

## پیش‌بینی بارش بهاره استان خراسان رضوی بر اساس سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

غلامعباس فلاح قاله‌ری\* - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی دانشگاه اصفهان و عضو گروه اقلیم‌شناسی کاربردی پژوهشکده اقلیم‌شناسی  
جواد خوشحال - استادیار گروه جغرافیای دانشگاه اصفهان

پذیرش مقاله: ۱۳۸۷/۶/۲۴ تأیید نهایی: ۱۳۸۸/۳/۲۳

### چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی ارتباط سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی با بارش استان خراسان رضوی است. در این مطالعه، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پیش‌بینی بارش در بازه زمانی آوریل تا ژوئن ۲۰۰۷-۱۹۷۰ (فروردین تا خرداد) در استان خراسان رضوی ارائه شده است. برای این منظور ارتباط بین تغییرات سیگنال‌های اقلیمی شامل فشار سطح دریا، اختلاف فشار سطح دریا، دمای سطح دریا، اختلاف دما بین سطح دریا و سطح ۱۰۰۰ میلی‌باری، دمای سطح ۷۰۰ میلی‌باری، ضخامت بین سطوح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌باری، رطوبت نسبی سطح ۳۰۰ میلی‌باری و آب قابل بارش با بارش متوسط منطقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در انتخاب این مناطق، تأثیرپذیری بارندگی منطقه شمال شرق ایران از سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی مورد توجه قرار گرفته است. سپس، مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی در دوره ۱۹۹۷-۱۹۷۰ آموزش داده شده است و در پایان، پیش‌بینی بارش در دوره ۲۰۰۷-۱۹۹۸ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی مصنوعی در تمامی سال‌ها می‌تواند بارش را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل، ۲/۵ میلی‌متر به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی بارش، سیگنال‌های اقلیمی، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

### مقدمه

تمامی جنبه‌های زندگی انسان به نحوی تحت تأثیر فرایندهای آب‌وهوایی است و این تأثیرگذاری در زمینه‌های مختلفی چون کشاورزی، آبیاری، اقتصاد، مخابرات، حمل‌ونقل، ترافیک، آلودگی هوا و صنایع نظامی بیشتر دیده می‌شود (Haltiner and Williams, 1980, 447). پیش‌بینی بارش برای کشورهای در حال توسعه که اقتصادشان مبتنی بر کشاورزی است، بسیار اهمیت دارد. به‌طور مشخص، اقلیم و بارش از پدیده‌های غیرخطی بزرگ در طبیعت به‌شمار می‌آیند، که به اثر پروانه‌ای مشهور شده‌اند (Abraham et al., 2001, 1044). امروزه پژوهشگران، با ابداع و پیشرفت

علمی چون روش‌های هوشمند - که ابزاری توانمند، انعطاف‌پذیر و مستقل از مدل‌های دینامیکی سیستم به‌شمار می‌آیند - در جست‌وجوی راه‌هایی برای پیشرفت و پیش‌بینی داده‌های مهم هواشناسی هستند (خلیلی، ۱۳۸۵، ۹).

در سال‌های اخیر، تحقیقات وسیعی در زمینه پیش‌بینی‌های میان‌مدت و بلندمدت (ماهانه و فصلی) در نقاط مختلف جهان انجام شده است. بسیاری از این تحقیقات بر مبنای تأثیر الگوهای سینوپتیکی بزرگ‌مقیاس بوده است (کارآموز و همکاران، ۱۳۸۴، ۱۵۹). پنگراسز و بارتولی<sup>۱</sup> (2006, 133) بارندگی ماهیانه را در مجارستان با استفاده از تیپ‌های الگوی چرخش اتمسفری و شاخص «انسو» مدل‌سازی کردند. بدین‌منظور از تکنیک مدل‌سازی مبتنی بر قوانین فازی برای ایجاد ارتباط بین ورودی‌ها و بارندگی استفاده شد. نتایج آنها نشان می‌دهد که مدل مبتنی بر قوانین فازی، ابزار عالی را برای پیش‌بینی مشخصات آماری بارندگی ماهیانه با استفاده از فراوانی ماهیانه تیپ‌های الگوی چرخش اتمسفری روزانه و SOI<sup>۳</sup> تأخیری فراهم می‌کند.

هالید و رید<sup>۴</sup> (2002, 166) از تکنیک منطق فازی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بارش محلی ماه ژانویه در فرودگاه هزانودین<sup>۵</sup> در اندونزی - که بزرگ‌ترین ناحیه تولید برنج است - استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که مدل منطق فازی برای پیش‌بینی بارش ماه ژانویه از مدل‌های آماری دیگر مناسب‌تر است. چوی<sup>۶</sup> (1999, 745) از شبکه‌های عصبی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای پیش‌بینی بارش استفاده کرده‌اند. نتایج کار آنها نشان از کارایی سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی بارش دارد. کاوازوس<sup>۷</sup> (2000, 1718) از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی بارش روزانه استفاده کرده است؛ متغیرهای مورد استفاده وی عبارت است از: ضخامت بین سطوح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و رطوبت سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال. نتایج به‌دست آمده، کارایی شبکه‌های عصبی را در پیش‌بینی بارش نشان می‌دهد. ماریا<sup>۸</sup> و همکاران (2005, 146) از شبکه‌های عصبی و مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی بارش در منطقه سائوپائولوی برزیل استفاده کرده‌اند. متغیرهای مورد استفاده آنها عبارت است از: دمای پتانسیل، مؤلفه قائم باد، رطوبت ویژه، دمای هوا، آب قابل بارش، چرخندگی نسبی و شار واگرایی رطوبت. نتایج کار آنها، نشان از کارایی هر دو روش در پیش‌بینی بارش دارد. کارآموز و همکاران (۱۳۸۴، ۲۵۰) با استفاده از کاربرد سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی، از مدل مبتنی بر قوانین فازی و شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی بارش در مناطق غرب ایران (حوضه‌های آبریز کارون، کرخه و مرزی غرب) استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که جز در منطقه جنوب غرب که پیش‌بینی هر دو مدل دارای خطای بیش از ۳۵ درصد و مشابه بوده است، در مناطق شمال غرب و غرب، خطای مدل فازی به ترتیب ۸/۴ و ۱۳ درصد کمتر از شبکه عصبی است. فلاح‌قاله‌ری (۱۳۸۵، ۱۶۰) از تکنیک منطق فازی و

1. Pangracz and Bartholy
2. ENSO (El Niño Southern Oscillation Index)
3. Southern Oscillation Index
4. Halid and Rid
5. Hasanuddin
6. Choi
7. Cavazos
8. Maria

شبکه‌های عصبی فازی تطبیقی برای پیش‌بینی بارش دسامبر تا می منطقه خراسان استفاده کرده است. نتایج، نشان از کارایی هر دو روش در پیش‌بینی بارش فصلی دارد. در پژوهش حاضر، مدل فازی عملکرد بهتری در مقایسه با مدل ANFIS داشته است. با توجه به اهمیت پیش‌بینی بارش در بسیاری از فرایندهای تصمیم‌گیری، نظیر مدیریت منابع آب و کشاورزی، در این پژوهش سعی شده است با استفاده از اطلاعات اقلیمی نظیر دما و اختلاف دمای سطح دریا، فشار و اختلاف فشار سطح دریا، آب قابل بارش، دمای هوا در سطح ۷۰۰ میلی‌بار، ضخامت بین سطوح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌بار و رطوبت نسبی سطح ۳۰۰ میلی‌بار، ارتباط سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی با بارش منطقه مورد مطالعه بررسی و تبیین گردد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، استان خراسان رضوی است. سری زمانی مورد مطالعه در این تحقیق، متوسط بارش بهاره ۳۸ ساله فروردین تا خرداد (آوریل تا ژوئن) هر سال است. داده‌های بارش بهاره برای هر سال میلادی شامل بارندگی ۳۸ ایستگاه همدیدی، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی است، که از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو دریافت شده است. از این تعداد، ۲۴ ایستگاه مربوط به آمار و اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو و بقیه مربوط به سازمان هواشناسی هستند. شکل ۱ نقشه محدوده مورد مطالعه و نام ایستگاه‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر برای تکمیل برخی از نواقص اطلاعاتی بارش، از روش تفاضل‌ها و نسبت‌ها و برای آزمون همگنی داده‌ها از آزمون ران تست استفاده گردیده است.

### داده‌های مورد نیاز

داده‌های مورد نیاز - به جز داده‌های بارش که از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده است - از سایت نوا<sup>۱</sup> در شبکه‌های ۲/۵ × ۲/۵ درجه در فاصله بین سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۷۰ میلادی استخراج گردیده است.

### محاسبه بارش متوسط منطقه‌ای

هدف نهایی از بررسی تغییرات مکانی بارش، شبیه‌سازی تغییرات اطلاعات بارش در بُعد مکان است، به‌گونه‌ای که زمینه برای اهداف بعدی از جمله پیش‌بینی بارش و به‌دست آوردن اطلاعات لازم برای تحلیل بلندمدت وضعیت بارش در هر منطقه از محدوده مورد مطالعه فراهم گردد. همان‌طور که اشاره گردید، در این تحقیق از روش کریجینگ برای محاسبه بارش متوسط منطقه‌ای استفاده گردیده است. برای به‌دست آوردن سری زمانی بارش متوسط منطقه‌ای، مراحل‌ای که در ادامه می‌آید، طی شد:

(۱) ساختن فایل‌های ورودی نرم‌افزار Arcmap؛ (۲) به‌دست آوردن واریوگرام تجربی؛ (۳) تحلیل و ترسیم تغییرات

مکانی بارش در منطقه برای هر سال؛ ۴) به‌دست آوردن مقادیر متوسط بارش در منطقه مورد مطالعه برای هر سال؛ ۵) ساخت سری‌های زمانی بارش برای منطقه مورد مطالعه.

### بررسی ارتباط سیگنال‌های شاخص با بارش

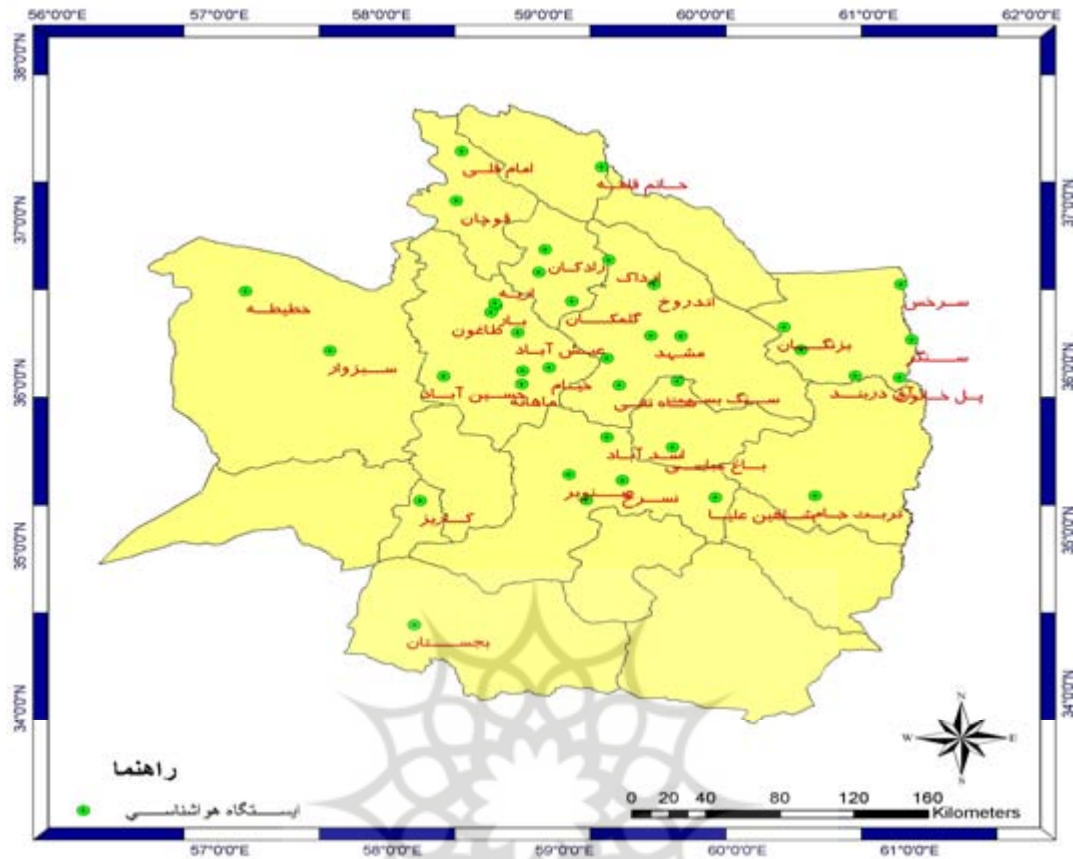
سیگنال‌هایی که در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفته‌اند به دو دسته تقسیم می‌شوند: داده‌های هواشناسی سطح زمین و داده‌های هواشناسی سطوح فوقانی جو. داده‌های هواشناسی سطوح فوقانی جو اینها هستند: ۱) دمای هوا در سطح ۷۰۰ میلی‌بار؛ ۲) ضخامت بین سطوح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌بار؛ ۳) رطوبت نسبی سطح ۳۰۰ میلی‌بار. داده‌های هواشناسی سطح زمین اینها هستند: ۱) فشار سطح دریا؛ ۲) اختلاف فشار سطح دریا؛ ۳) دمای سطح دریا؛ ۴) اختلاف دما بین سطح دریا و سطح ۱۰۰۰ میلی‌باری؛ ۵) بادمداری؛ ۶) باد نصف‌النهاری؛ ۷) آب قابل بارش.

### فصل‌بندی بارندگی و سیگنال‌ها

فصل‌بندی بارندگی و سیگنال‌ها بر این اساس بوده است که با استفاده از میانگین مقادیر یک سیگنال مشخص در چند ماه متوالی، بتوان میزان بارندگی فصلی را در ماه‌های آینده مشخص ساخت، بنابراین سعی شده است که فصل‌های مربوط به سیگنال‌ها، ماه‌های دارای بارندگی را شامل نشوند. با توجه به اینکه در این تحقیق، بررسی ارتباط داده‌های هواشناسی با بارش بهاره موردنظر بوده است، از میانگین مقادیر سیگنال‌های هواشناسی در بازه زمانی مهر تا اسفند (اکتبر تا مارس) به‌عنوان سری زمانی سیگنال‌ها و از میانگین بارندگی ماه‌های فروردین تا خرداد (آوریل تا ژوئن) به‌عنوان سری زمانی بارندگی استفاده شده است.

### محدوده مکان مورد بررسی

در پژوهش حاضر، برای تحلیل داده‌های سطوح فوقانی جو و همچنین ۳ پارامتر سطح زمین شامل بادمداری، باد نصف‌النهاری و آب قابل بارش از دو شبکه ۵×۵ درجه و ۱۰×۱۰ درجه استفاده شده است. محدوده مکان مورد بررسی که داده‌های هواشناسی سطح زمین و سطوح فوقانی جو در آنها با روش تحلیل عاملی بررسی شده است، در حد فاصل ۸۰-۰- درجه شرقی و ۵۰-۱۰- درجه شمالی در شبکه‌های ۵×۵ درجه و ۱۰۰-۰- درجه شرقی و ۷۰-۰- درجه شمالی در شبکه‌های ۱۰×۱۰ درجه قرار دارد. این محدوده مناطقی را شامل می‌گردد که تغییرات الگوی دما، فشار، رطوبت و سرعت باد در آنها بر بارش منطقه اثرگذار است (علیجانی، ۱۳۸۱، ۲۰۷). برای داده‌های هواشناسی دیگر در سطح زمین شامل فشار، دما، اختلاف فشار و اختلاف دما بین سطح دریا و سطح ۱۰۰۰ میلی‌باری به‌صورت نقطه‌ای عمل شده است. به عبارت دیگر، مناطقی تحت عنوان مناطق شاخص در نقاط مختلفی از دریاها که طبق تحقیقات پژوهشگران قبلی (ناظم‌السادات، ۱۳۸۰، ۶۰ و علیجانی، ۱۳۸۱، ۲۰۷ و موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۸۷، ۲۱۷ و فلاح‌قاله‌ری و همکاران، ۱۳۸۶، ۹۵) بر آب‌وهوای ایران اثر می‌گذارند، انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های منتخب

لازم به‌ذکر است برای انجام آزمون‌های آماری لازم و به‌دست آوردن همبستگی بین سیگنال‌های شاخص و بارش منطقه، از دو نرم‌افزار اکسل<sup>۱</sup> و جامپ نسخه ۴<sup>۲</sup> استفاده شده است.

### متدولوژی مورد استفاده

متدولوژی مورد استفاده در تحلیل پارامترهای هواشناسی جوّ بالا و سطح زمین (بادمداری، باد نصف‌النهاری و آب قابل بارش) استفاده از روش تحلیل عاملی است. روش تحلیل عاملی از جمله روش‌های آماری است که برای کاهش تعداد متغیرها از آن استفاده می‌شود. در این روش، متغیرهای اولیه براساس ضرایب همبستگی بین آنها به متغیرهای غیروابسته تبدیل می‌شوند. این متغیرهای غیروابسته عامل<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. اندازه هر کدام از مشاهدات در عامل‌های جدید با عنوان نمرات عاملی محاسبه می‌شود. در نتیجه به‌جای اندازه‌های واقعی مشاهدات، نمرات آنها در مؤلفه‌های جدید به‌عنوان معیارهای جدید برای خوشه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. امتیاز این روش در آن است که ضمن اینکه تعداد متغیرها را کاهش می‌دهد، مقدار اولیه واریانس موجود در داده‌های اصلی را حفظ می‌کند (علی‌جانی، ۱۳۸۱، ۱۸۰).

1. Excel
2. Jmp 4
3. Factor

### بررسی ارتباط الگوهای سینوپتیکی شاخص با بارش منطقه

همان‌طور که اشاره شد، در پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط تغییرات داده‌های هواشناسی فشار، دما، اختلاف فشار و اختلاف دما، با بارش در محدوده مورد مطالعه، نقاطی تحت عنوان نقاط شاخص در مناطق مختلفی از دریاها که بر آب‌وهوای ایران تأثیرگذارند، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. این نقاط شامل نقاطی در دریای مدیترانه، خلیج فارس، دریای عمان، خلیج عدن، دریای عرب، دریای سرخ، دریای سیاه، دریای آدریاتیک، دریاچه آرال، اقیانوس هند، اقیانوس اطلس، دریای شمال و سیبری است، که مختصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است. در انتخاب این مناطق، تأثیرپذیری منطقه شمال شرق کشور از الگوهای سینوپتیکی مورد توجه قرار گرفته است.

جدول ۱. نام و مختصات نقاط مورد استفاده در تحلیل‌های دما و فشار سطح دریا\*

نام نقاط مورد استفاده	عرض جغرافیایی (شمالی)	طول جغرافیایی	نام نقاط مورد استفاده	عرض جغرافیایی (شمالی)	طول جغرافیایی
دریای آدریاتیک	۴۳	۱۵	شمال دریای خزر	۴۵	۵۰
خلیج عدن	۱۲/۵	۴۵	شمال خلیج فارس	۲۷	۵۰
شبه‌جزیره دریای عرب	۱۴-۲۰	۶۰-۷۰	شمال دریای سرخ	۲۵	۳۵
دریاچه آرال	۴۵	۶۰	دریای شمال	۵۴	۵
شبه‌جزیره آزر	۲۰-۴۱	۳۰۰-۳۳۹	دریای عمان	۲۴	۶۵
آزر	۴۱	۳۳۰	جنوب دریای خزر	۳۹	۵۰
دریاچه بایکال	۵۴	۱۰۷	جنوب دریای سرخ	۱۴	۴۰
دریای سیاه	۴۵	۳۵	شبه‌جزیره سیبری	۵۰-۶۰	۹۰-۱۳۰
مرکز اقیانوس اطلس	۳۰	۳۲۰	غرب دریای مدیترانه	۴۱	۵
گرینلند	۳۵	۳۰	دریای لابرادور	۶۰	۳۰۹
اقیانوس هند	۵-۱۴	۶۰-۷۰	شبه‌جزیره ایسلند	۵۴-۷۰	۳۰۰-۳۵۰

\* نقاطی که با خط فاصله از هم جدا شده‌اند، یک محدوده را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، شبه‌جزیره آزر در محدوده ۲۰-۴۱ درجه عرض شمالی و ۳۰۰-۳۳۹ درجه طول جغرافیایی قرار دارد. چون طول جغرافیایی از ۱۸۰-۰ طول شرقی و ۱۸۰-۰ طول غربی تغییر می‌کند، و چون محیط زمین از ۰-۳۶۰ متغیر است، در این مقاله برای ساده‌سازی و پرهیز از واژه طول غربی و شرقی، محیط زمین با مبدأ طول جغرافیایی صفر درجه به طرف شرق، مبنای انتخاب نقاط قرار گرفته است.

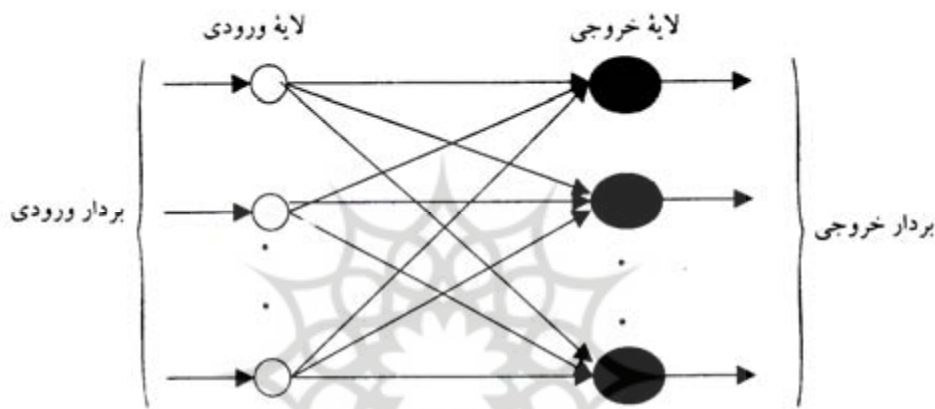
### ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای اولین بار مک‌کولاک و پیتس<sup>۱</sup> در سال ۱۹۴۳ معرفی کردند. بعدها با ظهور الگوریتم آموزش پس‌انتشار خطا<sup>۲</sup> برای شبکه‌های پیش‌خور<sup>۳</sup> به وسیله راملهارت و همکاران<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۶، استفاده از شبکه عصبی وارد مرحله تازه‌ای گردید (مهدی‌زاده، ۱۳۸۳، ۱۶۰).

1. McCulloch and Pitts
2. Back propagation algorithm
3. Feed forward
4. Ramelhart et al.



شبکه‌های عصبی مصنوعی همانند شبکه عصبی طبیعی، از اجزایی به نام سلول عصبی تشکیل شده‌اند. همان‌طور که در شبکه عصبی طبیعی، تعدادی از سلول‌ها دریافت اثر محرک خارجی، تعدادی پردازش اطلاعات و تعدادی نیز انتقال پاسخ محرک به عضو موردنظر را بر عهده دارند، در شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز تعدادی از سلول‌ها دریافت معلومات مسئله، تعدادی پردازش اطلاعات و تعدادی نیز ارائه پاسخ مسئله را بر عهده دارند. هر شبکه عصبی به‌ترتیب شامل لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی است، به‌طوری که این سلول‌ها از طریق اتصالاتی با وزن‌های مختلف به یکدیگر وصل‌اند. در تمام شبکه‌های عصبی مصنوعی یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و تعدادی لایه پنهان وجود دارد (مه‌دی‌زاده، ۱۳۸۳، ۱۷۰). شکل ۲ ساختار یکی از این نوع شبکه‌ها را نشان می‌دهد (محمدی، ۱۳۸۲، ۱۴۰).



شکل ۲. ساختار کلی شبکه‌های عصبی پیش‌خور تک‌لایه

سه جزء نرون چندورودی اینها هستند:

الف) مجموعه سیناپس‌ها که هر یک با وزن مربوط به خودشان مشخص می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، نرون  $k$  که خروجی آن با  $x_k$  مشخص می‌شود از طریق یک رابط وزنی مناسب،  $w_{jk}$  به نرون موردنظر ( $j$ ) متصل می‌شود. اثر نرون  $k$  بر روی نرون  $j$  از طریق حاصل  $x_k \cdot w_{jk}$  مشخص می‌گردد. چنانچه نرون  $k$  فعال و  $w_{jk}$  مثبت باشد (سیناپس تحریک‌کننده)، نرون  $k$  اثر مثبتی بر نرون  $j$  خواهد داشت. از طرفی چنانچه نرون  $k$  فعال اما  $w_{jk}$  منفی باشد (سیناپس مهارکننده)، نرون  $k$  اثر منفی بر نرون  $j$  خواهد داشت. توجه به حالت نوشتاری زیرنویس وزن سیناپس  $w_{jk}$  اهمیت فراوان دارد. اولین زیرنویس، مربوط به نرون مقصد و دومین زیرنویس مربوط به نرون مبدأ متعلق به سیناپس مورد نظر است.

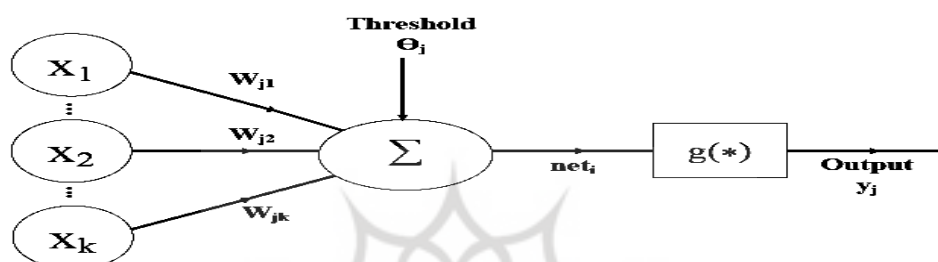
ب) یک جمع‌کننده برای جمع سیگنال‌های ورودی که از طریق سیناپس‌های نرون وزن‌دار می‌شود. اثر جمع‌شونده همه نرون‌های متصل به نرون مورد نظر (نرون  $j$ ) از طریق جمع تأثیرات هر یک از نرون‌ها بر روی نرون  $j$  با یکدیگر مشخص می‌گردد.

ج) یک تابع فعالیت برای محدودسازی دامنه خروجی نرون به کار می‌رود. تابع فعالیت به‌عنوان تابعی محدودکننده محسوب می‌شود، که در آن تغییرات مجاز دامنه سیگنال‌های خروجی به برخی مقادیر متناهی محدود می‌شود. ورودی خالص (net) و خروجی ( $y$ ) مطابق فرمول‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند.

$$\text{net}_j = \sum_{k=1}^K w_{jk} x_k + b \quad (1)$$

$$y_j = g(\text{net}_j) \quad (2)$$

که در آن،  $x_1, x_2, \dots, x_k$ : سیگنال‌های ورودی؛  $w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jk}$ : وزن‌های سیناپسی جمع‌شونده به یک نرون؛  $\text{net}_j$ : تأثیر تجمعی همه نرون‌های متصل به نرون  $j$  و آستانه داخلی نرون  $j$ ؛  $g$ : تابع فعالیت؛ و  $y_j$ : سیگنال خروجی نرون است (محمدی، ۱۳۸۲، ۱۴۵).



شکل ۳. مدل یک نرون چندورودی

در پژوهش حاضر برای ارزیابی دقت مدل، از شاخص جذر میانگین مربعات خطا استفاده شده است که از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}{n}} \quad (3)$$

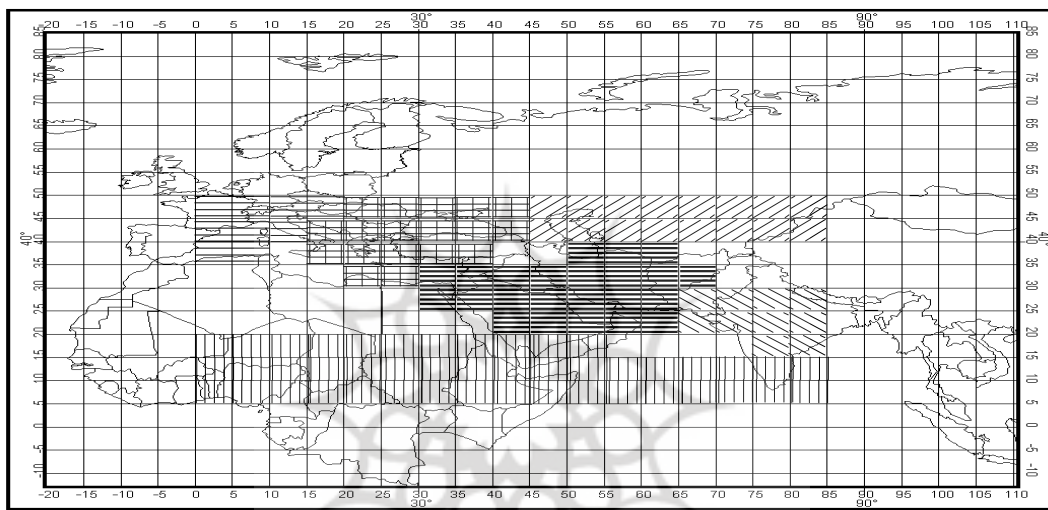
در این رابطه RMSE به معنی جذر میانگین مربعات خطا؛  $o_i$  و  $e_i$  به ترتیب مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده متغیر در نقطه  $i$ ؛ و  $n$  تعداد مشاهدات است.

### یافته‌های تحقیق

در پژوهش حاضر برای به دست آوردن سیگنال‌های هواشناسی مؤثر بر بارش منطقه، از روش همبستگی پیرسون استفاده شده است. به این ترتیب کلیه سیگنال‌هایی که در بازه زمانی اکتبر تا مارس (مهر تا اسفند) و ژانویه تا مارس (دی تا اسفند) در سطح ۵ درصد با بارش منطقه همبستگی معنی‌دار نشان داده‌اند، به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده در ساختار مدل پیش‌بینی بارش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بعد از بررسی‌های متعدد، مشخص گردید بهترین حالت تأثیر سیگنال‌ها وقتی است که از بازه زمانی اکتبر تا مارس سیگنال‌ها استفاده گردد. لذا سیگنال‌های زیر در بازه زمانی اکتبر تا مارس به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده در مدل‌های پیش‌بینی بارش مورد استفاده قرار گرفته‌اند: (۱) SST مرکز اقیانوس اطلس؛ (۲) SST غرب

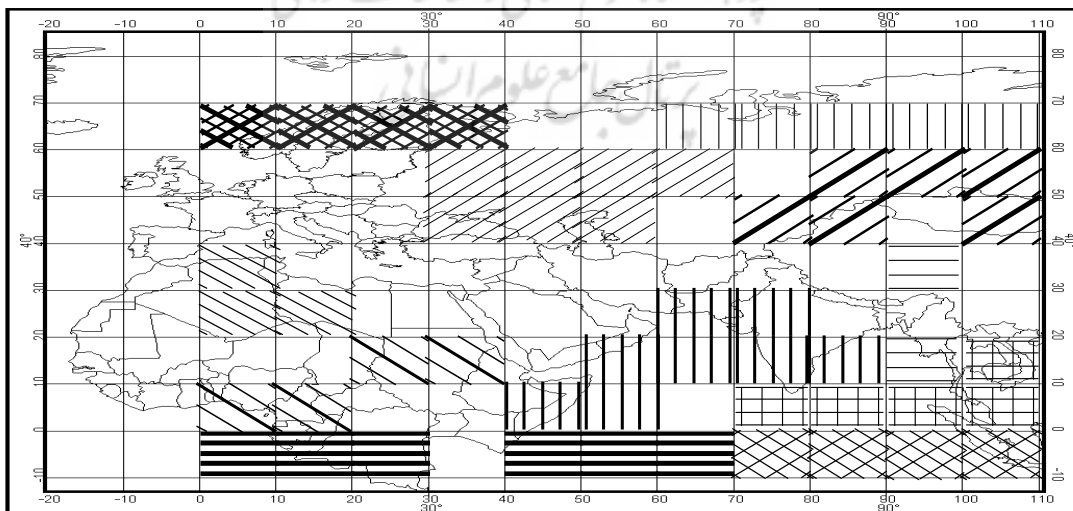


دریای مدیترانه؛ (۳)  $\Delta$ SST دریاچه آرال؛ (۴)  $\Delta$ SST دریای لابرادور؛ (۵) SLP شمال خلیج فارس؛ (۶) SLP دریای عمان؛ (۷) SLP جنوب خلیج فارس؛ (۸) SLP جنوب دریای سرخ؛ (۹)  $\Delta$ SLP بین شرق دریای مدیترانه و دریای عمان؛ (۱۰) دمای هوای سطح ۷۰۰ میلی‌بار در منطقه شاخص فاکتور ۲ در شبکه‌های ۵×۵ درجه (شکل ۴)؛ (۱۱) دمای هوای سطح ۷۰۰ میلی‌بار در منطقه شاخص فاکتور ۳ در شبکه‌های ۵×۵ درجه (شکل ۴)؛ (۱۲) آب قابل بارش در منطقه شاخص فاکتور ۱۰ در شبکه‌های ۱۰×۱۰ درجه (شکل ۵)؛ (۱۳) رطوبت نسبی سطح ۳۰۰ میلی‌بار در منطقه شاخص فاکتور ۲ در شبکه‌های ۵×۵ درجه (شکل ۶)؛ (۱۴) رطوبت نسبی سطح ۳۰۰ میلی‌بار در منطقه شاخص فاکتور ۴ در شبکه‌های ۵×۵ درجه (شکل ۶).



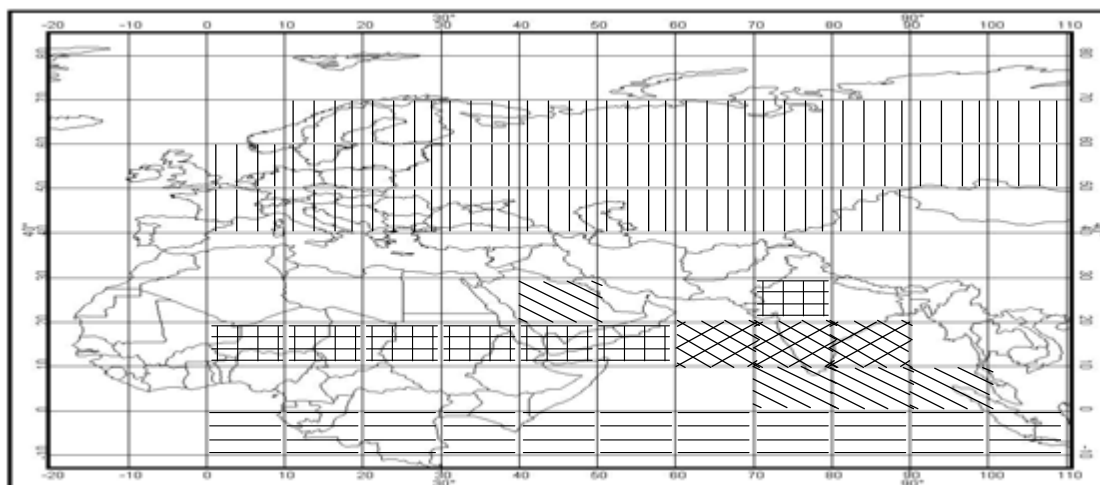
Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5	Factor6
[Empty]	[Horizontal lines]	[Vertical lines]	[Diagonal lines /]	[Diagonal lines \]	[Cross-hatch]

شکل ۴. مناطق شاخص شناسایی شده دمای سطح ۷۰۰ میلی‌بار در بازه زمانی اکتبر تا مارس در شبکه‌های ۵×۵ درجه با روش تحلیل عاملی



Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5	Factor6	Factor7	Factor8	Factor9	Factor10	Factor11
[Empty]	[Empty]	[Diagonal lines /]	[Diagonal lines \]	[Horizontal lines]	[Vertical lines]	[Cross-hatch]	[Diagonal lines /]	[Diagonal lines \]	[Empty]	[Diagonal lines /]

شکل ۵. مناطق شناسایی شده آب قابل بارش در بازه زمانی اکتبر تا مارس در شبکه‌های ۱۰×۱۰ درجه



Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
	— — — — —	\ \ \ \ \	/ / / / /	+ + + + +

شکل ۶. مناطق شناسایی شدهٔ رطوبت نسبی سطح ۳۰۰ میلی‌بار در شبکه‌های ۵×۵ درجه

### پیش‌بینی بارش بهاره با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

در این تحقیق از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تدوین مدل پیش‌بینی بارش بهاره استفاده شده است. مدل مذکور، داده‌ها را به سه بخش مختلف با عنوان داده‌های آموزشی<sup>۱</sup>، داده‌های صحت‌سنجی<sup>۲</sup> و داده‌های تست<sup>۳</sup> تقسیم می‌کند.

برای این منظور از ۳۸ سال داده، تعداد ۱۹ سال آن با عنوان داده‌های آموزشی (۱۹۸۸-۱۹۷۰)، تعداد ۹ سال به عنوان داده‌های صحت‌سنجی (۱۹۹۷-۱۹۸۹) و ۱۰ سال باقی‌مانده هم به عنوان داده‌های تست (۲۰۰۷-۱۹۹۸) استفاده گردیدند. به عبارت دیگر، از مجموع داده‌های تاریخی، دوسوم آنها (۱۹۹۷-۱۹۷۰) به عنوان داده‌های کالیبراسیون<sup>۴</sup> و یک‌سوم (۲۰۰۷-۱۹۹۸) به عنوان داده‌های تست در نظر گرفته شدند.

پس از آزمون‌های مختلف برای آزمون شبکه، تعداد نرون‌های لایه پنهان و توابع فعالیت مختلف در لایه پنهان و خروجی، سرانجام مدل نهایی با یک لایه ورودی (سیگنال‌های ذکر شده در بخش قبل)، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی (میانگین بارش بهاره)، دارای کمترین خطا بود و به عنوان مدل نهایی مورد استفاده قرار گرفت.

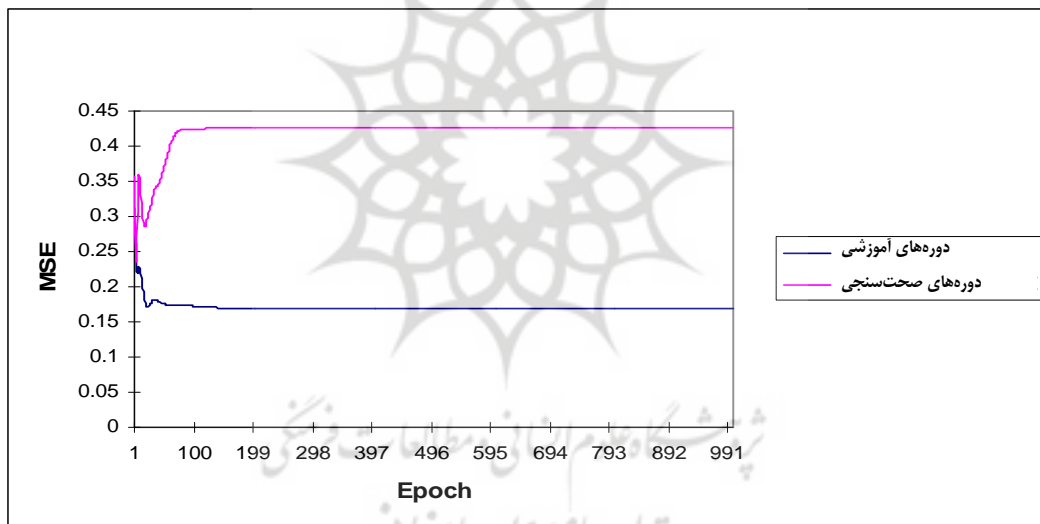
تعداد نرون‌های لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی به ترتیب شامل چهارده، چهار و یک نرون است (۱-۴-۱۴). تابع فعالیت لایه پنهان، تابع تانژانت هایپربولیک و تابع فعالیت لایه خروجی، تابع سیگموئید خطی است. لازم به یادآوری است، جذر میانگین مربعات خطا در این مدل ۶/۸ میلی‌متر به دست آمده است.

شکل ۷ و جدول ۲ نتایج دوره کالیبراسیون مدل پیش‌بینی بارش را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود،

1. Training
2. Validation
3. Testing
4. Calibration

حداقل میانگین مربعات خطا در تکرار ۱۰۰۰ به میزان  $0/169$  و حداکثر میانگین مربعات خطا هم مقدار  $0/169$  به دست آمده، که با حداقل میانگین مربعات خطا برابر است. به عبارت دیگر، در این مرحله، در تکرار ۱۰۰۰، شبکه حداکثر نهایی خطا را به خود اختصاص داده است.

همچنین، حداقل میانگین مربعات خطای دوره صحت‌سنجی در تکرار ۳ به میزان  $0/234$  و حداکثر میانگین مربعات خطای دوره صحت‌سنجی مقدار  $0/425$  به دست آمده است. نتایج مدل پیش‌بینی در جدول ۳ و شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این نتایج برای سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۷ میلادی که دوره تست مدل بوده‌اند، ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (MSE)  $46/5$  و میانگین مربعات خطای نرمال‌شده<sup>۲</sup> (NMSE)  $0/55$  است. همچنین میانگین مطلق خطا<sup>۳</sup> (MAE) برای این مدل،  $6/15$  میلی‌متر به دست آمده است. مینیمم مطلق خطا<sup>۴</sup>  $0/13$  میلی‌متر و ماکزیمم مطلق خطا<sup>۵</sup>  $10/9$  میلی‌متر به دست آمده است. همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر بارش ثبت شده و پیش‌بینی شده برای مدل،  $0/79$  است. ریشه میانگین مربعات خطا برای این مدل،  $6/8$  میلی‌متر است.

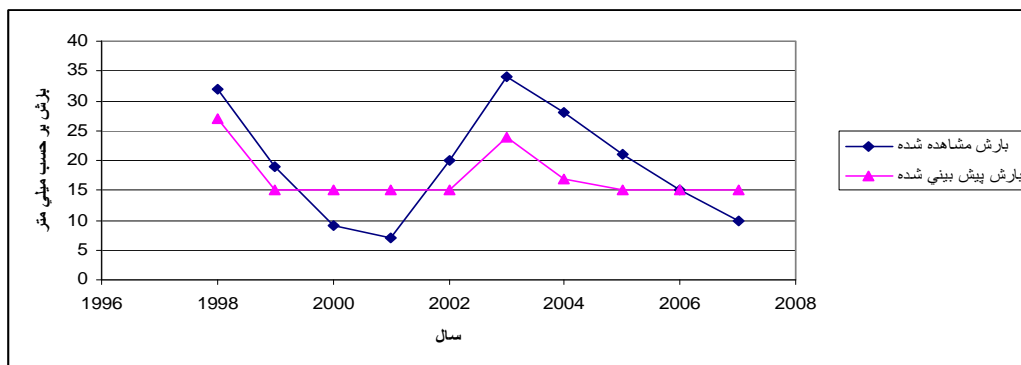


شکل ۷. نمودار میانگین مربعات خطا در دوره‌های آموزشی و صحت‌سنجی در تکرارهای مختلف

جدول ۲. مینیمم و ماکزیمم خطا در دوره‌های آموزشی و صحت‌سنجی

صحت‌سنجی	آموزش	بهترین شبکه
۳	۱۰۰۰	تکرار
$0/234672223$	$0/169410659$	حداقل میانگین مربعات خطا
$0/425994516$	$0/169410659$	حداکثر میانگین مربعات خطا

1. Mean Square Error
2. Normalizes Mean Square Error
3. Mean Absolute Error
4. Min Abs Error
5. Max Abs Error



شکل ۸. مقایسه بارش مشاهده شده و پیش‌بینی شده در محدوده مورد مطالعه با مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی

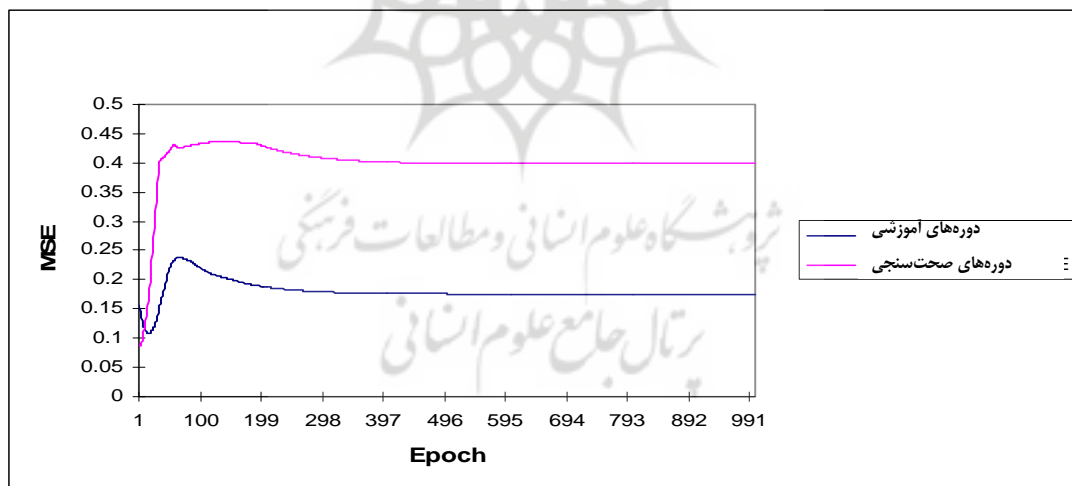
جدول ۳. پیش‌بینی بارش محدوده مورد مطالعه با مدل شبکه عصبی

سال	بارش ثبت شده	بارش پیش‌بینی
۱۹۹۸	۳۲	۲۷
۱۹۹۹	۱۹	۱۵
۲۰۰۰	۹	۱۵
۲۰۰۱	۷	۱۵
۲۰۰۲	۲۰	۱۵
۲۰۰۳	۳۴	۲۴
۲۰۰۴	۲۸	۱۷
۲۰۰۵	۲۱	۱۵
۲۰۰۶	۱۵	۱۵
۲۰۰۷	۱۰	۱۵

جدول ۴. مشخصات مدل شبکه عصبی مصنوعی

عملکرد شبکه	مقدار به دست آمده
میانگین مربعات خطا	۴۶/۵۴۴۲۵۸۴۳
میانگین مربعات خطای نرمال شده	۰/۵۵۰۴۲۰۵۶۶
میانگین مطلق خطا	۶/۱۵۲۴۸۶۸۷۲
حداقل مطلق خطا	۰/۱۳۷۶۹۴۵۱۶
حداکثر مطلق خطا	۱۰/۹۸۰۷۱۵۵۲
ضریب همبستگی بین بارش مشاهده شده و پیش‌بینی شده	۰/۷۹۰
ریشه میانگین مربعات خطا	۶/۸

بررسی نتایج مدل نشان می‌دهد که مدل عمدتاً توان پیش‌بینی سال‌های حدی خشک و تر را ندارد. این امر از آنجا ناشی می‌شود که سال‌های حدی در دوره کالیبراسیون مدل پیش‌بینی تکرار نشده است و به همین دلیل، مدل قادر به پیش‌بینی این سال‌های حدی نیست. لازم به یادآوری است که کمترین مقدار بارش در سری زمانی بارندگی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ اتفاق افتاده است. برای حل این مشکل، بایستی مدل با داده‌های حدی آموزش داده شود. به همین دلیل و برای توسعه مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی بارش فصلی، به‌طوری که بتوان از آن در تمام موارد اعم از سال‌های خشک، تر و نرمال استفاده کرد - سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۰ که یکی نماینده سال حدی خشک و دیگری نماینده سال حدی تر در دوره تست مدل به‌شمار می‌آید، از داده‌های تست خارج شدند و به داده‌های آموزشی و دوره کالیبراسیون مدل منتقل و به جای آنها داده‌های دیگری جایگزین گردیدند. شکل ۹ و جدول ۵ نتایج دوره کالیبراسیون مدل پیش‌بینی بارش را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، حداقل خطای آموزش در تکرار ۱۷ به میزان ۰/۱۰۸ به دست آمده است. خطای نهایی آموزش هم به مقدار ۰/۱۷۵ به دست آمده است. همچنین، حداقل خطای صحت‌سنجی در تکرار ۱ به میزان ۰/۰۸۷ به دست آمده است. همچنین، خطای نهایی صحت‌سنجی مقدار ۰/۳۹۹ به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دقت مدل به‌طور اعجاب‌آوری در تشخیص تمامی سال‌های خشک، تر و نرمال افزایش یافته است و می‌توان گفت که دقت این مدل بسیار بالاتر از مدل قبلی است و شکل ۱۰ هم به وضوح این موضوع را نشان می‌دهد. بنابراین، نتیجه می‌گیریم که تغییر در نوع داده‌های آموزشی، در نتایج مدل پیش‌بینی بارش مؤثر بوده است و با این مدل می‌توان بارش را با دقت بالایی تخمین زد.



شکل ۹. میانگین مربعات خطا در دوره‌های آموزشی و صحت‌سنجی بعد از اصلاح شبکه با داده‌های تاریخی

جدول ۵. حداقل و حداکثر خطا در دوره‌های آموزشی و صحت‌سنجی بعد از اصلاح شبکه با داده‌های تاریخی مناسب

صحت سنجی	آموزش	بهترین شبکه
۱	۱۷	تکرار
۰/۰۸۷۷۸۹۷۲۴	۰/۱۰۸۴۷۲۲۹۹	حداقل میانگین مربعات خطا
۰/۳۹۹۱۰۱۲۹۹	۰/۱۷۵۵۷۷۱۵۳	حداکثر میانگین مربعات خطا

جدول ۶ بارش مشاهده شده و پیش‌بینی شده در مدل را بعد از اصلاح بردار ورودی به شبکه در دوره آموزش نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دقت مدل در این حالت بسیار بالا رفته و ریشه میانگین مربعات خطا در این مدل به مقدار ۲/۵ میلی‌متر رسیده است، که کارایی بالای این مدل را در پیش‌بینی بارش منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۶. پیش‌بینی بارش محدوده مورد مطالعه بعد از اصلاح شبکه با داده‌های تاریخی

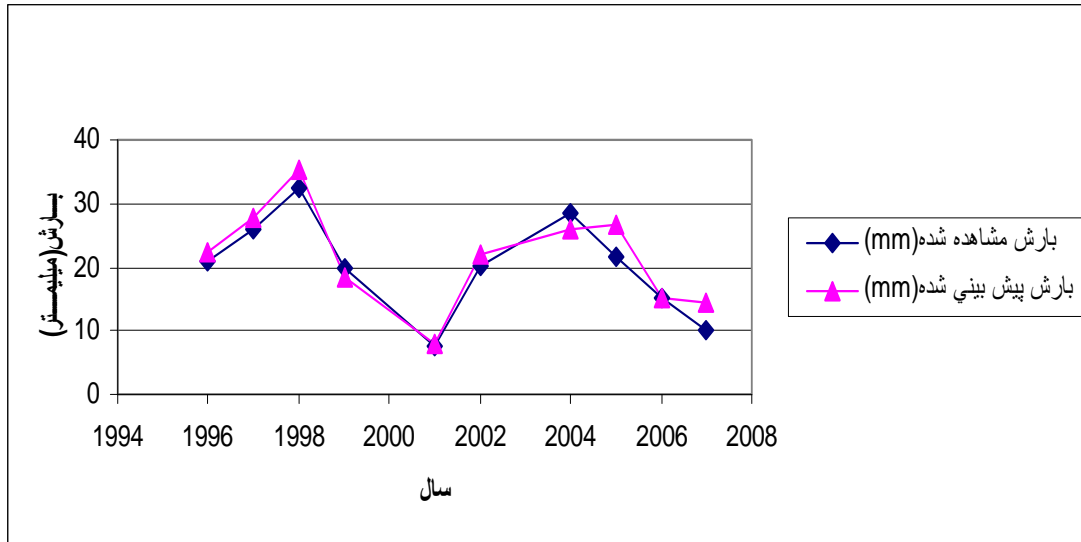
سال	بارش ثبت شده	بارش پیش‌بینی
۱۹۹۶	۲۱	۲۲
۱۹۹۷	۲۵	۲۷
۱۹۹۸	۳۲	۳۵
۱۹۹۹	۱۹	۱۸
۲۰۰۱	۷	۷٫۷
۲۰۰۲	۲۰	۲۲
۲۰۰۴	۲۸	۲۵
۲۰۰۵	۲۱	۲۶
۲۰۰۶	۱۵	۱۵
۲۰۰۷	۱۰	۱۴

در جدول ۷ میانگین مربعات خطا (MSE) ۶/۷ میلی‌متر و میانگین مربعات خطای نرمال شده (NMSE) ۰/۱۲ است. همچنین میانگین مطلق خطا (MAE) برای این مدل، ۲/۱۲ میلی‌متر به دست آمده است. مینیمم مطلق خطا ۰/۰۳ میلی‌متر و ماکزیمم مطلق خطا ۴/۹۷ میلی‌متر به دست آمده است. همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر بارش ثبت‌شده و پیش‌بینی شده برای مدل، ۰/۹۵ است که بسیار مناسب ارزیابی می‌گردد.

جدول ۷. مشخصات مدل شبکه عصبی مصنوعی بعد از اصلاح شبکه با داده‌های تاریخی

عملکرد شبکه	مقدار به دست آمده
میانگین مربعات خطا	۶/۷۳۷۵۹۲۵۸۱
میانگین مربعات خطای نرمال شده	۰/۱۲۳۶۶۱۰۲۷
میانگین مطلق خطا	۲/۱۲۶۰۴۳۴۵۷
حداقل مطلق خطا	۰/۰۳۴۶۷۹۴۶۳
حداکثر مطلق خطا	۴/۹۷۸۳۲۱۰۷۲
ضریب همبستگی بین بارش مشاهده شده و پیش‌بینی شده	۰/۹۵۶
جزر میانگین مربعات خطا	۲/۵





شکل ۱۰. مقایسه بارش مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در محدوده مورد مطالعه با مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی بعد از اصلاح شبکه با داده‌های تاریخی

برای تکمیل این بخش، لازم است نتایج به‌دست آمده به‌وسیله مدل، مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار بگیرد. شکل ۱۱ مقادیر بارش واقعی را در مقابل مقادیر بارش پیش‌بینی شده نشان می‌دهد. رابطه ۴، معادله خط رگرسیون تغییرات مقادیر بارش مشاهده شده را نسبت به مقادیر بارش پیش‌بینی شده نشان می‌دهد.

$$\text{بارش مشاهده شده (mm)} = 0.93 \times \text{بارش پیش‌بینی شده (mm)} + 0.05 \quad (4)$$



شکل ۱۱. تغییرات مقادیر بارش مشاهده شده نسبت به مقادیر بارش پیش‌بینی شده (خط مورب، خط رگرسیون است)

جدول ۸ خلاصه مشاهدات رگرسیون خطی بین مقادیر بارش واقعی و مقادیر بارش پیش‌بینی شده، و جدول ۹ نتایج تجزیه واریانس رگرسیون خطی بین مقادیر بارش واقعی و مقادیر بارش پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۸ دیده می‌شود، با در نظر گرفتن حدود اطمینان ۹۹ درصد رگرسیون خطی بین مقادیر بارش واقعی و مقادیر بارش پیش‌بینی شده، جذر میانگین مربعات خطا  $2/41$  میلی‌متر به دست آمده است، که دقت بالایی را نشان می‌دهد. همان‌طور

که در جدول ۹ دیده می‌شود، نسبت F در سطح ۱ درصد معنی‌دار است و نشان از ارتباط قوی تغییرات بارش مشاهده شده با مقادیر بارش پیش‌بینی شده دارد.

جدول ۸. خلاصه مشاهدات رگرسیون خطی بین مقادیر بارش واقعی و مقادیر بارش پیش‌بینی شده

مقدار به دست آمده	نام پارامتر
۰/۹۱	ضریب تبیین
۰/۹	ضریب تبیین تعدیل شده
۲/۴۱	جزر میانگین مربعات خطا
۲۰/۱	میانگین
۱۰	تعداد مشاهدات

جدول ۹. تجزیه واریانس رگرسیون خطی بین مقادیر بارش واقعی و مقادیر بارش پیش‌بینی شده

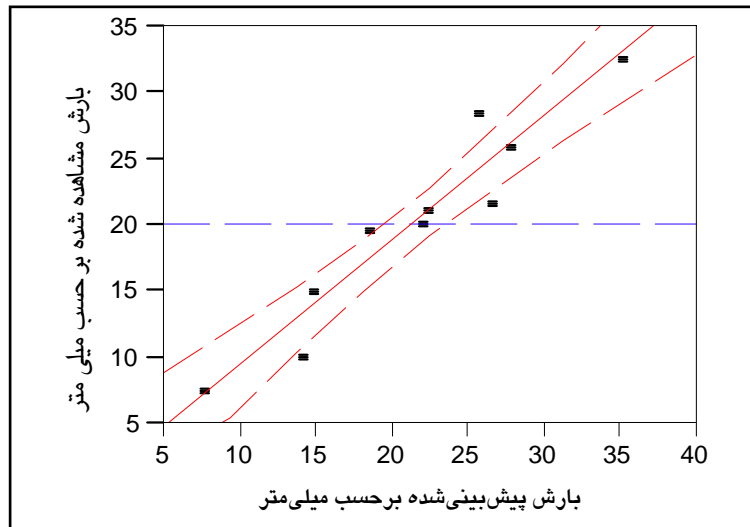
منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	نسبت F
رگرسیون	۱	۴۹۸/۳۹۴	۴۹۸/۳۹۴	۸۵/۷۱
خطا	۸	۴۶/۵	۵/۸۱	Prob>F
کل	۹	۵۴۴/۸۴		<۰/۰۰۰۱

جدول ۱۰ آزمون معنی‌دار بودن شیب خط رگرسیون بین مقادیر بارش واقعی و مقادیر بارش پیش‌بینی شده به وسیله مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، شیب خط رگرسیون نیز در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. مقدار P-value برای آزمون معنی‌دار بودن شیب خط رگرسیون کوچک‌تر از  $0/0001$  به دست آمده است.

جدول ۱۰. خلاصه مشاهدات آماری مربوط به تخمین داده‌های مدل

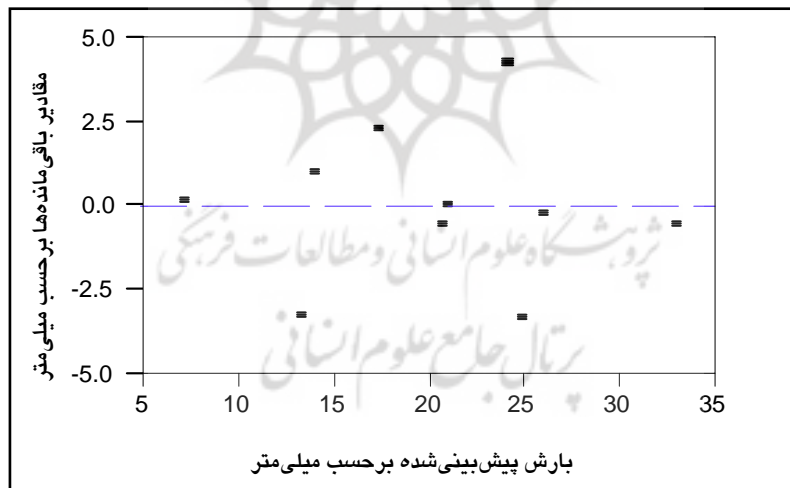
پارامتر	مقدار تخمین زده شده	خطای استاندارد	نسبت t	Prob> t
عرض از مبدأ	-۰/۰۵	۲/۳۱	-۰/۰۲	۰/۹۸۱۱
باقی‌مانده‌ها	۰/۹۳	۰/۱	۹/۲۶	<۰/۰۰۰۱

شکل ۱۲ هم حدود اطمینان ۹۹ درصد را برای تغییرات بارش مشاهده شده در برابر مقادیر بارش پیش‌بینی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اینجا نیز تغییرات بارش مشاهده شده و مقادیر بارش پیش‌بینی شده تطابق بسیار بالایی دارد و در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.



شکل ۲. حدود اطمینان ۹۹ درصد تغییرات بارش مشاهده شده در برابر بارش پیش‌بینی شده

شکل ۱۳ هم تغییرات مقادیر باقی‌مانده‌ها را در برابر مقادیر بارش پیش‌بینی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اینجا نیز تغییرات مقادیر باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر بارش پیش‌بینی شده، کاملاً تصادفی و نرمال است و نشان از دقت بالای مدل در پیش‌بینی بارش دارد.



شکل ۱۳. تغییرات مقادیر باقی‌مانده‌ها نسبت به مقادیر بارش پیش‌بینی شده برحسب میلی‌متر

## نتیجه‌گیری

در مجموع، بررسی نتایج مدل نشان از اختلاف بین بارش مشاهده شده و پیش‌بینی شده در محدوده وسیعی دارد و مدل توانسته است در تمامی سال‌ها، بارش را با خطای قابل قبولی پیش‌بینی کند. جذر میانگین مربعات خطا برای این مدل، ۲/۵ میلی‌متر است که بسیار اندک است و دقت مدل را در پیش‌بینی بارش منطقه به وضوح نشان می‌دهد. به‌طور کلی چنین استنباط می‌شود که متغیرهای وارد شده به مدل، توانسته‌اند به راحتی و با دقت زیاد، الگوی پراکندگی و توزیع

بارش را در سال‌های مورد مطالعه در این تحقیق، توجیه کنند و به‌طور موفقیت‌آمیزی در پیش‌بینی بارش فصل بهار مورد استفاده واقع شوند. این موضوع نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب شرب و کشاورزی ایفا می‌کند و می‌توان با در نظر گرفتن این پیش‌بینی‌ها، سیاست‌های آینده را در جهت بهینه‌سازی صرف هزینه‌ها و امکانات بهره‌وری حداکثر طرح‌ریزی کرد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر، با نتایج به‌دست آمده از سوی پژوهشگران دیگر (فلاح قاهره، ۱۳۸۵، ۱۶۰) و (کارآموز، ۱۳۸۴، ۲۵۰) نشان‌دهنده افزایش دقت مدل مورد استفاده در این تحقیق در پیش‌بینی بارش بهاره است و می‌توان به‌طور موفقیت‌آمیزی از این مدل در پیش‌بینی بارش بهاره استفاده کرد.

### سپاس‌گزاری

این مقاله بخشی از نتایج طرح پژوهشی «پیش‌بینی بارش بهاره استان خراسان رضوی براساس سیگنال‌های هواشناسی با استفاده از منطق فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و شبکه‌های عصبی فازی تطبیقی» است، که نگارنده آن را به انجام رسانده و مراتب سپاس و قدردانی خود را به‌دلیل در اختیار قراردادن امکانات لازم برای انجام این طرح، از مسئولان محترم پژوهشکده اقلیم‌شناسی، ابراز می‌دارد.

### منابع

- Abraham, A., Sajith, N. and Joseph, B., 2001, **Will We Have a Wet Summer? Long-term Rain Forecasting Using Soft Computing Models**, Modelling and Simulation, Publication of the Society for Computer Simulation International, Prague, Czech Republic, pp. 1044-1048
- Alijani, B., 2003, **Synoptic Climatology**, Samt Press, First Edition, PP. 257.
- Cavazos, T., 2000, **Using Self-Organizing Maps to Investigate Extreme Climate Event: An Application to Wintertime Precipitation in the Balkans**, Journal of Climate, Vol. 13, PP. 1718-1732.
- Choi, L., 1999, **An Application Hydroinformatic Tools for Rainfall Forecasting**, Thesis (Ph.D), University of New South Wales (Australia), p. 752.
- Fallah Ghalhary, G.A., 2006, **Predicting Seasonal Rainfall Based on Synoptic Patterns by Means of Fuzzy Sets Theory**, Master Thesis, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- Fallah Ghalhary, G.A., Mousavi Baygi M., Habibi Nokhandan M., 2007, **Seasonal Rainfall Forecasting Based on Synoptically Pattern of Sea Level Pressure and Sea Level Pressure Gradient by Means of Statistical Models**, Agricultural Sciences and Technology Journal. Ferdowsi University of Mashhad.21, 95-104 (in Farsi). <http://jm.um.ac.ir/index.php/agricultural/issue/view/158>
- Fatehi Marj H., 2000, **A Study of Chaos in Dynamic Systems**, Master Thesis in Power, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

- Halid, H. and Ridd, P., 2002, **Modelling Inter-Annual Variation of a Local Rainfall Data Using a Fuzzy Logic Technique**, Proceeding of International Forum on Climate Prediction, James Cook University, Australia, First Proof Pages, pp: 166-170.
- Haltiner, G.J., and Williams, R.T., 1980, **Numerical Prediction and Dynamic Meteorology**, 2nd Edition, New York, Wiley & Sons, pp. 447.
- Karamouz, M., 2006, **Long Term Rainfall Forecasting Using By Meteorological Signals**, Iran Meteorological Organization.
- Khalili, N., 2006, **Rainfall Forecast by Means of Neural Networks**, Master Thesis in Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Agriculture, supervised by Kamran.
- Mahdizadeh, M.B., 2004, **Artificial Neural Networks and Their Application in Civil Engineering**, First Ed, Ebadi publication (in Farsi).
- Maria, C., Haroldo, F. and Ferreira, N., 2005, **Artificial Neural Network Technique for Rainfall Forecasting Applied to the Sao Paulo Region**, Journal of Hydrology, Vol. 301, Issues 1-4, PP.146-162.
- Mohammadi, K., Misaghi, F., 2003, **Artificial Neural Networks**, first edition, Tarbiat Modarres University Press, Iran (in Farsi).
- Mousavi Baygi, M., Fallah Ghalhary, G.A., Habibi Nokhandan, M., 2008, **The Relationship between Large-scale Climatic Predictors and Rainfall in Khorasan**, j.Agric.sci.Natur.Resour, 15. 2, ISSN: 1028-3099 (in Farsi). [www.magiran.com/jasnr/print-87-2.htm](http://www.magiran.com/jasnr/print-87-2.htm)
- Nazemosadat, M.J., 2001, **Will it Rain? Drought and Rainfall in Iran and Their Relation with ENSO**, Shiraz University Press.
- Pongracz, R. and Bartholy, J., 2006, **Regional Effects of ENSO in Central/Eastern Europe**, Journal of advances in Geosciences, Vol. 6, pp. 133-137.