

Optimization and Prediction of Photocatalytic Process of Nano Titania Immobilized on Concrete Surface for Treating Phenolic Water

M. Delnavaz¹, B. Ayati^{2*}, H. Ganjidoust³
and S. Sanjabi⁴

Abstract

The optimization of photocatalytic process by Taguchi method and the prediction of removal efficiency by artificial neural network were investigated in this research. Immobilized photocatalytic reactor was irradiated with TiO₂ by UV-A lamps to produce hydroxyl radicals for degradation of phenolic synthetic wastewater. Taguchi method and L₁₆ orthogonal array for experimental planning was used for determination of optimum conditions including initial phenol concentration (50-500 mg/L), UV lamps power (8-60 W), pH (4-12), TiO₂ concentration (20-80 g/m²), and UV lamp distance from concrete surface (5-20 cm). The results showed that influent phenol concentration and solution pH had the highest effect on the removal efficiency. The optimum conditions were obtained for influent phenol concentration of 50 mg/L, pH of 12, UV lamp of 60 W, titania amount of 80 g/m², and UV lamp distance to concrete surface of 10 cm. Prediction of photocatalytic process performance by artificial neural network showed that the best result was obtained at the structure of (5-6-4-1). Transfer functions for this model were Gaussian, Hyperbolic Tangent, and Sigmoid for hidden layer 1 and 2 and output layer, respectively. The difference between measured and predicted values of output nodes was less than 5%.

Keywords: Taguchi method, Titanium dioxide, Concrete, Artificial neural network, Model.

Received: December 3, 2011

Accepted: July 15, 2013

بهینه‌سازی و پیش‌بینی فرایند فتوکاتالیستی با پوشش نانو ذرات تیتانیا بر سطح بتن برای تصفیه آب حاوی فنل

محمد دلنواز^۱، بیتا آیتی^{۲*}، حسین گنجی دوست^۳
و سهراب سنجابی^۴

چکیده

در این تحقیق، بهینه‌سازی فرایند فتوکاتالیستی توسط روش تاگوچی و پیش‌بینی راندمان حذف سیستم توسط شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. راکتور فتوکاتالیستی از نوع پوشش یافته بود که انرژی مورد نیاز برای تحریک نانوذرات تیتانیا و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل جهت تجزیه فنل موجود در آب با استفاده از لامپ‌های UV-A تأمین می‌شد. جهت بهینه‌سازی فرایند با استفاده از روش تاگوچی و آرایه استاندارد L₁₆، تاثیر پارامترهای موثر شامل غلظت آلاینده ورودی (۵۰-۵۰۰ mg/L)، شدت تابش لامپ (۶۰-۸۰ وات)، pH محلول (۴-۱۲)، میزان تیتانیا بر واحد سطح (۲۰-۸۰ g/m²) و فاصله لامپ تا صفحات بتنی (۵-۲۰ cm) بررسی شد. نتایج نشان داد که تاثیر غلظت آلاینده ورودی و pH نسبت به سایر عوامل بیشتر بوده و شرایط بهینه بصورت غلظت آلاینده ورودی ۵۰ mg/L، pH برابر ۱۲، شدت تابش ۶۰ وات، میزان تیتانیا معادل ۸۰ g/m² و فاصله لامپ از صفحات معادل ۱۰ cm تعیین گردید. پیش‌بینی فرایند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که ساختار شبکه بصورت دو لایه پنهان و توابع انتقال گوسین در لایه پنهان اول، تانژانت هیپربولیک در لایه پنهان دوم و سیگموئید در لایه پنهان خروجی و ساختار (۱-۴-۶-۵) بهترین جواب بوده و اختلاف میان نتایج آزمایشگاه و مدل کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: تاگوچی، دی‌اکسید تیتانیوم، بتن، شبکه عصبی مصنوعی، مدل

تاریخ دریافت مقاله: ۱۲ آذر ۱۳۹۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۴ تیر ۱۳۹۲

1- Ph.D Graduate in Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, and Assistant Professor, Department of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: ayati_bi@modares.ac.ir

3- Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Engineering Faculty, Material Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*- Corresponding Author

۱- فارغ التحصیل دکتری مهندسی محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران و استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*- نویسنده مسئول

(De Lasa et al., 2005). در سیستم‌های معلق مهم‌ترین مشکل، بازیابی مجدد کاتالیست‌ها می‌باشد. از این رو استفاده از سیستم‌های چسبیده می‌تواند علاوه بر حل مشکل فوق باعث ایجاد زمینه‌های مناسب برای رشد این فرایند در پابلوت‌های نیمه صنعتی و صنعتی گردد. محققین مختلف از بسترهای گوناگون برای تثبیت نانو ذرات استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به کربن فعال (Uchida et al., 1993)، کابل‌های فیبر نوری (Scotti et al., 2009)، فایبر گلاس (Horikoshi et al., 2002)، شیشه (Rachel et al., 2002) و سنگ متخلخل (Venkata Subba Rao et al., 2003) اشاره کرد که البته استفاده از این بسترها با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها به مطالعات آزمایشگاهی محدود شده است. به عنوان مثال:

حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۷ طی تحقیقات با پوشش دادن نانو ذرات TiO_2 بر روی سنگدانه‌های سبک و متخلخل پرلیت، راندمان حذف فنل با استفاده از لامپ‌های UV-C با توان‌های ۸۰ و ۱۲۵ وات را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ۲۰۰ mL از فنل ورودی با غلظت ۱ mM با استفاده از لامپ با توان ۸۰ و ۱۲۵ وات پس از ۴ ساعت به ترتیب به میزان ۳۹/۷ و ۸۳/۳ درصد حذف شده است (Hosseini et al., 2007). در تحقیقی، تربیا فتوکاتالیست‌های TiO_2 و $Fe-C-TiO_2$ را بر روی پوشش‌های کتانی برای تجزیه فنل مورد استفاده قرار داد. فتوکاتالیست $Fe-C-TiO_2$ راندمان بالاتری داشت و در دو سیستم به ترتیب ۱۸-۱۵ و ۱۶-۱۵ mg/L فنل بعد از ۵ ساعت تابش UV بطور کامل حذف شد (Tryba, 2008). لینگ و همکاران با استفاده از روش سل-ژل، TiO_2 را بر سطح شیشه‌ای راکتور لوله‌ای پوشش دادند. در این تحقیق که با استفاده از توان‌های مختلف لامپ با شدت $5-15 \text{ mW/cm}^2$ انجام شد، نیمه عمر واکنش برای غلظت آلاینده ورودی به میزان ۱۰۰۰ میکرو مولار معادل ۵۶ دقیقه تعیین گردید (Ling et al., 2004). در تحقیقی دیگر، تصفیه آب آلوده به فنل با استفاده از راکتور فتوکاتالیستی با پوشش ذرات TiO_2 بر بستر پلاتینی با استفاده از لامپ UV با توان ۳۰ وات بررسی شد. راندمان حذف TOC با غلظت اولیه 22 mg/dm^3 در زمان ۸ ساعت به میزان ۹۵ درصد گزارش شده است (Zhang et al., 2003). استفاده از کربن اسفنجی برای پوشش‌دهی فتوکاتالیست‌های TiO_2 جهت تجزیه فنل توسط ولاسکو و همکاران انجام شد. بالاترین راندمان حذف این سیستم در مدت زمان ۳۵۰ دقیقه و غلظت آلاینده ورودی به میزان ۱۰۰ mg/L و با استفاده از لامپ UV فشار بالا با توان ۱۲۵ W به میزان ۹۵ درصد بدست آمد (Velasco et al., 2010). در تحقیقی مشابه، کاریو و همکاران اقدام به تثبیت نانو

فنل و مشتقات آن، ترکیبات حلقوی سخت تجزیه‌پذیری هستند که در فاضلاب بسیاری از صنایع شیمیایی سنتزی، رزین، آفت‌کش‌ها، زغال‌سنگ، چوب و کاغذ، پالایش نفت و... یافت می‌شوند (Sarfraz et al., 2004). عدم تصفیه مناسب و تخلیه این آلاینده‌ها به محیط زیست، به میزان زیادی باعث آلودگی منابع آب می‌شود. سازمان بهداشت جهانی حد مجاز غلظت فنل و کلروفنل‌ها را در آب آشامیدنی کمتر از ۰/۱ میکروگرم (Dezuane, 1997) و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا برای منابع آب جوامع انسانی، ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر (U.S. Environmental Protection Agency, 2002) تعیین کرده است که بیانگر ضرورت تصفیه و کنترل آنهاست. روش‌های مختلف جهت تصفیه فنل مورد استفاده قرار می‌گیرند که به‌عنوان نمونه می‌توان به انواع بیولوژیکی شامل لجن فعال (Suryaman et al., 2006)، راکتورهای ناپیوسته متوالی^۱ (Moussavi et al., 2009) و راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک^۲ (Ayati et al., 2007)، فیزیکی مانند جذب سطحی و سونولیز^۳ و شیمیایی شامل فنتون، الکتروشیمیایی (Busca et al., 2008) و ازن (Manojlovic et al., 2007) اشاره کرد. اگرچه فرایندهای بیولوژیکی به میزان مناسبی توانسته‌اند این قبیل آب‌های آلوده یا فاضلابها را تصفیه نمایند، ولی نیاز به کنترل دقیق پارامترهای موثر بر سیستم مانند pH ، دما، اکسیژن و اثر بازدارندگی فنل باعث محدودیت استفاده از این سیستم‌ها برای تصفیه نمونه‌هایی با حد بالای آلاینده‌گی شده است. سایر فرایندهای متداول تصفیه مانند روش‌های فیزیکی و شیمیایی نیز باعث انتقال آلودگی از یک فاز به فاز دیگر، تغلیظ آن‌ها و یا تولید یک آلاینده جدید می‌شوند که نیاز به تصفیه بیشتری دارند. در سال‌های اخیر فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به دلیل سهولت کاربرد، اقتصادی بودن و کارایی بالا به عنوان جایگزینی مناسب (Sreethawong and Chavadej, 2008; Horderm et al., 2003; Beltran et al., 2005) برای فرایندهای متداول تصفیه بکار رفته‌اند. در این فرایند مواد آلاینده در حضور ذرات فتوکاتالیستی تحت تأثیر تابش اشعه UV قرار گرفته و به دلیل تولید رادیکال‌های هیدروکسیل اکسید و تجزیه می‌گردند (De Lasa et al., 2005). در بین انواع ترکیبات مورد استفاده در فرایند فتوکاتالیستی، دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) یا تیتانیا به دلیل هزینه کم، عدم سمیت و واکنش‌پذیری بالا برای تجزیه ترکیبات آلی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Wang et al., 2009). راکتورهای فتوکاتالیستی مورد استفاده در تصفیه آب آلوده یا فاضلاب به دو صورت معلق و پوشش یافته می‌باشند

ناحیه فتوکاتالیستی (سطوح بتنی پوشش داده شده) منتقل و با اعمال شیب ملایمی در این قسمت با استفاده از نیروی ثقل به سمت مخزن هوادهی رفته و بصورت سرریزی وارد مخزن آلاینده می‌شد. جهت تقسیم جریان آب بر روی سطوح بتنی از یک لوله به عرض راکتور و با فاصله منافذ ۱ سانتی‌متر استفاده شد. غلظت مورد نیاز اکسیژن جهت انجام فرایند فتوکاتالیستی در ناحیه هوادهی توسط پمپ Crison A6500 تأمین و میزان آن توسط DO متر شرکت Crison مدل Oxi45 کنترل شد. با توجه به خطرات لامپ‌های UV استفاده شده در راکتور و جهت حفظ شرایط ایمنی در آزمایشگاه، جداره خارجی راکتور بطور کامل با ورقه‌های آلومینیومی پوشانده شد. طرح شماتیک راکتور در شکل ۱ ارائه شده است.

۲-۲- پوشش‌دهی نانو ذرات

در این تحقیق از صفحات بتنی به ابعاد ۵×۲۵×۵ سانتی‌متر به عنوان بستر جهت پوشش دهی نانو ذرات استفاده شد. جهت ساخت بتن مطابق روش آیین نامه بتن آمریکا (American Concrete Institute, 1996) از سیمان تیپ ۵ (ضد سولفات مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب شهری و صنعتی)، آب شرب تهران، سبکدانه لیکا^۵ با حدود دانه‌بندی ۱۰-۵ میلی‌متر جهت حصول تخلخل کافی و افزایش مساحت سطحی بتن و ماسه دوبار شور ۵-۰ میلی‌متر استفاده گردید (جدول ۱).

اتصال نانو ذرات به صفحات بتنی با استفاده از چهار روش دوغابی، مخلوط با سیمان و استفاده از دو نوع چسب اپوکسی و ضد آب انجام شد. چسب اپوکسی مورد استفاده با نام تجاری Nitofix و چسب ضد آب با نام تجاری Nitotile و هر دو محصول شرکت فارس ایران بودند. مراحل پوشش‌دهی با استفاده از هر روش مطابق زیر بوده است:

۲-۲-۱- روش دوغابی

۲۰ g/L از محلول TiO_2 در محلول آب مقطر- متانول (با نسبت حجمی ۲۵٪) ساخته شد.

محلول ساخته شده به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس با دور ۱۵۰۰ rpm به شدت همزده شد.

دوغاب حاصل به مدت ۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار گرفت تا محلول نانو ذرات TiO_2 فلوکوله شده از هم جدا شوند و دوغاب حالت یکنواخت بگیرد.

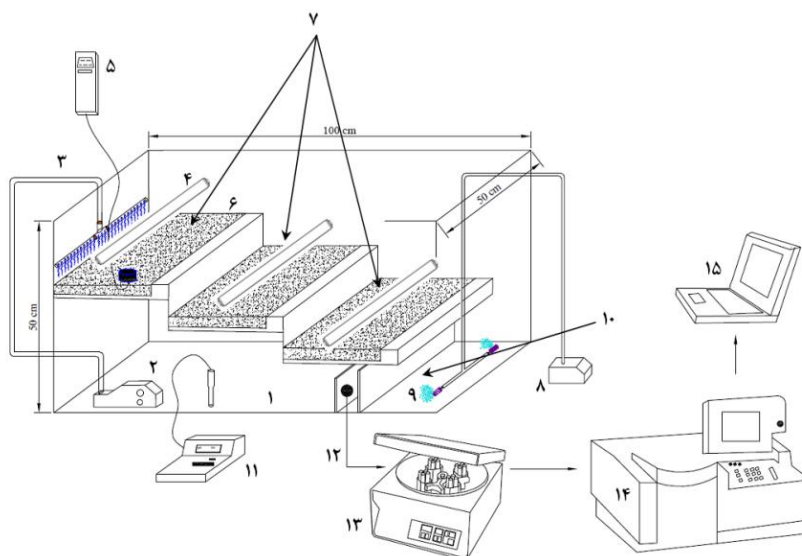
کریستال‌های TiO_2 بر کربن فعال کردند. راندمان این سیستم پس از ۱۲۰ دقیقه و تابش با لامپ UV-A به شدت ۳۰۰ W در غلظت اولیه آلاینده ۴۰ ppm معادل ۴۵ درصد تعیین گردید (Carpio et al., 2005). در این تحقیق با استفاده از چهار روش، نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیم بر روی سطح بتن پوشش یافته و قابلیت سیستم فتوکاتالیستی در شرایط مختلف بهره‌برداری در حذف فنل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه بسیاری از سازه‌های مهندسی در تصفیه خانه‌های آب و فاضلاب از جنس بتن هستند و نیز به دلیل خصوصیات فیزیکی و شرایط اقتصادی اینگونه بسترها، در صورت فراهم نمودن شرایط فرایند فتوکاتالیستی می‌توان از این ماده به عنوان بستر مواد فتوکاتالیست در تصفیه‌خانه‌ها استفاده نمود. ضمن اینکه مطالعات استفاده از بتن جهت پوشش نانو ذرات در فرایندهای تصفیه آب و فاضلاب بسیار محدود بوده و تحقیقات مختصر انجام شده منحصر به تثبیت بر روی مصالح تشکیل دهنده بتن مانند سنگدانه‌ها می‌باشد.

تاثیر عوامل مختلف در فرایند فتوکاتالیستی، اهمیت بهینه‌سازی این سیستم‌ها جهت افزایش راندمان حذف را ضروری می‌سازد. روش‌های گوناگونی جهت بهینه‌سازی موجود است که در این میان، بکار بردن روش‌های مبتنی بر طراحی آزمایش می‌تواند منجر به نتایج دقیق‌تری گردد (ضرغامی و احسانی، ۱۳۹۰). در این تحقیق از روش تاگوچی بر مبنای طراحی آزمایش و آنالیز آماری تحلیل واریانس^۴ (ANOVA) جهت بهینه‌سازی فرایندهای مختلف استفاده گردید. هدف دیگر این تحقیق با توجه به حجم زیاد اطلاعات آزمایشگاهی در شرایط مختلف، پیش‌بینی فرایند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بود. با توجه به اینکه هدف از شبیه‌سازی فرایند فتوکاتالیستی، پیش‌بینی فرایند در شرایطی است که اقدامات آزمایشگاهی صورت نگرفته باشد، از این روش دستیابی به مدل کمک قابل توجهی به برنامه‌ریزی جهت ساخت سیستم در مقیاس بزرگ و کاهش هزینه‌ها خواهد کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- پیلوت آزمایشگاهی

پیلوت مورد استفاده در تحقیق از جنس پلکسی گلاس مشتمل بر سه بخش مخزن آلاینده، ناحیه‌های فتوکاتالیستی و هوادهی، در مقیاس آزمایشگاهی بود. جهت تأمین سطح کافی برای عبور محلول از ناحیه فتوکاتالیستی، از رژیم جریان ناپیوسته چرخشی در طراحی اولیه راکتور استفاده شد. آلاینده سنتزی از مخزن آلاینده توسط پمپ Technic AP1400F با قابلیت انتقال آب با دبی ۰/۱۱ L/s به



- ۱- مخزن آلاینده
۲- پمپ انتقال آب
۳- لوله توزیع آب
۴- لامپ UV-A
۵- دستگاه سنجش شدت UV
۶- بتن پوشش داده شده با نانو پودر TiO_2
۷- ناحیه فتوکاتالیستی
۸- پمپ هوا
۹- سنگ هوا
۱۰- ناحیه هوادهی
۱۱- pH متر
۱۲- محل نمونه گیری
۱۳- سانتریفوژ
۱۴- اسپکتروفتومتر
۱۵- رایانه

شکل ۱- طرح شماتیک سیستم مورد استفاده در تحقیق

جدول ۱- مقادیر وزنی نسبت اختلاط در یک متر مکعب

مصلح	سیمان (kg/m^3)	آب (L/m^3)	شن ۱/۲ اینچ (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	چگالی (kg/m^3)	تخلخل (%)
مقدار وزنی	۴۰۰	۲۰۰	۵۰۵	۱۰۱	۱۲۰۰	۱۹
مقدار حجمی	۰/۱۳	۰/۲	۰/۶۳	۰/۰۴		

پس از خارج کردن نمونه‌ها از کوره، به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه خنک و قبل از قرار گرفتن در راکتور با جریان آب شسته شدند تا هرگونه ذرات باقیمانده بر روی سطح جدا شوند.

۲-۲-۲- روش مخلوط با سیمان

۲۰ g/L از محلول TiO_2 با دوغاب سیمان (۴۰ گرم سیمان + ۲۰ cc آب) مخلوط و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس با دور ۱۰۰۰ rpm به شدت همزده شد.

پس از ساخت صفحات بتنی و گیرش اولیه بتن ساخته شده پس از ۸ ساعت، دوغاب ساخته شده بر روی صفحات بتنی ریخته شد و نمونه به ۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. پس از خشک شدن، نمونه‌ها توسط جریان آب شسته شدند تا ذرات باقیمانده از سطح جدا شوند.

پس از تهیه طرح اختلاط بتن به روش حجمی و مخلوط کردن مصالح در میکسر و در زمانی که گیرش اولیه سیمان حاصل شده ولی به حد نهایی نرسیده بود، نصف دوغاب ساخته شده به روی سطح بتنی ریخته شد تا سطح در زیر مایع غرقاب گردد. سطح پوشش داده شده به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد تا رطوبت سطحی بتن و محلول تثبیت شده از بین برود.

در مرحله دوم، باقیمانده سوسپانسیون بر روی هر یک از سطوح بتنی خشک ریخته شد تا سطوح بصورت کامل در زیر سوسپانسیون قرار گرفته و پوشش یکنواخت نانو ذرات تمام سطح را پوشش دهد.

برای حذف کلیه مواد آلی و چسبیدن ذرات TiO_2 به سطح، نمونه‌های بتنی پوشش یافته به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در کوره قرار داده شدند.

۲-۳- روش استفاده از چسب اپوکسی و ضد آب

- ۱۰۰ mL از چسب‌های بتن با ۱۰۰۰ mL آب مقطر مخلوط شده و به مدت ۵ دقیقه با دور ۱۰۰ rpm مخلوط و بر روی صفحات بتنی ریخته شد.
- ۲۰ g/L از محلول TiO_2 در محلول آب مقطر- متانول (با نسبت حجمی ۲۵٪) ساخته شده و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس با دور ۱۵۰۰ rpm به شدت همزده شد.
- دوغاب حاصل به مدت ۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار گرفت تا محلول نانو ذرات TiO_2 فلوکوله شده از هم جدا شوند و دوغاب حالت یکنواخت گیرد.
- محلول ساخته شده ۲۰ دقیقه بعد از پوشش دادن چسب بر روی بتن به سطح چسب ریخته شد تا تمام سطح را در بر گیرد.
- نمونه‌های پوشش یافته به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه خشک و قبل از قرار گرفتن در راکتور با جریان آب شسته شدند تا هرگونه ذرات باقیمانده بر روی سطح جدا شوند.
- جهت اطمینان از پوشش‌دهی مناسب نانو ذرات TiO_2 بر روی سطوح بتنی، آزمایش SEM^۱ و آنالیز EDX^۲ به موازات هم توسط دستگاه SEM فیلیپس مدل XL30 بر روی کلیه نمونه‌های اولیه و پوشش داده شده انجام شد.

Qualitek-4 مطابق دستورالعمل انجام ۱۶ آزمایش (ارائه استاندارد L₁₆ تاگوچی) تعیین شد. برای تحلیل آماری و دقیق‌تر نتایج، از یک تابع پاسخ تبدیل یافته که بصورت نسبت علامت هر اثر (S) به اثرات ناشی از خطا (N) تعریف می‌گردد، استفاده شد. مزیت استفاده از این پاسخ جدید در تحلیل آماری، نسبت به شکل اولیه پاسخ، مقایسه بزرگی اثرات ناشی از هر عامل اصلی با اثرات ناشی از عوامل خطا و اغتشاش در اندازه‌گیری است که در نتیجه منجر به برداشت دقیقتری از تأثیر واقعی عوامل بر سیستم می‌شود.

جدول ۲- متغیرها و سطوح انتخابی برای طراحی آزمایشات

متغیرها	سطوح			
	۴	۳	۲	۱
غلظت فنل (mg/L)	۵۰۰	۲۵۰	۱۰۰	۵۰
شدت تابش (وات)	۶۰	۴۰	۲۰	۸
pH	۱۲	۹	۷	۴
میزان TiO_2 در فرایند (g/m ²)	محلول*	۲۰	۶۰	۸۰
فاصله لامپ (cm)	۲۰	۱۵	۱۰	۵

* استفاده از راکتور با TiO_2 معلق (۱ g/L)

نحوه محاسبه نسبت S/N بسته به اینکه هدف چه نوع بهینه‌سازی باشد، متفاوت خواهد بود. از آنجا که در این تحقیق، پاسخ در نظر گرفته شده درصد حذف فنل است، هدف بهینه‌سازی پاسخ در نظر گرفته شد. نسبت S/N به صورت معادله ۱ محاسبه می‌گردد:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right) \quad (1)$$

در این معادله y_i برابر مقدار پاسخ اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش در هر آزمون و n تعداد تکرار آزمایش‌ها (در اینجا برابر ۲) می‌باشد.

۲-۴- راه‌اندازی سیستم

سطوح بتنی پس از پوشش‌دهی جهت انجام فرایند فتوکاتالیستی در داخل راکتور قرارداد شده‌اند. جهت تأمین انرژی مورد نیاز و شرایط انجام فرایند از لامپ‌های UV-A black light (در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از صفحات بتنی) استفاده شد. این لامپ‌ها قادر به تولید طول موج در محدوده ۳۲۰-۴۰۰ نانومتر با پیک تابش ۳۶۵ نانومتر هستند که معادل انرژی مورد نیاز برای تهییج نانو ذرات TiO_2 است. شدت تابش لامپ‌ها با استفاده از دستگاه UV-A سنج Lutron مدل UVA-365 تعیین شد.

۲-۳- کاربرد روش تاگوچی در بهینه‌سازی فرایند فتوکاتالیستی

برای بررسی نقش پارامترهای مختلف در راندمان و بهینه‌سازی فرایند از روش تاگوچی و برای تحلیل آماری و دقیق‌تر نتایج، از یک تابع پاسخ تبدیل یافته که بصورت نسبت علامت هر اثر (S) به اثرات ناشی از خطا (N) تعریف می‌گردد، استفاده شد. مزیت استفاده از این پاسخ جدید در تحلیل آماری، نسبت به شکل اولیه پاسخ، مقایسه بزرگی اثرات ناشی از هر عامل اصلی با اثرات ناشی از عوامل خطا و اغتشاش در اندازه‌گیری است که در نتیجه منجر به برداشت دقیقتری از تأثیر واقعی عوامل بر سیستم می‌شود (Engin et al., 2008). برای این منظور تاثیر عوامل اصلی شامل غلظت آلاینده ورودی، شدت تابش لامپ، pH فرایند، میزان TiO_2 در فرایند و فاصله لامپ UV تا سطح بتنی مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲ عوامل منتخب همراه با مقادیر عددی برای هر سطح را نشان می‌دهد.

باتوجه به اینکه تعداد متغیرها مطابق جدول برابر پنج عدد و برای هر یک نیز چهار سطح در نظر گرفته شده است، تعداد کل آزمایش‌های لازم، مطابق با روش فاکتوریل کامل برابر $4^5 = 1024$ می‌شود. تعداد و شرایط آزمایش‌های لازم با استفاده از نرم‌افزار (Nutek Inc)

آلاینده سنتزی از ترکیب آب مقطر و فنل محصول شرکت مرک (درجه خلوص ۹۹٪) و در محدوده غلظت ۵۰-۵۰۰ mg/L ساخته شد. آزمایش تعیین غلظت فنل با استفاده از روش نورسنجی مستقیم با معرف ۴-آمینو آنتی پیرین در طول موج ۵۰۰ نانومتر مطابق روش Lambda EZ150 در دستگاه اسپکتروفوتومتر (APHA, 2005). با توجه به اینکه در نمونه خروجی از راکتور امکان حضور نانو ذرات TiO_2 وجود داشت، جهت اندازه‌گیری غلظت فنل، کلیه نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۳۰۰۰ rpm در دستگاه سانتریفوژ Sigma مدل ۱۰۱ قرار داده شدند. میزان pH سیستم با استفاده از دستگاه Metrohm با الکتروود دیجیتال مدل ۶۹۰ اندازه‌گیری شد و کلیه آزمایشات در دمای $25 \pm 2^\circ C$ صورت گرفت.

۲-۵- پیش‌بینی فرایند با استفاده از شبکه عصبی

با توجه به حجم زیاد اطلاعات آزمایشگاهی در شرایط مختلف، از ANN برای پیش‌بینی فرایند استفاده شد. از آنجا که هدف از شبیه‌سازی فرایند فتوکاتالیستی، پیش‌بینی فرایند در شرایطی است که اقدامات آزمایشگاهی صورت نگرفته باشد، از این روش دستیابی به مدل کمک قابل توجهی به برنامه‌ریزی جهت ساخت سیستم در مقیاس بزرگ و کاهش هزینه‌ها خواهد کرد. در این تحقیق جهت ساخت مدل از نرم‌افزار تخصصی Qnet نسخه Vesta service 2000 و روش پرسپترون چند لایه (MLP) با نحوه آموزش پس انتشار خطا (BP) استفاده گردید. برای ساخت مدل، پنج پارامتر اصلی در فرایند فتوکاتالیستی شامل زمان ماند، غلظت فنل ورودی، pH سیستم، غلظت TiO_2 پوشش داده شده بر سطح بتن و شدت تابش لامپ‌های UV به عنوان متغیر ورودی سیستم و راندمان حذف فنل به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد. کل اطلاعات استفاده شده برای مدلسازی شامل ۵ گروه با ۲۰۹ ورودی بود که از این میزان ۱۵۰ مورد به عنوان اطلاعات آموزشی به شبکه و باقیمانده جهت تست شبکه مورد استفاده قرار گرفت. پارامتر مهمی که میزان تغییرات وزنی ضرایب را تعیین می‌کند (Delnavaz et al., 2010) به میزان ۰/۸ و نرخ یادگیری بیشینه و کمینه بین ۰/۰۱-۰/۴۷ و جهت پایداری سریع‌تر شبکه در نظر گرفته شد. برای تعیین بهینه‌ترین مدل جهت پیش‌بینی فرایند فتوکاتالیستی از مدل‌های متفاوتی استفاده شد. 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^{۱۰} (RMSE) و بیشترین ضریب همبستگی (R^2) انتخاب گردید.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- پوشش نانو ذرات بر روی بتن

جهت بررسی پوشش‌دهی نانو ذرات تیتانیا بر سطوح بتنی، اقدام به انجام تصویر برداری با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰ برابر توسط SEM و آنالیز EDX بر روی نمونه‌ها شد (شکل ۲). در روش‌های مختلف پوشش‌دهی با توجه به فرایندهای متفاوت مورد استفاده جهت اتصال نانو ذرات به صفحات بتنی، تصاویر مختلفی از لایه‌های TiO_2 مشاهده شد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در پوشش‌دهی دوغابی و چسب اپوکسی که نانو ذرات بطور مستقیم بر سطح بتنی ریخته شدند، یک لایه نسبتاً یکنواخت از نانو ذرات به ابعاد در حدود ۴۳ نانومتر بر روی سطح بتن پوشش یافته است. اختلاط نانو ذرات با سیمان در روش دوم، مانع از ایجاد پوشش یکنواخت و کافی در سطح شده و همانطور که در شکل ۲-ج ملاحظه می‌گردد، قسمت زیادی از سطح پوشش داده شده فاقد TiO_2 می‌باشد. در پوشش‌دهی با چسب ضد آب (شکل ۲-ه) اگرچه پوشش یکنواخت در سطح تشکیل شده اما به دلیل ماهیت آبریزی این نوع چسب، در محلهایی از سطح فضاهای خالی بدون پوشش (دوایر رسم شده) نیز ملاحظه می‌گردد.

آنالیز سطوح توسط سیستم EDX نیز عدم تغییر احتمالی در ساختار عناصر فتوکاتالیست بر اثر فعل و انفعالات شیمیایی و وجود تیتانیا در محل عکس‌برداری را تأیید کرد. پوشیده شدن نانو ذرات با سیمان در روش پوشش‌دهی مخلوط با سیمان نیز کاهش ۳۵ درصدی در میزان تیتانیا در واحد سطح را نسبت به سایر روش‌های پوشش‌دهی نشان داد. همانطور که در شکل ۲-ج ملاحظه می‌گردد، در حدود ۱۸ درصد از سطح در این روش مربوط به عنصر سیلیس بوده که از عناصر اصلی هیدراتاسیون^{۱۱} سیمان می‌باشد.

۳-۲- تعیین شرایط بهینه

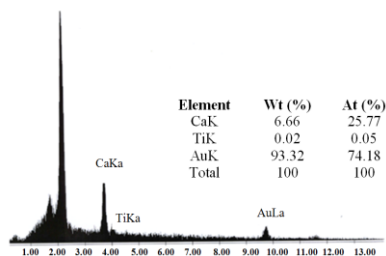
مقادیر نتایج مربوط به راندمان حذف در هر مرحله و مقدار S/N محاسبه شده برای هر ردیف آزمایش با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی در جدول ۳ نشان داده شده است.

۳-۲-۱- تأثیر عوامل بر سیستم

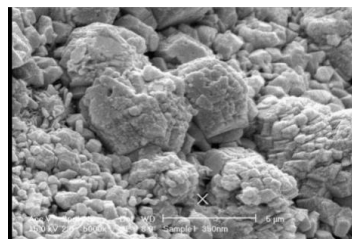
میزان و نحوه تأثیر عوامل مختلف بر پاسخ تبدیل یافته سیستم (به صورت نسبت S/N) برای هر یک از عوامل تحلیل در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است کلیه نتایج بدست آمده در محدوده سطوح در نظر گرفته شده، صادق است. در این جدول بیشترین مقدار

شرایط بهینه را در بین سطوح مختلف هر عامل نشان می‌دهد. S/N به این ترتیب سطح ۱ برای غلظت آلاینده ورودی (۵۰ mg/L)، سطح ۴ برای شدت تابش (لامپ ۶۰ وات)، سطح ۴ برای pH

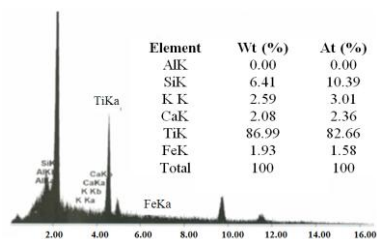
۱ برای غلظت TiO_2 (۸۰ g/m²) و سطح ۲ برای فاصله لامپ (۱۰ cm) به عنوان عوامل بهینه انتخاب شدند.



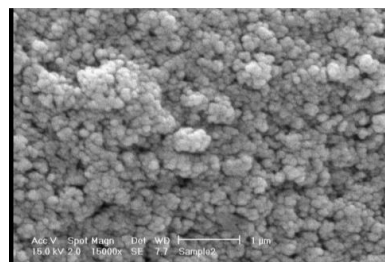
۲-الف



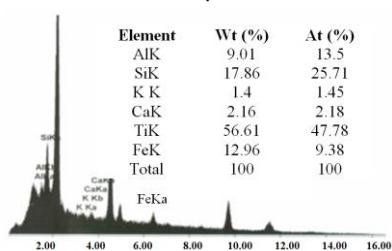
۱-الف



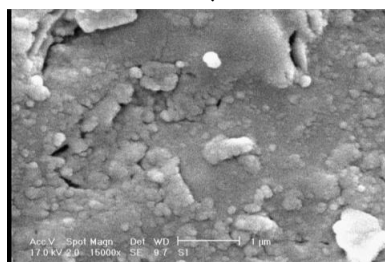
۲-ب



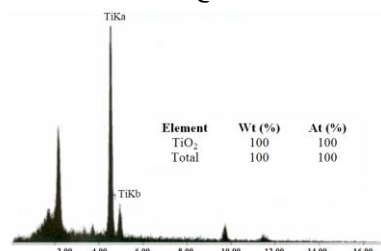
۱-ب



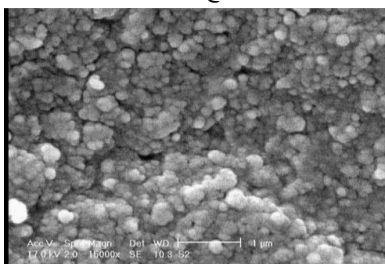
۲-ج



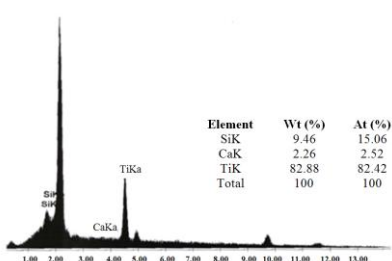
۱-ج



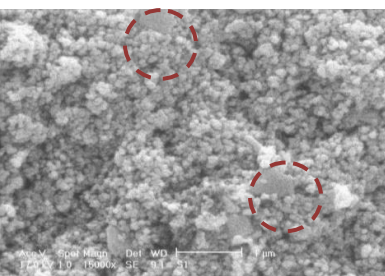
۲-د



۱-د



۲-ه



۱-ه

شکل ۲- تصاویر SEM با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰ برابر و آنالیز EDX

(الف) بتن بدون پوشش دهی، (ب) دوغابی، (ج) مخلوط با سیمان، (د) چسب اپوکسی، (ه) چسب ضدآب

جدول ۳- راندمان حذف در آزمایشات طرح شده و S/N محاسبه شده

S/N	حذف فنل (درصد)		مقادیر انتخاب شده برای متغیرها				شماره	
	تکرار دوم	تکرار اول	فاصله لامپ (cm)	میزان TiO_2 (g/m^2)	pH	شدت تابش (وات)		غلظت فنل (mg/L)
۳۵/۷۳	۶۰/۱	۶۲/۳	۲۰	۶۰	۴	۴۰	۲۵۰	۱
۳۶/۹۲	۷۰/۳	۷۰/۱	۵	۲۰	۱۲	۲۰	۲۵۰	۲
۳۷/۹۹	۷۸/۴	۸۰/۴	۵	۸۰	۴	۸	۵۰	۳
۳۶/۵۳	۶۶	۶۸/۳	۲۰	۲۰	۷	۸	۱۰۰	۴
۳۵/۵۱	۶۱/۲	۵۸/۳	۵	محلول	۷	۴۰	۵۰۰	۵
۳۶/۷۳	۶۸/۱	۶۹/۲	۲۰	۸۰	۹	۲۰	۵۰۰	۶
۳۷/۹۷	۸۰/۲	۷۸/۳	۱۵	۸۰	۷	۶۰	۲۵۰	۷
۳۷/۷۴	۷۶/۲	۷۸/۱	۱۰	۸۰	۱۲	۴۰	۱۰۰	۸
۳۷/۲۸	۷۴/۱	۷۲/۲	۵	۶۰	۹	۶۰	۱۰۰	۹
۳۶/۰۱	۶۲/۲	۶۴/۳	۱۵	۶۰	۱۲	۸	۵۰۰	۱۰
۳۴/۴۲	۵۳/۲	۵۲/۱	۱۰	۲۰	۴	۶۰	۵۰۰	۱۱
۳۶/۲۲	۶۴/۲	۶۵/۳	۱۵	محلول	۴	۲۰	۱۰۰	۱۲
۳۷/۲۱	۷۴/۲	۷۱/۱	۱۰	محلول	۹	۸	۲۵۰	۱۳
۳۸/۹۷	۹۰/۱	۸۷/۶	۲۰	محلول	۱۲	۶۰	۵۰	۱۴
۳۷/۹۳	۷۸/۴	۷۹/۲	۱۵	۲۰	۹	۴۰	۵۰	۱۵
۳۸/۱۷	۸۲/۱	۸۰	۱۰	۶۰	۷	۲۰	۵۰	۱۶

جدول ۴- نرخ‌های S/N اصلی برای هر یک از سطوح

نرخ S/N				متغیر اصلی
سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۳۵/۶۷۴	۳۶/۹۶۴	۳۶/۹۴۷	۳۸/۲۶۷	غلظت فنل (mg/L)
۳۷/۱۶۴	۳۷/۰۱۴	۳۶/۹۴۲	۳۶/۷۳۱	شدت تابش (وات)
۳۷/۴۱۵	۳۷/۲۹۱	۳۷/۰۵۲	۳۶/۰۹۴	pH
۳۶/۹۸۳	۳۶/۴۵۵	۳۶/۸۰۱	۳۷/۶۱۲	میزان TiO_2 (g/m^2)
۳۶/۹۹۳	۳۶/۸۹۱	۳۷/۰۳۷	۳۶/۹۳۱	فاصله لامپ (cm)

۳-۲-۲- تحلیل واریانس نتایج

جهت تعیین تاثیر هر یک از پارامترها در راندمان سیستم، تحلیل واریانس انجام شد (جدول ۵). هدف از این تحلیل بدست آوردن نسبت واریانس هر فاکتور نسبت به واریانس کل می‌باشد. از آنجا که هر پنج عامل این تحقیق چهار سطحی در نظر گرفته شده‌اند، میزان درجه آزادی برای مقایسه مقادیر پاسخ در سه سطح از هر عامل برابر ۳ می‌باشد و کل درجه آزادی برابر ۱۵ محاسبه می‌گردد. بنابراین درجه آزادی برای خطا برابر صفر می‌شود که این امر به دلیل یکسان بودن مقادیر درجه آزادی می‌باشد. در نهایت واریانس

خطا توسط محاسبه مجموع مربع خطا و تقسیم آن بر درجه آزادی تعیین شد. درصد تاثیر عوامل مختلف بر حذف فنل در فرایند فتوکاتالیستی در محدوده سطوح در نظر گرفته شده نشان می‌دهد که همه عوامل به جز فاصله لامپ UV از سطح، کم و بیش دارای اهمیت نسبی برای تاثیر بر S/N می‌باشند. همانطور که مشخص است موثرترین عامل، به ترتیب غلظت آلاینده ورودی، pH غلظت نانو ذرات TiO_2 ، شدت تابش لامپ و فاصله لامپ تا بستر می‌باشد.

جدول ۵- تحلیل واریانس نتایج (ANOVA)

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات (S)	واریانس	درصد تأثیر هر فاکتور
غلظت آلاینده (mg/L)	۳	۱۳/۵	۴/۴۸	۶۴
شدت تابش (وات)	۳	۰/۴	۰/۱۳	۱/۹
pH	۳	۴/۳	۱/۴۳	۲۰/۵
غلظت TiO_2 (g/m^2)	۳	۲/۸	۰/۹۴	۱۳/۴
فاصله لامپ (cm)	۳	۰/۱	۰/۰۲	۰/۳
مجموع	۱۵	۲۱	۷	۱۰۰

۳-۲-۳- راه‌اندازی سیستم در شرایط بهینه

نتایج راه‌اندازی سیستم در شرایط بهینه (غلظت آلاینده ورودی 50 mg/L ، شدت تابش با استفاده از لامپ ۶۰ وات، میزان TiO_2 معادل 80 g/m^2 ، $pH=12$ ، فاصله لامپ از صفحات معادل 10 سانتیمتر) در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، میزان راندمان حذف برای تمامی روش‌ها بالاتر از سایر مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول ۳ بود، به نحوی که پس از ۴ ساعت $99/3$ درصد از فنل در روش چسب اپوکسی حذف گردید. بالاترین راندمان حذف در روش دوغابی و مخلوط با سیمان به ترتیب ۹۷ و ۵۵ درصد تعیین شد که دلیل این اختلاف، اختلاط نانو ذرات TiO_2 با درصدی از سیمان مورد استفاده از طرح اختلاط بود که میزان ماده فتوکاتالیست فعال سطحی در مقایسه با روش دوغابی را به میزان زیادی کاهش داد. راندمان سیستم در روش چسب اپوکسی به میزان ۱۴ درصد بیشتر از چسب ضد آب بود که دلیل آن نیز خصوصیت ذاتی آب‌گریزی چسب بتن ضد آب و کاهش نفوذ آلاینده و به دام افتادن آن در سطح فعال کاتالیست می‌باشد. زمان لازم جهت رسیدن به حد توصیه شده سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا در شرایط بهینه برای روش دوغابی، چسب اپوکسی و چسب ضد آب به ترتیب پس از ۷۲۰، ۳۶۰ و ۷۲۰ دقیقه تعیین گردید. برای روش

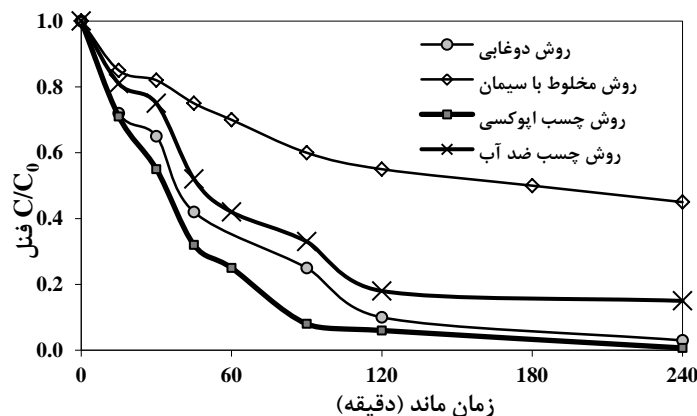
مخلوط با سیمان پس از گذشت ۲۴ ساعت از شروع واکنش نیز راندمان حذف به حد استاندارد نرسید.

۳-۳- پیش‌بینی راندمان سیستم با استفاده از ANN

جهت پیش‌بینی راندمان سیستم با استفاده از ANN، بهینه‌ترین مدل با تغییر در تعداد نرون‌های ورودی و توابع تبدیل مطابق جدول ۶ تعیین شد.

ساختار شبکه منتخب نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با تغییر ساختار شبکه از یک لایه پنهان به دو لایه پنهان و تغییر در توابع انتقال شبکه به تدریج میزان $RMSE$ و R^2 بهبود یافته و در نهایت مدل ANN با دو لایه پنهان و توابع انتقال گوسین در لایه پنهان اول، تانژانت هیپربولیک در لایه پنهان دوم و سیگموئید در لایه پنهان خروجی و ساختار ۱-۴-۶-۵ بهترین جواب را داده است.

نحوه آموزش و آزمایش شبکه با استفاده از اطلاعات ورودی تقسیم‌بندی شده در شکل ۵ و میزان ضریب همبستگی بین این دو گروه اطلاعات ورودی در شکل ۶ ارائه شده است.

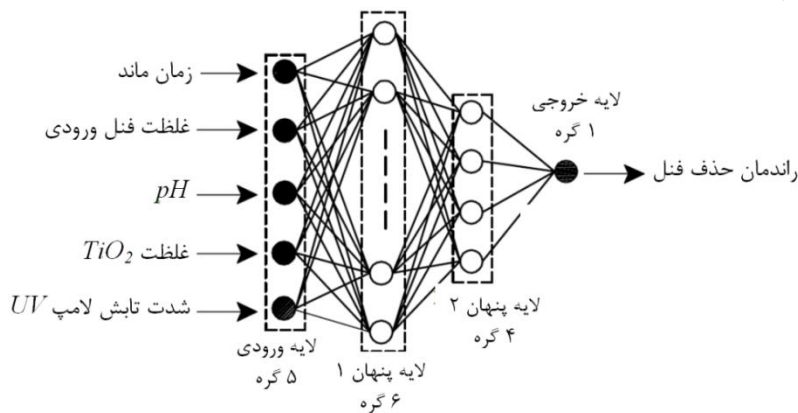


شکل ۳- راندمان سیستم در شرایط بهینه

جدول ۶- مراحل تعیین ساختار بهینه ANN

R^2		RMSE		لایه خروجی	لایه پنهان ۲	لایه پنهان ۱	ساختار شبکه
آموزش	آزمایش	آموزش	آزمایش				
۰/۸۸	۰/۸۸۹	۰/۰۹۸۹	۰/۰۹۸۶	S	-	S	۵-۱-۱
۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۰۹۲۸	۰/۰۸۴۷	S	-	S	۵-۲-۱
۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۱۰۵۷	۰/۰۷۶۵	S	-	S	۵-۳-۱
۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۰۹۹۱	۰/۰۶۵۴	S	-	S	۵-۴-۱
۰/۸۷	۰/۹۶	۰/۱۰۹۶	۰/۰۵۷۸	S	-	S	۵-۶-۱
۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۱۰۲۵	۰/۰۶۳۷	S	-	S	۵-۷-۱
۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۰۸۴۱	۰/۰۵۹۳	S	-	S	۵-۸-۱
۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۱۰۷	۰/۱۰۳	G	-	G	۵-۱-۱
۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۲۱۰	۰/۱۱۷۸	G	-	G	۵-۶-۱
۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۰۹۵	۰/۰۷۱	S	-	HT	۵-۶-۱
۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۰۶۸	۰/۰۳۹	S	HT	G	۵-۹-۸-۱
۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۰۶۸	۰/۰۴۷	S	S	S	۵-۹-۸-۱
۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۰۷	۰/۰۳۹	S	HT	G	۵-۵-۴-۱
۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۰۹	۰/۰۶	S	HT	G	۵-۳-۳-۱
۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۰۴۳	S	G	HT	۵-۶-۴-۱
۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۰۵۱	۰/۰۲۹	S	HT	G	*۵-۶-۴-۱

S: تابع انتقال سیگموئید، HT: تابع انتقال تانژانت هیپربولیک، G: تابع انتقال گوسین
*: مدل ANN بهینه

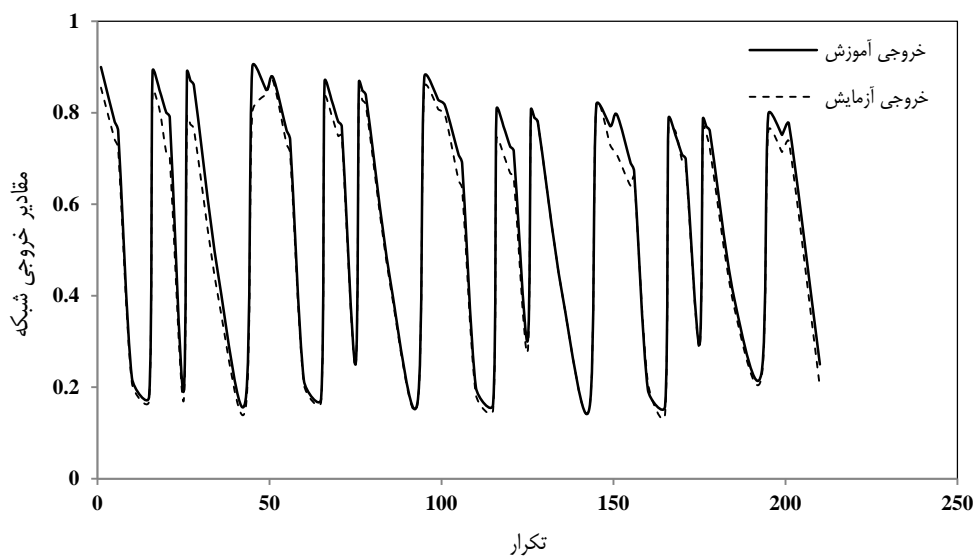


شکل ۴- مدل ANN بهینه

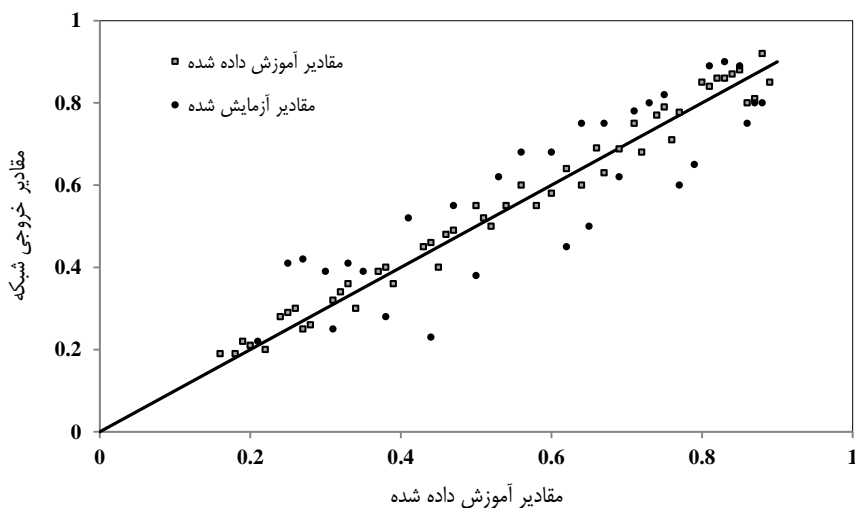
۴- خلاصه و جمع بندی

نتایج مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که بتن به عنوان پر مصرفترین ماده ساختمانی و مصالح اصلی سازه‌ای در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب می‌تواند بستر مناسبی برای پوشش نانو ذرات TiO_2 باشد. بهینه‌سازی فرایند و درصد تأثیر عوامل مختلف بر حذف فنل در فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از روش تاگوچی تعیین شد.

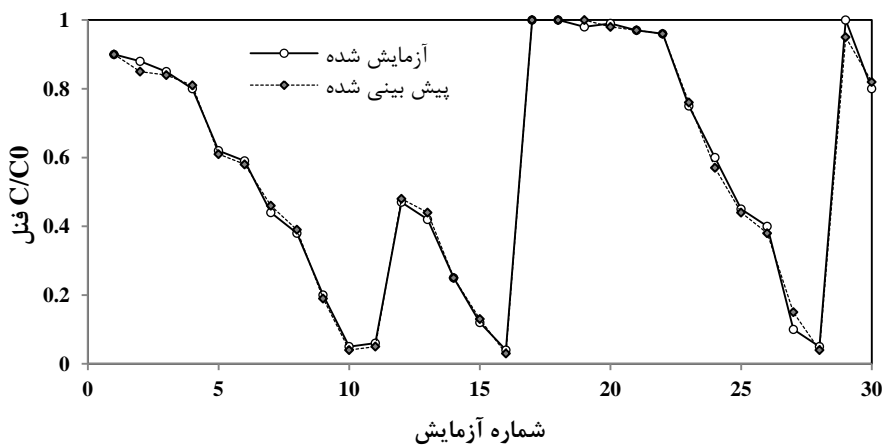
همانطور که ملاحظه می‌گردد ANN با اصلاح مقادیر وزن ماتریس لایه‌های پنهان به نحو مناسبی شرایط انجام فرایند را مدل کرده است. آزمایش شبکه با استفاده از ۲۵ درصد باقیمانده اطلاعات (استفاده نشده در آموزش شبکه) صورت گرفت. نتایج مربوط به ارزیابی مدل در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، میزان اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و داده‌های پیش‌بینی شده توسط ANN بسیار کم می‌باشد به نحوی که بیشترین اختلاف بین داده‌ها پس از اجرای مدل کمتر از ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۵- آموزش و آزمایش شبکه برای مدل کردن راندمان فرایند فتوکاتالیستی



شکل ۶- رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی شبکه



شکل ۷- ارزیابی شبکه با داده‌های جدید

به حوضه دریاچه ارومیه. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۷، شماره ۲: ۱-۱۴.

American Concrete Institute ACI 211 (1996) Manual of concrete practice. Farmington Hill, USA.

APHA, AWWA and WPCF (2005) Standard method for the examination water and wastewater. Washington DC. USA.

Ayati B, Ganjidoust H, Mir Fattah M (2007) Degradation of aromatic compounds using moving bed biofilm reactor. Iran J Environ Health 4(2):107-112.

Beltran FJ, Rivas FJ, Montro-de-Espinosa R (2005) Iron type catalysts for the ozonation of oxalic acid in water. Water Res 39:3553-3564.

Busca G, Berardinelli S, Resini C, Arrighi L (2008) Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments. J Hazard Mater 160(2-3):265-288.

Carpio E, Zuniga P, Ponce S, Solis J, Rodriguez J, Estrada W (2005) Photocatalytic degradation of phenol using TiO₂ nanocrystals supported on activated carbon. J Mol Catal A-Chem 228:293-298.

De Lasa H, Serrano B, Salaices M (2005) Photocatalytic Reaction Engineering. Springer Science.

Delnavaz M, Ayati B, Ganjidoust H (2010) Prediction of moving bed biofilm reactor (MBBR) performance for the treatment of aniline using artificial neural networks (ANN). J Hazard Mater 179(1-3):769-775.

Dezuane J (1997) Handbook of drinking water quality. 2nd Edition, Vannos Trand Reinhold.

Engin AB, Ozdemir O, Turan M, Turan, AZ (2008) Color removal from textile dye bath effluents in a zeolite fixed bed reactor: Determination of optimum process conditions using Taguchi method. J Hazard Mater 159:348-353.

Hordern BK, Ziolek M, Nawrocki J (2003) Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone in reactions water treatment. Appl Catal B-Environ 46:639-669.

Horikoshi S, Watanabe N, Onishi H, Hidaka H, Serpone N (2002) Photodecomposition of a nonylphenol polyethoxylate surfactant in a cylindrical photoreactor with TiO₂ immobilized fiberglass cloth. Appl Catal B-Environ 37(2):117-129.

Hosseini SN, Borghei SM, Vossoughi M, Taghavinia N (2007) Immobilization of TiO₂ on perlite granules

موثرترین عامل، به ترتیب غلظت آلاینده ورودی، pH، غلظت نانو ذرات TiO₂، شدت تابش لامپ و فاصله لامپ تا بستر بتنی بود. در بهینه‌ترین شرایط فرایند در غلظت آلاینده ۵۰ mg/L، شدت تابش با استفاده از لامپ ۶۰ وات، میزان TiO₂ معادل ۸۰ g/m²، pH=۱۲ و فاصله لامپ از صفحات معادل ۱۰ سانتیمتر میزان راندمان حذف پس از ۴ ساعت در پوشش‌دهی با استفاده از چسب اپوکسی به میزان ۹۹/۳ درصد تعیین شد. مقایسه نتایج این تحقیق با کار سایر محققان نشان داد که راندمان سیستم در شرایط بهینه در حدود ۱۵ درصد بیشتر از تحقیق حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۷ بود که از سبکدانه پرلیت به عنوان بستر و از لامپ UV-C با توان ۱۲۵ وات جهت حذف فنل استفاده کردند. مدل‌سازی سیستم با استفاده از روش ANN نشان داد که در بهترین مدل منتخب بین داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و داده‌های پیش‌بینی شده اختلاف حدود ۵ درصد وجود دارد. تحقیقات محدودی در زمینه استفاده از ANN برای مدل‌سازی فرایند فتوکاتالیستی انجام شده است. تعیین شرایط بهینه و پیش‌بینی فرایند فتوکاتالیستی می‌تواند باعث ایجاد زمینه‌های مناسب جهت استفاده از این فناوری نوین جهت تصفیه منابع آبی آلوده به ترکیبات سخت تجزیه‌پذیری مانند فنل شود.

۵- تشکر

بدینوسیله از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو جهت حمایت تشویقی و معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس جهت حمایت مالی طرح تشکر و قدردانی می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Sequencing Batch Reactor (SBR)
- 2- Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)
- 3- Sonolysis
- 4- Analysis of Variance
- 5- Light Expanded Clay Aggregate (LECA)
- 6- Scanning Electronic Microscope
- 7- Energy Dispersive X-ray Microanalysis
- 8- Multi Layer Perceptron
- 9- Back Propagation
- 10- Root Mean Square Error
- 11- Hydration
- 12- Trapping

۶- مراجع

ضرغامی م، احسانی ا (۱۳۹۰) ارزیابی روش‌های مختلف تصمیم‌گیری گروهی چند معیاره در انتخاب طرح‌های انتقال آب

- Suryaman D, Hasegawa K, Kagaya S (2006) Combined biological and photocatalytic treatment for the mineralization of phenol in water. *Chemosphere* 65(11):2502–2506.
- Tryba B (2008) Immobilization of TiO₂ and Fe-C-TiO₂ photocatalysts on the cotton material for application in a flow photocatalytic reactor for decomposition of phenol in water. *J Hazard Mater* 151(2-3):623-627.
- Uchida H, Itoh S, Yoneyama H (1993) Photocatalytic degradation of propylamide using TiO₂ supported on activated carbon. *Chem Lett* 12:1995-1998.
- US Environmental Protection Agency (2002) Toxicological Review of Phenol. CAS No. 108-95-2.
- Velasco LF, Tsyntsarski B, Petrova B, Budinova T, Petrov N, Parra JB, Ania CO (2010) Carbon foams as catalyst supports for phenol photodegradation. *J Hazard Mater* 184:843–848.
- Venkata Subba Rao K, Rachel A, Subrahmanyam M, Boule P (2003) Immobilization of TiO₂ on pumice stone for the photocatalytic degradation of dyes and dye industry pollutants. *Appl Catal B-Environ* 46(1): 77–85.
- Wang X, Liu Y, Hu Z, Chen Y, Liu W, Zhao G (2009) Degradation of methyl orange by composite photocatalysts nano-TiO₂ immobilized on activated carbons of different porosities. *J Hazard Mater* 169 (1-3):1061–1067.
- Zhang L, Kanki T, Sano N, Toyoda A (2003) Development of TiO₂ photocatalyst reaction for water Purification. *Sep Purif Technol* 31:105-110.
- for photocatalytic degradation of phenol. *Appl Catal B-Environ* 74(1-2):53–62.
- Ling CM, Mohamed AR, Bhatia S (2004) Performance of photocatalytic reactors using immobilized TiO₂ film for the degradation of phenol and methylene blue dye present in water stream. *Chemosphere* 57:547–554.
- Manojlovic D, Ostojic DR, Obradovic BM, Kuraica MM, Krsmanovic VD, Puric J (2007) Removal of phenol and chlorophenols from water by new ozone generator. *Desalination* 213:116–122.
- Moussavi G, Mahmoudi M, Barikbin B (2009) Biological removal of phenol from strong wastewaters using a novel MSBR. *Water Res* 43(5):1295–1302.
- Rachel A, Subrahmanyam M, Boule P (2002) Comparison of photocatalytic efficiencies of TiO₂ in suspended and immobilized form for the photocatalytic degradation of nitrobenzene sulfonic acids. *Appl Catal B-Environ* 37(4):301–308.
- Sarfraz S, Thomas S, Tewari UK (2004) Anoxic treatment of phenolic wastewater in sequencing batch reactor. *Water Res* 38(4):965-971.
- Scotti R, D'Arienzo M, Morazzoni F, Renato Bellobono I (2009) Immobilization of hydrothermally produced TiO₂ with different phase composition for photocatalytic degradation of phenol. *Appl Catal B-Environ* 88(3-4):323–330.
- Sreethawong T, Chavadej S (2008) Color removal of distillery wastewater by ozonation in the absence and presence of immobilized iron oxid catalyst. *J Hazard Mater* 155:486-493.