامل میزان خوراک در سطوح بین ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر، زمان ماند ۸ تا ۷۲ ساعت و درصد پرشدگی ۳۰ و ۵۰ و ۷۰ درصد با استفاده از RSM صورت گرفت. دقت و صحت مدل‌های ارائه شده به کمک تحلیل واریانس ANOVA بررسی شد. پیش‌بینی راندمان حذف سیستم با استفاده از ANN پایه شعاعی نیز بررسی گردید.

**یافته‌ها:** بهینه‌سازی فرایند نشان داد که شرایط بهینه برای بیشترین حذف در میزان خوراک ۱۷۰۰ mg/l و زمان ماند ۷۲ ساعت در درصد پرشدگی ۵۶/۸۲ درصد می‌باشد. نتایج پیش‌بینی فرایند با استفاده از ANN پایه شعاعی نیز نشان داد که در بهترین ساختار شبکه با توابع انتقال Radbas و خطی (Purelin) با  $R^2=0/982$  قادر به پیش‌بینی راندمان حذف می‌باشد. **نتیجه‌گیری:** با مقایسه مدل ANN پایه شعاعی و RSM و مقایسه میزان خطای این دو روش می‌توان گفت که روش ANN پایه شعاعی با دقت بیشتر و خطای کمتر روند داده‌ها را پیش‌بینی کرده است.

**کلمات کلیدی:** راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک، آنیلین، روش پاسخ سطح، شبکه عصبی مصنوعی

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول: گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
ایمیل: delnavaz@khu.ac.ir - تلفن تماس: ۰۲۱۸۸۸۳۰۸۹۱

## مقدمه

MBBR یکی از سیستم‌های تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی است که در اوایل دهه ۹۰ میلادی در نروژ به کار گرفته شد و با تلفیق برخی ویژگی‌های فرایندهای لجن فعال و بیوفیلترها سعی در کاهش معایب این روش‌ها و بهبود عملکرد آن‌ها داشته است. سیستم‌های MBBR را می‌توان برای توسعه-ی سیستم‌های تصفیه فاضلاب موجود بکار برد که نتیجه آن صرفه‌جویی در هزینه و بالا رفتن کیفیت فاضلاب خروجی است. از آن‌جا که در این سیستم‌ها جرم بیومس (چسبیده و معلق)  $10000 \text{ mg/L}$  تخمین زده می‌شود، از این‌رو به ازای واحد حجم تانک بار بالایی را تصفیه می‌کنند که همین عامل سبب کاهش حجم تانک می‌گردد. این سیستم به علت بازده بالا و فضای اشغالی کمتر، انتخاب بسیار مناسبی است.<sup>۱-۲</sup> در طراحی فرایند MBBR ایده اصلی بر تطابق بهترین ابزار و قابلیت‌های فرایند لجن فعال و همچنین فرایندهای بیوفیلتر و به کار گرفتن آن‌ها به موازات هم با کنار نهادن معایب هر یک از آن‌ها بوده است. MBBR از اجزای آکنه که دارای سطح موثر بالایی باشند به عنوان بیوفیلم جهت محیط رشد میکروارگانیسم‌ها و از یک تانک برای رشد بیومس استفاده می‌کند. بر خلاف اکثر راکتورهای بیوفیلمی، MBBR از تمام حجم تانک برای رشد بیومس استفاده می‌نماید. در این سیستم رشد بیومس‌ها بر روی آکنه‌ها صورت می‌گیرد که به راحتی در محیط آبی حرکت می‌کنند و با استفاده از یک توری فلزی که در خروجی تعبیه شده است در داخل راکتور باقی می‌مانند. این راکتور می‌تواند هوازی یا بی‌هوازی و یا آنوکسیک باشد.<sup>۳</sup>

آنیلین یا آمینو بنزن یک ترکیب آلی با فرمول  $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$  می‌باشد. این ترکیب آلی شامل یک حلقه بنزنی است که به یک گروه آمینی اتصال دارد.<sup>۴</sup> آنیلین به عنوان یک ماده سمی قابلیت حل شدن در آب به میزان ۳/۵٪ را دارد. بنابراین حلالیت آن در آب نه تنها خطر وجود آن را در فاضلاب افزایش می‌دهد بلکه در منابع آب شرب می‌تواند به عنوان یک ماده شیمیایی

یافت شود.<sup>۵</sup> آنیلین به طور گسترده در صنایع شیمیایی به عنوان ماده خام و در کارخانجات رنگ، لاستیک، تولید دارو، پلاستیک‌سازی و آفت‌کش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.<sup>۶</sup> در ایران با توجه به وجود صنایع مختلف پتروشیمی، تولید لاستیک و رنگ، این ترکیب به میزان بالایی در خط تولید و در پساب خروجی این صنایع یافت می‌شود.

امروزه روش‌های زیادی جهت بهینه‌سازی و بررسی عملکرد سیستم‌های تصفیه فاضلاب به کار گرفته می‌شود، در این میان روش طراحی آزمایشات بسیار قابل توجه است. روش طراحی آزمایش، مجموعه اقداماتی است که توسط مدل‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای آزمایشگاهی از طریق روش‌های آماری انجام شده و اخیراً در پژوهش‌های زیست محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.<sup>۷</sup> استفاده از روش‌های مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها در رابطه با بهینه‌سازی به جهت بازده بالای نتایج و همچنین سهولت استفاده برای محقق، در سال‌های اخیر در بسیاری از طرح‌های پژوهشی، در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است. Qaderi و همکاران در حذف آلاینده‌های نفتی با استفاده از روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی حذف آلاینده‌های نفتی در راکتور بیوفیلم با بستر متحرک استفاده کردند. تاثیر سه پارامتر (مدت زمان نگهداری، غلظت خوراک فاضلاب و درصد پرشدگی) مورد بررسی قرار گرفت.<sup>۸</sup> Navamani و همکاران پساب حاصل از تولید رنگدانه‌های شرکتی واقع در هند را بررسی کردند که حاوی مقادیر زیادی سولفات به شکل سولفات سدیم بود، از آنجا که میزان سولفات بالا منجر به TDS بالا می‌شود، این تحقیق بر روی حذف یون‌های سولفات با روش شیمیایی با استفاده از کلرید باریم انجام شد. بهینه‌سازی و پیش‌بینی پارامترها با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) مورد ارزیابی قرار گرفت، ۱۷ آزمایش طراحی شده و درصد حذف سولفات تعیین شد.<sup>۹</sup> از لحاظ آماری با توجه به اینکه مقدار p-value از عدد ۰/۰۵ کمتر و میزان ضریب برازش نزدیک به ۱۰۰ درصد

مدل معنی دار بود. شرایط بهینه متغیرها در سطوح انتخاب شده، شامل میزان COD ورودی برابر با ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر، pH برابر با ۸، شوری ۵٪ و در نهایت منبع تامین نیتروژن کلرور آمونیوم با استفاده از راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک با کمک لجن فعال برگشتی در تصفیه خانه فاضلاب چنیه اهواز توسط حقیقی فرد و همکاران انجام شد. بر اساس تحلیل نتایج با استفاده از روش تاگوچی شرایط بهینه و مناسب برای افزایش کارایی یک راکتور MBBR به دست آمد.<sup>۱۰</sup> Zinatizadeh و همکاران در تحقیقی از MBBR جهت حذف کربن آلی و نیتروژن از فاضلاب شهری با استفاده از روش نیتریفیکاسیون به صورت همزمان استفاده کردند. برای ارزیابی عملکرد فرایند، سه متغیر مستقل زمان ماند هیدرولیکی، اکسیژن محلول و نوع مدیا انتخاب شد. این فرآیند با بررسی ۱۰ پاسخ، مورد تجزیه و تحلیل و مدل سازی قرار گرفت. حداکثر راندمان حذف COD به ترتیب ۸۵ و ۸۸ درصد برای سیستم با فرم حلقه و Kaldnes در زمان ۱۲ ساعت و اکسیژن محلول ۴ میلی گرم بر لیتر بود.<sup>۱۱</sup> جمالی و همکاران شرایط بهینه حذف COD، رنگ، کدورت و TSS توسط فرات پتاسیم از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی برای تصفیه فاضلاب یک کارخانه تولید فرش استفاده کردند.<sup>۱۲</sup> Delnavaz و همکاران کارایی راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) برای حذف آلاینده‌های آنیلین با استفاده از مدل ANN با درصد پرشدگی ثابت ۵۰ درصد را بررسی کردند. معماری مناسب مدل های شبکه عصبی با استفاده از چند مرحله آموزش و آزمایش مدل ها تعیین گردید. مدل پیشنهادی توانایی یک شبکه عصبی را برای پیش بینی عملکرد MBBR با دقت کافی برای تصفیه فاضلاب حاوی آنیلین نشان می دهد.<sup>۱۳</sup> در این تحقیق بهینه سازی و پیش بینی راندمان راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک یا MBBR در تصفیه فاضلاب مصنوعی حاوی مواد آلی با ساختار آمینی شامل آنیلین با استفاده از روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی بررسی

شده است. طراحی آزمایشات بنا بر شرایط مختلف، روش های متفاوتی ارائه می کند که در این تحقیق از روش RSM استفاده شده است. این روش باعث کاهش تعداد آزمایشات، کاهش هزینه های اقتصادی و همچنین به کارگیری روش هایی در مصرف درست انرژی شده و در نتیجه امکان طراحی و چیدمان آزمایش ها، بهینه سازی و پیش بینی روند آزمایش را فراهم می کند. در بسیاری از تحقیقاتی که تاکنون بر روی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک انجام شده، متغیرها آلاینده موجود در پساب و زمان ماند بوده است که تعداد زیادی از آنها بازده سیستم، صرفاً توسط روش های آزمایشگاهی بحث و نتیجه گیری شده است، آنچه که در این تحقیق مورد نظر قرار گرفته است، بررسی بازده و بهینه سازی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک حاوی آلاینده های آلی است.

## روش انجام تحقیق

در این پژوهش از اطلاعات آزمایشگاهی دنواز و همکاران که در سال ۱۳۸۶ با استفاده از راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک، تصفیه فاضلاب سنتزی و حذف آلاینده های آلی را مورد آزمایش قرار داده اند، استفاده شده است. آکنه های مورد استفاده در این تحقیق از نوع سنگدانه های لیکا بود. فاضلاب مورد بررسی شامل آنیلین بود که درجه خلوص ۹۹ درصد از شرکت Merck خریداری شد. همان طور که در بالا ذکر شد، در این پژوهش از اطلاعات آزمایشگاهی دنواز و همکاران که در سال ۱۳۸۶ با استفاده از راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک، تصفیه فاضلاب سنتزی و حذف آلاینده های آلی را مورد آزمایش قرار داده اند، استفاده شده است.<sup>۱</sup> بدین صورت که آزمایش های انجام گرفته و پاسخ های به دست آمده توسط نرم افزار مورد بررسی قرار گرفت.

## بهینه سازی با استفاده از RSM

RSM از جمله روش های بهینه سازی می باشد که با استفاده از مجموعه ای از تکنیک های ریاضی و آماری مسائل را مدل می کند. هدف بهینه سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می باشد. یک آزمایش یک سری از آزمون ها است که اجرا نامیده می شود، در هر آزمایش تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می شوند. در طرح های سطح پاسخ ساخت مدل های سطح پاسخ یک فرآیند تکراری می باشد. در این روش به محض اینکه یک مدل تقریبی به دست آمد، مورد آزمون قرار می گیرد که آیا جواب رضایت بخش است یا خیر، اگر جواب تایید نشود تخمین فرآیند دوباره شروع می شود و آزمایشات بیشتری انجام می گیرد. در طراحی آزمایش ها هدف، شناسایی و تحلیل متغیرهای موثر بر خروجی ها با کمترین تعداد آزمایش است. این روش با کشف میزان پاسخ بهینه ی هر یک از متغیر های طراحی به بهترین سطح پاسخ دست می یابد.

مطالعه بهینه سازی با استفاده از RSM به شش مرحله به شرح زیر تقسیم شد:

- ۱- انتخاب متغیرهای مستقل بر سیستم،
  - ۲- انتخاب طرح آزمایش و انجام آزمایش ها با توجه به زمینه آزمایشی انتخاب شده
  - ۳- تحلیل آماری ریاضی از داده های تجربی به دست آمده از طریق تابع چند جمله ای مناسب
  - ۴- ارزیابی تناسب مدل
  - ۵- تأیید لزوم و امکان انجام یک جابجایی در جهت منطقه مطلوب
  - ۶- به دست آوردن مقادیر بهینه برای هر متغیر مورد مطالعه<sup>۱۴</sup>
- به منظور تجزیه و تحلیل اثرات سه متغیر مستقل (میزان خوراک، زمان ماند و درصد پرشدگی) بر بازده راندمان حذف مواد آلی توسط فرآیند MBBR از RSM و نرم افزار Design

expert انجام شد. این نرم افزار آماری منحصراً به انجام طراحی آزمایش ها می پردازد. همچنین جهت کاهش تعداد آزمایش های مورد نیاز، مقایسه تست های غربالگری، بهینه سازی پارامترهای طراحی، طرح های مخلوط چند فاکتوره و قابل استفاده است. این نرم افزار با کمک آزمون ماتریس برای غربالگری آزمون ها با عوامل مختلف تا ۵۰ عامل و فاکتور را پوشش می دهد.

در روش RSM یک معادله ریاضی به منظور تخمین رابطه بین متغیرهای مستقل و پاسخ برآزش میشود و شرایط بهینه متغیرها برای رسیدن به بیشینه پاسخ نیز تعیین می شود. مدل مرتبه دوم که بیشتر در RSM استفاده می شود، در معادله (۱) نشان داده شده است.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{j < i} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

در این معادله  $Y$ ، متغیر پاسخ،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_i$  ضریب همبستگی عوامل خطی،  $\beta_{ii}$  ضریب همبستگی عوامل درجه دوم،  $\beta_{ij}$  ضریب همبستگی متقابل  $i$  و  $j$  و  $\varepsilon$  خطای احتمالی موجود است.

جدول ANOVA یکی دیگر از پارامترهای آماری است که برای تحلیل کفایت مدل مورد استفاده قرار می گیرد که در ادامه تعریف عوامل موجود در این جدول پرداخته می شود. جهت مناسب بودن مدل از پارامتر ضریب برآزش ( $R^2$ ) مطابق معادله (۲) استفاده شد. همانطور که مشخص است هرچه این ضریب به ۱ یا به عبارت دیگر به ۱۰۰ درصد نزدیکتر باشد قابل قبول تر است.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}} = \frac{SS_{model}}{SS_{total}} \quad (2)$$

در این معادله  $SS_{model}$  مجموع مربعات مدل و  $SS_{total}$  مجموع مربعات کل که حاصل مجموع مربعات باقیمانده و مجموع مربعات مدل است می باشد.

احتمال رخداد یک داده با فرض باطل را P-value می گویند. در اکثر موارد جملاتی که P-value آن کمتر از ۰/۰۵ باشد مناسب است، لازم به ذکر است عدد ۰/۰۵ از سطح

اطمینانی که برای مدل طراحی می کنیم به دست می آید که در اکثر طرح ها سطح اطمینان ۰/۹۵ را در نظر می گیرند.

پارامتر F-value یا Fisher-Test به این معناست که جمله مورد نظر چه مقدار به طرح مورد نظر نزدیکتر است، به عبارت دیگر هر چه F-value بیشتر باشد آن جمله قابل اعتمادتر است. پس از تعریف مفاهیم کلی موجود در روش سطح پاسخ، در ادامه به چگونگی تحلیل داده ها توسط نرم افزار پرداخته شده است.

ضریب رگرسیون تعدیل یافته ( $R^2_{adjust}$ ) که در بررسی RSM کاربرد دارد مانند ضریب رگرسیون به دست می آید با این تفاوت که درجه آزادی را هم لحاظ می کند و همچنین در این حالت ضریب برازش در مقابل تغییرات ناگهانی به خوبی عمل می کند. به عبارتی هر چه  $R^2$  و  $R^2_{adjust}$  به یک نزدیکتر باشد جواب برازش قابل قبول تر است. در محاسبه این ضریب، برخلاف ضریب برازش به جای مجموع مربعات از میانگین مجموع مربعات استفاده می شود (معادله ۳).

$$R^2_{adjusted} = 1 - \frac{(1-R^2)(N-1)}{N-P-1} \quad (3)$$

در این معادله، N تعداد کل مشاهدات، P تعداد متغیرهای پیش بینی شده و  $R^2$  ضریب رگرسیون مدل است.

ضریب واریانس یا ضریب پراکندگی معیاری است که برای اندازه گیری توزیع داده های آماری به کار می رود که از معادله ۴ به دست می آید.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{M}} \quad (4)$$

در این معادله،  $\sigma$  انحراف معیار است که نشان دهنده میزان فاصله داده ها از مقدار میانگین است و M میانگین داده ها است. هرچه مقدار ضریب واریانس کمتر باشد مدل به دست آمده اعتبار بالاتری دارد. ضریب واریانس برای هر متغیر وابسته محاسبه می شود در صورتی که نتیجه به دست آمده زیر ۱۰ درصد باشد نتیجه عالی ارزیابی شده و اگر ضریب واریانس بالاتر از ۳۰ درصد به دست آید، آزمون باید دوباره تکرار شود.<sup>۱۵</sup>

برای تعیین شرایط بهینه در آزمایش های انجام شده توسط دنواز و همکاران و همچنین پیش بینی آزمایش هایی که در آزمایشگاه انجام نشده است، سطوح طراحی آزمایش مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. همچنین پاسخ که در اینجا راندمان حذف ماده آلی در راکتور بیوفیلمی بود نیز به نرم افزار داده شد و بررسی ها صورت گرفت.

### پیش بینی فرایند با استفاده از ANN پایه شعاعی

با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن پدیده های زیست-محیطی از جمله فرآیند تصفیه آب و فاضلاب، استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی با عملکردی مشابه مغز انسان به عنوان ابزاری مناسب قابل توجه است.<sup>۱۶</sup> روند کلی کارکرد شبکه های عصبی مصنوعی در قالب رابطه های ۶ و ۷ قابل مشاهده است.

$$y_i^m \quad (6)$$

$$v_i^m \quad (7)$$

که در آن  $y_i^m$  ورودی های مدل،  $v_i^m$  خروجی لایه m ام، f معرف تابع انتقال، L تعداد رابطه ها با لایه های قبلی،  $w_{ji}^m$  معادل وزن هر رابط و  $b_i^m$  معرف بایاس یعنی جز ثابت تابع انتقال می باشد.

تعداد بهینه لایه های مخفی در شبکه های عصبی مصنوعی و همچنین تعداد مطلوب نرون ها در هر لایه با استفاده از سعی و خطا مشخص می گردد. اگرچه ثابت شده است که شبکه ای با یک لایه مخفی قادر به مدل سازی هر تابع پیوسته ای با درجات آزادی کافی می باشد. کل اطلاعات استفاده شده برای مدل سازی شامل ۵ گروه با ۲۰۰ ورودی بود که از این میزان ۱۵۰ عدد از اطلاعات به عنوان اطلاعات آموزشی به شبکه و باقیمانده جهت تست شبکه مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین بهینه ترین مدل برای پیش بینی فرایند بیولوژیکی از مدل های متفاوتی استفاده شد.

**جدول ۱:** سطوح طراحی آزمایش، مقادیر متغیرهای مستقل (میزان خوراک، زمان ماند و درصد پرشدگی) و سطوح مربوطه مورد استفاده در روش سطح پاسخ

| متغیر       | سطوح |     |     |     |      |      |      |      |
|-------------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| میزان خوراک | ۱۰۰  | ۲۵۰ | ۵۰۰ | ۷۵۰ | ۱۰۰۰ | ۱۵۰۰ | ۲۰۰۰ | ۲۵۰۰ |
| زمان ماند   | ۸    |     | ۲۴  |     | ۴۸   |      | ۷۲   |      |
| درصد پرشدگی |      | ۳۰  |     |     | ۵۰   |      | ۷۰   |      |

## یافته‌ها

### بهینه سازی فرایند با استفاده از RSM

آزمایشات طراحی شده در فرایند MBBR برای حذف آلاینده حاوی آنیلین مطابق روش سطح پاسخ در قالب ۹۶ آزمایش بود که پارامترهای میزان خوراک، زمان ماند و درصد پرشدگی به عنوان فاکتورهای اصلی برای بهینه سازی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بهره برداری سیستم در شرایط مختلف راه اندازی در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می گردد بالاترین راندمان حذف معادل ۹۱ درصد در COD معادل ۲۰۰۰mg/L در زمان ماند ۷۲ ساعت حاصل گشته است. در بارگذاری اولیه تا COD معادل ۱۵۰۰mg/L راندمان حذف در زمان ماند های ۸ و ۲۴ ساعت روند مناسبی داشته است به نحوی که در COD معادل ۷۵۰mg/L این راندمان در مدت ۸ ساعت ۲۹ درصد و در زمان ماند ۲۴ ساعت به اندازه ۴۱ درصد می باشد. در COD معادل ۱۰۰۰mg/L راندمان حذف در زمان ماند های ۸ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۳۵ و ۵۴ درصد است که این مقادیر برای COD معادل ۱۵۰۰mg/L به اندازه ۲ درصد برای زمان ماند ۸ ساعت و ۴ درصد برای زمان ماند ۲۴ ساعت افزایش داشته است که بالاترین راندمان حذف نیز برای این زمان ماندها

برای این منظور مدلسازی با یک لایه پنهان و یک نرون شروع و بر اساس میزان خطای محاسبه شده برای هر حالت، بهترین مدل از لحاظ کمترین خطای میانگین مجذور مربعات (RMSE) مطابق معادله ۵ و بیشترین ضریب همبستگی ( $R^2$ ) انتخاب گردید.

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_i^*)^2} \quad (5)$$

در این معادله پارامتر N تعداد داده ها،  $X_i$  داده آزمایشگاهی یا واقعی و  $X_i^*$  داده ی پیش بینی شده می باشد.

در این تحقیق از شبکه های پایه شعاعی جهت پیش بینی راندمان سیستم استفاده شده است. نحوه عمل کرد این شبکه ها به این صورت است که فرایند آموزش با افزایش تعداد نرون های لایه پنهان تا رسیدن تابع کارایی به میزان هدف و یا تا رسیدن به حداکثر تعداد نرون های تعیین شده ادامه پیدا می کند. تابع کارایی مورد استفاده، پارامتر میانگین مربعات خطا می باشد. یکی از نکات قابل توجه در مورد شبکه های پایه شعاعی عدم نیاز به هیچ گونه پیش فرضی در مورد شکل مدل در فرایند مدلسازی می باشد. این شبکه ها به طور کلی یک مدل مبتنی بر داده هستند.<sup>۱۷</sup> در شبکه های پایه شعاعی تعداد نرون های لایه پنهان از صفر تا حداکثر تعداد مجاز نرون ها یعنی تعداد داده های ورودی و در هر تکرار یک نرون افزایش یافته و به ازای آن میانگین مربعات خطا محاسبه می گردد.

می‌باشد. راندمان حذف در زمان ماند ۴۸ و ۷۲ ساعت در محدوده COD معادل ۵۰۰-۱۵۰۰ mg/L بالا بود و با روند ملایمی از ۷۴ درصد در COD معادل ۷۵۰ mg/L تا ۸۵ درصد در COD معادل ۱۵۰۰ mg/L در زمان ماند ۴۸ ساعت افزایش داشت. با افزایش باردهی به سیستم راندمان حذف در زمان ماند های اولیه کاهش چشمگیری پیدا کرده است به نحوی که در COD معادل ۲۵۰۰ mg/L راندمان حذف در زمان ماند ۸ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۱۵ و ۳۰ درصد می‌باشد. با مراجعه به نمودار مشاهده می‌شود که افزایش چشمگیر راندمان حذف در بازه زمانی ۲۴ و ۴۸ ساعت می‌باشد به نحوی که بیشترین اختلاف در COD معادل ۲۰۰۰ mg/L که بهینه ترین حالت راندمان حذف برای این راکتور می‌باشد به اندازه ۳۶ درصد بدست آمده است و این روند اختلاف در راندمان حذف از

باردهی اولیه به سیستم (COD معادل ۵۰۰ mg/L) تا مراحل آخر باردهی به سیستم (COD معادل ۴۰۰۰ mg/L) مشاهده می‌شود. در راکتور حاوی آنیلین افزایش در راندمان حذف از بارگذاری های اولیه روند صعودی داشته است و همانطور که ذکر شد در COD معادل ۲۰۰۰ mg/L بیشترین میزان حذف به اندازه ۹۱ درصد بدست آمد. از این مرحله به بعد کاهش در راندمان حذف به اندازه ۱۷ درصد در زمان ماند ۷۲ ساعت در COD معادل ۲۵۰۰ mg/L حاصل شد. این روند با ادامه باردهی به سیستم ادامه یافت به نحوی که در COD معادل ۳۵۰۰ mg/L راندمان در زمان ماند ۷۲ ساعت به اندازه ۶۰ درصد رسید که با بررسی سیستم در زمان ماند ۱۲۰ ساعت افزایشی به اندازه ۴ درصد حاصل شد.

جدول ۲: آزمایشات طراحی شده و پاسخ راندمان حذف در راکتور حاوی آنیلین

| پاسخ     | فاکتور سوم | فاکتور دوم    | فاکتور اول      | پاسخ     | فاکتور سوم    | فاکتور دوم   | فاکتور اول      |
|----------|------------|---------------|-----------------|----------|---------------|--------------|-----------------|
| درصد حذف | C: درصد    | B: زمان ماند  | A: غلظت آلاینده | درصد حذف | C: درصد       | B: زمان ماند | A: غلظت آلاینده |
| تکرار    | پیش‌دگی    | آلاینده ورودی | تکرار           | پیش‌دگی  | آلاینده ورودی | تکرار        | پیش‌دگی         |
| ۴۸/۳     | ۵۰         | ۲۴            | ۱۵۰۰            | ۴۹       | ۱۵۰۰          | ۲۴           | ۱۵۰۰            |
| ۴۸/۲     | ۷۰         | ۲۴            | ۱۵۰۰            | ۵۰       | ۱۵۰۰          | ۲۴           | ۱۵۰۰            |
| ۸۲/۴     | ۳۰         | ۴۸            | ۱۵۰۰            | ۵۱       | ۱۵۰۰          | ۴۸           | ۱۵۰۰            |
| ۸۵       | ۵۰         | ۴۸            | ۱۵۰۰            | ۵۲       | ۱۵۰۰          | ۴۸           | ۱۵۰۰            |
| ۸۶/۱     | ۷۰         | ۴۸            | ۱۵۰۰            | ۵۳       | ۱۵۰۰          | ۴۸           | ۱۵۰۰            |
| ۸۵       | ۳۰         | ۷۲            | ۱۵۰۰            | ۵۴       | ۱۵۰۰          | ۷۲           | ۱۵۰۰            |
| ۸۶       | ۵۰         | ۷۲            | ۱۵۰۰            | ۵۵       | ۱۵۰۰          | ۷۲           | ۱۵۰۰            |
| ۸۷       | ۷۰         | ۷۲            | ۱۵۰۰            | ۵۶       | ۱۵۰۰          | ۷۲           | ۱۵۰۰            |
| ۲۲       | ۳۰         | ۸             | ۲۰۰۰            | ۵۷       | ۲۰۰۰          | ۸            | ۲۰۰۰            |
| ۲۴/۸     | ۵۰         | ۸             | ۲۰۰۰            | ۵۸       | ۲۰۰۰          | ۸            | ۲۰۰۰            |
| ۲۸/۸     | ۷۰         | ۸             | ۲۰۰۰            | ۵۹       | ۲۰۰۰          | ۸            | ۲۰۰۰            |

|    |      |    |    |      |    |      |    |    |      |
|----|------|----|----|------|----|------|----|----|------|
| ۱۲ | ۱۰۰  | ۷۲ | ۷۰ | ۷۵   | ۶۰ | ۲۰۰۰ | ۲۴ | ۳۰ | ۵۰   |
| ۱۳ | ۲۵۰  | ۸  | ۵۰ | ۴۵/۷ | ۶۱ | ۲۰۰۰ | ۲۴ | ۵۰ | ۴۸/۳ |
| ۱۴ | ۲۵۰  | ۲۴ | ۳۰ | ۵۸/۱ | ۶۲ | ۲۰۰۰ | ۲۴ | ۷۰ | ۴۹/۱ |
| ۱۵ | ۲۵۰  | ۲۴ | ۵۰ | ۶۲/۸ | ۶۳ | ۲۰۰۰ | ۴۸ | ۳۰ | ۸۲/۲ |
| ۱۶ | ۲۵۰  | ۲۴ | ۷۰ | ۶۱/۹ | ۶۴ | ۲۰۰۰ | ۴۸ | ۵۰ | ۸۱/۷ |
| ۱۷ | ۲۵۰  | ۴۸ | ۳۰ | ۵۹/۱ | ۶۵ | ۲۰۰۰ | ۴۸ | ۷۰ | ۸۳/۱ |
| ۱۸ | ۲۵۰  | ۴۸ | ۵۰ | ۶۷/۸ | ۶۶ | ۲۰۰۰ | ۷۲ | ۳۰ | ۹۰/۱ |
| ۱۹ | ۲۵۰  | ۴۸ | ۷۰ | ۶۸   | ۶۷ | ۲۰۰۰ | ۷۲ | ۵۰ | ۹۲/۸ |
| ۲۰ | ۲۵۰  | ۷۲ | ۳۰ | ۷۹/۲ | ۶۸ | ۲۰۰۰ | ۷۲ | ۷۰ | ۹۳/۲ |
| ۲۱ | ۲۵۰  | ۷۲ | ۵۰ | ۸۱   | ۶۹ | ۲۵۰۰ | ۸  | ۳۰ | ۱۰/۶ |
| ۲۲ | ۲۵۰  | ۷۲ | ۷۰ | ۸۰/۳ | ۷۰ | ۲۵۰۰ | ۸  | ۵۰ | ۱۱/۶ |
| ۲۳ | ۷۵۰  | ۸  | ۳۰ | ۲۸/۱ | ۷۱ | ۲۵۰۰ | ۲۴ | ۳۰ | ۲۵/۹ |
| ۲۴ | ۷۵۰  | ۸  | ۵۰ | ۲۹/۲ | ۷۲ | ۲۵۰۰ | ۲۴ | ۷۰ | ۳۵/۲ |
| ۲۵ | ۷۵۰  | ۸  | ۷۰ | ۳۰   | ۷۳ | ۲۵۰۰ | ۴۸ | ۳۰ | ۷۹   |
| ۲۶ | ۷۵۰  | ۲۴ | ۳۰ | ۵۰/۳ | ۷۴ | ۲۵۰۰ | ۴۸ | ۷۰ | ۸۱/۶ |
| ۲۷ | ۷۵۰  | ۲۴ | ۵۰ | ۵۴/۳ | ۷۵ | ۲۵۰۰ | ۷۲ | ۳۰ | ۶۵/۱ |
| ۲۸ | ۷۵۰  | ۲۴ | ۷۰ | ۵۵/۱ | ۷۶ | ۲۵۰۰ | ۷۲ | ۵۰ | ۷۳/۷ |
| ۲۹ | ۷۵۰  | ۴۸ | ۳۰ | ۶۶/۱ | ۷۷ | ۲۵۰۰ | ۷۲ | ۷۰ | ۷۴/۸ |
| ۳۰ | ۷۵۰  | ۴۸ | ۵۰ | ۷۰/۸ | ۷۸ | ۳۰۰۰ | ۸  | ۵۰ | ۲۱/۴ |
| ۳۱ | ۷۵۰  | ۴۸ | ۷۰ | ۷۱/۱ | ۷۹ | ۳۰۰۰ | ۸  | ۷۰ | ۲۲   |
| ۳۲ | ۷۵۰  | ۷۲ | ۳۰ | ۷۸/۲ | ۸۰ | ۳۰۰۰ | ۲۴ | ۳۰ | ۲۴   |
| ۳۳ | ۷۵۰  | ۷۲ | ۵۰ | ۸۰   | ۸۱ | ۳۰۰۰ | ۲۴ | ۵۰ | ۲۵/۹ |
| ۳۴ | ۷۵۰  | ۷۲ | ۷۰ | ۸۰/۱ | ۸۲ | ۳۰۰۰ | ۲۴ | ۷۰ | ۲۶/۹ |
| ۳۵ | ۱۰۰۰ | ۸  | ۳۰ | ۳۵/۹ | ۸۳ | ۳۰۰۰ | ۴۸ | ۳۰ | ۴۵/۱ |
| ۳۶ | ۱۰۰۰ | ۸  | ۵۰ | ۳۷/۶ | ۸۴ | ۳۰۰۰ | ۴۸ | ۵۰ | ۴۷/۳ |
| ۳۷ | ۱۰۰۰ | ۸  | ۷۰ | ۳۵/۱ | ۸۵ | ۳۰۰۰ | ۴۸ | ۷۰ | ۴۸/۳ |
| ۳۸ | ۱۰۰۰ | ۲۴ | ۳۰ | ۴۷/۵ | ۸۶ | ۳۰۰۰ | ۷۲ | ۳۰ | ۷۷/۲ |
| ۳۹ | ۱۰۰۰ | ۲۴ | ۵۰ | ۵۰/۶ | ۸۷ | ۳۰۰۰ | ۷۲ | ۵۰ | ۸۰/۴ |
| ۴۰ | ۱۰۰۰ | ۲۴ | ۷۰ | ۴۸/۲ | ۸۸ | ۳۰۰۰ | ۷۲ | ۷۰ | ۸۱   |
| ۴۱ | ۱۰۰۰ | ۴۸ | ۳۰ | ۸۲/۴ | ۸۹ | ۳۵۰۰ | ۸  | ۷۰ | ۱۰/۱ |
| ۴۲ | ۱۰۰۰ | ۴۸ | ۵۰ | ۸۵   | ۹۰ | ۳۵۰۰ | ۲۴ | ۷۰ | ۳۸   |
| ۴۳ | ۱۰۰۰ | ۴۸ | ۷۰ | ۸۶/۱ | ۹۱ | ۳۵۰۰ | ۴۸ | ۳۰ | ۴۳/۲ |
| ۴۴ | ۱۰۰۰ | ۷۲ | ۳۰ | ۸۵   | ۹۲ | ۳۵۰۰ | ۴۸ | ۵۰ | ۴۷/۴ |
| ۴۵ | ۱۰۰۰ | ۷۲ | ۵۰ | ۸۳/۱ | ۹۳ | ۳۵۰۰ | ۴۸ | ۷۰ | ۴۸/۱ |
| ۴۶ | ۱۰۰۰ | ۷۲ | ۷۰ | ۸۷   | ۹۴ | ۳۵۰۰ | ۷۲ | ۳۰ | ۶۲   |
| ۴۷ | ۱۵۰۰ | ۸  | ۳۰ | ۹/۶  | ۹۵ | ۳۵۰۰ | ۷۲ | ۵۰ | ۶۰/۹ |
| ۴۸ | ۱۵۰۰ | ۲۴ | ۳۰ | ۵۰   | ۹۶ | ۳۵۰۰ | ۷۲ | ۷۰ | ۶۳/۲ |

آنالیز واریانس پرکاربردترین تکنیک به منظور تفسیر نتایج آماری است، نتایج تحلیل واریانس برای راندمان حذف در راکتور حاوی آنیلین در جدول ۳ مشاهده می گردد، جمله های خطی (A) و (B)، جمله های درجه دوم (A<sup>2</sup>) و (B<sup>2</sup>) و جمله برهم کنش (A.B) که به معنای برهم کنش میزان خوراک دهی و زمان ماند است، با اهمیت هستند و جمله خطی (C)، جمله درجه دوم (C<sup>2</sup>) و برهم کنش (A.C) و (B.C) که به معنای برهم کنش درصد پرشدگی و زمان ماند و هم چنین برهم کنش

درصد پرشدگی و میزان خوراک است، بی اهمیت می باشد. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می شود مقدار  $R^2=0.90$  برای معادله به دست آمده، که این مقدار نشان دهنده هم پوشانی مناسب داده های آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل ارائه شده، برای بررسی راندمان حذف در راکتور MBBR حاوی آنیلین است.

جدول ۳: آنالیز انحراف معیار برای پاسخ راندمان حذف در راکتور حاوی آنیلین

| منبع           | مجموع مربعات | درجه آزادی | متوسط مربعات | F-value | p-value |
|----------------|--------------|------------|--------------|---------|---------|
| مدل            | ۴۳۹۶۴/۱۴     | ۹          | ۴۸۸۴/۹۰      | ۸۶/۷۷   | <۰/۰۰۰۱ |
| A-نرخ خوراک    | ۵۷۹۵/۵۵      | ۱          | ۵۷۹۵/۵۵      | ۱۰۲/۹۴  | <۰/۰۰۰۱ |
| B-زمان ماند    | ۳۹۲۷۶/۳۰     | ۱          | ۳۹۲۷۶/۳۰     | ۶۹۷/۶۴  | <۰/۰۰۰۱ |
| C-درصد پرشدگی  | ۵۷۱/۲۷       | ۱          | ۵۷۱/۲۷       | ۱۰/۱۵   | ۰/۰۰۲۰  |
| AB             | ۱۰۶۹/۰۲      | ۱          | ۱۰۶۹/۰۲      | ۱۸/۹۹   | <۰/۰۰۰۱ |
| AC             | ۱۱۴/۱۹       | ۱          | ۱۱۴/۱۹       | ۲/۰۳    | ۰/۱۵۸۰  |
| BC             | ۸۷/۶۲        | ۱          | ۸۷/۶۲        | ۱/۵۶    | ۰/۲۱۵۶  |
| A <sup>2</sup> | ۲۹۱۲/۱۶      | ۱          | ۲۹۱۲/۱۶      | ۵۱/۷۳   | <۰/۰۰۰۱ |
| B <sup>2</sup> | ۱۶۸۹/۶۱      | ۱          | ۱۶۸۹/۶۱      | ۳۰/۰۱   | <۰/۰۰۰۱ |
| C <sup>2</sup> | ۳۹/۸۵        | ۱          | ۳۹/۸۵        | ۰/۷۰۷۸  | ۰/۴۰۲۵  |
| باقیمانده      | ۴۸۴۱/۷۲      | ۸۶         | ۵۶/۳۰        |         |         |
| مجموع          | ۴۸۸۰۵/۸۶     | ۹۵         |              |         |         |

جدول ۴: اطلاعات آماری برای پاسخ راندمان حذف در راکتور حاوی آنیلین

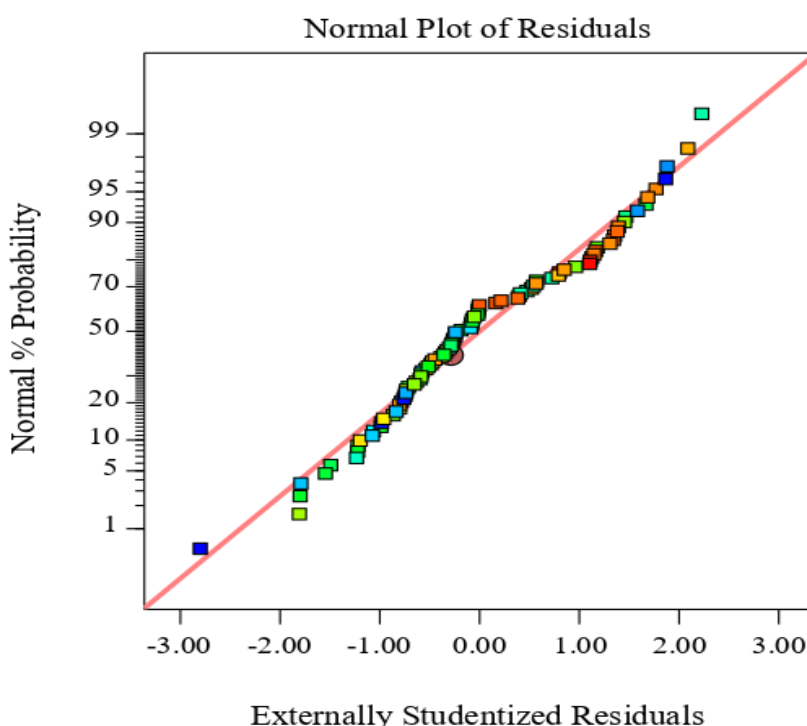
| پارامتر                  | مقدار  |
|--------------------------|--------|
| انحراف از معیار          | ۷/۵۰   |
| میانگین                  | ۵۷/۷۸  |
| ضریب تغییرات             | ۱۲/۹۹  |
| R <sup>2</sup>           | ۰/۹۰۰۸ |
| Adjusted R <sup>2</sup>  | ۰/۸۹۰۴ |
| Predicted R <sup>2</sup> | ۰/۸۷۶۸ |

نمودار ۲ نمودار نرمال مانده‌های مدل است و نشان می‌دهد که مانده‌ها از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند. در شکل شماره ۳ نمودار همپوشانی نشان داده شده است. این نمودارها اثر دو متغیر میزان خوراک و زمان ماند را در درصد پرشدگی ۵۰ درصد نشان می‌دهد و همانطور که در شکل قابل مشاهده است در زمان نزدیک به ۷۲ ساعت و با میزان خوراک بین ۹۵۰ تا ۱۸۰۰ میلی گرم راندمان حذف در بیشترین مقدار خواهد شد. بهینه شرایط برای میزان حذف ۸۹/۸۶۵ در راکتور حاوی آنیلین در میزان خوراک حدود ۲۰۰۰ میلی گرم در متر مکعب و زمان ۷۲ ساعت در درصد پرشدگی ۵۸/۸۲ درصد رخ داده است.

با انجام آنالیز رگرسیونی، معادله چند جمله‌ای بدست آمده از رابطه بین متغیرها با پاسخ در راکتور حاوی آنیلین به صورت زیر است:

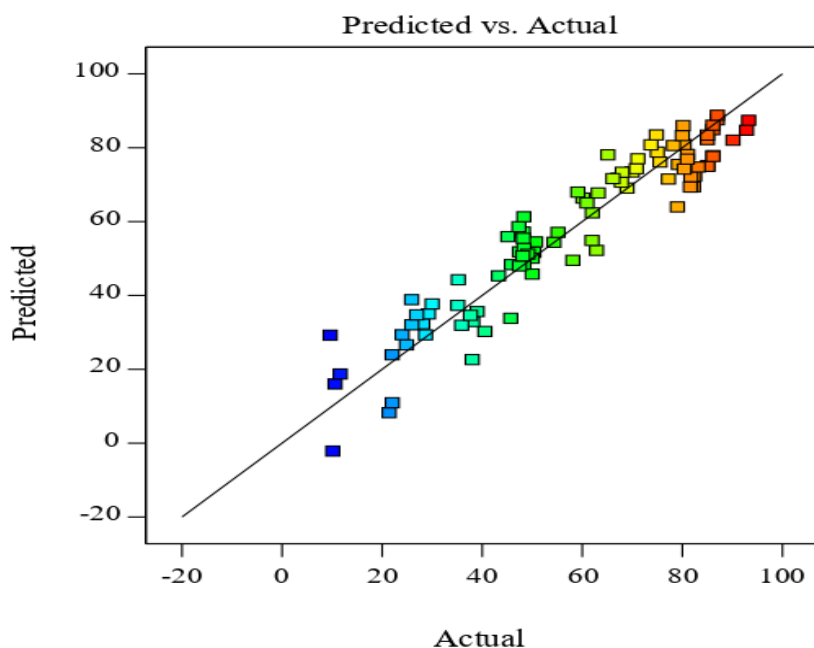
$$\begin{aligned} & \text{زمان} \times 0.009523 - (\text{زمان} \times \text{غلظت آلاینده}) + \text{درصد پرشدگی} \times \\ & 0.134647 + \text{زمان} \times 1/42435 + \text{غلظت آلاینده} \times 0.006605 + \\ & 14/71723 = \text{راندمان حذف} \end{aligned}$$

نمودار پراکندگی نرمال داده‌ها بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده در شکل ۱ رسم شده است. این نمودار مقادیر یا گروهی از مقادیر که توسط مدل پیش‌بینی نشده است را نشان می‌دهد. میزان  $R^2$  برابر ۰/۹ است. توزیع مناسب و نرمال نقاط اطراف خط راست، نشان دهنده توزیع مناسب خطاها است.

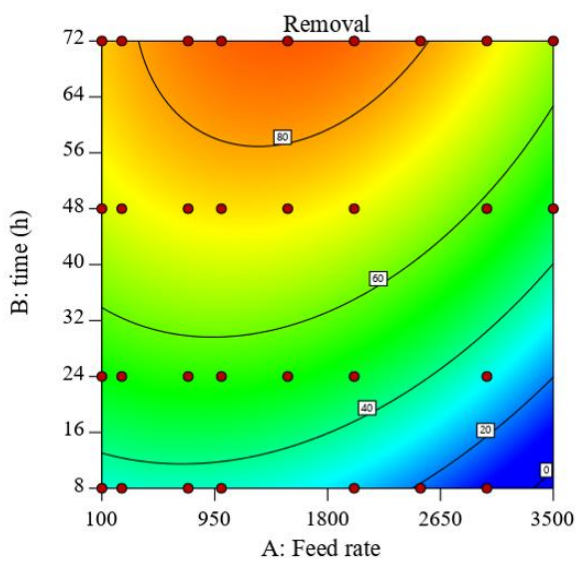


شکل ۱: پراکندگی نرمال داده‌ها در راکتور حاوی آنیلین

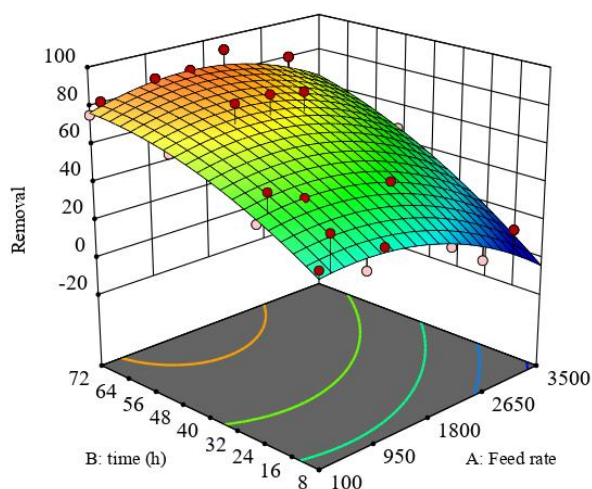
بهینه سازی و پیش بینی فرآیند بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)



شکل ۲: پراکندگی مقدار مانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی شده در راکتور حاوی آنیلین



(ب)



(الف)

شکل ۳: تاثیر برهمکنش متغیرهای همپوشانی زمان ماند و میزان غلظت آلاینده بر پاسخ راندمان حذف

## پیش بینی فرایند با استفاده از ANN

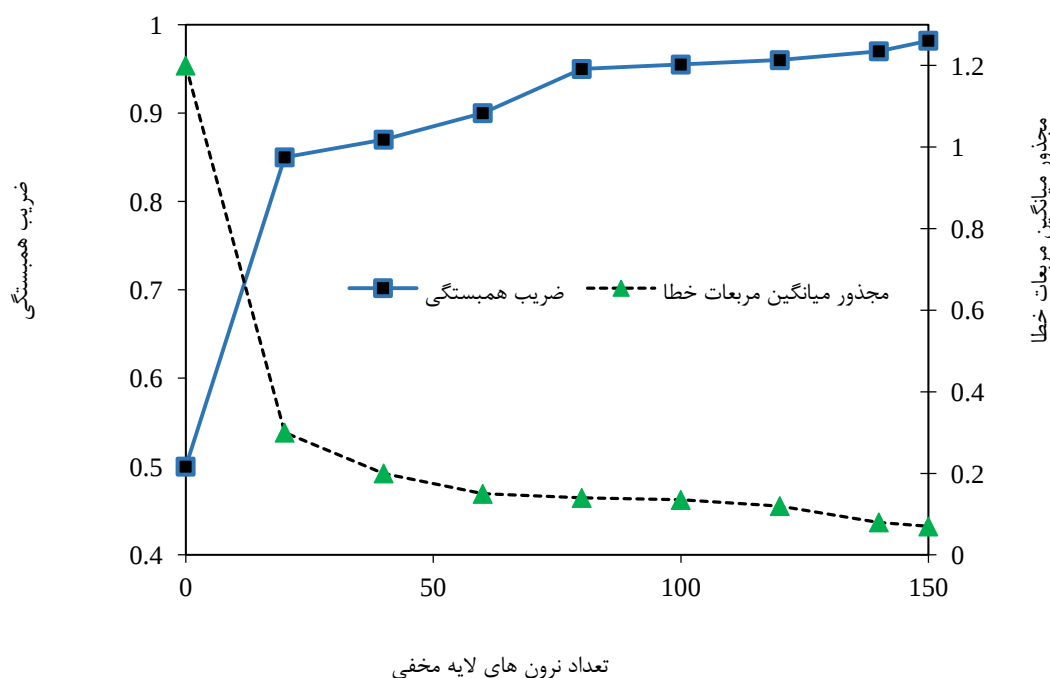
شکل ۴ نحوه تغییرات عملکرد این شبکه به ازای افزایش تعداد نرون‌های لایه مخفی را نشان می‌دهد. با افزایش تعداد نرون‌ها ضریب همبستگی تا مقدار ۱ افزایش و جذر میانگین مربعات خطا تا رسیدن به خطای هدف (صفر) کاهش می‌یابد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد نرون‌ها از صفر تا ۱۵۰، ضریب همبستگی تا ۰/۹۸۲ افزایش و جذر میانگین مربعات خطا تا ۰/۰۷ کاهش یافته است.

## پیش‌بینی راندمان حذف آنیلین در MBBR با

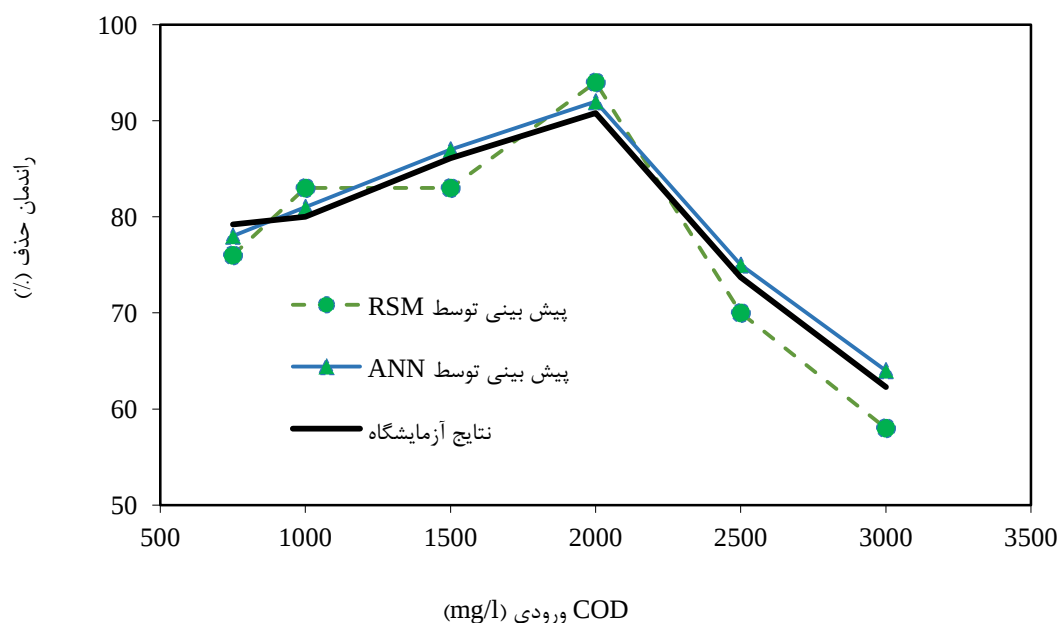
## روشن‌های ANN و RSM

مقایسه مدل ANN پایه شعاعی و RSM بر روی داده‌های

آزمایشگاهی دلنواز و همکاران جهت تصفیه فاضلاب حاوی آنیلین با استفاده از MBBR در زمان ماند ۷۲ ساعت و با درصد پرشدگی ۵۰ درصد در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است هر دو روش ANN و RSM روند قابل قبولی را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده‌اند. در روش RSM میزان RSME معادل ۴/۰۸ و  $R^2$  معادل ۹۴/۴۱ به دست آمد. در روش ANN نیز میزان RSME معادل ۱/۵۵ و  $R^2$  معادل ۹۸/۸۷ تعیین شد. با مقایسه میزان خطای این دو روش می‌توان گفت روش ANN پایه شعاعی با دقت بیشتر و میزان خطای کمتر روند داده‌ها را پیش‌بینی کرده است.



شکل ۴: نحوه تغییرات عملکرد شبکه پایه شعاعی به ازای افزایش تعداد نرون‌های لایه مخفی



شکل ۵: نمودار مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و روند پیش‌بینی با استفاده از روش ANN و RSM

## بحث

بالاترین راندمان حذف در COD معادل  $2000 \text{ mg/L}$  در زمان ماند ۷۲ ساعت حاصل شد. راندمان حذف در زمان ماند ۴۸ و ۷۲ ساعت در محدوده COD معادل  $500-1500 \text{ mg/L}$  بیشتر از سایر شرایط بهره برداری بود. با افزایش باردهی به سیستم راندمان حذف در زمان ماندهای اولیه کاهش چشمگیری پیدا کرد و افزایش چشمگیر راندمان حذف در بازه زمانی ۲۴ و ۴۸ ساعت ملاحظه شد. در راکتور حاوی آنیلین افزایش در راندمان حذف از بارگذاری‌های اولیه روند صعودی داشته است و از این مرحله به بعد کاهش در راندمان حذف به حاصل شد. نتایج تحقیق قادری و همکاران نیز نشان داد که افزایش زمان نگهداری، کاهش غلظت خوراک فاضلاب و افزایش درصد پر شدن مواد باعث افزایش راندمان حذف می‌شود.

علاوه بر این، هنگامی که دو پارامتر غلظت خوراک فاضلاب و میزان پر شدن رسانه‌ها ثابت بود، افزایش زمان

نگهداری از ۱۶ تا ۳۰ ساعت باعث افزایش راندمان حذف از ۷۱ تا ۸۳ درصد شد. وقتی دو پارامتر زمان نگهداری و نسبت پر شدن رسانه‌ها ثابت بوده است، کاهش در غلظت خوراک فاضلاب از ۵۰۰ به ۲۵۰ میلی گرم در لیتر، راندمان حذف را از ۷۲ تا ۸۸ درصد افزایش داد و در نهایت، هنگامی که دو پارامتر زمان نگهداری و میزان فاضلاب تغذیه ثابت بود، افزایش میزان پر شدن رسانه از ۳۵ تا ۵۵ درصد، راندمان حذف را از ۷۴ درصد به ۸۵ درصد افزایش داد. بنابراین کاهش غلظت فاضلاب بیشترین تاثیر را بر بهبود راندمان حذف آلاینده‌های نفتی را داشته است. همچنین می‌توان گفت بر اساس نتایج این مطالعه، سیستم پیشنهادی توانایی زیادی در حذف آلودگی‌های نفتی از فاضلاب دارد.

مطابق آنالیز واریانس صورت گرفته، مقدار p-Value عوامل (A) و (B) و  $(A^2)$  و  $(B^2)$  و (A.B) کمتر از ۰/۰۰۵ است و در نتیجه اهمیت این عوامل در راندمان حذف قابل ملاحظه است. می‌توان گفت در این مدل میزان خوراک و

خطای شبکه به مقدار تعیین شده در هدف برسد. حداکثر تکرار در این شبکه‌ها نیز برابر تعداد داده‌ها می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

- بررسی نتایج توسط RSM که در قالب ۹۶ آزمایش طراحی شد، نشان می‌دهد که MBBR با ضریب رگرسیون ۰/۹ قابلیت تصفیه آلاینده آنیلین را دارد و بیشترین مقدار حذف در میزان خوراک ۱۷۰۰ میلی گرم در متر مکعب و زمان ۷۲ ساعت در درصد پرشدگی راکتور با آکنه‌ی ۵۶/۸۲ درصد است.
- با مقایسه عملکرد سیستم در درصد پرشدگی‌های ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد در راکتور مورد آزمایش، با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Design Expert این نتیجه حاصل شده که فاکتور پرشدگی در راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک، معنی‌دار نیست، یا به عبارت دیگر تغییر در میزان پرشدگی راکتور معنی‌دار نمی‌باشد.
- در مدل ANN پایه شعاعی با افزایش تعداد نرون‌ها ضریب همبستگی تا مقدار ۱ افزایش و جذر میانگین مربعات خطا تا رسیدن به خطای هدف (صفر) کاهش می‌یابد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد نرون‌ها از صفر تا ۱۵۰، ضریب همبستگی تا ۰/۹۸۲ افزایش و جذر میانگین مربعات خطا تا ۰/۰۷ کاهش یافته است
- با مقایسه مدل ANN پایه شعاعی و RSM و مقایسه میزان خطای این دو روش می‌توان گفت روش ANN پایه شعاعی با دقت بیشتر و میزان خطای کمتر روند داده‌ها را پیش‌بینی کرده است.

زمان ماند اهمیت بیشتری نسبت به درصد پرشدگی راکتور دارد و درصد پرشدگی راکتور فاکتور قابل توجهی نیست. در حالت کلی حتی با وجود داده‌های طبیعی انتظار برخی پراکنش‌های متوسط وجود دارد، در نتیجه مدل به دست آمده معنادار بوده و پاسخ‌های پیش‌بینی شده با پاسخ‌های واقعی سازگاری دارند، بنابراین می‌توان گفت مدل سطح پاسخ مدل مناسبی به منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی راندمان حذف با استفاده از راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک می‌باشد. نتایج ANOVA در تحقیق جمالی و همکاران نشان داد که دو متغیر مستقل pH و غلظت فرات پتاسیم و اثرات متقابل آن‌ها، اثرات معنی‌داری در حذف متغیرهای پاسخ COD، کدورت، رنگ و TSS دارند. شرایط بهینه برای حذف این چهار آلاینده برای ۱۶۰ میلی گرم در لیتر فرات پتاسیم و برای pH برابر ۴/۵ بود. در این شرایط میزان حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب ۸۶، ۸۵، ۸۴ و ۸۳ درصد بود. همچنین می‌توان گفت مدل درجه دوم آماری، برازش خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی دارد. در نتیجه روش سطح پاسخ با حداقل خطا، در مقایسه با روش‌های سنتی، روش مطلوبی برای بهینه‌سازی فرایند تصفیه فاضلاب صنایع فرش با استفاده از فرات پتاسیم است

در ایجاد شبکه‌های پایه شعاعی برخلاف شبکه‌های پیش-خور، امکان تغییر ساختار زیادی وجود ندارد. این شبکه از دولایه پنهان و خروجی با توابع انتقال Radbas و خطی (Purelin) تشکیل شده‌اند. تعداد داده‌ها و بردارهای ورودی در عملکرد این شبکه‌ها نقش به‌سزایی دارند. پس از اجرای شبکه پایه شعاعی تعداد نرون‌های لایه مخفی از ۰ تا تعداد تعیین شده (حداکثر تعداد نرون‌ها برابر تعداد داده‌های ورودی) و در هر تکرار (epoch) یک نرون افزایش یافته تا

## References

1. Delnavaz M, Ayati B, Ganjidoust H. Treatment of Wastewater Containing Aromatic Amine compounds Using Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), Master of

Science thesis in Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, ۲۰۱۷ [In Persian].

۶. Bering S, Mazur J, Tarnowski K, Janus M, Mozia S, Morawski A.W. The application of moving bed bio-reactor (MBBR) in commercial laundry wastewater treatment. *Sci Total Environ*, ۲۰۱۸;۶۲۷: ۱۶۴۳-۸.
۷. Chen S, Sun F, Chung J.S. Treatment of pesticide wastewater by moving-bed biofilm reactor combined with Fenton-coagulation pretreatment. *J. Hazard Mater*, ۲۰۰۷;۱۴۴(۱-۲): ۵۷۷-۸۴.
۸. Devulapalli R, Jones F. Separation of aniline from aqueous solutions using emulsion liquid membranes. *J. Hazard Mater*, ۱۹۹۹;۷۰(۳):۱۵۷-۷۰.
۹. Brillas E, Casado J. Aniline degradation by Electro-Fenton® and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater treatment. *Chemosphere* ۲۰۰۲;۴۷(۳): ۲۴۱-۴۸.
۱۰. Qi X.H, Zhuang Y.Y, Yuan Y.C, Gu W.X. Decomposition of aniline in supercritical water. *J. Hazard Mater*, ۲۰۰۲;۹۰(۱): ۵۱-۶۲.
۱۱. Zangoeei H, Delnavaz M, Asadollahfardi G. Prediction of coagulation and flocculation processes using ANN models and Fuzzy regression, *Water Sci Technol*, ۲۰۱۶;۷۴(۶): ۱۲۹۶-۱۳۱۱.
۱۲. Qaderi, F, Sayahzadeh A, Azizi M. Efficiency optimization of petroleum wastewater treatment by using of serial moving bed biofilm reactors. *J. Clean Prod*, ۲۰۱۸;۱۹۲: ۶۶۵-۷۷.
۱۳. Navamani K.D, Aditya Narayana B.C, Arivazhagan M. Removal of high concentration of sulfate from pigment industry effluent by chemical precipitation using barium chloride: RSM and ANN modeling approach. *J environ manage*, ۲۰۱۰;۲۰۶: ۶۹-۷۶.
۱۴. Jaafarzadeh Haghighifard N, Mehrabani Ardekani M.M, Nabizadeh Nodehi R, Yazdanbakhsh A.R. Optimization of Moving Bed Biofilm Reactor Using Taguchi Method, *Iranian J Health and Environ*, ۲۰۰۹;۲(۱): ۱-۱۴ [In Persian].
۱۵. Zinatizadeh A, Ghaytooli E. Simultaneous nitrogen and carbon removal from wastewater at different operating conditions in a moving bed biofilm reactor (MBBR): process modeling and optimization. *J Taiwan Inst Chem Eng*, ۲۰۱۵;۵۳: ۹۸-۱۱۱.
۱۶. Jamali H.A, Dindarloo K, Panahi fard M, Moradnia M. Response Surface Methodology to Optimize Wastewater Treatment in Carpet Industries by Potassium Ferrate, *Water Waste*, ۲۰۱۸;۲۹(۲): ۳۸-۴۷ [In Persian].
۱۷. Delnavaz M, Ayati B, Ganjidoust H. Prediction of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) performance for treatment of aniline using artificial neural networks (ANN), *J. hazard mater*, ۲۰۱۰;۱۷۹(۱-۳): ۷۶۹-۷۷۵.
۱۸. Montgomery D, Myers R. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, Raymond H. Meyers, Douglas C. Montgomery, A Wiley-Interscience Publications, ۲۰۱۶.
۱۹. Karimifard S, Alavi Moghaddam M.R. Application of response surface methodology in physicochemical removal of dyes from wastewater: A critical review, *Sci Total Environ*, ۲۰۱۸; ۶۴۰-۶۴۱: ۷۷۲-۹۷.
۲۰. Nasr M.S, Moustafa M.A.E, Seif H.A.E, Kobrosy G.E.L. Application of Artificial Neural Network (ANN) for the prediction of EL-AGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT Alex Eng J, ۲۰۱۲; ۵۱(۱): ۳۷-۴۳.
۲۱. Cohen S, Intrator N. Automatic model selection in a hybrid perceptron/ radial network, *Inform Fusion*, ۲۰۰۲;۳(۴): ۲۵۹-۶۶.

# Optimization and Prediction of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Using Surface Response Method (RSM) and Artificial Neural Network (ANN)

Mohammad Delnavaz\*, Mahsa Peidad

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

\* E-mail: delnavaz@khu.ac.ir

Received: 1 Feb 2020 ; Accepted: 14 Apr 2020

## ABSTRACT

**Background** In this study, the optimization and prediction of the efficiency of a moving bed biofilm reactor (MBBR) in the treatment of synthetic wastewater containing organic material including aniline was investigated using response surface methodology and artificial neural network.

**Materials and Methods:** Modeling results were applied to a 5-liter volume reactor filled with 3%, 5% and 7% LECA lightweight aggregates as a growth medium for microorganisms and biofilm layer formation. In order to determine the optimum conditions in the experiments results and also to predict the tests not performed, three factors were feed levels at levels of 100 to 3000 mg/L, retention time of 1 to 24 hours and filling percentage of 30 and 50 and 70% were performed using RSM. The accuracy of the presented models was evaluated by ANOVA. Prediction of system removal efficiency using radial basis ANN was also investigated.

**Results:** Process optimization showed that the optimum conditions for maximum removal were at feed rate of 1700 mg/l and 24 hours at 56.82% filling percentage. The results of the process prediction using radial basis ANN also showed that in the best network structure with Radbas and linear functions (Purelin) with  $R^2 = 0.982$  can predict the efficiency.

**Conclusion:** By comparing the radial basis ANN model and RSM and comparing the error rates of these two methods, it can be concluded that the radial base ANN method predicts the data process more accurately and with lower error.

**Keywords:** Moving Bed Biofilm Reactor, Aniline, Surface Response Method, Artificial Neural Network