

## پهنه‌بندی فضایی بارش سالانه ایران با استفاده از مدل عصبی مصنوعی - فازی ANFIS-FCM

علی شاهبایی کوتنایی و حسین عساکره<sup>\*۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۶)

### چکیده

بارش یکی از مهم‌ترین فراسنج‌های آب و هوایی است که چگونگی پراکنش و مقادیر آن در نواحی مختلف، برابند روابط پیچیده خطی و غیرخطی بین عناصر جوی - فرایندهای اقلیمی و ساختار فضایی محیط سطح زمین است. طبقه‌بندی داده‌ها و فرارگیری آنها در پهنه‌های کوچک و متجانس می‌تواند در بهبود درک این روابط پیچیده و نتایج حاصل از آنها مؤثر باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های بارش سالانه ۳۴۲۳ ایستگاه همدیدی، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی ایران در دوره ۱۹۶۱ - ۲۰۱۵ و داده‌های ارتفاع، شیب، جهت شیب و تراکم ایستگاهی تلاش شد تا چگونگی پراکنش بارش کشور در ارتباط با عوامل محیطی پهنه‌بندی شده و مورد تحلیل قرار گیرد. بدین منظور بعد از استانداردسازی و آماده‌سازی ماتریس داده‌ها، تعداد بهینه خوشه‌ها مشخص و مجموعه داده‌ها به مدل شبکه عصبی - فازی (ANFIS-FCM) وارد شد. بررسی نتایج نشان داد که مقادیر شاخص‌های  $R^2$  و MAE به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۲۳ بوده که حاکی از دقت مناسب مدل است. همچنین مشخص شد در پهنه‌های چهارگانه خروجی مدل، عوامل محیطی از اثرگذاری بالایی در پراکنش فضایی فراسنج بارش برخوردار هستند. در پهنه‌های اول و سوم، ترکیب عوامل ارتفاع و شیب زیاد به همراه مجاورت جغرافیایی با سامانه‌های بارشی، موجب شده متوسط مقدار بارش سالانه در این پهنه‌ها به ترتیب ۳۱۸ و ۱۸۱ میلی‌متر باشد؛ در حالی که با تضعیف نقش عوامل محیطی در خوشه‌های دوم و چهارم، متوسط بارش سالانه به حدود ۱۰۰ میلی‌متر کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی، منطق فازی، تابع عضویت، خوشه‌بندی، بارش، ایران.

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Shahbai2008@yahoo.com

## مقدمه

بارش یکی از عناصر آب و هوایی است که دارای روابط بسیار پیچیده‌ای با مؤلفه‌های مکانی است. بارش زمانی اتفاق می‌افتد که هوای مرطوب و عامل صعود، هر دو با هم در منطقه‌ای حضور داشته باشند (۱۷). این عنصر یکی از داده‌های مهم ورودی به سامانه‌های هیدرولوژیکی بوده که آگاهی از رفتار زمانی - مکانی آن در برنامه‌ریزی‌های محیطی و طرح‌های درگیر با آن مؤثر است. رفتار زمانی - مکانی بارش از یک سو متأثر از سامانه‌های همدید و گردش عمومی جو و از سوی دیگر تحت تأثیر عوامل محلی - مکانی است. عوامل مکانی از قبیل ارتفاع، شرایط توپوگرافی، موقعیت مطلق و نسبی، ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، شرایط فیزیوگرافیک منطقه و ... نیز ممکن است بر مقادیر بارش ثبت شده هر ایستگاه تأثیرگذار باشد و رفتار فضایی این سنجه اقلیم‌شناختی را کنترل کند (۲۴). گاه ممکن است تحت تأثیر عوامل مکانی یکسان مقادیر ثبت شده بارش در موقعیت‌های فضایی (ایستگاه‌های همدیدی و باران‌سنجی) مختلف، تشابه معنی‌داری داشته باشند. این تفاوت در عملکرد و پیچیدگی‌های ساختاری موجب می‌شود بررسی دقیق این فراسنج در محدوده‌های گسترده امری دشوار و چه بسا همراه با خطا باشد. مرزبندی و تفکیک زمانی - مکانی به واحدهای به نسبت مستقل از یکدیگر بر اساس یک یا چند معیار مفروض همواره در کانون توجه جغرافیدانان بوده (۱۹) و هدف اصلی در این گونه تقسیم‌بندی‌ها پیشینه کردن شباهت‌های درون‌گروهی و تفاوت‌های برون‌گروهی است. این فرایند موجب می‌شود حجم زیادی از اطلاعات با اختصاص به چند دسته متجانس کوچک‌تر به راحتی در روش‌های مختلف مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرند. به علاوه این روش می‌تواند به گسترش معلومات نقطه‌ای به اطلاعات منطقه‌ای برای نقاط فاقد آمار کمک فراوانی کند (۱۱). امروزه پژوهشگران با روش‌های مختلفی نواحی را طبقه‌بندی و پهنه‌بندی می‌کنند. از یک دیدگاه، این روش‌ها را می‌توان به دو دسته آماری و هوشمند

تقسیم کرد. پرکاربردترین روش‌های چندمتغیره آماری در این زمینه شامل تحلیل عاملی (FA) به همراه تحلیل خوشه‌ای (CA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران علوم هوا و اقلیم‌شناسی قرار گرفته است (۲۲). روش‌های هوشمند اغلب مبتنی بر آموزش هستند و دارای فراسنج‌هایی هستند که لازم است در طول فرایند یادگیری تنظیم شوند. از جمله مهم‌ترین روش‌های هوشمند می‌توان به شبکه‌های عصبی یا عصبی-فازی اشاره کرد (۳). در این روش‌ها تلاش می‌شود بر اساس فرایندهای یادگیری و با استفاده از پردازشگرهای ساده به نام نرون (Neuron) روابط ذاتی میان داده‌ها شناسایی شده و از این طریق نگاهی میان فضای ورودی (لایه ورودی) و فضای مطلوب (لایه خروجی) ارائه شود (۲۱). برحسب روابط درونی و چگونگی یادگیری و پردازش داده‌ها در شبکه، ساختارهای مختلفی از شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است. یکی از ساختارهای مهم و بهینه‌سازی شده در این شبکه، مدل استنتاج تطبیقی فازی-عصبی (Adaptive neuro-fuzzy inference system) است. این ساختار که اولین بار در سال ۱۹۹۳ ارائه و در سال ۱۹۹۶ بسط یافت، اجازه می‌دهد که سیستم‌های فازی در زمینه آموزش فراسنج‌ها، از الگوریتم آموزش انتشار خطای تطبیقی استفاده کنند و بدین ترتیب مجموعه‌های فازی به عنوان وزن ارتباطات و متغیرهای ورودی و خروجی به عنوان نرون‌ها تفسیر خواهند شد و از این طریق الگوریتم یادگیری ساختارها، فراسنج‌ها و یا هر دوی آنها اصلاح می‌شود (۲۳). در زمینه مدل‌سازی و پیش‌بینی و طبقه‌بندی با شبکه‌های فازی و همچنین ساختار ANFIS پژوهش‌های گوناگونی در ایران و سایر نقاط جهان صورت پذیرفته است؛ از جمله حاج حمد و همکاران (۱۳) بر اساس روش منطق فازی اقلیم‌های محلی و شرایط گلخانه‌ای را بررسی و طبقه‌بندی کرده و مدلی در این زمینه ارائه کردند. عاقل‌پور و همکاران (۱) با استفاده از داده‌های بارش ۸ ایستگاه اقلیمی ایران، میزان کارایی مدل‌های رگرسیون، شبکه

های آب و هوایی و محیطی به‌عنوان ورودی‌های مدل و انجام پهنه‌بندی بر مبنای آنها و توجه به نسبی بودن تغییرات شرایط بارشی بر اساس نقش عوامل محیطی و محلی است.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مورد مطالعه

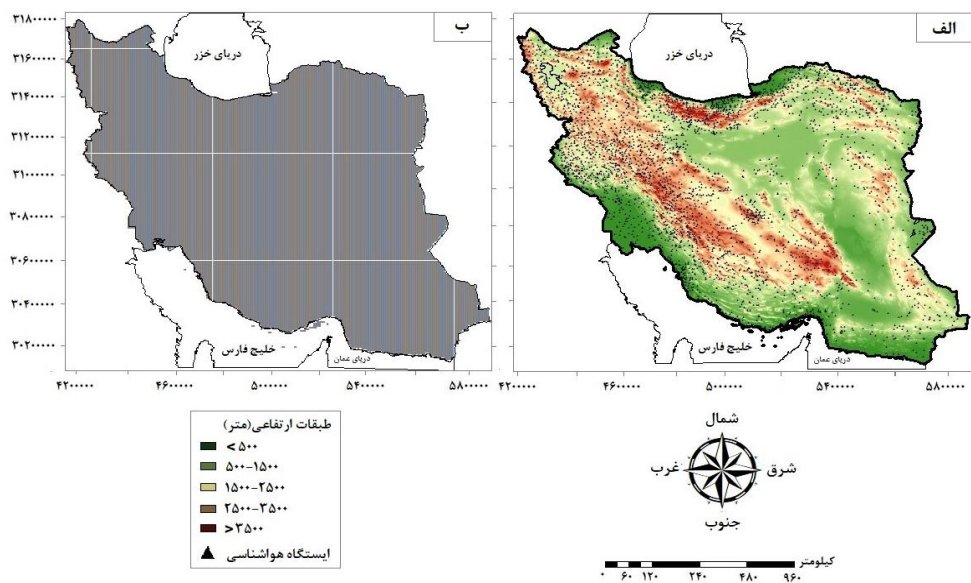
محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل تمامی پهنه کشور ایران است (شکل ۱). سرزمین ایران با وسعت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع، بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی واقع شده است (۲۰). ایران سرزمینی بسیار متنوع است و ترکیب عوامل محیطی مختلف از قبیل وسعت، ارتفاع، شکل و جهت ناهمواری‌ها و موقعیت طبیعی، سبب شده است این سرزمین از نظر آب و هوایی تنوع زیادی داشته باشد و این موضوع از نحوه تغییرپذیری شدید زمانی - مکانی دو عنصر عمده اقلیمی یعنی دما و بارش در آن قابل مشاهده بوده است.

### روش تحقیق

به‌منظور انجام پهنه‌بندی بارشی - محیطی در سطح کشور با روش ANFIS-FCM و ارزیابی کیفیت آن، در نخستین گام اقدام به گردآوری و آماده‌سازی داده‌های بارشی و محیطی مورد نیاز شده است. داده‌های بارش شامل میانگین سالانه فراسنج بارش ۳۴۲۳ ایستگاه همدیدی، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی ایران در دوره ۲۰۱۵-۱۹۶۱ بوده که از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده است. به‌منظور افزایش کیفیت تحلیل‌ها تلاش شد داده‌های ایستگاهی با طول دوره آماری حداقل ۱۵ سال پیاپی و بیشتر مورد استفاده قرار گیرند (شکل ۱- الف) این نحوه انتخاب طول دوره آماری موجب شده تا علاوه بر افزایش پراکنش و پوشش جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده در بخش میان‌یابی اولیه، ایستگاه‌های بیشتری وارد مدل عصبی - فازی شود و دقت پهنه‌بندی‌های نهایی افزایش یابد. داده‌های محیطی مورد استفاده شامل فراسنج‌های ارتفاع، شیب، جهت

عصبی و منطق فازی را در طبقه‌بندی و پیش‌بینی شرایط بارشی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مدل رگرسیون دارای دقت بالاتری نسبت به روش‌های هوش مصنوعی بوده است. جعفری و همکاران (۱۶) کارایی مدل های ANFIS و ANFIS-Wavelet در خوشه‌بندی و پیش‌بینی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را مورد مقایسه قرار دادند و دریافتند مدل ترکیبی ANFIS-Wavelet دارای برآوردهای بهتری نسبت به مدل ANFIS است. فرسادنیا و همکاران (۷) با هدف تعیین مناطق بارشی همگن در استان مازندران و تحلیل روند بارش در آنها از روش خوشه‌بندی فازی استفاده و سه ناحیه بارشی در این استان را تشخیص و مورد بررسی قرار دادند. قربانی و همکاران (۱۱) شرایط دمایی ۱۱۲ ایستگاه هواشناسی ایران را با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی فازی و شبکه عصبی مصنوعی کوهن طبقه‌بندی کردند. مکاریان و همکاران (۲۰) نیز با همین روش مطالعه‌ای در زمینه طبقه‌بندی میزان تبخیر سالانه ایستگاه‌های تبخیرسنجی انجام دادند.

با وجود پژوهش‌های پرتعداد انجام شده با روش‌های عصبی - فازی، تعداد پژوهش‌هایی که در زمینه پهنه‌بندی‌های بارشی - محیطی انجام شده و کارایی این روش‌ها در آنها مورد ارزیابی قرار گرفته باشد، بسیار اندک هستند. این‌گونه پهنه‌بندی‌ها که با استفاده از چند گروه داده محیطی و بارشی انجام می‌شود نقش مهمی در شناخت توان‌های محیطی در بخش‌های مختلف محدوده‌های بزرگ و انجام برنامه‌ریزی‌های اجتماعی - اقتصادی و زیست محیطی در آنها دارد. بر این اساس و با توجه به ضرورت افزایش هرچه بیشتر دقت در امر ناحیه‌بندی، در این پژوهش تلاش شده با استفاده از داده‌های بارش سالانه، ارتفاع، شیب، جهت شیب و تراکم ایستگاهی در سطح ایران، چگونگی تغییرات فراسنج بارش در سطح کشور در ارتباط با عوامل فضایی سطح زمین با استفاده از روش عصبی - فازی ANFIS-FCM پهنه‌بندی شده و مورد تحلیل قرار گیرد. نکته مهم در پژوهش حاضر که در سایر پژوهش‌های مشابه کمتر به آن پرداخته شده، استفاده همزمان از داده



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی، شرایط ارتفاعی و چگونگی پراکنش ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش و

ب) پوشش یاخته‌های ۸×۸ کیلومتری در پهنه ایران

اندازه‌گیری متغیرها فرایند استانداردسازی روی داده‌ها اعمال شد. بدین منظور از نمایه نمره استاندارد  $Z$  (رابطه ۱) استفاده شد:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S} \quad (1)$$

در این رابطه  $x_i$  مقدار هر یک از مشاهدات،  $\bar{x}$  میانگین کل مشاهدات و  $S$  انحراف معیار مشاهدات است. مقدار استاندارد شده با این نمایه فقط فاصله هر یک از متغیرها را از میانگین و برحسب واحدهای انحراف معیار بیان می‌کند. با این وصف، نمره استاندارد شده مقداری بدون بعد تلقی می‌شود؛ از این رو گفته می‌شود مقادیر  $Z$  فاقد واحد (بدون بعد) هستند (۴). یکی از مهم‌ترین مسائل در امور مربوط به خوشه‌بندی و پهنه‌بندی، انتخاب تعداد بهینه و مناسب خوشه‌ها است. در این قسمت لازم است تعداد مناسب خوشه‌ها به‌نحوی انتخاب شوند و به مدل خوشه‌بندی اعلام شود که خوشه‌های به‌دست آمده دارای بیشینه پراش بیرونی و کمینه پراش درونی باشند و داده‌هایی که دارای شباهت بیشتری با یکدیگر هستند در یک گروه قرار گیرند (۸). در پژوهش حاضر از دو روش نیم‌رخ (Silhouette) و ریشه میانگین مربعات انحراف استاندارد (RMSSTD) به‌منظور تخمین تعداد بهینه خوشه‌ها استفاده شده است. نمایه

شیب در پهنه ایران بوده که از نقشه مدل رقومی ارتفاع استخراج شده است. همچنین با هدف افزایش دقت برآوردها، داده‌های تراکم ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق مختلف کشور از نقشه تراکم ایستگاهی استخراج و به مدل وارد شده است. در این قسمت به‌منظور آماده‌سازی پایگاه داده‌ها برای استفاده در بخش‌های بعدی پژوهش نیاز به یکسان‌سازی پوشش تمامی داده‌ها در سطح کشور از طریق تعریف یک اندازه مشترک برای یاخته‌های مکانی متغیرها وجود داشته است. بر این اساس ابتدا با توجه به تعداد ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده و مساحت کشور و با محاسبه نسبت موجود بین این دو شاخص، اندازه مناسب یاخته‌ها برای میان‌یابی فراسنج بارش در حدود ۸ کیلومتر مربع به‌دست آمد. با مشخص شدن این آستانه و تکمیل پوشش داده‌های بارش در سطح کشور در ادامه داده‌های محیطی نیز با همین توان تفکیک ۸ کیلومتری از نقشه مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر و نقشه تراکم ایستگاهی استخراج شده و در نهایت پایگاه داده اصلی این پژوهش با ابعاد  $25381 \times 5$  و از طریق روش کریجینگ میان‌یابی و تشکیل شد (شکل ۱-ب). بعد از تشکیل پایگاه داده‌ها، به‌دلیل متفاوت بودن بُعد و مقیاس

در ترکیب با ساختار خوشه‌بندی فازی C-Means (FCM) تشکیل شده است. به‌کارگیری ساختارهای ترکیبی شبکه عصبی و منطق فازی به این دلیل مورد توجه واقع شده است که در شبکه‌های عصبی سنتی مقادیر وزن نرون‌ها در طول فرایند یادگیری ایجاد شده یا تغییر پیدا می‌کند؛ در نتیجه ترکیب عملیات یادگیری در شبکه‌های عصبی مصنوعی با استنتاج فازی منجر به بهبود محسوس دقت در خروجی‌های مدل خواهد شد. ساختار شبکه فازی - عصبی تطبیق‌پذیر به‌صورت کلی از ۵ لایه تشکیل می‌شود (شکل ۲):

در لایه اول (ورودی) هر گره شبکه (نرون) که با  $i$  مشخص می‌شود تنها سیگنال ورودی خارجی را به لایه بعدی هدایت می‌کند:

$$Q_i^1 = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{x - v_i}{\sigma_i} \right]^2} b_i \quad (4)$$

در اینجا  $x$  داده‌های ورودی به گره  $i$ ،  $A_i$  برچسب‌های کلامی (غیر عددی) مرتبط با این گره و  $v_i$ ،  $\sigma_i$ ،  $b_i$  فراسنج‌های تنظیم‌کننده و شکل‌دهنده توابع عضویت (Membership function) گره‌ها هستند. نرون‌های فازی در این لایه یک نشانک ورودی را دریافت و در خصوص درجه وابستگی این نشانک به مجموعه فازی نرون تصمیم می‌گیرند. فراسنج‌ها در این لایه از نوع فراسنج‌های فرضی هستند. در لایه دوم و از طریق هر یک از نرون‌های شبکه، با استفاده از فرایند ضرب نرون‌ها مقدار فراسنج شدت آستانه (Firing Strength) برای هر نرون محاسبه می‌شود. این شاخص مشخص خواهد کرد که قوانین استنتاج فازی به‌ازای هر یک از ورودی‌ها تا چه حد در نتیجه نهایی صادق خواهد بود (رابطه ۵):

$$Q_i^2 = \prod = W_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i=1,2. \quad (5)$$

لایه سوم شامل محاسبات مربوط به نسبت Firing Strength برای هر نرون با مجموع Firing Strength‌ها در کل شبکه است و در این لایه، قواعد فازی به‌دست آمده در لایه قبل نرمالیزه می‌شوند:

$$Q_i^3 = \bar{W}_i = \frac{W_i}{\sum_{j=1}^2 W_j} \quad (6)$$

نیم‌رخ بر اساس میانگین فاصله هر یک از نمونه‌های یک خوشه با تمام نمونه‌های موجود در همان خوشه و میانگین فاصله کل نمونه موجود در خوشه‌های دیگر با یک خوشه مشخص تعریف می‌شود. رابطه اصلی این نمایه به‌صورت زیر است:

$$S(i) = \frac{(b(i) - a(i))}{\max\{b(i), a(i)\}} \quad (2)$$

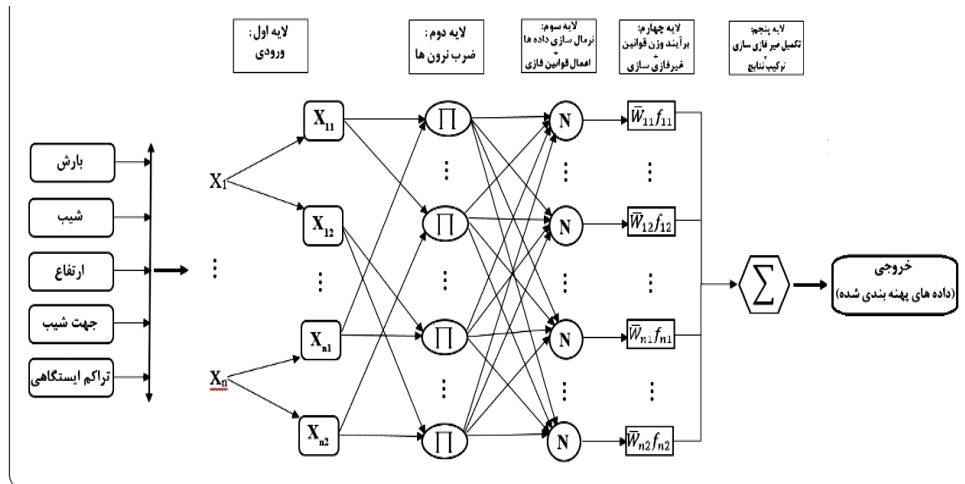
در رابطه بالا  $a(i)$  بیانگر عدم تشابه یک نمونه با نمونه‌های دیگر در خوشه و  $b(i)$  بیانگر عدم تشابه یک نمونه نسبت به همه نمونه‌های موجود در خوشه‌های دیگر (نزدیک‌ترین خوشه‌ها) است. مقادیر این نمایه در بازه  $+1$  و  $-1$  در نوسان بوده و مقدار  $+1$  نشان‌دهنده کیفیت خوب خوشه‌بندی در هر خوشه مشخص و  $-1$  مشخص‌کننده کیفیت پایین قرارگیری داده‌ها در هر خوشه مشخص است (۶).

معیار ریشه میانگین مربعات انحراف استاندارد برای مشخص کردن تعداد خوشه‌ها در خوشه‌بندی‌های تفکیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معیار میزان شباهت مقادیر درون خوشه‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. برای محاسبه مقادیر این معیار از رابطه زیر استفاده می‌شود (۳۰):

$$RMSSTD = \sqrt{\frac{\sum_{d=1, \dots, D} \sum_{k=1, \dots, M} \sum_{i=1}^{n_{kd}} (x_i - \bar{x}_d)^2}{\sum_{d=1, \dots, D} (n_{kd} - 1)}} \quad (3)$$

که در آن  $k$  تعداد خوشه‌ها،  $d$  اندازه متغیرها،  $x_i$  مقدار هر متغیر و  $\bar{x}_d$  میانگین ارزش‌های مربوط به اعضای هر خوشه است. برای تعیین بهترین تعداد خوشه‌ها توسط این معیار، باید مقادیر مختلف معیار مورد نظر به ازای مقادیر مختلف  $k$  محاسبه شده و نمودار آن رسم شود. در نمودار مورد نظر هر نقطه‌ای که شکست واضحی وجود داشته باشد و پس از آن مقادیر معیار به ثبات برسند به‌عنوان تعداد مناسب خوشه‌ها در نظر گرفته خواهد شد.

پس از به‌دست آمدن تعداد بهینه خوشه‌ها، در بخش بعدی پژوهش تلاش شده است تا با استفاده از مدل ANFIS-FCM عملیات خوشه‌بندی و در نهایت پهنه‌بندی پایگاه داده ایجاد شده انجام شود. این روش از دو بخش شبکه عصبی مصنوعی ANFIS



شکل ۲. ساختار مدل ANFIS-FCM مورد استفاده در پژوهش

بندی چندگانه را بر داده‌ها اعمال کند. در این الگوریتم هر یک از داده‌ها دارای یک درجه عضویت از صفر تا صد درصد هستند و خوشه‌بندی در این روش بر اساس بالاترین درجه عضویت هر یک از داده‌ها در هر خوشه صورت می‌پذیرد. هدف نهایی الگوریتم مذکور آن است که خروجی تابع زیر کمینه شود:

$$J(\mu, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c (\mu_{ij})^m \|x_i - v_j\|^2 \quad (9)$$

در روابط مربوط به این الگوریتم  $n$  تعداد نقاط داده،  $v_j$  نشان دهنده زامین مرکز خوشه‌ای،  $m$  بیانگر معیار Fuzziness ( $m \in [1, \infty]$ )، تعداد مراکز خوشه‌ای،  $\mu_{ij}$  عضویت  $i$  امین داده در زامین مرکز خوشه‌ای،  $d_{ij}$  نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین  $i$  امین داده و  $j$  امین مرکز خوشه‌ای بوده و  $x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  به‌عنوان مجموعه‌ای از داده‌ها و  $v = v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  به‌صورت مجموعه‌ای از مراکز دسته‌ها محسوب می‌شوند.

بر اساس توضیحات و روابط بیان شده در این قسمت، مدل ANFIS-FCM در محیط نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده و داده‌های بارشی - محیطی، به‌عنوان ورودی به آن معرفی شد. در این بخش با توجه به حجم داده‌ها و ضرورت ارزیابی مناسب خروجی‌های مدل، داده‌های مورد استفاده به دو قسمت یادگیری (۷۵ درصد داده‌ها) و ارزیابی (۲۵ درصد داده‌ها) تقسیم شده و

هر نرون در لایه چهارم به نرون نرمالیزه شده لایه قبل مرتبط است و سیگنال‌های ورودی لایه اول را نیز دریافت می‌کند. انجام فرایند غیرفازی سازی (Defuzzification) در این لایه آغاز شده و نرون‌های غیر فازی شده در این لایه مقدار وزن برآیند یک قانون را محاسبه می‌کنند. رابطه اصلی در این لایه به شرح زیر است:

$$Q_i^4 = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (7)$$

این رابطه  $\bar{W}_i$  خروجی لایه سوم بوده و سایر فرانسج‌های مندرج در رابطه به فرانسج‌های برآیند معروف هستند. در آخرین لایه (لایه پنجم) که لایه خروجی نامیده می‌شود، در واقع نرون‌های مرحله قبل با یکدیگر جمع می‌شوند و در نهایت از طریق تکمیل فرایند غیرفازی سازی با روش مرکز ثقل، خروجی‌های فازی به خروجی‌های عددی تبدیل می‌شوند. در این لایه تنها یک نرون وجود دارد. برای انجام محاسبات در این لایه از رابطه زیر استفاده می‌شود (۳ و ۹):

$$Q_i^5 = \text{Overall Output} = \sum \bar{W}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i} \quad (8)$$

در پژوهش حاضر برای تخمین توابع عضویت و ایجاد قوانین فازی در لایه‌های گوناگون مورد استفاده در مدل ANFIS تابع FCM استفاده شده است. الگوریتم فازی C-Means برخلاف روش‌های سنتی خوشه‌بندی که هر داده را به صورت قطعی در یک دسته خاص جای می‌دهند، می‌تواند نوعی خوشه

را نشان می‌دهد و مقادیر آن هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهینه‌تر است. RMSE، MAE و S به‌منظور ارزیابی دقت فراسنج‌های مختلف در مدل‌ها به‌کار می‌روند و مقادیر آنها هرچه کمتر باشد، نشانه دقت بیشتر خروجی‌های مدل است (۵)؛ هرچند این قاعده‌ای نسبی بوده و لزوماً و در تمامی موارد جامعیت ندارد و در این مورد می‌بایست نوع و کیفیت داده‌ها و فراسنج‌های درونی مدل‌ها نیز در نظر گرفته شوند.

پس از ارزیابی کیفیت خروجی مدل و با مشخص شدن داده‌های موجود در هر طبقه، در بخش نهایی پژوهش حاضر توزیع فضایی (نقشه پهنه‌بندی محیطی کشور) ترسیم و شرایط موجود در هر نقشه از دیدگاه اقلیم‌شناختی با توجه به نقش عوامل محیطی در چگونگی تغییرات فراسنج بارش، مورد تحلیل قرار گرفته است.

### بحث و بررسی

#### تعیین تعداد مناسب خوشه‌ها

شکل ۳- الف مقادیر نمایه نیم‌رخ برای تعداد مختلف خوشه‌ها را نشان می‌دهد. نخستین نکته مشخص در این شکل، پراکنش دو طرفه مقادیر نمایه در تعدادی از خوشه‌ها است؛ که در تعدادی از خوشه‌ها به سمت مقادیر مثبت و منفی پراکنده شده است. این شرایط نشان‌دهنده آن است که در این خوشه‌ها کیفیت خوشه‌بندی داده‌ها پایین بوده و انتخاب و استفاده از آنها در بررسی‌ها موجب ارائه نتایج اشتباه در خروجی مدل شبکه عصبی- فازی خواهد شد. همان‌طور که در شکل مذکور مشخص است، بهترین و بهینه‌ترین شرایط زمانی ایجاد می‌شود که تعداد ۴ خوشه به‌عنوان تعداد مناسب خوشه‌ها به نرم‌افزار معرفی شود. مقدار نمایه نیم‌رخ برای این ۴ خوشه، ۰/۹ است که بالاترین و با ثبات‌ترین مقدار در بین تمام خوشه‌ها بوده و نشانه خوشه‌بندی مناسب داده‌ها در این تعداد خوشه است. نتایج حاصل از اعمال معیار RMSSTD بر داده‌ها (شکل ۳- ب)، کاملاً با نتایج شاخص نیم‌رخ مشابهت دارد. در این نمودار

با تنظیم پارامترهای مربوط به منطق فازی و شبکه عصبی مانند تعداد نرون‌ها، تعداد لایه‌های پنهان، تعداد تکرارها، نرخ آموزش و قوانین فازی شبکه در نهایت خروجی‌های طبقه‌بندی و بهینه‌سازی شده به دست آمده است. در بخش بعدی، نتایج خروجی مدل با روش‌های گوناگون از جمله نمودار پراکنش داده‌ها، تحلیل مانده‌ها (رابطه ۱۰)، ضریب تعیین (رابطه ۱۱) جذر میانگین مربعات خطا (رابطه ۱۲)، میانگین خطای مطلق (رابطه ۱۳) و انحراف معیار (رابطه ۱۴) مورد ارزیابی قرار گرفته است (۵):

$$x_i - x_p = e \quad (10)$$

$$R^2 = \left( \frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (p_i - \bar{p})(x_i - \bar{x})}{s_p \cdot s_o} \right)^2 \quad (11)$$

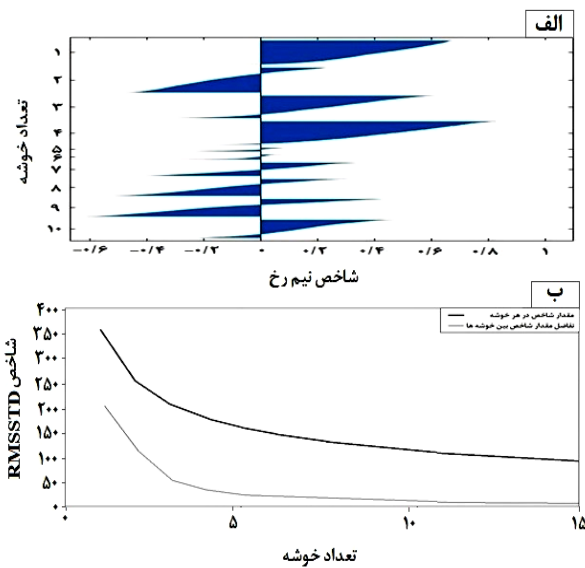
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - p_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_p| \quad (13)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (14)$$

در روابط بالا  $x_i$  مقدار مشاهده شده متغیر مورد نظر؛  $p_i$  و  $x_p$  مقادیر شبیه‌سازی شده متغیر مورد نظر،  $\bar{x}$  میانگین مقادیر متغیرها،  $n$  تعداد داده‌ها و  $s_p$  و  $s_o$  انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده است.

نمودار پراکنش داده‌ها بر مبنای مقایسه نتایج خوشه‌بندی اولیه داده‌ها به وسیله تابع FCM و خوشه‌بندی نهایی بر مبنای مدل ANFIS-FCM ترسیم شده است. مقادیر مانده‌های مدل در واقع میزان خطای مقادیر برآورد شده توسط مدل نسبت به مقادیر واقعی را نشان می‌دهد و هرچه مقادیر به صفر نزدیک‌تر و فشرده‌تر باشند نشانه دقت بیشتر مدل در برآورد است. پراکنش‌نگار، نموداری است که میزان همبستگی متغیرها با یکدیگر را نمایش می‌دهد و دیدی کلی از پراکندگی داده‌های واقعی و داده‌های برآورد شده، ایجاد می‌کند. معیار  $R^2$  توانایی مدل در تبیین روابط درونی داده‌ها



شکل ۳. الف) مقادیر معیار نیم رخ و ب) مقادیر معیار RMSSTD در خوشه‌های مختلف

توابع ANFIS-FCM استفاده شده در این پژوهش از نوع گوسی هستند. توابع گوسی به همراه توابع مثلثی، دوزنقه‌ای و زنگوله‌ای از پرکاربردترین توابع عضویت در مدل‌های منطق فازی بوده و در بخش فازی‌سازی مدل و به‌منظور نگاشت متغیرها مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۸) در سال‌های اخیر از این توابع در زمینه‌های گسترده‌ای از جمله ساختارهای هوش مصنوعی و منطق فازی، مباحث زمین آمار، تشخیص پراکندگی الگوهای پیچیده و همچنین خوشه‌بندی (به‌ویژه خوشه‌بندی داده‌های با توزیع نرمال) استفاده شده است (۱۵).

بر اساس نتایج درج شده در جدول ۲ به‌صورت کلی می‌توان کارایی مدل در موضوع پهنه‌بندی محیطی-بارشی را مناسب و قابل قبول ارزیابی کرد. مقدار معیار  $R^2$  کل برای داده‌های یادگیری ۰/۷۶ و در گروه داده‌های ارزیابی مدل ۰/۷۵ است که نشان‌دهنده ارتباط و همبستگی مناسب داده‌های خروجی نسبت به داده‌های وارد شده به مدل است. این شرایط در سایر معیارهای مورد استفاده نیز قابل مشاهده است؛ از جمله در معیارهای RMSE، MAE و S که به ترتیب مقادیر ۰/۵۱ و ۰/۴۹، ۰/۲۳ و ۰/۲ و همچنین ۰/۴۳ و ۰/۴۱ را به خود اختصاص داده‌اند. نکته مهمی که در داده‌های این جدول قابل

مقادیر مربوط به معیار و همچنین تفاضل مقدار معیار در هر خوشه نسبت به خوشه قبل نمایش داده شده است. بر اساس شکل مشخص است که در محدوده تعداد ۴ خوشه، شکست نمودار اتفاق افتاده و پس از آن هیچ‌گونه تغییر مشخصی در خطوط نمودار مشاهده نمی‌شود و نمودار با شیب بسیار آرامی کاهش می‌یابد. بنابراین این شاخص نیز تعداد ۴ خوشه را به‌عنوان تعداد بهینه خوشه‌ها مشخص کرده است.

### ارزیابی مدل ANFIS-FCM

در جدول ۱ برخی اطلاعات مربوط به ساختار داخلی مدل ANFIS-FCM درج شده است. بر اساس اطلاعات این جدول، مدل مذکور برای انجام محاسبات داخلی خود از ۴ قانون فازی بهره برده است. این قوانین که بر مبنای نوع داده‌ها و روابط بین آنها ایجاد شده‌اند، یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌های فازی هستند که بر اساس آنها فرایند تصمیم‌سازی بر مبنای منطق فازی صورت می‌گیرد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این پژوهش ۷۵ درصد داده‌ها (۱۹۰۳۵ مورد از داده‌ها) به‌عنوان داده‌های یادگیری به مدل وارد شده و ۲۵ درصد داده‌ها (۶۳۴۶ مورد از داده‌ها) به ارزیابی مدل ایجاد شده اختصاص یافته‌اند.



جدول ۱. مشخصات مدل ANFIS-FCM

تعداد قوانین فازی	تعداد گره‌ها	تعداد فراسنج‌های خطی	تعداد فراسنج‌های غیرخطی	تعداد کل فراسنج‌ها	تعداد داده‌های یادگیری	تعداد داده‌های ارزیابی	نوع توابع عضویت	نوع توابع خروجی	توصیف
۴	۵۶	۲۴	۴۰	۶۴	۱۹۰۳۵	۶۳۴۶	گوسی	خطی	

جدول ۲. نتایج عددی سنجش کارایی مدل

ارزیابی			یادگیری				نوع داده‌ها		شاخص - شماره خوشه	
$R^2$	RMSE	MAE	S	$R^2$	RMSE	MAE	S			
۰/۶۷	۰/۸۶	۰/۹۵	۰/۵۹	۰/۷۵	۰/۶۶	۰/۸۳	۰/۹۵	۰/۶	ضریب تعیین ( $R^2$ )	
۰/۶۵	۰/۳۸	۰/۲۲	۰/۷۲	۰/۴۹	۰/۶۷	۰/۴۲	۰/۲۲	۰/۶۹	۰/۵۱	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)
۰/۳۵	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۴۴	۰/۲	۰/۳۷	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۴۲	۰/۲۳	میانگین خطای مطلق (MAE)
۰/۵۴	۰/۳۶	۰/۲۲	۰/۵۷	۰/۴۱	۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۲۲	۰/۵۴	۰/۴۳	انحراف معیار (S)

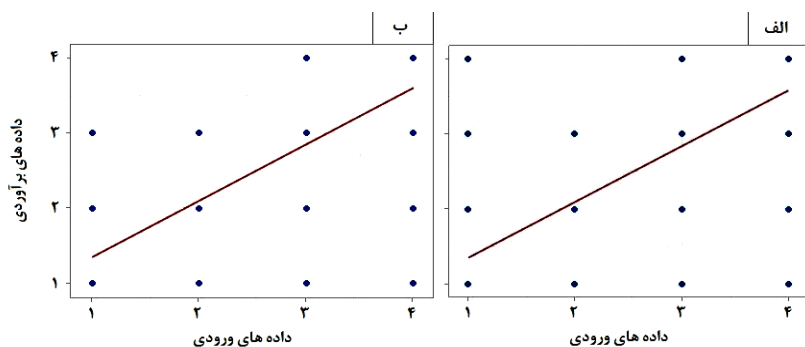
مشاهده است، وجود نوسان در مقادیر معیارها برای خوشه‌های مختلف است. در تمامی معیارها، بهترین شرایط و بالاترین میزان دقت در برآوردهای مربوط به خوشه دوم دیده می‌شود. مقادیر معیار  $R^2$  در این خوشه برای هر دو گروه داده یادگیری و ارزیابی مدل ۰/۹۵ است که حاکی از دقت بالا و خطای بسیار پایین مدل در برآورد و خوشه‌بندی داده‌ها در این گروه است. در خوشه اول، مقادیر معیارهای ارزیابی تا حدودی از حالت دلخواه فاصله گرفته و معیار  $R^2$  برای داده‌های یادگیری و ارزیابی، به ترتیب به ۰/۶ و ۰/۵۹ کاهش می‌یابد. این نوسان داده‌ها با توجه به تنوع داده‌های محیطی - بارشی ورودی به مدل و همچنین گستردگی منطقه مورد مطالعه (کل پهنه کشور ایران) قابل توجیه است.

بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که در بخش قابل توجهی از داده‌های خوشه‌بندی شده، خوشه‌های برآورد شده با خوشه‌های اولیه منطبق هستند و میزان خطای برآورد در حد قابل قبول است که در جدول ارزیابی به آن اشاره شد. همچنین در شکل ۵، مانده‌های تمامی داده‌ها فاقد روند

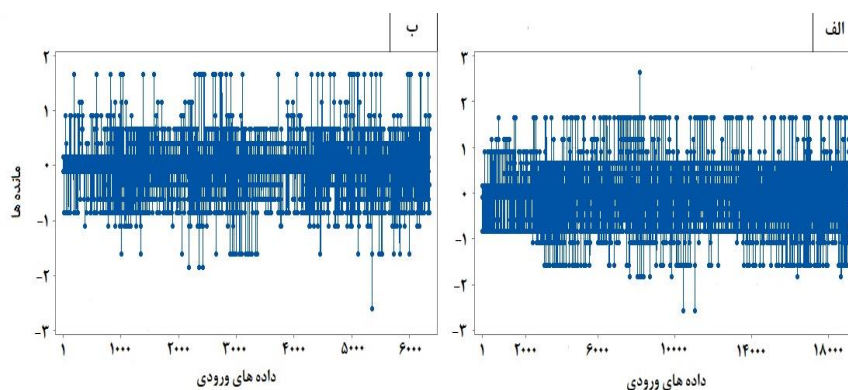
#### ناحیه‌بندی محیطی بر اساس مدل ترکیبی ANFIS-FCM

نقشه‌های موجود در شکل ۶، پهنه‌های بارشی - محیطی ترسیم شده از خروجی‌های مدل ANFIS-FCM را نشان می‌دهند و در این بخش تلاش شده چگونگی پراکنش مکانی یاخته‌ها و عوامل محیطی و آب و هوایی مرتبط با آن مورد تحلیل قرار گیرد.

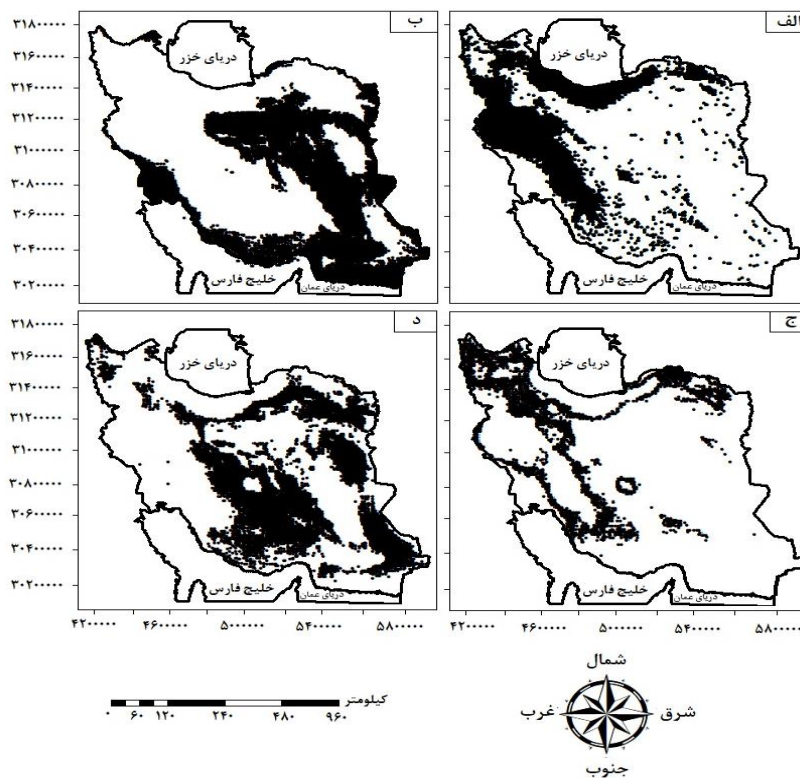
در شکل ۶- الف، نحوه پراکنش یاخته‌های متعلق به خوشه اول نمایش داده شده است. ۲۲ درصد از یاخته‌ها در این خوشه طبقه‌بندی شده و از لحاظ جغرافیایی بخش‌هایی از مناطق شمالی، شمال غرب و نواحی غربی کشور را شامل



شکل ۴. پراکنش داده های ورودی به مدل در برابر داده های برآورد شده؛ الف) داده های یادگیری و ب) داده های ارزیابی



شکل ۵. پراکنش مانده های مدل در برابر داده های ورودی



شکل ۶. پهنه بندی بارشی - محیطی ایران با روش عصبی - فازی

مقدار معیارهای ارزیابی مدل در خوشه اول که در بخش قبل بیان شد را تا حدودی توجیه کند. در واقع شرایط توپوگرافیک خاص ایران و وجود رشته کوه‌ها و همچنین بلندی‌های منفرد در نقاط مختلف کشور و تفاوت شرایط محیطی و آب و هوایی حاکم بر هر یک از آنها موجب شده است تا دقت مدل در طبقه‌بندی داده‌های ورودی و برآورد موقعیت یاخته‌های خوشه اول اندکی کاهش یابد و نیاز است در کاربرد مدل در مناطق وسیع و دارای تغییرات شدید محیطی، این موارد در نظر گرفته شود.

در شکل ۶ - ب، نواحی تحت پوشش خوشه دوم مشخص شده است. یاخته‌های مربوط به این خوشه ۳۷ درصد از کل یاخته‌ها را به خود اختصاص داده و در بخش‌هایی از نواحی مرکزی، شرق، نوار جنوبی و جنوب غرب کشور (خوزستان) پراکنده شده‌اند. همچنین بخش‌های کوچکی از شمال گلستان و شمال اردبیل نیز در این گروه قرار گرفته است. متوسط مقدار بارش در این نواحی ۱۰۱ میلی‌متر، میانگین سطوح ارتفاعی منطقه ۹۴۵ متر و متوسط مقدار شیب در آن ۱۱/۵ درجه است. با بررسی شرایط پراکنش یاخته‌های مربوط به این گروه می‌توان گفت که ویژگی اصلی مناطق تحت پوشش خوشه دوم، کاهش میزان ارتفاع منطقه، کاهش یافتن تراکم ناهمواری‌ها و همچنین کاهش مقادیر بارندگی و افزایش نسبی خشکی در سطح منطقه است. اکثر یاخته‌های مرتبط با این خوشه در نواحی کم‌ارتفاع (نسبت به ارتفاعات مجاور)، جلگه‌ای و در احاطه ناهمواری‌ها قرار گرفته‌اند. به دلیل کاهش اثرگذاری ناهمواری‌ها، شرایط آب و هوایی و تغییرات مقادیر فراسنج بارش در این مناطق تابع قدرت و میزان رطوبت سامانه‌های بارش‌زای عبوری از آنها است. در بخش‌های مرکزی و شرقی کشور، عبور سامانه‌های بارشی از ارتفاعات زاگرس موجب تضعیف آنها و کاهش میزان بارش دریافتی در این مناطق می‌شود. بخش‌های جنوب و جنوب شرقی منطقه نیز میزان بارش و شرایط آب و هوایی تابع شدت و ضعف سامانه‌های موسمی ورودی به این مناطق (در فصل تابستان) و سامانه‌های بارش‌زای دوره سرد است. در

می‌شود. میانگین میزان بارش در این نواحی ۳۱۸ میلی‌متر، متوسط ارتفاع ۱۶۷۷ متر و متوسط شیب ۱۸/۸ درجه است. بخش قابل توجهی از مناطق درون این پهنه، منطبق بر رشته کوه‌های البرز، زاگرس غربی و بلندی‌های شمال غرب کشور است که با ارتفاع قابل توجه خود مانند دیواری در برابر سامانه‌های بارشی عبوری از منطقه عمل کرده و موجب می‌شوند هوای مرطوب بادهای غربی در برخورد با این دیواره‌های کوهستانی متراکم شده و بارش‌های قابل توجهی را به‌ویژه در دوره سرد ایجاد کند (۱۹) و مجموعه این شرایط موجب افزایش میزان بارش در این نواحی، نسبت به مناطق کم ارتفاع مجاور خود شده است.

بخش دیگری از این پهنه، مناطق ساحلی دریای خزر را در بر گرفته است. در این مناطق با کاهش میزان ارتفاع، اثرگذاری مستقیم این عامل در تغییرات میزان بارش‌ها تضعیف شده است، اما در مقابل، موقعیت مناسب منطقه در برابر سامانه‌های بارش‌زای نفوذی از سمت شمال و غرب، قرارگیری در کنار دریای خزر و موقعیت جلگه‌ای و همچنین موقعیت رشته کوه البرز در جنوب منطقه و نقش آن در تراکم رطوبت در سطح منطقه، موجب شده است مقدار بارش سالانه در این نواحی قابل توجه باشد (۱۰) و این افزایش میزان بارش در کنار شرایط ارتفاعی و افزایش میزان شیب (در بخش‌های جنوبی سواحل دریای خزر) موجب همانندی شرایط بارشی این ناحیه و نواحی کوهستانی و قرارگیری آنها در یک طبقه شده است.

تمرکز اکثر یاخته‌های این پهنه در نواحی شمال و غرب کشور بوده اما به‌صورت پراکنده‌تر، می‌توان آنها را در مناطق مرکزی، شرقی، جنوبی و جنوب شرقی نیز مشاهده کرد. این شرایط به دلیل قرارگیری بلندی‌های منفرد و پراکنده در این نواحی است و موجب شده است هم از نظر شرایط بارشی و هم از نظر ویژگی‌های ارتفاعی، شیب و جهت شیب نوعی شرایط خاص محلی و متفاوت از اقلیم اصلی آن مناطق ایجاد شود که در خروجی‌های مدل عصبی - فازی به آن توجه شده است. وجود پراکندگی یاخته‌ها در این خوشه می‌تواند کاهش

مساعد برای شکل‌گیری فرایند همرفت دامنه‌ای در این مناطق بسیار بیشتر از بلندی‌های سایر نقاط کشور مهیا می‌شود و در واقع می‌توان گفت این فرایند در مناطق مرتفع مرکز و شرق کشور، تا حد قابل توجهی تضعیف می‌شود.

شکل ۶ - د، چگونگی پراکنش یاخته‌های مرتبط با خوشه چهارم را نمایش می‌دهد. این خوشه ۲۹ درصد از مساحت ایران را در بر گرفته و میانگین بارش در آن ۱۰۲ میلی‌متر است. متوسط مقادیر ارتفاعی در آن ۱۱۳۴ متر و متوسط میزان شیب ۱۱/۸ درجه است. موقعیت پراکنش یاخته‌ها در این خوشه با موقعیت قرارگیری ارتفاعات داخلی کشور در محدوده شرق زاگرس، برخی مناطق هرمزگان، شرق سیستان و بلوچستان، بخش‌های شرقی خراسان جنوبی و برخی مناطق خراسان رضوی و همچنین کرمان و یزد مطابقت دارد. همچنین یاخته‌های مربوط به این خوشه در جنوب و جنوب‌شرق رشته کوه البرز و برخی مناطق شمال‌غرب کشور هم قابل مشاهده است. ناهمواری‌ها در این نواحی دارای ارتفاعی کمتر از ناهمواری‌های رشته کوه‌های البرز و زاگرس بوده و از نظر موقعیت جغرافیایی در نواحی داخلی فلات ایران قرار گرفته‌اند. این شرایط ارتفاعی و موقعیت جغرافیایی آنها موجب شده است تا سامانه‌های بارشی در شرایط ضعیف‌تر و همراه با رطوبت کمتر از آنها عبور کند (۱۴)؛ در نتیجه میزان بارش‌های دریافتی در این مناطق کاهش یافته و میزانی تقریباً مشابه با بارش‌های دریافتی مناطق خوشه دوم دارد.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تلاش شد با به‌کارگیری روش‌های عصبی - فازی و استفاده از مدل ریاضی ANFIS-FCM، نوعی پهنه‌بندی بارشی - محیطی با محوریت فراسنج بارش و با در نظر گرفتن عوامل محیطی مانند ارتفاع و شیب انجام شود. بررسی نقشه‌های مربوط به پهنه‌های چهارگانه حاصل از خروجی‌های مدل نشان داد که پهنه اول منطبق بر نواحی مرتفع زاگرس در غرب کشور، ارتفاعات البرز و همچنین سواحل دریای خزر

بخش‌های جنوب غرب، شمال و شمال‌غربی عامل تأثیرگذار در میزان بارش دریافتی، قرار داشتن در مسیر سامانه‌های ناپایدار عبوری و میزان رطوبت و قدرت سامانه‌ها است (۱۸). گفتنی است که بیشترین دقت خروجی‌های عددی مدل، در این خوشه مشاهده می‌شود و یاخته‌های مرتبط با آن اکثراً و به‌صورت فشرده در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند که علت آن تغییرات کمتر مقادیر بارش در سطح منطقه و شرایط توپوگرافی یکنواخت‌تر در این نواحی است.

شکل ۶ - ج، نحوه پراکنش یاخته‌های خوشه سوم را در سطح کشور نشان می‌دهد. ۱۲ درصد از کل یاخته‌ها در این خوشه قرار گرفته‌اند که کمترین تعداد در بین سایر خوشه‌ها هستند. متوسط مقدار بارندگی در خوشه سوم ۱۸۱ میلی‌متر، متوسط میزان ارتفاع ۱۵۱۵ متر و میانگین مقدار شیب در آن ۱۳/۶ درجه است. مناطق تحت پوشش این خوشه شامل بخش‌هایی از شمال و شمال‌شرق کشور، سرتاسر دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز، بخش‌هایی از شمال غرب کشور، دامنه‌های غربی و شرقی رشته کوه زاگرس و قسمت‌های کم‌وسعت‌تری در استان‌های اصفهان، فارس و کرمان را شامل می‌شود. ویژگی کاملاً مشهود در نقشه مربوط به خوشه سوم، قرارگیری کوهپایه‌ها و نقاط دامنه‌ای اطراف رشته کوه‌های شمالی و غربی کشور در آن است. مناطق تحت پوشش این خوشه علاوه بر دریافت بارش‌های سیستماتیک در دوره سرد سال، در فصل بهار مستعد فرایندی به‌نام همرفت دامنه‌ای هستند. همرفت دامنه‌ای فرایندی است که طی آن هوای مناطق شیب‌دار دامنه کوه‌ها با دریافت تابش خورشید نسبت به اطراف خود گرم‌تر شده و هوای بالای آنها شروع به صعود می‌کند (۲). وقوع این حالت در حضور رطوبت کافی در هوا و وجود ریز موج‌های ترازهای میانی یا فوقانی جو، موجب وقوع بارش‌های رگباری در این نواحی شده و میزان بارش دریافتی در این نواحی را نسبت به مناطق کم ارتفاع داخل فلات ایران افزایش می‌دهد. قرارگیری اکثریت قابل توجه یاخته‌های مربوط به این خوشه در مناطق شمال، شمال‌غرب و غرب کشور نشانه آن است که شرایط

برآوردها در مناطق با تغییرپذیری زیاد عوامل محیطی و اقلیمی است. به نظر می‌رسد در شرایط تغییرپذیری بالای فراسنج‌های اقلیمی یا عوامل سطح زمین، مدل دچار اشباع اطلاعات و نوعی بیش برآورد شده که در نهایت موجب بروز خطا در خروجی خواهد شد. در این شرایط بهتر است ابعاد منطقه مورد مطالعه محدودتر انتخاب شود. یافته‌های این پژوهش در موضوع کاربرد روش عصبی - فازی در پهنه‌بندی فضایی فراسنج بارش، با نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهشگران از جمله وانگ و همکاران (۲۳)، گومز و همکاران (۱۲) و مکاریان و همکاران (۲۷) مطابقت دارد. نتایج این پژوهش و سایر پژوهش‌های اشاره شده، تأیید کننده آن است که به صورت کلی و در اکثر مناطق جغرافیایی، انجام فرایند طبقه‌بندی فراسنج‌های آب و هوایی با مدل‌های عصبی - فازی از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و توجه به شرایط عوامل محیطی سطح زمین در امر طبقه‌بندی، می‌تواند نتایج واقع‌بینانه‌تری در خروجی مدل‌ها به همراه داشته باشد. از نتایج پهنه‌بندی‌های محیطی - بارشی می‌توان در امور مربوط به مدیریت و برنامه‌ریزی محیطی در زمینه کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری طرح‌ها استفاده کرد.

است. عوامل ایجاد کننده بارش در این نواحی اندکی متفاوت اما مقادیر بارندگی در سرتاسر این پهنه قابل توجه بوده که موجب شده با وجود تفاوت‌های ارتفاعی و محیطی، مناطق مرتفع و جلگه ساحلی خزر در یک پهنه قرار گیرند. پهنه دوم شامل نواحی کم ارتفاع مرکز، نوار جنوبی و جنوب غرب کشور بوده است که به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص و ارتفاع کم و همچنین قرارگیری در پشت دیواره‌های کوهستانی، بارش‌های کمتری دریافت می‌کنند. پهنه سوم، نواحی کوهپایه‌ای و دامنه‌های اطراف رشته کوه‌های البرز و زاگرس و همچنین دامنه‌های شمال غرب کشور را در بر گرفته است. این نواحی علاوه بر دریافت بارش‌های سیستماتیک در دوره سرد سال، از پدیده همرفت دامنه‌ای در فصل بهار بهره می‌برند که موجب افزایش مقادیر بارش دریافتی در این مناطق شده است. خوشه چهارم منطبق با ناهمواری‌های داخلی در بخش‌های مرکزی و شرقی کشور است. موقعیت این ناهمواری‌ها و تضاد محیطی ایجاد شده توسط آنها نسبت به محیط کم ارتفاع اطراف، موجب افزایش نسبی بارش در این نواحی شده است. نکته مهمی که در بررسی خروجی‌های مدل مشخص شد، کاهش نسبی دقت

### منابع مورد استفاده

1. Aghelpour, P., V. P. Singh and V. Varshavian. 2021. Time series prediction of seasonal precipitation in Iran, using data-driven models: a comparison under different climatic conditions. *Arabian Journal of Geosciences* 14(551): 1-10.
2. Alijani, B. 2016. Climate of Iran. PayameNoor University Press. Tehran. (In Farsi).
3. Ameli, A. and M. Ramazani. 2015. Predicting stock prices using fuzzy neural network based on genetic algorithm and comparison with fuzzy neural network. *Journal of Economic Modeling Research* 22(1): 61-91. (In Farsi).
4. Asakereh, H. 2011. Fundamentals of Statistical Climatology. Zanjan University Press. Zanjan. (In Farsi).
5. Asakereh, H., A. Shahbaee Kotenaee and M. Foroumadi. 2019. Evaluating changes and forecasting minimum temperature in the west of Mazandaran province using statistical downscaling model SDSM. *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 23(1): 69-86. (In Farsi).
6. Doostkamian, M., E. Haghghi and R. Bourbouri. 2018. Analyzing and identifying regional changes of hot and cold zones in Iran indifferent periods. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 6(2): 141-162. (In Farsi).
7. Farsadnia, F., M. Rostami Kamrood and A. Moghadamnia. 2012. Rainfall trend analysis of mazandaran province using regional mann-kendall test. *Iran-Water Resources Research* 8(2): 60-70. (In Farsi).
8. Farshadfar, E. 2010. Multivariate Principles and Procedures of Statistics. Razi University Press. Kermanshah. (In Farsi)
9. Fattahi, H. 2016. Adaptive neuro-fuzzy inference system based on fuzzy c-means clustering algorithm, a technique for estimation of tBM penetration rate. *International Journal of Optimization in Civil Engineering* 6(2): 159-171.
10. Ghayoor, H., S. A. Massodian, M. Azadi and H. Noori. 2011. Temporal and spatial analysis of precipitation events in the southern coasts of Caspian sea. *Geographical Research* 26(1): 1-30. (In Farsi).
11. Ghoorbani, M. A., H. Jabari, S. Poorbabak, E. Asadi and M. Fazelifard. 2016. Classification of annual temperature

- of Iran meteorological stations using fuzzy cluster analysis and kohonen artificial neural networks. *Journal of Geography and Planning* 20(55): 45-63. (In Farsi).
12. Gomes, E. P., C. J. C. Blanco and F. C. L. Pessoa. 2019. Identification of homogeneous precipitation regions via fuzzy c-means in the hydrographic region of tocantins-araguaia of Brazilian Amazonia. *Applied Water Science* 9(6): 1-12.
  13. Haj Hamad, I., A. Chouchaine and H. Bouzaouache. 2021. A takagi-sugeno fuzzy model for greenhouse climate. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 11(4): 7424-7429.
  14. Halabian, A. H., F. Hosseinalipour and F. Jafari Shendi. 2012. The analysis of spatial - temporal distribution of daily precipitation on the central and south western Iran. *Geography and Environmental Sustainability* 1(2): 31-41. (In Farsi).
  15. Honarkhah, M. and J. Caers. 2010. Stochastic simulation of patterns using distance-based pattern modeling. *Mathematical Geosciences* 42(1): 487-517.
  16. Jafari, M. M., H. Ojaghloou, M. Zare and G. J. P. Schumann. 2021. Application of a novel hybrid wavelet-ANFIS/fuzzy C-means clustering model to predict groundwater fluctuations. *Atmosphere* 12(1): 1-9.
  17. Kaviani, M. and B. Alijani. 2016. The Foundations of Climatology. Samt Press. Tehran. (In Farsi).
  18. Kia, S. M. 2014. Fuzzy logic in MATLAB. Kian University Press. Tehran. (In Farsi).
  19. Massodian, S. A., M. Darand and S. Karsaz. 2011. Precipitation regions of west and northwestern of Iran using cluster analysis. *Journal of Physical Geography* 4(11): 35-44. (In Farsi).
  20. Mokarian, R., H. Sedghi, S. Nemati and H. Babazadeh. 2018. Classification of Evaporation Stations using Fuzzy Cluster Analysis and Kohonen Artificial Neural Networks. *Geography and Planning* 22(63): 283-304. (In Farsi).
  21. Sabziparvar, A. A. and M. Bayat Varkeshi. 2011. Evaluation of artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) methods in prediction of global solar radiation. *Iranian Journal of Physics Research* 10(4): 347-357. (In Farsi).
  22. Shirvani, A. and S. M. J. Nazemosadat. 2012. Regionalization of precipitation in Iran using principal components and cluster analysis. *Iran-Water Resources Research* 8(1): 81-85. (In Farsi).
  23. Wang, Z., Z. Zeng, C. Lai, W. Lin, X. Wu and X. Chen. 2017. A regional frequency analysis of precipitation extremes in mainland china with Fuzzy C-means and L-moments approaches. *International Journal of Climatology* 37(1): 429-444.
  24. Zhao, Q. 2012. Cluster Validity in Custering Methods. PhD thesis. University of Eastern Finland. Joensuu. Finland.

## Spatial Zoning of Iran's Annual Rainfall using ANFIS-FCM Artificial-Fuzzy Neural Model

A. Shahbaee Kotenae\* and H. Asakereh<sup>1</sup>

(Received: October 15-2021; Accepted: April 26-2022)

### Abstract

Precipitation is one of the most significant climatic parameters; its distribution and values in different areas is the result of complex linear and nonlinear relationships between atmospheric elements-climatic processes and the spatial structure of the earth's surface environment. Classification of data and placing them in small and homogeneous zones can be effective in improving the understanding of these complex relationships and their results. In the present study, zoning and analyzing the distribution of rainfall in Iran concerning environmental factors was performed using the annual precipitation data of 3423 synoptic, climatological, and gauge stations in the country during the period from 1961 to 2015 and the altitude, slope, aspect, and station density data. After standardization and preparation of the data matrix, the optimal number of clusters was determined and the data set was entered into the neural-fuzzy network model (ANFIS-FCM). The results showed that the values of  $R^2$  and MAE indices were 0.76 and 0.23, respectively which indicate the appropriate accuracy of the model. It was also found that in the four output zones of the model, environmental factors have a high impact on the spatial distribution of precipitation. In the first and third zones, the combination of high altitude and slope factors along with geographical proximity to precipitation systems has caused the average annual rainfall in these zones to be 318 and 181 mm, respectively. The mean annual rainfall has decreased to about 100 mm by the weakening of the role of environmental factors in the second and fourth clusters.

**Keywords:** Neural network, Fuzzy logic, Membership function, Clustering, Precipitation, Iran.

---

1. Department of Geography, Faculty of Humanities, Zanzan University, Zanzan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: Shahbai2008@yahoo.com