

# پیش‌بینی نرخ برگشت لجن با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب تربت حیدریه

فتح‌الله غلامی بروجنی<sup>۱</sup>

رضا ابراهیم‌پور<sup>۲</sup>

امیرحسین امیری‌فرد<sup>۳</sup>

(دریافت ۹۱/۱۱/۵ پذیرش ۹۲/۴/۱۶)

## چکیده

بین پارامترهای مختلف کمی و کیفی فاضلاب و میزان لجن برگشتی مورد نیاز، که یکی از مهم‌ترین پارامترهای بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌روش لجن فعال است، ارتباط علت و معلولی پیچیده و غیر خطی وجود دارد. همچنین شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای مزایایی از قبیل قدرت یافتن روابط علت و معلولی پیچیده و غیر خطی توسط ابزارهای محاسباتی ساده ریاضی، داشتن قدرت تعمیم بالا و همچنین سرعت بالا در مرحله آزمایش‌اند و می‌توانند به‌صورت یک ابزار نرم‌افزاری در بهره‌برداری از تصفیه‌خانه فاضلاب مورد استفاده قرار گیرند. در این پژوهش میزان لجن برگشتی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تربت حیدریه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و با توجه به داده‌های ورودی یک‌ساله مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مختلف تأثیرگذار در میزان لجن برگشتی از قبیل دبی و دمای فاضلاب ورودی، TSS، BOD<sub>5</sub>، COD، ورودی و خروجی، غلظت لجن برگشتی، غلظت مواد معلق مایع مخلوط و همچنین میزان لجن فعال جمع‌آوری شده، به شبکه‌های عصبی MLP و RBF اعمال شد. نتایج این مطالعه نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی MLP می‌تواند با دقت بیش از ۹۳ درصد میزان لجن برگشتی مورد نیاز در سیستم‌های متداول بیولوژیکی تصفیه فاضلاب به‌روش هوادهی گسترده را پیش‌بینی نماید.

**واژه‌های کلیدی:** تصفیه فاضلاب، شبکه عصبی مصنوعی، لجن فعال برگشتی

## Using Artificial Neural Networks to Estimate the Return Sludge Rate A Case Study of Torbat Heydarieh Wastewater Treatment Plant

F. Gholami-Boroujeni<sup>1</sup>

R. Ebrahimpour<sup>2</sup>

A.H. Amirifard<sup>3</sup>

(Received Jan. 24, 2013 Accepted July 7, 2013)

### Abstract

There are complex and nonlinear causal relationships among the different quality and quantity parameters of wastewater and return activated sludge, which is one of the most important parameters in the operation of activated sludge wastewater treatment plants. On the other hand, Artificial Neural Networks (ANNs) have advantages such as the ability to identify and extract complex and nonlinear causal relations using simple mathematical formulas, high generalizing power, and high speed that make them capable of being used as a powerful software in the operation of wastewater treatment plants. In this study, the application of artificial neural networks (ANNs) for determining the amount of return activated sludge in Torbat Heydarieh wastewater treatment plant is investigated based on one-year inlet flow data. The different parameters involved in this process such as inlet flow and temperature, inlet and outlet total suspended solids, inlet and outlet BOD<sub>5</sub> and COD, MLSS, and the amount of return activated sludge were collected and applied to MLP and RBF artificial neural networks (ANNs). Results showed that MLP is capable of estimating the return activated sludge required in conventional biological wastewater treatment systems such as extended aeration and that its estimation accuracy is above 93%.

**Keywords:** Wastewater Treatment, Artificial Neural Network, Return Activated Sludge.

1. Assist. Prof. of Environmental Health, Faculty of Public Health, Urmia University of Medical Sciences, Urmia
2. Assist. Prof. of Electronic, Dept. of Electrical and Computer Eng., Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran
3. MSc Student, Dept. of Electrical and Computer Eng., Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran (Corresponding Author)  
a.amirifard@gmail.com

- ۱- استادیار گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه
- ۲- استادیار گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
- ۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران (نویسنده مسئول)  
a.amirifard@gmail.com

فعال برگشتی، استفاده کرد و به این ترتیب بخشی از مشکلات بهره‌برداری تصفیه‌خانه فاضلاب، کاهش داده می‌شود.

پژوهش‌های زیادی در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی سیستم‌های بیولوژیکی تصفیه فاضلاب انجام شده است. در سال ۲۰۰۷، مالی و همکاران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به مدل‌سازی سیستم بیولوژیکی تصفیه فاضلاب به صورت مدل جعبه سیاه پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند با توجه به داده‌های ورودی یک‌ساله تصفیه‌خانه، میزان BOD، COD و TSS پساب خروجی و همچنین میزان لجن برگشتی مورد نیاز تصفیه‌خانه دوحه قطر با سیستم لجن فعال را مدل نماید [۵]. همچنین نصر و همکاران در سال ۲۰۱۲، به بررسی کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور پیشگویی در بهره‌برداری یک تصفیه‌خانه فاضلاب به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در مصر پرداختند. در این مطالعه داده‌های مربوط به BOD، COD، TSS و ورودی، دمای محیط، pH، غلظت MLSS در حوض هوادهی، نیتروژن و فسفر به مدت یک‌سال در شبکه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد شبکه FFBP<sup>۲</sup> با ضریب همبستگی ۰/۹ می‌تواند لجن برگشتی را در این تصفیه‌خانه تخمین بزند [۶]. پای و همکاران با استفاده از سیستم‌های فازی، توانایی شبکه‌های عصبی را ارتقا داده و موفق شدند میزان SS، COD و pH یک تصفیه‌خانه بیمارستانی را با MSE معادل ۰/۱۹ و ۲/۲۵ و صفر پیش‌بینی نمایند [۷]. داوت و همکاران در سال ۲۰۰۸ توسط شبکه عصبی مصنوعی توانستند میزان TSS تصفیه‌خانه شهر ملتیه ترکیه را با دقت خوب پیش‌بینی نمایند. برای این کار داده‌های جمع‌آوری شده بیش از یکسال آزمایشگاه را به عنوان داده‌های خام اولیه استفاده نمودند [۸]. همچنین کریگر در دانشگاه پنسیلوانیا در یک پروژه دانشگاهی در سال ۲۰۰۷ یک شبکه عصبی مصنوعی طراحی کرد به نحوی که داده‌های ورودی آن به صورت مستقیم در هر لحظه از سیستم کنترل مرکزی یک تصفیه‌خانه پایلوت و سایت هواشناسی منطقه در اختیار شبکه قرار می‌گرفت. او داده‌هایی از قبیل دبی لحظه‌ای و دبی هفته‌های گذشته، TKN فعلی و هفته‌های گذشته، COD، دمای حداقل، میزان بارندگی و شماره ماه سال را در اختیار شبکه عصبی قرار می‌داد و مقادیر دبی و TKN و COD هفته بعد توسط شبکه پیش‌بینی می‌شد و بهره‌بردار می‌توانست تدابیر لازم را در خصوص کنترل بهتر پارامترهای تصفیه‌خانه به‌کار گیرد [۹]. خطایی و کثیری در سال ۲۰۱۱ نیز یک تصفیه‌خانه فاضلاب بیولوژیکی را توسط شبکه عصبی مدل‌سازی نمودند [۱۰]. دانامین و همکاران COD، TSS و MLSS پساب خروجی تصفیه‌خانه

فرایند لجن فعال یکی از روش‌های بیولوژیکی تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی است. برای رسیدن به عملکرد مناسب در فرایند لجن فعال، بهره‌بردار باید جرم میکربی (M)، غلظت اکسیژن محلول در حوض هوادهی (DO) و زمان ماند و نسبت مناسب غذا به میکروارگانیسم در این حوضچه‌ها را کنترل نماید. میزان لجن برگشتی به عوامل زیادی نظیر دبی ورودی به حوض هوادهی، کیفیت فاضلاب ورودی، نرخ رشد میکروارگانیسم‌ها (سینتیک‌های باکتریایی و ثابت‌های فرایند میکربی)، غلظت توده بیولوژیکی موجود در حوضچه و غلظت لجن برگشتی (MLSS) و غیره بستگی دارد [۱]. از آنجا که میزان لجن برگشتی به سیستم لجن فعال یک رابطه غیر خطی و پیچیده با سایر پارامترهای تصفیه‌خانه و همچنین شرایط محیطی (دمای محیط، شرایط کمی و کیفی فاضلاب در زمان‌های مختلف و غیره) دارد، بهره‌برداری موفقیت‌آمیز یک تصفیه‌خانه به روش لجن فعال، مستلزم آگاهی و کنترل دائم بهره‌بردار از فاکتورهایی است که بر فرایند تأثیر می‌گذارند. برای فعال نگاه داشتن دائم ارگانیسم‌ها در سیستم لجن فعال، بهره‌بردار باید شرایط محیطی مناسب (مخصوصاً نسبت غذا به میکروارگانیسم، اکسیژن محلول، pH و غیره) و همچنین میزان لجن برگشتی مناسب مورد نیاز در حوض هوادهی را فراهم کند [۲].

شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای مزایایی از قبیل قدرت یافتن روابط علت و معلولی پیچیده و غیر خطی توسط ابزارهای محاسباتی ساده ریاضی، داشتن قدرت تعمیم بالا و همچنین سرعت بالا در مرحله آزمایش‌اند و می‌توانند به صورت یک ابزار نرم‌افزاری در بهره‌برداری از تصفیه‌خانه فاضلاب مورد استفاده قرار گیرند. یکی از روش‌های هوش مصنوعی که در سطح وسیعی در بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از یک دهه گذشته آغاز شده و برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای مورد نیاز در این فرایندها در حال بسط و توسعه است، شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> هستند [۳]. ANNها در ابتدا نیاز به اندازه‌گیری اولیه متمرکز و دقیق از تغییرات سیستم دارند، تا بتوانند به نحو صحیح آموزش ببینند و بعد از آموزش شبکه عصبی، تعداد دفعات اندازه‌گیری‌ها و تمرکز آن‌ها می‌تواند کمتر باشد. اگر مقادیر خروجی شبکه عصبی با مقادیر واقعی تفاوت پیدا کرد، شبکه می‌تواند با داده‌های جدید آموزش داده شود که این کار به صورت نرم‌افزاری می‌تواند انجام شود [۴]. در نتیجه می‌توان با اعمال داده‌های مختلف فرایند لجن فعال در تصفیه‌خانه فاضلاب به شبکه‌های عصبی مصنوعی، ابتدا آنها را آموزش داده و سپس از آن‌ها برای پیش‌بینی میزان لجن

<sup>2</sup> Feed Forward Back Propagation

<sup>1</sup> Artificial Neural Networks (ANN)

فاضلاب آنکارا را با مقدار مجذور مربعات خطای<sup>۱</sup> معادل ۵/۰۳ درصد، ۱۷/۱ درصد و ۳/۷۷ درصد پیش‌بینی کردند [۱۱]. ایشان به منظور پیش‌بینی پارامترهای پساب خروجی تصفیه‌خانه، مقدار پارامترهای مختلف ورودی از قبیل دبی، COD، TKN، لجن فعال دفعی WAS، لجن فعال برگشتی RAS و میزان اکسیژن محلول حوض هوادهی (DO) و همچنین میزان (SS) اندازه‌گیری شده قبلی را به‌عنوان داده‌های خام ورودی به شبکه اعمال کردند. آنها برای این کار مدت ۲۹۰ ساعت (۱۲ روز) ضمن نظارت بر بهره‌برداری، به ازای هر دو ساعت، کلیه داده‌ها که به صورت آنالین و یا توسط آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شد را ثبت کردند و از آنها به‌عنوان داده‌ی خام ورودی به شبکه عصبی استفاده کردند [۱۱]. کاربردهای مختلف شبکه عصبی مصنوعی نشان دهنده توانمندی بالای مدل‌های هوشمند عصبی در پیش‌بینی پارامترهای مختلف فاضلاب است. از طرفی با توجه به توان ارزیابی ارتباطات غیر خطی آنها، استفاده از مدل‌سازی شبکه‌های عصبی به منظور پیش‌بینی میزان لجن فعال برگشتی ضروری به نظر می‌رسد.

در این پژوهش امکان‌سنجی کاربرد شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه<sup>۲</sup> و توابع شعاع پایه<sup>۳</sup> در پیش‌بینی میزان لجن برگشتی مورد نیاز در تصفیه‌خانه فاضلاب تربت حیدریه مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

شهر تربت حیدریه، مرکز شهرستان تربت حیدریه در استان خراسان رضوی و در فاصله تقریبی ۱۵۰ کیلومتری جنوب غربی مشهد، قرار دارد. متوسط سردترین ماه سال در دی ماه حدود ۴/۷- درجه سلسیوس و متوسط گرم‌ترین ماه سال در تیر ماه حدود ۳۴ درجه سلسیوس است. تصفیه‌خانه فاضلاب این شهر از نوع تصفیه فاضلاب با طرح لجن فعال از نوع هوادهی گسترده است. ظرفیت متوسط آن ۱۵۰ لیتر در ثانیه و حداکثر ظرفیت، ۳۰۰ لیتر در ثانیه است. مراحل تصفیه فاضلاب در این تصفیه‌خانه عبارت‌اند از: آشغال‌گیر، دانه‌گیر با هوادهی، واحد اندازه‌گیری جریان، واحد تصفیه بیولوژیکی به روش لجن فعال (هوادهی گسترده)، ته‌نشینی ثانویه، واحد گندزدایی UV. در این طرح لجن فعال توسط (۳+۱) دستگاه الکتروپمپ لجن‌کش مستغرق فاضلابی با ظرفیت ۲۷۰ متر مکعب (هر پمپ حدود ۹۰ متر مکعب در ساعت) به حوضچه تقسیم حوض‌های هوادهی وارد می‌شود و لجن مازاد نیز توسط (۱+۱)

دستگاه الکتروپمپ لجن‌کش مستغرق فاضلابی با ظرفیت ۳۶ متر مکعب به لاگون‌های لجن ارسال می‌شود [۱۲].

میزان اکسیژن محلول (DO)، MLSS، pH، دبی، دما و کدورت فاضلاب ورودی و دبی لجن برگشتی، و لجن مازاد و همچنین دبی، کدورت، اکسیژن محلول و pH پساب خروجی به صورت آنالین توسط تجهیزات ابزار دقیق نصب شده، اندازه‌گیری و برای ثبت به دستگاه PLC<sup>۴</sup> ارسال می‌شود. همچنین پارامترهایی از قبیل TSS، BOD<sub>5</sub>، COD در واحدهای مختلف و SVI در حوض هوادهی در آزمایشگاه تصفیه‌خانه اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. در نهایت بهره‌بردار با توجه به داده‌های ثبت شده به طور ساعتی و روزانه، میزان لجن برگشتی مورد نیاز را به صورت تجربی (با توجه به اطلاعات قبلی تصفیه‌خانه) و محاسباتی (با استفاده از روش بالانس جرمی و غلظت MLSS در حوض هوادهی که طبق گزارش طراح تصفیه‌خانه باید ۳۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر باشد) به دست می‌آورد و تعداد پمپ لجن برگشتی و مازاد را مشخص می‌کند و برای اجرا به اپراتور، اعلام می‌کند. کلیه تغییرات بالا از قبیل تعداد پمپ‌های روشن، ساعت کاری آنها، دبی لجن و غیره توسط PLC ثبت و ضبط شده و نمودارهای آن نیز تهیه می‌شود. در شکل ۱ تجهیزات ابزار دقیق نصب شده در واحد بیولوژیکی به صورت شماتیک ترسیم شده است [۱۲].

این پژوهش در سه مرحله زیر انجام شد:

- جمع‌آوری داده‌های خام ورودی؛

- طراحی شبکه عصبی مصنوعی و اعمال داده‌های خام به آنها؛

- اجرای شبکه و آنالیز آماری داده‌های خروجی.

اطلاعات و داده‌هایی که توسط PLC و آزمایشگاه به مدت یک سال و به تعداد ۲۰۰ عدد ثبت شده بود، به‌عنوان داده‌های خام در شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. فرایند آموزش برای این الگوریتم‌ها که شامل تغییر پارامترهای تأثیرگذار در شبکه عصبی از قبیل تعداد لایه‌های مخفی در شبکه MLP تعداد نرون لایه‌های پنهان، نرخ یادگیری، تعداد مراحل آموزش و درصد تغییر وزن‌ها در هر مرحله است، در دفعات زیاد و با دو تابع انتقال سیگموئید و تانژانت انجام شد و با آزمایش شبکه با داده‌های ارزیابی و مشاهده نتایج حاصل، بهینه تعداد نرون‌ها در لایه مخفی و پارامترهای نرون‌های لایه مخفی به وسیله سعی و خطا به دست آمد و هر بار فرایند آموزش و ارزیابی مدل با هدف کاهش میزان میانگین مربع خطا<sup>۵</sup> تکرار شد. این روند تا جایی که تفاوت بین داده‌های واقعی (داده‌های ارزیابی) و داده‌های پیش‌بینی شده به

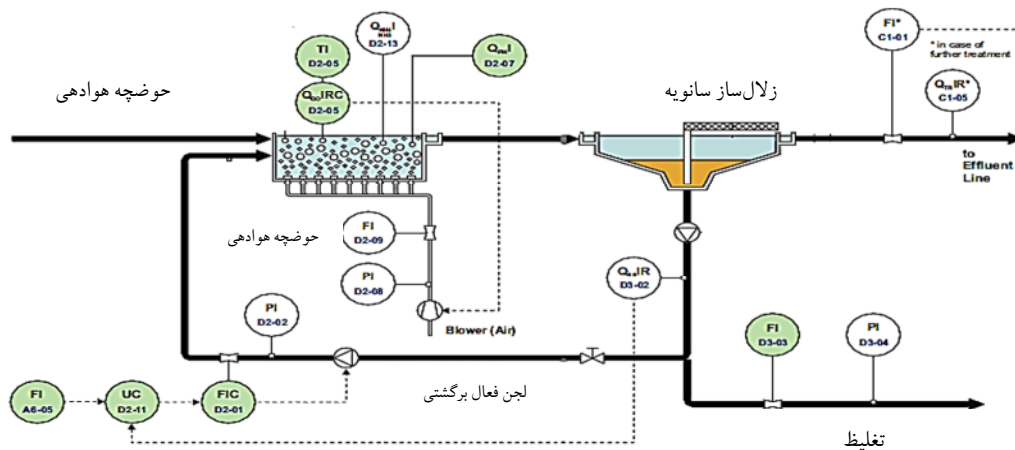
<sup>۱</sup> Root Mean Square Error (RMSE)

<sup>۲</sup> Multilayer Perception (MLP)

<sup>۳</sup> Radial Basis Function (RBF)

<sup>۴</sup> Programmable Logic Controller

<sup>۵</sup> Mean Square Error (MSE)



شکل ۱- تجهیزات ابزار دقیق نصب شده در واحد بیولوژیکی

پیش‌بینی خروجی مناسب، داده‌های آزمایش که قبلاً از داده‌های اولیه استخراج شده بود، به شبکه اعمال شد و خروجی‌های به دست آمده از آن با خروجی‌های واقعی مقایسه و درصد صحت پیش‌بینی به نسبت داده‌های اعمال شده برای آزمایش محاسبه شد. مقادیر اندازه‌گیری و ثبت شده پارامترهای مختلف فاضلاب که توسط تجهیزات ابزار دقیق روی خط و آزمایشگاه، اندازه‌گیری شده بودند، به عنوان داده‌های ورودی و خروجی شبکه در نظر گرفته شدند. داده‌های مربوط به دبی و دمای فاضلاب ورودی، TSS، ورودی و خروجی،  $BOD_5$  ورودی و خروجی، COD ورودی و خروجی، غلظت لجن برگشتی ( $X_R$ )، غلظت مواد معلق مایع مخلوط (MLSS) در حوض هوادهی، به عنوان داده خام ورودی و میانگین میزان دبی لجن فعال برگشت داده شده به حوض‌های هوادهی به عنوان داده‌های خروجی به شبکه اعمال شد. در مواردی که تعداد دفعات اندازه‌گیری بیش از یک بار در ۲۴ ساعت بود، (مانند مقادیری که توسط اندازه‌گیرها انجام می‌شود)، از مقدار متوسط استفاده شد و دبی نیز به صورت میانگین روزانه به شبکه اعمال شد. از آنجا که نتایج آنالیز نمونه‌های پساب تصفیه‌خانه نشان می‌دهد، تصفیه‌خانه با این شرایط بهره‌برداری توانسته است استانداردهای خروجی را تأمین نماید، میزان لجن برگشتی محاسبه و اعمال شده توسط بهره‌بردار به عنوان مقادیر بهینه در نظر گرفته شد. پس از آموزش شبکه عصبی و تنظیم پارامترهای آن می‌توان مطمئن بود که شبکه عصبی موجود می‌تواند در حد یک بهره‌بردار متخصص، میزان لجن برگشتی مورد نیاز را محاسبه و برآورد کند. در جدول ۱ پارامترهای استفاده شده به عنوان داده خام شبکه عصبی، آورده شده است.

لازم به ذکر است که هر یک از مقادیر جدول ۱ به صورت مستقیم یا غیر مستقیم بر میزان لجن برگشتی تأثیر گذار است.

حداقل برسد، ادامه یافت. رابطه ۱ نحوه محاسبه میزان MSE را نشان می‌دهد

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{n} \quad (1)$$

که در این رابطه

$n$  تعداد پیش‌بینی‌ها و  $e_i$  خطای پیش‌بینی  $i$  ام است، که از تفاوت مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی به دست می‌آید.

انتخاب بهترین شبکه بر اساس کمترین میزان MSE و بالاترین درصد صحت صورت می‌گیرد. در هر کدام از شبکه‌ها برای همگرایی بهتر و رسیدن به حداقل خطا، آموزش در تعداد مراحل مختلف<sup>۱</sup> انجام می‌شود.

پس از اجرای الگوریتم تصحیح وزن‌ها تا رسیدن به کمترین خطای کلی، چندین معیار برای توقف الگوریتم پیشنهاد می‌شود که در این تحقیق از دو معیار زیر استفاده شد

۱- اگر خطا (که قرار است کمینه شود)، از یک سطح آستانه کمتر بشود، می‌توان پذیرفت که شبکه با خطای قابل قبولی آموزش دیده است.

۲- اگر میزان تغییرات خطا در طی دو گام متوالی کمتر از یک سطح آستانه باشد یا به عبارت دیگر، روند کاهش خطا با سرعت کند انجام شود، می‌توان چنین برداشت کرد که نزدیک کمینه کلی است. لذا در این حالت نیز تصمیم به توقف الگوریتم آموزش گرفته می‌شود.

پس از آن که شبکه با داده‌های اولیه صحیح آموزش داده شود و با توجه به نتایج ارزیابی با داده‌های ارزیابی، وزن‌های آن تغییر پیدا کند، قادر خواهد بود تا با دریافت داده‌های مشابه، پاسخ مناسب را پیش‌بینی نماید. به همین منظور برای بررسی میزان توانایی شبکه در

<sup>1</sup> Epoch

جدول ۱- پارامترهای اعمال شده به نرون‌های ورودی شبکه عصبی مصنوعی

پارامتر	توضیحات	حداقل	میانگین	حداکثر
Flow	میزان جریان فاضلاب ورودی	۲۸۹	۴۰۹	۵۳۰
Temp <sub>In</sub>	دمای فاضلاب ورودی	۱	۱۸	۳۵
TSS <sub>In</sub>	جامدات معلق کل ورودی	۱۲۶	۲۷۲	۴۴۷
TSS <sub>Out</sub>	جامدات معلق کل خروجی	۴۵	۵۳	۶۰
BOD <sub>5In</sub>	ورودی BOD	۱۱۰	۲۲۶	۳۴۸
BOD <sub>5Out</sub>	خروجی BOD	۳۰	۳۷	۴۵
COD <sub>In</sub>	ورودی COD	۱۷۳	۳۸۲	۶۴۲
COD <sub>Out</sub>	خروجی COD	۶۱	۸۱	۹۹
X <sub>R</sub>	میزان غلظت لجن برگشتی	۸۰۱۲	۹۰۹۳	۹۹۹۳
MLSS	جامدات معلق مایع مخلوط	۳۰۱۷	۴۱۴۱	۵۸۴۰
RAS	میزان لجن فعال برگشتی	۱۲۴	۱۹۲	۲۷۰

رابطه ۲ برای نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد. با استفاده از این رابطه کلیه داده‌ها در دامنه ۰ و ۱ قرار می‌گیرند.

$$\bar{X} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

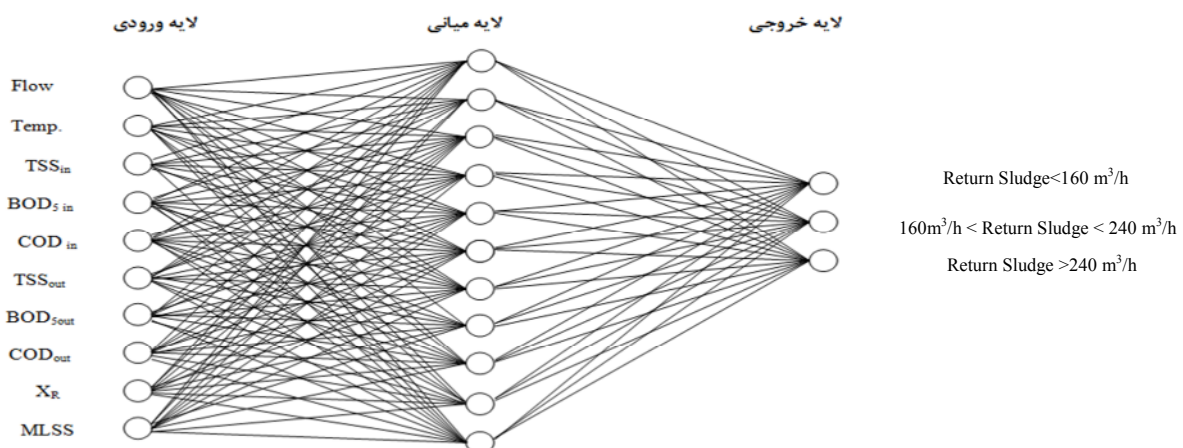
که در این رابطه

$\bar{X}$  داده نرمال شده،  $X_i$  داده مورد استفاده و  $X_{\min}$  و  $X_{\max}$  حداقل و حداکثر داده‌ها در سری مورد نظر است [۱۳].

### ۳- طراحی شبکه، ورود داده‌های خام و آنالیز نتایج

شبکه‌ای با ۱۰ نرون در لایه ورودی (داده ورودی) و سه نرون در لایه خروجی (تعیین متوسط میزان لجن برگشتی مورد نیاز در شبانه روز) طراحی شد. در شکل ۲ یک نمونه ساختار شبکه عصبی MLP با یک لایه میانی مورد استفاده در این پژوهش نمایش داده شده است.

به همین منظور و برای اطمینان از تأثیرگذاری آنها در میزان لجن برگشتی، ۸ مدل شبکه عصبی با تعداد ۹ ورودی (با حذف یک پارامتر) تشکیل داده شد و مشاهده شد که درصد صحت پیش‌بینی شبکه عصبی به مقادیر کمتر از ۹۰ درصد کاهش پیدا کرد. با توجه به اینکه ممکن است در ثبت داده‌ها در آزمایشگاه، کم‌دقتی صورت گیرد و یا در هنگام اندازه‌گیری و آزمایش مشکلاتی وجود داشته باشد، کلیه داده‌های جمع‌آوری شده قابل استفاده نیست. به همین دلیل ابتدا تمامی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های نامناسب که تغییرات آنها نسبت به داده‌های قبل و بعد از آنها غیر منطقی بود، از مجموعه داده‌ها حذف شدند و سپس برای افزایش دقت و سرعت فرایندهای شبکه‌های عصبی، داده‌های مورد استفاده نرمال شدند. برای این منظور، روش‌های متعددی ارائه شده که در این پژوهش از



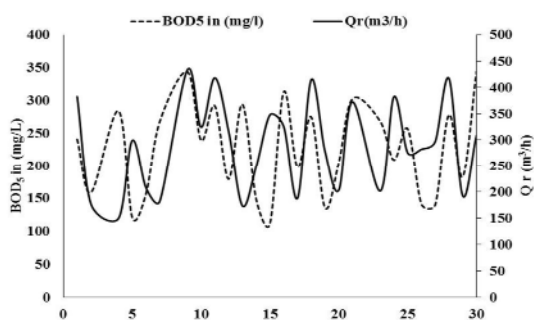
شکل ۲- یک نمونه شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده شده در این پژوهش

در این پژوهش برای انجام مراحل مذکور اعم از تشکیل شبکه عصبی، آموزش، ارزیابی، اصلاح وزن‌ها و در نهایت آزمایش شبکه عصبی از ابزار موجود در نرم افزار MATLAB-Ver 7.8.0.347(R2009a) استفاده شد.

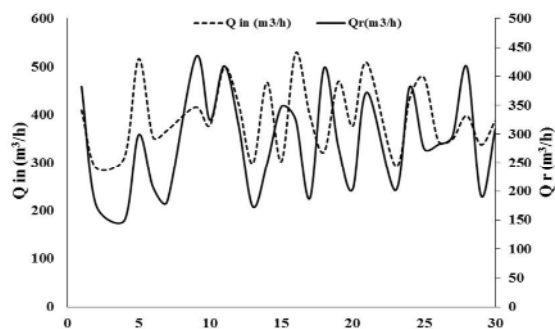
#### ۴- نتایج و بحث

در شکل‌های ۳ تا ۸ ارتباط بین پارامترهای ورودی (دبی ورودی، BOD ورودی، TSS ورودی، COD ورودی و غلظت MLSS) دبی لجن برگشتی آورده شده است.

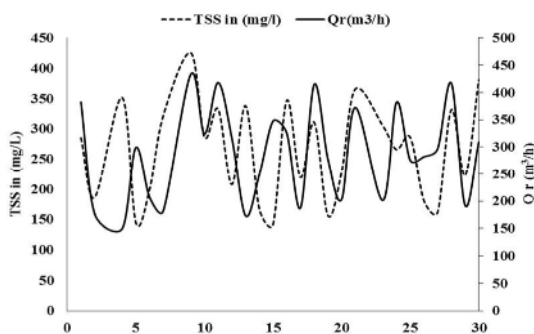
در مرحله اول ترتیب کلیه داده‌ها توسط دستورات نرم‌افزاری جابجا شد، به نحوی که داده‌های مربوط به فصل‌های مختلف سال، به صورت غیر منظم به شبکه اعمال شدند و پس از نرمالیزه کردن داده‌ها با روش بیان شده در بخش قبل، ۷۵ درصد داده‌ها (۱۵۰ عدد) به عنوان ورودی آموزش و ارزیابی مدل، و ۲۵ درصد به عنوان داده‌های آزمایش مدل (۵۰ عدد) انتخاب شدند. از مجموع داده‌های آموزش و ارزیابی، ۱۰۰ عدد برای آموزش و ۵۰ عدد برای ارزیابی استفاده شدند به نحوی که شبکه عصبی با داده‌های اولیه آموزش یافت و پس از ارزیابی با داده‌های باقیمانده، وزن‌های آن تغییر یافته و اصلاح شد.



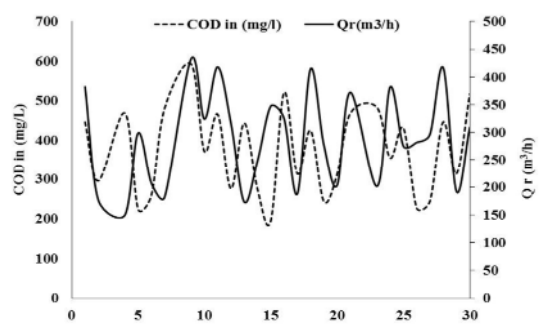
شکل ۴- بررسی اثر تغییرات میزان اکسیژن خواهی بیولوژیکی ورودی بر میزان لجن برگشتی در تصفیه خانه فاضلاب تربت حیدریه



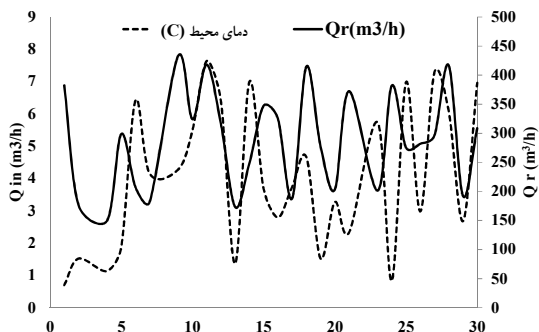
شکل ۳- بررسی اثر تغییرات دبی ورودی بر میزان لجن برگشتی در تصفیه خانه فاضلاب تربت حیدریه



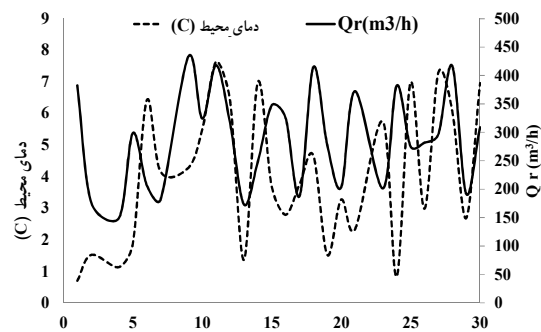
شکل ۶- بررسی اثر تغییرات میزان مواد معلق ورودی بر میزان لجن برگشتی در تصفیه خانه فاضلاب تربت حیدریه



شکل ۵- بررسی اثر تغییرات میزان اکسیژن خواهی شیمیایی ورودی بر میزان لجن برگشتی در تصفیه خانه فاضلاب تربت حیدریه



شکل ۸- بررسی اثر تغییرات غلظت دمای فاضلاب ورودی بر میزان لجن برگشتی در تصفیه خانه فاضلاب تربت حیدریه



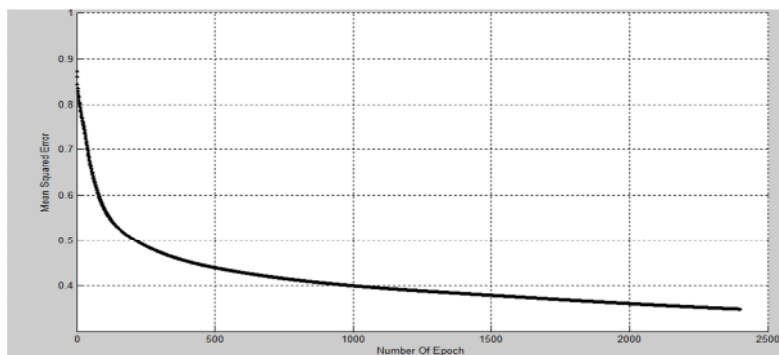
شکل ۷- بررسی اثر تغییرات دمای محیط بر میزان لجن برگشتی در تصفیه خانه فاضلاب تربت حیدریه

۵- نتایج عملکرد شبکه در پیش‌بینی میزان لجن برگشتی نتایج عملکرد شبکه برای پیش‌گویی تعداد پمپ‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، روند نزول کمیت میانگین مربع خطا (MSE) در شبکه MLP در عدد ۰/۱۳۱ و در شبکه RBF در عدد ۰/۲۰۱۰ تقریباً ثابت می‌شود که با توجه به میزان MSE می‌توان نتایج را رضایت‌بخش دانست. بهترین نتیجه برای شبکه MLP از نظر درصد صحت پیش‌بینی‌های انجام شده به ازای داده‌های آزمایش، شبکه‌ای با ۱۲ نرون در لایه مخفی و با ۷۰۰ بار تکرار مراحل آموزش که در

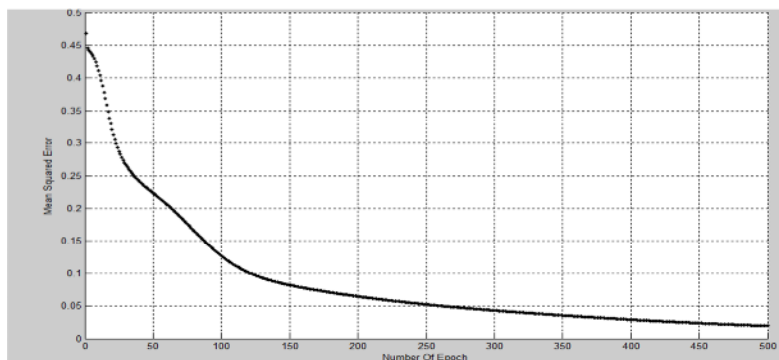
نهایت خطای ارزیابی در آن برابر با ۰/۱۹۳ و درصد صحت، ۹۳/۰۷ درصد بود و بهترین شبکه RBF شبکه‌ای با ۱۸ نرون در لایه مخفی و با ۲۴۰۰ آزمایش در مراحل مختلف که میزان MSE برابر ۰/۳۴۸۸ و درصد صحت آن ۵۴/۲۵ درصد بود. در نهایت شبکه MLP به‌عنوان بهترین شبکه انتخاب شد تا برای پیش‌بینی تعداد پمپ‌های مورد نیاز برای برگشت لجن فعال مورد استفاده قرار گیرد. نتایج افزایش تعداد تکرارها در بهترین حالات شبکه RBF و MLP در شکل‌های ۹ و ۱۰ قابل مشاهده است.

جدول ۲- بهترین نتایج شبکه RBF و MLP به ازای تعداد نرون لایه میانی

درصد صحت	خطای ارزیابی	تعداد تکرار	تابع آستانه	توپولوژی	نوع شبکه
۸۹/۰۵	۰/۰۱۴۲	۶۰۰	TanSig	۱۰-۱۶-۳	MLP
۸۷/۴۵	۰/۰۳۴۵	۵۰۰	TanSig	۱۰-۱۸-۳	
۹۳/۰۷	۰/۰۱۹۳	۷۰۰	LogSig	۱۰-۱۲-۳	
۹۱/۰۳	۰/۰۱۹۵	۷۰۰	LogSig	۱۰-۱۶-۱۲-۳	
۹۰/۳۴	۰/۰۲۸۸	۴۰۰	LogSig	۱۰-۱۴-۸-۳	
۴۹/۲۵	۰/۳۴۸۸	۲۰۰۰	TanSig	۱۰-۱۲-۳	RBF
۵۰/۷۵	۰/۳۰۱۰	۲۲۰۰	TanSig	۱۰-۱۵-۳	
۵۴/۲۵	۰/۳۴۸۸	۲۴۰۰	TanSig	۱۰-۱۸-۳	
۴۸/۶۳	۰/۲۰۱۰	۲۴۰۰	LogSig	۱۰-۱۲-۳	
۴۹/۰۵	۰/۳۷۷۵	۲۲۰۰	LogSig	۱۰-۱۵-۳	



شکل ۹- میانگین مربع خطای آموزش و خطای ارزیابی در مقابل تعداد مراحل آموزش در شبکه شعاع پایه



شکل ۱۰- میانگین مربع خطای آموزش و خطای ارزیابی در مقابل تعداد مراحل آموزش در شبکه پرسپترون چند لایه

مستلزم صرف وقت و هزینه برای انجام آزمایش‌ها در دو یا چند بازه زمانی مختلف خواهد بود.

## ۶- نتیجه‌گیری

استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، برای پیش‌بینی میزان لجن برگشتی مورد نیاز و در نتیجه پیش‌بینی تعداد پمپ‌های فعال لجن برگشتی مورد نیاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش لجن فعال، می‌تواند بسیار ارزشمند باشد. با توجه به اینکه مشخصات کمی و کیفی فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه، شرایط محیطی، دما و سایر پارامترهای تأثیرگذار در طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با یکدیگر متفاوت است، امکان استفاده از شبکه عصبی آموزش‌دیده در یک تصفیه‌خانه برای سایر تصفیه‌خانه‌های مشابه وجود ندارد و می‌توان گفت، شبکه عصبی در یک تصفیه‌خانه در شرایطی قابل استفاده است که با داده‌های صحیح و قابل قبول همان تصفیه‌خانه آموزش ببیند و از طرفی هر چقدر دقت اندازه‌گیری و ثبت داده‌های اولیه بیشتر باشد و همچنین اگر این داده‌ها قبل از اعمال به شبکه عصبی توسط یک کارشناس فرایند بررسی شده و مقادیر تکراری و غیر قابل قبول آن حذف شوند، نتایج حاصل از شبکه عصبی دقیق‌تر خواهد بود. در نتیجه می‌توان گفت که پارامترهای ورودی شبکه‌های عصبی مصنوعی، اثر زیادی بر توانایی یادگیری و پیش‌بینی‌های مدل‌های مختلف این شبکه‌ها دارند.

## ۷- قدردانی

به‌این وسیله از شرکت دیگاب به‌خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات مربوط به تصفیه‌خانه فاضلاب تربت حیدریه قدردانی می‌شود.

برای پیش‌بینی تعداد پمپ‌های مورد نیاز لجن برگشتی، دو نوع شبکه عصبی مصنوعی نظارت شده که به‌وسیله الگوریتم انتشار به عقب آموزش دیده‌اند، بررسی شد. این کار با استفاده از متغیرهای ورودی که شامل برخی از خصوصیات فاضلاب ورودی و لجن بودند، انجام شد. مدل ANN نهایی با موفقیت رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی را یاد گرفت. همچنین شبکه MLP در مقایسه با شبکه RBF توانایی بیشتری در فرایند پیش‌بینی داشت. نتایج نشان داد که شبکه MLP می‌تواند با دقت ۹۳ درصد تغییرات، میزان لجن برگشتی را در شرایط مختلف پیش‌بینی نمایند. این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل ANN ابزار مؤثری برای پیش‌بینی تعداد پمپ لجن برگشتی با توجه به پارامترهای فاضلاب است. یکی از مزایای این پژوهش این است که برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی نیازی به انجام آزمایش‌های جدید و نمونه‌برداری مجدد نیست و می‌توان با داده‌های جمع‌آوری شده توسط تجهیزات ابزار دقیق روی خط و آزمایشگاه در طول یک یا چند سال تصفیه‌خانه، شبکه عصبی مورد نظر را آموزش داد. بدیهی است در صورتی که اطلاعات جمع‌آوری شده بیشتری که به مرور زمان در دوره بهره‌برداری از تصفیه‌خانه فاضلاب به‌دست می‌آید، در اختیار شبکه عصبی قرار گیرد، می‌توان مطمئن بود که نتایج خروجی شبکه تا حد بسیار بالایی قابل اطمینان است. از طرفی با توجه به اینکه جمع‌آوری داده‌ها توسط اپراتورها با دقت نسبتاً کمی انجام می‌شود، ممکن است نتایج حاصل از شبکه عصبی نیز از صحت کمتری برخوردار باشند. در حالی که با انجام آزمایش در یک بازه مشخص و جمع‌آوری داده‌ها به‌صورت دقیق و با نظارت کامل می‌توان با اطمینان بیشتر از نتایج شبکه عصبی نهایی استفاده کرد که این امر

## ۸- مراجع

1. Tchobanoglous, G., and Burton F., L. (2003). *Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse*, 4<sup>th</sup> Ed., Mecalf and Eddy, Mcgraw-Hill Inc., New York.
2. Hakan, M. (2004). "Modeling of activated sludge process by using artificial neural networks." M.Sc. Thesis, School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.
3. Zhang, Q., and Stanley, S. J. (1999). "Real-time water treatment process control with artificial neural networks." *J. Environ Eng.* 125(2), 153-160.
4. Hamed, M.M., Khalafallah, M.G., and Hassanien, E.A. (2004). "Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks." *Environ. Model and Soft*, (19), 919-928.
5. 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." *J. of Environmental Management*, 83, 329-338.
6. Nasr, M., Medhat, S., Hamdy, A.E., and Galal El Kobrosy, G. (2012) "Application of artificial neural network (ANN) for the prediction of EL-AGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT." *Alexandria Engineering Journal*, 51, 37-43.



7. Paia, T.Y., Yanga, P.Y., Wanga, S.C., Loa, M.H., Chiangd, C.F., Kuo, J.L., Chua, H.H., Sua, H.C., Yua, L.F., Hua, H.C., and Changa, Y.H. (2011). "Predicting effluent from the wastewater treatment plant of industrial park based on fuzzy network and influent quality." *Applied Mathematical Modelling*, 35 (8), 3674-3684.
8. Davut, H., and Demirb, T. (2008). "Prediction of wastewater treatment plant performance based on wavelet packet decomposition and neural networks." *Expert Systems with Applications*, 34, (2), 1038-1043.
9. Tyagi, R. D., Du, Y. G., Sreekrishnan, T. R., and Villeneuve, J. P. (2008). "Neural model for the operational control of activated sludge processes." *Process Biochem.*, 28, 259-267.
10. Ali, R., Khataee, M., and Kasiri, B. (2011). "Modeling of biological water and wastewater treatment processes using artificial neural networks." *CLEAN – Soil, Air, Water*, 39 (8), 742-749.
11. Du Nyamin Gu, C., Lu, S., and U Kru, D. (2010). "Artificial neural network modelling of a large-scale wastewater treatment plant operation." *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 33 (9), 1051-1058.
12. Khorasan Water and Wastewater Co. Contractor: Digab Co., Consulting Engineers: Mahab Ghods Co. (2000). *Contract of design, made, erection and operation of Torbat Heydarieh water and wastewater treatment plant*, 34-72. (In Persian)
13. Pai, T.Y., Wang, S.C., Chiang, C.F., Su, H.C., Yu, L.F., Sung, P.J., Lin, C.Y., and Hu, H.C. (2009). "Improving neural network prediction of effluent from biological wastewater treatment plant of industrial park using fuzzy learning approach." *Bioprocess Biosyst Eng.*, 32, 781-790.