

# مدل‌سازی ارتباط کیفیت آب‌های سطحی و سنج‌های سیمای سرزمین با استفاده از سیستم استنتاج عصبی - فازی (مطالعه موردی: استان مازندران)

محسن میرزایی<sup>۱</sup>، علیرضا ریاحی بختیاری<sup>۲</sup>، عبدالرسول سلمان ماهینی<sup>۳</sup>، مهدی غلامعلی فرد<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران  
۲- دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران  
(نویسنده مسئول) ۴۴۵۵۳۱۰۱ (۰۱۱) riahi@modares.ac.ir  
۳- دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
۴- استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران

(دریافت ۹۲/۷/۸ پذیرش ۹۳/۴/۲۰)

## چکیده

تغییرات کیفیت آب، رویکرد مناسبی برای پایش آلودگی‌های غیر نقطه‌ای است. در مطالعه حاضر، اطلاعات کیفیت آب ۸۱ ایستگاه آبسنجی واقع بر رودخانه‌های استان مازندران در خلال سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ مورد بررسی قرار گرفت. مرز زیر حوضه‌های بالادست ایستگاه‌ها ترسیم شد و سنج‌های سیمای سرزمین در دو سطح کلاس و سیما برای زیر حوضه‌های موجود استخراج شدند. از تحلیل مولفه‌های اصلی برای تعیین پارامترهای کیفیت آب و از رگرسیون خطی پیشرو به منظور تعیین سنج‌های بهینه در توصیف تغییرات هر کدام از پارامترها استفاده شد. پنج مؤلفه اول قادر به توصیف ۹۶/۶۱ درصد از تغییرات کیفیت آب رودخانه‌های استان مازندران بودند. برای مدل‌سازی ارتباط میان سنج‌های سیمای سرزمین و پارامترهای کیفیت آب از شبکه عصبی-فازی تطبیقی و رگرسیون چند متغیره خطی استفاده شد. نتایج حاکی از بود رگرسیون چند متغیره خطی توانسته است پارامترهای SAR، TDS، pH، NO<sub>3</sub> و PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> را با ضریب تبیین ۰/۸۱، ۰/۵۶، ۰/۷۳، ۰/۴۴ و ۰/۶۳ در مرحله آزمون پیش‌بینی نماید. این در حالی است که ضریب تبیین شبکه عصبی-فازی به ترتیب برابر با ۰/۸۲، ۰/۷۹، ۰/۸۲، ۰/۳۱ و ۰/۳۶ بوده است. بنابراین، شبکه عصبی-فازی در اغلب موارد کارایی بالاتری داشته و این امر ارتباط غیر خطی میان پارامترهای کیفیت آب و سنج‌های سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. از آنجا که کاربری‌ها و پوشش سرزمین مختلف در حوضه دارای تأثیر زیادی بر کیفیت آب خروجی، آلاینده‌های در دسترس و بار مواد محلول در رودخانه‌ها هستند، استفاده از روش این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری تکمیلی در برنامه‌ریزی منطقه‌ای و ارزیابی اثرات محیط زیستی در برنامه‌های توسعه مطرح شود.

**واژه‌های کلیدی:** سنج‌های سیمای سرزمین، کاربری اراضی، پوشش اراضی، شبکه تطبیقی عصبی-فازی، استان مازندران

## ۱- مقدمه

سطحی و زیرزمینی آب به راحتی قابل اجرا نیست [۸]. کاربری اراضی در حوضه، دارای تأثیر معنی‌داری بر روی کیفیت و کمیت رواناب است [۹]. فعالیت‌های انسان، تعیین کننده مسیرهای زهکش جریان‌های آب بر روی سطح زمین و نیز تعیین کننده نوع و میزان آلاینده‌های قابل دسترس در آب‌های سطحی هستند [۱۰]. به‌طور تجربی مشاهده شده که رواناب زمین‌های کشاورزی، مقادیر زیادی مواد مغذی و رسوب به همراه دارد. این در حالی است که روانابی که از جاده عبور می‌کند، دارای سدیم و سولفات بیشتری است و روانابی که از مناطق پر تراکم شهری عبور کرده است، دارای فلزات سنگین و قطعات لاستیکی است [۱۱]. بنابراین، وجود یک ارتباط قوی میان پوشش سرزمین و کیفیت آب‌های سطحی غیر قابل انکار است [۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵]. برخی مطالعات برای بیان ارتباط میان کاربری اراضی و کیفیت آب تنها نوع و میزان (درصد و یا وسعت) کاربری‌های مختلف،

کیفیت آب به‌عنوان یک عامل کلیدی در بخش‌های مختلف مانند صنعت، شرب و کشاورزی مطرح است. عوامل متعددی بر روی سلامت آب‌های سطحی اثرگذاراند، به‌طوری که کیفیت آب در هر نقطه از یک رودخانه، بیان کننده تأثیرات عمده آن از پوشش زمین و کاربری‌های موجود، شرایط آب و هوایی، نزولات جوی، تراکم جمعیت، تراکم دام، سنگ شناسی و خاکشناسی حوضه و سایر متغیرهای محیطی است [۷-۱]. به‌طور کلی، می‌توان منابع آلوده‌کننده آب را به دو دسته نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای<sup>۱</sup> تقسیم کرد. آلودگی حاصل از منابع نقطه‌ای با روش‌های مختلف عملاً قابل مهار هستند، اما این موضوع در مورد منابع غیرنقطه‌ای به دلیل نامشخص بودن نوع، مقدار، محل و چگونگی ورود آلاینده‌ها به جریان‌های

<sup>۱</sup> Non-Point Sources Pollution

رونده خطی اشاره نمود [۲۵]. طبق پژوهش‌های انجام شده در حوضه‌های استان مازندران، طی دو دهه اخیر تغییرات کاربری و به‌خصوص افزایش سطح مناطق مسکونی و صنعتی با سرعت بیشتری همراه بوده است و استقرار نامناسب کاربری‌ها بیش از پیش قابل رویت است [۲۶، ۲۷، ۲۸]. این امر موجب اختلال در سیستم طبیعی زهکش منطقه و تغییر در میزان و سهم آلاینده‌های در دسترس جریان‌های سطحی و در نهایت تغییر در کیفیت این جریان‌ها خواهد شد. از این رو، در اختیار داشتن ابزارهای مکانی برای کمی‌سازی و درک ارتباط میان الگوهای پراکنش کاربری اراضی و پارامترهای کیفیت آب سطحی می‌تواند راهکارهایی برای محافظت و افزایش بقای این اکوسیستم‌ها و گام نهادن در جهت مدیریت و توسعه پایدار این مناطق ارائه نماید.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در عرض جغرافیایی  $35^{\circ}45'$  تا  $36^{\circ}59'$  و طول جغرافیایی  $50^{\circ}10'$  تا  $54^{\circ}42'$  واقع شده است و مساحت آن برابر با  $2613213$  هکتار است. بخش عمده‌ای از منطقه مطالعاتی در استان مازندران قرار دارد و علاوه بر مازندران، قسمت‌هایی از استان‌های تهران و گلستان را پوشش می‌دهد (شکل ۱). بیشتر رودخانه‌های جاری در مازندران دائمی هستند، طول رودخانه‌های غرب این استان به دلیل نزدیک بودن کوهستان به دریا، کوتاه‌تر و رودهای شرقی طولانی‌تر است. تراکم آبراهه در منطقه مورد مطالعه برابر با  $2/33$  کیلومتر در هکتار است و شامل رودخانه‌های بزرگی مانند بابلرود، تجن، سیاهرود، هراز، نکارود، سردآبرود، چشمه کیله، گلندرود، گرمابرو، چالوس رود، نسا رود، چالکرو، صفارود به همراه زیرشاخه‌ها و سایر رودخانه‌های موجود در این منطقه است. منشأ اغلب رودخانه‌های این استان از رشته کوه‌های البرز است که پس از گذر از استان به دریای مازندران ریخته می‌شوند. در مسیر این رودخانه‌ها شهرها و مناطق مسکونی، اراضی کشاورزی و نیز صنایع و حوضچه‌های پرورش ماهی متعددی وجود دارد که پساب هر کدام می‌تواند اثرات مخربی بر کیفیت آب رودخانه برجای گذارد. پوشش غالب منطقه مطالعاتی جنگل است و میانگین بارندگی سالانه در نوار ساحلی استان برابر با  $977$  میلی‌متر است. توزیع مکانی بارندگی از غرب به شرق با کاهش همراه است در حالی که توزیع زمانی آن وضعیتی تقریباً منظم دارد.

### ۲-۲- مراحل انجام تحقیق

در مطالعه حاضر، اطلاعات کیفیت آب ۸۱ ایستگاه آبسنجی واقع

نظیر کاربری شهری، کشاورزی، جنگل و مرتع را در نظر می‌گیرند. برخی دیگر از سنجه‌های سیمای سرزمین که متغیرهای کمی بیشتری از کاربری‌های موجود در سیمای سرزمین فراهم می‌کند و می‌تواند ارائه دهنده تحلیل مناسب‌تری از این ارتباط باشند، استفاده کرده‌اند [۱۶]. سلاجقه و همکاران در سال ۱۳۸۹، به بررسی اثرات تغییر کاربری بر کیفیت آب رودخانه‌های حوضه آبخیز کرخه پرداختند [۱۷]. نتایج آنها رشد شدید کاربری مسکونی در اغلب زیرحوضه‌ها را نمایش داده است که تأثیر معنی‌داری بر روی افت کیفیت آب، به‌ویژه در افزایش پارامترهای EC، TDS و SAR و آنیون‌ها و کاتیون‌ها داشته است. نعمتی و همکاران در سال ۱۳۸۶ ارتباط میان مقادیر نترات و فسفات رودخانه زاینده‌رود با کاربری اراضی موجود در این حوضه را بررسی کردند [۱۸]. در مطالعه‌ای دیگر، وو و همکاران در سال ۲۰۱۲، از سنجه‌های سیمای سرزمین برای پیش‌بینی کیفیت آب استفاده کردند و توانایی مدل‌های آلومتریک و مدل‌های رگرسیونی چندگانه خطی را در این پیش‌بینی مقایسه نمودند [۱۹]. نتایج آنها نشان داد که در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه سنتی، مدل‌های آلومتریک عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند.

قابل ذکر است که رگرسیون چندگانه خطی، بیشترین کاربرد در مدل‌سازی ارتباط میان پارامترهای کیفیت آب و سنجه‌های سیمای سرزمین را داشته است [۱۱ و ۲۰]. این در حالی است که ارتباط میان متغیرها، اغلب از الگوهای غیر خطی پیروی می‌نماید و مدل‌های رگرسیونی با پایه خطی، قادر به توصیف این ارتباطات نیستند [۶]. در این میان، سیستم‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه مدل تطبیقی عصبی-فازی، به‌عنوان روش محاسباتی بسیار قدرتمند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی روابط غیر خطی و پیچیده به‌خصوص در شرایطی که به‌صورت صریح و روشن از رابطه بین متغیرهای مورد استفاده شناخت کافی وجود ندارد، مطرح است و در بسیاری مطالعات، نتایج قابل قبول داشته است [۲۱ و ۲۲].

از آنجا که سنجه‌های سیمای سرزمین دارای تعدد و تنوع زیادی هستند، یکی از مهم‌ترین معضلات در استفاده از آنها، انتخاب سنجه‌های بهینه است [۲۳ و ۲۴]. باید در نظر داشت سیستم‌های هوش مصنوعی فاقد ساز و کارهایی برای انتخاب متغیرهای بهینه‌اند و تعدد ورودی‌ها، موجب کاهش کارایی فرایند مدل‌سازی می‌شود [۲۲]. بنابراین نیاز است قبل از فرایند مدل‌سازی، ورودی‌های بهینه که بهترین توصیف را از متغیر پاسخ (پارامترهای کیفیت آب) داشته باشند، تعیین شوند. رویکردهای بسیاری برای کاهش ورودی‌ها و انتخاب متغیرهای پاسخ و مستقل مناسب وجود دارد که از این قبیل می‌توان به تحلیل مولفه‌های اصلی و رگرسیون پیش

سنج‌های سیمای سرزمین قادراند ابعاد مختلفی از سیما را به صورت کمی نمایش دهند. از رگرسیون خطی پیشرو برای کاهش ورودی‌ها و تعیین سنج‌های بهینه که دارای بیشترین ارتباط با پارامترهای اصلی کیفیت آب باشند، استفاده شد. همچنین، از شبکه عصبی-فازی تطبیقی و رگرسیون چند متغیره خطی برای مدل‌سازی ارتباط میان سنج‌های سیمای سرزمین و پارامترهای کیفیت آب استفاده شد. در نهایت بهترین مدل‌ها برای هر کدام از پارامترها تعیین شد. شکل ۲، نمودار جریانی مطالعه حاضر را به طور خلاصه نمایش می‌دهد.

### ۲-۳- تحلیل مؤلفه‌های اصلی

هدف اصلی استفاده از تحلیل عاملی، کاهش حجم داده‌ها و تعیین مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در شکل‌گیری پدیده‌ها است. تناسب جامعه آماری برای انجام PCA به وسیله آزمون<sup>۱</sup> KMO<sup>۱</sup> سنجیده شد و به منظور بهبود روابط بین ورودی‌ها و مؤلفه‌های اولیه و نیز تفکیک بهتر آنها برای عضویت در مؤلفه‌ها، از چرخش (واریمکس<sup>۲</sup>) استفاده شده است [۳۰ و ۳۱]. در PCA، تعداد عوامل اصلی که قادر باشند توصیف جامعی از متغیرها داشته باشند، تعیین می‌شوند و متغیرها با توجه به میزان همبستگی با این مؤلفه‌ها، در زیر گروه آنها قرار می‌گیرند. در نهایت از روی بیشینه بار عاملی، متغیرهای اصلی در هر مؤلفه تعیین می‌شوند [۲۴].

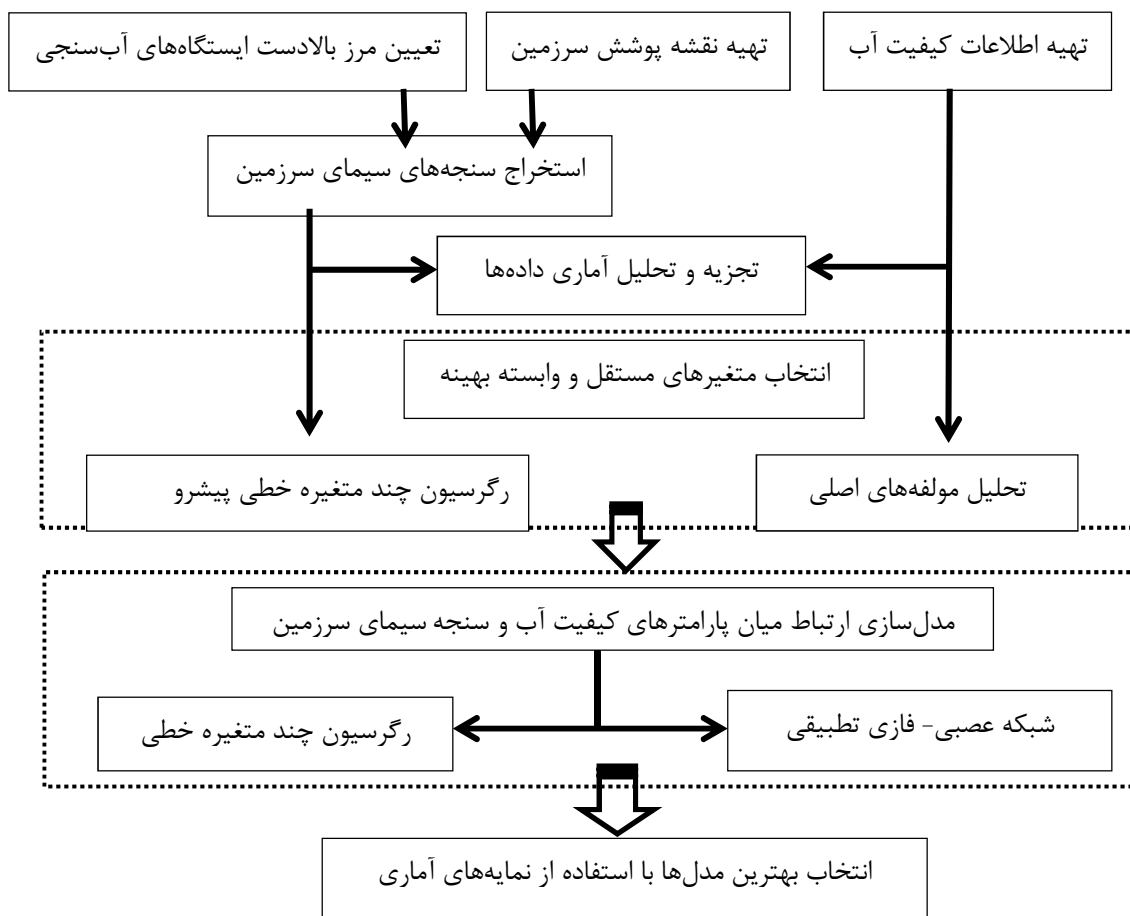
بر رودخانه‌های استان مازندران از شرکت آب منطقه‌ای تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. مرز بالادست ایستگاه‌ها به وسیله نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور و با توجه به مرز تهیه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب استان مازندران، با روش رقومی سازی دستی تهیه شد. یک فرایند ترکیبی چند مرحله‌ای همراه با بهره‌گیری از منابع متعدد شامل تصاویر سنجنده‌های TM و ETM<sup>+</sup> ماهواره لندست، تصاویر رنگ مجازی Google Earth و نقشه‌های طبقه‌بندی سنجنده مودیس (IGBP) ماهواره Terra برای دستیابی به صحت بالای نقشه کاربری/پوشش سرزمین مربوط به سال ۱۳۸۹ استفاده شد [۲۹]. در مرحله بعد، کاربری اراضی موجود در بالادست ایستگاه‌های آبنجی، برش داده شد. در بررسی حاضر، با توجه به مطالعاتی که دیگر محققان در این زمینه انجام داده‌اند و نیز رایج بودن برخی سنج‌ها، ۲۴ سنج در سطح کلاس و ۳۹ سنج در سطح سیما، در محیط نرم افزار Fragstats 4.1، برای مدل‌سازی ارتباط آنها با پارامترهای کیفیت آب انتخاب و استخراج شدند.

پارامترهای کیفیت آب شامل EC، pH، NO<sub>3</sub><sup>-</sup>، PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>، CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>، HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>، SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>، Ca<sup>2+</sup>، Mg<sup>2+</sup>، K<sup>+</sup>، Na<sup>+</sup>، SAR، Na% و Per.H در خلال سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ برداشت شدند. پارامترهای ذکر شده دارای همپوشانی هستند، لذا برای دستیابی به پارامترهای اثرگذار و پرهیز از ورودی‌های یکسان، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تعیین مهم‌ترین پارامترهای کیفیت آب رودخانه‌های مازندران استفاده شد.

<sup>1</sup> Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)  
<sup>2</sup> Varmix



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی (حوضه‌های استان مازندران) و پراکنش مکانی ایستگاه‌های آبنجی



شکل ۲- نمودار جریان‌ی روش کار

است [۲۱]. در مطالعه حاضر سنج‌های سیمای سرزمین به‌عنوان متغیرهای مستقل (ورودی به مدل) و پارامترهای کیفیت آب به‌عنوان متغیرهای پاسخ (خروجی مدل) در نظر گرفته شدند و انتخاب متغیرهای مدل از طریق روش‌های کاهش داده که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد (رگرسیون متغیره خطی پیشرو و تحلیل مؤلفه‌های اصلی)، انجام شد. ساختار مناسب عصبی-فازی تطبیقی متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت ورودی، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می‌شود. برای بررسی تأثیر نوع طبقه‌بندی داده‌ها بر روی عملکرد مدل شبکه عصبی-فازی تطبیقی، از هر دو روش تفکیک شبکه‌ای با توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی، ناقوس‌تعمیم یافته و چند جمله‌ای و تفکیک خوشه‌ای استفاده شد. برای هر دو روش تعداد توابع عضویت بین ۲ تا ۵، تغییر داده شد. بعد از انتخاب روش بهینه‌سازی هیبرید<sup>۱</sup> تعداد و نوع توابع عضویت بهینه در هر یک از مدل‌ها تعیین شد. با استفاده از تفکیک خوشه‌ای، شعاع تأثیر از ۰/۰۲ تا ۰/۷۰ تغییر داده شد و مدل بهینه تعیین شد.

<sup>۱</sup> Hybrid

#### ۲-۴- رگرسیون چند متغیره خطی پیشرو

در مطالعه حاضر بنابر سنج‌های استخراج شده در سطح کلاس (هفت کلاس کاربری) و سیما در مجموع ۲۰۷ سنج (۲۰۷ =  $24 \times 7 + 39$ ) وجود دارد که در واقع متغیرهای مستقل برای پارامترهای اصلی کیفیت آب (که در تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخاب می‌شوند) هستند. بنابراین، لازم است تعداد ورودی‌های مدل را کاهش داد و سنج‌های بهینه که دارای توصیف بهتری از هر کدام از پارامترهای کیفیت آب هستند، وارد مدل شوند. از آنجا که رگرسیون چندگانه خطی پیشرو کارایی خوبی در انتخاب متغیرهای مستقل و کاهش ورودی‌ها دارد، از این رویکرد استفاده شده است [۳۲]. در این مطالعه پس از تعیین شدن پارامترهای اصلی کیفیت آب، به‌طور جداگانه سنج‌های بهینه انتخاب شدند.

#### ۲-۵- شبکه عصبی-فازی تطبیقی

مدل تطبیقی عصبی-فازی از مزیت منطق فازی در بیان عدم قطعیت و توانایی شبکه عصبی مصنوعی در آموزش و یادگیری بهره برده است و به‌عنوان رویکردی با توانایی‌های ترکیبی بالا مطرح

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- پوشش اراضی زیر حوضه های استان مازندران

نقشه پوشش اراضی با هفت طبقه، شامل مناطق مسکونی، جنگل، منابع آب سطحی (سدها و تالابها)، اراضی کشاورزی، اراضی مرتعی، اراضی بایر و جاده ها تهیه شد (شکل ۴). شایان ذکر است، صحت طبقه بندی با استفاده از آماره کاپا برابر با ۹۱ درصد بوده است که حاکی از صحت بالا و مقبولیت نقشه ذکر شده برای استفاده در مطالعه حاضر است.

#### ۳-۲- تعیین پارامترهای اصلی در توصیف کیفیت آب رودخانه های استان مازندران

طبق نتایج به دست آمده، مؤلفه های اول تا پنجم به ترتیب ۶۴/۳۷، ۱۴/۰۵، ۸/۸۷، ۶/۶۵ و ۲/۶۶ درصد از واریانس جامعه را توصیف می نمایند و در مجموع ۹۶/۶۱ درصد از واریانس جامعه توسط پنج مؤلفه اول توصیف شده است. بنابراین پنج مؤلفه اول، به عنوان بهترین مؤلفه ها در توصیف تغییرات کیفیت آب رودخانه های استان مازندران انتخاب شدند. انتخاب پارامترهای اصلی کیفیت آب بر این اساس بوده است که در هر مؤلفه، مطابق با نظر کارشناسی، پارامترهایی که دارای بیشترین مقدار (مثبت یا منفی) بار عاملی هستند، بیشترین همبستگی و در نتیجه بهترین نماینده برای توصیف آن مؤلفه می باشند [۳۰].

در مؤلفه اول، پارامترهای TDS، EC، Cl<sup>-</sup>، Sum A، Na<sup>+</sup>، Sum K، SAR و Na% به ترتیب دارای بار عاملی برابر با ۰/۸۶، ۰/۸۶،

در نهایت برای هر یک از مدل های شبکه عصبی - فازی تطبیقی که به روش شبکه ای و خوشه ای تهیه شدند، پارامترهای کیفیت آب پیش بینی شدند. شایان ذکر است فرایند ذکر شده در محیط نرم افزار متلب<sup>۱</sup> انجام شد. شکل ۳، نمایی از شبکه عصبی - فازی تطبیقی به همراه ورودی ها و خروجی های مدل مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

#### ۲-۶- ارزیابی مدل ها

در مطالعه حاضر به صورت تصادفی، ۷۰ درصد از داده ها برای آموزش<sup>۲</sup> و ۳۰ درصد داده ها برای آزمون<sup>۳</sup>، استفاده شده اند. به منظور مقایسه مدل های مورد استفاده در این تحقیق برای برآورد پارامترهای کیفیت آب از نمایه های آماری ضریب کارایی ناش - ساتکلیف<sup>۴</sup>، مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> و ضریب تبیین<sup>۶</sup> استفاده شد. مقدار RMSE بین صفر و یک قرار دارد و مقدار آن هر چه به صفر نزدیک تر باشد، نشان از دقت بالای مدل است. مقدار CE بین منفی بی نهایت و یک قرار دارد و مقدار آن هر چه به ۱ نزدیک تر باشد، نشان از کارایی بالای مدل در برآورد پارامتر مورد نظر است. همچنین مقدار R<sup>2</sup> بین ۰ تا ۱ است که مقدار نزدیک به ۱ بهترین وضعیت را نمایش می دهد.

<sup>1</sup> Matlab 7.2

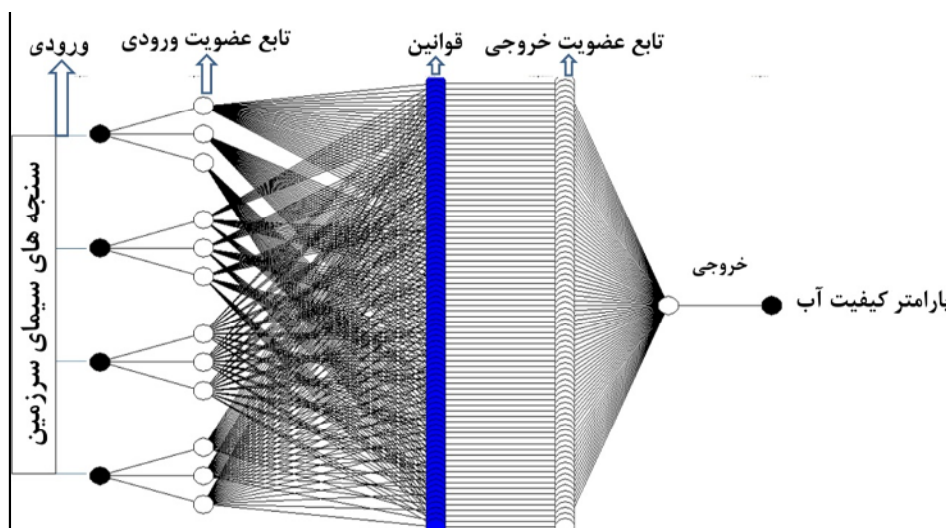
<sup>2</sup> Training

<sup>3</sup> Test

<sup>4</sup> Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (CE)

<sup>5</sup> Root Mean Square Error (RMSE)

<sup>6</sup> Determination Coefficient (R<sup>2</sup>)

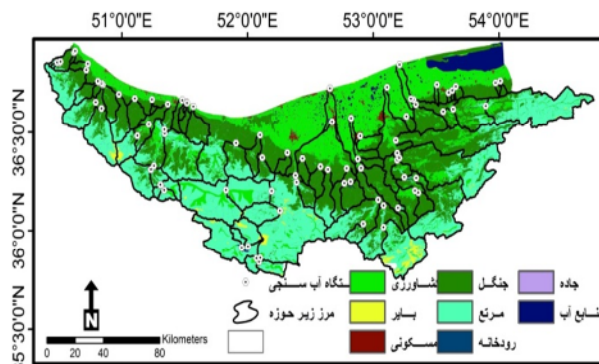


شکل ۳- ساختار شبکه عصبی - فازی تطبیقی مورد استفاده در تحقیق

۰/۸۹ هستند (جدول ۱). اجزای این مؤلفه بیان‌کننده عوامل مؤثر در اسیدیته آب می‌باشند، لذا در این مؤلفه pH به دلیل داشتن بیشترین بار عاملی و نیز استفاده رایج از آن در مطالعات مشابه به‌عنوان پارامتر اصلی انتخاب شده است [۳۶ و ۳۷]. در مؤلفه سوم TDS، EC،  $SO_4^{2-}$ ،  $Ca^{2+}$  و  $K^+$  بیشترین بار عاملی را داشتند (به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۶۹، ۰/۶۸، ۰/۷۵ و ۰/۶۶). پارامترهای TDS و EC دارای همبستگی یکسانی با این مؤلفه هستند و به‌عنوان پارامترهای معرف این مؤلفه انتخاب شدند. از آنجا که این دو پارامتر اهمیت زیادی در بیان کیفیت آب برای کشاورزی دارند [۳۳ و ۳۵]. از میان دو پارامتر ذکر شده، TDS به‌عنوان نماینده این مؤلفه انتخاب شده است. مؤلفه چهارم و پنجم، یعنی پارامترهای  $NO_3^-$  و  $PO_4^{3-}$  که نشان‌دهنده مواد مغذی آب هستند، به‌عنوان پارامترهای تعیین‌کننده در توصیف کیفیت آب رودخانه‌ها استفاده شدند. مطابق با جدول ۱،  $NO_3^-$  و  $PO_4^{3-}$  دارای همبستگی برابر با ۰/۹۵ با مؤلفه‌های چهارم و پنجم بوده است.

### ۳-۳- تعیین سنج‌های بهینه در توصیف پارامترهای کیفیت آب

باتوجه به تعدد سنج‌ها، یکی از مسائل در امر استفاده از این سنج‌ها، انتخاب سنج مناسب از میان آنها است [۳۸ و ۳۹]. در این میان، استفاده از فنون آماری چند متغیره در انتخاب سنج‌های



شکل ۴- نقشه پوشش اراضی سال ۱۳۹۰ منطقه مطالعاتی و زیر حوضه‌های بالادست ایستگاه‌های آبنسجی

۰/۹۸، ۰/۸۵، ۰/۹۸، ۰/۸۴، ۰/۹۸، ۰/۸۴ و ۰/۸۴ هستند. پارامترهایی که بیشترین بار عاملی را در این مؤلفه دارند، اغلب نمایش‌دهنده یون‌های محلول در آب می‌باشند. مطابق با جدول ۱، در میان پارامترهای موجود در مؤلفه اول، SAR دارای بیشترین بار عاملی است (برابر با ۰/۹۸) و به‌عنوان پارامتر اصلی این مؤلفه انتخاب شده است. دلیل دیگر انتخاب این پارامتر به‌عنوان نماینده مؤلفه اول، قابلیت بالای این شاخص در تعیین مطلوبیت آب برای استفاده در کشاورزی است. در مطالعات زیادی از شاخص SAR به‌عنوان یکی از بهترین شاخص‌های کیفیت آب برای کشاورزی استفاده شده است [۳۳، ۳۴ و ۳۵]. در مؤلفه دوم pH،  $CO_3^{2-}$  و  $HCO_3^-$  به ترتیب دارای بار عاملی برابر با ۰/۹۴، ۰/۹۲ و

جدول ۱- بار عاملی پارامترهای کیفیت آب در پنج مؤلفه اصلی

مؤلفه‌ها					پارامترهای کیفیت آب
مؤلفه ۵	مؤلفه ۴	مؤلفه ۳	مؤلفه ۲	مؤلفه ۱	
۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۶۹	۰/۲۶	۰/۸۶	TDS
۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۶۹	۰/۲۸	۰/۸۶	EC
۰/۰۲۲	۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۹۴	۰/۰۸	pH
۰/۲۶	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۹	$PO_4^{3-}$
۰/۹۵	۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۹	$NO_3^-$
۰/۰۶	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۹۲	۰/۰۵	$CO_3^{2-}$
۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۸۹	۰/۳۸	$HCO_3^-$
۰/۰۸۱	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۹۸	$Cl^-$
۰/۰۳۲	۰/۰۱	۰/۶۸	۰/۰۰	۰/۱۹	$SO_4^{2-}$
۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۴۳	۰/۲۸	۰/۸۵	SumA
۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۷۵	۰/۴۰	۰/۵۱	$Ca^{2+}$
۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۵۹	۰/۵۲	۰/۵۴	$Mg^{2+}$
۰/۰۰۷	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۹۸	$Na^+$
۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۶۶	۰/۴۷	۰/۵۶	$K^+$
۰/۰۰۴	۰/۰۲	۰/۴۵	۰/۲۹	۰/۸۴	Sum.K
۰/۰۰۴	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۹۸	SAR
۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۲۴	۰/۲۰	۰/۸۴	%Na
۰/۰۱	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۷۷	۰/۴۰	Tem.H
۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۶۰	۰/۴۳	۰/۵۲	Per.H

جنگل<sup>۱۱</sup>، تراکم حاشیه کشاورزی<sup>۱۲</sup> و دایره محدود کننده کشاورزی<sup>۱۳</sup> هستند (جدول ۲). سایر سنج‌ها از روند مطالعه حذف شدند.

### ۳-۳-۳- سنج‌های بهینه برای TDS

مطابق با جدول ۲، درصد مساحت جنگل<sup>۱۴</sup>، شاخص بزرگ‌ترین لکه جنگل<sup>۱۵</sup>، میانگین فاصله اقلیدسی نزدیک‌ترین همسایه مسکونی<sup>۱۶</sup>، شاخص دایره محدود کننده مسکونی<sup>۱۷</sup> و میانگین شاخص شکل کشاورزی<sup>۱۸</sup> به‌عنوان بهترین متغیرهای مستقل به مرحله بعد (مدل‌سازی کیفیت آب) معرفی شدند.

### ۳-۳-۴- سنج‌های بهینه برای $PO_4^{3-}$

در مورد فسفات نیز سنج‌های بهینه، غالباً سنج‌هایی در سطح کلاس هستند و سنج‌ها در سطح سیما از روند مطالعه حذف شدند. بنابراین درصد مساحت کشاورزی<sup>۱۹</sup>، تراکم حاشیه مسکونی، تقسیم شدگی مسکونی<sup>۲۰</sup>، نسبت محیط به مساحت مسکونی<sup>۲۱</sup>، شاخص نرمال شده شکل مرتع<sup>۲۲</sup>، تکه شدگی کشاورزی<sup>۲۳</sup> و شاخص پیوستگی مسکونی<sup>۲۴</sup> به‌عنوان متغیرهای مستقل بهینه، در توصیف تغییرات فسفات موجود در آب رودخانه‌های استان مازندران انتخاب شدند (جدول ۲). بر اساس معادله رگرسیونی ۳-۴، تمامی سنج‌های ذکر شده، موجب افزایش مقادیر فسفات در آب رودخانه‌ها می‌شوند (جدول ۳).

### ۳-۳-۵- سنج‌های بهینه برای $NO_3^-$

سنج‌های درصد مساحت جنگل، درصد مساحت کشاورزی، تراکم حاشیه منابع آب، میانگین چین‌خوردگی لکه‌های کشاورزی<sup>۲۵</sup> و شاخص نرمال شده شکل کشاورزی<sup>۲۶</sup> به‌عنوان متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی مقادیر نترات هستند و سایر سنج‌ها حذف می‌شوند (جدول ۲).

بهینه می‌تواند موجب ارتقاء صحت مدل‌ها و تفسیر تغییرات شود. باید توجه داشت سنج‌ها در بسیاری از موارد دارای همپوشانی هستند و اطلاعات مشابهی از وضعیت سیمای سرزمین ارائه می‌نمایند. برای مثال، اطلاعات ارائه شده از سنج‌های کل حاشیه و تراکم حاشیه روند تغییرات کاملاً مشابه دارند و همانگونه که در مطالعه لاوسچ و هرزوک در سال ۲۰۰۲ اشاره شده است، این همپوشانی‌ها مفسر را از دستیابی سریع به جنبه‌های مختلف سیمای سرزمین باز می‌دارد [۲۴]. بنابراین، لازم است تعداد ورودی‌های مدل کاهش یابد و سنج‌های بهینه که دارای توصیف بهتری از هر کدام از پارامترهای کیفیت آب هستند، وارد مدل شوند. از آنجا که رگرسیون چندگانه خطی پیشرو کارایی خوبی در انتخاب متغیرهای مستقل و کاهش ورودی‌ها دارد [۳۲]، در مطالعه حاضر از این رویکرد استفاده شد. شایان ذکر است مشابه با مطالعات لی و همکاران، اغلب سنج‌های بهینه در سطح کلاس اطلاعات بیشتری ارائه می‌کنند و در سطح سیما توانایی کمتری در توصیف تغییرات پارامترهای کیفیت آب دارند [۴ و ۱۰]. سنج‌های کاربری/پوشش جنگل، دارای نقش بسزایی در بهبود کیفیت آب، از طریق تعدیل مقادیر فسفات، اسیدیته و کل جامدات محلول در آب رودخانه‌های استان دارند. این در حالی است که سنج‌های کاربری/پوشش مسکونی و کشاورزی مانند تراکم حاشیه<sup>۱</sup>، درصد مساحت<sup>۲</sup>، تکه شدگی<sup>۳</sup> و اتصال<sup>۴</sup> در بسیاری از موارد منجر به افت کیفیت آب رودخانه‌ها شده‌اند (جدول ۲). شایان ذکر است در اغلب کاربری‌ها/پوشش‌ها سنج‌های تراکم حاشیه و درصد مساحت از سیما، قادر به توصیف تغییرات پارامترهای کیفیت بوده‌اند و به‌عنوان سنج‌هایی بهینه برای مدل‌سازی کیفیت آب مطرح شده‌اند.

### ۳-۳-۱- سنج‌های بهینه برای SAR

با توجه به جدول ۲، در میان تمامی سنج‌های استخراج شده، درصد مساحت کشاورزی<sup>۵</sup>، سطح شبکه شبکه شدگی با کشاورزی<sup>۶</sup> و شاخص پراکندگی و مجاورت اراضی بایر<sup>۷</sup>، به‌عنوان بهترین سنج‌ها در توصیف تغییرات SAR انتخاب شدند و برای فرایند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

### ۳-۳-۲- سنج‌های بهینه برای pH

سنج‌های بهینه برای pH شامل، شاخص تقسیم شدگی جنگل<sup>۸</sup>، تراکم حاشیه مسکونی<sup>۹</sup>، دایره محدود کننده جنگل<sup>۱۰</sup>، مساحت

<sup>9</sup> ED\_R  
<sup>10</sup> CIRCLE\_MN\_F  
<sup>11</sup> CA\_F  
<sup>12</sup> ED\_A  
<sup>13</sup> CIRCLE\_MN\_A  
<sup>14</sup> PLAND\_F  
<sup>15</sup> LPI\_F  
<sup>16</sup> ENN\_MN\_R  
<sup>17</sup> CIRCLE\_MN\_R  
<sup>18</sup> SHAPE\_MN\_A  
<sup>19</sup> PLAND\_A  
<sup>20</sup> DIVISION\_R  
<sup>21</sup> PARA\_MN\_R  
<sup>22</sup> NLSI\_P  
<sup>23</sup> SPLIT\_A  
<sup>24</sup> CONNECT\_R  
<sup>25</sup> FRAC\_MN\_A  
<sup>26</sup> NLSI\_A

<sup>1</sup> ED  
<sup>2</sup> PLAND  
<sup>3</sup> SPLIT  
<sup>4</sup> CONNECT  
<sup>5</sup> PLAND\_A  
<sup>6</sup> MESH\_A  
<sup>7</sup> IJ\_BI  
<sup>8</sup> DIVISION\_F

جدول ۲- نتایج رگرسیون خطی پیشرو برای تعیین سنجه‌های بهینه در توصیف تغییرات پارامترهای کیفیت آب

ضریب دوربین - واتسن	R <sup>2</sup>	R	سنجه‌های بهینه (متغیرهای مستقل)	پارامتر کیفیت آب
۱/۵۵	۰/۷۹	۰/۸۸	PLAND_A, MESH_A, IJI_BL	SAR
۱/۸۸	۰/۷۸	۰/۸۸	DIVISION_F, ED_R, CIRCLE_MN_A, ED_A, CA_F, CIRCLE_MN_F	pH
۲/۰۰	۰/۷۹	۰/۸۹	PLAND_F, LPI_F, ENN_MN_R, CIRCLE_MN_R, SHAPE_MN_A	TDS
۱/۸۰	۰/۷۶	۰/۸۷	PLAND_A, ED_R, DIVISION_R, PARA_MN_R, NLSI_P, SPLIT_A, CONNECT_R	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
۱/۹۶	۰/۶۱	۰/۷۸	PLAND_F, PLAND_A, ED_W, FRAC_MN_A, NLSI_A	NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>

A: کشاورزی، F: جنگل، W: منابع آب، R: مسکونی، P: اراضی مرتعی، BL: اراضی بایر، RO: جاده‌ها، MN: میانگین

جدول ۳- معادله رگرسیونی و آماره‌های مدل‌های کیفیت آب در مراحل آموزش و آزمون

مرحله آزمون			مرحله آموزش			معادله رگرسیونی	شماره رابطه	پارامتر کیفیت آب
CE	R <sup>2</sup>	RMSE	CE	R <sup>2</sup>	RMSE			
۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۳۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۴۳	۰/۰۰۱ + ۰/۱۴۹ * (PLAND_A) + ۰/۲۹۶ * (MESH_A) + ۰/۹۰۸ * (IJI_BL)	(۱-۳)	SAR
۰/۵۱	۰/۵۶	۰/۳۳	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۲۱	۱/۰۰۲ - ۰/۲۹۵ * (DIVISION_F) - ۰/۵۱۳ * (ED_R) - ۰/۳۵۷ * (CIRCLE_MN_F) + ۰/۱۹۹ * (CA_F) - ۰/۹۴۴ * (CIRCLE_MN_A) - ۰/۴۶۳ * (ED_A)	(۲-۳)	pH
۰/۷۳	۰/۷۳	۷۸/۵۴	۰/۸۲	۰/۸۲	۶۰/۷۸	۰/۸۰۹-۲/۱۵۹ (PLAND_F) - ۱/۵۶۴ * (LPI_F) - ۰/۵۴۴ * (ENN_MN_R) - ۰/۰۹۸ * (CIRCLE_MN_R) + ۰/۱۲۵ * (SHAPE_MN_A)	(۳-۳)	TDS
۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۰۳	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۰۳	-۰/۱۴۵ + ۰/۳۹۱ * (PLAND_A) + ۰/۲۵۹ * (ED_R) + ۰/۲۲۰ * (DIVISION_R) + ۰/۴۰۹ * (PARA_MN_R) + ۰/۱۹۹ * (NLSI_P) + ۰/۵۲۳ * (CONNECT_R) + ۰/۴۰۶ * (Split_A)	(۴-۳)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
۰/۴۱	۰/۴۴	۱/۲۶	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۸۴	۰/۱۱۹ - ۰/۳۱۶ * (PLAND_F) + ۰/۴۳۹ * (PLAND_A) - ۰/۱۴۵ * (ED_W) + ۰/۴۶۵ * (FRAC_MN_A) + ۰/۳۸۲ * (NLSI_A)	(۵-۳)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

A: کشاورزی، F: جنگل، W: منابع آب، R: مسکونی، P: اراضی مرتعی، BL: اراضی بایر، RO: جاده‌ها، MN: میانگین

گرفتند و تابع خروجی که عملکرد مناسب‌تری داشت، در نتایج آورده شد.

پیرامون مقایسه روش‌های هوشمند و رگرسیونی در تخمین ویژگی‌های هیدرولوژی تاکنون تحقیقات زیادی صورت گرفته است [۶، ۲۱ و ۴۱]. اما تحقیقی که بیان‌گر اهمیت روش‌های هوشمند در مقابل روش‌های رگرسیونی رایج در مدل‌سازی ارتباط میان پارامترهای کیفیت آب و سنجه‌های سیمای باشد، در دسترس نیست. ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق به کمک نمایه‌های RMSE، CE و R<sup>2</sup> امکان‌پذیر است. این نمایه‌ها می‌توانند برتری مدل‌ها را از طریق مقایسه بین مقادیر

### ۳-۴- نتایج مدل‌سازی

در تحقیق حاضر، برای اجرای شبکه عصبی-فازی تطبیقی از روش تفکیک شبکه‌ای با چهار تابع عضویت (مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی، زنگ‌دیس‌ی تعمیم یافته و چند جمله‌ای) و تفکیک خوشه‌ای با تعداد تابع عضویت بهینه که با سعی و خطا تعیین می‌شود (که در این تحقیق تابع عضویت بین ۲ تا ۵ تغییر داده شد) استفاده شد. ترکیب ورودی‌های متعددی برای دستیابی به بهترین مدل شبکه عصبی-فازی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تابع خروجی، انواع توابع خطی و ثابت برای هرکدام از توابع فازی‌ساز مورد آزمون قرار



مشاهده شده و برآورد شده تعیین نمایند. بیشترین ضریب تبیین، کمترین میزان خطا و ضریب کارایی بالا، بهترین روش را معرفی می‌نماید. در فرایند مدل‌سازی، طبق نظر شو و اوردا در سال ۲۰۰۸ مدلی قابل پذیرش است که دارای ضریب کارایی بالایی در مرحله آزمون باشد [۲۱].

مدل‌های شبکه عصبی-فازی و رگرسیون چند متغیره خطی برای تک تک پارامترهای اصلی در توصیف کیفیت آب استان مازندران اجرا شد. نتایج حاکی از آن است که رگرسیون چند متغیره خطی توانسته است پارامترهای SAR، TDS، pH،  $\text{NO}_3^-$  و  $\text{PO}_4^{3-}$  را با ضریب تبیین ۰/۸۱، ۰/۵۶، ۰/۷۳، ۰/۴۴ و ۰/۶۳ در مرحله آزمون پیش‌بینی نماید (جدول ۳). این در حالی است که ضریب تبیین شبکه عصبی-فازی به ترتیب برابر با ۰/۸۲، ۰/۷۹، ۰/۸۲، ۰/۳۱ و ۰/۳۶ بوده است (جدول ۴). در شکل ۵ مقایسه‌های کلی مدل‌های مذکور به وسیله ضریب کارایی نمایش داده شده است. مطابق این شکل، شبکه عصبی-فازی نسبت به رگرسیون چند متغیره خطی، دارای کارایی بالاتری در پیش‌بینی مقادیر SAR، pH و TDS بوده است. این امر به دلیل رابطه غیر خطی است که بین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل وجود دارد. نتایج به دست آمده تحقیق حاضر با نتایج، وو و همکاران در سال ۲۰۱۲، در توانایی بالاتر مدل‌های غیر خطی برای پیش‌بینی کیفیت آب هم راستا است [۱۹]. از آنجا که در سیستم‌های طبیعی مانند رودخانه‌ها، عموماً مشاهدات و روابط ناشناخته بین متغیرها وجود دارد، بهتر است از مدل‌هایی استفاده شود که بتوانند روابط غیر خطی را تشخیص داده و به درستی مفاهیم آن سیستم را درک و برآورد صحیحی نمایند [۶].

با توجه به نتایج به دست آمده، در پیش‌بینی اکثر پارامترها، روش شبکه عصبی-فازی با تفکیک خوشه‌ای، دارای خطای کمتر و دقت بالاتری نسبت به تفکیک شبکه‌ای با توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی، زنگ‌دیزی تعمیم یافته و چند جمله‌ای داشته است (جدول ۴). این امر می‌تواند به این علت باشد که در تفکیک خوشه‌ای، داده‌های ورودی با توجه به اندازه شعاع تأثیر به چند دسته

تقسیم می‌شوند. در این حالت تعداد عوامل خطی و غیر خطی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند که این امر باعث تسهیل در فرایند آموزش شبکه می‌شود و قادر است مرحله آزمون را با توانایی بالاتری پیش‌بینی نماید [۴۲]. شایان ذکر است، شبکه عصبی-فازی و نیز رگرسیون چند متغیره خطی، هر دو دارای کارایی نسبتاً پایین در پیش‌بینی مقادیر نیترات و فسفات محلول در رودخانه‌های استان مازندران بوده‌اند، اما کارایی مدل رگرسیونی بهتر از شبکه عصبی-فازی بوده است (شکل ۵). در مطالعه حاضر، ضریب تبیین مدل رگرسیونی در پیش‌بینی فسفات و نیترات برابر با ۰/۶۳ و ۰/۴۴ بوده است. در نتایج مطالعات مشابه مورنو و همکاران در سال ۲۰۰۸، وو و همکاران در سال ۲۰۱۲ و امیری و نکانه در سال ۲۰۰۸ با ضریب تبیین مدل رگرسیونی برای فسفات و نیترات به ترتیب برابر با ۰/۶۰، ۰/۴۹، ۰/۵۸، ۰/۴۳ و ۰/۶۲ و ۰/۴۷ بوده است [۳۷، ۳۷، ۱۹]. این در حالی است که در مطالعات نامبرده نیز، نیترات و فسفات نسبت به سایر پارامترهای کیفیت آب استفاده شده، با دقت کمتری پیش‌بینی شده‌اند. بنابر نتایج به دست آمده، سنج‌های سطح سیمای سرزمین توانایی کمتری در توصیف تغییرات مواد مغذی در رودخانه‌های استان دارند. همچنین، ارتباط میان سنج‌های سیما و نیترات و فسفات رودخانه‌های مورد مطالعه بیشتر به صورت خطی بوده و این امر منجر به افزایش ضریب کارایی مدل رگرسیونی نسبت به شبکه عصبی-فازی در برآورد مقادیر این پارامترهاست. در مطالعه حاضر تمرکز بر روی کاربری اراضی و به تبع آن سنج‌های سیمای سرزمین بوده است و این سنج‌ها توانسته‌اند سهم مهمی از تغییرات کیفیت آب را توصیف نمایند، اما متغیرهای اثرگذار دیگری مانند شرایط آب و هوایی، نزولات جوی، تراکم جمعیت، تراکم دام، سنگ‌شناسی و خاکشناسی حوضه و سایر متغیرهای محیطی در نظر گرفته نشده‌اند [۷-۳]. بنابراین، می‌توان کارایی نسبتاً پایین مدل‌ها در پیش‌بینی مواد مغذی را احتمالاً ناشی از این متغیرها دانست.

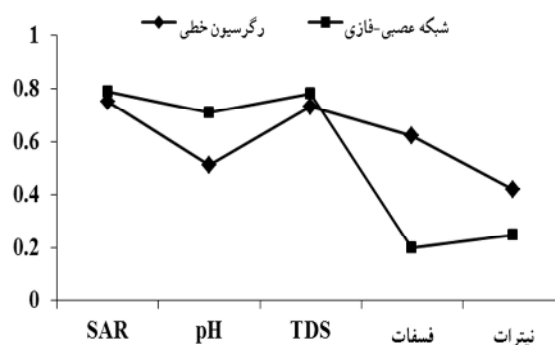
جدول ۴- جزئیات و آماره‌های مدل شبکه عصبی-فازی تطبیقی در مراحل آموزش و آزمون

پارامتر کیفیت آب	نوع شبکه	تابع ورودی	تابع خروجی	مرحله آموزش			مرحله آزمون		
				CE	R <sup>2</sup>	RMSE	CE	R <sup>2</sup>	RMSE
SAR	شبکه‌ای	گوسی	خطی	۰/۳۹	۰/۸۲	۰/۳۸	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۷۹
pH	خوشه‌ای	گوسی	خطی	۰/۲۲	۰/۷۷	۰/۲۸	۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۷۱
TDS	خوشه‌ای	گوسی	خطی	۰/۰۴	۱	۷۳/۵۰	۱	۱	۰/۷۸
$\text{PO}_4^{3-}$	خوشه‌ای	گوسی	خطی	۰/۰۲	۰/۸۸	۰/۰۵	۰/۸۸	۰/۳۶	۰/۲۰
$\text{NO}_3^-$	خوشه‌ای	گوسی	خطی	۰/۷۵	۰/۷۳	۱/۳۸	۰/۷۳	۰/۳۱	۰/۲۵

به اینکه استقرار هر گونه کاربری/پوشش در حوضه دارای تأثیر زیادی بر کیفیت آب خروجی از حوضه و آلاینده‌های در دسترس و بار مواد محلول در رودخانه‌ها دارد، نتایج مطالعه حاضر می‌تواند به‌عنوان راهکار مناسبی برای برنامه‌ریزی منطقه‌ای و ارزیابی اثرات محیط زیستی در برنامه‌های توسعه، به‌وسیله کمی‌سازی این روابط باشد. بنابر نتایج به‌دست آمده، احداث شهرک‌ها و یا جنگلکاری به ترتیب می‌تواند منجر به کاهش و افزایش کیفیت آب خروجی از حوضه شود. اما نحوه استقرار این کاربری/پوشش‌ها نیز با توجه به تأثیر سنج‌ها و اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین می‌تواند بر کیفیت آب رودخانه‌ها اثر گذار باشد و حتی منجر به افزایش سطح کیفی آب‌ها شود. به‌عنوان مثال مطابق با نتایج بررسی حاضر، تراکم حاشیه مناطق مسکونی موجب کاهش اسیدیته آب رودخانه‌های استان شده است. بنابراین، احتمالاً و با فرض عدم تأثیر سایر عوامل، در صورتی که مناطق مسکونی یکپارچه نباشند و در قطعات کوچک توزیع شوند، تراکم حاشیه بیشتر خواهند شد که منجر به کاهش اسیدیته رودخانه‌های استان می‌شود. این در حالی است که در صورت مساوی بودن مساحت جنگل در دو سیمای جنگل‌های یکپارچه و وسیع توانایی بیشتری در تعدیل pH دارند و افزایش تقسیم‌شدگی این کاربری/پوشش توانایی تعدیل pH توسط جنگل‌ها را کاهش می‌دهد. بنابراین، درک ارتباط و نیز مدل‌سازی تجربی بنا بر اطلاعات موجود از منطقه، قادر است راهکارهای مناسبی برای توسعه پایدار و کاهش هزینه‌ها ارائه نماید.

#### ۵- قدردانی

تحقیق حاضر حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس است. نویسندگان از همکاری مسئولان دانشگاه و دانشکده و نیز از کارکنان محترم شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران نهایت تشکر و سپاس را دارند.



شکل ۵- ضریب کارایی مدل‌های بهینه شبکه عصبی-فازی و رگرسیون چند متغیره خطی

#### ۴- نتیجه‌گیری

استفاده از سنج‌های سیمای سرزمین برای پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب، می‌تواند به‌عنوان رویکردی مناسب در راستای پایش آلودگی‌های غیر نقطه‌ای باشد. در مطالعه حاضر، اطلاعات کیفیت آب ۸۱ ایستگاه آبنجی واقع بر رودخانه‌های استان مازندران مورد بررسی قرار گرفت. بهترین مدل‌ها قادر بودند با ضریب تبیین  $0.79$ ،  $0.82$ ،  $0.44$  و  $0.63$  پارامترهای SAR، TDS، pH،  $NO_3^-$  و  $PO_4^{3-}$  را پیش‌بینی کنند که در این میان مدل‌های ارائه شده میان سنج‌های سیمای سرزمین و کیفیت آب توانایی کمتری در پیش‌بینی مقادیر نیترات و فسفات نسبت به سایر پارامترهای کیفیت آب رودخانه‌های استان داشته‌اند که این امر، تأثیرپذیری آنها از سایر متغیرهای محیطی موجود و عدم تطابق با ساختار مدل‌های مورد استفاده را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج مطالعه حاضر قادر است نقش ساختار و ترکیب کاربری‌ها/پوشش‌های مختلف بر روی کیفیت آب رودخانه‌های استان مازندران را به‌صورت کمی نمایش دهد و کیفیت آب در هر نقطه از رودخانه را با توجه به کاربری‌ها/پوشش‌های بالادست آن تعیین نماید. با توجه

#### ۶- مراجع

- Bahar, M. M., Hiroo, O., and Masumi, Y. (2008). "Relationship between river water quality and land use in a small river basin running through the urbanizing area of central Japan." *J. Limnology*, 9(1), 19-26.
- Crim, J. F., Schoonover, J. E., and Lockaby, B. G. (2012). "Assessment of fecal coliform and escherichia coli across a land cover gradient in west georgia streams." *J. Water Quality, Exposure and Health*, 4(3), 143-158.
- Delpla, I., Jung, A. V., Baures, E., Clement, M., and Thomas, O. (2009). "Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production." *J. Environment International*, 35(8), 1225-1233.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. (2007). "Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT." *J. Hydrology*, 333(2), 413-430.

5. Turner, R. E., and Rabalais, N. N. (2003). "Linking landscape and water quality in the Mississippi river basin for 200 years." *J. BioScience*, 53(6), 563-572.
6. Lek, S., Guiresse, M., and Giraudel, J. L. (1999). "Predicting stream nitrogen concentration from watershed features using neural networks." *J. Water Research*, 33(16), 3469-3478.
7. Jarvis, N. (2007). "A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality." *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523-546.
8. Sonneveld, M. P. W., Schoorl, J. M., and Eldkamp, A. V. (2006). "Mapping hydrological pathways of phosphorus transfer in apparently homogeneous landscapes using a high-resolution DEM." *J. Geoderma*, 133(1), 32-42.
9. Nakane, K., and Haidary, A. (2009). "Sensitivity analysis of stream water quality and land cover linkage models using monte carlo method." *J. Environmental Research and Public Health*, 4(1), 121-130.
10. Lee, S. W., Hwang, S. J., Lee, S. B., Hwang, H. S., and Sung, H. C. (2009). "Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics." *J. Landscape and Urban Planning*, 92(2), 80-89.
11. Tong, S. T., and Chen, W. (2002). "Modeling the relationship between land use and surface water quality." *J. Environmental Management*, 66(4), 377-393.
12. Maier, H. R., and Dandy, G. C. (2000). "Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: A review of modelling issues and applications." *J. Environmental Modelling and Software*, 15(1), 101-124.
13. Ahearn, D., S., Sheibley, R., W., Dahlgren, R. A., Anderson, M., Johnson, J., and Tate, K. W. (2005). "Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California." *J. Hydrology*, 313(3), 234-247.
14. King, R. S., Matthew, E., Baker, D. F., Whigham, D. E., Weller, T. E., Jordan, P. F., and Martin K. (2005). "Spatial considerations for linking watershed land cover to ecological indicators in streams." *J. Ecological Applications*, 15 (1), 137-153.
15. Haidary, A., Amiri, B. J., Adamowski, J., Fohrer, N., and Nakane, K. (2013). "Assessing the impacts of four land use types on the water quality of wetlands in Japan." *Water Resources Management*, 27(7), 2217-2229.
16. Alberti, M., Booth, D., Hill, K., Coburn, B., Avolio, C., Coe, S., and Spirandelli, D. (2007). "The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis on Puget lowland sub-basins." *J. Landscape Urban Plan*, 80 (4), 345-361.
17. Salajegheh, A., Khorasani, N., Hamidifar, M., and Salajegheh, S. (2010). "Landcover change and this impacts on water quality." *J. Environmental Studies*, 37 (58), 81-86. (In Persian)
18. Nemat, M., Ebrahimi, A., Mirghafari, N., and Safyanian, A. (2007). "Effects of land use on nitrate and phosphate river water." *4<sup>th</sup> Conference of Engineering Sciences and Watershed Management*, Faculty of Natural Resources, Theran University, Karaj. (In Persian)
19. Wu, M. Y., Xue, L., Jin, W. B., Xiong, Q. X., Ai, T.C., and Li, B.L. (2012). "Modeling the linkage between landscape metrics and water quality indices of hydrological units in Sihui basin, Hubei Province, China." *J. An Allometric Model. Procedia Environmental Sciences*, 13(1), 2131-2145.
20. Shiels, D. R. (2010). "Implementing landscape indices to predict stream water quality in an agricultural setting: An assessment of the lake and river enhancement (LARE) protocol in the mississinewa river watershed, East-Central Indiana." *J. Ecological Indicators*, 10(6), 1102-1110.
21. Shu, C., and Ouarda, T. (2008). "Regional flood frequency analysis at ungauged sites using the adaptive neuro-fuzzy inference system." *J. Hydrology*, 349(1), 31-43.
22. Noori, R., Karbassi, A. R., Moghaddamnia, A., Han, D., Zokaei-Ashtiani, M.H., Farokhnia, A., and Gousheh, M.G. (2011). "Assessment of input variables determination on the SVM model performance using PCA, Gamma test, and forward selection techniques for monthly stream flow prediction." *J. Hydrology*, 401 (3), 177-189.
23. McGarigal, K., and Marks, B. J. (1995). *Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*, Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.

24. Lausch, A., and Herzog, F. (2002). "Applicability of landscape metrics for the monitoring of landscape change: issues of scale, resolution and interpretability." *Ecological Indicators*, 2(1), 3-15.
25. Wagner, J. M., and Shimshak, D. G. (2007). "Stepwise selection of variables in data envelopment analysis: Procedures and managerial perspectives." *J. Operational Research*, 180(1), 57-67.
26. Gholamalifard, M., Zare Maivan, H., Joorabian Shooshtari, S., and Mirzaei, M. (2012). "Monitoring land cover changes of forests and coastal areas of northern Iran (1988-2010): A remote sensing approach." *J. Persian Gulf*, 3(10), 47-56.
27. Mirkatuli, J., and Kanani, M. (2010). "Assessment of ecological capability of urban development by MCDM and GIS (Case study: Sari, Mazandaran Province)." *J. Human Geography Researchs*, 43(77), 75-88. (In Persian)
28. Talebi Amiri, Sh., Azari Dehkordi, F., Sadeghi, H., and Soofbaf, R. (2009). "Study on landscape degradation in Neka watershed using landscape metrics." *J. Environmental Sciences*, 6(3), 133-144. (In Persian)
29. Salman Mahini, A., Fazli, H., Daryanabard, R., Kamyab, H., Fendereski, F., Davar, L., Azarm Del, L., Mehri A., and Kheyraadi, V. (2011). *Zoning and degree of ecologically sensitive coastal areas*, Department of Environment, Tehran, Page 231. (In Persian)
30. Ouyang, Y. (2005). "Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis." *J. Water Research*, 39(12), 2621-2635.
31. Riitters, K. H., O'Neill, R.V., Hunsaker, C. T., Wickham, J. D., Yankee, D. H., Timmins, S. P., Jones, K. B., and Jackson, B.L. (1995). "A factor analysis of landscape pattern and structure metrics." *J. Landscape Ecology*, 10 (1), 23-39.
32. Noori, R., Sabahi, M., Karbassi, A., Baghvand, A., and Taati Zadeh, H. (2010). "Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set." *J. Desalination*, 260(1), 129-136.
33. Alavi, N., Nozari, V., Mazloumzadeh, S., and Nezamabadi-pour, H. (2010). "Irrigation water quality evaluation using adaptive network-based fuzzy inference system." *J. Paddy and Water Environment*, 8(3), 259-266.
34. Ocampo-Duque W., Ferre´H. N., Domingo, J. L., and Schuhmacher, M. (2006). "Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study." *J. Environ. Int.*, 32,733-742.
35. Wilcox, L. V. (1955). *Classification and use of irrigation waters*, U.S. Dept. Agric. Circ., 969, 19 p.
36. Tran, C. P., Bode, R. W., Smith, A. J., and Kleppel, G. S. (2010). "Land-use proximity as a basis for assessing stream water quality in New York State (USA)." *J. Ecological Indicators*, 10(3), 727-733.
37. Amiri, B. J., and Nakane, K. (2008a). "Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the chugoku district of japan." *Water Resour Manage*, 23(5), 931-956.
38. Wickham, J. D., O'Neill, R. V., Riitters, K. H., Wade, T. G., and Jones, K. B. (1997). "Sensitivity of selected landscape pattern metrics to land-cover misclassification and differences in land-cover composition." *J. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(4), 397-401.
39. Herold, M., Couclelis, H., and Clarke, K. C. (2005). "The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change." *J. Computers, Environment and Urban Systems*, 29(4), 369-399.
40. Li, X., Jongman, R. H., Hu, Y., Bu, R., Harms, B., Bregt, A. K., and He, H. S. (2005). "Relationship between landscape structure metrics and wetland nutrient retention function: A case study of Liaohe Delta, China." *J. Ecological Indicators*, 5(4), 339-349.
41. Han, H. G., Chen, Q. I., and Qiao, J. F. (2011). "An efficient self-organizing RBF neural network for water quality prediction." *J. Neural Networks*, 24(7), 717-725.
42. Moosavi, V., Vafakhah, M., Shirmohammadi, B., and Behnia, N. (2013). "A wavelet-anfis hybrid model for groundwater level forecasting for different prediction periods." *Water Resources Management*, 27 (2), 1-21.
43. Moreno, M. D., Mander, Ü., Comín, F. A., Pedrocchi, C., and Uemaa, E. (2008). "Relationships between landscape pattern, wetland characteristics, and water quality in agricultural catchments." *J. Environmental Quality*, 37(6), 2170-2180.