

مدل سازی حذف سفیکسیم به روش فنتون با شبکه عصبی مصنوعی

مهناز یاسمی*

گروه مهندسی شیمی، واحد ایوان غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، ایوان غرب، ایران

زهرا معافی

گروه مهندسی شیمی، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران

چکیده: هدف از این پژوهش، مدل سازی راندمان حذف سفیکسیم به روش فنتون و با استفاده از شبکه عصبی است. شبکه عصبی مصنوعی توانایی بالایی در پیش بینی نتیجه های تجربی دارد. در این مدل سازی مقدار هیدروژن پراکسید، کاتالیست آهن، مدت زمان حذف سفیکسیم، غلظت اولیه سفیکسیم و pH پارامترهای ورودی های سیستم و درصد حذف سفیکسیم به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. شاخص های عملکرد شامل: مجموع مربع های خطا (SSE)، جذر متوسط مربع های خطا (RMSE)، ضریب تعیین تعدیل شده (R_{adj}^2) و ضریب تعیین R^2 در تعیین تعداد نرون های بهینه میانی به کار رفته است. با توجه به نتیجه های به دست آمده، مدل شبکه عصبی توانست بازده جذب را با تابع انتقال تانژانت سیگموئیدی در لایه پنهان و تابع انتقال محرک خطی در لایه خروجی پیش بینی کند. همچنین نتیجه های مدل سازی شبکه عصبی با الگوریتم لونیگ-مارکوآرت نشان داد که شبکه با چیدمان ۱-۱۳-۵ (۵ نرون در لایه ورودی، ۱۳ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون در لایه خروجی) بهترین نتیجه را در پیش بینی خروجی و حداقل خطا دارا می باشد. ضریب همبستگی مدل مربوط به قسمت های آموزش، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۰/۹۹۹۹۳، ۰/۹۹۴۳۶ و ۰/۹۶۹۰۱ به دست آمد که این نتیجه ها حاکی از دقت زیاد روش شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی داده های آزمایشگاهی حذف سفیکسیم از محلول آبی است. برای پیش بینی روند تغییرها از ابزار شبکه عصبی در نرم افزار MATLAB استفاده شده است.

واژگان کلیدی: فنتون، جذب سطحی، نانولوله کربنی، شبکه عصبی، بهینه سازی.

KEYWORDS: Fenton, Adsorption, Carbon nanotubes, neural network, Optimization.

مقدمه

جدی برای بشر تلقی می شود و ورود این مواد به منابع آبی، سبب آلودگی گیاهان، خاک و جانوران شده و مشکل هایی را برای بهداشت عمومی ایجاد می کند [۱]. مصرف بی رویه آنتی بیوتیک به عنوان دارو از سوی انسان ها و مصرف غیرمنطقی آن در

آنتی بیوتیک ماده ای شیمیایی است که از یک میکروارگانیسم تولید یا از آن گرفته می شود و میکروارگانیسم های دیگر را از بین می برد یا مانع رشد آن ها می شود. آنتی بیوتیک یک زیست کش است بنابراین حضور ترکیب های دارویی در محیط زیست تهدیدی

*Email: mahnazyasemi@yahoo.com

* عهده دار مکاتبات

هیدروکسیل و سرانجام باعث افزایش راندمان اکسایش می‌شود این روش فوتوفنتون نامیده می‌شود [۷]. بابو^۱ و همکاران بررسی‌های خود را در مورد آنتی‌بیوتیک سیپروفلوکساسین با فرایند فوتوفنتون در حضور کاتالیست ناهمگن کامپوزیت آهن لایونیت، مقدارهای گوناگون pH، هیدروژن پراکسید و آهن انجام دادند. نتیجه‌ها نشان داد که با افزایش غلظت H_2O_2 ، افزایش مقدار کاتالیست و کاهش pH به مقدار ۳، بیش از ۵۷٪ از میزان کل کربن آلی پس از ۳۰ دقیقه تجزیه شد [۸]. المول^۲ و همکاران در مورد تأثیر فرایند فوتوفنتون بر روی راندمان حذف آنتی‌بیوتیک‌های آموکسی سیلین، آمپی سیلین و کلواکسی سیلین مطالعه نمودند [۹]. شمس‌خرم‌آبادی در مطالعه فرایند اکسایش پیشرفته UV/H_2O_2 بر روی حذف آنتی‌بیوتیک سفتریاکسون از محیط آبی دیدند که افزایش غلظت آنتی‌بیوتیک تأثیر منفی بر راندمان حذف دارد [۱۰]. حیدری و همکاران از الکتروفنتون برای حذف پنتاکلو فنول از محلول آبی استفاده کردند [۱۱]. در یک مطالعه دیگر توسط تیموری و همکاران که از فرایند فتون برای حذف آنتی‌بیوتیک آموکسی سیلین و سیپروفلوکساسین از پساب بیمارستانی استفاده کرد، نتیجه‌ها نشان داد راندمان حذف آنتی‌بیوتیک با این روش بالا بوده است [۱۲]. از شبکه عصبی مصنوعی در بهینه‌سازی حذف فلزها، فرایندهای جذب سطحی و تصفیه پساب استفاده شده است [۱۳-۱۷]. هدف از این مطالعه مدل‌سازی داده‌های تجربی فرایند شیمیایی اکسایش پیشرفته فتون همگن برای حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم از محیط آبی با جاذب ارزان و در دسترس و به کمک شبکه عصبی مصنوعی^۳ (ANN) می‌باشد.

اکسایش پیشرفته به روش فتون

تاکنون روش‌های زیستی، فیزیکی و شیمیایی گوناگونی برای زدودن باقی‌مانده‌های دارویی از محیط‌های آبی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸-۲۰]. مطالعه‌ها نشان داده که روش‌های جذب به کمک غشاء و اسمز وارون [۲۱]، کربن فعال [۲۲]، ازناسیون و روش‌های زیستی [۲۳] می‌توانند در حذف برخی از ترکیب‌های دارویی مؤثر باشند. برخی از این روش‌ها مانند فرایندهای غشایی به دلیل هزینه سرمایه گذاری، نگهداری و راهبری از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیستند [۲۴]. فرایند ازناسیون هم به منظور اکسایش آنتی‌بیوتیک‌ها منجر به تبدیل این مواد به ترکیب‌های

دامداری‌ها و مرغداری‌ها سبب شده است تا این ماده به تقریب در همه مواد غذایی که مصرف می‌کنیم، وجود داشته باشد و در نتیجه بدن بسیاری از ما به آنتی‌بیوتیک‌ها مقاوم شود [۲]. سفیکسیم که آنتی‌بیوتیک D سفالوسپورینی است در درمان طیف گسترده‌ای از بیماری‌های عفونی باکتریایی مانند عفونت‌های تنفسی، عفونت‌های پوست و بافت نرم و عفونت‌های استخوان یا مفاصل و عفونت‌های ادراری مؤثر می‌باشد. به دلیل وجود انواع گوناگون مواد آلی، مواد شیمیایی، آنتی‌بیوتیک‌ها، مواد سمی و هورمون‌ها در پساب صنایع داروسازی توجه خاصی به روش‌های تصفیه این نوع پساب شده است. سمی بودن، زیست تخریب‌ناپذیری، ایجاد مقاومت دارویی، سرطانزا بودن، جهش ژنتیکی و آسیب DNA در آنتی‌بیوتیک‌ها باعث شده که این ترکیب‌ها به عنوان آلاینده شبه پایدار محیط‌زیست نامیده شوند. در واقع آنتی‌بیوتیک‌ها به دلیل داشتن خاصیت ضد میکروبی، مانع فعالیت باکتری‌ها در سامانه تصفیه زیستی شده و با مختل کردن عملیات تصفیه بدون حذف شدن، از آن عبور می‌کنند. روش‌های معمول مورد استفاده در تصفیه پساب صنایع دارویی مانند تصفیه زیستی عموماً کارآمد نیستند [۳]. بنابراین روش‌های اکسایش پیشرفته، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۴]. در حال حاضر از این فناوری برای تصفیه ترکیب‌های آلی تجزیه‌ناپذیر، مانند آفت‌کش‌ها، مواد رنگ‌آمیزی، مواد دارویی و ترکیب‌های شیمیایی آلی استفاده می‌شود [۵].

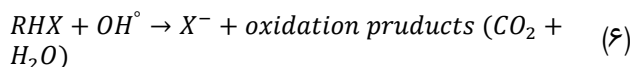
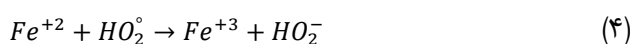
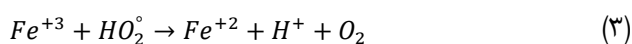
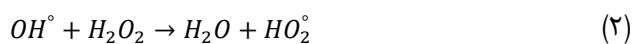
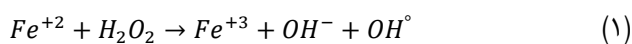
تاکنون مطالعه‌های گوناگونی در ارتباط با کاربرد فرایندهای اکسایش پیشرفته در حذف باقی‌مانده دارویی مانند ازناسیون، شکست نوری مستقیم و غیرمستقیم و فتون برای تصفیه پساب صنایع داروسازی پژوهش‌هایی انجام گرفته است [۶]. روش فتون یکی از روش‌های اکسایش سنتی است. که در آن فرایند تولید رادیکال‌های هیدروکسی غیرانتخابی به روش واکنش بین پروکسید هیدروژن و نمک‌های آهن دوظرفیتی به عنوان کاتالیست صورت می‌گیرد. روش فتون به انواع گوناگونی تقسیم می‌شود که شامل: شبه فتون، فوتوشبه فتون، فوتوفنتون، الکتروفنتون و سونوفنتون ... می‌باشد که شرایط عمل در آن‌ها متفاوت ولی اساس واکنش آن‌ها همانند است. به عنوان نمونه، شبه فتون یک سامانه الکتروشیمیایی است که در آن یون‌های Fe^0 به عنوان احیاء کننده و مولکول‌های پروکسید هیدروژن به عنوان اکسنده عمل می‌کنند. افزودن پرتوهای UV به فرایند فتون سبب افزایش احیاء کاتالیست و نیز تولید رادیکال

(۱) Bobu et al

(۳) Artificial Neural Network

(۲) Elmoll et al

پیشرفته شامل روش‌های ترکیبی ازن با اشعه فرابنفش یا آب اکسیژنه، یا ترکیب هر سه روش یعنی ازن-آب اکسیژنه-اشعه فرابنفش، ترکیب اشعه فرابنفش با آب اکسیژنه یا با تیتانیوم دی‌اکسید می‌باشد. ب) اکسایش شیمیایی با مواد اکسیدکننده مانند: اشعه فرابنفش و گاما، آب اکسیژنه، معرف فنتون. دلیل نام‌گذاری این فرایندها به نام فرایند اکسایش پیشرفته، تولید رادیکال هیدروکسیل است که علاوه بر بالا بردن کارایی اکسایش، از نظر شرایط عملیاتی و فرآورده‌های جانبی مضر برای محیط‌زیست، تفاوت زیادی با روش‌های معمول دارند [۲۹]. واکنش‌گر فنتونی شامل مخلوطی از یون آهن به‌عنوان کاتالیست و هیدروژن پراکسید به‌عنوان عامل اکسند بوده که بسیاری از مولکول‌های آلی را اکسید می‌کند [۳۰]. واکنش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:



شبکه عصبی مصنوعی

اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی در جانوران و انسان‌ها است. همان‌گونه که می‌دانید در مغز، نرون‌ها وظیفه پردازش و انتقال اطلاعات را در قالب سیگنال‌های الکتریکی دارند. شبکه‌های عصبی مصنوعی نمونه ساده شده‌ای از مغز هستند و به‌طور معمول تعداد محدودی نرون مصنوعی، بسته به کاربرد شبکه از ده‌ها تا صدها که هر کدام محاسبه ساده‌ای را انجام می‌دهند به هم وصل هستند. ساختار این شبکه‌ها به گونه‌ای است که قابلیت یادگیری دارند. پس از ساخت شبکه، فرایند یادگیری انجام می‌شود. رایج‌ترین تکنیک آموزش نظارتی، الگوریتم پس انتشار خطا است. یادگیری این الگوریتم بر پایه قانون تصحیح خطا بنا شده است که می‌توان آن را تعمیم الگوریتم مرسوم به حداقل میانگین مربع‌ها دانست. یادگیری به روش این روش دو مرحله دارد: مرحله پیش‌روی و مرحله بازگشت. در مرحله پیش‌روی ورودی‌ها به صورت لایه به لایه در شبکه پیش می‌روند و در پایان یک سری

واسطه آلی و مقاوم به تجزیه می‌شود [۲۵]. روش‌های جذب سطحی، آلاینده‌ها را از بین نمی‌برند و صرفاً آن را از یک فاز به فاز دیگر منتقل می‌کنند. روش زیستی نیز ممکن است نسبت به سمیت مواد دچار شوک شود. آلاینده‌های سمی در پساب‌های صنعتی باعث مقاوم بودن آن‌ها در برابر تصفیه زیستی و بروز مشکل‌هایی در فرایند تصفیه می‌شوند. مطالعه‌های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی و در مقیاس واقعی نشان می‌دهد برخی از آنتی‌بیوتیک‌های موجود در خاک، آب و رسوب‌ها نسبت به تجزیه زیستی از خود مقاومت نشان می‌دهند. یکی از مزیت‌های عمده فرایند فنتون این است که فرایند یاد شده ترکیبی از اکسایش و انعقاد است که منجر به تولید لجن کم‌تری نسبت به فرایندهای انعقاد و لخته‌سازی می‌شود. در دهه اخیر، فرایندهای اکسایش پیشرفته به منظور کاهش آلودگی به علت حضور باقی‌مانده‌های دارویی در آب، مورد استفاده قرار گرفته‌اند اساس این فرایندها تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل فعال است که با ترکیب‌های آلی واکنش داده و موجب تخریب آن‌ها می‌شوند. یکی از جالب‌ترین روش‌های مورد مطالعه، فنتون بوده که در آن به کمک یون فلزی، انتقال الکترون صورت می‌گیرد [۲۶].

از برتری‌های این فرایند می‌توان به کارایی بالا، سادگی روش، هزینه پایین به دلیل عدم نیاز به دستگاه یا انرژی الکتریکی برای انجام واکنش و به دلیل استفاده از کاتالیست غیر سمی آهن و نیز معرف هیدروژن پراکسید که دوست‌دار محیط‌زیست محسوب می‌شود این روش جزء روش‌های سازگار با محیط‌زیست بوده و به دلیل اجرا و بهره‌برداری آسان، از کارآمدی بالایی برای تصفیه آب و پساب برخوردار است [۲۷]. فرایند فنتون در تجزیه پساب‌های سمی و غیر قابل تجزیه زیستی و تبدیل آن‌ها به مواد قابل تجزیه به طور مؤثری عمل کرده و نه تنها به حذف کربن آلی، فلزهای سنگین و فسفر کمک می‌کند بلکه باکتری‌ها را نیز غیرفعال می‌سازد. قابلیت معدنی‌سازی بخش اصلی بار آلودگی و ایجاد پساب با سمیت کم‌تر، سهولت تصفیه زیستی نهایی، راهبری و بهره برداری آسان‌تر و بنابراین تنظیم شرایط کاری موجب شده که این فرایند به راحتی در تصفیه آلاینده‌هایی با مقدارهای کم، مورد استفاده قرار گیرد [۲۸]. اکسایش شامل فرایندهایی است که اساس آن‌ها بر تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل (OH°) در تخریب ترکیب‌های آلی شیمیایی است که این رادیکال‌های الکترون‌دوست به سرعت با نزدیک‌ترین ترکیب آلی الکترون‌دار وارد واکنش می‌شوند. روش‌های اکسایش عبارتند از: الف) فرایندهای اکسایش

هوشمند عصبی در مدیریت مسائل زیست محیطی باشد. در این مطالعه مدل‌سازی داده‌های تجربی فرایند شیمیایی اکسایش پیشرفته فتون برای حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم از محیط آبی با جذب ارزان و در دسترس به کمک شبکه عصبی مصنوعی انجام گرفته است. در این راستا، مدل هوش مصنوعی به منظور شبیه‌سازی رفتار سامانه تصفیه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر مورد استفاده قرار گیرد. پروسه جذب سفیکسیم بسیار پیچیده است و این مسئله به دلیل دخیل شدن پارامترهای زیاد با رابطه‌های غیر خطی است. اما استفاده از مدل‌های مفهومی به منظور جلوگیری از افزایش روز افزون نگرانی‌ها در مورد اثرهای زیست محیطی آنتی‌بیوتیک‌ها و کمک به مهندسين برای پیش‌بینی رفتار تصفیه پساب و نیز کنترل فرایندهای پیچیده تصفیه برای به‌دست آوردن خروجی با کیفیت مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۳۹، ۴۰]. ورودی‌های این پژوهش مقدار هیدروژن پراکسید، کاتالیست آهن، مدت زمان حذف سفیکسیم، غلظت اولیه سفیکسیم و pH بوده و درصد حذف سفیکسیم به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. مقایسه همبستگی بالا و خطای کم بین مقدارهای تجربی و پیش‌بینی شده هر یک از مشخصه‌ها گویای آن است که شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی جذب سفیکسیم بیش‌ترین دقت را داشته است.

بخش تجربی

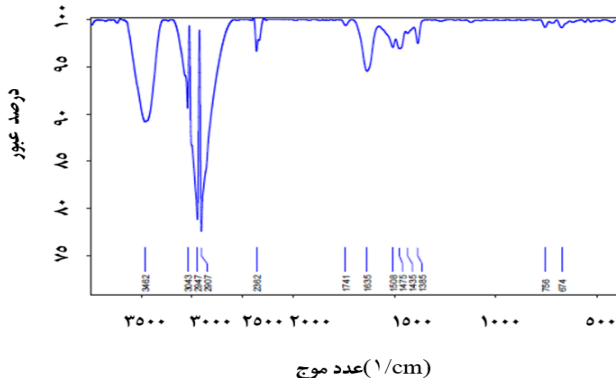
از جاذب نانولوله کربنی (اندازه ذره‌ها ۲۰-۱۰ nm، طول ذره‌ها ۴۰ μm، خلوص ۹۵٪ وزنی، دانسیته ۰/۵ g/cm³)، سفیکسیم، کاتالیست سولفات آهن ۷ آب، عامل اکسید کننده هیدروژن پراکسید و آب مقطر استفاده شد. هیدروکلریک اسید و پتاسیم هیدروکسید برای تنظیم pH مورد استفاده قرار گرفتند. نخست محلول استوک سفیکسیم بر اساس بیش‌ترین حلالیت آن در محلول آبی تهیه شد. با رقیق‌سازی محلول استوک به کمک آب مقطر، نمونه پساب دارویی با غلظت‌های مورد نظر به‌دست آمد. آزمایش‌ها به کمک طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ و با تغییر پارامترهای pH بین ۲ تا ۱۰، مقدار هیدروژن پراکسید ۱ تا ۱۰ ml، غلظت یون آهن (II) ۰/۱ تا ۰/۱ گرم بر لیتر، مدت زمان حذف سفیکسیم بین ۱ تا ۳۵ دقیقه و غلظت اولیه سفیکسیم برابر ۵۵-۵ ppm انجام شد. شکل ۱ فرایند حذف سفیکسیم از محلول آبی با غلظت‌های متفاوت از سفیکسیم با افزودن جاذب نانولوله کربنی و عامل اکسید کننده هیدروژن پراکسید

خروجی به‌عنوان جواب حقیقی شبکه به‌دست می‌آید، در این مرحله توازن اتصال ثابت است. در مرحله بازگشت، اوزان اتصال بر اساس قانون تصحیح خطا، تغییر می‌کنند. تفاضل پاسخ حقیقی شبکه و پاسخ مورد انتظار که خطا نامیده می‌شود به عنوان خطای اتصال‌ها در شبکه منتشر می‌شود و اوزان به‌گونه‌ای تغییر می‌یابد که پاسخ حقیقی شبکه به پاسخ دلخواه نزدیک‌تر شود [۳۱].

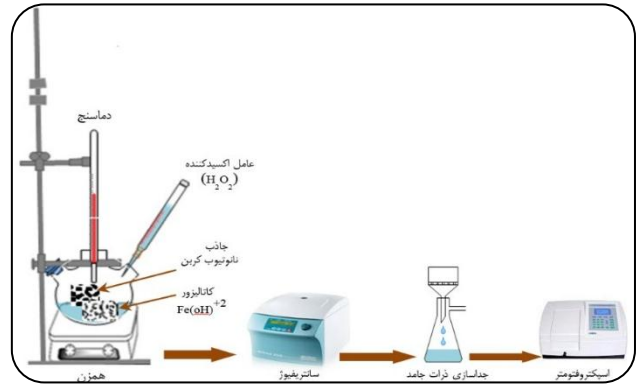
امروزه به قدری استفاده از سامانه‌های هوشمند و به ویژه شبکه عصبی مصنوعی گسترده شده است که می‌توان این ابزارها را در ردیف عملیات پایه ریاضی و به عنوان ابزارهای عمومی و مشترک، طبقه‌بندی کرد. چرا که کم‌تر رشته دانشگاهی است که نیازی به تحلیل، تصمیم‌گیری، تخمین، پیش‌بینی، طراحی و ساخت داشته باشد و در آن از موضوع شبکه‌های عصبی استفاده نشده باشد. شبکه عصبی مصنوعی با یادگیری تعدادی داده ثبت شده قادر به پیش‌بینی رفتار خروجی در کل بازه آموزشی است. علت عملکرد خوب شبکه عصبی را می‌توان به هوشمند بودن فرایند تحلیل داده‌ها و اندازه‌گیری‌های مناسب و انتخاب مشخصه‌های مؤثر در خروجی نسبت داد به طوری که شبکه عصبی طی فرایند آموزش، با ایجاد رابطه‌هایی منطقی میان نگاشت‌های ورودی و خروجی، از آن برای محاسبه داده‌هایی که در امر آموزش شبکه به کار نرفته‌اند استفاده می‌کند [۳۲]. پای^۱ و همکاران از یک شبکه هوش مصنوعی سه لایه با ۶ نورون در لایه میانی و چهار نورون اطلاعاتی در ورودی موفق به پیش‌بینی عامل‌های کیفی پساب خروجی از تصفیه خانه بیمارستانی در کشور تایوان شدند آن‌ها از مشخصه‌های pH، دما و جامدهای معلق پساب بهره گرفتند [۳۳]. توانایی شبکه هوش مصنوعی در مدل‌سازی مشخصه‌های کیفی پساب شهر آنکارای ترکیه توسط گلوکلو^۲ مورد بررسی قرار گرفت [۳۴]. نصر و همکاران با استفاده از شبکه هوش مصنوعی عملکرد تصفیه خانه پساب EL-AGAMY را مدل‌سازی نمودند [۳۵]. نورانی و همکاران از مدل‌های شبکه عصبی برای پیش‌بینی غلظت روزانه پارامترهای BOD، SS در خروجی تصفیه خانه پساب استفاده کردند [۳۶]. ندیری و همکاران [۳۷] با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب به پیش‌بینی پارامترهای پساب خروجی تصفیه خانه تبریز پرداختند. خادمی و همکاران ارزیابی عملکرد تصفیه خانه پساب خرم آباد را توسط شبکه هوش مصنوعی انجام دادند [۳۸]. این کاربردها می‌تواند نشان‌دهنده توانمندی بالای مدل‌های

(۱) Pai et al

(۲) Gluclu



شکل ۲ - طیف FT-IR جاذب نانولوله کربنی



شکل ۱ - شمایی از فرایند حذف سفیکسیم به روش فنتون

به دلیل ساختار غیر اشباع و آروماتیکی پیوندهای C=C می‌باشد. پیک $\frac{1}{cm}$ ۱۷۴۱ نشان‌دهنده حضور پیوند C=O و پیک $\frac{1}{cm}$ ۱۳۸۵ نشان‌دهنده پیوند C-O می‌باشد.

نانولوله‌های کربنی از لحاظ کاتالیستی فعال و خاصیت موینگی بالایی دارند و می‌توانند گازها و مایع‌ها را در خود جای دهند. این نانولوله‌ها از جمله موادی هستند که می‌توانند برای تمیز کردن آب‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرند. بسیاری از آلاینده‌ها تمایل به چسبیدن به نانولوله‌های کربنی دارند بنابراین با استفاده از صافی‌های دارای نانولوله کربنی می‌توان آن‌ها را از آب زدود. نانولوله‌های کربنی در مقایسه با دیگر ابزارهای تصفیه که دارای همان اندازه تخلخل هستند، به دلیل ویژگی‌های انتقال جرم سریع نانولوله‌ها، بدون استفاده از فشار، شدت جریان مناسبی را تأمین می‌کنند. همچنین مولکول‌های آب را به صورت یک ردیف فشرده زنجیری درآورده و علاوه بر این، یون‌ها را نیز تصفیه می‌کنند و سرعت انتقال آب به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [۴۵، ۴۶]. مطابق شکل ۳ درصد حذف سفیکسیم در حالت ترکیب روش فنتون و جاذب نانولوله کربنی، فنتون به تنهایی و جاذب به تنهایی به ترتیب برابر با ۹۸/۹۵٪، ۹۲/۷۵٪ و ۸۵/۴۴٪ است.

مدل شبکه عصبی مصنوعی

در این پژوهش، تأثیر پنج پارامتر پراکسید هیدروژن، pH، سولفات آهن، زمان و غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک در دو سطح حداقل و حداکثر برای حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم با استفاده از فرایند فنتون مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ فاکتورها و سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد. ماتریکس آزمایش‌ها در سطوح گوناگون متغیرها به منظور بررسی راندمان حذف سفیکسیم مطابق جدول ۲ می‌باشد. برای جلوگیری از خطای سامانه‌ای آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شد.

را نشان می‌دهد. در ادامه برای جداسازی ذره‌های معلق جامد از سائتریفیوژ استفاده شد و سپس با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر میزان سفیکسیم حذف شده اندازه‌گیری شد. از دستگاه اسپکتروفتومتر در ناحیه UV به منظور تعیین غلظت آلاینده دارویی استفاده شد. قله $\frac{1}{cm}$ ۲۸۶ نانومتر نشان‌دهنده طول موج بیشینه برای محلول سفیکسیم می‌باشد [۴۳-۴۴].

نتیجه‌ها و بحث

ترکیب فنتون و نانولوله کربنی

در این پژوهش برای حذف سفیکسیم از محلول‌های آبی ترکیب روش فنتون و جاذب نانولوله کربنی استفاده شد. به منظور بررسی گروه‌های عاملی موجود در نانولوله کربنی از آنالیز طیف‌سنجی FT-IR استفاده شد. آنالیز طیف‌سنجی یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین فناوری‌های طیف‌سنجی برای شناسایی و اندازه‌گیری گروه‌های عاملی، گروه‌های فلزی و پیوندهای OH موجود در سطح نمونه است. نتیجه این آنالیز می‌تواند ساختار احتمالی ترکیب‌ها را مشخص کند. در آنالیز FT-IR بر اساس روش پاسخ نمونه قرص شده به اشعه فرسورخ در طول موج‌های گوناگون و با استفاده از موقعیت و پهنای پیک‌ها می‌توان نوع باند شیمیایی و ساختار احتمالی نمونه را تعیین کرد. لذا به منظور شناسایی ترکیب‌ها، گروه‌های عاملی موجود در ساختار جاذب نانولوله کربنی از آنالیز FT-IR استفاده شد. به طوری که نتیجه‌های به دست آمده در شکل ۲ قابل دیدن است. طول موج $\frac{1}{cm}$ ۳۴۶۲ نشان‌دهنده وجود پیوندهای OH آزاد و جذب رطوبت می‌باشد. حضور پیک‌های موجود در $\frac{1}{cm}$ ۳۰۴۳ نشان‌دهنده حضور OH متصل به حلقه آروماتیکی و هیدروکسیل‌های گوناگون در سطح نانولوله کربنی می‌باشد. پیک‌های $\frac{1}{cm}$ ۱۴۷۵-۲۹۴۷ نشان‌دهنده گروه -CH₂ و پیک‌های $\frac{1}{cm}$ ۱۴۳۵-۲۹۰۷ نشان‌دهنده گروه -CH₃ می‌باشد. پیک $\frac{1}{cm}$ ۱۶۳۵

جدول ۱ - پارامترها و سطح‌های گوناگون آن‌ها

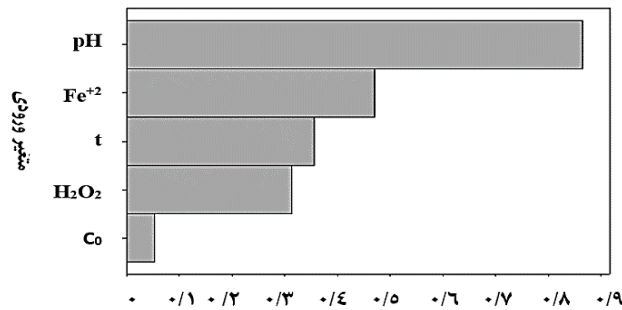
متغیرهای مستقل	واحد	سطح پایین	سطح بالا
غلظت اولیه سفیکسیم	ppm	۵	۵۵
زمان	minute	۱	۳۵
pH	---	۲	۱۰
غلظت Fe^{+2}	g/l	۰/۰۱	۰/۱
مقدار H_2O_2	ml	۱	۱۰

جدول ۲ - ماتریکس آزمایش‌ها در سطوح گوناگون متغیرها و راندمان تجربی حذف سفیکسیم

تعداد آزمایش	pH	t	H_2O_2	Fe^{+2}	غلظت اولیه سفیکسیم (C)	Y درصد حذف سفیکسیم	شبکه عصبی پیش‌بینی حذف سفیکسیم با مدل
۱	۴	۲۶/۵	۷/۷۵	-/۰/۷	۱۶/۲۵	۹۷/۳۵	۹۸/۷۲
۲	۴	۹/۵	۷/۷۵	-/۰/۷	۳۸/۷۵	۸۱/۱۷	۸۰/۶۹
۳	۴	۹/۵	۳/۲۵	-/۰/۳	۳۸/۷۵	۸۸/۶۸	۸۸/۹۲
۴	۸	۲۶/۵	۳/۲۵	-/۰/۷	۱۶/۲۵	۹۱/۸۸	۹۱/۸۸
۵	۸	۹/۵	۳/۲۵	-/۰/۳	۱۶/۲۵	۸۱/۶۹	۸۲/۲۴
۶	۶	۳۵	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۸۹/۶۱	۸۹/۲۸
۷	۶	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۱/۳۰	۹۰/۸۷
۸	۲	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۵/۰۰	۹۴/۳۵	۹۴/۶۴
۹	۲	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۱/۲۵	۹۰/۱۷
۱۰	۱۰	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۸۷/۱۲	۸۸/۸۷
۱۱	۶	۱۸	۵/۵	-/۱/۰	۲۷/۵۰	۹۱/۰۵	۹۰/۱۵
۱۲	۲	۱۸	۱۰	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۵/۷۴	۹۵/۷۵
۱۳	۸	۲۶	۷/۷۵	-/۰/۷	۳۸/۷۵	۹۲/۹۷	۹۳/۱۱
۱۴	۸	۹	۷/۷۵	-/۰/۷	۱۶/۲۵	۹۱/۵۶	۹۱/۸۹
۱۵	۶	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۱/۳۰	۹۰/۸۷
۱۶	۶	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۱/۳۰	۹۰/۸۷
۱۷	۸	۹	۳/۲۵	-/۰/۷	۳۸/۷۵	۹۳/۹۸	۹۴/۸۳
۱۸	۸	۲۶	۳/۲۵	-/۰/۳	۳۸/۷۵	۸۵/۵۵	۸۲/۴۱
۱۹	۶	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۱/۳۰	۹۰/۸۷
۲۰	۴	۲۶	۷/۷۵	-/۰/۳	۳۸/۷۵	۸۷/۶۴	۸۷/۸۷
۲۱	۴	۲۶	۳/۲۵	-/۰/۳	۱۶/۲۵	۹۳/۰۵	۹۳/۱۴
۲۲	۴	۲۶	۳/۲۵	-/۰/۷	۳۸/۷۵	۹۰/۷۵	۹۱/۴۴
۲۳	۶	۱	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۸۳/۹۶	۸۴/۶۶
۲۴	۶	۱۸	۵/۵	-/۰/۱	۲۷/۵۰	۸۵/۲۵	۸۴/۸۲
۲۵	۶	۱۸	۱	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۲/۵۷	۹۲/۲۳
۲۶	۸	۹/۵	۷/۷۵	-/۰/۳	۳۸/۷۵	۹۱/۱۱	۹۰/۳۳
۲۷	۴	۹/۵	۷/۷۵	-/۰/۳	۱۶/۲۵	۹۳/۸۴	۹۳/۷۶
۲۸	۶	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۵۰	۹۰/۶۴	۹۰/۰۲
۲۹	۴	۹/۵	۳/۲۵	-/۰/۷	۱۶/۲۵	۸۶/۵۶	۸۶/۹۴
۳۰	۶	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۱/۳۰	۹۰/۸۷
۳۱	۸	۲۶/۵	۷/۷۵	-/۰/۳	۱۶/۲۵	۸۱/۴۵	۸۹/۵۳
۳۲	۲	۱۸	۵/۵	-/۰/۵	۲۷/۵۰	۹۱/۳۰	۹۰/۸۷

جدول ۳ - مقایسه الگوریتم های آموزشی گوناگون در مدل سازی حذف سفیکسیم با شبکه عصبی مصنوعی

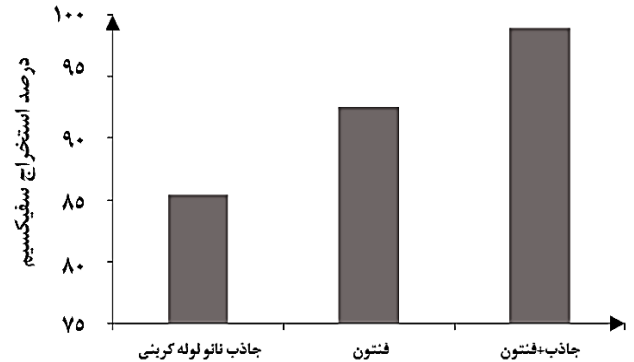
تعداد	تابع انتقال لایه پنهان	تابع انتقال لایه خروجی	R ²	R ² _{adj}	RMSE	SSE
۱	Logsig	Logsig	۰/۴۸۳۹	۰/۱۶۶۷	۱/۸۵۳۶	۱۰۳/۰۷۹۸
۲	Logsig	Purelin	۰/۹۵۹۱	۰/۹۵۷۷	۰/۸۵۰۵	۲۱۷/۰۲۲
۳	Logsig	Tansig	۰/۷۶۴۹	۰/۷۵۷۰	۱/۸۶۵۳	۱۰۴/۳۷۶۸
۴	Purelin	Logsig	۰/۳۹۵۲	۰/۳۷۱۷	۱/۸۹۴۳	۱۰۷/۶۴۷۸
۵	Purelin	Purelin	۰/۲۳۱۱	۰/۲۰۵۵	۲/۲۲۶۵	۱۴۸/۷۱۲۴
۶	Purelin	Tansig	۰/۲۱۶۳	۰/۱۹۰۲	۱/۶۵۵۳	۸۲/۲۰۰۵
۷	Tansig	Logsig	۰/۴۵۶۷	۰/۴۳۸۶	۱/۵۶۰۲	۷۳/۰۳۰۵
۸	Tansig	Purelin	۰/۹۸۶۱	۰/۹۸۵۶	۰/۴۶۸۹	۶/۵۹۵۰
۹	Tansig	Tansig	۰/۸۱۱۶	۰/۸۳۶۳	۱/۶۶۶۰	۶/۵۹۵۰



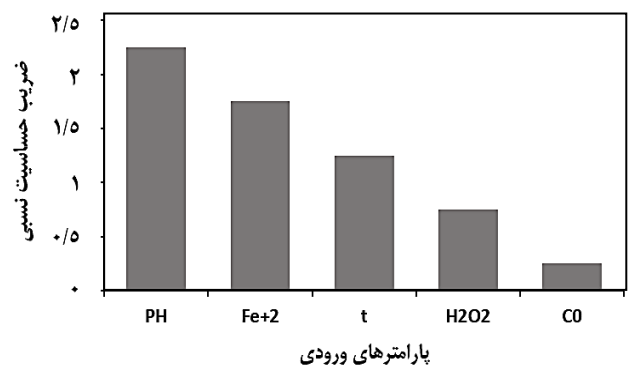
درصد اهمیت نسبی

شکل ۵ - اهمیت نسبی متغیرهای ورودی بر بازده حذف سفیکسیم

بر مبنای متغیرهای ورودی، مدل پیشنهادی شبکه عصبی دارای ۵ لایه ورودی، ۱۳ لایه پنهان و یک لایه خروجی است. لایه های ورودی همان مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار در فرایند حذف سفیکسیم یعنی: غلظت اولیه سفیکسیم (ppm)، زمان واکنش (min)، مقدار عامل اکسید کننده هیدروژن پر اکسید (ml)، مقدار کاتالیست آهن Fe^{+2} و pH است. شبکه MLP مورد استفاده دارای سه لایه می باشد. تابع انتقال در لایه پنهان تانژانت سیگموئیدی^۱ و در لایه خروجی از تابع انتقال خطی^۲ استفاده شد. پس از دادن داده های ورودی و خروجی، شبکه عصبی ۷۰٪ داده ها را به عنوان داده های آموزش، ۱۵٪ را به داده های اعتبارسنجی و ۱۵٪ باقی مانده را به دسته تست به طور تصادفی اختصاص داد. برای آموزش شبکه نخست تعدادی الگوریتم مطابق جدول ۳ مقایسه شدند. در این مدل سازی، ۹ الگوریتم مختلف برای آموزش شبکه استفاده و با مقایسه خطاهای مورد نظر ($RMSE, SSE, R^2, R^2_{adj}$)، بهترین الگوریتم



شکل ۳ - مقایسه درصد حذف سفیکسیم در سه حالت جذب، فنتون و ترکیب جذب و فنتون



پارامترهای ورودی

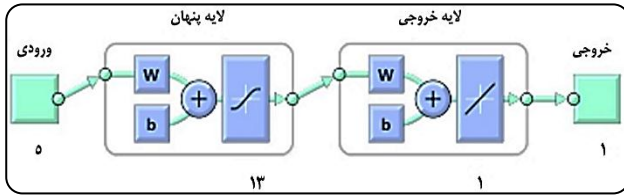
شکل ۴ - نتیجه های آنالیز حساسیت حذف سفیکسیم از محلول آبی بر اساس آنالیز شبکه عصبی

آنالیز حساسیت در روش شبکه عصبی

فرایند آنالیز حساسیت اطلاعات ارزشمندی درباره میزان حساسیت مدل به متغیرهای ورودی آن در اختیار طراح مدل قرار می دهد. مقدار ضریب حساسیت هر متغیر ورودی از تقسیم کردن خطای کل شبکه در غیاب آن متغیر، بر خطای کل شبکه در حضور همه متغیرهای ورودی محاسبه می شود. متغیری که ضریب حساسیت نسبی آن بالاتر باشد تأثیر بیش تری بر متغیر وابسته دارد. نتیجه های آنالیز حساسیت در شکل ۴ نشان می دهد متغیر PH با بیش ترین ضریب حساسیت مهمترین عامل در راندمان حذف سفیکسیم است. غلظت اولیه سفیکسیم کم ترین تأثیر را بر راندمان حذف دارا می باشد. شکل ۵ نمودار ستونی مقدار تأثیر نسبی هر یک از متغیرهای ورودی را بر روی متغیر پاسخ نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود همه متغیرهای ورودی اثر شایان توجهی بر روی متغیر پاسخ یا درصد حذف سفیکسیم دارند و نمی توان از تأثیر هر کدام از آن ها بر فرایند صرف نظر کرد اما در این بین تأثیر pH بیش تر از بقیه متغیرهاست.

(۱) Tansigmoid

(۲) purelin



شکل ۶ - توپولوژی مدل شبکه عصبی مصنوعی در فرایند حذف سفیکسیم با روش فنتون

با فرض تأثیر همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته می‌باشد. در صورتی که درصد نشان داده شده توسط «ضرب تعیین تعدیل شده» فقط حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل و اصلی مدل بر وابسته است و نه همه متغیرها. تفاوت دیگر این است که مناسب بودن متغیرها برای مدل توسط ضرب تعیین حتی با وجود مقدار بالا قابل مشخص شدن نیست در صورتی که می‌توان به مقدار برآورد شده توسط ضرب تعیین تعدیل شده اعتماد کرد.

در این قسمت داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های واقعی مقایسه می‌شود و از این روش کفایت شبکه برای پیش‌بینی حذف سفیکسیم تأیید یا نقض می‌شود. این تابع، به صورت متوالی به شبکه نرون می‌افزاید و این کار تا زمانی انجام می‌شود که میانگین مربع‌های خطا از مقدار تعیین شده کم‌تر شود و یا این که به بیش‌ترین مقدار نرون تعیین شده رسیده باشیم. نتیجه‌های این مطالعه نشان می‌دهد که این شبکه شامل سه لایه: ورودی، پنهان و خروجی است که لایه پنهان با ۱۳ گره بهترین کارایی را دارد. معیار توقف فرایند آموزش، بر اساس خطای تولید شده به‌وسیله ANN تعریف می‌شود. شبکه به کار گرفته شده یک شبکه پرسپترون چند لایه^۲ MLP است که به صورت پیش‌خور عمل می‌کند و در سه لایه طراحی شده است. ۵ عامل ورودی داریم و خروجی شامل یک نرون یعنی بازده حذف سفیکسیم است. نرون‌های لایه میانی از توابع تبدیل تانژانت سیگموئید و نرون‌های لایه خروجی از توابع تبدیل خطی به عنوان تابع فعالیت استفاده می‌کنند. شبکه با دریافت بازخورد از ورودی‌ها در هر مرحله از اجرای الگوریتم، بیش‌ترین نرون‌ها را در لایه پنهان در نظر می‌گیرد. در نظر گرفتن تعداد کم نرون‌ها در لایه فعال‌سازی، باعث می‌شود که شبکه نتواند معادله میان ورودی‌ها و خروجی‌ها را به خوبی بیان کند و افزایش تعداد نرون‌ها شبکه را دچار خطا کرده و مانع از یافتن نقطه کلی بهینه می‌شود. بدین ترتیب باید حد ویژه‌ای را برای افزایش تعداد نرون‌ها در لایه پنهان در نظر گرفت. شکل ۶ ساختمان شبکه عصبی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ - حداقل مربع‌های خطا و ضریب همبستگی در شبکه عصبی طراحی شده برای تعیین تعداد نرون بهینه

تعداد نرون	R^2	R^2_{adj}	RMSE	SSE
۱۰	۰/۸۶۵۷	۰/۸۶۱۲	۱/۶۴۷۱	۸۱/۳۸۸۶
۱۱	۰/۷۸۶۵	۰/۷۷۹۴	۲/۰۱۳۲	۱۲۱/۵۸۸۰
۱۲	۰/۵۲۴۱	۰/۵۰۸۲	۲/۲۰۸۶	۱۴۶/۳۳۱۷
۱۳	۰/۹۹۰۷	۰/۹۹۰۴	۰/۳۹۰۴	۴/۵۷۲۱
۱۴	۰/۹۸۵۵	۰/۹۸۵۰	۰/۴۸۶۰	۷/۰۸۵۲
۱۵	۰/۷۶۹۰	۰/۷۶۱۳	۱/۶۷۰۹	۸۳/۷۵۳۴
۱۶	۰/۹۸۶۱	۰/۹۸۵۶	۰/۴۸۱۸	۶/۹۶۲۶
۱۷	۰/۸۹۴۳	۰/۸۹۰۸	۱/۲۵۶۹	۴۷/۳۹۵۷
۱۸	۰/۹۲۴۰	۰/۹۲۱۵	۱/۱۴۴۵	۳۹/۲۹۵۷
۱۹	۰/۹۲۳۴	۰/۹۲۰۸	۱/۰۲۰۹	۳۱/۲۶۶۴
۲۰	۰/۸۰۱۹	۰/۷۹۵۳	۱/۶۸۶۰	۸۵/۲۷۶۱

برای آموزش شبکه، الگوریتم لونیگ-مارکوات^۱ (LM) به دست آمد. LM از بهترین و مؤثرترین روش‌ها در بسته نرم‌افزاری متلب است و به شدت سرعت همگرایی را افزایش داده و به نتیجه‌گیری سرعت می‌بخشد.

برای به دست آوردن خطاها از معادله‌های (۷) تا (۹) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,predic} - y_{i,exp})^2}{n}} \quad (7)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_{i,predic} - y_{i,exp})^2 \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,predic} - y_{i,exp})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,exp} - y_m)^2} \quad (9)$$

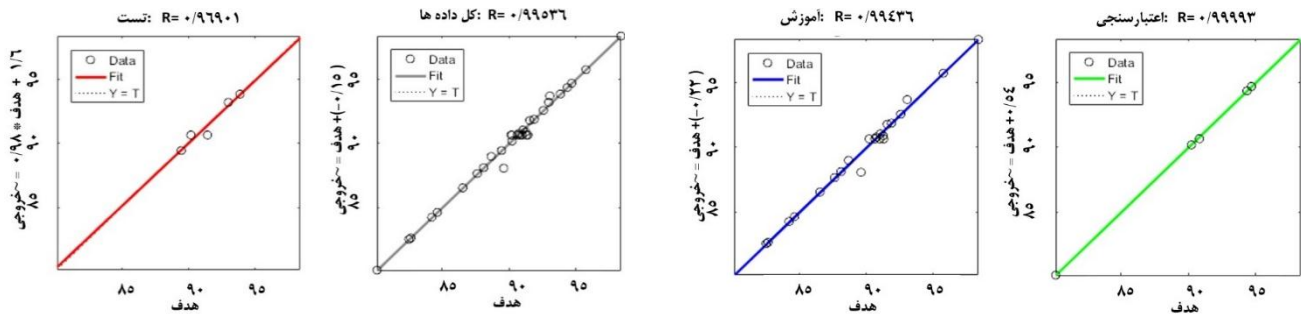
بعد از مقایسه الگوریتم‌های مختلف و رسیدن به بهترین الگوریتم برای به دست آوردن بهترین داده‌های خروجی (پیش‌بینی شده) توسط شبکه عصبی، نرون‌های ۱۰ تا ۲۰ با هم مقایسه شدند. با توجه به جدول ۴ بهترین نتیجه در تعداد نرون ۱۳ به دست آمد. پس از آموزش و به دست آوردن نرون بهینه و آموزش شبکه، شاخص‌های مجموع مربع‌های خطا (SSE)، جذر متوسط مربع‌های خطا (RMSE)، ضریب تعیین تعدیل شده (R^2_{adj}) و ضریب تعیین (R^2) با هم مقایسه شد. «ضریب تعیین» فرض می‌کند که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، تغییرات موجود در متغیر وابسته را تبیین می‌کند بنابراین درصد نشان داده شده توسط ضریب تعیین

(۱) Levenberg - Marquardt

(۲) Multi-Layer Perceptron

جدول ۵ - ماتریس وزن‌ها و بایاس‌ها

تعداد نرون	pH	زمان (دقیقه)	غلظت هیدروژن پراکسید (میلی لیتر)	غلظت یون آهن (گرم بر لیتر)	غلظت سفیکسیم (ppm)	بایاس ۱	وزن‌های بین لایه‌های خروجی و مخفی	وزن‌های بین لایه‌های ورودی و مخفی	
								متغیرها	متغیرها
۱	۰/۶۰۶۴	۱/۰۸۴۱	-۱/۳۴۲	۱/۴۰۸۷	-۰/۰۸۳۳	-۲/۴۰۲۶	-۰/۲۸۵۸		
۲	۱/۳۰۸۸	-۱/۰۰۰۴	۰/۰۳۹۳	-۰/۰۶۵۶	۱/۶۶۳۸	-۲/۰۲۹۷	-۰/۱۳۵۴		
۳	۱/۳۰۰۲	-۰/۳۷۵۶	۱/۱۷۸۹	۰/۶۶۱۴	۱/۳۰۷۷	-۱/۶۳۶۸	-۰/۱۸۳۱۵		
۴	-۰/۷۲۸۲	-۰/۶۲۷۸	۱/۸۶۳۱	-۰/۸۰۴۶	-۰/۵۰۷۴	۰/۸۸۳۰۹	-۰/۳۴۲۰		
۵	-۰/۴۸۰۳	۱/۷۰۶۲	۰/۱۴۵۵	۰/۳۶۴۹	-۱/۴۷۲۳	۰/۴۲۹۴	-۰/۱۸۸۵۳		
۶	-۱/۲۶۲۹	-۱/۱۶۷۹	-۰/۰۸۶۲	۱/۷۵۰۵	۰/۶۳۳۲۸	۱/۱۰۲۰	-۰/۸۴۸۵۳		
۷	-۱/۱۰۷۷	-۰/۵۰۳۲	۱/۷۹۹۲	۱/۳۸۷۰	۰/۰۹۴۲۷	-۰/۳۳۱۳	-۰/۴۲۰۸۲		
۸	۰/۸۶۳۶۲	-۰/۸۶۶۵	-۱/۰۵۵۸	-۰/۹۴۶۰	۱/۴۴۴۳	۱/۰۳۳۱	-۰/۶۹۴۲۲		
۹	۱/۰۳۶۶	-۰/۵۶۳۵	-۱/۹۴۸۲	-۰/۴۲۳۰	-۰/۴۶۹۶	۱/۰۲۹۱	-۰/۲۸۷۱۷		
۱۰	-۱/۴۴۴۳	۰/۲۸۸۸۱	۰/۹۶۲۵۱	-۰/۵۶۲۱	-۱/۳۵۱۵	-۱/۳۰۵۶	-۰/۱۰۴۲۳		
۱۱	-۱/۴۶۵۱	۰/۶۷۶۷۵	۰/۹۳۳۷۹	۰/۹۸۲۶	۰/۶۹۳۷۴	-۱/۸۴۵۲	-۰/۳۷۹۲۹		
۱۲	۰/۹۹۵۸	۱/۳۰۹۹	۰/۴۰۰۱۹	-۰/۸۲۷۰	۱/۶۱۲۰	۲/۰۳۷۱	-۰/۲۸۱۴۳		
۱۳	-۰/۵۳۰۶	-۱/۸۶۹۵	۰/۸۶۰۱۷	۱/۵۴۸۰	۰/۰۱۷۴۶	-۱/۹۰۳۸	-۰/۷۵۱۳۸		
									$B_2 = -0/5187$



شکل ۷ - نمودار پراکندگی پیش‌بینی داده‌ها با مدل ANN بر حسب مقدار واقعی برای آموزش، اعتبارسنجی، آزمایش و کل داده‌ها

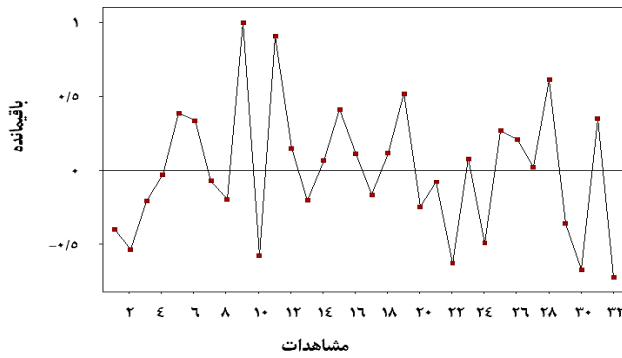
لایه‌های خروجی و مخفی هستند وزن‌ها ضریب‌های بین نرون‌های مصنوعی هستند که همانند قدرت سیناپسی بین آکسون و دندریت در نرون‌های زیستی واقعی عمل می‌کنند. بنابراین هر یک از وزن‌ها تصمیم می‌گیرد که چه نسبت از سیگنال ورودی به بدنه نرون منتقل خواهد شد. در حقیقت با استفاده از ماتریس وزن شبکه مصنوعی میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر روی متغیر خروجی قابل ارزیابی است.

دقت و اعتبار مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی آنالیزهای گوناگونی انجام شد. در آنالیز آماری داده‌های تجربی، یکی از راه‌های ارزیابی صحت مدل بررسی نمودار توزیع نرمال باقی‌مانده است. در شکل ۸ مقادیرهای باقی‌مانده استیودنت شده درونی بیانگر قابل قبول بودن

نمودار رگرسیون آموزش، اعتبارسنجی، آزمایش و همه داده‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل ضریب همبستگی مرحله آموزش، اعتبارسنجی و آزمون به ترتیب برابر با ۹۹/۴۳۶ درصد، ۹۹/۹۹۳ درصد و ۹۶/۹۰۱ درصد است. بنابراین با توجه به همبستگی بالای به‌دست آمده شده به ویژه در مرحله‌های آموزش و اعتبارسنجی، می‌توان اطمینان به‌دست آمده کرد که شبکه طراحی شده، فرایند آموزش را به صورت دلخواهی طی کرده و در مسیر آموزش، بیش‌برازش و کم‌برازش رخ نداده است ضریب همبستگی برای همه نمودارها نزدیک به یک و دلخواه است.

پس از مطمئن شدن از آموزش مناسب ANN ماتریس وزن‌های شبکه به دست آمده و در جدول ۵ گزارش شده است که در آن w_1 وزن‌های بین لایه‌های ورودی و مخفی و w_2 وزن‌های بین



شکل ۱۰ - پراکندگی مستقل باقی مانده‌ها

دقت بالای مدل می‌تواند با اطمینان به پیش‌بینی این مدل اعتماد کرده و از این مدل برای بهینه‌سازی و کنترل فرایند استفاده نمود که این امر می‌تواند به صرفه‌جویی در انرژی و زمان منجر شده و از طرف دیگر محصول نهایی مطلوب‌تری را ایجاد کند.

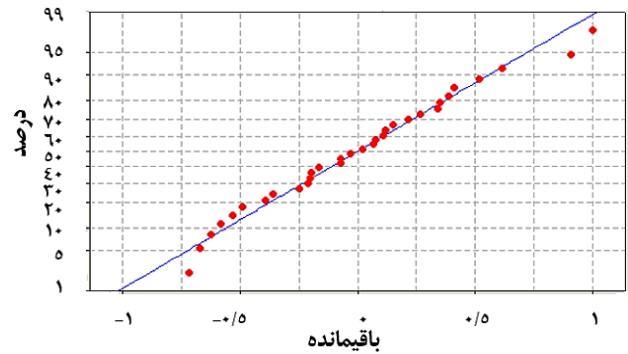
شکل ۱۰ پراکندگی مستقل باقی مانده‌ها را نشان می‌دهد از آن جا که روند سینوسی در استقلال باقی مانده‌ها مشاهده نمی‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل انتخاب شده برای تحلیل داده‌ها مناسب است.

تأثیر غلظت اولیه سفیکسیم

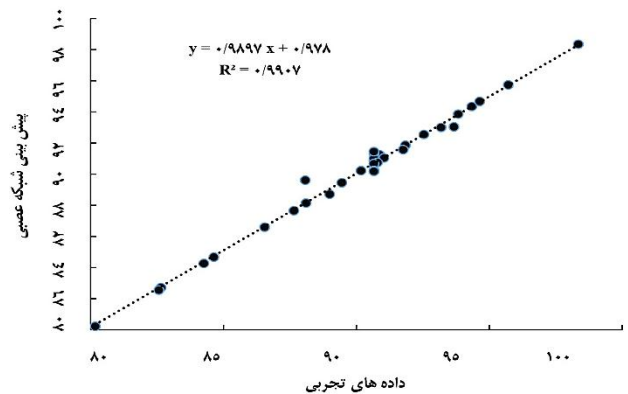
غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک یک نیروی محرکه مهم برای غلبه بر مقاومت انتقال جرم املاح بین فازهای آبی و جامد را فراهم می‌کند. اثر غلظت اولیه سفیکسیم بر راندمان حذف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتیجه‌ها نشان داد که بالاترین راندمان حذف برای غلظت‌های پایین‌تر مشاهده شد. با افزایش غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک، بازده حذف کاهش یافت. تولید واسطه‌ها در غلظت‌های بالاتر سفیکسیم ممکن است منجر به رقابت بین مولکول‌های سفیکسیم و واسطه‌ها برای رادیکال‌های هیدروکسیل شود که به کاهش درصد حذف منجر می‌شود که با نتیجه‌های مطالعه رحمانی و همکاران [۴۷]، سو^۱ و همکاران [۴۸]، حسنی و همکاران [۴۹] سازگار است.

تأثیر زمان اکسایش

به منظور تعیین بهترین زمان و تأثیر آن در فرایند فنتون، آزمایش در زمان‌های ۱ تا ۳۵ دقیقه انجام گرفت. با افزایش زمان واکنش، راندمان حذف سفیکسیم از محلول آبی افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۱۲ علت تند بودن شیب نمودار در دقیقه‌های اول خالی بودن سایت‌های فعال نانولوله کربنی و همچنین سریع بودن



شکل ۸ - نمودار توزیع احتمال نرمال برای باقی مانده‌های حذف سفیکسیم توسط فرایند فنتون

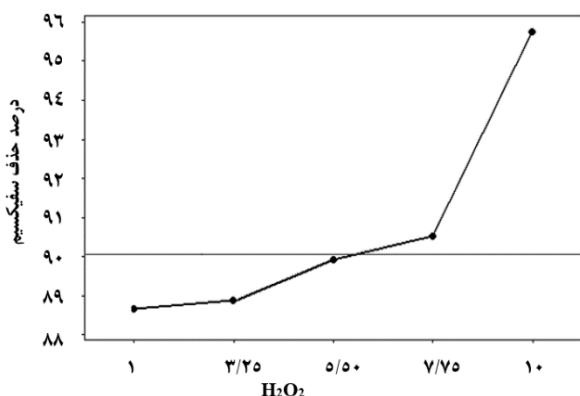


شکل ۹ - همبستگی بین نتیجه‌های تجربی و نتیجه‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی در حذف سفیکسیم با روش فنتون

مدل در تأمین فرضیه‌های آنالیز واریانس می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۸ قابل دیدن است، نقطه‌ها با هم در یک خط مستقیم تراز شده‌اند و هیچ انحرافی در توزیع داده مشاهده نمی‌شود که بیانگر همبستگی زیاد و توزیع طبیعی بین مقادیرهای باقی مانده است. بنابراین مدل می‌تواند برای پیش‌بینی مقادیرهای حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم در فرایند فنتون استفاده شود.

از رسم منحنی پراکندگی مقادیرهای پیش‌بینی شده مدل در مقابل مقادیرهای تجربی و با توجه به این که هر چه پراکندگی داده‌های پیش‌بینی شده در اطراف خط برازش کم‌تر باشد نشانگر کارایی و دقت بالای مدل در برآورد داده‌ها می‌باشد، پراکندگی داده‌های پیش‌بینی شده در اطراف خط برازش در شکل ۹ نشان داده شده است. عامل همبستگی $R^2 = 0.9907$ و معادله برازش بین نتیجه‌های شبکه و مقادیرهای تجربی حذف سفیکسیم از محلول آبی به روش فنتون، نمایانگر عملکرد دلخواه شبکه است. با توجه به

(۱) Xu et al



شکل ۱۳ - اثر هیدروژن پراکسید بر درصد حذف سفیکسیم

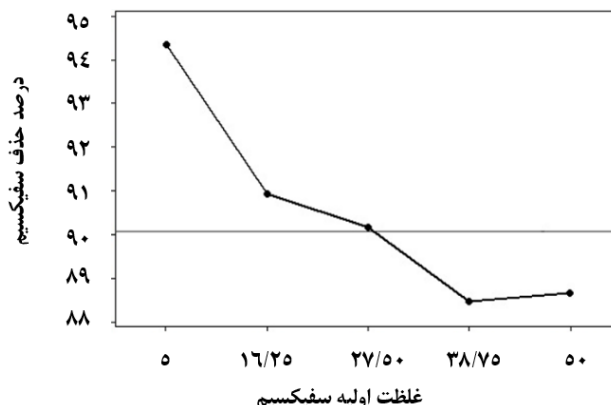
هیدروکسیل و قدرت اکسایش افزایش می‌یابد. رادیکال‌های تولید شده با گذشت زمان دسترسی بیش‌تری به آلاینده‌ها دارند و باعث تخریب بیش‌تر آلاینده‌ها می‌شوند که با نتیجه‌های مطالعه احمدزاده و همکاران [۵۳] هومم^۱ و همکاران [۵۴] مطابقت دارد. تغییرات غلظت پراکسید هیدروژن در راندمان حذف سفیکسیم در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

تأثیر غلظت Fe²⁺

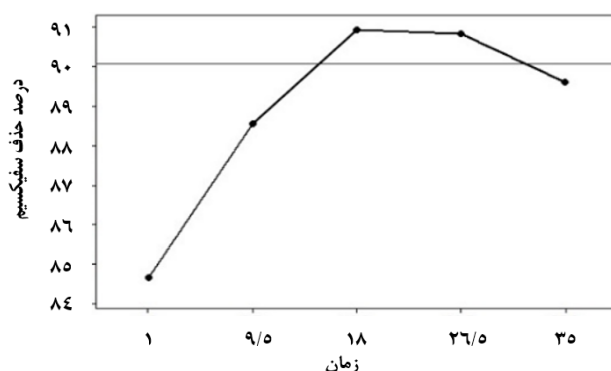
غلظت یون‌های آهن تأثیر به‌سزایی در بازدهی فرایند فنتون دارد. بدون حضور یون‌های آهن، رادیکال‌های هیدروکسیل تشکیل نمی‌شوند. با افزایش غلظت یون آهن، راندمان حذف سفیکسیم افزایش می‌یابد اما مقادیر بالای آن تأثیر چندانی بر راندمان حذف ندارد که این امر را می‌توان در تمایل رادیکال‌های هیدروکسیل به انجام واکنش اکسایش-کاهش با Fe²⁺ و H₂O₂ دنبال کرد که سبب کاهش سرعت و بازده تخریب ترکیب‌های شیمیایی می‌شود. لذا تعیین مقدار بهینه آن بسیار دارای اهمیت است که نتیجه‌ها با مطالعه‌های مهردادی و همکاران [۵۵] و مانول^۲ و همکاران [۵۶] هم‌خوانی دارد.

اثر pH

pH یکی از عوامل تأثیرگذار در راندمان فرایند فنتون می‌باشد. مقدار pH، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و بنابراین کارایی اکسایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تولید رادیکال OH به‌طور معمول در pH اسیدی مقبولیت بیش‌تری دارد. در pH قلیایی نیز Fe²⁺ تبدیل شده به Fe³⁺ و به صورت Fe(OH)₃ رسوب کرده



شکل ۱۱ - اثر غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک سفیکسیم بر درصد حذف به روش فنتون



شکل ۱۲ - اثر زمان واکنش فنتون بر درصد حذف سفیکسیم

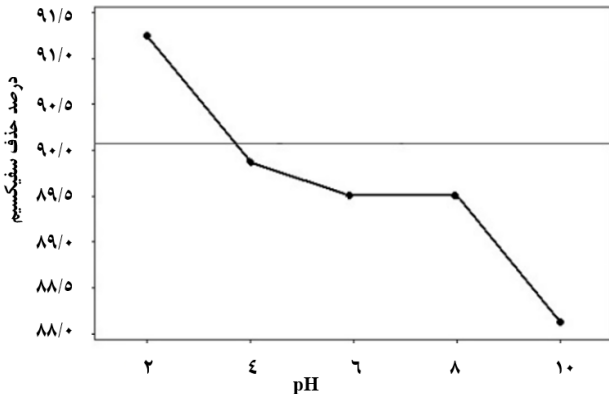
واکنش اکسایش توسط هیدروژن پراکسید است، اما رفته رفته با گذشت زمان و تجزیه بیش‌تر هیدروژن پراکسید تولید رادیکال‌های هیدروکسیل کم‌تر می‌شود در نتیجه فرایند حذف با سرعت کم‌تری صورت می‌گیرد. ضمناً با گذشت زمان جایگاه‌های فعال جاذب کاهش می‌یابد و تعداد فراورده‌های به‌دست آمده از واکنش آهن در محیط آبی افزایش می‌یابد که این موضوع نیز سبب کاهش کارایی حذف با افزایش زمان ماند می‌شود. نتیجه‌های به‌دست آمده از مطالعه حیدری و همکاران [۵۰]، شیخ محمدی و همکاران [۵۱] و حسین پناهی و همکاران [۵۲] روی تصفیه پساب به‌وسیله اکسایش فنتون با نتیجه‌های این پژوهش مطابقت دارد.

اثر غلظت هیدروژن پراکسید

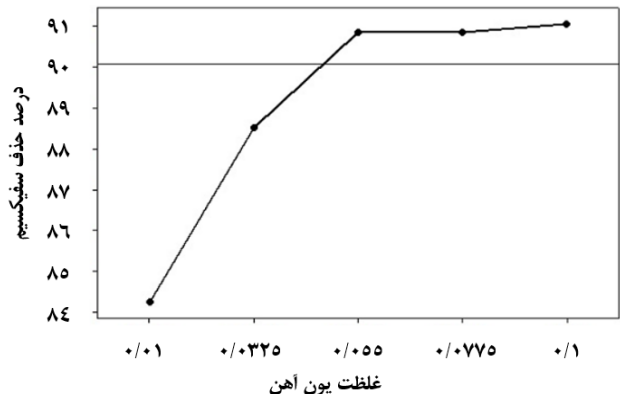
عملکرد سامانه فنتون در حذف سفیکسیم با افزودن پراکسید هیدروژن و به‌دنبال آن، واکنش با یون‌های آهن، تولید رادیکال

(۱) Homem et al

(۲) Manuel et al



شکل ۱۵ - اثر pH در فرایند فنتون بر درصد حذف سفیکسیم



شکل ۱۴ - اثر غلظت یون آهن در فرایند فنتون بر درصد حذف سفیکسیم

روش فنتون باشد. نوع الگوریتم، تابع انتقال و تعداد نرون‌ها در موفقیت شبکه نقش بسیار مهمی دارند. قانون آموزش لونیگ مارکواریت با تابع انتقال تانژانت سیگموئیدی و تابع محرک خطی در تدوین مدل، عملکرد بهتری دارد. شبکه با ۵ لایه ورودی، ۱۳ لایه پنهان و یک لایه خروجی، بهترین ساختار برای پیش‌بینی مقدار حذف سفیکسیم از محلول آبی با روش فنتون به‌دست آمد. در بررسی تأثیر متغیرهای مستقل، pH، غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک سفیکسیم، زمان تماس، غلظت هیدروژن پراکسید و یون آهن بر متغیر خروجی مشخص شد که افزایش غلظت اولیه سفیکسیم، زمان تماس و هیدروژن پراکسید به ترتیب باعث کاهش، افزایش و بیش‌تر شدن راندمان شد. اثر یون آهن نیز بر راندمان حذف سفیکسیم افزایشی است. به طور کلی pH محلول نقش مهمی در راندمان فرایند مورد مطالعه ایفا می‌کند به گونه‌ای که با افزایش pH کاهش یون‌های آزاد Fe^{+2} و رادیکال‌های OH و تشکیل رسوب آهن هیدروکسید، راندمان حذف سفیکسیم کاهش می‌یابد. هیدروژن پراکسید در بازه بازی به آب و اکسیژن تجزیه شده و قدرت اکسایش آن کم می‌شود. سایت‌های فعال جاذب نانولوله کربنی در آغاز واکنش خالی بوده و سفیکسیم به صورت مستقیم جذب می‌شود. با ازدیاد غلظت سفیکسیم در حجم ثابت تعداد مولکول‌های در دسترس واکنش افزایش و احتمال واکنش بین ذره‌های نانولوله کربنی و رادیکال‌های آزاد با مولکول‌های سفیکسیم افزایش یافته لذا درصد حذف بیش‌تر می‌شود. در شرایط بهینه که از مدل شبکه عصبی به‌دست آمد $pH=2/5$ ، غلظت هیدروژن پراکسید برابر با ۱۰ میلی‌لیتر، غلظت اولیه سفیکسیم ۱۰ PPM، غلظت کاتالیست آهن ۰/۰۵ و زمان انجام فرایند ۲۰ دقیقه می‌باشد راندمان

و از چرخه کاتالیستی خارج می‌شود. در نتیجه کاتالیست کافی در محیط عمل باقی نخواهد ماند این مسئله باعث تجزیه H_2O_2 و کاهش فرایند می‌شود. در pH‌های بالا همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشخص است به علت ناپایداری یون‌های آهن، راندمان حذف کاهش می‌یابد، همچنین یون فری در pH بالا ناپایدار بوده و به راحتی به یون فریک تبدیل می‌شود. زیرا این یون تمایل بالایی برای تشکیل کمپلکس‌های هیدروکسوفریک دارد با افزایش pH هیدروژن پراکسید به سرعت تجزیه می‌شود. نتیجه‌های این پژوهش با مطالعه‌هایی که توسط ژای و همکاران^۱ [۵۷]، باپونسامی^۲ و همکاران [۵۸] و بلقندر و همکاران [۵۹] مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

با توجه به توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی فرایندهای پیچیده، در این پژوهش کارایی آن در تخمین حذف سفیکسیم از محلول‌های آبی توسط جاذب نانولوله کربنی بررسی شد. در حالی که پژوهش‌های پیشین پژوهشگران در زمینه حذف سفیکسیم، جذب سطحی با چیتوزان به مقدار ۳۰/۵ میلی‌گرم به کمک جاذب اصلاح شده [۵۲]، حذف سفیکسیم با نشاسته برنج با بازده ۷۰/۲۲ درصد [۲۷]، با اکسایش پیشرفته UV/H_2O_2 ، تخریب ۹۱/۷۹ درصدی سفیکسیم به کمک دی‌اکسیدهای فرابنفش ساطع‌کننده نور [۳] می‌باشد. ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های به‌دست آمده از مدل ۰/۹۹۰۷ است که حاکی از نزدیکی نتیجه‌های مدل با نتیجه‌های آزمایش‌ها می‌باشد. بنابراین شبکه عصبی می‌تواند فناوری مناسبی برای مدل‌سازی، تخمین و پیش‌بینی پروسه جذب سفیکسیم از محلول آبی به کمک جاذب و

(۱) Zhai et al

(۲) Baponusami et al

حذف سفیکسیم با روش فنتون در آزمایشگاه ۹۹/۲۵ درصد و بر اساس پیش‌بینی مدل شبکه عصبی ۹۹/۸۹ درصد بوده است. اختلاف کم بین مقدار پیش‌بینی شده و تجربی حاکی از توانایی مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی رفتار فرایند و بهینه‌سازی شرایط فرایند فنتون در حذف سفیکسیم می‌باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

مراجع

- [1] Masoudi F., Kamranifar M., [Efficiency of Chitosan Extracted from Persian Gulf Shrimp Shell in Removal of Penicillin G Antibiotic from Aqueous Environment](#), *Ira. J. Chem. Chem. En.*, **39(4)**: 235-244 (2020).
- [2] Jain R., Gupta V.K., Jadon N., Radhapyari K., [Volta Metric Determination of Cefixime in pH Armaceuticals and Biological Fluids](#), *Anal. Biochem.*, **407(1)**: 79-88 (2010).
- [3] Pawar V., Gawande S., [Application of Ultraviolet Light-Emitting Diodes to the Removal of Cefixime Trihydrate from Aqueous Solution in the Presence of Peroxydisulfate](#), *J. Appli. Chem. Res.*, **9(3)**: 61-72 (2015).
- [4] Nithyanandam R., Saravanane R., [Treatment of Pharmaceutical Sludge by Fenton Oxidation Process](#), *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, **4(6)**: 359-364 (2013).
- [5] Shokri A., [Removal of Acid Red 33 from Aqueous Solution Fenton and Photo Fenton Processes](#), *J. Chem. Health Risks.*, **7(2)**: 119-131 (2017).
- [6] Azimi S.C., Shirini F., [Advanced Oxidation Process as a Green Technology for Dyes Removal from Wastewater: A Review](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, **40(5)**: 1467-1489(2021).
- [7] Shokri A., Bayat A., Mahanpoor K., [Employing Fenton-Like Process for the Remediation of Petrochemical Wastewater through Box-Behnken Design Method](#), *Desalin. Water Treat.*, **166**: 135-143 (2019).
- [8] Bobu M., Yediler A., Siminiceanu I., Schulte-Hostede S., [Degradation Studies of Ciprofloxacin on a Pillared Iron Catalyst](#), *Appl. Catal.*, **83(1-2)**: 15-23 (2008).
- [9] Elmoll E.S., Chaudhuri M., [Degradation of the Antibiotics Amoxicillin, Ampicillin and Cloxacillin in Aqueous Solution by the Photo-Fenton Process](#), *J. Hazard. Mater.*, **172(2-3)**: 1476-1481 (2009).
- [۱۰] شمس خرم‌آبادی ق.ا.، بلقدر ع.، گودینی ح.، آل‌نبی املشی س.ف.، حاتمی س.، گودرزی ع.، دانش بحرین م.ع.، شعبانی ح.، بررسی فرایند اکسایش پیشرفته UV/H₂O₂ در حذف آنتی‌بیوتیک سفتریاکسون از محیط آبی، فصلنامه علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی لرستان، **۱۶(۱)**: ۲۳ تا ۳۱ (۱۳۹۳).
- [11] Heidari Z., Motevasel M., Jaafarzadeh N.A., [Application of Electro-Fenton Process to the Removal of Pentachlorophenol from Aqueous Solutions](#), *Iran. J. Oil & Gas Sci. Technol.*, **4(4)**: 76-87 (2015).
- [12] Teymoori F., Pesarakloo V., Ghafourian H., Kashefiol Asl M., [Investigation of using Fenton Oxidation Process for Ampicillin and Ciprofloxacin Removal from Hospital Wastewater](#), *Ebnesina IRIAF Health. Admin.*, **19(2)**: 36-42 (2017).

- [13] Mohammadi F., Rahimi S., Yavari Z., [Application of Artificial Neural Network in Bio Sorption Modeling of Chromium \(VI\) from Aqueous Solutions](#), *Iran. J. Health Environ.*, **8(4)**: 433-46 (2016).
- [۱۴] پارسازاده ن.، یوسفی ف.، قائدی م.، کریمی ر.، بروسان ف.، [بهینه‌سازی فرایند جذب سطحی رنگ دی سولفین بلو توسط نانوذره ZnO-Cr نشانده شده بر روی کربن فعال با استفاده از روش پاسخ سطح و مدل‌سازی با کمک شبکه عصبی مصنوعی](#)، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۳۷(۴)**: ۳۷ تا ۵۴ (۱۳۹۷).
- [15] Asrari E., Khosravi V., [Application of Artificial Neural Network for Modeling Chromium \(VI\) Removal using Iron Oxide Nanoparticles](#), *J. Environ. Water Eng.*, **3(1)**: 30-39 (2017).
- [16] Sabonian M., Behnajady M.A., [Application of Artificial Neural Networks in the Modeling of Photocatalytic Reduction of Cr \(VI\) by Titanium Dioxide Nanoparticles: Optimization of Artificial Neural Network Structure](#), *Iran. J. Health & Environ.*, **11(2)**: 183-196 (2018).
- [17] Dehghani S., Jonidi jafari A., Farzadkia M., Gholami M., [Investigation of the Efficiency of Fenton's Advanced Oxidation Process in Sulfadiazine Antibiotic Removal from Aqueous Solutions](#), *Arak Med. Univ. J.*, **15(7)**: 19-29 (2012).
- [18] Le-Minh N., Khan S.J., Drewes J.E., Stuetz R.M., [Comparison of Homogeneous and Heterogeneous Fenton and Sono-Fenton Decolorization of Titan Yellow: Doehlert Optimization, Response Surface Methodology, and Synergic Effects Study](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, **40(5)**: 1457-1466 (2021).
- [19] Klavarioti M., Mantzavinos D., Kassinos D., [Removal of Residual Pharmaceuticals from Aqueous Systems by Advanced Oxidation Processes](#), *Environ. Int.*, **35(1)**: 402-417 (2009).
- [20] Kümmerer K., [Antibiotics in the Aquatic Environment - A Review](#), *Chemosphere*, **75(4)**: 417-434 (2009).
- [21] Košutić K., Dolar D., Ašperger D., Kunst B., [Removal of Antibiotics from a Model Wastewater by RO/NF Membranes](#), *Sep. Purif. Technol.*, **53(3)**: 244-249 (2007).
- [22] Poorsharbat F., Raouf F., Davvand A., [A Review on Diclofenac Removal from Aqueous Solution Emphasizing on Adsorption Method](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, **39(1)**: 141-154 (2020).
- [23] Yazdanbakhsh A., Paseban A., Ghorbanpoor R., [Inhibitory Effects of the Amoxicillin on Treatment Efficiency of Synthetic Wastewater in a Sequencing Batch Reactor](#), *JNKUMS.*, **7(3)**: 669-682 (2015).
- [24] Samarghandi M.R., Leili M., Harati R., Tarlani Azar M., Maleki S., [Efficiency of Electro/Persulfate Process by Iron Electrode in Removing Furfural from Aqueous Solution](#), *J. Mazandaran Univ. Med. Sci.*, **24(19)**: 95-108 (2014).
- [25] Uslu M., Balçoglu I.A., [Comparison of the Ozonation and Fenton Process Performances for the Treatment of Antibiotic Containing Manure](#), *Sci. Total Environ.*, **407(11)**: 3450-8 (2009).
- [26] Manshoury M., Yazdanbakhsh A., Sardar M., Sheykh Mohammadi A., [Investigation of Effective Factors for Fenton Like Process in Para-Chlorophenol Removal from Aqueous Solutions](#), *Iran J. Health & Environ.*, **3(4)**: 381-388 (2011).

- [27] Tabatabaei F., Asadi-Ghalhari M., Esmaeili R., [Modeling and Optimization of Cefixime Removal from Aqueous Solutions by Potato Starch using Response Surface Methodology \(RSM\)](#), *J. Health. Res. Commun.*, **6(2)**: 27-37 (2020).
- [۲۸] کریمی ب.، احرامپوش م.ح.، ابراهیمی ا.، مختاری م.، بررسی استفاده از فرایند اکسایش پیشرفته در حذف ترکیب‌های نیتروژن‌دار از شیرابه کارخانه کمپوست اصفهان، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی*، **۳۱(۴)**: ۳۳ تا ۳۸ (۱۳۹۱).
- [29] Munter R., [Advanced Oxidation Processes-Current Status and Prospects](#), *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.*, **50(2)**: 59-80 (2001).
- [30] Meric S., Selcuk H., Belgiorno V., [Acute Toxicity Removal in Textile Finishing Wastewater by Fenton's Oxidation, Ozone and Coagulation-Flocculation Processes](#), *J. Water Res.*, **39(6)**: 1147-1153 (2005).
- [31] Noorossana R., Davanloo Tajbakhsh S., Saghaei A., [An Artificial Neural Network Approach to Multiple Response Optimization](#), *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, **40(11)**: 1227-1238 (2009).
- [32] Zare Abiane H., [Evaluation of Ekbatan Wastewater Treatment Plant using Artificial Neural Network](#), *J. Envirology.*, **12(40)**: 2-8 (2014).
- [33] Pai T.Y., Tsai Y.P., Lo H.M., Tsai CH., Lin CY., [Grey and Neural Network Prediction of Suspended Solids and Chemical Oxygen Demand in Hospital Wastewater Treatment Plant Effluent](#), *J. Comput. Chem. Eng.*, **31(10)**: 1272-1281 (2007).
- [34] Gluclu D., Dursun S., [Advanced Neural Network Modelling of a Large Scale Wastewater Treatment Plant Operation](#), *Bio. Process. Biosyst. Eng.*, **33**: 1051-1058 (2010).
- [35] Nasr M., Medhat A., Moustafa H., Kobrosy G., [Application of Artificial Neural Network for the Prediction of EL-AGAMY Wastewater Treatment Plant Performance-Egypt](#), *Alexandria Eng. J.*, **51(1)**: 37-43 (2012).
- [36] Nourani V., Elkiran G., Abba S., [Wastewater Treatment Plant Performance Analysis using Artificial Intelligence-an Ensemble Approach](#), *Water Sci. Technol.*, **78(10)**: 2064-2076 (2018).
- [۳۷] ندیری ع.ا.، اصغری مقدم ا.، شکری س.، بررسی کارایی تصفیه خانه پساب تبریز با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، *محیط شناسی*، **(۴)**: ۴۰ تا ۸۲۷ تا ۸۴۴ (۱۳۹۳).
- [۳۸] خادمی کیا س.، حقی زاده ع.، گودینی ح.، شمس خرم آبادی ق.ا.، ارزیابی عملکرد تصفیه خانه پساب خرم آباد توسط شبکه هوش مصنوعی، *فصلنامه علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی لرستان*، **(۳)**: ۱۸ تا ۲۳ (۱۳۹۵).
- [39] Baaloudj O., [Artificial Neural Network Modeling of the Elimination of Antibiotics in the Wastewater by Advanced Processes of Oxidation](#), *Int. Res. J. Pharm. Pharmacol.*, **8(4)**: 2251-2256 (2020).
- [۴۰] ذوقی م.ج.، سعیدی م.، برآورد میزان شیرابه مراکز دفن زباله با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، *آب و پساب*، **(۱)**: ۲۲ تا ۷۶ تا ۸۴ (۱۳۹۰).

- [41] Kadhim S., Hamed A., Mubdir N., Abdullah M., Kadhim S., [Spectrophotometer Determination of Cefixime in Pure form and Pharmaceutical Preparation by using Cloud Point Extraction](#), *Baghdad Sci. J.*, **17(2)**: 2078-8665 (2020).
- [42] Kumar A., Kishore L., Nair A., Kaur N., [Estimation of Cefixime and Ofloxacin in its Pharmaceutical Dosage form by Spectrophotometric Methods](#), *J. Pharm. Res.*, **4(6)**: 1864-1866 (2011).
- [43] Attimarad M., Al-Dhubiab B., Alhaider I., Nair A., Harsha S., Mueen K., [Simultaneous Determination of Moxifloxacin and Cefixime by First and Ratio First Derivative Ultraviolet Spectrophotometry](#), *Chem. Cent. J.*, **6(105)**: 2-7 (2012).
- [44] Shankar D., Sushma K., Laxmi R., Reddy M., Murthy T., [UV and Visible Spectrophotometric Methods for the Determination of Cefixime](#), *Indian Drugs*, **38(12)**: 617-619 (2001).
- [45] Dutta J., Ahmad Mala A., [Removal of Antibiotic from the Water Environment by the Adsorption Technologies](#), *Water Sci. Techno.*, **82(3)**: 401-426 (2020).
- [۴۶] محقق م.؛ حذف آنتی‌بیوتیک سفیکسیم از پساب کارخانه‌های آنتی‌بیوتیک سازی با استفاده از سامانه غشایی میکروصافی، نانو صافی، اسمز معکول و کربن فعال، اولین همایش ملی نانوتکنولوژی مزایا و کاربردها، همدان، ایران، (۱۳۹۲).
- [47] Rahmani K., Faramarzi M.A., Mahvi A.H., Gholami M., Esrafil A., Forootanfar H., Farzadkia M., [Elimination and Detoxification of Sulfathiazole and Sulfamethoxazole Assisted by Laccase Immobilized on Porous Silica Beads](#), *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, **97**: 107-114 (2015).
- [48] Xu R., Li Y., Li H., [Degradation of Melatonin by UV, UV/H₂O₂, Fe₂+/H₂O₂ and UV/Fe₂+/H₂O₂ Processes](#), *Sep. Purif. Technol.*, **68(2)**: 261-266 (2009).
- [49] Hasani K., Peyghami A., Moharrami A., Vosoughi M., Dargahi A., [The Efficacy of Sono-Electro-Fenton Process for Removal of Cefixime Antibiotic from Aqueous Solutions by Response Surface Methodology and Evaluation of Toxicity of Effluent by Microorganisms](#), *Arabian J. Chem.*, **13(7)**: 6122-6139 (2020).
- [50] Heidari M., Malakootian M., Asadi F., [Removal of Phosphor from Aqueous Solution by Fenton Oxidation Process](#), *J. Env. Sci. Tech.*, **19(2)**: 63-72(2017).
- [۵۱] شیخ محمدی ا.، منشوری م.، یزدانبخش ح.، سردار م.، بررسی کارایی فرایند شبه فنتون در حذف ۴-کلروفنل از محیط‌های آبی، فصلنامه علمی پژوهشی دانشکده بهداشت یزد، (۱) ۱۲: ۱۰ تا ۱۷ (۱۳۹۲).
- [۵۲] پناهی ح.، کمانی ح.، سنچولی ف.، هاونگی م.، بررسی کارایی فرایند اولتراسونیک/فنتون در حذف آنتی‌بیوتیک پنیسیلین جی از محیط‌های آبی به روش سطح-پاسخ، مجله مهندسی بهداشت محیط، (۱) ۵: ۸۳ تا ۹۸ (۱۳۹۶).
- [53] Ahmadzadeh S., Dolatabadi M., [Removal of Acetaminophen from Hospital Wastewater using Electro-Fenton Process](#), *Environ. Earth Sci.*, **77**: 53-63 (2018).
- [54] Homem V., Santos L., [Degradation and Removal Methods of Antibiotics from Aqueous Matrices—A Review](#), *J. Environ. Manage.*, **92(10)**: 2304-2347(2011).

- [۵۵] مهرداد ن.، نبی بیدهندی غ.ر.، رودباری ع.ا.، استفاده از فرایند فنتون برای کاهش حجم لجن زیستی صنایع، *مجله دانش و تندرستی دانشگاه علوم پزشکی شاهرود*، **۱۲(۳)**: ۴۸ تا ۵۴ (۱۳۹۶).
- [56] Manuel E., Correa C., María F., Franco A., Fernández-González C., Godini H., Almasian M., *Advanced Oxidation Processes for the Removal of Antibiotics from Water*, *Desalin. Water Treat.*, **55(4)**: 1068-1077 (2015).
- [57] Zhai J., Ma H., Liao J., Rahaman M., Yang Z., *Comparison of Fenton, Ultraviolet-Fenton and Ultrasonic-Fenton Processes on Organics and Colour Removal from Pre-Treated Natural Gas Produced Water*, *Int. J. Environ. Sci. Techno.*, **15(11)**: 2411-2422 (2018).
- [58] Baponusami B., Muthukumar K., *Advanced Oxidation of Phenol: a Comparison between Fenton, Electro-Fenton, Sono-Electro-Fenton and Photo-Electro-Fenton Processes*, *Chem. Eng. J.*, **183**: 1-9 (2012)
- [59] Belghadr I., Shams Khorramabadi G., Godini H., Almasian M., *The Removal of the Cefixime Antibiotic from Aqueous Solution using an Advanced Oxidation Process (UV/H₂O₂)*, *Desalin. Water Treat.*, **55(4)**: 1068-1077 (2015).