کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
دانشگاه تهران، تهران
۲۶ و ۲۷ بهمن‌ماه ۱۳۹۵

1169P-NWWCE

# مدلسازی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) و اکسیژن محلول (DO) به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) جهت بهبود یافتن شاخص کیفیت آب ایران در رودخانه جاجرود

**علیرضا پارسا[۱]، پروفسور سید احمد میرباقری[۲]، دکتر سیده هدی رحمتی[۳]**

**۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست- منابع آب، دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات تهران ***

**۲- استاد و مدیرگروه مهندسی محیط زیست- منابع آب، دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات تهران**

**۳- استادیار گروه مهندسی محیط زیست- منابع آب، دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات تهران**

Musicmanalirezaparsa@Gmail.com*

**خلاصه**

رودخانه جاجرود یکی از مهمترین رودخانه‌های استان تهران می‌باشد که آب شرب بیش از ۳۰ درصد مردم تهران را تأمین می کند که در نتیجه حفظ کیفیت آب و سلامت آن و تعیین منابع و آثار زیست محیطی آن بسیار مهم و منطقی خواهد بود و یکی از مهمترین و قوی‌ترین ابزارهای مدیریتی برای این کار استفاده از مدلهای کامپیوتری برای شبیه سازی پارامترهای کیفی آن از جمله BOD، DO می‌باشد. در ابتدا اجرای یکسری اقدامات اولیه از جمله تعیین یک بازه زمانی نمونه برداری کیفی از آب رودخانه و همچنین تعیین طول مشخصی از رودخانه جهت نمونه‌برداری و مطالعه ضروری است. در این پژوهش هدف ، بررسی پارامترهای کیفی رودخانه جاجرود از جمله BOD و DO مدل سازی این پارامترها به کمک شبکه های عصبی مصنوعی(ANN) بوده است. برای این منظور بازه مورد نظر از ابتدای روستای گرمابدره تا ابتدای ورودی دریاچه سد لتیان با طول تقریبی ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. که بزرگترین مشکل آن آلودگی به مواد آلی و میکروبی می‌باشد. شبیه سازی کیفی رودخانه جاجرود در طی ۴ ماه در هر فصل (اردیبهشت ، مرداد ، آبان و بهمن) جهت مدلسازی دو پارامتر اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی(BOD) و اکسیژن محلول(DO) توسط شبکه های عصبی مصنوعی صورت پذیرفت که برای این منظور از نرم افزار MATLAB جهت مدسازی استفاده گردیده است. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل مذکور قادر است شبیه سازی را در حد قابل قبولی انجام دهد. همچنین رودخانه جاجرود به دلیل سرعت هوادهی بالا دارای ظرفیت خودپالایی مناسبی در طول مسیر خود است. با توجه به نتایج خروجی پارامترهای BOD , DO مشخص می گردد که مقادیر این پارامترها حتی در شرایط کم آبی (تابستان) در وضعیت مناسبی قرار داشته است که در ادامه به تفصیل به آن پرداخته شده است.

**کلمات کلیدی : رودخانه جاجرود، مدلسازی، شبکه عصبی مصنوعی، پارامترهای کیفی**

## ۱. مقدمه

رودخانه ها و آبهای جاری، از دیر باز مورد نیاز ومورد توجه بشر بوده اند و جهت بهره بردن از منابع آبی مناسب، جوامع انسانی و مراکز صنعتی و کشاورزی و غیره معمولا در نزدیکی رودخانه ها برپا شده است. با گذشت زمان و گسترش این جوامع و به تبع آن افزایش استفاده از منابع آبی، دخل و

تصرف غیر طبیعی و تغییر شرایط کیفی آب رودخانه ها افزایش یافته است. در این راستا سنجش، تحلیل و تفسیر داده های کیفی رودخانه ها به طور منظم این امکان را فراهم می سازد که ضـمن استفاده از آن در موارد مختلف، شیوه‌های مدیریتی صحیح و مناسب اتخاذ گردیده و به تدریج از آلودگی رودخانـه هـا کاسـته شده و به سمت کیفیتی با استاندارد قابل قبول حرکت نماید. [۷]. به این ترتیب مطالعات زیادی در ارتباط با روشهای تحلیلی در دو دهه ۵۰ و ۶۰ صورت گرفت. ولی بطور کلی روش تحلیلی ، پیچیده و نیازمند فرضیات ساده کننده ، به ویژه در ارتباط با مدلسازی مسائل انتقال می‌باشد. تلاش‌های عمده که بعد از آن صورت گرفت. مربوط به روشهای عددی همزمان با ظهور کامپیوتر بود. روشهای تفاضل محدود و اجزاء محدود همراه با سری‌های زمانی یک مجموعه وسیعی از مدلهای عددی را فراهم کرد[۱] مدلهای کیفی قادر به پیش بینی تغییرات غلظت پارامترهای مختلف در محیط آبی هستند و بنابراین هدف نهایی آنها ارائه راهکارهایی است تا به وسیله آنها بتوان این عدم تعادل و ناهماهنگی در محیط آبی مثل رودخانه را از بین برد[۳] .

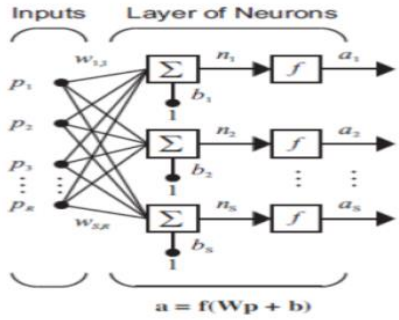
## ۲. مواد و روشها

حوزه آبریز جاجرود با وسعت ۱۸۹۲ کیلومتر مربع با مختصات ۳۵/۲۵ تا ۳۶ درجه عرض شمالی و ۵۱/۲۳ تا ۵۲/۶ طول شرقی در قسمت شرق و شمال شرق تهران قرار گرفته است[۱]. شاخه اصلی این رودخانه به طول ۱۴۰ کیلومتر از ارتفاعات خرسنگ واقع در شمال شرق تهران که جزء دیواره جنوبی ارتفاعات البرز مرکزی به حساب می‌آیند سرچشمه گرفته ، به طرف جنوب امتداد پیدا می کند و پس از عبور از روستای فشم و رسیدن به روستای اوشان و تغییر مسیر به طرف جنوب شرقی و طی مسیر رودک و لشکرک ، وارد دریاچه لتیان می‌شود و پس از سد وارد منطقه جاجرود می گردد.[۵] از جنبه اقلیم ، مجموعه جاجرود در منطقه‌ای معتدل و نسبتا خشک واقع شده است و متوسط بارندگی سالانه آن ۲۵۰ میلیمتر می‌باشد بخشی از حوزه با مساحت ۶۹۲ کیلومتر مربع که بالاتر از سطح سد لتیان قرار دارد ، قسمت عمده آب رودخانه جاجرود را تأمین می کند. بخش دیگر که مساحت آن ۱۲۰۰ کیلومتر مربع می‌شود به علت پائین بودن میزان بارندگی نقش کمتری در تأمین آب رودخانه دارد [۳]. شکل شماره ۱ تقسیمات حوضه سد لتیان و روستاها را نشان میدهد. [۶]

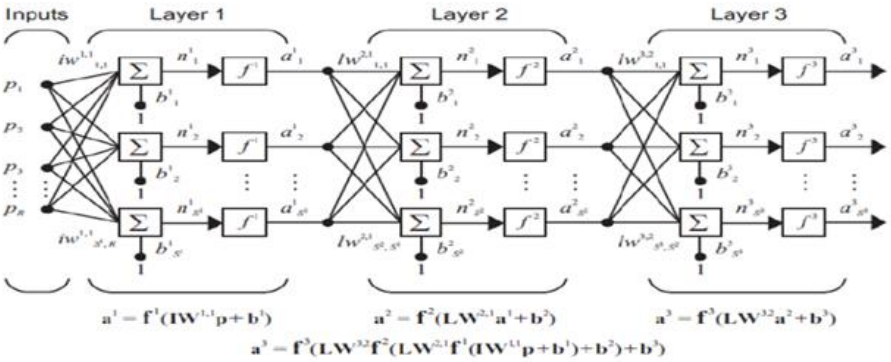
**شکل ۱- تقسیمات منطقه حوضه سد لتیان[٦]**

### شبکه های عصبی مصنوعی(ANN)

شبکه های مصنوعی یک مدل ریاضی یا شکلی از محاسبه الگوریتم با اعمال شبکه سیستم نرون های بیولوژیکی می‌باشد. به طور کاربردی ، شبکه های عصبی ابزار مدل سازی غیر خطی آماری می باشند که برای مدل کردن رابطه پیچیده بین ورودی و خروجی استفاده می‌شود[۸]. دو یا چند نورون می توانند در یک لایه با هم ترکیب شوند و یک شبکه می‌تواند از یک یا چند لایه این چنینی تشکیل شود. در شکل ۲ یک شبکه تک لایه با R ورودی و S نورون نشان داده شده است و شکل ۳ یک شبکه سه لایه را همراه با اطلاعات تفکیک شده برحسب لایه های آن نشان می دهد:




**شکل ۲- شبکه تک لایه با R ورودی و S نورون [۵]**




**شکل ۳ - شبکه سه لایه به همراه اطلاعات تفکیک شده [۵]**

## انتخاب و پیش پردازش داده ها

در ابتدای کار قبل از شروع به تحقیق ، اجرای کسری اقدامات اولیه و اساسی از جمله تعیین یک پریود زمانی نمونه‌برداری کیفی از آب رودخانه و همچنین تعیین طول مشخصی از رودخانه جهت نمونه‌برداری و مطالعه ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق هدف مدلسازی ۲ پارامتر DO ،BOD به وسیله شبکه عصبی میباشد. در اینجا ما یک دوره یک ساله از بهار تا زمستان سال ۱۳۹۴ را در نظر گرفته اما در هر فصل یک ماه به عنوان مدل و شاخص استفاده شده است. به منظور شبیه سازی کیفیت آب رودخانه توسط مدلهای کیفی و واسنجی و تصدیق این گونه مدل‌ها به پارامترهای کیفی آب نیاز می‌باشد. بنابراین بایستی این پارامترها در نقاطی از رودخانه اندازه‌گیری شوند. پارامترهای کیفی که جهت شبیه سازی کیفیت آب رودخانه جاجرود و واسنجی مدل برای این رودخانه به کار برده شدند عبارتند از : BOD و DO . به منظور دستیابی به پارامترهای کیفی مورد نیاز در این تحقیق از همکاری شرکت محترم آب منطقه‌ای تهران استفاده گردید. در اینجا سعی گردید تعدادی ایستگاه محدود که در کل معرف شرایط رودخانه در بازه مورد نظر باشد انتخاب گردد. بدین منظور ۸ ایستگاه انتخاب گردید. در جداول ۱ تا ۴ پارامترهای کیفی رودخانه جاجرود در ایستگاه‌های نمونه برداری ارائه شده است.

**جدول ۱- پارامترهای کیفی رودخانه جاجرود در اردیبهشت ماه در ایستگاه‌های نمونه برداری**

| پارامتر | مخلوط گرمابدر و آب نیک | بعد از زایگان | دو آب | بعد از اوشان | بعد از حاجی آباد | بعد از رودک | بعد از زرد بند | بعد از پل لشکرک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| دما | 9 | 9 | 8 | 10 | 10 | 8 | 8 | 9 |
| اکسیژن محلول | 8.2 | 8.8 | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.4 | 8.8 | 8.2 |
| اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی | 1 | 2 | 1.8 | 1.6 | 2 | 1 | 1.3 | 1 |

**جدول ۲- پارامترهای کیفی رودخانه جاجرود در مرداد ماه در ایستگاه‌های نمونه برداری**

| پارامتر | مخلوط گرمابدر و آب نیک | بعد از زایگان | دو آب | بعد از اوشان | بعد از حاجی آباد | بعد از رودک | بعد از زرد بند | بعد از پل لشکرک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| دما | 13 | 14 | 13 | 13 | 13 | 14 | 14 | 16 |
| اکسیژن محلول | 7.2 | 7.5 | 8.4 | 8.4 | 8.7 | 8.1 | 7.8 | 8.7 |
| اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی | 3.3 | 1 | 3.6 | 1.9 | 4 | 1.7 | 2.1 | 1.5 |

**جدول ۳- پارامترهای کیفی رودخانه جاجرود در آبان ماه در ایستگاه‌های نمونه برداری**

| پارامتر | مخلوط گرمابدر و آب نیک | بعد از زایگان | دو آب | بعد از اوشان | بعد از حاجی آباد | بعد از رودک | بعد از زرد بند | بعد از پل لشکرک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| دما | 4 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 | 10 |
| اکسیژن محلول | 9 | 8.8 | 8.3 | 8.4 | 8.6 | 8.6 | 8.9 | 9.2 |
| اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی | 2.2 | 2.1 | 1.3 | 2 | 1.4 | 1 | 1 | 1.5 |

**جدول ٤- پارامترهای کیفی رودخانه جاجرود در بهمن ماه در ایستگاه‌های نمونه برداری**

| پارامتر | مخلوط گرمابدر و آب نیک | بعد از زایگان | دو آب | بعد از اوشان | بعد از حاجی آباد | بعد از رودک | بعد از زرد بند | بعد از پل لشکرک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| دما | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| اکسیژن محلول | 9.3 | 9.6 | 9.4 | 10.1 | 9.9 | 9.9 | 10.2 | 10.2 |
| اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی | 1 | 1.6 | 1 | 2.2 | 1.5 | 1.2 | 1 | 1 |

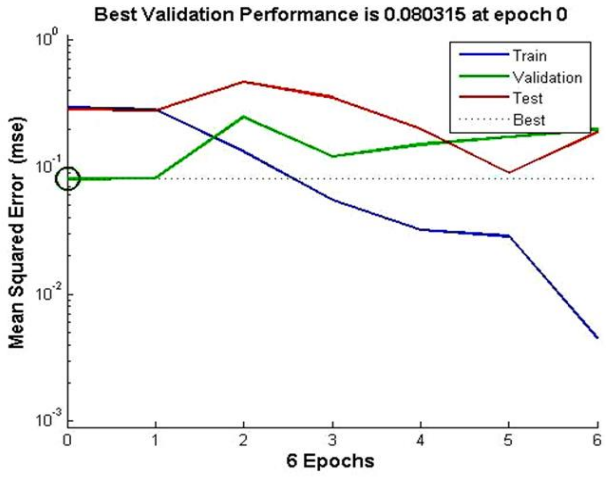
## ۳. بحث و نتایج

با توجه به داده های برداشت شده که طی ۴ ماه از ۸ ایستگاه روی رودخانه جاجرود برداشت شده است، پارامترهای BOD و DO با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی شبیه سازی گردید. برای شبیه سازی BOD و DO از ۶ پارامتر، دما، هدایت الکتریکی، نیترات، فسفات غیر آلی، قلیائیت کل، pH و آمونیاک به عنوان متغیر مستقل و هر کدام از شاخص های BOD و DO به صورت متغیر وابسته در نظر گرفته شد. از ۷۰ درصد طول داده ها برای آموزش و ۳۰ درصد بقیه برای تست شبکه استفاده گردید. برای اجرای شبکه نوع شبکه در حالت پیش فرض Free- backprop forward انتخاب می گردد تا دسترسی و تغییرات برای لایه ها و نرون ها امکان پذیر باشد. تابع آموزش TRINLM و تابع یادگیری LEARNGDM به صورت سعی و خطا و نیز با توجه به پیشنهاد شبکه و نوع داده های مورد استفاده انتخاب گردید. نوع خطا MSE و تعداد ۲ لایه برای آموزش استفاده گردید. همچنین در هر لایه تعداد ۱۰ نرون با توجه به پیشنهاد نرم افزار و نیز تابع انتقال TANSIG با سعی و خطا انتخاب گردید. برای اجرای شبکه ۱۰۰۰ تکرار و حداقل خطا انتخاب گردید. در نهایت داده نتایج هر شبیه سازی بصورت زیر حاصل گردید. لازم به ذکر است از معیار R2 و خطای RMSE برای صحت سنجی مدل استفاده شد. پارامترهای کیفی اندازه گیری شده در رودخانه جاجرود در ۸ ایستگاه به ترتیب زیر برآورد شده است.

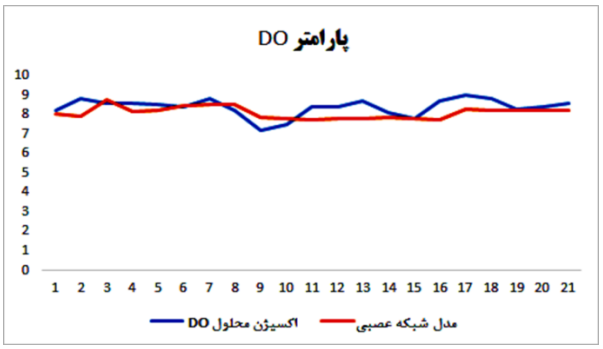
با توجه به نتایج حاصل از داده های برداشت شده، ملاحظه می گردد که مقدار دمای آب از بهار تا انتهای سال در رودخانه جاجرود افزایش و سپس کاهش یافته است. از نکات قابل توجه در این داده ها افزایش چشم گیر اکسیژن محلول در بهمن ماه به نسبت سایر ماهها می باشد. همچنین در مرداد ماه میزان اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی به صورت چشم گیری افزایش یافته و بیشترین میزان را در بین داده ها دارد. همچنین میزان فسفات غیر آلی در اردیبهشت در تمام ایستگاهها بیشتر از سایر ماه ها است. مقدار قلیائیت کل در اردیبهشت ماه کمتر از سه ماه دیگر است اما در سه ماه بعدی این شاخص در همه ایستگاهها چندان تغییر نکرده است. میزان آمونیاک این رودخانه در اردیبهشت ماه به مراتب از سایر ماهها بیشتر می باشد.

### شبیه سازی DO

نتایج حاصل از آموزش شبکه به شکل زیر می باشد. در شکل ۴ تغییرات پارامتر DO با ۶ دوره آموزش مذکور توسط شبکه عصبی شبیه سازی و ترسیم شده است. در این شکل مرحله رسیدن به بهترین جواب با توجه به کمترین خطا مد نظر می باشد. چرا که ملاک خطای شبکه در زمان ساخت شبکه MSE بوده است لذا میزان نرم افزار نیز با توجه به این خطا به بهترین جواب رسیده است. در شکل ۴ تغییرات پارامتر DO در شبیه سازی با شبکه عصبی و در شکل ۵ در مرحله آموزش شبکه نشان داده شده است.

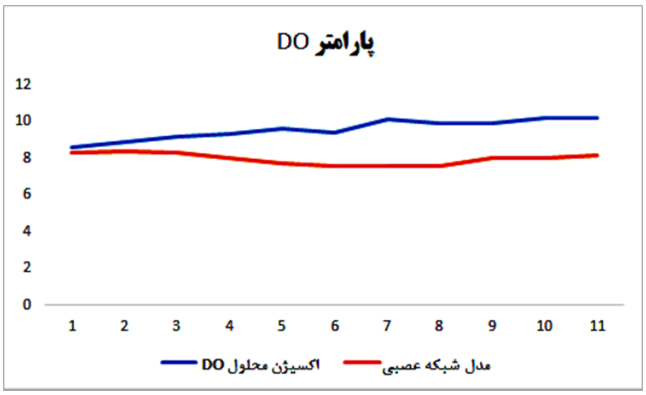



**شکل٤ – تغییرات پارامتر DO در شبیه سازی با شبکه عصبی**



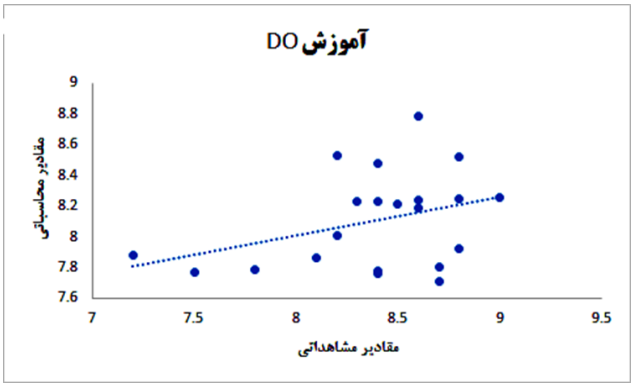

**شکل۵ – تغییرات پارامتر DO در مرحله آموزش شبکه**

با توجه به شکل فوق می توان بیان کردنتایج حاصل از شبکه عصبی برای پارامتر DO در مرحله آموزش، با دقت مناسبی همراه بوده است. بهترین نتیجه در این نوع شبکه در تکرار ۶ حاصل شده است و می توان به این نتیجه رسید استفاده از ۲ لایه با ۱۰ نرون می تواند نتایج مطلوبی را حاصل کند. در شکل ۶ تغییرات پارامتر DO در مرحله تست شبکه نشان داده شده است.



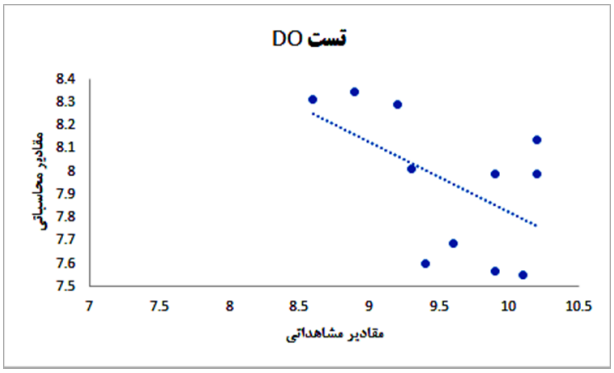

**شکل٦ – تغییرات پارامتر DO در مرحله تست شبکه**

نتایج حاصل نشان می دهد که مرحله تست شبکه از دقت کمتری نسبت به مرحله آموزش برخوردار است. یکی از علت های مهم این امر کوتاه بودن طول داده ها می باشد. چون در این تحقیق تنها ۴ ماه از سال داده برداری شده است، تنها با اتکا به این ۴ سری داده در ۸ ایستگاه مراحل شبیه سازی انجام شده است. همبستگی بین داده های مشاهداتی و محاسباتی برای پارامتر DO به شکل زیر است که مناسب ارزیابی نمی گردد. در شکل ۷ همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی برای پارامتر DO در مرحله آموزش شبکه نشان داده شده است.




**شکل ۷– همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی برای پارامتر DO در مرحله آموزش شبکه**

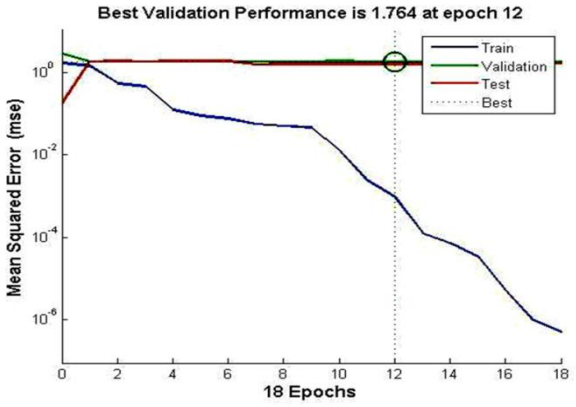
همچنین برای مرحله تست داریم (در شکل ۸ همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی برای پارامتر DO در مرحله تست شبکه نشان داده شده است):



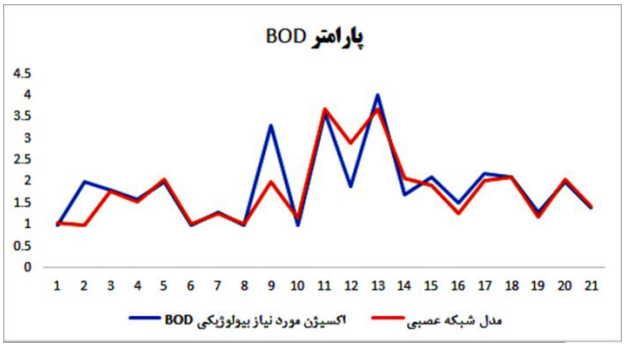

**شکل ۸- همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی برای پارامتر DO در مرحله تست شبکه**

## شبیه سازی BOD

نتایج حاصل از آموزش شبکه به شکل زیر می باشد. در شکل ۹ تغییرات پارامتر BOD با ۱۸ دوره آموزش توسط شبکه عصبی شبیه سازی و ترسیم شده است. در این شکل مرحله رسیدن به بهترین جواب با توجه به کمترین خطا مد نظر می باشد. چرا که ملاک خطای شبکه در زمان ساخت شبکه MSE بوده است لذا میزان نرم افزار نیز با توجه به این خطا به بهترین جواب رسیده است. در شکل ۹ تغییرات پارامتر BOD در شبیه سازی با شبکه عصبی نشان داده شده است.

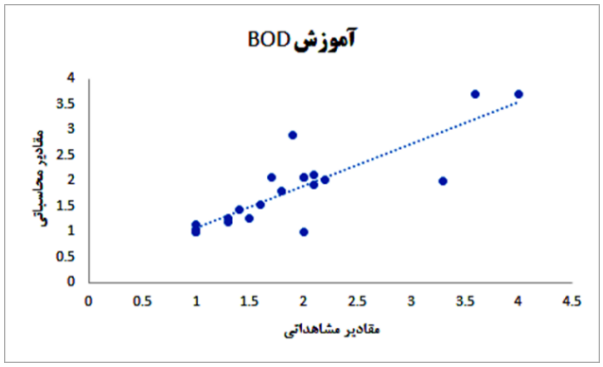



**شکل ۹- تغییرات پارامتر BOD در شبیه سازی با شبکه عصبی**

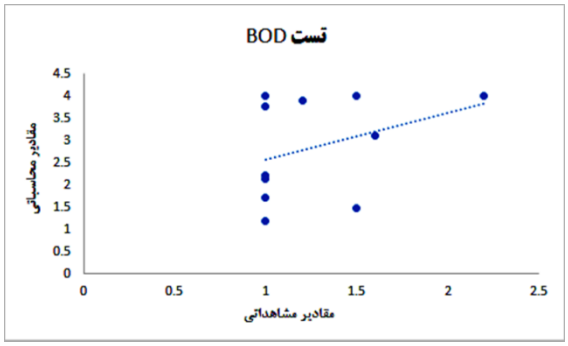



**شکل ۱۰- تغییرات پارامتر BOD در مرحله آموزش شبکه**

در مرحله آموزش برآورد شبکه عصبی با داده های مشاهداتی همخوانی قابل قبولی دارد اما در مرحله تست این روند قابل قبول نمی باشد. البته میزان $R^2$ و خطا نیز باید بررسی گردد تا بطور قطع روی این مورد تحلیل انجام داد. میزان همبستگی برای پارامتر BOD در مراحل آموزش و تست به قرار زیر خواهد بود. در شکل ۱۲ همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی برای پارامتر BOD در مرحله آموزش شبکه نشان داده شده است.




**شکل ۱۲- همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی برای پارامتر BOD در مرحله آموزش شبکه**




**شکل۱۳- همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی برای پارامتر BOD در مرحله تست شبکه**

در حالت آموزش شبکه برای پارامتر BOD همبستگی مطلوبی با توجه به تعداد داده ها مشاهده می گردد و این امر به دلیل توانایی بالای شبکه انتخابی با تعداد لایه ها و نرورن ها می باشد در حالیکه چنین وضعیتی برای تست وجود ندارد و همبستگی کاهش یافته است که این امر به دلیل عدم وجود طول داده کافی است. با توجه به نمودارهای همبستگی به وضوح مشخص است که همبستگی داده های مشاهداتی و محاسباتی نیتریت در هر دو مرحله آموزش و تست مناسب ارزیابی می گردد. برای بررسی بهتر محاسبات مربوط به میزان R2 و خطای RMSE برای تمامی پارامترها در هر دو مرحله آموزش و تست انجام شده است که به صورت زیر گزارش می گردد. در جدول ۵ معیارهای صحت سنجی شبکه عصبی در پارامترهای مختلف ارائه شده است.

**جدول ۵- معیارهای صحت سنجی شبکه عصبی در پارامترهای مختلف**

| پارامتر و معیار های صحت سنجی | BOD | | DO | |
|---|---|---|---|---|
| | آموزش | تست | آموزش | تست |
| R2 | ۰/۷۲ | ۰/۱۳ | ۰/۱۲ | ۰/۲۸ |
| RMSE | ۰/۴۴ | ۱/۸۸ | ۰/۵۱ | ۱/۲۸ |

با توجه به نتایج حاصل از جدول ۵ مشاهده می گردد که شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر برای داده های کیفی رودخانه جاجرود، بهترین عملکرد را در پارامتر اکسیژن بیولوژیکی (BOD) را با $R^2$ ۰/۷۲ برای آموزش و ۰/۱۳ برای تست با خطای ۰/۴۴ برای آموزش و ۱/۸۸ برای تست شبیه سازی کرده است. کارایی شبکه عصبی برای پارامتر DO خوب و قابل قبول نیست. علت عمده این امر نبود طول داده کافی برای آموزش شبکه می باشد. با این وجود پارامتر BOD با دقت مناسبی شبیه سازی شده است. استفاده از دو لایه با ۱۰ نرون جهت پردازش داده ها از یک سو و ماهیت داده های ورودی برای شبیه سازی از سوی دیگر یکی از عوامل مهم در دقت شبکه عصبی برای این دو پارامتر بوده است. با توجه به آنچه بیان گردید، نتایج زیر بصورت خلاصه قابل برداشت است. در این تحقیق استفاده نوع شبکه Free-forward backprop با تعداد ۲ لایه و ۱۰ نرون از طریق سعی و خطا حاصل شده است، برای داده های BOD و نیتریت به ازای استفاده از داده های ورودی موجود نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است. یکی از علل مهم در عدم دقت مدل در شبیه سازی پارامترها عدم وجود طول داده کافی برای آموزش و درنهایت برای تست شبکه می باشد. با توجه به عدم آموزش درست شبکه که عمدتا از داده های کم یا ورودی های غیر مرتبط بوجود می آید، تست یا همان پیش بینی شبکه نیز با مشکل روبرو خواهد بود. همچنین نتایج حاصل از مقایسه با سایر محققان نشان داد که نه تنها طول دوره آماری مورد استفاده در تخمین و شبیه سازی شبکه عصبی بسیار موثر است، بلکه استفاده از داده های ورودی با ماهیت مرتبط که بر روی مدل خروجی تاثیر مستقیم دارند بسیار مهم و قابل تامل است. لذا لزوماً استفاده از هر نوع داده ورودی نمی تواند باعث بهتر شدن نتایج شبیه سازی گردد.

## ۴. مراجع

۱- فرامز ، محمد ؛ مدل ریاضی یک بعدی انتقال آلودگی در کانالهای مرکب ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، سازه‌های آبی ، دانشکده کشاورزی ، دانشگاه تربیت مدرس ، سال ۱۳۸۲ ، ص۳۲

۲- میثاقی ، ف و محمدی ، ک ؛ پیش بینی تغییرات کیفیت اب رودخانه زاینده رود با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ، دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک ، دانشکده کشاورزی ، دانشگاه شیراز ، سال ۱۳۸۳ ، ص ۱۰.

۳- هاشمی منفرد ، آرمان ؛ تهیه مدل سه بعدی انتقال و پخش پارامترهای کیفی و لایه بندی آنها در مخازن سدها ، پایان نامه دکتری دانشکده مهندسی عمران ، دانشکده صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی ، سال ۱۳۹۰ ، ص ۳

۴- بیات ، حو. ۱۳۷۰ ، مجموعه مناطق جاجرود ، انتشارات سازمان محیط زیست ، ص ۶۷-۶۹

۵- براتی, فرناز. (۱۳۹۲). مدلسازی آلودگی رودخانه جاجرود تهران از مدل QUAL2K. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

۶- یوسف دوست, ایسن؛ ام البنین محمدرضاپور؛ آرش یوسف دوست و ناهید زرین دست، ۱۳۹۳، مقایسه شبکه عصبی مصنوعی GRNN,MLP و روش LMR در پیش بینی جریان ماهانه رودخانه و بهینه سازی برنامه ریزی و مدیریت منابع اب جاجرود، *همایش ملی آب، انسان و زمین*، اصفهان، شرکت توسعه سازان گردشگری اصفهان، http://www.civilica.com/Paper-WHEC01-WHEC01_218.html

۷- کلاغچیان، رضا. (۱۳۸۷). "کاربرد تئوری آنتروپی در طراحی بهینه سیستم های پایش رودخانه ها مطالعه موردی رودخانه جاجرود. طرح تحقیقات کاربردی معاونت پژوهش و مطالعات پایه کمیته تحقیقات شرکت آب منطقه ای تهران"

۸- بهرامی، س. (۱۳۹۲). "مدل سازی فرایندهای رأکتور هوادهی تصفیه فاضلاب با استفاده از شبکه عصبی هوشمند. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی تهران."