

مدلسازی تصفیه پساب‌های صنعتی بر پایه شبکه عصبی مصنوعی و مدل آماری رگرسیون لجستیک

سیدرحیم صانعی‌فرد^{۱*}، فاطمه قنبری^۲، احمد جعفریان^۱

^(۱) گروه ریاضی، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

^(۲) گروه شیمی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

چکیده

با توجه به اهمیت شناسایی آلاینده‌های صنعتی و یافتن راهکارهایی برای مدیریت و کنترل آن در جهت حفظ بقا، سلامت انسان و محیط زیست، دسترسی به مدل‌هایی که بتواند با دقت بالا این مهم را پیش‌بینی کند، نقش مهمی به لحاظ اقتصادی و زمانی دارد. در این تحقیق سه مدل مختلف برای پیش‌بینی فرایند حذف آلاینده‌ی مالاشیت سبز با ویژگی جهش‌زایی و سرطان‌زایی از پساب‌های صنعتی ارائه گردیده و یافته‌های حاصل مقایسه شدند. هدف اصلی در این پژوهش مقایسه دقت مدل‌های مختلف شبکه عصبی و رگرسیون لجستیک و مدل هوشمند ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون لجستیک جهت پیش‌بینی درصد حذف آلاینده‌ی مالاشیت سبز از پساب‌های صنعتی است تا بتوان یکی از آنها را به عنوان روش بهینه انتخاب و استفاده نمود. متغیرهای مستقل در هر سه مدل شبکه عصبی، رگرسیون لجستیک و مدل ترکیبی ANN و LR شامل مقدار اولیه نانو کامپوزیت پلی آنیلین پوشش داده شده روی خاکستر پوسته گندم، غلظت اولیه مالاشیت سبز، شدت اشعه‌ی یو وی و زمان پرتو افشانی و متغیر وابسته در مدل شبکه عصبی درصد حذف آلاینده‌ی مالاشیت سبز می‌باشد. مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی، توسط مدل طراحی شده و داده‌های بررسی شده ثابت می‌کند که استفاده از مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون لجستیک روشی ارزشمند برای پیش‌بینی عملکرد حذف ماده سمی مالاشیت سبز از پساب‌های صنعتی با بیشترین بازده و کمترین خطا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مالاشیت سبز، شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون لجستیک، مدل هوشمند ترکیبی

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت آب در زندگی بشر و کمبود منابع آب در کشورمان، به منظور تهیه و تأمین آب آشامیدنی سالم و بهداشتی نیازمند تصفیه آب‌های آلوده و پساب‌های صنعتی می‌باشیم. صنایع در حین انجام فعالیت به طور عمدی و یا غیرعمدی موجب ورود آلاینده‌ها در منابع آبی می‌شوند. لذا حفظ محیط زیست و توجه به تأمین سلامت آن، یکی از نیازهای ضروری امروز جامعه بشری است. رنگ‌ها، فلزات سنگین و سایر آلاینده‌های حاصل از پساب‌های صنعتی بخش عظیمی از ترکیبات آلی هستند که باعث ایجاد آلودگی در آب‌های طبیعی می‌گردند. بنابراین، فرایند حذف این آلاینده‌ها از آب و پساب‌ها امری مهم و ضروری تلقی می‌گردد [۱]. پساب صنعت نساجی رنگ‌های متراکم سمی را به سیستم چرخه‌ی آب وارد می‌کنند که اغلب تجدیدنپذیر و مقاوم در برابر روش‌های تجزیه‌ی بهینه‌ی معمولی می‌باشند [۲].

مشکلات مطرح شده باعث شده تا تلاش‌های زیادی در زمینه حذف این آلاینده‌ها صورت گرفته و روش‌های مختلفی جهت حذف آلاینده‌ها از منابع آبی ارائه گردد. یکی از روش‌های موثر در حذف آلاینده‌ها استفاده از نانوکامپوزیت پلی‌آنیلین بر پایه‌ی خاکستر سبوس گندم (PAN/WHA) می‌باشد. به کارگیری روش‌هایی برای ترکیب نانوذرات با مواد دیگر (به‌خصوص پلیمرها) و استفاده از آنها به صورت نانوکامپوزیت‌ها گامی مثبت در جهت تسریع و افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها از پساب‌ها به شمار می‌رود.

قنبری و همکارانش با استفاده از نانوکامپوزیت پلی آنیلین پوشش داده شده بر روی سبوس برنج (PANI/RHA) و مقایسه فعالیت کاتالیزستی آن با نانو ذره‌ی نقره/تیتانیوم دی اکساید (Ag/TiO_2) حذف آلاینده مالاشیت سبز (MG) را در سال ۲۰۱۲ مدل‌سازی کردند. در این فعالیت نانوکامپوزیت (PANI/RHA) تهیه شده در حذف مالاشیت سبز با نانو ذره نقره-تیتانیوم دی اکساید مقایسه شد. بررسی‌ها نشان داد که نانو ذره نقره-تیتانیوم دی اکساید نسبت به PAN/RHA در حذف مالاشیت سبز از کارایی بهتری برخوردار است [۳]. محققان در سال ۲۰۱۱ کیفیت پساب خروجی کارخانه کاغذ را با استفاده از سیستم استنتاج فازی مبتنی بر شبکه تطبیقی پیش‌بینی نمودند [۴]. پامیر و همکارانش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک تاثیر آب در مواد زائد جامد را در محل دفن زباله در سال ۲۰۰۷ پیش‌بینی نمودند [۵]. میشل و همکارانش در سال ۲۰۱۴ از انرژی خورشیدی برای تصفیه فاضلاب آسیاب زیتون با استفاده از یک راکتور فوتو کاتالیزستی در مقیاس پایلوت پس از انعقاد و لخته‌سازی استفاده کردند [۶]. هنگوئی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ روشی برای تشخیص خرابی آنلاین در فرایند تصفیه فاضلاب با استفاده از شبکه عصبی فازی ارائه نموده‌اند [۷]. قنبری و همکارانش تفکیک مالاشیت سبز را در حضور نانو کامپوزیت پلی آنیلین بر پایه‌ی خاکستر سبوس گندم (PANI/WHA) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و همچنین روش تجربی در سال ۲۰۱۵ مدل‌سازی کردند. طبق این مدل تهیه‌ی نانو کامپوزیت (PANI) آغشته شده به خاکستر سبوس گندم (WHA) و تحقیق بازده حذف مالاشیت سبز (MG) با استفاده از PAN/WHA در شرایط مختلف تحت تاثیر عوامل موثر و کارآمد مانند حجم PANI/WHA، غلظت اولیه (MG)، تراکم اشعه یو وی (UV light) و زمان پرتو افشانی، مورد مطالعه قرار گرفته شد. نتایج به دست آمده نشانگر کارایی بهتر مدل شبکه عصبی نسبت به روش تجربی می‌باشد. لذا استفاده از روش‌های تجربی به دلیل داشتن پیچیدگی‌های خاص و افزایش هزینه‌ی بالا، باعث کاهش قابلیت اطمینان می‌گردند. بنابراین روش‌های متعدد انجام شده برای حذف آلاینده‌ها به دلیل گستردگی شرایط، زیاد کارآمد نبوده و به نظر می‌رسد تکنیک‌های وابسته به داده‌های تجربی و پیشرفت آنها برای پیش‌بینی نتیجه فرایندها باید واضح و دقیق باشند.

لذا در این پژوهش، برای مدلسازی سیستم از مدل هوشمند ترکیبی بر پایه‌ی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل آماری رگرسیون لجستیک (LR)، که ابزاری توانمند برای مدلسازی سیستم‌های پیچیده می‌باشد استفاده شده است. در دهه اخیر بیش از پیش، شبکه‌های عصبی تأثیرات زیادی روی کاربرد مسائل صنعتی از قبیل فرایندهای غیرخطی، ردیابی و مونیتور نمودن خطا، فرایند کنترل و بهینه‌سازی داشته‌اند. از شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های غیرخطی و همچنین برای مدلسازی تصفیه‌خانه فاضلاب استفاده شده است [۸] که پیش‌بینی بهتری از عملکرد فرایند، به همراه کاربردی با دقت بالا، در مهندسی زیست‌محیطی ارائه می‌دهند [۹، ۱۰، ۱۱]. هر چند که بایستی اذعان کنیم گر چه از ایجاد سیستمی شبیه مغز انسان از دیدگاه مهندسی خیلی دور هستیم، با این حال شبکه‌های عصبی در مدل ANN ساده شده‌ی سیستم عصبی بیولوژیکی است که اولین بار در سال ۱۹۴۳ میلادی توسط مک کلاث (McCulloch) و پیتز (Pitts) کشف گردید و اولین شبکه عصبی با به کارگیری چند نورون ساده تهیه شد که قدرت محاسباتی قابل توجهی داشت [۱۱].

دهه‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی سال‌های طلایی شبکه‌های عصبی می‌باشد. در محدوده‌ی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۲ روزن بلات (Rosen Blat) گروه بزرگی از شبکه‌های عصبی به نام پرسپترون را معرفی نمود. با وجود انعطاف مناسب ANN، ازدیاد تعداد متغیرها، تعداد نورون‌ها و یا افزایش تعداد لایه‌ها در شبکه عصبی مصنوعی می‌توانند سبب پیچیدگی ساختار شبکه عصبی و ناپایداری آن گردند که یکی از دلایل آن افزایش تعداد وزن‌ها نسبت به ورودی‌ها می‌باشد [۱۳]. از طرفی در مواردی متغیرها از همبستگی بالایی برخوردارند که استفاده از همه‌ی آنها نوعی ورود اطلاعات تکراری را به همراه دارد [۱۴]. که این موارد می‌توانند از یافتن مدل‌های بهینه جلوگیری کنند. لذا با توجه به اهمیت مسئله کمبود آب، در مقاله حاضر برای رفع این مشکل از مدل هیبریدی ANN-LR که یک رویکرد جدید بر پایه ساختار ترکیبی شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) و مدل آماری رگرسیون لجستیک می‌باشد، به منظور تخمین بازده حذف ماده رنگزای مالا شیت سبز در پساب‌های صنعتی، جهت جلوگیری از آلودگی آب‌ها و حفظ محیط زیست استفاده شده است. در بین فرایندهای مختلف جداسازی در تصفیه آب و پساب، فرایند استفاده از نانوکامپوزیت پلی آنیلین به دلیل راندمان بالا و هزینه‌های اولیه و عملیاتی پایین نسبت به سایر روش‌های جداسازی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. برای بررسی فرایند حذف مالا شیت سبز، از مقدار اولیه پلی آنیلین بر پایه خاکستر پوسته گندم، غلظت اولیه مالا شیت سبز، شدت اشعه‌ی یو وی و زمان پرتو افشانی به عنوان اجزاء ورودی استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از ANN به طور مستقیم پیش‌بینی حذف آلاینده‌ی MG از پساب‌ها بررسی شده سپس با استفاده از مدل آماری LR مورد بررسی قرار گرفته شده و در نهایت مسئله با مدل هیبریدی ANN-LR بررسی شده و در آخر توانایی دقت این مدل‌ها جهت پیش‌بینی فرایند تصفیه پساب‌های صنعتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده‌ی تطابق بسیار خوب بین داده‌های تجربی و نتایج حاصل از روش ترکیبی (ANN) و (LR) می‌باشد. بر این اساس با مقایسه‌ی خروجی‌های حاصل از روش هوشمند ترکیبی، با خروجی‌های واقعی بهترین روش به عنوان ابزاری توانمند جهت پیش‌بینی صحیح عملکرد تصفیه پساب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP)

ساختار شبکه عصبی در مقالات پیشین به طور کامل بررسی شده است [۱۵، ۲]. از پرکاربردترین شبکه‌های عصبی، شبکه‌های پرسپترون هستند، این شبکه‌ها قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی، یک نگاشت غیرخطی را به دقت انجام دهند. این شبکه شامل سه لایه‌ی ورودی، پنهان و خروجی است، تعداد نورون‌های موجود

در لایه‌های ورودی و خروجی با توجه به ماهیت مسئله‌ی مورد بررسی، مشخص می‌شود، حال آنکه تعداد نورون‌های موجود در لایه‌های پنهانی و همچنین تعداد این لایه‌ها با نظر طراح شبکه به روش سعی و خطا در جهت کاهش مقدار خطا مشخص می‌گردد. در خروجی هر نورون از شبکه MLP یک تابع خطی قرار دارد و فرایند یادگیری در تمام نورون‌ها و لایه‌ها صورت می‌گیرد. در صورت کافی نبودن تعداد نورون‌ها در لایه پنهان، شبکه قادر نخواهد بود نگاشت دقیقی بین بردارهای ورودی و خروجی ایجاد کند. مقادیر اولیه وزن‌ها به صورت اتفاقی در نظر گرفته شده‌اند. همه وزن‌ها و بایاس‌هایی که در شبکه قرار دارند در طول فرایند یادگیری قابل تغییر هستند.

این شبکه بر مبنای الگوریتم پس انتشار خطا آموزش می‌بیند. بدین ترتیب که خروجی‌های واقعی با خروجی‌های دلخواه مقایسه می‌شوند، و وزن‌ها به وسیله‌ی الگوریتم پس انتشار، به صورت تحت نظارت تنظیم می‌گردند تا الگوی مناسب به وجود آید. برای الگوی ورودی p ام، مربع خطای خروجی برای تمامی سلول‌های لایه‌ی خروجی شبکه به صورت زیر می‌باشد [۱۳].

$$E_p = \frac{1}{2} (d^p - y^p)^2$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^s (d_j^p - y_j^p)^2 \quad (1)$$

که در آن d_j^p خروجی دلخواه برای j امین سلول در لایه خروجی و y_j^p خروجی واقعی برای j امین سلول در لایه خروجی، S ابعاد بردار خروجی، y^p بردار خروجی واقعی و d^p بردار خروجی دلخواه هستند خطای کل E برای p الگو به صورت زیر در می‌آید.

$$E = \sum_{p=1}^p E_p = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^p \sum_{j=1}^s (d_j^p - y_j^p)^2 \quad (2)$$

وزن‌ها با هدف کاهش تابع هزینه E به مقدار مینیمم به روش گرادیان نزولی تنظیم شده و روند یادگیری هنگامی متوقف می‌شود که مجموع کل خطا (E) برای p الگو از مقدار آستانه‌ی تعیین شده کمتر شود یا تعداد کل دوره‌های تعلیم به پایان رسد. در این تحقیق از مجموعه‌ی داده‌های آماری به دست آمده، داده‌های ورودی به طور تصادفی به سه مجموعه به شرح فوق تقسیم شده‌اند:

الف - ۷۰٪ داده‌ها در مجموعه‌ی داده‌های آموزشی (*training Data*).

ب - ۱۰٪ داده‌ها در مجموعه‌ی داده‌های اعتبارسنجی یا داده‌های ارزیابی (*validation Data*) در راستای بیش برآزش شبکه.

ج - ۲۰٪ داده‌ها در مجموعه‌ی آزمایش یا تست (*test Data*) برای بررسی کارایی شبکه‌ی نهایی. در این تحقیق تعداد مختلفی از نورون‌های ۵ تا ۴۰ عددی در لایه پنهان و یک نورون در لایه خارجی استفاده شدند. ماکزیمم تعداد مراحل تکرار ۵۰۰ مرتبه و مقدار خطای هدف برابر 10^{-6} تنظیم گردیده است. همچنین از میانگین مربعات خطا (MSE) و جذر میانگین مربعات خطا ($RMST$) به عنوان خطای عملکرد استفاده شده است. که با توجه به رابطه زیر، عملکرد شبکه ارزیابی می‌شود.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (A_j - Y_j)^2 \quad (3)$$

که در آن A_j و Y_j به ترتیب شاخص‌های ارزیابی شده متغیر عملکرد و مقدار پیش‌بینی شده و N تعداد کل داده‌ها است.

۲-۲- رگرسیون

واژه رگرسیون از لحاظ لغوی در فرهنگ لغت به معنی پسروی و بازگشت است. اما از دید آمار و ریاضیات به مفهوم بازگشت به یک مقدار متوسط یا میانگین به کار می‌رود. بدین معنی که برخی پدیده‌ها به مرور زمان از نظر کمی به طرف یک مقدار متوسط میل می‌کنند.

در مدل‌های آماری، تحلیل رگرسیون یک فرآیند آماری برای تخمین روابط بین متغیرها می‌باشد. تحلیل رگرسیونی فن و تکنیکی آماری برای بررسی و مدل‌سازی ارتباط بین متغیر وابسته و متغیر مستقل بوده و هدف آن پیش‌بینی متغیر وابسته با توجه به متغیرهای مستقل می‌باشد. مهم‌ترین تفاوت رگرسیون و همبستگی در این است که رگرسیون ماهیت پیش‌بینی میزان متغیر وابسته از روی مدلی که متغیر مستقل یکی از مولفه‌های آن است را دارد. در حالی که همبستگی صرفاً نشان‌دهنده شدت رابطه متغیرهای مستقل و وابسته می‌باشد.

رگرسیون تقریباً در هر زمینه‌ای از جمله مهندسی، فیزیک، اقتصاد، مدیریت، علوم زیستی، بیولوژی و علوم اجتماعی برای برآورد و پیش‌بینی مورد نیاز است. در مباحث مربوط به رگرسیون اغلب بحث بر سر یافتن رابطه‌ای بین متغیر پاسخ Y و مجموعه‌ای از متغیرهای پیشگوی X_i است که می‌توان آن را به صورت یک معادله ریاضی بیان کرد.

۱-۲-۲- مدل آماری رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک نوعی از رگرسیون است که متغیرهای مستقل می‌تواند هم در مقیاس کمی و هم در مقیاس اسمی باشد ولی متغیر وابسته، اسمی دو سطحی است. رگرسیون لجستیک روش آماری متعلق به گروه مدل‌های آماری خطی تعمیم یافته است که با استفاده از متغیرهای مستقل، احتمال وقوع یک حادثه را مورد پیش‌بینی قرار می‌دهد. نکته اصلی در رگرسیون این است که متغیر وابسته یک متغیر دوحالته است به طوری که می‌تواند عدد صفر به معنی عدم وقوع و یک به معنی وقوع رویداد باشد.

این مدل رگرسیون، شبیه رگرسیون معمولی است با این تفاوت که روش تخمین ضرایب یکسان نمی‌باشد و به جای حداقل کردن مجذور خطاها (که در رگرسیون معمولی انجام می‌شود)، احتمالی که یک واقعه رخ می‌دهد را حداکثر می‌نماید. در رگرسیون لجستیک از آماره‌های کای اسکوتر (χ^2) و والد ($Wald$) استفاده می‌شود. تحلیل مدل رگرسیون لجستیک به جز در مورد متغیر وابسته، مشابه رگرسیون خطی است. در رگرسیون لجستیک از مفهومی به نام بخت برای متغیر وابسته استفاده می‌شود در اصطلاح آماری بخت (Odd) به معنی احتمال رخداد یک پیشامد بر احتمال عدم رخداد آن می‌باشد. که این احتمال بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند. در حالی که بخت ممکن است بیش از یک باشد. واژه‌ی کلیدی در تحلیل رگرسیون لجستیک سازهای به نام لجیت ($Logit$) است که لگاریتم طبیعی بخت می‌باشد.

رگرسیون لجستیک دارای دو ویژگی می‌باشد. اول توزیع شرطی $Y|X$ که یک توزیع برنولی به جای یک توزیع گوسی است، زیرا متغیر وابسته دو حالت است. دوم مقادیر پیش‌بینی، احتمالاتی محدود بین بازه صفر و یک می‌باشد که به کمک تابع توزیع لجستیک به دست می‌آید لذا رگرسیون لجستیک احتمال خروجی را پیش‌بینی می‌کند. در این پژوهش هدف رگرسیون لجستیک یافتن بهترین مدل برای تشریح روابط موجود بین مجموعه‌ی متغیرهای مستقل شامل مقدار $PANI/WH$ ، غلظت MG ، تراکم اشعه UV و زمان پرتو افشانی و متغیر وابسته می‌باشد که این متغیر، یک متغیر اسمی به صورت وجود آلودگی و یا عدم وجود آلودگی در خروجی حاصل از پساب‌های صنعتی می‌باشد.

در این تحقیق عدد یک برای حذف ماده سمی مالاشیت سبز از پساب‌ها به میزان بیش از ۷۰٪ به عنوان احتمال خروجی مطلوب و عدد صفر برای کمتر از ۷۰٪ به عنوان احتمال خروجی نامطلوب در نظر گرفته شده است. فرم کلی معادله رگرسیون لجستیک دو وجهی به صورت زیر می‌باشد :

$$\begin{aligned} \text{logit}(p) &= \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \\ &= \alpha + \beta_1 x_{1,i} + \dots \\ &\quad + \beta_k x_{k,i} \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن :

P : احتمال وقوع (در این تحقیق احتمال وجود آلودگی)

x_i ($i = 1, 2, \dots, n$): متغیرهای مستقل

B_i ($i = 1, 2, \dots, n$): ضرایب تعیین شده برای مدل توسط رگرسیون می‌باشد.

$$p = \text{Pr}(Y_i = 1)$$

$$p = \text{Pr}(Y_i = 1|X) = \frac{e^{\alpha + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i}}}{1 + e^{\alpha + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i}}} \quad (۵)$$

۳-۲- روش پیشنهادی (ترکیب شبکه عصبی مصنوعی با رگرسیون لجستیک)

در ابتدا پارامترهای مورد نیاز آزمایشگاهی معرفی شده است (رجوع به جدول ۱). سپس با اعمال رگرسیون لجستیک و تحلیل آماری پارامترهای موجود و تعیین تاثیر هر یک از آنها بر روی خروجی ارزش اهمیت داده‌ها مشخص شده و احتمال خروجی به ازای هر یک از قوانین (ورودی‌های شبکه عصبی) مشخص شده است. روش پیشنهادی، پیش-بینی دقیق‌تر و با خطای کمتری از آلوده بودن و یا عدم آلودگی آب خروجی حاصل از روند تصفیه پساب را ارائه می‌دهد.

در ادامه نتایج حاصل از رگرسیون لجستیک بر روی شبکه عصبی اعمال شده و بر روی عملکرد آموزش شبکه عصبی تاثیر بسزایی گذاشته است. نتایج حاصل از شبکه عصبی و ترکیب آن با رگرسیون لجستیک در بخش ۳ مورد بحث قرار گرفته شده است.

۱-۳-۲- مدل شبکه عصبی ترکیبی

مدل ANN استفاده شده در این تحقیق، شبکه پرسپترون چند لایه می‌باشد که توسط الگوریتم کاهش شیب که پس انتشار نامیده می‌شود، آموزش می‌بیند که شامل یادگیری با ناظر می‌باشد. در این پژوهش به منظور کاهش خطا و افزایش دقت، از مدل هیبریدی شبکه عصبی مصنوعی و مدل آماری رگرسیون لجستیک ($ANN-LR$) جهت پیش‌بینی حذف آلاینده‌ی مالاشیت سبز از پساب‌های صنعتی استفاده شده است. در حالت کلی در ایجاد مدل‌های هیبریدی دو هدف زیر را در نظر می‌گیریم:

هدف اول: استفاده از مدل‌های آماری در انتخاب متغیرهای ورودی برای مدل شبکه عصبی

هدف دوم: استفاده از خروجی به صورت احتمال برآورد، به عنوان یک ورودی برای مدل شبکه عصبی

در صورتی که تعداد متغیرها بیش از حد زیاد باشند و یا تعداد نورون‌ها و لایه‌های استفاده شده در شبکه عصبی زیاد باشند مدل شبکه‌های عصبی به دلیل صرف زمان زیاد برای انتخاب و پردازش متغیرها دچار مشکل می‌گردند، لذا با ترکیب مدل‌های آماری و مدل شبکه عصبی می‌توان این مشکلات را به روش‌های زیر کاهش داد.

۱ - استفاده از مدل‌های آماری در پیش انتخاب متغیرها که باعث کاهش خطر و ریسک انتخاب بیش از ظرفیت و نیز کاهش زمان صرف شده برای انتخاب مدل می‌شود.

۲- استفاده از خروجی یک مدل آماری به عنوان ورودی یک مدل شبکه عصبی مصنوعی به طور موثری اطلاعات را متراکم نموده و به متغیرهای پتانسیل اجازه عمل می‌دهد.

در شکل زیر شمای کلی مدل شبکه عصبی هیبریدی نمایش داده شده است. طبق شکل (۱) فرایند مدل هیبریدی رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی مصنوعی ($ANN-LR$) شامل مراحل زیر می‌باشد:

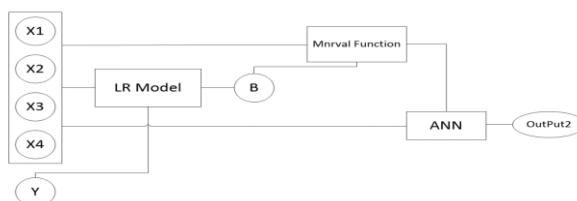
مرحله اول: ورودی‌ها (x_i) به همراه y همان خروجی مورد نظر ($Target$) وارد مدل آماری LR می‌شود.

مرحله دوم: با پردازش داده‌ها توسط مدل LR ، اطلاعات به صورت جدول شماره ۲ به همراه ضرایب تخمین (B) به دست می‌آید.

مرحله سوم: ضرایب تخمین به همراه ورودی‌ها (x_i) وارد تابع $Mnrv$ شده و خروجی‌ها به صورت احتمال مطلوب یا نامطلوب مشخص می‌شود.

مرحله چهارم: ورودی‌ها به همراه خروجی مدل آماری LR وارد شبکه عصبی شده و خروجی شبکه هیبریدی را ($Output$) را نتیجه می‌دهد.

بنابراین برای اجرای مدل هیبریدی $ANN-LR$ از داده‌های پردازش شده توسط LR و خروجی مدل آماری به عنوان ورودی‌های شبکه عصبی طبق نمودار زیر استفاده می‌شود.



شکل ۱- شمای کلی مدل شبکه عصبی هیبریدی

۳- نتایج عددی

۳-۱- آماده سازی داده ها

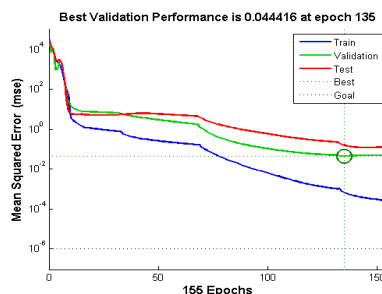
پیش‌بینی حذف آلایندگی مالاشیت سبز از پساب‌های صنعتی با استفاده از نانو کامپوزیت پلی آنیلین بر پایه‌ی خاکستر سبوس گندم، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است (۱۱). این نانوکامپوزیت توسط پرتو افشانی اشعه ایکس (XRD) و اسکن میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. میزان حذف آلایندگی، به مقدار اولیه نانوکامپوزیت پلی آنیلین (PANI/WHA)، غلظت اولیه مالاشیت سبز، شدت اشعه‌ی یو وی (UV light) و زمان پرتو افشانی بستگی دارد. مقدار اولیه نانوکامپوزیت، غلظت اولیه MG، شدت اشعه‌ی UV و زمان پرتو افشانی به عنوان متغیرهای ورودی و درصد حذف آلایندگی MG، به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده است. متغیرهای تحقیق در جدول (۱) خلاصه شده‌اند.

جدول ۱- متغیرهای تحقیق

VARIABLE	RANGE
Input Layer	
$x_1 = \text{PANI/WHA initial dosage(g/L)}$	۰,۱ – ۱,۵
$x_2 = \text{MG initial concentration (mg/L)}$	۱ – ۱۲
$x_3 = \text{UV light intensity (W/m}^2\text{)}$	۸,۳ – ۴۰,۶
$x_4 = \text{Irradiation time (min)}$	۰ – ۲۰۰
Output Layer	
$Y = \text{Removal of MG (\%)}$	۰ – ۱۰۰

۳-۲- نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی

عملکرد حذف MG توسط نانو کامپوزیت PANI/WHA با استفاده از مدل ANN به صورت اعمال سه لایه شبکه عصبی با ۴۰ نورون در لایه اول و ۱۴ نورون در لایه دوم و یک نورون در لایه آخر و به کارگیری الگوریتم پس انتشار خطا پیش‌بینی شد. برای آموزش شبکه از تابع trainlm استفاده شده است. بدین منظور یک شبکه feedforward ایجاد کرده با فراخوانی تابع newff یک شبکه سه لایه، با تابع انتقال tansig در لایه‌های پنهان یک و دو و تابع انتقال خطی (purelin) در لایه خروجی ایجاد شده است. برای ارزیابی کارایی و دقت این مدل از ضریب رگرسیون و میانگین مربعات خطاها (MSE) استفاده شده است. تمام محاسبات مدل ANN توسط نرم‌افزار MATLAB ۸,۲ با استفاده از نوار ابزار ANN به دست آمده‌اند، روال آموزش در صورتی که خطای مجموعه ارزیابی در ۲۰ تکرار متوالی افزایش یابد، متوقف می‌شود. این توقف در تکرار ۱۵۵ رخ داده است. با کلیک روی کلید performance در پنجره آموزش نمودار مربوط به خطاهای آموزشی، ارزیابی و آزمایشی رسم می‌شود. این نمودار در شکل (۲) نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار ملاحظه می‌شود خطای میانگین مربعات شبکه از یک مقدار بزرگ آغاز شده و رفته رفته کاهش می‌یابد. نمودار شامل سه منحنی کاهش خطا می‌باشد، که داده‌های آموزش (Train Data) با منحنی آبی رنگ و داده‌های آزمایش (Test Data) با منحنی قرمز و داده‌های اعتبارسنجی (Validation Data) با منحنی سبز نمایش داده شده‌اند و نمودار منحنی‌ها نشانگر آن هستند که خطای مجموعه ارزیابی با خطای مجموعه آزمایشی و مجموعه آموزشی دارای رفتار و خصوصیات مشابهی است. و بهترین کارایی در تکرار ۱۳۵ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۴۴ حاصل شده است.

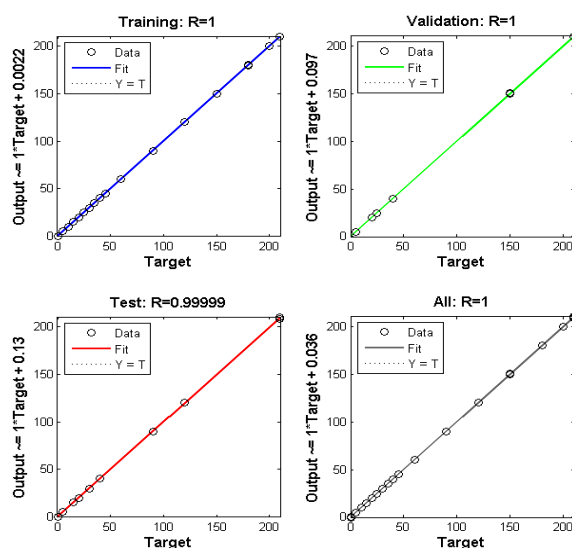


شکل ۲- نمودار عملکرد کارایی شبکه عصبی (میانگین مربعات شبکه)

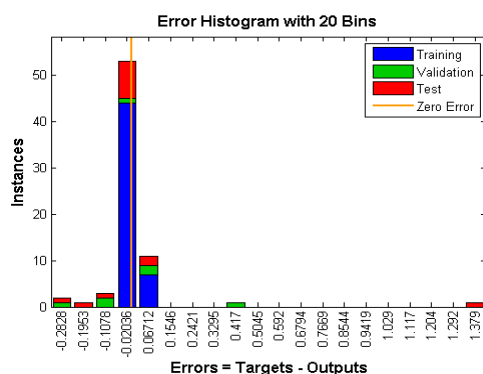
برای انجام تحلیل روی عکس‌العمل شبکه برای حذف مالاشیت سبز (MG) در پساب توسط PANI/WHA برای هر سه دسته آموزشی، ارزیابی و آزمایشی با کلیک بر روی کلید Regression در پنجره آموزش نمودارهای زیر در شکل (۳) حاصل شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با حداکثر مقدار ضریب رگرسیون ($R = 1$) خروجی مجموعه‌های آموزشی، ارزیابی و تست بر روی هدف منطبق شده‌اند. نتایج حاصل نشانگر این است که ارتباط خوبی بین نتایج هر سه دسته آموزشی، ارزیابی و آزمایشی وجود دارد.

شکل ۴ نمودار هیستوگرام خطای حاصل از عملکرد شبکه عصبی جهت حذف آلاینده ی مالاشیت سبز برای سه مجموعه داده های آموزشی، اعتبار سنجی و تست را نشان می دهد. اکثر خطاها بین 0.06712 و -0.2036 قرار دارند.



شکل ۳- نمودارهای رگرسیون شبکه



شکل ۴- هیستوگرام مقادیر خطای حاصل از شبکه عصبی مصنوعی ساده

۳-۳- نتایج حاصل از رگرسیون لجستیک

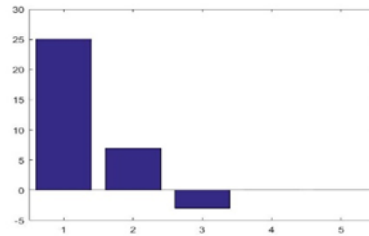
در این تحقیق هدف یافتن احتمال وجود آلودگی یا عدم وجود آلودگی در خروجی تصفیه پساب‌های صنعتی می‌باشد، لذا مدلسازی تصفیه با استفاده از رگرسیون لجستیک انجام شده است. این پژوهش از لحاظ روش، یک پژوهش از نوع همبستگی است. در برآزش رگرسیون لجستیک از شیوه‌ی گام‌به‌گام پیشرو استفاده شده و معنی‌داری ضرایب رگرسیون از طریق تابع حداکثر درست‌نمایی (Maximum likelihood) و آزمون والد سنجیده شد. تابع درست-نمایی یک روش برای آزمون معنی‌داری ضرایب مدل رگرسیون است. مقایسه‌ی مقدار مشاهده شده با مقادیر پیش-بینی شده با استفاده از تابع درست‌نمایی صورت می‌گیرد و آزمون والد یکی از راه‌هایی است که معمولاً برای آزمون معنی‌داری ضرایب در رگرسیون لجستیک به کار برده می‌شود. رگرسیون لجستیک یکی از ابزارهای آماری است که به منظور مدلسازی و تحلیل داده‌ها از آن استفاده می‌شود. رگرسیون لجستیک دارای شکل کلی زیر است:

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \sum_{i=1}^n B_i \quad (6)$$

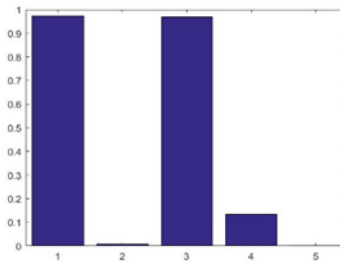
X بردار متغیرهای مستقل شامل مقدار اولیه نانوکامپوزیت، غلظت اولیه MG، شدت اشعه UV و زمان پرتو افشانی می‌باشد و β بردار ضرایب تخمین می‌باشد. همچنین p احتمال پیامد یا وقوع است. در جدول ۲ متغیرها به همراه ضرایب تخمین (B) و ارزش متغیرهای ورودی (P-value)، ارزش آماره آزمون (t-value) و انحراف استاندارد (SE) خروجی قابل استفاده از تصفیه پساب در مقابل خروجی غیرقابل استفاده نشان داده شده است. شکل ۵ نمودار ضرایب تخمین خروجی قابل استفاده از تصفیه پساب در مقابل خروجی غیر قابل استفاده را نشان می‌دهد. در شکل ۶، محور افقی، پارامترهای موجود (۴ پارامتر ذکر شده در جدول ۱) و محور عمودی، بیانگر ارزش اهمیت هر یک از آنها بر روی خروجی قابل استفاده از تصفیه پساب در مقابل خروجی غیرقابل استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۲ - ضرایب تخمین و احتمال خروجی قابل استفاده در مقابل خروجی غیر قابل استفاده از تصفیه پساب

متغیرها	B	SE	p-value	t-value
$x_1 = \text{PANI/}$ WHA initial dosage(g/L)	۶,۹۸۱۳	۲,۶۶۰۶	۰,۰۰۸۷	۲,۶۲۳۹
$x_2 = \text{MG}$ initial concentration (mg/L)	-۳,۰۲۲۱	۷۶,۶۹۸۷	۰,۹۶۸۶	-۰,۰۳۹۴
$x_3 = \text{UV}$ light intensity (W/m^2)	۰,۰۳۴۴	۰,۰۲۳۰۲	۰,۱۳۵۲	۱,۴۹۳۷
$x_4 =$ Irradiation time (min)	۰,۰۲۵۰	۰,۰۰۷۹	۰,۰۰۱۵	۳,۱۷۷۹



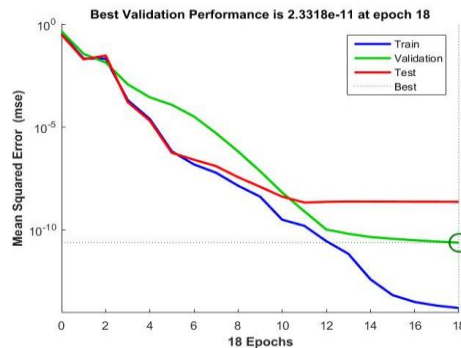
شکل ۵- نمودار ضرایب تخمین



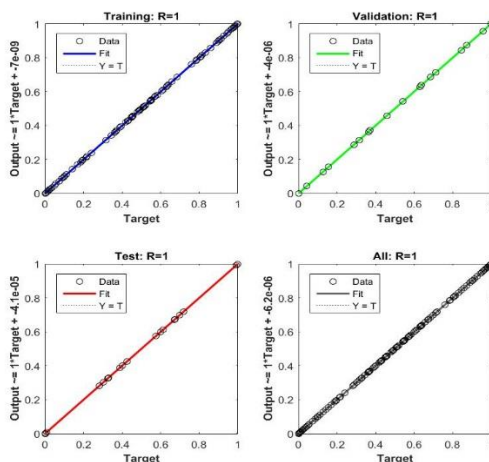
شکل ۶- ارزش اهمیت پارامترهای موجود

۳-۴- نتایج حاصل از روش پیشنهادی

با اعمال ورودی‌های معرفی شده در جدول ۱ به مدل ترکیبی شبکه عصبی و رگرسیون لجستیک با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نمودارهای زیر حاصل شده است. در شکل ۷ (نمودار عملکرد مدل ترکیبی) نحوه کاهش خطا با تعداد تکرارها و مجموع مربعات خطا نشان داده شده است. با توجه به نمودار ملاحظه می‌شود که مقدار خطای میانگین مربعات نهایی کوچک بوده و بهترین کارایی در مورد مجموعه ارزیابی در تکرار ۱۸ رخ داده است و در مقایسه با نمودار شکل ۴ واضح است که روند کاهش خطا در شکل ۹ بهتر از نمودار شکل ۴ می‌باشد و مدل ترکیبی، خطای بسیار کمتری نسبت به روش ساده شبکه عصبی دارد.



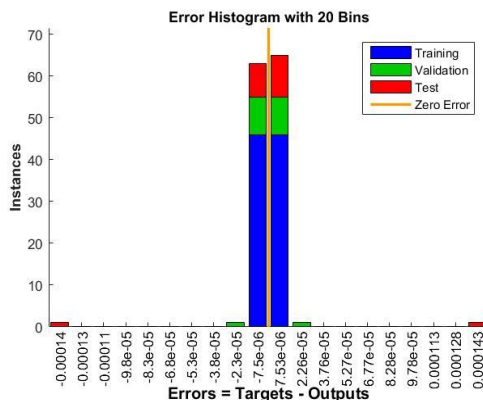
شکل ۷- نمودار عملکرد مدل ترکیبی شبکه عصبی با رگرسیون لجستیک



شکل ۸- رگرسیون‌های حاصل از مدل ترکیبی شبکه عصبی با رگرسیون لجستیک

شکل ۸ نمودار رگرسیون حاصل از مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی با مدل رگرسیون لجستیک را برای داده‌های آموزش، تست، اعتبارسنجی و کل داده‌ها نشان می‌دهد. طبق نمودار ملاحظه می‌شود که خروجی مجموعه‌های آموزشی، ارزیابی و تست به خوبی بر روی بردارهای هدف منطبق شده‌اند. همچنین نمودارهای شکل ۸ در مقایسه با نمودارهای رگرسیون شکل ۳ عملکرد بهتری را نشان می‌دهند.

شکل ۹ نمودار هیستوگرام مقادیر خطای حاصل از ترکیب شبکه عصبی با رگرسیون لجستیک را به صورت نمودار میله‌ای نشان می‌دهد. میله آبی رنگ نشان دهنده داده‌های آموزشی، میله سبز رنگ نشان دهنده داده‌های اعتبارسنجی و میله قرمز رنگ نشان دهنده داده‌های تست می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید بسیاری از خطاها بین $10^{-6} \times 7/53$ و $10^{-6} \times 7/5$ قرار دارند، با اینکه دو نقطه خطای آزمایش در $0/00014$ و $0/000143$ و دو نقطه خطای اعتبارسنجی در $10^{-5} \times 2/26$ و $10^{-5} \times 2/3$ وجود دارد. که نشان دهنده پیش‌بینی خطای خیلی پائین مدل هیبریدی نسبت به خطای ملاحظه شده در نمودار هیستوگرام حاصل از شبکه عصبی ساده می‌باشد.



شکل ۹- هیستوگرام خطای پیش‌بینی مدل ترکیبی شبکه عصبی با رگرسیون لجستیک

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از رگرسیون لجستیک ابتدا ارزش اهمیت هر یک از متغیرها مشخص شده و بیشترین عامل تاثیرگذار بر پیش‌بینی حذف آلاینده‌ی مالاشاریت سبز، غلظت اولیه همین ماده پیش‌بینی شده است. همچنین عملکرد حذف MG توسط نانو کامپوزیت PANI/WHA با استفاده از مدل ANN به صورت اعمال سه لایه شبکه عصبی با ۴۰ نورون در لایه‌ی اول، ۱۴ نورون در لایه‌ی دوم، یک نورون در لایه‌ی آخر و به کارگیری الگوریتم پس انتشار خطا پیش‌بینی شد. که با توجه به تعداد زیاد نورون‌ها و لایه‌های استفاده شده در این مدل، شبکه از پیچیدگی زیادی برخوردار می‌باشد. در صورتی که در مدل ترکیبی با استفاده از تعداد نورون کمتر (شامل ۱۰ نورون) و دو خروجی از پیچیدگی شبکه کاسته شده و کارایی بهتری حاصل شده است. لذا با استفاده از مدل‌های ترکیبی می‌توان از صرف زمان زیاد برای انتخاب و پردازش متغیرها ممانعت نمود.

در ضمن برای بررسی کارایی این مدل‌ها با هدف حذف آلاینده‌ی MG از پساب‌ها، طبق نمودارهای به دست آمده در شکل‌های ۴ و ۹ ملاحظه می‌شود که میزان خطای مدل شبکه عصبی برابر ۰/۰۴ و میزان خطای مدل ترکیبی

برابر $10^{-11} \times 2/3$ می‌باشد.

لذا نتایج حاصل از مقایسه‌ی پیش‌بینی مدل‌ها، تاییدکننده برتری مدل شبکه‌های عصبی ترکیبی نسبت به شبکه عصبی ساده و مدل آماری رگرسیون لجستیک می‌باشد. این تفاوت را می‌توان به ویژگی مربوط به مدل ترکیبی در شناخت اثرات متقابل متغیرها و شناسایی الگوهای موجود در داده‌ها، خطای کمتر و دقت بیشتر توجیه نمود. همچنین با استفاده از مدل هوشمند ترکیبی می‌توان قسمت اعظم مشکلات بهره‌برداری تصفیه خانه‌های فاضلاب، از قبیل عدم حضور دائم نیروی متخصص در محل، عدم امکان پیش‌بینی وضعیت پساب ورودی و خروجی را مرتفع کرد. لذا مدل هیبریدی به عنوان یک تکنولوژی پیشرفته و یک روش بهبودبخش برای افزایش دقت پیش‌بینی کنترل هوشمند فرایند تصفیه پساب‌های صنعتی کاربرد دارد. همچنین با به کارگیری این طرح می‌توان از هزینه‌های گزافی که صنایع مختلف برای تصفیه پساب‌های خود می‌پردازند، جلوگیری نمود.

فهرست منابع

- [۱] M. A., BEHNAJADY, N. MODIRSHAHLA and F. GHANBARY, "A kinetic model for the decolorization of C.I. Acid Yellow ۲۳ by Fenton process," *J. of Hazar. Mate.*, vol. ۱۴۸, no. ۳, pp. ۹۸-۱۰۲, ۲۰۰۷.
- [۲] N. DANESHVAR, A. R. KHATAEE and N. JAFARZADEH, "The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow ۲۸ by electrocoagulation process," *J. of Hazar. Mate.*, vol ۱۳۷, no. ۴, pp. ۱۷۸۸-۱۷۹۵, ۲۰۰۶.
- [۳] F. GHANBARY and A. JAFARIAN, "Polyaniline/wheat Husk Ash Nanocomposite Preparation and Modeling Its Removal Activity with an Artificial Neural Network," *Chiang Mai J. of Science*, vol. ۴۲, no. ۹, pp. ۱-۱۲, ۲۰۱۵.
- [۴] J. WAN, M. HUANG, Y. MA and X.SUN, "Prediction of effluent quality of a paper mill wastewater treatment using an adaptive network-based fuzzy inference system," *App. Soft Comp.*, vol. ۱۱, no. ۳, pp. ۳۲۳-۳۴, ۲۰۱۱.
- [۵] S. POMMIER, D. CHENU, M. QUINTARD and X. LEFEBVRE, "A logistic model for the prediction of the influence of water on the solid waste methanization in landfills," *Biotech. and bioeng.*, vol. ۹۷, no. ۶, pp. ۴۷۳-۴۸۲, ۲۰۰۷.
- [۶] I. MICHAEL, A. PANAGI, L. A. IOANNOU and Z. FRONTISTIS, "Utilizing solar energy for the purification of olive mill wastewater using a pilot-scale photocatalytic reactor after coagulation-flocculation," *J. of Water res.*, vol. ۶۰, no. ۷, pp. ۲۸-۴۰, ۲۰۱۴.
- [۷] H. HONGGUI, and Y. LI, "A fuzzy neural network approach for online fault detection in waste water treatment process," *Comp. & Elec. Eng.*, vol. ۴۰, no. ۱۲, pp. ۲۲۱۶-۲۲۲۶, ۲۰۱۴.
- [۸] M. S. NASR, M. A. MOUSTAFA, H. A. SEIF and G .E. KOBROSY, "Application of Artificial Neural Network (ANN) for the prediction of EL-AGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT," *Alex. Eng. J.*, vol. ۵۱, no. ۲۵, pp. ۳۷-۴۳, ۲۰۱۲.
- [۹] T. R. NEELAKANTAN and G. M. BRION, "Neural network modelling of Cryptosporidium and Giardia concentrations in the Delaware River," *Water Sci. & Tech.* vol. ۴۳, no. ۲۳, pp. ۱۲۵-۱۳۲, ۲۰۰۱.
- [۱۰] U. GOVINDARAJ and S. RAO, "Artificial neural networks in hydrologic applications," *J. of Hydro. Eng.*, vol. ۵۲, no. ۴۲, pp. ۱۲۴-۱۳۷, ۲۰۰۰.
- [۱۱] H. R. MAIER and G. C. DANDY, "Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications," *Env. modelling & soft.*, vol. ۱۵, no. ۱۲, pp. ۱۰۱-۱۲۴, ۲۰۰۰.
- [۱۲] J. ZURADA, "Introduction to Artificial Neural Systems," West Publishing, ۱۹۹۲.
- [۱۳] S. HAYKIN, "Neural networks: a comprehensive foundation," *Prentice Hall., New Jersey, USA*, ۱۹۹۹.

[۱۴] Y. X. ZHANG, "Artificial neural networks based on principal component analysis input selection for clinical pattern recognition analysis," *Talanta*, vol. ۷۳, no. ۸, pp. ۶۸-۷۵, ۲۰۰۷.

[۱۵] F. GHANBARY, N. MODIRSHAHLA, M. KHOSRAVI and M. A. BEHNAJADY, "Synthesis of TiO_2 nanoparticles in different thermal conditions and modeling its photocatalytic activity with artificial neural network," *J. of Env. sciences*, vol. ۲۴, no. ۲۱, pp. ۷۵۰-۷۵۶, ۲۰۱۲.