



## بررسی و مقایسه توانمندی دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک جهت پیش‌بینی کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های نیمه‌مکانیکال

فرشته رفعت متولی<sup>۱</sup>، شهناز دانش<sup>۲</sup>، حبیب رجبی مشهدی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد

(feri.rafat@gamil.com)

### خلاصه

در تحقیق حاضر، توانمندی دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، جهت پیش‌بینی کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های نیمه‌مکانیکال (مطالعه موردی، تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک پرکنندآباد مشهد با سیستم لاگون هوادهی) بررسی و مقایسه شد. پیشینه ضریب هم‌بستگی مدل شبکه عصبی با جستجوی کامل برای پارامتر BOD برابر با ۰/۸۶ و میزان درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی (rRMSPE) و درصد میانگین مطلق خطای نسبی (rMAPE) متناظرش به ترتیب برابر با ۱۴٪ و ۱۲٪ برآورد شد. در مدل شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، پیشینه ضریب هم‌بستگی برای پارامتر BOD برابر با ۰/۹۳ و rRMSPE و rMAPE متناظرش به ترتیب برابر با ۱۰٪ و ۷٪ به دست آمد. نتایج حاصل از این تحقیق، بر کاربرد مناسب هر دو مدل جهت پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه‌های نیمه‌مکانیکال دلالت داشت. اما مدل شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک به دلیل برازش بالاتر و خطای کم‌تر، مدلی کارآمدتر و مناسب‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: کیفیت پساب تصفیه‌خانه، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، لاگون هوادهی، پیش‌بینی

### ۱. مقدمه

راهبری صحیح تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یکی از مهم‌ترین عوامل مدیریتی بخش آب و فاضلاب به شمار می‌آید. در حال حاضر عملکرد بسیاری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در کشورهای مختلف، با مشکلاتی روبه‌رو می‌باشد که می‌تواند ناشی از عوامل مختلف مانند تغییرات کمی و کیفی فاضلاب ورودی، شرایط فرآیندی، نوسانات شرایط آب و هوایی در فصول مختلف سال باشد. از این‌رو استفاده از روش‌هایی که بتواند عملکرد و کارایی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را به خصوص، بر اساس نوسانات کمی و کیفی فاضلاب ورودی، شرایط فرآیندی و یا شرایط آب و هوایی پیش‌بینی کند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر اساس این پیش‌بینی‌ها، بهره‌بردار می‌تواند تدابیر لازم را قبل از بروز مشکلات اتخاذ نماید و تداعی مورد نیاز را فراهم سازد و بدین ترتیب کنترل و بهره‌برداری مناسبی را اعمال نماید. در کشور ایران به خصوص در استان خراسان رضوی به دلیل محدودیت منابع آب، به کاربرد پساب تصفیه‌خانه‌ها برای مصارف کشاورزی توجه ویژه‌ای مبذول می‌گردد. لذا اطمینان از عملکرد بهینه و مستمر تصفیه‌خانه‌ها و تأمین کیفیت مناسب پساب از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. این امر را می‌توان با پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و ارزیابی قابلیت کاربرد پساب تولیدی در دوره‌های مختلف و ارائه راه کارهایی برای بهبود کیفیت پساب ارائه کرد. هم‌چنین اتخاذ تصمیمات به موقع و اجرای آن‌ها با استفاده از

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران - محیط زیست

<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> عضو هیئت علمی گروه مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد



نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل به کار رفته، باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها و جلوگیری از اتلاف وقت می‌شود. یکی از پرکاربردترین روش‌های پیش‌بینی در زمینه آب و فاضلاب، روش شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در خارج از کشور در رابطه با مدل‌سازی تصفیه‌خانه فاضلاب با کمک شبکه‌های عصبی انجام شده است که اکثراً در رابطه با سیستم‌های مدرن و مکانیکال (لجن فعال) بوده‌اند. در زمینه تصفیه‌خانه‌های نیمه‌مکانیکال (لاگون‌های هوادهی و برکه‌های تثبیت) گزارش‌های محدودی ارائه شده است که هیچ‌یک از آن‌ها در داخل کشور انجام نشده‌اند.

Cote و همکاران در سال ۱۹۹۵، جهت افزایش دقت مدل‌های مکانیکی که برای فرآیند لجن فعال به کار می‌رفتند، از شبکه عصبی استفاده نمودند [۱]. Zhu و همکاران در سال ۱۹۹۸، در کار تحقیقاتی خود نشان دادند که با بهینه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی می‌توان به صورت لحظه‌ای خصوصیات خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب پیشرفته را، پیش‌بینی کرد [۲]. Holubar و همکاران در سال ۲۰۰۲، از شبکه عصبی بر مبنای الگوریتم پیش‌خور پس‌انتشار<sup>۱</sup> برای مدل کردن و کنترل متان تولیدی در هاضم‌های بی‌هوازی استفاده کردند. این محققین توانمندی بالای مدل شبکه عصبی را در پیش‌بینی میزان گاز تولیدی در شرایط مختلف بارگذاری، به منظور پیش‌بینی و جلوگیری از بارهای اضافی ورودی، نشان دادند [۳]. Oliveira-Esquerre و همکاران در سال ۲۰۰۴، با استفاده از شبکه عصبی به پیش‌بینی رضایت‌بخشی در مورد BOD پساب خروجی یک تصفیه‌خانه فاضلاب مربوط به صنعت کاغذ در برزیل دست یافتند. در این بررسی محققین ابتدا با استفاده از مدل‌های خطی رگرسیونی سعی در پیش‌بینی پارامتر BOD در ورودی و خروجی تصفیه‌خانه نمودند. آن‌ها کاربرد رگرسیون خطی برای مدل‌سازی سیستم تصفیه لاگون هوادهی در تصفیه‌خانه صنعتی را برای پارامترهای خروجی مناسب ندانستند. از این‌رو استفاده از مدل‌های رگرسیونی را برای لاگون‌های هوادهی توصیه نمودند. در ادامه محققین مذکور با کاربرد مدل‌های شبکه عصبی مختلف در مورد سیستم تصفیه فاضلاب مربوط به صنعت کاغذ در برزیل که از نوع لاگون هوادهی بود، به نتایج جالبی رسیدند و مدل شبکه عصبی برای سیستم لاگون هوادهی و سیستم‌های مشابه کارآمد ارزیابی کردند [۴]. Hamed و همکاران در سال ۲۰۰۴، دو مدل بر پایه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی غلظت خروجی BOD و SS از یک تصفیه‌خانه بزرگ فاضلاب (با سیستم لجن فعال) در قاهره را توسعه دادند. تحقیق فوق شبکه عصبی مصنوعی را یک ابزار ارزشمند برای پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب معرفی نمود [۵]. Mjalli و همکاران در سال ۲۰۰۷، با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی مقادیر پارامترهای BOD، COD و TSS پساب تصفیه‌خانه دوحه را پیش‌بینی نمودند و دریافته‌اند که مدل شبکه عصبی مصنوعی از دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی و تخمین پارامترهای بهره‌بردار تصفیه‌خانه‌های پیشرفته فاضلاب برخوردار است [۶]. Shi و Qiao در سال ۲۰۱۰، غلظت اکسیژن محلول و میکروارگانیسم‌های هتروتروفیک در فرآیند تصفیه فاضلاب را به وسیله مدل شبکه عصبی، کنترل و بهینه کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بر عملکرد مناسب مدل شبکه عصبی جهت کنترل و بهینه‌سازی غلظت پارامترهای مذکور دلالت داشت [۷]. Pendashteh و همکاران در سال ۲۰۱۱، به وسیله شبکه عصبی یک رآکتور غشایی<sup>۲</sup> را که برای تصفیه فاضلابی روغنی به کار می‌رفت، مدل کردند. مدل نتایج مطلوبی را ارائه کرد [۸].

به طور کلی شبکه‌های عصبی به دلیل ویژگی‌ها و مزایای خاصی از جمله یادگیری تطبیقی، خودسازمان‌دهی، پردازش موازی، تحمل خطا و از همه مهم‌تر تعمیم‌پذیری بالا در شبیه‌سازی و مدل کردن مسائل پیچیده کاربری چشم‌گیری دارند. صنعت آب و فاضلاب نیز از این روند مستثنی نبوده و از این ابزار محاسباتی در موارد و شرایط مختلف، استفاده کرده است [۷،۶]. این روش مدل‌سازی مانند سایر مدل‌ها دارای نقاط ضعفی می‌باشد، بدین منظور برای بالا بردن دقت مدل مذکور از روش‌های مختلف بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در زمینه تصفیه آب و فاضلاب با توجه به مقالات و تحقیقات موجود، پرکاربردترین روش بهینه‌سازی که با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی تلفیق می‌شود، الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

Cao و همکاران در سال ۲۰۰۸، شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی تأثیر تغییرات پارامترهای یک سیستم بی‌هوازی در عملکرد آن به کار بردند و برای بهینه‌سازی وزن‌های شبکه عصبی مصنوعی، از الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی موازی<sup>۳</sup> استفاده نمودند. نتایج کار این محققین نشان داد که تلفیق روش‌های مذکور می‌تواند ابزار مناسبی را برای پیش‌بینی تغییرات عملکرد یک سیستم بی‌هوازی ارائه نماید. این محققین هم‌چنین نتیجه گرفتند که با توجه به سازگاری‌های این ابزار با شرایط مختلف محیطی، می‌توان آن‌ها را برای سایر سیستم‌های تصفیه نیز توسعه داد [۹]. Abu Qdais و همکاران در سال ۲۰۱۰، از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تولید بیوگاز در هاضم کارخانه بیوگاز Russaifah در اردن استفاده کردند. نتیجه کار محققین مذکور، کارایی مدل را در پیش‌بینی میزان متان تولیدی نشان داد [۱۰]. Fang و همکاران در سال ۲۰۱۰، یک مدل دینامیکی جامع (شامل مدل مکانیکی، مدل شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک) را برای شبیه‌سازی عملکرد یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری که دارای نوسانات قابل توجهی در جریان ورودی بود، توسعه دادند و وزن‌های شبکه عصبی را به‌وسیله الگوریتم ژنتیک بهینه نمودند. نتایج

<sup>۱</sup> - Feed Forward Back Propagation Algorithm

<sup>۲</sup> - Membrane Sequencing Batch Reactor (MSBR)

<sup>۳</sup> - Multi Population Parallel Genetic Algorithm



تحقیق این محققین حاکی از آن بود که مدل جامع به کار گرفته شده، ابزاری مفید و مؤثر برای شبیه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است [۱۱].  
Gueguim Kana و همکاران در سال ۲۰۱۲، به وسیله شبکه عصبی به همراه الگوریتم ژنتیک، بیوگاز تولیدی از فاضلاب را مدل‌سازی و بهینه کردند.  
نتایج این تحقیق نشان دهنده اثر بخشی مدل شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک رفتار غیرخطی سیستم و بهینه‌سازی میزان بیوگاز تولیدی بوده است [۱۲].  
Piuleac و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک روش بهینه‌سازی بر پایه شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک توسعه دادند و بدین وسیله یک فرآیند واقعی الکترو-انعقادی را بهینه نمودند. اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی با استفاده از داده‌های تجربی، خطایی کم‌تر از ۱۱ درصد را نشان داد [۱۳].  
با توجه به مشکلات موجود در کیفیت پساب خروجی بسیاری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و هم‌چنین نیمه‌مکانیکال بودن برخی از آن‌ها، کاربرد مدل‌های پیشرفته‌ای مانند شبکه‌های عصبی جهت پیش‌بینی عملکرد چنین تصفیه‌خانه‌ای ضروری به نظر می‌رسد. به همین جهت در این تحقیق امکان کاربری شبکه عصبی و شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های تصفیه نیمه‌مکانیکال، به صورت مطالعه موردی در ارتباط با تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک پرکنندآباد مشهد در یک دوره ۴ ساله (از فروردین ۱۳۸۶ تا اسفند ۱۳۸۹) بررسی و دو مدل مذکور با یکدیگر مقایسه شدند.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. تصفیه‌خانه مورد مطالعه

یکی از مهم‌ترین تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری مشهد، تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک پرکنندآباد می‌باشد که در حاشیه جنوبی رودخانه فصلی کشف‌رود و در ده کیلومتری شمال غرب مشهد قرار گرفته است. ظرفیت اسمی این تصفیه‌خانه ۱۵۲۰۰ مترمکعب در روز و جمعیت تحت پوشش آن معادل صد هزار نفر می‌باشد. فرآیند تصفیه مورد استفاده در این تصفیه‌خانه از نوع لاگون هوادهی با اختلاط کامل می‌باشد به گونه‌ای که فاضلاب خام با عبور از واحد آشغالگیر، لاگون‌های هوادهی، حوضچه‌های ته‌نشینی، برکه جلادهی و واحد گندزدایی تصفیه می‌شود.

### ۲.۲. داده‌ها و اطلاعات استفاده شده

جهت مدل‌سازی سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب و دقت‌سنجی مدل، هم‌چنین تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک پرکنندآباد از آمار و اطلاعاتی استفاده شد که عبارتند از: الف: پارامترهای فاضلاب ورودی شامل: جریان روزانه ورودی، بار روزانه COD، BOD، TSS و ورودی، pH روزانه فاضلاب ورودی و دمای روزانه فاضلاب ورودی، ب: پارامترهای فرآیندی شامل: غلظت روزانه اکسیژن محلول در لاگون هوادهی، pH روزانه در لاگون هوادهی، تعداد هواده‌های فعال در لاگون هوادهی به صورت روزانه و درجه حرارت روزانه فاضلاب موجود در لاگون هوادهی، ج: پارامترهای پساب خروجی شامل: غلظت BOD و TSS در پساب خروجی و میزان pH روزانه پساب خروجی و د: داده‌های هواشناسی شامل: درجه حرارت متوسط روزانه هوا، تعداد ساعات آفتابی به صورت روزانه و میزان بارندگی روزانه. داده‌های مربوط به فاضلاب ورودی، پساب خروجی و شرایط فرآیندی در یک دوره ۴ ساله (از فروردین ۱۳۸۶ تا اسفند ۱۳۸۹) از شرکت آب و فاضلاب مشهد دریافت و بررسی‌های لازم انجام پذیرفت. داده‌های هواشناسی مورد نیاز نیز از سازمان هواشناسی مشهد اخذ گردید.

### ۳.۲. مدل شبکه عصبی با جستجوی کامل

پیچیده‌ترین شبکه عصبی که پارامترهای زیادی را شامل می‌گردد و از طرفی مطابق با نیازهای این تحقیق نیز می‌باشد، شبکه MLP<sup>۱</sup> است. طبق قضیه کولموگوروف<sup>۲</sup> ثابت می‌شود حداکثر تعداد لایه‌های یک شبکه عصبی برای حل مسائل غیرخطی، سه لایه می‌باشد [۱۴]. با توجه به این که لایه خروجی همواره در شبکه عصبی MLP وجود دارد، بنابراین حداکثر با دو لایه پنهان می‌توان مسائل غیرخطی را حل نمود. در این مدل علاوه بر شبیه‌سازی تصفیه‌خانه فاضلاب و ارزیابی مدل شبکه عصبی جهت پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه، ساختار شبکه عصبی به وسیله روش جستجوی کامل، بهینه‌سازی شد. جستجو کامل بدین معناست که تمام شرایط مختلف ساختار شبکه عصبی لحاظ شده است. در این مدل هم شبکه عصبی با یک لایه پنهان و هم شبکه عصبی با دو لایه پنهان مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین تعداد نرون‌ها در لایه‌های مختلف نیز در بازه [۱،۳۰] بررسی شد. البته در این شرایط تمام عوامل تأثیرگذار بر عملکرد تصفیه‌خانه، بدون هیچ وزن‌دهی به عنوان ورودی شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت. شبکه عصبی از جمله روش‌های آماری<sup>۳</sup> محسوب می‌شود که در هر بار آموزش، ممکن است نتایج متفاوتی را منتج گردد. بنابراین برای بررسی عملکرد واقعی شبکه عصبی،

<sup>۱</sup> - Multi Layer Perceptron

<sup>۲</sup> -Kolmogorov

<sup>۳</sup> -Stochastic



باید شبکه به صورت مجزا چند بار آموزش داده شده و بعد از هر بار آموزش، ارزیابی شود. تابع فعالیت در همه لایه‌ها به جز لایه خروجی تابع تانزانت هیپربولیک<sup>۱</sup> بود. تابع فعالیت در لایه خروجی خطی انتخاب شد تا بتواند خروجی‌های مد نظر این تحقیق را که ممکن است اعدادی خارج از بازه [۱،-۱] نیز باشد، تولید کند. داده‌های گرفته شده از تصفیه‌خانه فاضلاب و اداره هواشناسی جهت آموزش و آزمایش شبکه به کار گرفته شدند. جهت آموزش شبکه عصبی، قسمتی از این داده‌ها و اطلاعات اخذ شده را برای آموزش شبکه (نمونه‌های آزمایش) و باقی‌مانده را برای آزمایش شبکه (نمونه‌های آموزش) استفاده شدند (بهترین حالت به ترتیب ۸۰٪ و ۲۰٪ بود). نمونه‌های آموزش خود به دو دسته نمونه‌های آموزشی واقعی و نمونه‌های اعتبارسنجی<sup>۲</sup> تقسیم شدند. نمونه‌های آموزشی واقعی و اعتبارسنجی به ترتیب ۸۰٪ و ۲۰٪ از تعداد نمونه‌های آموزش بودند.

#### ۴.۲. مدل شبکه عصبی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک

در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی مدل شبکه عصبی، ویژگی‌های ورودی (عوامل مؤثر بر عملکرد تصفیه‌خانه) به شبکه عصبی به صورت مناسب با وزن‌های بهینه، وزن‌دهی شدند. بدین ترتیب که برای هر ویژگی یک وزن در بازه [۰،۱] به وسیله یک بردار وزن که ابعاد آن به اندازه ابعاد ویژگی‌های ورودی بود، تعریف گردید. قبل از ورود ویژگی‌ها به شبکه عصبی، برای هر ویژگی وزن متناظر آن اعمال شده و سپس ویژگی وزن‌دار به شبکه عصبی داده شد. به طور اجمال اگر وزن ویژگی صفر باشد، عملاً این ویژگی در سیستم بی‌تأثیر خواهد بود. اما اگر وزن ویژگی به سمت ۱ میل کند، ویژگی با تأثیر بیشتری در شبکه عصبی مورد توجه قرار خواهد گرفت. بررسی ساختار بهینه شبکه عصبی، با فرض این که در هر لایه  $n$  نرون قرار داشته باشد، شامل بررسی ساختار شبکه در  $n^2+n$  حالت مختلف خواهد شد. چرا که  $n$  حالت (نرون) در لایه اول و  $n$  نرون هم در لایه دوم می‌تواند قرار بگیرد، اما یک حالت دیگر برای لایه دوم نیز وجود دارد که همان حذف لایه می‌باشد. بنابراین در مجموع برای لایه دوم  $n+1$  حالت وجود دارد. به همین جهت از نظر محاسباتی، بررسی بهترین ساختار شبکه عصبی کار پیچیده‌ای نمی‌باشد. اما در این تحقیق علاوه بر بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی، مدل به دنبال بهینه‌سازی وزن‌های هر ویژگی نیز بود. اگر فرض شود  $m$  ویژگی مختلف وجود داشته باشد، با توجه به این که وزن هر ویژگی یک عدد پیوسته حقیقی در بازه [۰،۱] است، مسأله به صورت یک مسأله بهینه‌سازی در فضای پیوسته با ابعاد  $m$  تبدیل خواهد شد. بنابراین تعیین وزن‌های مناسب برای هر ویژگی، مسأله بسیار پیچیده بهینه‌سازی خواهد گردید. یکی از بهترین روش‌ها برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک می‌باشد. الگوریتم‌های تکاملی می‌توانند جواب‌های نزدیک به بهینه (نه لزوماً بهینه مطلق) را در مدت زمان معینی به دست آورند.

#### ۵.۲. شاخص‌های آماری مورد استفاده در تحلیل نتایج [۱۵]

##### ۱.۵.۲. ضریب هم‌بستگی<sup>۳</sup>

در مدل‌سازی‌ها این شاخص جهت ارزیابی مدل استفاده می‌شود.

$$R = \frac{\sum (y_{i,observed} - \mu_{y,observed})(y_{i,simulated} - \mu_{i,simulated})}{n (\sigma_{y,observed})(\sigma_{y,simulated})} \quad (1)$$

اندیس observed به معنی داده‌های واقعی و اندیس simulated به معنی داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل می‌باشد.  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب نشانگر میانگین و انحراف از معیار می‌باشد. هر چه شاخص ضریب هم‌بستگی (R) به ۱ نزدیک‌تر باشد، هم‌بستگی داده‌های واقعی و نتایج حاصل از مدل بیشتر می‌باشد و در نتیجه مدل کارایی بالاتری را دارد.

##### ۲.۵.۲. درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی<sup>۴</sup>

$$rRMSPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_{i,observed} - y_{i,simulated}}{y_{i,observed}} \right)^2}{n}} \times 100 \quad (2)$$

<sup>1</sup> - Tan-Sigmoid

<sup>2</sup> - Validation

<sup>3</sup> - Correlation Coefficient

<sup>4</sup> -Root Mean Square Relative Percentage Error



در این شاخص، میزان خطا در هر مرحله به طور نسبی با مقدار واقعی پارامتر مورد نظر محاسبه می‌گردد. اگر بازه تغییرات نمونه مورد مطالعه زیاد باشد، به دلیل نسبی بودن میزان خطا، مقایسه معناداری می‌توان انجام داد. در کارهای آزمایشگاهی، اگر شاخص فوق کم‌تر از ۲۰٪ باشد، خطا مناسب و اگر کم‌تر از ۱۰٪ باشد، خطا بسیار کم بوده است.

### ۳.۵.۲. درصد میانگین مطلق خطای نسبی<sup>۱</sup>

$$rMAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_{i,observed} - Y_{i,simulated}}{Y_{i,observed}} \right|}{n} \times 100 \quad (3)$$

در این شاخص نیز با به دست آوردن قدر مطلق نسبی خطا، ضمن حفظ اندازه مطلق خطا، با نسبی کردن آن، شاخصی بی‌بعد جهت اندازه‌گیری خطا حاصل می‌شود. این شاخص نیز جهت مقایسه کردن، مناسب می‌باشد. معمولاً در کارهای آزمایشگاهی مقدار این شاخص تا ۲۰٪ نیز قابل قبول شمرده می‌شود و اگر پایین‌تر از ۱۰٪ باشد، بسیار مناسب قلمداد می‌گردد.

### ۶.۲. روش

در ابتدا به کمک داده‌های یک دوره چهار ساله (۱۳۸۹-۱۳۸۶) از پارامتر BOD پساب خروجی عملکرد تصفیه‌خانه مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با استفاده از داده‌های کمی و کیفیت فاضلاب ورودی، کیفیت پساب خروجی، شرایط فرآیندی و اطلاعات هواشناسی، عوامل مؤثر بر عملکرد تصفیه‌خانه تعیین شد. پس از تعیین عوامل مؤثر (ویژگی‌های مؤثر)، با استفاده از این ویژگی‌ها و مدل شبکه عصبی به پیش‌بینی غلظت پارامتر BOD در پساب خروجی پرداخته شد. برای هر حالت از جستجوی کامل (یعنی تعداد نرون‌های مشخص در لایه اول و دوم)، شبکه عصبی ده بار اجرا شد و بررسی ارزیابی کاربرد مدل شبکه عصبی بر اساس معیارهای آماری ضریب هم‌بستگی (R)، درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی (rRMSPE) و درصد میانگین مطلق خطای نسبی (rMAPE) انجام پذیرفت. جهت دستیابی به دقت بالاتر در مدل‌سازی تصفیه‌خانه، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه عصبی استفاده شد. در این مرحله، ویژگی‌های ورودی به شبکه عصبی به صورت مناسب با وزن‌های بهینه، وزن‌دهی شدند و بدین ترتیب ساختار شبکه عصبی (تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌های هر لایه) و وزن‌های مربوط به  $W$  ویژگی مختلف به صورت توأم و هم‌زمان بهینه گردیدند. در نهایت میزان غلظت پارامتر BOD در پساب خروجی، پیش‌بینی و به وسیله معیارهای آماری ضریب هم‌بستگی (R)، درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی (rRMSPE) و درصد میانگین مطلق خطای نسبی (rMAPE) با میزان واقعی آن‌ها سنجیده شدند و بدین وسیله کارایی مدل مذکور ارزیابی گشت.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. تعیین عوامل مؤثر (ویژگی‌ها) بر غلظت BOD پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک پرکندآباد مشهد

در تصفیه‌خانه‌های نیمه‌مکانیکال (لاگون هوادهی) عوامل مختلفی بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. به طور کلی این عوامل را می‌توان در سه گروه: الف) پارامترهای کمی و کیفی فاضلاب ورودی، ب) پارامترهای فرآیندی و ج) پارامترهای آب و هوایی تقسیم‌بندی نمود. از بین داده‌های موجود، پارامترهایی که در حساسیت مدل نقش دارند مورد بررسی قرار گرفتند و به دلیل حجم بالای مطالب و محدودیت در ارائه آن‌ها، تنها به اعلام نتیجه آن بسنده می‌کنیم. بر اساس نتایج به دست آمده، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد تصفیه‌خانه شماره یک پرکندآباد عبارت بودند از: الف) از گروه پارامترهای فاضلاب ورودی: دبی جریان ورودی، نسبت  $BOD_{in}/COD_{in}$ ، درجه حرارت و میزان بار مواد آلی، ب) از گروه عوامل فرآیندی: میزان اکسیژن محلول، درجه حرارت و pH در محتوای لاگون و تعداد هواده‌های فعال و ج) از گروه عوامل آب و هوایی: درجه حرارت هوا و تعداد ساعات آفتابی بودند. هم‌چنین بر اساس بررسی‌های انجام شده، از عوامل بسیار مؤثر بر کیفیت پساب خروجی، عمق لجن و تراکم جلبک‌ها در لاگون-های هوادهی و ته‌نشینی بودند. اما به دلیل نبود داده‌های کافی، در اجرای مدل‌ها لحاظ نشدند.

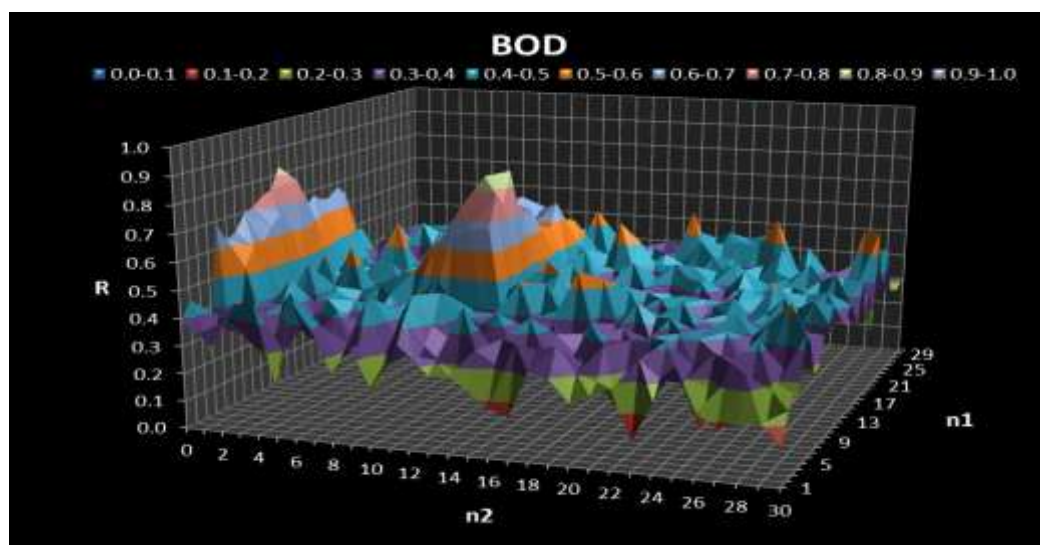
#### ۲.۳. نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی مصنوعی با جستجوی کامل

در شکل (۱) نتیجه بررسی‌های مدل شبکه عصبی با جستجوی کامل در یک شکل سه بعدی شامل یک رویه، نمایش داده شده است. دو بعد این شکل به تعداد نرون‌های لایه اول و دوم و بعد سوم (ارتفاع) به معیار ضریب هم‌بستگی (R) نسبت داده شد. لازم به ذکر است که برای تعداد نرون-

<sup>1</sup>-Mean Absolute Relative Percentage Error

های لایه دوم در شکل، مقدار صفر نیز لحاظ شده است. مقدار صفر به عنوان تعداد نرون های لایه دوم، نشان دهنده حذف لایه پنهان دوم می‌باشد. برای هر حالت از جستجوی کامل (یعنی تعداد نرون های مشخص در لایه اول و دوم)، شبکه عصبی ۱۰ مرتبه اجرا شد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه ضریب هم‌بستگی (R) با در نظر گرفتن وزن یکسان برای تمامی عوامل مؤثر بر غلظت BOD در پساب خروجی به عنوان ورودی شبکه، برابر با ۰/۸۶ در حالتی به دست آمد که شبکه دارای ساختاری شامل دوازده نرون در لایه اول و سیزده نرون در لایه دوم بود. با توجه به شکل مذکور، بهترین مقادیر ضریب هم‌بستگی (۰/۷۷ ≤ R ≤ ۰/۸۶) در ساختارهایی مطابق با رابطه (۴) نتیجه شدند. n<sub>1</sub> و n<sub>2</sub> در رابطه (۴)، تعداد نرون در لایه های اول و دوم می‌باشد.

$$\begin{aligned} 8 \leq n_1 \leq 14, n_2 = 0 &\rightarrow 0.7 \leq R \leq 0.83 \\ n_1 = 12, n_2 = 1 &\rightarrow R = 0.78 \\ 10 \leq n_1 \leq 13, 11 \leq n_2 \leq 13 &\rightarrow 0.70 \leq R \leq 0.86 \end{aligned} \quad (4)$$



شکل (۱): شکل سه بعدی نتایج مدل شبکه عصبی با جستجوی کامل مربوط به پارامتر BOD

با توجه به شکل (۱) و رابطه (۴) که بازه‌های مناسب از تعداد نرون‌ها را در ساختار شبکه مشخص می‌کند، عملاً بررسی تعداد نرون‌های بیشتر از ۱۵ عدد در هر لایه، غیرضروری به نظر می‌رسد. با این که رویه ناهمواری‌های زیادی را نشان می‌دهد اما ناحیه‌ای که رویه اصطلاحاً تپه مانند است، مطلوب می‌باشد مخصوصاً که مقدار بیشینه ضریب هم‌بستگی نیز در همین ناحیه واقع شده است. از طرفی در حالتی که شبکه بیشینه ضریب هم‌بستگی (R=۰/۸۶) را داشت، میزان درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی (rRMSPE) و درصد میانگین مطلق خطای نسبی (rMAPE) مدل به ترتیب برابر با ۱۴٪ و ۱۲٪ بودند. با توجه به نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی با جستجوی کامل برای پارامتر BOD و نیمه‌مکانیکال بودن تصفیه‌خانه مورد مطالعه، می‌توان گفت مدل شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی پارامترهای کیفی پساب مناسب می‌باشد [۱،۴،۵،۶،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱،۲۲].

### ۳.۳. نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی مصنوعی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک

در مدل شبکه عصبی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک به مدت ۵۰۰ نسل به دنبال جواب بهینه گشت و در هر نسل ۲۰۰ جواب ممکن در فضای جستجو را ارزیابی کرد. برای پارامتر BOD، ویژگی‌های وزن‌دار به شبکه عصبی داده شد و غلظت خروجی توسط مدل پیش‌بینی گردید و با مقدار واقعی آن سنجیده شد. در ادامه جهت اختصار مطلب، نتایج حاصل از ۱۵ بار اجرای مدل، برای پارامتر BOD در پساب خروجی مختصراً آورده شده است.

بیشینه و کمینه مقدار ضریب هم‌بستگی (R) نتایج حاصل از مدل به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۸۶ و ۱/۰۸ به دست آمد. میانگین ضریب هم‌بستگی (R) ۰/۸۹ محاسبه شد که با توجه به نیمه‌مدرن بودن تصفیه‌خانه عدد مناسبی بوده است. بررسی تعداد نرون‌های انتخاب شده در لایه‌های پنهان اول و دوم نشان داد که در ۱۳٪ مواقع، شبکه دارای دو لایه پنهان با متوسط تعداد نرون در لایه اول ۱۶ و در لایه دوم ۱۱ بود. در ۸۷٪ باقیمانده، شبکه تنها دارای یک لایه پنهان بود که متوسط تعداد نرون معادل ۱۴ را داشت. به طور میانگین بهترین ساختار شبکه دارای دو لایه پنهان با متوسط تعداد نرون در لایه اول



معادل ۱۵ و در لایه دوم ۲ بود. هم‌چنین شبکه در بیشینه مقدار ضریب هم‌بستگی (R) فقط یک لایه پنهان با ۱۱ نرون را دارا بود. در جدول (۱) اولویت ویژگی‌ها در پیش‌بینی پارامتر BOD، خلاصه شده است.

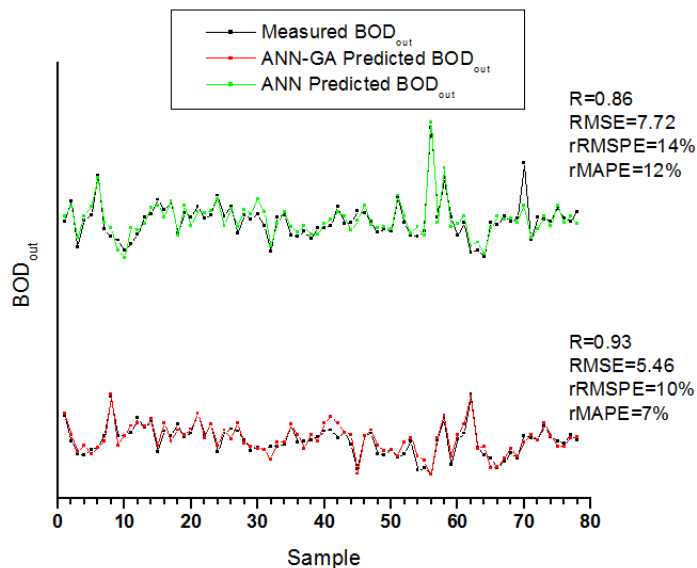
جدول (۱): اولویت‌بندی ویژگی‌های مؤثر بر پیش‌بینی غلظت پارامتر BOD در پساب خروجی تصفیه‌خانه

اولویت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	-	-	-
ویژگی	TBOD <sub>in</sub> /TCOD <sub>in</sub>	DO	T <sub>L</sub>	L. TBOD <sub>in</sub>	T <sub>in</sub>	Q <sub>in</sub>	T <sub>air</sub>	Aerator	L. TSS <sub>in</sub>	Sunny hr	pH <sub>L</sub>
میانگین	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۷۳	۰/۶۶	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۹
انحراف معیار	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در رابطه با عوامل مؤثر بر غلظت BOD پساب خروجی تصفیه‌خانه در شرایط واقعی، اولویت‌بندی مدل که در جدول (۱) آمده است، به نتایج موجود و در شرایط واقعی بسیار نزدیک می‌باشد. به دلیل تصفیه بیولوژیکی، پارامترهای تأثیرگذار بر رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها مانند نسبت BOD<sub>in</sub>/COD<sub>in</sub> ورودی، میزان اکسیژن محلول و درجه حرارت لاگون هوادهی و بار BOD ورودی نیز در پیش‌بینی‌های مدل در اولویت قرار گرفتند. همان‌طور که در طراحی تصفیه‌خانه‌های بیولوژیکی ابتدا نسبت BOD<sub>in</sub>/COD<sub>in</sub> ورودی بررسی می‌شود، مدل نیز اولین الویت را به نسبت فوق اختصاص داد. سایر ویژگی‌ها هم با وزن‌های نزدیک به هم اولویت‌بندی شدند که تقریباً دارای اثر مشابهی بر پیش‌بینی پارامتر BOD بودند. مدل ANN-GA با بیشینه ضریب هم‌بستگی ۰/۹۳ و میزان خطای rMAPE و rRMSPE به ترتیب برابر با ۱۰٪ و ۷٪ در پیش‌بینی غلظت پارامتر BOD مدلی کارآمد بوده و نتایج دقیقی را ارائه داده است [۱،۴،۵،۶،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱،۲۲]. بنابراین می‌توان از آن در مدل‌سازی تصفیه‌خانه‌های نیمه‌مکانیکال به خصوص تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک پرکن‌آباد استفاده کرد.

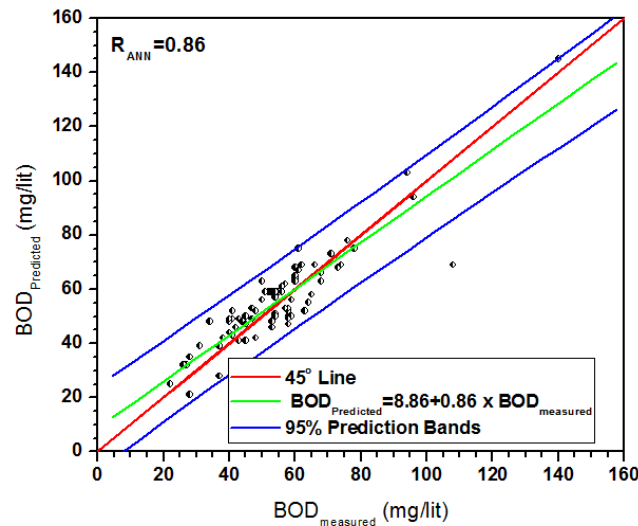
#### ۴.۳. بررسی و مقایسه نتایج مدل‌های شبکه عصبی با جستجوی کامل و شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک

در شکل (۲)، نتایج پیش‌بینی شده غلظت پارامتر BOD توسط هر یک از مدل‌های شبکه عصبی با جستجوی کامل (ANN) و شبکه عصبی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک (ANN-GA) به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر با آن‌ها و هم‌چنین معیار ضریب هم‌بستگی (R) و خطاهای مربوط به هر مدل نیز نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل مذکور، هر دو مدل ANN و ANN-GA جهت پیش‌بینی غلظت پارامتر BOD مناسب بودند [۱،۴،۵،۶،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱،۲۲]. مدل ANN-GA با افزایش ضریب هم‌بستگی از ۰/۸۶ به ۰/۹۳ سبب تغییر رده مدل از خوب به بسیار خوب شد. از طرفی میزان خطای rMAPE و rRMSPE در مدل ANN به ترتیب برابر با ۱۴٪ و ۱۲٪ بود که به ۱۰٪ و ۷٪ در مدل ANN-GA کاهش یافت. بنابراین در رابطه با پیش‌بینی غلظت پارامتر BOD مدل ANN-GA کارآمدتر بوده و نتایج دقیق‌تری را ارائه داده است.

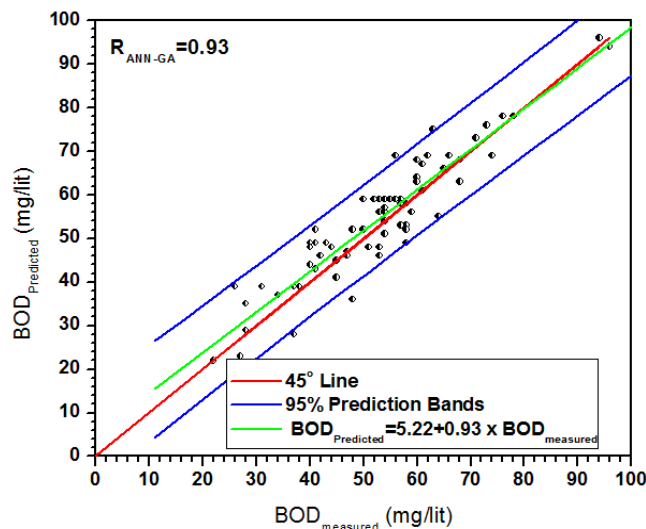


شکل (۲): بررسی هم‌زمان دو مدل شبکه عصبی با جستجوی کامل و شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، در پیش‌بینی پارامتر BOD

در شکل‌های (۳) و (۴)، داده‌های پیش‌بینی شده در مقابل داده‌های واقعی برای پارامتر BOD، به ترتیب در مدل ANN-GA و ANN ترسیم شده است. در شرایط ایده‌آل، انتظار می‌رود که پیش‌بینی کاملاً با اندازه‌گیری مطابقت داشته باشد. در این صورت، چنانچه داده‌های به‌دست آمده از مدل برحسب مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها رسم شوند، نقاط حاصل باید بر خط ۴۵ درجه (نیمساز) منطبق باشند. میزان انحراف از این خط، تفاوت بین دو دسته داده را مشخص می‌کند. هم‌چنین در این شکل‌ها، بهترین خط گذرنده از این داده‌ها به همراه فرمول آن نیز ارائه گردیده است. خطوط آبی-رنگ اطراف پرازش در شکل مذکور، بازه متناظر با سطح اطمینان ۹۵٪ را مشخص می‌کنند. پراکندگی کم داده‌های پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده و هم-چنین کوچک بودن بازه سطح اطمینان ۹۵٪ در شکل‌های مذکور، نشان دهنده دقت هر دو مدل و کارآمدی آن‌ها بود.



شکل (۳): بررسی پراکندگی داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی با جستجوی کامل (ANN) و نتایج اندازه‌گیری شده، به همراه بهترین خط گذرنده از آن‌ها برای پیش‌بینی پارامتر BOD و بازه متناظر با سطح اطمینان ۹۵٪



شکل (۴): بررسی پراکندگی داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک (ANN-GA) و نتایج اندازه‌گیری شده، به همراه بهترین خط گذرنده از آن‌ها برای پیش‌بینی پارامتر BOD و بازه متناظر با سطح اطمینان ۹۵٪

در جدول (۲) خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از مدل ANN و ANN-GA برای پیش‌بینی غلظت پارامتر BOD پساب خروجی ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور و کلیه توضیحات ارائه شده، مناسب بودن هر دو مدل جهت پیش‌بینی پارامتر BOD پساب روشن می‌باشد. اما به دلیل میزان پرازش بالاتر و خطای کم‌تر، مدل ANN-GA از امتیاز بالاتری جهت پیش‌بینی غلظت پارامتر BOD پساب خروجی برخوردار است.





جدول (۲): خلاصه‌ای از مشخصات و نتایج حاصل از دو مدل شبکه عصبی با جستجوی کامل (ANN) و مدل شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک (ANN-GA) برای پیش‌بینی غلظت پارامتر BOD پساب خروجی

مدل	ANN	ANN-GA
تعداد نورون در لایه اول ( $n_1$ )	۱۲	۳
تعداد نورون در لایه دوم ( $n_2$ )	۱۳	۰
$R_{max}$	۰/۸۶	۰/۸۰
MSE	۵۹/۶۴	۱۰۲/۴۱
RMSE	۷/۷۲	۱۰/۱۲
rRMSPE	٪۱۴	٪۱۸
rMAPE	٪۱۲	٪۱۵

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی بر اساس بررسی‌های انجام شده در تحقیق حاضر، نتایجی به دست آمد که اهم آن‌ها در ذیل آمده است:

۱. در تصفیه‌خانه‌های نیمه‌مکانیکال (لاگون هوادهی) عوامل مختلفی بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. به طور کلی این عوامل را می‌توان در سه گروه: الف) پارامترهای کمی و کیفی فاضلاب ورودی، ب) پارامترهای فرآیندی و ج) پارامترهای آب و هوایی تقسیم‌بندی نمود.
۲. بر اساس نتایج به دست آمده، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد تصفیه‌خانه عبارت بودند از: الف) از گروه پارامترهای فاضلاب ورودی: دبی جریان ورودی، نسبت  $TBOD_{in}/TCOD_{in}$  ورودی، درجه حرارت و میزان بار مواد آلی، ب) از گروه عوامل فرآیندی: میزان اکسیژن محلول، درجه حرارت و pH در محتوای لاگون و تعداد هوادهای فعال و ج) از گروه عوامل آب‌وهوایی: درجه حرارت هوا و ساعات آفتابی بودند.
۳. بیشینه ضریب هم‌بستگی مدل شبکه عصبی با جستجوی کامل برای پارامتر BOD برابر با ۰/۸۶ و میزان درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی (rRMSPE) و درصد میانگین مطلق خطای نسبی (rMAPE) متناظرش به ترتیب برابر با ٪۱۴ و ٪۱۲ برآورد شد. در مدل شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، بیشینه ضریب هم‌بستگی برای پارامتر BOD برابر با ۰/۹۳ و rRMSPE و rMAPE متناظرش به ترتیب برابر با ٪۱۰ و ٪۷ به دست آمد. نتایج حاصل از این تحقیق، بر کاربرد مناسب هر دو مدل جهت پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه‌های نیمه‌مکانیکال دلالت داشت. اما مدل شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک به دلیل برآزش بالاتر و خطای کم‌تر، مدلی کارآمدتر و مناسب‌تر می‌باشد.

#### ۵. مراجع

1. Cote, M., Grandjean, B., Lessard, P., and Thibault, J., (1995), "Dynamic modelling Of The Activated Sludge Process: Improving Prediction Using Neural Networks", Journal: Water Research, Volume: 29, Issue: 4, Pages: 995-1004.
2. Zhu J., Zurcher J., and Rao M., (1998), "An On-Line Wastewater Quality Predication System Based On A Time-Delay Neural Network", Journal: Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume: 11, Pages: 747-758.
3. Holubar, P., Zani, L., Hager, M., Froschl, W., Radak, Z., and Braun, R., (2002), "Advanced Controlling of Anaerobic Digestion by Means of Hierarchical Neural Networks", Journal: Water Research, Volume: 36, Pages: 2582-2588.
4. Oliveira-Esquerre, K.P., Seborg, D.E., Bruns, R.E., and Mori, M., (2004), "Application Of Steady-State And Dynamic Modeling For The Prediction Of The BOD Of An Aerated Lagoon At A Pulp And Paper Mill: Part I. Linear Approaches", Journal: Chemical Engineering Journal, Volume: 104, Issue: 1, Pages: 73-81.
5. Hamed, M., Khalafallah, M.G., and Hassanein, E.A., 2004, "Prediction Of Wastewater Treatment Plant Performance Using Artificial Neural Network", Journal: Environmental Modeling and Software, Volume: 19, Pages: 919-928.
6. Mjalli\_F. S., Al-Asheh S., and Alfadala H.E., (2007), "Use Of Artificial Neural Network Black-Box Modeling for The Prediction of Wastewater Treatment Plants Performance", Journal: Environmental Management, Volume: 83, Pages: 329-338.



7. Shi, X., and Qiao, J., (2010), "Neural Network Predictive Optimal Control For Wastewater Treatment", Journal: Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2010 International Conference on, IEEE.
8. Pendashteh, A.R., Fakhru'l-Razi, A., Chaibakhsh, N., Abdullah, L.C., Madaeni, S.S, and Abidin, Z.Z., (2011), "Modeling Of Membrane Bioreactor Treating Hypersaline Oily Wastewater By Artificial Neural Network", Journal: hazardous materials, Volume: 192, Issue: 2, Pages: 568-575.
9. Cao G., Li M., and Mo C., (2008) , "Prediction Of The Anaerobic Systems Based On Neural Network With Multipopulation Parallel Genetic Algorithm", Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application, Volume: 5, Pages: 947-951
10. Abu Qdais H., Bani Hani K., and Shatnawi N., (2010), "Modeling and Optimization Of Biogas Production from A Wastewater Digester Using Artificial Neural Network And Genetic Algorithm", Journal: Resources, Conservation and Recycling, Volume: 54, Issue: 6, Pages: 359-363.
11. Fang, F., Ni, B.J., Xie, W.M., Sheng G.P., Liu S.G., Tong Z.H., and Yu H.Q., (2010), "An Integrated Dynamic Model For Simulating A Full-Scale Municipal Wastewater Treatment Plant Under Fluctuating Conditions", Journal: Chemical Engineering Journal ,Volume: 160, Issue: 2, Pages: 522-529.
12. Gueguim Kana, E.B., Oloke, J.K., Lateef, A., and Adesiyun, M.O., (2012). "Modeling And Optimization Of Biogas Production On Saw Dust And Other Co-Substrates Using Artificial Neural Network And Genetic Algorithm", Journal: Renewable Energy, Volume: 46, Pages: 276-281.
13. Piuleac, C. G., Curteanu, S., Rodrigo, M.A., Sáez, C., and Fernández, F.J., (2013), "Optimization Methodology Based On Neural Networks And Genetic Algorithms Applied To Electro-Coagulation Processes", Journal: Central European Journal of Chemistry, Volume: 11, Issue: 7, Pages: 1213-1224.
۱۴. البرزی، م.، (۱۳۸۹)، "آشنایی با شبکه های عصبی"، نویسنده: آر. بیل وتی. جکسون، ناشر: دانشگاه صنعتی شریف، ویرایش اول، چاپ چهارم.
14. Armstrong, J. S., Collopy, F., (1992), "Error Measure For Generalizing About Forecasting Methods: Empirical Comparisons", International Journal of Forecasting, Volume: 8, Pages: 69-80.
15. Häck, M., and M., Köhne, (1996), "Estimation Of Wastewater Process Parameters Using Neural Networks", Journal: Water science and technology, Volume: 33, Issue: 1, Pages: 101-115.
16. Belanche, L. A., Valdés, J.J., Comas, J., Roda, I.R., and Poch, M., (1999), "Towards A Model Of Input–Output Behaviour Of Wastewater Treatment Plants Using Soft Computing Techniques", Journal: Environmental Modelling & Software, Volume: ume: 14, Issue: 5, Pages: 409-419.
17. Hamoda, M. F., Al-Ghusian, I.A., and Hassan, A.H., (1999), "Integrated Wastewater Treatment Plant Performance Evaluation Using Artificial Neural Networks", Journal: Water science and technology, Volume: 40, Issue: 7, Pages: 55-65.
18. Oliveira-Esquerre, K.P., Mori, M., and Bruns, R.E., (2002), "Simulation Of An Industrial Wastewater Treatment Plant Using Artificial Neural Networks And Principal Components Analysis", Journal: Brazilian Journal of Chemical Engineering ,Volume: 19, Pages: 365-370.
19. Pai, T., Tsai, Y.P., Lo, H.M., Tsai, C.H., and Lin, C.Y., (2007), "Grey And Neural Network Prediction Of Suspended Solids And Chemical Oxygen Demand In Hospital Wastewater Treatment Plant Effluent", Journal: Computers & Chemical Engineering, Volume: 31, Issue: 10, Pages: 1272-1281.
20. Dogan, E., Ates, A., Yilmaz, E.C., and Eren, B., (2008). "Application Of Artificial Neural Networks To Estimate Wastewater Treatment Plant Inlet Biochemical Oxygen Demand", Journal: Environmental progress, Volume: 27, Issue: 4, Pages: 439-446.
21. Chen, H.M., and Lo, S.L., (2010), "Prediction Of The Effluent From A Domestic Wastewater Treatment Plant Of CASP Using Gray Model And Neural Network", Journal: Environmental monitoring and assessment, Volume: 162, Issue: 1-4, Pages: 265-275.
22. Noori, R., Karbassi, A.R., Ashrafi, K.H., Ardestani, M., and Mehrdadi, N., (2013), "Development And Application Of Reduced Order Neural Network Model Based On Proper Orthogonal Decomposition For BOD5 Monitoring: Active And Online Prediction", Journal: Environmental Progress & Sustainable Energy, Volume: 32, Issue: 1, Pages: 120-127.