2020, Vol.7, No.3, Pages 63 to 72
Journal of Water and Sustainable Development

سال هفتم، شماره ۳، ۱۳۹۹، صفحات ۶۳ تا ۷۲
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: کاربردی

Investigating the Results of Predicting the Quality of Treated Effluent Using Neural Network and Metaheuristic Algorithm (Case Study: Pegah Factory in Azerbaijan)

M. Yousefi Nejad Attari[1*], Sh. Habbibi[2], A. derakhshan[3]

1,2,3- Assistant Professor, MSc and Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad university, Bonab, Iran.

*(Corresponding Author Email: myousefi@bonabiau.ac.ir)

Received: 15-03-2020
Accepted: 26-05-2020

بررسی نتایج پیش‌بینی کیفیت پساب تصفیه‌شده با شبکه عصبی و الگوریتم فرابتکاری (مطالعه موردی: کارخانه پگاه آذربایجان)

مهدی یوسفی‌نژاد عطاری[1*]، شاهین حبیبی[2]، علی درخشان[3]

۱و۲و۳- به‌ترتیب استادیار، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد و استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: myousefi@bonabiau.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۰۶

Abstract

Reducing water resources and increasing demand for safe drinking water requires attention to water resources that can be returned to nature or can be used in industry or agriculture. In this regard, the use of optimal and effective methods for wastewater treatment and development is very important. In order to increase the efficiency of the wastewater treatment system and in order to reduce the pollution load of the effluent, it is very important to predict the quality of the treated effluent. In this research work, using genetic algorithm and neural network method, the effluent treatment system of Azerbaijan Pegah factory has been modeled in order to optimize the results using genetic algorithm and neural network method. The effluent treatment process should be carried out in order to anticipate the removal and disinfection of the remaining carbon materials and microbial contaminants according to the BOD_5 and COD data that determine the quality of the effluent. The results show that the combination of the above two algorithms has been successful in predicting the output data compared to the actual data and there is an 87% matching of the data.

Keywords: Effluent, Genetic Algorithm, Neural Network, BOD_5, COD.

چکیده

کاهش منابع آبی و افزایش تقاضا برای آب شرب سالم، لزوم توجه به منابع آبی که قابلیت برگشت به طبیعت و یا امکان استفاده در بخش صنعت یا کشاورزی را داشته باشد، می‌طلبد. در این راستا، استفاده از روش‌های بهینه و موثر برای تصفیه پساب و توسعه آن اهمیت به‌سزایی دارد. جهت افزایش کارایی سیستم تصفیه فاضلاب و در راستای کاهش بار آلودگی پساب خروجی، پیش‌بینی کیفیت پساب تصفیه‌شده بسیار حائز اهمیت است. در این کار پژوهشی، سیستم تصفیه پساب خروجی از کارخانه پگاه آذربایجان با الگوریتم ژنتیک و روش شبکه عصبی، مدل‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی‌شده جهت بهینه‌سازی فرآیند تصفیه پساب استفاده شد تا پیش‌بینی حذف و زدایش مواد باقیمانده کربنی و مواد آلاینده میکروبی، با توجه به داده‌های BOD_5 و COD که کیفیت پساب خروجی را معین می‌کنند، ممکن شود. نتایج به‌دست آمده حاکی از این است که ترکیب دو الگوریتم فوق، در پیش‌بینی داده‌های خروجی و در مقایسه با داده‌های واقعی، موفق عمل کرده و تطابق داده‌ها ۸۷ درصد است.

واژه‌های کلیدی: پساب، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی، BOD_5، COD.

DOI: 10.22067/jwsd.v7i3.86040

مقدمه

مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی آلودگی آب ناشی از تخلیه مواد مغذی در آب‌های پذیرنده است (Garcia و همکاران، ۲۰۰۹). در دنیای حاضر از فاضلاب‌های ایجادشده به‌عنوان منابع مختلف استفاده می‌کنند؛ لذا ضرورت بهینه‌سازی و تحقیق بر روی کیفیت پساب‌های ایجاد شده بسیار ضروری به نظر می‌رسد. همچنین به منظور بهبود اثربخشی تصفیه، اجرای روش‌های کنترل مناسب ضروری است. از جمله متداول‌ترین روش‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، روش بیولوژیکی است که جهت حذف آلودگی فاضلاب از فرآیندهایی مبتنی بر فنّاوری لجن فعال استفاده می‌شود (Li و Lerapetritou، ۲۰۰۸). به‌دلیل پیچیدگی پدیده‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مرتبط با واحدهای تصفیه، کارائی فرآیند به‌شدت به شرایط محیطی و عملیاتی وابسته است (Lu و Ma، ۲۰۲۰). کنترل فرآیندهای تصفیه فاضلاب، به‌دلیل نوسانات زیاد جریان و بار ورودی مشکل است؛ لذا مطالعات گسترده‌ای در زمینه شبیه‌سازی کنترل فرآیند لجن فعال انجام شده است (Chachuat و همکاران، ۲۰۰۵).

عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تابعی از عوامل مختلف کیفی فاضلاب، شرایط مدیریتی تصفیه‌خانه و مسائل زیست‌محیطی است. دفع فاضلاب با مشخصه‌های کیفی قابل قبول، به انواع منابع پذیرنده، یکی از مشکلات زیست‌محیطی است که جوامع امروزی با آن مواجه‌اند. آزادسازی فاضلاب افزون بر انتقال عوامل بیماری‌زای میکروبی و شیمیایی به انسان، باعث انهدام بسیاری از آبزیان رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها می‌شود (Metcalf و Eddy، ۲۰۰۳). آمار و ارقام موجود نشان می‌دهند، حجم آب‌های نامتعارف، از جمله پساب‌های شهری و صنعتی ایران در سال ۱۳۷۵ در حدود ۳/۴ میلیاردمترمکعب بوده که ۲/۵ میلیاردمترمکعب آن مربوط به پساب شهری است. با توجه به رشد و توسعه شهرنشینی مقدار این پسابها در سال ۱۳۸۰ برابر با ۴/۵ میلیاردمترمکعب شد (رنگ‌زن و همکاران، ۱۳۸۵). حجم پساب در سال ۱۳۹۷ به ۸۵ میلیاردمترمکعب رسید. رشد سریع پساب تولیدشده لزوم بررسی کاربرد فاضلاب و پساب در کشاورزی به علت نیاز روزافزون به آب و قابل اطمینان بودن پساب به‌عنوان منبع شبه جایگزین آب در سال‌های خشك و کم باران، به‌ویژه در مناطق خشك و نیمه خشك ایران و در کل به دلیل بالا بودن مواد معدنی همچون ازت، فسفر و پتاسیم برای رشد گیاهان، روز به روز مورد توجه بیشتر قرار داده است. (مرادمند و بیگی هرچگانی، ۱۳۸۸؛ ترابیان و مطلبی، ۱۳۸۲)

بررسی رفتاری تصفیه‌خانه‌ها براساس معیارهای کیفی پساب در قالب مدل‌های تخمین‌گر از موضوعات جدید است.

امروزه صنایع شیر و لبنیات از لحاظ کمّی و کیفی توسعه سریعی یافته‌اند. لذا ارتقاء کیفیت پساب خروجی از این صنایع و ایجاد فرایندهای سریع که بتواند سرعت تصفیه را افزایش دهند، یک ضرورت است.

از آنجایی که همه کانال‌های توزیع شامل باکتری و مواد مغذی هستند، تقریباً هر نوع ترکیب زائدی که وارد این آبراه‌ها می‌شوند، واکنش‌های بیوشیمیایی را آغاز می‌کنند. این نوع واکنش‌های بیوشیمیایی که در آزمایشگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شوند، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD_5)[1] نامیده می‌شوند. BOD_5 این مواد شیمیایی مسئول شکستن اکسیدکننده‌های قوی هستند. این واکنش‌های شیمیایی که در آزمایشگاه انجام می‌شوند، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)[2] نامیده می‌شوند. هر دو آزمایش BOD و COD برای اندازه‌گیری اثر کاهش اکسیژن حاصل از آلاینده‌های فاضلابی هستند. تأثیر هر دو آزمایش به‌طور گسترده‌ای در اندازه‌گیری اثر آلاینده‌ها به اثبات رسیده است.

برای مدل‌سازی فرایند تصفیه، پساب کارخانه پگاه آذربایجان به دلیل غلظت نسبتاً زیاد COD در این نوع فاضلاب، بهره‌گیری از روش تصفیه بی‌هوازی روش مطلوب است. تحقیق حاضر با هدف بررسی سیستم تصفیه‌خانه کارخانه لبنیات پگاه استان آذربایجان‌شرقی و ارائه یک الگوریتم مناسب جهت پیش‌بینی خروجی تصفیه پساب این واحد انجام شده است. در سال‌های اخیر، تصفیه‌خانه مدرن شرکت پگاه آذربایجان که پروژه زیست‌محیطی مهمی در استان محسوب می‌شود، احداث شده است.این واحد ظرفیت لازم برای مرحله توسعه آتی را دارد. در فرآیند تصفیه، بایستی بتوان از پساب تصفیه‌شده، جهت آبیاری فضای سبز و مصارف کشاورزی استفاده نمود. همچنین، پساب تصفیه‌شده، استانداردهای لازم جهت تخلیه به آب‌های سطحی را داشته باشد. لذا استفاده پارامترهای ورودی کیفیت پساب خروجی در مراحل مختلف تصفیه و الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توان به استانداردهای متعارف رسیده و کیفیت پساب خروجی قابل پیش‌بینی است.

با توجه به مطالب مطرح شده، می‌توان دریافت بررسی و پیش‌بینی کیفیت پساب می‌تواند آمادگی سیستم‌های تصفیه را جهت تهیه مواد و اقدامات مقتضی فراهم نماید. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک کیفیت پساب تصفیه شده در کارخانه پگاه آذربایجان پیش بینی شده و به تحلیل نتایج حاصل از تحقیق پرداخته شود.

روش تحقیق

مراحل مختلف انجام این تحقیق را می‌توان در مراحل زیر بیان نمود:

۱. ابتدا مقادیر ورودی شامل داده‌های مرتبط با عوامل موثر بر کیفیت پساب خروجی شامل پارامترهای سنجش دما (T)، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD_5)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) در کارخانه پگاه آذربایجان طی یک بازه زمانی یکساله گردآوری شده و وارد نرم‌افزار Matlab می‌شوند.

۲. داده‌های به‌دست‌آمده مستقیماً وارد الگوریتم فراابتکاری ژنتیک شده و این الگوریتم به دنبال جستجوی داده‌هایی از بین داده‌های ورودی است که با توجه به میزان آلایندگی تولید شده، کمترین میزان را به خود اختصاص دهند. در واقع، مجموعهء داده‌های ورودی تهیه می‌شود و پارامترهای سنجش دما (T)، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD_5)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) به عنوان خروجی قرار می‌گیرند.

۳. خروجی روش قبلی به عنوان ورودی برای آموزش داده‌های شبکه عصبی استفاده می‌شود. شبکه عصبی با استفاده از داده‌های ورودی مرحله اول آموزش را دریافت می‌کند.

۴. شبکه عصبی درصدی از داده‌های ورودی مرحله اول را با ورودی‌های اولیه، به عنوان داده‌های آزمایشی، آزمون کرده و نتایج را با استفاده از نمودار در خروجی نمایش می‌دهد. در صورتیکه خطای پیش‌بینی کمتر از ۱۰ درصد باشد، نتیجه مورد نظر تأیید می‌شود.

• داده‌های کیفی پساب تصفیه شده ورودی

عوامل مؤثر بر کیفیت پساب خروجی شامل پارامترهای سنجش دما (T)، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD_5)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) و pH در ورودی و خروجی تصفیه‌خانه از تصفیه‌خانه پگاه آذربایجان تهیه شد. در جدول (۱) و (۲) داده‌های جمع‌آوری شده را برای مقادیر ورودی و خروجی در سال ۱۳۹۶ و به تفکیک هر ماه می‌توان مشاهده نمود:

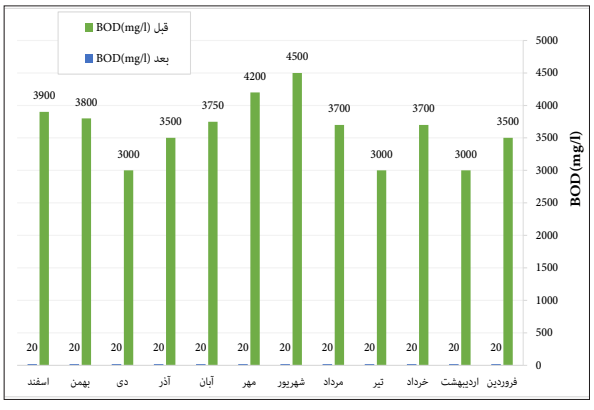
جدول ۱- مشخصات کیفی پساب ورودی به تصفیه‌خانه و خروجی از آن

		pH		BOD_5 (mg/l)		COD (mg/l)	
ردیف	ماه	ورودی	خروجی	ورودی	خروجی	ورودی	خروجی
۱	فروردین	۸/۵۲	۷/۵۲	۳۴۷۰	۳۰	۵۶۳۹/۳	۵۷/۳
۲	اردیبهشت	۹/۳	۸/۰۸۷	۲۹۸۰	۲۸	۶۱۰۲/۲۵۸	۶۵/۸۳۸۷
۳	خرداد	۱۱/۰۴	۸/۰۹	۳۶۰۰	۳۱	۵۷۱۱/۶۴	۶۲/۹۳۵۴
۴	تیر	۹/۴	۸/۰۸	۳۰۱۰	۲۹	۶۰۰۷/۴۲	۶۴/۷۱
۵	مرداد	۹/۲۴	۷/۹۴	۳۷۹۰	۳۲	۶۳۷۰/۹۶	۷۹/۶۴۵
۶	شهریور	۹/۱۸۷	۷/۸۸	۴۴۹۰	۳۶	۶۹۲۷/۴۲	۶۸/۵۱۶
۷	مهر	۹/۰۸۶	۷/۸۴	۴۰۵۳	۴۵	۶۵۹۷	۶۵/۳۶۷
۸	آبان	۹/۲۵۷	۷/۸۶	۳۸۷۰	۳۶	۶۲۶۴/۳۴	۶۶/۰۱
۹	آذر	۹/۳۸	۷/۸۵	۳۵۶۰	۴۷	۵۹۹۷/۳۳	۶۶/۴۶
۱۰	دی	۹/۲۶۳	۷/۸۶	۳۰۱۰	۳۳	۶۲۸۹/۳	۶۳/۲۶۷
۱۱	بهمن	۹/۰۶	۷/۸۹	۳۸۹۰	۴۰	۶۳۴۱	۶۱/۲
۱۲	اسفند	۹/۱۱	۷/۸۶	۴۰۲۰	۳۱	۶۴۲۸/۲۷	۶۵/۵۸۶

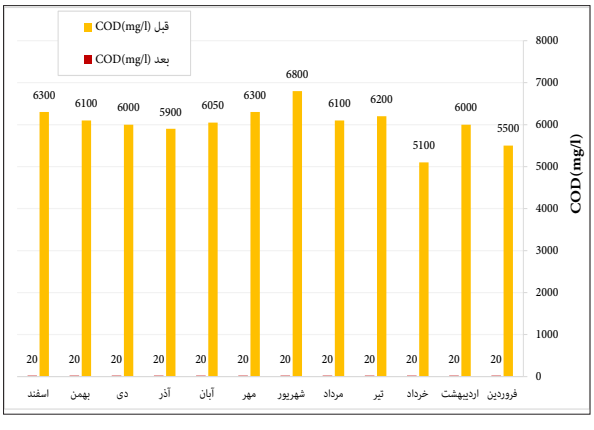
با توجه به داده‌های جدول (۱) مشاهده می‌شود که مقادیر ورودی برای متغیرهای مورد بررسی نسبت به مقادیر خروجی بسیار بالا است که می‌تواند بیانگر کارایی روش به‌کاررفته در فرآیند تصفیه باشد. مقدار pH در پساب ورودی در اغلب ماه‌های سال قلیایی بوده که پس از تصفیه، pH پساب خروجی در محدوده خنثی قرار می‌گیرد و امکان رهاسازی در طبیعت و یا مصارف کشاورزی را از لحاظ pH میسر می‌نماید.

اختلاف مقادیر ثبت شده برای BOD_5 و COD قبل و بعد از تصفیه بسیار زیاد است (شکل‌های ۱ تا ۳).

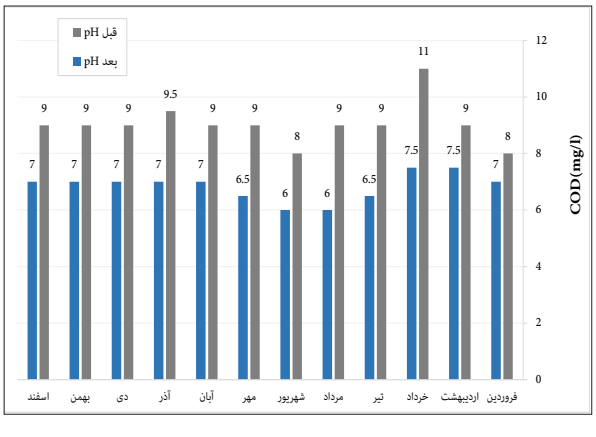
باتوجه به کاهش بار آلودگی شیمیایی (COD) می‌توان اذعان نمود که عملیات تصفیه به خوبی صورت گرفته است. دما قبل و بعد از عملیات تصفیه تغییر نکرده و در نتیجه پارامتر ثابت این فرآیند محسوب می‌شود.



شکل ۱- تغییرات BOD_5 پساب ورودی و خروجی در طی سال ۱۳۹۶برحسب میلی‌گرم در لیتر



شکل ۲- تغییرات COD پساب ورودی و خروجی در طی سال ۱۳۹۶ برحسب میلی‌گرم در لیتر



شکل ۳- تغییرات pH پساب ورودی و خروجی در طی سال ۱۳۹۶

• معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌های مورد نظر از شاخص ضریب همبستگی (R) با رویکرد مقایسه بین تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود (رابطه ۱). ضریب همبستگی، یکی از معیارهای تعیین همبستگی دو متغیر است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا ۱- است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. همچنین، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)[۳]، خطای جذر میانگین مربعات یا انحراف جذر میانگین مربعات یا خطای جذر میانگین مربع‌ها (RMSD)[۴] مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی تعیین می‌شود (روابط ۲ و ۳). علاوه بر دو پارامتر فوق از میانگین مربعات خطا (MSE) که یک معیار بسیار رایج برای به‌دست آوردن بهترین برآوردگر بوده و در بین آماردانان مطلوبیت خاصی دارد، استفاده می‌شود (رابطه ۴).

با توجه به این که مقدار RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری متغیر است، مقایسه مقدار آن بین مدل‌های ساخته شده برای دو متغیر با واحدهای متفاوت دقت کافی را نخواهد داشت؛ لذا مقدار RMSE را به دامنه داده‌های متغیر وابسته تقسیم کرده و آن را RMSE نرمال شده (NRMSE) می‌نامند. این معیار برای مقایسه مدل‌های مختلف مناسب خواهد بود. لازم به ذکر است که NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق‌بودن مدل، ۱۰-۲۰ درصد مناسب بودن مدل، ۲۰-۳۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف‌بودن مدل است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (۱)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2}{N} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2}{N}} \quad (۳)$$

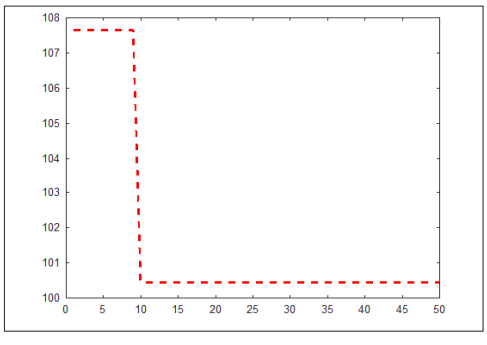
$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}} \quad (۴)$$

در این روابط، x_i مقدار مشاهده شده در گام زمانی i ام، y_i مقدار محاسبه شده در همان زمان، N تعداد گام‌های زمانی، $\bar{x}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و $\bar{y}$ نیز میانگین مقادیر محاسباتی است. کم بودن میزان MSE و RMSE و نزدیک بودن NRMSE به صفر و نزدیک بودن مقدار R به یک، گویای دقت قابل قبول مدل و برتری آن نسبت به مدل دیگر است.

نتایج

۱- خروجی الگوریتم ژنتیک

همانطور که ذکر شد، داده‌های خام در ابتدا با الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB بررسی شده و پس از طبقه‌بندی و انتخاب داده‌های با تولید کمترین آلودگی، خروجی برای بهینه‌سازی، وارد الگوریتم شبکه عصبی می‌شود. در شکل (۴) خروجی الگوریتم ژنتیک آورده شده است. محور افقی تکرارهای الگوریتم ژنتیک و محور عمودی میزان آلایندگی است.



شکل ۴- نتایج خروجی الگوریتم ژنتیک

مشاهده می‌شود که داده‌ها به یک حالت بهینه و یکنواختی در خروجی الگوریتم ژنتیک رسیده‌اند.

بایستی ذکر شود که جمعیت و یا کروموزوم‌های این الگوریتم، در واقع بر اساس داده‌های خام به‌دست آمده در طول یک سال، که به‌صورت ماهانه در تصفیه‌خانه پگاه آذربایجان ثبت شده، می‌باشد که در طی اجرای الگوریتم از فایل اکسل بازخوانی می‌شود. در واقع، کروموزوم‌های تشکیل شده از مقادیر اولیه موجود در فایل اکسل هستند.

نحوه تقاطع به صورت نقطه‌ای انتخاب شده است. در واقع، در تقاطع نقطه‌ای به صورت مشخص با معین کردن از قبل (در این پروژه به صورت تصادفی)، نقطه تقاطع انتخاب می‌شود و بین دو کروموزوم، از آن نقطه، ژن‌ها عوض شده و کروموزوم جدید تشکیل می‌شود. همچنین، جهش نیز نقطه‌ای انتخاب شده، به طوری که در هر تکرار از کل تکرارها، با توجه به درصد مشخص شده از کل جمعیت، به صورت تصادفی مکانی از ژن‌ها انتخاب شده و عملیات جهش انجام می‌پذیرد.

در جدول (۳) داده‌های ورودی و خروجی مورد نظر آورده شده است.

جدول ۲- جدول معرفی ورودی و خروجی‌های نرم‌افزار

ردیف	ورودی نرم‌افزار	خروجی نرم‌افزار
۱	PH اولیه	PH ثانویه
۲	BOD_5 اولیه	BOD_5 ثانویه
۳	COD اولیه	COD ثانویه

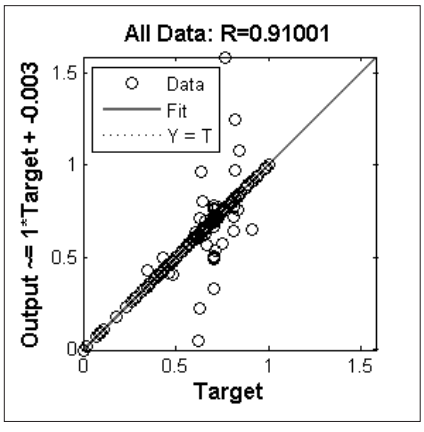
برای سنجش کارایی نرم‌افزار در حالت آموزش از معیارهای جدول (۴) استفاده شده است.

جدول ۳- معیارهای کارایی

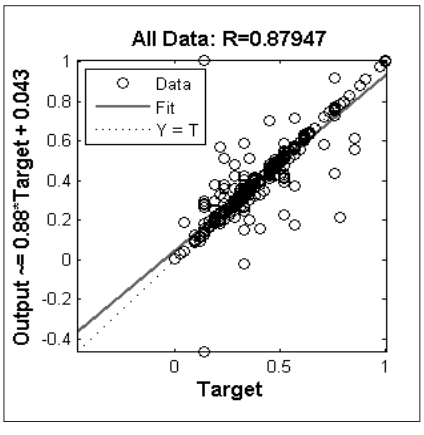
.No	Error Name	Symbol
۱	Mean Squared Error	MSE
۲	Root Mean Square Error	RMSE
۳	Normalized Mean Squared Error	NMSE
۴	Regression Coefficient	R

برای طبقه‌بندی داده‌های ورودی و ساخت قوانین، روش‌های متعددی پیشنهاد شده که رایج‌ترین آن‌ها عبارتند از : افراز شبکه‌ای[۵]، خوشه‌بندی فازی کاهشی[۶] و روش خوشه‌بندی فازی (FCM)[۷]. در مدل فازی عصبی، افراز شبکه‌ای توسط genfis۱ ، خوشه‌بندی فازی کاهشی توسط genfis۲ و روش کلاسترینگ فازی (FCM) با استفاده از genfis۳ تولید می‌شود. در این پژوهش از روش genfis۳ استفاده شده است. در این روش از تابع FCM برای استخراج توابع عضویت و تعیین تعداد قوانین استفاده می‌شود. همچنین ایجاد یک ساختار FIS از نوع ممدانی یا سوگنو صورت می‌گیرد، سپس تعداد خوشه‌ها (n-cluster) توسط FCM داده می‌شود. تابع عضویت ورودی پیش فرض، از نوع گوسی gaussmf و تابع عضویت خروجی پیش فرض از نوع خطی[۸] است.

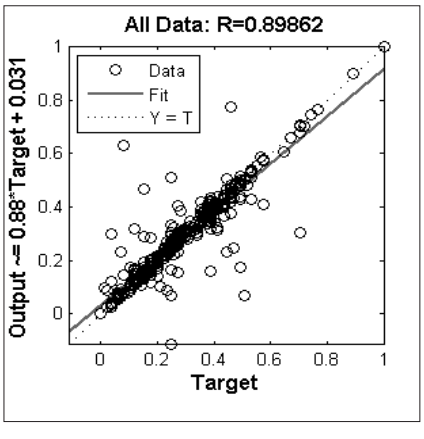
در شکل (۵) نمودار کارایی داده کل برای هر یک از پارامترهای در نظر گرفته شده (BOD_5، pH، COD) نشان داده شده است.



pH



BOD



COD

شکل ۵- نمودار کارایی ساختار برحسب ضریب همبستگی

شکل (۵) نمودار کارایی ساختار برحسب ضریب همبستگی سناریو ۴ را نشان می‌دهد. در نمودارهای رسم شده ملاحظه می‌شود که پراکندگی داده‌ها کمتر شده و خط پررنگ که نشان‌دهنده نتایج خروجی است، به خط نقطه‌چین داده‌های کل نزدیک‌تر شده است. این نزدیکی بین این خطوط نشان‌دهنده صحت مقادیر به‌دست آمده است.

مقادیر به دست آمده برای هر یک از خطاها و معیارهای ارزیابی محاسبه و در جدول (۴) گردآوری شده است.

جدول ۴- مقادیر به‌دست آمده برای معیارهای ارزیابی مختلف

پارامترها	معیارهای ارزیابی			
	MSE	RMSE	NRMSE	R
pH	۰,۰۰۵۱۲۲	۰,۰۷۱۵۶۸	۰,۱۱۰۴۸۹	۰,۹۱۰۰۰۷
BOD_5	۰,۰۰۷۹۵۹۴	۰,۰۸۹۲۱۶	۰,۲۳۰۴۰۵	۰,۸۷۹۴۷۴
COD	۰,۰۰۴۵۷۸۸	۰,۰۶۷۶۶۷	۰,۲۳۸۱۵۶	۰,۸۹۸۶۱۶

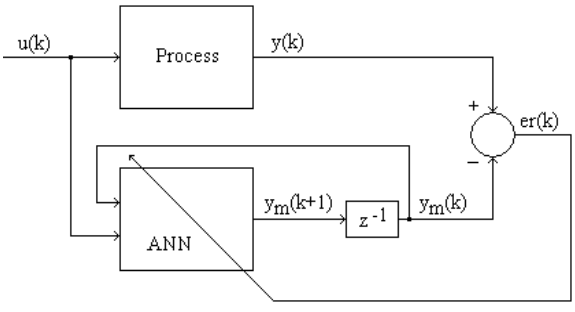
همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است، مقدار R برای BOD_5، pH، COD، برابر ۰/۸۷، ۰/۹۱ و ۰/۸۹ است. هر چه مقدار R به یک نزدیک‌تر باشد، مقادیر تخمینی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. بنابراین، می‌توان اذعان نمود هر سه پارامتر مقادیر نزدیکی به مقادیر اندازه‌گیری شده دارند. علاوه بر این مقدار NRMSE نیز تأییدکننده دقت شبکه عصبی مورد استفاده بوده که در این مدل برای pH برابر با ۱۱ درصد و برای BOD_5 و COD برابر با ۲۳ درصد است.

با توجه به این که مقدار BOD_5 به شدت تحت شرایط درجه حرارت، نور، زمان و به خصوص دمای محیط قرار می‌گیرد، نتایج حاصله نشان می‌دهند که با استفاده از داده‌های ورودی که در آنها دما لحاظ نشده، می‌توان کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه پگاه آذربایجان را با درصد خطایی کمتر از ۳۰ درصد محاسبه نمود که این رقم برتری مدل استفاده شده را نشان می‌دهد. R بدست آمده برای BOD_5، ۰/۸۷ می‌باشد که نزدیکی به یک در این معیار نشان‌دهنده دقت بالای مدل استفاده شده است.

۲- نتایج خروجی از شبکه عصبی

در مقایسه با چندین روش هوش مصنوعی، رویکرد شبکه عصبی برای مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی، چندین مزیت را پیشنهاد می‌دهد که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: یادگیری از نمونه، بدون نیاز به دانش قبلی و آموزش ساده.

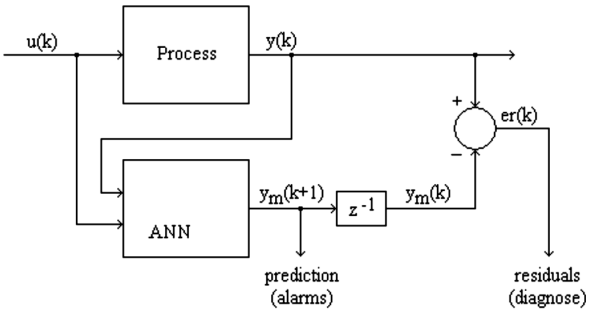
در طول مرحله آموزش، شبکه عصبی به مانند شکل (۶) (نمایشگر زمان گسسته) متصل می‌شود که در آن می‌توان متغیرهای ورودی و خروجی شبکه را متوجه شد. خطای بین خروجی‌های فرآیند $y(k)$ و مدل عصبی $y_m(k)$ برای آموزش پارامترها به کار می‌رود. داده‌های آموزشی شامل متغیرهای لایه ورودی $u(k)$ و $y(k)$ و اهداف $y(k+1)$ هستند.



شکل ۶- ساختار شبکه عصبی در حال یادگیری

فرض می‌شود که متغیرها قابل اندازه‌گیری هستند. اگر این مورد محقق نشود، برآوردگر (جدا از شبکه عصبی) لازم است. در این تحقیق، داده‌های آموزشی از شبیه‌سازی مدل تحلیلی (آموزش خارج از خط) به‌دست آمده؛ بنابراین، هیچ ارزیابی لازم ندارد. شبکه عصبی در حین پیاده‌سازی به‌صورت شکل (۷) پیکربندی شده است. خروجی شبکه عصبی جهت موارد زیر استفاده می‌شود:

- هشدار دهنده (یک گام جلوتر از خروجی پیش‌بینی شده)؛
- تشخیص و شناسایی خطا از طریق ارزیابی سایر خروجی‌ها (خروجی‌های به تأخیر افتاده شبکه، در مقایسه با خروجی‌های فرآیند).



شکل ۷- ساختار شبکه عصبی در حال پیاده‌سازی

در این تحقیق، شبکه عصبی و الگوریتم آموزش در محیط MATLAB و با استفاده از توابع مناسب آن، مورد آزمایش قرار گرفته شد. مجموعه‌ای از بردارهای داده‌های آموزشی، توسط شبیه‌سازی مدل تحلیلی فرآیند، به‌دست آمد. مراحل طراحی شبکه‌های عصبی مصنوعی که مدل تصفیه فاضلاب را تقریب می‌زند، عبارتند از:

۱- ایجاد ورودی و مجموعه داده‌های هدف

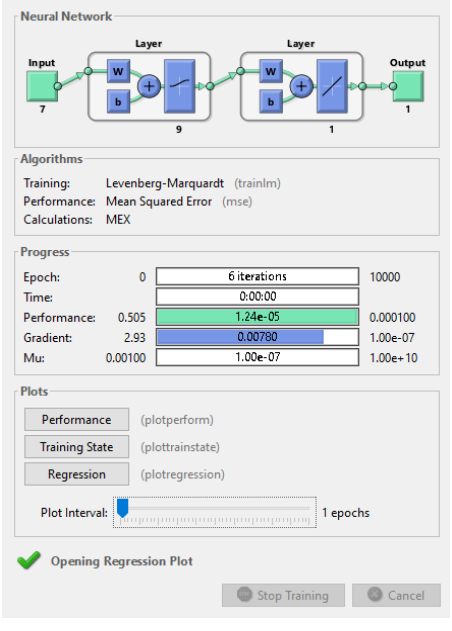
۲- ایجاد معماری یک شبکه بازخورد شده

۳- تنظیم پارامترهای آموزشی مانند هدف، خطا، حداکثر تعداد دوره (تکرار)، حداقل شیب، میزان یادگیری و غیره

۴- آموزش شبکه عصبی

۵- اندازه‌گیری نتایج با شبیه‌سازی خروجی شبکه عصبی با استفاده از داده‌های ورودی و مقایسه آن با خروجی «هدف»

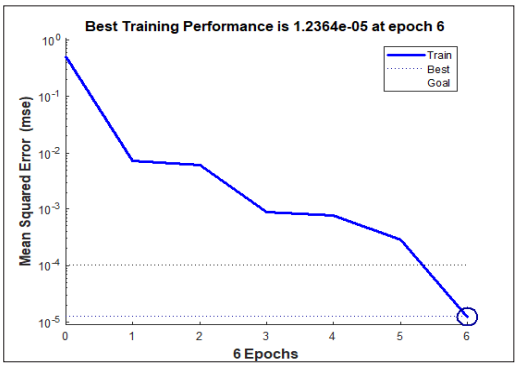
۶- اعتباربخشی شبکه عصبی با استفاده از داده‌های مستقل.



شکل ۸- ساختار شبکه عصبی مصنوعی برای فرآیند تصفیه فاضلاب

شکل (۸) ساختار شبکه عصبی را، همانطور که Matlab رسم می‌کند، نشان می‌دهد. تعداد متغیرهای ورودی به مقدار ۱۰ تنظیم می‌شود. لایه پنهان حاوی ۹ گره، به عنوان یک مقایسه بین عملکرد آموزش و توانایی تعمیم (آزمایش شده در مرحله اعتبارسنجی) می‌باشد. الگوریتم Levenberg-Marquardt (تابع انتقال Trainlm-Neural در Matlab) جهت یادگیری و روش حداقل مربعات (DLS)[۹] برای ارزیابی استفاده است. شبکه‌های عصبی در مرحله نهایی با استفاده از مجموعه‌های مستقل داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی مدل فرآیند با ورودی‌های نمایه، اعتبار داده می‌شود.

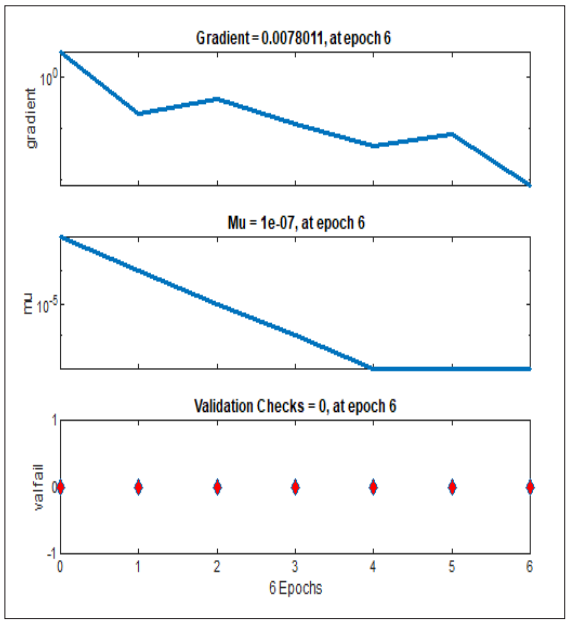
خروجی شبکه عصبی، با انتخاب گزینه Performance ظاهر می‌شود که نشان‌دهنده کیفیت اجرای روش پیشنهادی است و این امر بیانگر کیفیت خوبی برای پیش‌بینی پارامترهای خروجی می‌باشد.



شکل ۹- خروجی اول از خروجی‌دهنده شبکه عصبی با انتخاب گزینه Performance

با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود میانگین مربع خطا در روش شبکه عصبی پس از ۶ دوره به کمترین مقدار ممکن می‌رسد. در واقع، با ارزیابی خطای تقریبی می‌توان بیان نمود که تکرار ۶ دوره معمولاً کافی بوده و و می‌توان به کمترین خطای تقریبی دست یافت.

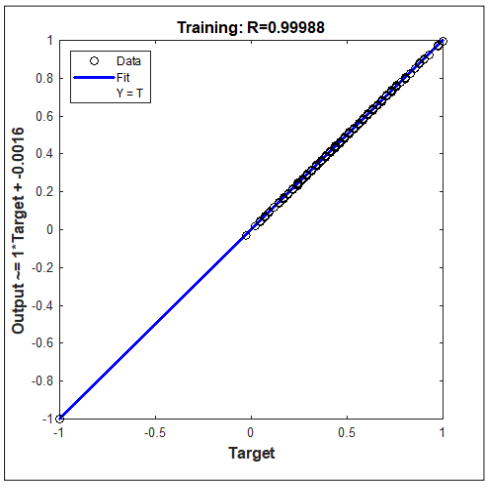
خروجی دوم از خروجی دهنده شبکه عصبی با انتخاب Training State حاصل می‌شود که نتایج خروجی برای ورودی‌ها و نتایج تغییر در روش شبکه عصبی می‌باشد.



شکل ۱۰- خروجی دوم از خروجی‌دهنده شبکه عصبی با انتخاب گزینه Training State

با توجه بـه خاصیت تصادفی‌بودن شبکه‌های عصبی مصنوعی (بـه سـبب انتخاب تصادفی وزن‌های شـبکه عصبی مقادیر اولیه)، نتایج پیش‌بینی نیز تصادفی می‌باشد و با هر بار آموزش پیش‌بینی به دلیل تغییر وزن‌ها تغییر می‌کند. از این رو با آموزش مجدد شبکه عصبی، خطای پیش‌بینی نیز تغییر کرده کـه ایـن تغییرات می‌تواند نتایج مقایسه بین مدل‌ها را تحت‌الشعاع خود قرار داده و سبب اریب در نتایج شود. با نمونه‌گیری مجدد از داده‌ها، یک فاصله اطمینان برای پیش‌بینی‌های شبکه عصبی برآورد می‌شود. Train در شکل (۱۰) هرچه کوچکتر و به مقدار مطلوب نزدیکتر شود، نشان‌دهنده عملکرد مناسب شبکه است. داده‌های اعتبارسنجی نشان‌دهنده قابلیت و توانایی پیش‌بینی و تعمیم‌دهی مناسب و مطلوب شبکه عصبی است؛ به نحوی‌که داده‌های خروجی الگوریتم به‌طور کامل با داده‌های خروجی واقعی تطابق دارند. اعتبارسنجی در مقابل داده‌های جدید باعث افزایش خطای شبکه و توقف فرآیند آموزش می‌شود.

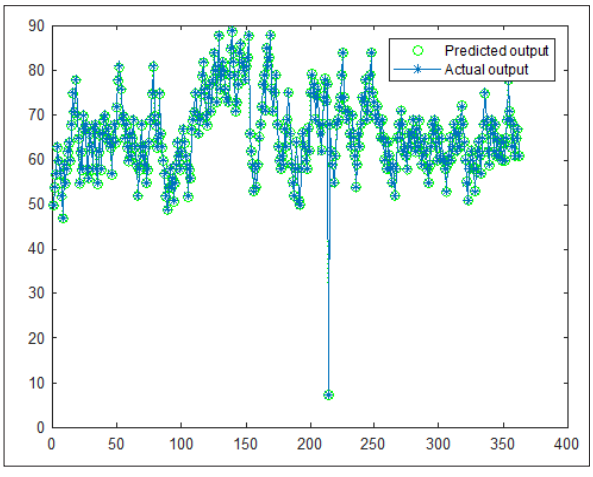
خروجی سوم از خروجی‌دهنده شبکه عصبی با انتخاب گزینه Regression به‌دست آمده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- خروجی رگرسیون در شبکه عصبی

رگرسیون میزان اثر دو یا چند متغیر بر متغیر وابسته را می‌سنجد و همبستگی رابطه بین دو یا چند متغیر را سنجش می‌کند. در تحلیل رگرسیون حاصل از شبکه عصبی همبستگی کامل بین داده‌های خروجی از الگوریتم قابل مشاهده است (Zhang و همکاران، ۲۰۱۹). در این حالت اختلاف داده‌های خروجی واقعی و به‌دست آمده از واحد تصفیه و داده‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار بررسی می‌شود. به هر میزان اختلاف بین دو خروجی (تصفیه‌خانه و نرم‌افزار) کمتر باشد، کارایی الگوریتم به‌کاررفته در پیش‌بینی خروجی بیشتر است.

شکل (۱۲) میزان آلایندگی پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. براساس این شکل می‌توان مشاهده نمود که تطابق مناسبی بین داده‌های خام ورودی به نرم‌افزار و داده‌های خروجی از آن به‌عنوان پارامتر پیش‌بینی شده وجود دارد. محور افقی تکرارهای الگوریتم ژنتیک و محور عمودی میزان آلایندگی است.



شکل ۱۲- نمودار پیش‌بینی نهایی

نتیجه‌گیری

با توجه به داده‌ها و نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر، موارد زیر قابل استنتاج است:

- الگوریتم فراابتکاری ژنتیک به دنبال جستجوی داده‌هایی از بین داده‌های ورودی است که با توجه به میزان آلایندگی تولید شده، کمترین میزان خطا را نسبت به شبکه‌های عصبی به خود اختصاص دهند.

- مقادیر تخمینی سه پارامتر BOD_5، COD، pH براساس الگوریتم ژنتیک نزدیک مقادیر واقعی آنها (مقادیر اندازه‌گیری شده) بوده، به طوریکه مقدار R نزدیک یک است..

- مقدار BOD_5 به شدت تحت شرایط درجه حرارت، نور و زمان قرار می‌گیرد لذا نتایج حاصله نشان می‌دهند که با استفاده از داده‌های ورودی که در آنها دما لحاظ نشده، می‌توان کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه پگاه آذربایجان را با درصد خطایی کمتر از ۳۰ درصد محاسبه نمود که این رقم برتری مدل استفاده شده را نشان می‌دهد.

- R بدست آمده برای BOD_5، ۰/۸۷ می‌باشد که نزدیکی به یک در این معیار نشان‌دهنده دقت بالای مدل استفاده شده می‌باشد.

- داده‌ها به یک حالت بهینه و یکنواختی در خروجی الگوریتم ژنتیک رسیده‌اند.

- شبکه عصبی قابلیت و کیفیت خوبی برای پیش‌بینی پارامترهای خروجی است.

- میانگین مربع خطا در روش شبکه عصبی پس از ۶ دوره به کمترین مقدار ممکن می‌رسد.

- با ارزیابی خطای تقریبی می‌توان بیان نمود که تکرار ۶ دوره معمولاً کافی بوده و و می‌توان به کمترین خطای تقریبی دست یافت.

-داده‌های Trainهرچه کوچکتر شود و به مقدار مطلوب نزدیکتر شوند، نشان دهنده عملکرد مناسب شبکه است.

- داده‌های اعتبارسنجی نشان دهنده قابلیت و توانایی پیش‌بینی و تعمیم‌دهی مناسب و مطلوب شبکه عصبی است.

- اعتبارسنجی در مقابل داده‌های جدید که باعث افزایش خطای شبکه می‌شوند، مقاومت نشان داده و باعث توقف فرایند آموزش می‌گردد.

- در تحلیل رگرسیون حاصل از شبکه عصبی می‌توان مشاهده نمود که همبستگی کامل مابین داده‌های خروجی از الگوریتم قابل مشاهده است.

- به هر میزان اختلاف مابین دو داده‌های خروجی (تصفیه‌خانه و نرم‌افزار) کمتر باشد، کارایی الگوریتم بکار رفته در پیش‌بینی خروجی بیشتر است.

پی‌نوشت

1- Biochemical Oxygen Demand (BOD)
2- Chemical Oxygen Demand (COD)
3- Root-Mean-Square Error
4- Root-Mean-Square Deviation
5- Grid partition
6- Subtractive Fuzzy clustering
7- Fuzzy c-means clustering
8- linear
9- Damped Least-Squares

منابع

مرادمند، م. و بیگی هرچگانی، ح. ۱۳۸۸. اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده بر توزیع سرب و نیکل در اندام فلفل سبز و خاك. مجله پژوهش آب ایران، ۵: ۶۳ – ۷۰۳.

رنگ‌زن، ن.، پاینده، خ. و لندی، ا. ۱۳۸۵. بررسی کیفیت پساب بر انباشت عناصر سنگین در دو گیاه سورگوم و شبدر .مجموعه مقالات نهمین کنگره علوم خاك ایران، تهران.

ترابیان، ع. و مطلبی، م. ۱۳۸۲. طرح مدیریتی استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده (مطالعه موردی: شهرك اکباتان). محیط‌شناسی، ۲۹(۳۲):۵۷-۶۲.

Chachuat B., Roche N. and Latfi M.A. 2005. OpTImal aera on control of industrial alterntiang activated sludge pants. Biochemical Engineering Journal, 23(3): 277-289.

Lu H., and Ma X. 2020. Hybrid decision tree-based machine learning models for short-term water quality prediction. Chemosphere, 126169.

Metcalf, E. (1819). Inc.(2003), Wastewater engineering treatment and reuse.

Zhang L., Ma X., Shi P., Bi S. and Wang C. 2019. RegCNN: A Deep Multi-output Regression Method for Wastewater Treatment. In 2019 IEEE 31st International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI) (pp. 816-823). IEEE.

Garcia M.D., Grau P., Huete H., Gomez J., Garcia-Heras L. and Ayesa E. 2009. New generic mathematical model for WWTP sludge digesters operating under aerobic and anaerobic conditions: Model building and experimental verification. Water Research, 43(18): 4626-4642.

Li Z, and Lerapetritou M. 2008. Process scheduling under uncertainly: Review and challenges. Computers and Chemical Engineering, 32(405): 715-727.