مجله مهندسی بهداشت محیط، بهار ۱۳۹۹، سال ۷، شماره ۳ :۳۱۳-۲۹۸

# 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*، 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 سطح پاسخ (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 میکروارگانسیم‌ها و تشکیل لایه بیوفیلم پر شده بود، استفاده گردید. برای تعیین شرایط بهینه در آزمایش-های انجام شده و همچنین پیش‌بینی آزمایش‌های انجام نشده، سه عامل میزان خوراک در سطوح بین ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌گرم 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 پیش بینی فرایند با استفاده از ANN پایه شعاعی نیز نشان داد که در بهترین ساختار شبکه با توابع انتقال Radbas و خطی (Purelin) با $R^2$=۰/۹۸۲ قادر به پیش بینی 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

* **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) ۱۰۰۰۰ 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.[۱-۲] 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.[۳]

آنیلین یا آمینو بنزن یک ترکیب آلی با فرمول $C_6H_5NH_2$ می‌باشد. این ترکیب آلی شامل یک حلقه بنزنی است که به یک گروه آمینی اتصال دارد.[۴] 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.[۵] 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.[۶] 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 اخیرا در پژوهش‌های زیست محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.[۷] استفاده از روش-های 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 آلاینده های 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.[۸] 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.[۹] 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 میلی‌گرم 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 چنبیه 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.[10] 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 ٤ میلی‌گرم بر لیتر بود.[11] 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.[12] Delnavaz و همکاران کارایی راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) برای حذف آلاینده‌ی 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 می‌دهد.[13]

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، روش‌های متفاوتی ارائه می‌کند که در این تحقیق از روش RSM استفاده شده است. این روش باعث کاهش تعداد آزمایشات، کاهش هزینه‌های اقتصادی و همچنین به کارگیری روش‌هایی در مصرف درست انرژی شده و در نتیجه امکان طراحی و چیدمان آزمایش‌ها، بهینه‌سازی و پیش‌بینی روند آزمایش را فراهم می‌کند. 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 روش‌های آزمایشگاهی بحث و نتیجه-گیری شده است، آن‌چه که در این تحقیق مورد نظر قرار گرفته است، بررسی بازده و بهینه‌سازی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک حاوی آلاینده‌های آلی است.

## روش انجام تحقیق

در این پژوهش از اطلاعات آزمایشگاهی دلنواز و همکاران که در سال ۱۳۸٦ با استفاده از راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک، تصفیه فاضلاب سنتزی و حذف آلاینده‌های آلی را مورد آزمایش قرار داده‌اند، استفاده شده است. آکنه‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع سنگدانه‌های لیکا بود. فاضلاب مورد بررسی شامل آنیلین بود که درجه خلوص ۹۹ درصد از شرکت Merck خریداری شد. همان‌طور که در بالا ذکر شد، در این پژوهش از اطلاعات آزمایشگاهی دلنواز و همکاران که در سال ۱۳۸٦ با استفاده از راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک، تصفیه فاضلاب سنتزی و حذف آلاینده‌های آلی را مورد آزمایش قرار داده‌اند، استفاده شده است.[1] بدین صورت که آزمایش‌های انجام گرفته و پاسخ‌های به دست آمده توسط نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفت.

## بهینه سازی با استفاده از RSM

RSM از جمله روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد که با استفاده از مجموعه ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری مسائل را مدل می‌کند. هدف بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. یک آزمایش یک سری از آزمون‌هاست که اجرا نامیده می‌شود، در هر آزمایش تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند. در طرح‌های سطح پاسخ ساخت مدل‌های سطح پاسخ یک فرآیند تکراری می‌باشد. در این روش به محض اینکه یک مدل تقریبی به دست آمد، مورد آزمون قرار می‌گیرد که آیا جواب رضایت-بخش است یا خیر، اگر جواب تایید نشود تخمین فرآیند دوباره شروع می‌شود و آزمایشات بیشتری انجام می‌گیرد. در طراحی آزمایش‌ها هدف، شناسایی و تحلیل متغیرهای موثر بر خروجی‌ها با کمترین تعداد آزمایش است. این روش با کشف میزان پاسخ بهینه‌ی هر یک از متغیر های طراحی به بهترین سطح پاسخ دست می‌یابد.

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

۱- انتخاب متغیرهای مستقل بر سیستم،

۲- انتخاب طرح آزمایش و انجام آزمایش‌ها با توجه به زمینه آزمایشی انتخاب‌شده

۳- تحلیل آماری ریاضی از داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از طریق تابع چند جمله‌ای مناسب

٤- ارزیابی تناسب مدل

۵- تائید لزوم و امکان انجام یک جابجایی در جهت منطقه مطلوب

٦- به دست آوردن مقادیر بهینه برای هر متغیر مورد مطالعه[١٤]

به‌منظور 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 نرم‌افزار آماری منحصراً به انجام طراحی آزمایش‌ها می‌پردازد. همچنین جهت کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز، مقایسه تست‌های غربالگری، بهینه‌سازی پارامترهای طراحی، طرح‌های مخلوط چند فاکتوره و قابل استفاده است. این نرم‌افزار با کمک آزمون ماتریس برای غربالگری آزمون‌ها با عوامل مختلف تا ۵۰ عامل و فاکتور را پوشش می‌دهد.

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

$$\gamma = \beta_{\cdot} + \sum_{i=1}^{n} \beta_i X_i \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} X_i^{2} + \sum \sum_{j<i}^{n} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \qquad (1)$$

در این معادله $\gamma$، متغیر پاسخ، $\beta_{\cdot}$ 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 می‌گیرد که در ادامه تعریف عوامل موجود در این جدول پرداخته می‌شود.

جهت مناسب بودن مدل از پارامتر ضریب برازش ($R^{2}$) مطابق معادله (۲) اسفتاده شد. همانطور که مشخص است هرچه این ضریب به ۱ یا به عبارت دیگر به ۱۰۰ درصد نزدیکتر باشد قابل قبول‌تر است.

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

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 می‌گویند. 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 می‌کنیم به دست می‌آید که در اکثر طرح‌ها سطح اطمینان ۰/۹۵ را در نظر می‌گیرند.

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 داده‌ها توسط نرم‌افزار پرداخته شده است.

ضریب رگرسیون تعدیل یافته ($R^2_{adjust}$) که در بررسی RSM کاربرد دارد مانند ضریب رگرسیون به دست می‌آید 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 می‌کند. 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 می‌شود (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 پیش‌بینی شده و $R^2$ ضریب رگرسیون مدل است.

ضریب واریانس یا ضریب پرکندگی معیاری است که برای اندازه‌گیری توزیع داده‌های آماری به کار می‌رود که از معادله ٤ به دست می‌آید.

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

در این معادله، $\partial$ انحراف معیار است که نشان‌دهنده میزان فاصله داده‌ها از مقدار میانگین است و M میانگین داده‌ها است. هرچه مقدار ضریب واریانس کمتر باشد مدل به دست آمده اعتبار بالاتری دارد. ضریب واریانس برای هر متغیر وابسته محاسبه می‌شود 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.[15]

برای تعیین شرایط بهینه در آزمایش‌های انجام شده توسط دلنواز و همکاران و همچنین پیش‌بینی آزمایش‌هایی 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 نرم‌افزار داده شد و بررسی‌ها صورت گرفت.

## پیش بینی فرایند با استفاده از ANN پایه شعاعی

با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن پدیده‌های زیست-محیطی از جمله فرآیند تصفیه آب و فاضلاب، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی با عملکردی مشابه مغز انسان به عنوان ابزاری مناسب قابل توجیه است.[16] روند کلی کارکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در قالب رابطه‌های ٦ و ٧ قابل مشاهده است.

$$y \quad (6)$$

$$v \quad (7)$$

که در آن $y_i^m$ ورودی‌های مدل، $v_i^m$ خروجی لایه m ام، f معرف تابع انتقال، L تعداد رابطها با لایه‌های قبلی، $w_{ji}^{m\ 1}$ معادل وزن هر رابط و $b_i^m$ معرف بیاس یعنی جز ثابت تابع انتقال می‌باشد.

تعداد بهینه لایه‌های مخفی در شبکه‌های عصبی مصنوعی و همچنین تعداد مطلوب نرون‌ها در هر لایه با استفاده از سعی و خطا مشخص می‌گردد. اگرچه ثابت شده است که شبکه‌ای با یک لایه مخفی قادر به مدلسازی هر تابع پیوسته‌ای با تعداد درجات آزادی کافی می‌باشد. کل اطلاعات استفاده شده برای مدلسازی 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 بهینه‌ترین مدل برای پیش‌بینی فرایند بیولوژیکی از مدل‌های 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 | ۳۰۰۰ | |
| زمان ماند | ۸ | | ۲٤ | | ٤۸ | | | ۷۲ | | |
| درصد پرشدگی | | ۳۰ | | | ۵۰ | | | ۷۰ | | |

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.

$$\mathrm{RSME} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_i^*)^2} \qquad (۵)$$

در این معادله پارامتر N تعداد داده‌ها، $X_i$ داده آزمایشگاهی یا واقعی و $X_i^*$ داده‌ی پیش‌بینی شده می‌باشد.

در این تحقیق از شبکه‌های پایه شعاعی جهت پیش بینی راندمان سیستم استفاده شده است. نحوه عمل‌کرد این شبکه‌ها به‌این صورت است که فرآیند آموزش با افزایش تعداد نرون‌های لایه پنهان تا رسیدن تابع کارایی به میزان هدف و یا تا رسیدن به حداکثر تعداد نرون‌های تعیین‌شده ادامه پیدا می‌کند. تابع کارایی مورد استفاده، پارامتر میانگین مربعات خطا می‌باشد. یکی از نکات قابل توجه در مورد شبکه‌های پایه شعاعی عدم نیاز به هیچ‌گونه پیش‌فرضی در مورد شکل مدل در فرآیند مدل‌سازی می‌باشد. این شبکه‌ها به طور کلی یک مدل مبتنی بر داده هستند.[۱۷] در شبکه‌های پایه‌شعاعی تعداد نرون‌های لایه پنهان از صفر تا حداکثر تعداد مجاز نرون‌ها یعنی تعداد داده‌های ورودی و در هر تکرار یک نرون افزایش یافته و به ازای آن میانگین مربعات خطا محاسبه می‌گردد.

## 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 بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بهره برداری سیستم در شرایط مختلف راه اندازی در جدول ۲ ارائه شده است. همانطورکه ملاحظه می‌گردد 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 ماندهای ۸ و ۲٤ 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 ۲٤ ساعت به اندازه ٤۱ درصد می‌باشد. در COD معادل ۱۰۰۰mg/L راندمان حذف در زمان ماندهای ۸ و ۲٤ ساعت به ترتیب ۳۵ و ۵٤ درصد است که این مقادیر برای COD معادل ۱۵۰۰mg/L به اندازه ۲ درصد برای زمان ماند ۸ ساعت و ٤ درصد برای زمان ماند ۲٤ ساعت افزایش داشته است که بالاترین راندمان حذف نیز برای این زمان ماندها

می‌باشد. راندمان حذف در زمان ماند ٤٨ و ٧٢ ساعت در محدوده COD معادل ١٥٠٠mg/L–٥٠٠ بالا بود و با روند ملایمی از ٧٤ درصد در COD معادل ٧٥٠mg/L تا ٨٥ درصد در COD معادل ١٥٠٠mg/L در زمان ماند ٤٨ ساعت افزایش داشت. با افزایش باردهی به سیستم راندمان حذف در زمان ماندهای اولیه کاهش چشمگیری پیدا کرده است به نحوی که در COD معادل ٢٥٠٠mg/L راندمان حذف در زمان ماند ٨ و ٢٤ ساعت به ترتیب ١٥ و ٣٠ درصد می‌باشد. با مراجعه به نمودار مشاهده می‌شود که افزایش چشمگیر راندمان حذف در بازه زمانی ٢٤ و ٤٨ ساعت می‌باشد به نحوی که بیشترین اختلاف در COD معادل ٢٠٠٠mg/L که بهینه ترین حالت راندمان حذف برای این راکتور می‌باشد به اندازه ٣٦ درصد بدست آمده است و این روند اختلاف در راندمان حذف از باردهی اولیه به سیستم (COD معادل ٥٠٠mg/L) تا مراحل آخر باردهی به سیستم (COD معادل ٤٠٠٠mg/L) مشاهده می‌شود. در راکتور حاوی آنیلین افزایش در راندمان حذف از بارگذاری‌های اولیه روند صعودی داشته است و همانطور که ذکر شد در COD معادل ٢٠٠٠mg/L بیشترین میزان حذف به اندازه ٩١ درصد بدست آمد. از این مرحله به بعد کاهش در راندمان حذف به اندازه ١٧ درصد در زمان ماند ٧٢ ساعت در COD معادل ٢٥٠٠mg/L حاصل شد. این روند با ادامه باردهی به سیستم ادامه یافت به نحوی که در COD معادل ٣٥٠٠mg/L راندمان در زمان ماند ٧٢ ساعت به اندازه ٦٠ درصد رسید که با بررسی سیستم در زمان ماند ١٢٠ ساعت افزایشی به اندازه ٤ درصد حاصل شد.

**جدول ٢:** 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 پرشدگی | B:زمان ماند | A: غلظت آلاینده ورودی | تکرار | درصد حذف | C: درصد پرشدگی | B:زمان ماند | A: غلظت آلاینده ورودی | تکرار |
| ٤٨/٣ | ٥٠ | ٢٤ | ١٥٠٠ | ٤٩ | ٤٠/٥ | ٣٠ | ٨ | ١٠٠ | ١ |
| ٤٨/٢ | ٧٠ | ٢٤ | ١٥٠٠ | ٥٠ | ٣٨/١ | ٥٠ | ٨ | ١٠٠ | ٢ |
| ٨٢/٤ | ٣٠ | ٤٨ | ١٥٠٠ | ٥١ | ٣٩ | ٧٠ | ٨ | ١٠٠ | ٣ |
| ٨٥ | ٥٠ | ٤٨ | ١٥٠٠ | ٥٢ | ٤٥/٨ | ٣٠ | ٢٤ | ١٠٠ | ٤ |
| ٨٦/١ | ٧٠ | ٤٨ | ١٥٠٠ | ٥٣ | ٤٩/٢ | ٥٠ | ٢٤ | ١٠٠ | ٥ |
| ٨٥ | ٣٠ | ٧٢ | ١٥٠٠ | ٥٤ | ٤٨/٥ | ٧٠ | ٢٤ | ١٠٠ | ٦ |
| ٨٦ | ٥٠ | ٧٢ | ١٥٠٠ | ٥٥ | ٦٠/١ | ٣٠ | ٤٨ | ١٠٠ | ٧ |
| ٨٧ | ٧٠ | ٧٢ | ١٥٠٠ | ٥٦ | ٦٨/٩ | ٥٠ | ٤٨ | ١٠٠ | ٨ |
| ٢٢ | ٣٠ | ٨ | ٢٠٠٠ | ٥٧ | ٦٧/١ | ٧٠ | ٤٨ | ١٠٠ | ٩ |
| ٢٤/٨ | ٥٠ | ٨ | ٢٠٠٠ | ٥٨ | ٦٩/٩ | ٣٠ | ٧٢ | ١٠٠ | ١٠ |
| ٢٨/٨ | ٧٠ | ٨ | ٢٠٠٠ | ٥٩ | ٧٥/٥ | ٥٠ | ٧٢ | ١٠٠ | ١١ |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۵۰ | ۳۰ | ۲٤ | ۲۰۰۰ | ٦۰ | ۷۵ | ۷۰ | ۷۲ | ۱۰۰ | ۱۲ |
| ٤۸/۳ | ۵۰ | ۲٤ | ۲۰۰۰ | ٦۱ | ٤۵/۷ | ۵۰ | ۸ | ۲۵۰ | ۱۳ |
| ٤۹/۱ | ۷۰ | ۲٤ | ۲۰۰۰ | ٦۲ | ۵۸/۱ | ۳۰ | ۲٤ | ۲۵۰ | ۱٤ |
| ۸۲/۲ | ۳۰ | ٤۸ | ۲۰۰۰ | ٦۳ | ٦۲/۸ | ۵۰ | ۲٤ | ۲۵۰ | ۱۵ |
| ۸۱/۷ | ۵۰ | ٤۸ | ۲۰۰۰ | ٦٤ | ٦۱/۹ | ۷۰ | ۲٤ | ۲۵۰ | ۱٦ |
| ۸۳/۱ | ۷۰ | ٤۸ | ۲۰۰۰ | ٦۵ | ۵۹/۱ | ۳۰ | ٤۸ | ۲۵۰ | ۱۷ |
| ۹۰/۱ | ۳۰ | ۷۲ | ۲۰۰۰ | ٦٦ | ٦۷/۸ | ۵۰ | ٤۸ | ۲۵۰ | ۱۸ |
| ۹۲/۸ | ۵۰ | ۷۲ | ۲۰۰۰ | ٦۷ | ٦۸ | ۷۰ | ٤۸ | ۲۵۰ | ۱۹ |
| ۹۳/۲ | ۷۰ | ۷۲ | ۲۰۰۰ | ٦۸ | ۷۹/۲ | ۳۰ | ۷۲ | ۲۵۰ | ۲۰ |
| ۱۰/٦ | ۳۰ | ۸ | ۲۵۰۰ | ٦۹ | ۸۱ | ۵۰ | ۷۲ | ۲۵۰ | ۲۱ |
| ۱۱/٦ | ۵۰ | ۸ | ۲۵۰۰ | ۷۰ | ۸۰/۳ | ۷۰ | ۷۲ | ۲۵۰ | ۲۲ |
| ۲۵/۹ | ۳۰ | ۲٤ | ۲۵۰۰ | ۷۱ | ۲۸/۱ | ۳۰ | ۸ | ۷۵۰ | ۲۳ |
| ۳۵/۲ | ۷۰ | ۲٤ | ۲۵۰۰ | ۷۲ | ۲۹/۲ | ۵۰ | ۸ | ۷۵۰ | ۲٤ |
| ۷۹ | ۳۰ | ٤۸ | ۲۵۰۰ | ۷۳ | ۳۰ | ۷۰ | ۸ | ۷۵۰ | ۲۵ |
| ۸۱/٦ | ۷۰ | ٤۸ | ۲۵۰۰ | ۷٤ | ۵۰/۳ | ۳۰ | ۲٤ | ۷۵۰ | ۲٦ |
| ٦۵/۱ | ۳۰ | ۷۲ | ۲۵۰۰ | ۷۵ | ۵٤/۳ | ۵۰ | ۲٤ | ۷۵۰ | ۲۷ |
| ۷۳/۷ | ۵۰ | ۷۲ | ۲۵۰۰ | ۷٦ | ۵۵/۱ | ۷۰ | ۲٤ | ۷۵۰ | ۲۸ |
| ۷٤/۸ | ۷۰ | ۷۲ | ۲۵۰۰ | ۷۷ | ٦٦/۱ | ۳۰ | ٤۸ | ۷۵۰ | ۲۹ |
| ۲۱/٤ | ۵۰ | ۸ | ۳۰۰۰ | ۷۸ | ۷۰/۸ | ۵۰ | ٤۸ | ۷۵۰ | ۳۰ |
| ۲۲ | ۷۰ | ۸ | ۳۰۰۰ | ۷۹ | ۷۱/۱ | ۷۰ | ٤۸ | ۷۵۰ | ۳۱ |
| ۲٤ | ۳۰ | ۲٤ | ۳۰۰۰ | ۸۰ | ۷۸/۲ | ۳۰ | ۷۲ | ۷۵۰ | ۳۲ |
| ۲۵/۹ | ۵۰ | ۲٤ | ۳۰۰۰ | ۸۱ | ۸۰ | ۵۰ | ۷۲ | ۷۵۰ | ۳۳ |
| ۲٦/۹ | ۷۰ | ۲٤ | ۳۰۰۰ | ۸۲ | ۸۰/۱ | ۷۰ | ۷۲ | ۷۵۰ | ۳٤ |
| ٤۵/۱ | ۳۰ | ٤۸ | ۳۰۰۰ | ۸۳ | ۳۵/۹ | ۳۰ | ۸ | ۱۰۰۰ | ۳۵ |
| ٤۷/۳ | ۵۰ | ٤۸ | ۳۰۰۰ | ۸٤ | ۳۷/٦ | ۵۰ | ۸ | ۱۰۰۰ | ۳٦ |
| ٤۸/۳ | ۷۰ | ٤۸ | ۳۰۰۰ | ۸۵ | ۳۵/۱ | ۷۰ | ۸ | ۱۰۰۰ | ۳۷ |
| ۷۷/۲ | ۳۰ | ۷۲ | ۳۰۰۰ | ۸٦ | ٤۷/۵ | ۳۰ | ۲٤ | ۱۰۰۰ | ۳۸ |
| ۸۰/٤ | ۵۰ | ۷۲ | ۳۰۰۰ | ۸۷ | ۵۰/٦ | ۵۰ | ۲٤ | ۱۰۰۰ | ۳۹ |
| ۸۱ | ۷۰ | ۷۲ | ۳۰۰۰ | ۸۸ | ٤۸/۲ | ۷۰ | ۲٤ | ۱۰۰۰ | ٤۰ |
| ۱۰/۱ | ۷۰ | ۸ | ۳۵۰۰ | ۸۹ | ۸۲/٤ | ۳۰ | ٤۸ | ۱۰۰۰ | ٤۱ |
| ۳۸ | ۷۰ | ۲٤ | ۳۵۰۰ | ۹۰ | ۸۵ | ۵۰ | ٤۸ | ۱۰۰۰ | ٤۲ |
| ٤۳/۲ | ۳۰ | ٤۸ | ۳۵۰۰ | ۹۱ | ۸٦/۱ | ۷۰ | ٤۸ | ۱۰۰۰ | ٤۳ |
| ٤۷/٤ | ۵۰ | ٤۸ | ۳۵۰۰ | ۹۲ | ۸۵ | ۳۰ | ۷۲ | ۱۰۰۰ | ٤٤ |
| ٤۸/۱ | ۷۰ | ٤۸ | ۳۵۰۰ | ۹۳ | ۸۳/۱ | ۵۰ | ۷۲ | ۱۰۰۰ | ٤۵ |
| ٦۲ | ۳۰ | ۷۲ | ۳۵۰۰ | ۹٤ | ۸۷ | ۷۰ | ۷۲ | ۱۰۰۰ | ٤٦ |
| ٦۰/۹ | ۵۰ | ۷۲ | ۳۵۰۰ | ۹۵ | ۹/٦ | ۳۰ | ۸ | ۱۵۰۰ | ٤۷ |
| ٦۳/۲ | ۷۰ | ۷۲ | ۳۵۰۰ | ۹٦ | ۵۰ | ۳۰ | ۲٤ | ۱۵۰۰ | ٤۸ |

آنالیز واریانس پرکاربردترین تکنیک به منظور تفسیر نتایج آماری است، نتایج تحلیل واریانس برای راندمان حذف در راکتور حاوی آنیلین در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، جمله‌های خطی (A) و (B)، جمله‌های درجه دوم ($A^2$) و ($B^2$) و جمله برهم‌کنش (A.B) که به معنای برهم‌کنش میزان خوراک‌دهی و زمان ماند است، با اهمیت هستند و جمله خطی (C)، جمله درجه دوم ($C^2$) و برهم‌کنش (A.C) و (B.C) که به معنای برهم‌کنش درصد پرشدگی و زمان ماند و هم‌چنین برهم‌کنش درصد پرشدگی و میزان خوراک است، بی‌اهمیت می‌باشد.

همانطور که در جدول ٤ مشاهده می‌شود مقدار $R^2$=۰/۹۰ برای معادله به‌دست‌آمده، که این مقدار نشان‌دهنده همپوشانی مناسب داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی‌شده 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** | ٤٣٩٦٤/١٤ | ٩ | ٤٨٨٤/٩٠ | ٨٦/٧٧ | <۰/۰۰۰۱ |
| -Aنرخ خوراک | ٥٧٩٥/٥٥ | ١ | ٥٧٩٥/٥٥ | ١٠٢/٩٤ | <۰/۰۰۰۱ |
| -Bزمان ماند | ٣٩٢٧٦/٣٠ | ١ | ٣٩٢٧٦/٣٠ | ٦٩٧/٦٤ | <۰/۰۰۰۱ |
| -Cدرصد پرشدگی | ٥٧١/٢٧ | ١ | ٥٧١/٢٧ | ١٠/١٥ | ۰/۰۰۲۰ |
| AB | ١٠٦٩/٠٢ | ١ | ١٠٦٩/٠٢ | ١٨/٩٩ | <۰/۰۰۰۱ |
| AC | ١١٤/١٩ | ١ | ١١٤/١٩ | ٢/٠٣ | ۰/١٥٨٠ |
| BC | ٨٧/٦٢ | ١ | ٨٧/٦٢ | ١/٥٦ | ۰/٢١٥٦ |
| A□ | ٢٩١٢/١٦ | ١ | ٢٩١٢/١٦ | ٥١/٧٣ | <۰/۰۰۰۱ |
| B□ | ١٦٨٩/٦١ | ١ | ١٦٨٩/٦١ | ٣٠/٠١ | <۰/۰۰۰۱ |
| C□ | ٣٩/٨٥ | ١ | ٣٩/٨٥ | ۰/٧٠٧٨ | ۰/٤٠٢٥ |
| **باقیمانده** | ٤٨٤١/٧٢ | ٨٦ | ٥٦/٣٠ | | |
| **مجموع** | ٤٨٨٠٥/٨٦ | ٩٥ | | | |

**جدول٤:** اطلاعات آماری برای پاسخ راندمان حذف در راکتور حاوی آنیلین

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| انحراف از معیار | ٧/٥٠ |
| میانگین | ٥٧/٧٨ |
| ضریب تغییرات | ١٢/٩٩ |
| R□ | ۰/٩۰۰٨ |
| Adjusted R□ | ۰/٨٩۰٤ |
| Predicted R□ | ۰/٨٧٦٨ |

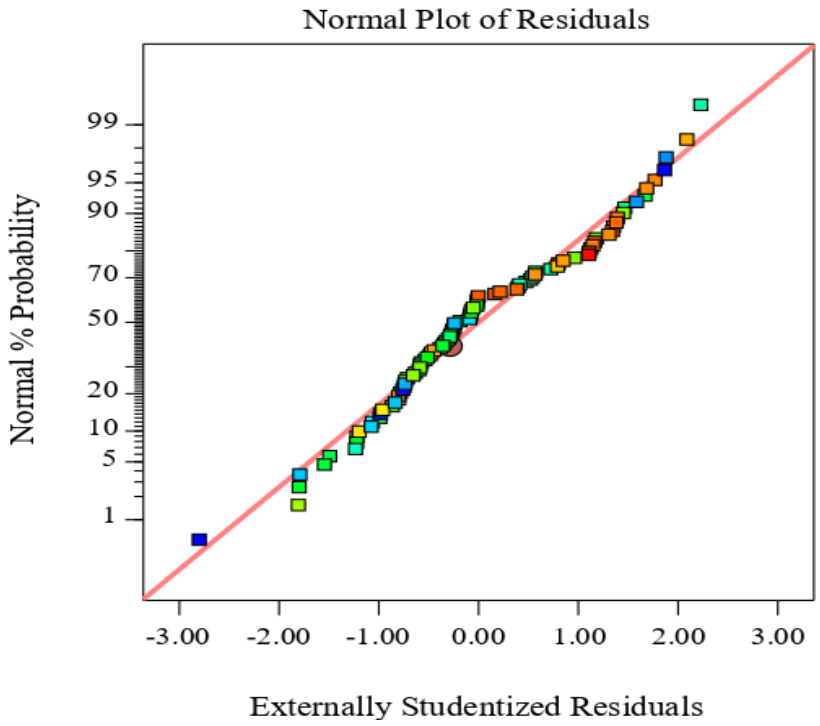
با انجام آنالیز رگرسیونی، معادله چند جمله‌ای بدست امـده از رابطه بین متغیرها با پاسخ در راکتور حاوی آنیلین به صورت زیر است:

زمان×۰/۰۰۹۵۲۳- (زمان×غلظت آلاینده) + درصد پرشدگی× ۰/۱۳٤٦٤۷ + زمان× ۱/٤۲٤۳۵ + غلظت آلاینده× ۰/۰۰٦٦۰۵ + ۱٤/۷۱۷۲۳= راندمان حذف

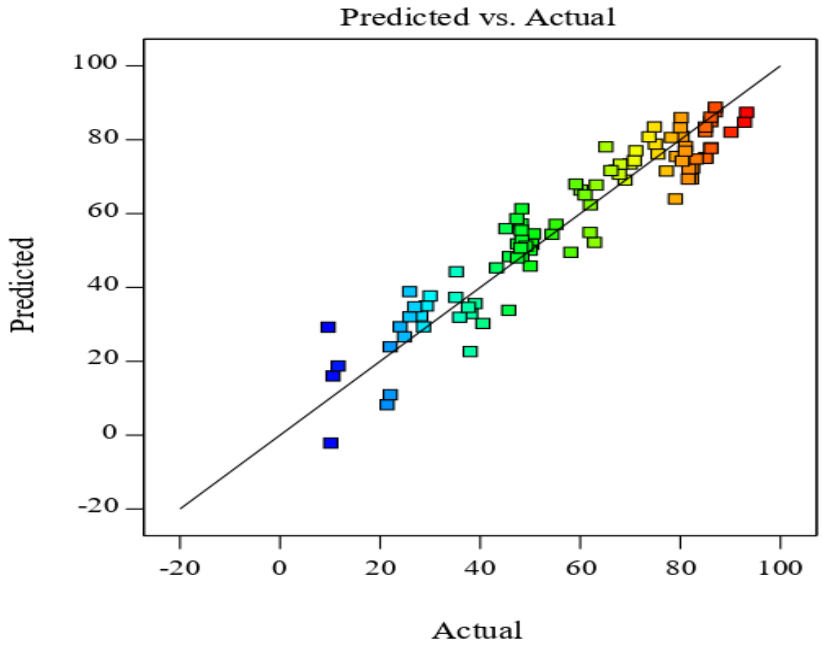
نمودار پراکندگی نرمال داده‌ها بین مقادیر واقعـی و مقـادیر پیش‌بینی شده در شکل ۱ رسم شده است. این نمودار مقادیر یا گروهی از مقادیر که توسط مدل پیش بینی نشده است را نشان می‌دهد. میزان $R^2$ برابر ۰/۹ است. توزیع مناسب و نرمال نقـاط اطراف خط راست، نشان دهنده توزیع مناسب خطاها است.

نمودار ۲ نمودار نرمال مانده‌های مدل است و نشان می‌دهد که مانده‌ها از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند.

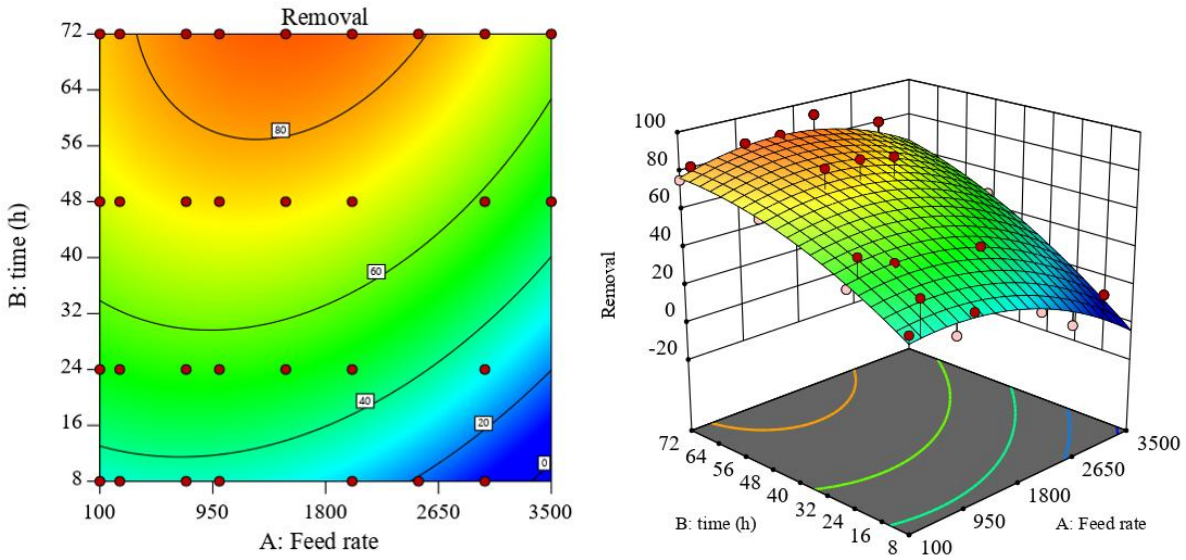
در شکل شماره ۳ نمودار همپوشانی نشان داده شده اسـت. این نمودارها اثر دو متغیـر میـزان خـوراک و زمـان مانـد را در درصد پرشدگی ۵۰ درصد نشان مـی‌دهـد و همـانطور کـه در شکل قابل مشاهده است در زمان نزدیـک بـه ۷۲ سـاعت و بـا میزان خوراک بین ۹۵۰ تا ۱۸۰۰ میلی‌گـرم رانـدمان حـذف در بیشترین مقدار خواهد شد. بهینـه شـرایط بـرای میـزان حـذف ۸۹/۸٦۵ در راکتور حاوی آنیلین در میزان خوراک حدود ۲۰۰۰ میلی‌گرم در متر مکعب و زمان ۷۲ ساعت در درصد پرشـدگی ۵۸/۸۲ درصد رخ داده است.




**شکل ۱:** پراکندگی نرمال داده‌ها در راکتور حاوی آنیلین




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




(ب) (الف)

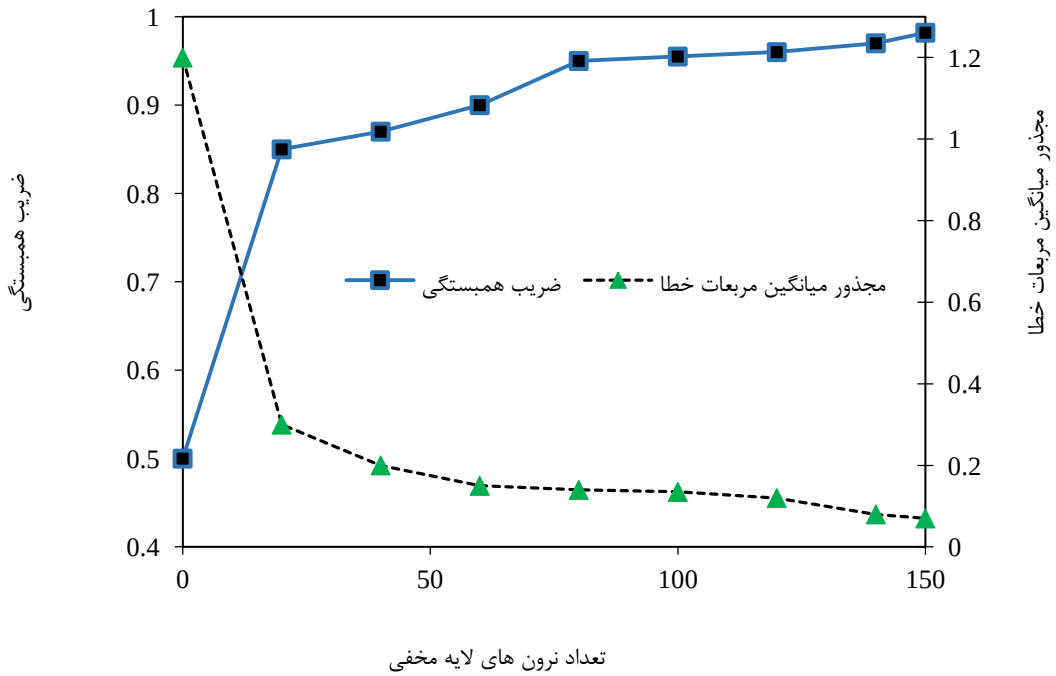
**شکل ۳:** تاثیر برهمکنش متغیرهای همپوشانی زمان ماند و میزان غلظت آلاینده بر پاسخ راندمان حذف

### پیش بینی فرایند با استفاده از ANN

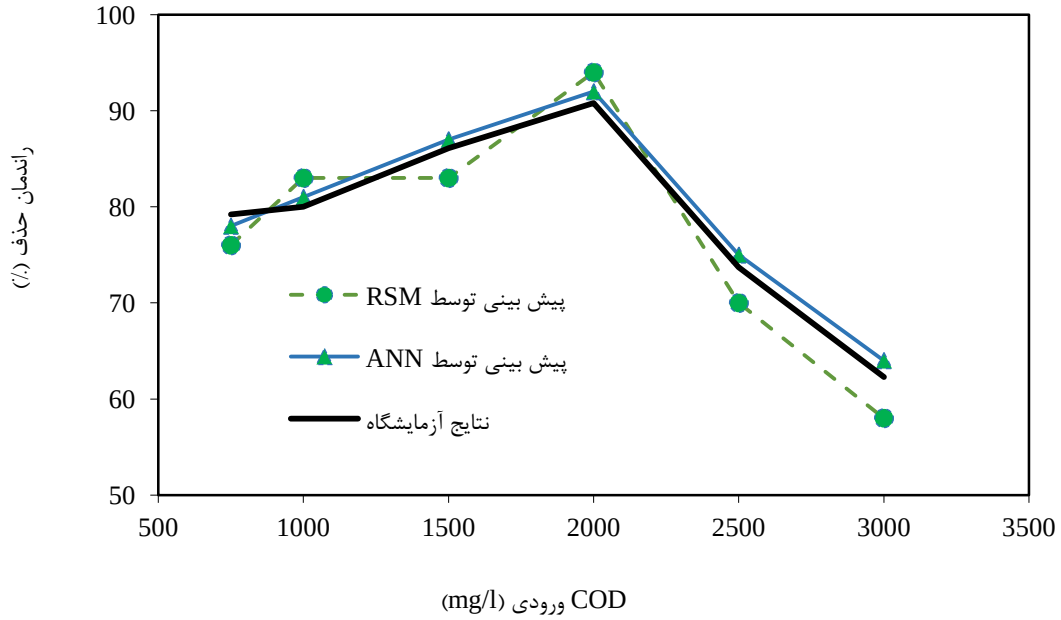
شکل ٤ نحوه تغییرات عملکرد این شبکه به ازای افـزایش تعداد نرون‌های لایه مخفی را نشان می‌دهد. با افـزایش تعـداد نرون‌ها ضریب همبستگی تا مقدار ۱ افزایش و جـذر میـانگین مربعات خطا تا رسیدن به خطای هدف (صفر) کاهش می‌یابد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افـزایش تعـداد نـرون‌هـا از صفر تا ۱۵۰، ضـریب همبسـتگی تـا ۰/۹۸۲ افـزایش و جـذر میانگین مربعات خطا تا ۰/۰۷ کاهش یافته است.

### پیش‌بینی رانـدمان حـذف آنیلـین در MBBR بـا روش‌های ANN و RSM

مقایسه مدل ANN پایه شعاعی و RSM بر روی داده‌هـای آزمایشگاهی دلنواز و همکاران جهت تصفیه فاضـلاب حـاوی آنیلین با اسـتفاده از MBBR در زمـان مانـد ۷۲ سـاعت و بـا درصد پرشدگی ۵۰ درصد در شکل ۵ نشان داده شـده اسـت. همان‌طور که در شـکل ۵ قابـل مشـاهده اسـت هـر دو روش ANN و RSM روند قابـل قبـولی را در مقایسـه بـا داده‌هـای آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده‌اند. در روش RSM میـزان RSME معادل ٤/۰۸ و $R^2$ معادل ۹٤/٤۱ به دست آمد. در روش ANN نیز میزان RSME معادل ۱/۵۵ و $R^2$ معادل ۹۸/۸۷ تعیین شـد. با مقایسه میزان خطـای ایـن دو روش مـی‌تـوان گفـت روش ANN پایه شعاعی با دقت بیشتر و میزان خطـای کمتـر رونـد داده‌ها را پیش‌بینی کرده است.




**شکل ۰:** نحوه تغییرات عملکرد شبکه پایه‌شعاعی 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 ۲۰۰۰mg/L در زمان ماند ۷۲ ساعت حاصل شد. راندمان حذف در زمان ماند ٤٨ و ۷۲ ساعت در محدوده COD معادل ۵۰۰–۱۵۰۰mg/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 ٢٤ و ٤٨ 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 ١٦ تا ۳۰ ساعت باعث افزایش راندمان حذف از ۷۱ تا ۸۳ درصد شد. وقتی دو پارامتر زمان نگهداری و نسبت پر شدن رسانه ها 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 ٧٤ درصد به ۸۵ درصد افزایش داد. بنابراین کاهش غلظت فاضلاب بیشترین تاثیر را بر بهبود راندمان حذف آلاینده های 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 برای 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

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 میلی‌گرم در لیتر فرات پتاسیم و برای pH برابر ٤/٥ بود. دراین شرایط میزان حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب ۸٦، ۸٥، ۸٤ 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 پایه‌شعاعی 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 پایه‌شعاعی 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 خطای شبکه به مقدار تعیین‌شده در هدف برسد. حداکثر تکرار در این شبکه‌ها نیز برابر تعداد داده‌ها می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

- بررسی نتایج توسط RSM که در قالب ۹٦ 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 میلی‌گرم در متر مکعب و زمان ۷۲ ساعت در درصد پرشدگی راکتور با آکنه‌ی ٥٦/۸۲ درصد است.
- با مقایسه عملکرد سیستم در درصد پرشدگی‌های ۷۰، ٥۰ 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 ۱٥۰، 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.

## References


۱. 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].

۲. 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.

۳. 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.

۴. Devulapalli R, Jones F. Separation of aniline from aqueous solutions using emulsion liquid membranes. J. Hazard Mater, ۱۹۹۹;۷۰(۳):۱۵۷–۷۰.

۵. 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.

۶. 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.

۷. Zangooei 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.

۸. 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.

۹. 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.

۱۰. 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].

۱۱. 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.

۱۲. 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].

۱۳. 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.

۱۴. 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.

۱۵. 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.

۱۶. 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.

۱۷. Cohen S, Intrator N. Automatic model selection in a hybrid perceptron/ radial network, Inform Fusion, ۲۰۰۲;۳(۴): ۲۵۹–۶۶.

*Journal of Environmental Health Engineering, May ۲۰۲۰; Vol. ۷, No. ۳: ۲۹۸-۳۱۳*

# 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:* ۸ *Feb* ۲۰۲۰ *; Accepted:* ۱۸ *Apr* ۲۰۲۰**

**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 ۵-liter volume reactor filled with ۳۰٪, ۵۰٪ and ۷۰٪ 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 ۱۰۰ to ۳۰۰۰ mg/L, retention time of ۸ to ۷۲ hours and filling percentage of ۳۰ and ۵۰ and ۷۰٪ 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 ۱۷۰۰ mg/l and ۷۲ hours at ۵۶,۸۲٪ 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 $R^۲$ = ۰,۹۸۲ 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