مقایسه عملکرد الگوریتم ICA و حالت ترکیب شده آن با فازی (FUZZY-ICA) در پیش‌بینی بارش روزانه

امیرمحمد رخ‌شاد[۱]، بهرام بختیاری*[۲] و کورش قادری[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
[۲] استادیار، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۵/۱۰)

چکیده

پیش‌بینی بارش به دلیل عدم قطعیت بالای تخمین آن، امری مشکل می‌باشد. در این پژوهش، از الگوریتم ICA و ترکیب آن با استنتاج فازی (FUZZY-ICA)، برای بررسی توانایی و مقایسه عملکرد آنها در پیش‌بینی بارش روزانه یک اقلیم نیمه‌خشک مانند کرمان استفاده شد. برای این منظور، از ۳۰ سال داده روزانه ایستگاه همدیدی کرمان (۲۰۱۰-۱۹۸۱) و ۱۰ سال داده روزانه ایستگاه‌های همدیدی رفسنجان و زرند (۲۰۰۱-۲۰۱۰) در فصول بارش (۷ ماه از سال) و پنج متغیر بارش، دمای تر، نقطه شبنم، ابرناکی و نم (رطوبت) نسبی استفاده شد. کدهای مورداستفاده در نرم‌افزار Matlab14 نوشته شد که در حالت ترکیبی، الگوریتم ICA برای تعیین بازه‌های توابع عضویت، قواعد نهایی و مقادیر وزن‌ها به جای استفاده از سعی‌وخطا در فازی، به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش نسبت به پیش‌بینی ارتفاع آن با روش‌های ذکرشده، نتایج قابل قبول‌تری را ارائه می‌کند و روش ترکیبی FUZZY-ICA با پیش‌بینی صحیح حالت ۸۹/۶۳، ۸۲/۳۱ و ۷۴/۱۲ درصد از روزها به ترتیب در ایستگاه‌های کرمان، رفسنجان و زرند نسبت به پیش‌بینی حالت ۶۱/۴، ۵۱/۹ و ۵۱/۲ درصد از روزها در استفاده از الگوریتم ICA، از دقت بیشتری در کنار سرعت مناسب‌تر آن برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، بارش، الگوریتم رقابت استعماری، استنتاج فازی، ایستگاه کرمان، ایستگاه رفسنجان، ایستگاه زرند

۱ مقدمه

جنبه‌های مختلف زندگی انسان هرکدام به نحوی تحت تاثیر فرآیندهای هواشناختی است و این تاثیرگذاری در زمینه‌های مختلفی چون آبیاری، کشاورزی، حمل و نقل، شدآمد (ترافیک) و صنایع وابسته بیشتر دیده می‌شود. بارش، مهم‌ترین مولفه هواشناختی بوده و پیش‌بینی بارش و برآورد نزولات جوی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مولفه‌های اقلیمی در حوزه مدیریت منابع آب، از اهمیت ویژه‌ای در امر بهینه‌سازی مصرف و استفاده از این منابع برخوردار است (خلیلی و همکاران، ۱۳۸۵). جمع شدن مقدار زیادی بارش یا وقوع یک دوره طولانی‌مدت بارش می‌تواند باعث جاری شدن سیل به‌خصوص نزدیک محل‌های پرآب مانند اقیانوس‌ها شود (کرول، ۲۰۰۵). همچنین خشک‌سالی اغلب با یک کاهش قابل‌ملاحظه بارش نسبت به متوسط بلندمدت بارندگی آغاز و با گذر زمان، سبب کاهش رطوبت خاک و در ادامه افت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۸۹). بارش در ایران یکی از متغیرهای اساسی

*نگارنده رابط: drbakhtiari@uk.ac.ir Corresponding Author:

برای ارزیابی مهیایی بالقوه منابع آب است اما توزیع زمانی و مکانی آن بسیار ناموزون می‌باشد. به همین دلیل، توزیع منابع آب کشور نیز یکنواخت نیست. نگهداری و مدیریت منابع آب، ضمن اینکه تابعی از بارش دریافتی است، به تغییرپذیری بارش نیز بستگی دارد. هر چه تغییرات مکانی بارش کمتر باشد، همگنی و یکدستی منابع آب بیشتر می‌شود. به همین دلیل، تغییرپذیری زمان بارش در ارزیابی منابع آب آبخیزها و مطالعه نسبی منابع آب محلی و منطقه‌ای، اهمیت ویژه‌ای دارد (میرموسوی و زهره وندی، ۱۳۹۰). پیش‌بینی بارندگی نقش مهمی در بهینه‌سازی مدل‌های آب‌شناختی دارد و لذا روش‌هایی برای پیش‌بینی بارندگی روزانه ارائه‌شده است (کرول، ۲۰۰۵).

از دیرباز پژوهش‌های متعددی برروی بارش و همچنین روش‌های ذکر شده، در ایران و سایر نقاط جهان صورت گرفته است. چوان (۱۹۹۷) شبکه‌های عصبی را برای پیش‌بینی بارش در منطقه سنای مالزی به کاربرد و از ۹ متغیر شامل زمان (روز)، فشار، دمای خشک، دمای تر، نقطه شبنم، سرعت باد، جهت باد، پوشش ابر و وضعیت بارش در ساعات قبل، در دو ساختار شبکه عصبی استفاده کرد. نتایج به‌دست‌آمده، برتری روش شبکه عصبی را نسبت به روش عددی نشان داد. هالید و رید (۱۹۹۹) از روش استنتاج فازی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بارش محلی ماه ژانویه در فرودگاه هازانودین در اندونزی استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد مدل استنتاج فازی برای پیش‌بینی بارش ماه ژانویه نسبت به مدل‌های آماری مناسب‌تر است. شاو (۲۰۰۰) توابع عضویت فازی را بر مبنای مقدار ابر، نوع ابر، سرعت باد و نم نسبی برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی دما به‌کار برده است. نتایج، حاکی از کارایی بالای این روش در پهنه‌بندی دماست. وانگ و همکاران (۲۰۰۳) از قواعد فازی برای ساخت مدل پیش‌بینی بارش بر فراز سوئیس با بهره‌گیری از داده‌های درون‌یابی فضایی نقشه خودسامانده استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده کارایی مناسب این روش در پیش‌بینی بارش است. کارانو و همکاران (۲۰۰۴) با مقایسه مدل وایازش (رگرسیون) غیرخطی و مدل‌سازی مبتنی بر دانش فازی، توضیح دادند که مدل فازی، زمانی که داده‌های کیفی و کمّی هردو به‌کاربرده شده و همچنین زمانی که داده‌ها کم باشند، مناسب‌ترین گزینه است. هونگ و همکاران (۲۰۰۸) با به کارگیری ۴ سال از یک سری متغیرهای هواشناختی ۷۵ ایستگاه هواشناسی مانند نم نسبی، فشار هوا و دمای تر با بهره‌گیری از مدل‌های شبکه‌های عصبی، به پیش‌بینی بارش در بانکوک پرداختند و نتایج قابل قبولی کسب کردند. همچنین تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مهم‌ترین ورودی علاوه بر بارش، دمای تر است. دوان و همکاران (۲۰۰۹) به ارائه مدل پیشنهادی روش تطبیق تصویرهای آشفته با الگوریتم رقابت استعماری پرداختند. نتایج، نشان‌دهنده کارایی موثر این روش در زمینه مورد نظر بود. داش (۲۰۱۲) از مدل زنجیره مارکوف برای وقوع بارش روزانه در چهار ایستگاه در هند استفاده و فراوانی وقوع بارش را به‌وسیله ماتریس احتمال انتقال به دست آورد. نتایج از مناسب بودن زنجیره مارکوف مرتبه اول برای استفاده در تمام ماه‌های سال حکایت داشت.

در ایران نیز کارآموز (۱۳۸۴) با استفاده از کاربرد نشانک(سیگنال)های بزرگ‌مقیاس اقلیمی از مدل مبتنی بر قوانین فازی و شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی بارش در مناطق غرب ایران (حوضه‌های آبخیز کارون، کرخه و مرزی غرب) استفاده کرد. نتایج او نشان داد 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. فلاح قالهری و همکاران (۱۳۸۵) از روش استنتاج فازی و شبکه‌های عصبی فازی تطبیقی برای پیش‌بینی بارش دسامبر تا می منطقه خراسان استفاده کرده است. نتایج، نشان‌دهنده

کارایی هر دو روش در پیش‌بینی بارش فصلی است. در این پژوهش، مدل فازی، عملکرد بهتری نسبت به مدل شبکه‌های عصبی فازی تطبیقی داشته است. محمدیان و کی‌نیا (۱۳۹۱) برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت باد از ترکیب الگوریتم رقابت استعماری و شبکه عصبی استفاده کردند که وظیفه الگوریتم، تنظیم هوشمند وزن‌های شبکه عصبی بود. نتایج پیش‌بینی آنها، نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم در تنظیم داده‌های ورودی بود. عراقی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۲) در تنها مورد استفاده الگوریتم رقابت استعماری در موضوع آب، به بررسی عملکرد این الگوریتم در بهره‌برداری از مخزن پرداخته‌اند. این پژوهشگران عملیات مشابهی نیز با الگوریتم ژنتیک انجام دادند. نتایج از برتری نسبی رقابت استعماری حکایت دارد.

هدف از این پژوهش، پیش‌بینی بارش روزانه با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری و همچنین استنتاج فازی بهینه‌شده با این الگوریتم و بررسی توانایی و عملکرد آنها در این زمینه بر روی آمار بارندگی ۳۰ و ۱۰ ساله ایستگاه‌های همدیدی کرمان، زرند و رفسنجان در مقیاس زمانی روزانه می‌باشد. همچنین با توجه به پیشینه پژوهش‌ها و عدم به کارگیری این نوع ترکیب الگوریتم ICA برای پیش‌بینی روزانه پدیده بارش، این مطالعه را می‌توان نوآوری جدیدی در این زمینه دانست.

۲ روش تحقیق

داده‌ها و منطقه مطالعاتی

در مطالعه حاضر، از داده‌های ۳۰ ساله ایستگاه همدیدی کرمان و ۱۰ ساله ایستگاه‌های زرند و رفسنجان در مقیاس زمانی روزانه استفاده شد. با توجه به فصل بارش در این ایستگاه‌ها، از داده‌های پنج ماه ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر صرف‌نظر و درمجموع، ۶۳۹۰ روز از ایستگاه کرمان و ۲۱۳۰ روز از دو ایستگاه دیگر بررسی شد. مشخصات جغرافیایی و اقلیمی این ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های موردمطالعه.

شماره	نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	سال آماری	ماه‌های موردبررسی
۱	کرمان	٥٦/٥٨	۳۰/۱٥	۱۷٥۳/۸	۲۰۱۰ -۱۹۸۱	Nov-May
۲	رفسنجان	٥٦/٥٤	۳۰/۲٥	۱٥۸۰/۹	۲۰۱۰ -۲۰۰۱	Nov-May
۳	زرند	٥٦/۳٤	۳۰/٤۸	۱۷۰۰	۲۰۱۰ -۲۰۰۱	Nov-May

جدول۲. نمونه‌ای یک هفته‌ای از داده‌های مورد استفاده ایستگاه همدیدی کرمان.

تاریخ اندازه‌گیری	بارش	میزان ابرناکی	نم نسبی	نقطه شبنم	دمای تر
۲۰۰۸/۱/۱	۱	٤/۸۷٥	٤۹/٤	-٤/۳	۲/۱
۲۰۰۸/۱/۲	۰	٦/۲٥	٤۲/۸	-۳/٥	٤
۲۰۰۸/۱/۳	۰/۱	٥/۸۷٥	٤٤/۹	-۰/۸	٦
۲۰۰۸/۱/٤	۱۰/۲	۷/٥	۹۱/٥	۳/٤	٤/۲
۲۰۰۸/۱/٥	۷/۹	٦/۸۷٥	۹۷/٥	۳/۷	۳/۹
۲۰۰۸/۱/٦	۰	٤/۷٥	٦۸/٦	-۱/۲	۲/٦
۲۰۰۸/۱/۷	٤/٤	٥/۳۷٥	۸٥/٥	-۷/٦	-٥/۹

علاوه بر بارش، از متغیرهای دمای تر، دمای نقطه شبنم، نم نسبی و میزان ابرناکی نیز هم‌زمان برای ورودی استفاده شد. علت انتخاب این متغیرها، پژوهش‌های قبل (هونگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ ثامنی و خان‌تیموری، ۱۳۹۰) و سعی و خطای انجام‌گرفته و البته در دسترس نبودن سایر متغیرها، می‌باشد. در جدول ۲ نمونه‌ای یک هفته‌ای از این داده‌ها آورده شده است.

۲-۱ روش‌ها

الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) در سال ۲۰۰۷ معرفی شد. در این الگوریتم به‌جای طبیعت، از یک پدیده اجتماعی الهام گرفته شده است. در ICA تعدادی کشور، متناظر افراد در الگوریتم ژنتیک وجود دارد. درواقع این مجموعه از کشورها، نقاطی تصادفی درون فضای جستجو می‌باشند. به‌این‌ترتیب، کشورهای قدرتمند به‌منزله استعمارگر و کشورهای ضعیف به‌منزله مستعمره قرار می‌گیرند. برای شروع الگوریتم، تعداد $N_{country}$ کشور اولیه ایجاد می‌شود. N_{imp} تا از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به‌منزله استعمارگر انتخاب و باقیمانده N_{col} تا از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هرکدام به یک امپراتوری تعلق دارند. برای تقسیم مستعمرات اولیه بین استعمارگرها، به هر استعمارگر ، تعدادی مستعمره متناسب باقدرت آن، اختصاص داده می‌شود. برای انجام این کار، با داشتن هزینه هر استعمارگر، هزینه بهنجارش آنها به‌صورت معادله (۱) در نظر گرفته می‌شود:

$$C_n = \max_i\{c_i\} - c_n, \qquad (۱)$$

که در آن c_n، هزینه استعمارگر nام، $\max_i\{c_i\}$ بیشترین هزینه میان استعمارگرها و C_n، هزینه بهنجارشده این استعمارگر می‌باشد. هر استعمارگری که دارای هزینه بیشتری باشد (استعمارگر ضعیف‌تری باشد)، دارای هزینه بهنجارش کمتری خواهد بود. با داشتن این هزینه، قدرت نسبی هر استعمارگر با رابطه (۲) محاسبه‌شده و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره بین استعمارگرها تقسیم می‌شوند:

$$p_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right|, \qquad (۲)$$

کشورهای استعمارگر با اعمال سیاست جذب (همگون‌سازی) در راستای محورهای خاصی، کشورهای مستعمره را به سمت خود می‌کشند. حرکت کشور مستعمره به سمت کشور استعمارگر به‌اندازه x و با انحراف زاویه‌ای θ صورت می‌گیرد. این مقادیر به‌طور تصادفی تعیین می‌شوند. قدرت یک امپراتوری برابر است با قدرت کشور استعمارگر، به‌اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن. بدین ترتیب برای محاسبه هزینه کل یک امپراتوری از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$T.C_n = Cost(imperialist_n) + \xi\, mean\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\}, \qquad (۳)$$

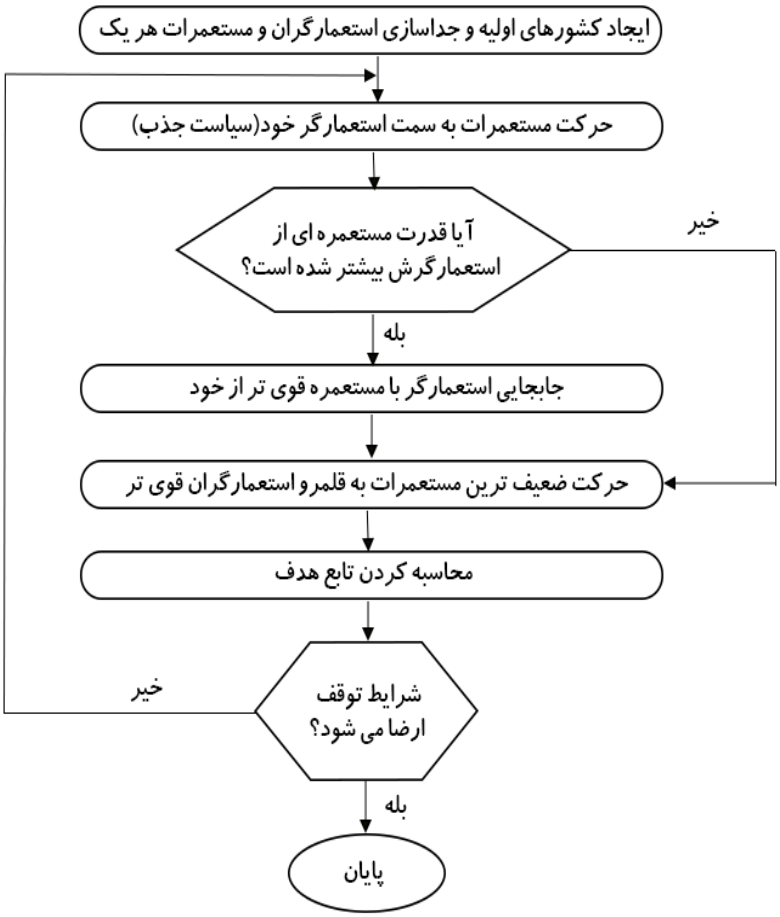
که در آن $T.C_n$ هزینه کل امپراتوری nام و ξ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن ξ باعث می‌شود که هزینه کل یک امپراتوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور استعمارگر) شود.

ممکن است درروند حرکت کشورها در طول اجرای الگوریتم، یک کشور مستعمره قدرت بیشتری از استعمارگر نظیر خود پیدا کند. در این حالت، جای کشور مستعمره و استعمارگر عوض خواهد شد. در هر مرحله از تکرار الگوریتم، میان استعمارگران رقابتی برقرار است. در این رقابت، استعمارگری که نسبت به دیگر استعمارگران قدرت کمتری دارد، یکی از مستعمرات خود را از دست

می‌دهد. در این فرآیند، ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین استعمارگر به‌طور تصادفی به یکی از استعمارگران دیگر ملحق می‌شود. اگر استعمارگری تمام مستعمرات خود را از دست بدهد، خود به‌صورت مستعمره یک استعمارگر دیگر درخواهد آمد. مراحل الگوریتم به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا بالاخره تعداد استعمارگران به یک برسد. در این حالت تمام کشورها، مستعمره یک استعمارگر هستند و الگوریتم به پایان می‌رسد. البته شرایط توقف دیگری مانند تعداد تکراری معین نیز، می‌تواند به‌کار رود. در شکل ۱ نمودار گردش‌کار (فلوچارت) این الگوریتم نشان داده شده است.

استنتاج فازی

مفهوم استنتاج فازی نخستین بار در سال **۱۹۶۵** ارائه شد. در ساخت یک سامانه استنتاج فازی، ابتدا یک سامانه قاعده‌بنیان (based-rule) فازی بر اساس داده‌های مشاهداتی تعیین می‌شود که از بین دو روش استلزام معمول یعنی ممدانی و سوگنو، روش ممدانی رایج‌تر می‌باشد. سپس ورودی‌های مدل به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که داده‌های موثرتر بر خروجی به کار گرفته شوند. تعیین این ارتباط یا با دانش قبلی و یا با سعی و خطا صورت می‌گیرد.



شکل ۱. نمودار گردش کار الگوریتم رقابت استعماری.

به‌طور مثال، در برآورد بارش، متغیرهای ورودی مؤثر، بارش، نم نسبی، میزان ابرناکی، نقطه شبنم و دمای تر می‌باشند. در ادامه، فازی‌سازی بخش ابتدایی و انتهایی با استفاده از توابع عضویت فازی صورت گرفته و بازه‌های فازی تعیین می‌شوند. برای تعیین توابع عضویت فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی مدل پیش‌بینی، از الگوریتم‌ها و بررسی ارتباط آماری بین متغیرها استفاده می‌شود. همچنین توابع عضویت گوسی یا ذوزنقه‌ای که کاربرد گسترده‌ای دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با ترکیب قسمت‌های مختلف بخش ابتدایی هر یک از قواعد و به دنبال آن، تعیین شدت و میزان تأثیر قاعده مزبور در خروجی نهایی سامانه، قوانین فازی ایجاد می‌شوند. ضرایب وزنی برای تمامی توابع عضویت یکسان یا متغیر در نظر گرفته و با توجه به تعداد توابع عضویت خروجی و ورودی، تعداد قواعد مشخص می‌شود. در نهایت، برای محاسبه مقدار خروجی، از ترکیب این قواعد استفاده شده و ازآنجاکه تصمیم‌گیری بر اساس بررسی تمام قواعد در سامانه استنتاج فازی صورت می‌گیرد، لذا برای تصمیم‌گیری، باید بتوان قواعد را به روشی ترکیب کرد. یکی از این روش‌ها، گرفتن گرانیگاه (مرکز ثقل) مجموعه فازی است. اجتماع مجموعه‌های فازی، یک سری از مقادیر خروجی را در برمی‌گیرد و لذا باید غیرفازی شود تا از مجموعه فازی به یک عدد خروجی تبدیل گردد.

۲-۲ حالات مورد بررسی برای پیش‌بینی بارش

از آنجا که طبق بررسی‌های انجام گرفته، برای پیش‌بینی بارش روزانه، حالت و معادله مشخص دقیقی بین پارامترهای هواشناختی و بارش وجود ندارد و بررسی تمام حالات به‌خصوص در هنگام ترکیب ICA و استنتاج فازی بسیار کند و وقت‌گیر می‌باشد، لذا پیش از ترکیب، برای یافتن جواب دقیق‌تر، بهترین حالت از بین حالت‌های موجود انتخاب می‌شود. این حالات عبارتند از:

- استفاده از اطلاعات یک و دو روز قبل برای هرروز
- استفاده از ۱ تا ۵ متغیر در هرروز برای پیش‌بینی بارش روز بعد
- استفاده از یک روز تأخیر بین روز موردنظر و روزهای مورداستفاده قبل

به‌طور مثال برای پیش‌بینی بارش روز N (یعنی RN) که در جدول ۳ آمده است، این حالت‌ها بررسی می‌شوند:

- استفاده از یکی از متغیرهایW، D، H، C و R از روز N-1
- استفاده از دو، سه، چهار و پنج‌تا از متغیرهای W، D، H، C و R از روز N-1 به‌صورت ترکیبی
- استفاده از دو حالت ۱ و۲ برای روز N-2
- استفاده از ترکیب یک، دو، سه، چهار و پنج متغیر از روز N-1 و یک، دو، سه، چهار و پنج متغیر از روز N-2

جدول ۳. داده‌های چهار روز متوالی به‌صورت پارامتری.

روز	دمای تر **W**	نقطه شبنم **D**	رطوبت نسبی **H**	ابرناکی **C**	بارش **R**
N-3	W_{N-3}	D_{N-3}	H_{N-3}	C_{N-3}	R_{N-3}
N-2	W_{N-2}	D_{N-2}	H_{N-2}	C_{N-2}	R_{N-2}
N-1	W_{N-1}	D_{N-1}	H_{N-1}	C_{N-1}	R_{N-1}
N	W_N	D_N	H_N	C_N	R_N

۲-۳ ترکیب تمام حالات فوق

درمجموع، طبق محاسبات انجام‌شده، بیش از ۵۹۰۰ حالت وجود دارد که می‌تواند برای به‌دست آوردن بهترین جواب بررسی شود و کد نوشته‌شده در ICA برای این منظور، قادر به بررسی تمامی این حالات می‌باشد. لیکن به دلیل مدت‌زمان بالای محاسبات هر حالت در رسیدن به جواب بهینه، حدود ۱۰۰۰ حالت به‌صورت تصادفی انتخاب شد. این تصادفی بودن انتخاب‌ها، حالات مختلف ترکیب پارامترها، استفاده از تعداد روز قبل و تأخیر از روز موردنظر را شامل می‌شود.

برای به کارگیری استنتاج فازی بهینه شده با ICA، ابتدا به تعیین مشخصات هریک از آنها پرداخته شد. مانند سایر الگوریتم‌ها، ICA نیز دارای ضرایب و متغیرهایی است که چنانچه به‌درستی تنظیم و انتخاب نشوند، می‌توانند جواب ارائه‌شده را از پاسخ بهینه بسیار دور کنند. این مقادیر به علاوه تعداد تکرار و جمعیت اولیه به‌کاربرده شده، در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ٤. مقادیر پارامترهای الگوریتم ICA در پیش‌بینی بارش.

تعداد تکرار	تعداد کشورهای اولیه	تعداد امپراتوری‌ها	β	R	Ξ
۲۰۰	۱۰۰	۱۰	۰/٦	۰/٤	۰/۰۳

که در آن، β ضریب جذب مستعمرات توسط استعمارگرها، R آهنگ انقلاب و ξ ضریب ارزش برای محاسبه هزینه هر امپراطوری هستند. علت اجتناب از به کار بردن اعداد بزرگ‌تر برای تعداد تکرار و کشورها، وجود تعداد زیاد حالات و زمان بالای محاسبه با توجه به تعداد زیاد داده‌ها (بیش از ۶۰۰۰ مورد برای هر داده) است.

تعداد متغیرهای الگوریتم نیز به‌گونه‌ای نوشته شد که به‌صورت هوشمند و بر اساس تعداد روزهای مورداستفاده در تابع ورودی، ضریبی از تعداد متغیرهای ورودی باشد که این مقدار بین ۵ تا ۳۰ متغیر لحاظ می‌شود. دامنه ضرایب هر ورودی نیز بر اساس سعی و خطا تعیین و به‌صورت ماتریس در الگوریتم به‌کاربرده شد.

به‌طورکلی الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر ژنتیک و ICA به‌منظور بهینه‌سازی توابع هدف، ایجادشده و به کار می‌روند. لذا برای استفاده از آنها در کاربردهای دیگر، بایستی مسئله را به‌گونه‌ای تغییر داد که از این طریق قابل‌حل باشد. بنابراین در پیش‌بینی با الگوریتم، هدف نهایی، به حداقل رساندن مجموع اختلاف‌های بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده می‌باشد. به این صورت که در هر تکرار، پس از ضرب ضرایب ورودی در متغیرها و برآورد بارش روز موردنظر، قدر مطلق اختلاف آن با مقدار واقعی محاسبه می‌شود که مجموع این مقادیر را الگوریتم بهینه می‌سازد (استفاده از قدر مطلق به دلیل عدم امکان پیش‌بینی بارش به‌صورت عددی منفی و جلوگیری از این اتفاق است). این رابطه در معادله (۴) آورده شده است:

$$Z=\sum_{i=1}^{n}\left|y_o-y_c\right|= \left|b_1x_1^{c_1}-r_1+b_2x_2^{c_2}-r_2+\cdots+b_nx_n^{c_n}-r_n\right|, \quad (۴)$$

که در آنها r مقدار واقعی بارش روز موردنظر می‌باشد. داده‌های ورودی این تابع شامل بارش، نم نسبی، ابرناکی، نقطه شبنم و دمای تر بوده و بارش روزهای آتی نیز به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. البته بارش خروجی، هم به صورت ارتفاع بارش و هم به‌صورت ۰ و ۱ به‌کار می‌رود (۰، روزهای با بارش کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و ۱، روزهای با بارش بالاتر از ۰/۵ میلی‌متر). همچنین ازآنجایی‌که میزان تأثیر هر یک از متغیرهای ورودی انتخاب شده و ترکیبات مختلف آنها در دقت پیش‌بینی

بارش، به‌خوبی مشخص نیست، یک ماتریس حاوی درایه‌های ۰ و ۱ به‌گونه‌ای نوشته شد که با دریافت تعداد متغیرهای ورودی (n)، تعداد 2^n-1 ستون و n سطر ایجاد کند. با ضرب این ماتریس در جمعیت تولیدشده توسط الگوریتم، حالات مختلفی از ترکیب متغیرها ایجاد و تأثیر برخی از آنها صفر در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، در ساده‌ترین حالت و به کارگیری ۵ متغیر، ماتریس ضرایب با ۳۱ ستون مطابق آنچه در ادامه آمده است، ایجاد می‌شود.

به‌طور مثال، ستون اول تنها تأثیرگذاری متغیر پنجم (در اینجا بارش) را بر احتمال بارش روزهای آتی بررسی می‌کند. همین‌طور ستون دوم، تأثیرگذاری ترکیب متغیرهای چهارم و پنجم (میزان ابرناکی و بارش) را در پیش‌بینی احتمال بارش به‌دست می‌آورد. ستون آخر نیز تمامی متغیرهای ورودی را در نظر می‌گیرد. همچنین هنگام استفاده از داده‌های دو روز قبل، این ماتریس در متغیرهای آن روزها نیز ضرب و حالات ترکیبی مختلف و کاملی ایجاد می‌نماید:

$$a=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

برای انتخاب بهترین حالت ترکیب داده‌ها در ICA برای استفاده در ادامه فرآیند پیش‌بینی، از یک رابطه غیرخطی بین متغیرها استفاده شد. این رابطه در معادله (۵) آورده شده است:

$$U=\sum_{i=1}^{n} b_i x_i^c \qquad (۵)$$

که در آن n، تعداد متغیر ورودی بر اساس حالت انتخاب‌شده، x_i ،هر یک از متغیرهای مورداستفاده در آن حالت و b و c، ضرایب تولیدشده توسط الگوریتم می‌باشند. در پایان، بهترین حالت برای ترکیب متغیرها و همچنین به‌کارگیری روزهای قبل با تاخیر مورد نیاز، حاصل می‌شود که براساس آن، تعداد و نوع ورودی‌ها در بخش ترکیب با استنتاج فازی تعیین می‌گردد.

۲-۴ پیش‌بینی ارتفاع بارش با ICA

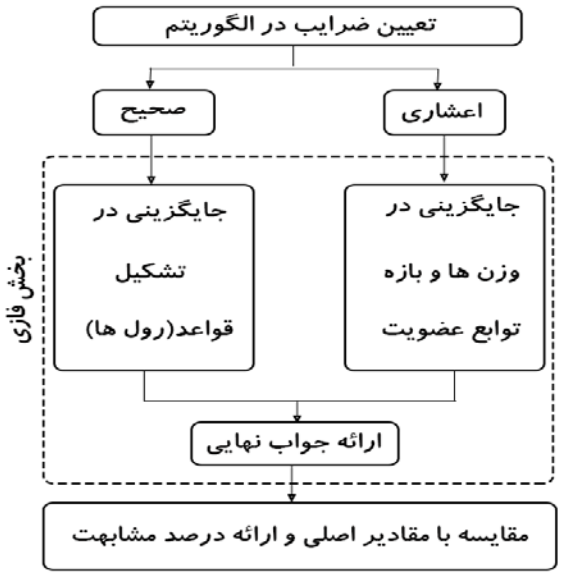
به منظور ارزیابی و مقایسه دقت عملکرد روش‌های مورد نظر در پیش‌بینی بارش، ابتدا از ICA در پیش‌بینی ارتفاع بارش استفاده شد. بدین صورت که الگوریتم به‌گونه‌ای تنظیم شد که خروجی آن به صورت مقادیر عددی باشد و با حالات تصادفی اجرا گردد. نتایج این مرحله به‌منظور مقایسه با مقادیر حالت دوم برای ادامه روند کار محاسبه شد.

۲-۵ پیش‌بینی وقوع یا عدم‌وقوع بارش با ICA

در این حالت، پیش‌بینی به صورت وقوع یا عدم وقوع بارش انجام گردید تا میزان دقت این روش‌ها در این زمینه سنجیده شود. بنابراین مقادیر به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که نتایج خروجی الگوریتم به صورت صفر و یک درآید.

حالت سوم: ترکیب ICA و استنتاج فازی

برای به‌کارگیری استنتاج فازی بهینه شده با ICA، ابتدا به تعیین مشخصات هریک از آنها پرداخته شد. ابتدا تعیین بازه‌های توابع عضویت و وزن‌های فازی به جای سعی و خطا، به الگوریتم ICA سپرده شد. همچنین تنها برخی از بهترین حالات استفاده شد. در پایان براساس قواعد به‌دست آمده، بهترین حالات بیان شد. روند کلی روش ترکیبی به کارگرفته شده در شکل ۲ آورده شده است.



شکل۲. نمودار گردش کار روش ترکیبی.

جدول ۵. مقادیر محاسبه‌شده برخی شاخص‌های آماری در پیش‌بینی ارتفاع بارش با الگوریتم ICA.

ایستگاه	RMSE		D		R^2	
	محاسبه‌شده	بازه تغییرات	محاسبه‌شده	بازه تغییرات	محاسبه‌شده	بازه تغییرات
زرند	۲/۵۳۱		۰/۲۵۵		۰/٤۰۱٤	
رفسنجان	۲/٤۸٤	(∞+ و ۰)	۰/۲۹٦	(۱و ۰)	۰/٤٤۱۹	(۱و ۰)
کرمان	۲/۰٤٤		۰/۵٦٦		۰/۵٤۲٤	

۳ بحث و نتایج

حالت اول: پیش‌بینی ارتفاع بارش با ICA

گام نخست در بررسی عملکرد روش‌های مورد نظر در پیش‌بینی بارش، استفاده تنها از ICA در پیش‌بینی ارتفاع این پدیده بود. بدین منظور، ابتدا داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل، هر دو به‌صورت مقادیر واقعی (و نه ۰ و ۱) در نظر گرفته و الگوریتم با تابع ذکرشده و با حالات تصادفی اجرا شد. نتایج در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که از نتایج مشخص است، با توجه به ضریب تعیّن (R^2) پایین و ضریب ویلموت (d) بالا، استفاده از الگوریتم به‌تنهایی و برای محاسبه ارتفاع بارش، با خطای معنی‌داری همراه بوده و از دقت کافی برخوردار نیست. این امر می‌تواند به دلیل عدم قطعیت بالای پدیده بارش به‌خصوص در مقیاس روزانه (به دلیل وجود داده‌های صفر فراوان) باشد.

حالت دوم: پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش با ICA

با توجه به اینکه پیش‌بینی ارتفاع بارش با استفاده از داده‌های گذشته و تابع به‌کاربرده شده، جواب قابل قبولی ارائه نمی‌کند و تاکنون معادله معتبری برای پیش‌بینی بارش با توجه به متغیرهای در دسترس روزهای قبل، ارائه نشده است، لذا به پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش بسنده شد. هدف آن است که هم دقت نتایج افزایش یابد و هم قابلیت مقایسه و نتیجه‌گیری با روش‌های دیگر به شکل مناسب‌تری وجود داشته باشد. لذا طبق آنچه که پیش از

این ذکر شد، روزهایی با بارش کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر، روزهای خشک (یعنی صفر) و مقادیر بزرگ‌تر، روزهای تر (یعنی یک) به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این پیش‌بینی در جداول ۶ تا ۸ و شکل ۳ آورده شده است. جدول ۹ نیز ضرایب به‌کاررفته در این جداول را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ستون اول به‌کار رفته در این جداول (a)، بیان کننده شماره ردیف ضرایب تولید شده به وسیله بخشی از الگوریتم برای اعمال تاثیر یا عدم تاثیر هر متغیر هواشناختی است.

با توجه به شکل‌ها و جداول و همان‌گونه که انتظار می‌رفت، دقت پیش‌بینی نسبت به قبل افزایش‌یافته و مقدار خطای موجود نیز، بیشتر به دلیل کثرت روزهای بدون بارش (مقادیر صفر) است زیرا پیش‌ازاین، توانایی الگوریتم در مسائل مشابه سنجیده شده است. بااین‌حال هنوز نتایج به‌دست‌آمده از شرایط آرمانی فاصله معنی‌داری دارد. همچنین به دلیل وجود اعداد صفر و یک، تنها به رسم نمودار دایره‌ای بسنده شد، زیرا نمایش نتایج با سایر نمودارها به درستی قابل رویت نیست.

جدول ٦. سه حالت خروجی برتر الگوریتم در پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش در ایستگاه کرمان.

ستون ضریب a	تعداد روز قبل مورداستفاده	تعداد روز تأخیر به‌کاررفته	درصد پیش‌بینی صحیح
۲۷	۱	۰	٦۱/٤
۳-٦	۲	۰	۵۷/۷
۳۱	۱	۰	٤۸/۱

جدول ۷. سه حالت خروجی برتر الگوریتم در پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش در ایستگاه رفسنجان.

ستون ضریب a	تعداد روز قبل مورداستفاده	تعداد روز تأخیر به‌کاررفته	درصد پیش‌بینی صحیح
۳۱	۱	۰	۵۱/۹
۳	۱	۰	٤۸/۹
۲۵	۱	۰	٤٦/۲

جدول ۸. سه حالت خروجی برتر الگوریتم در پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش در ایستگاه زرند.

ستون ضریب a	تعداد روز قبل مورداستفاده	تعداد روز تأخیر به‌کاررفته	درصد پیش‌بینی صحیح
۲۱	۱	۰	۵۱/۲
۱۸	۱	۰	٤٦/۳
۲۸	۱	۰	٤۵/۱

جدول ۹. ضرایب هر متغیر بر اساس شماره ستون انتخاب‌شده در حالت پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع.

شماره ستون a	دمای تر	دمای نقطه شبنم	نم نسبی	میزان ابرناکی	بارش
۲۷	۱	۱	۰	۱	۱
۳۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۰	۰	۰	۱	۱
۲۱	۱	۰	۱	۰	۱
۲۸	۱	۱	۱	۰	۰
۲۵	۱	۱	۰	۰	۱
۱۸	۱	۰	۰	۱	۰
٦	۰	۰	۱	۱	۱

حالت سوم: ترکیب ICA و استنتاج فازی

همان‌گونه که پیش‌ازاین ذکر گردید، الگوریتم رقابت استعماری به‌تنهایی قادر به ارائه پاسخ (آن‌گونه که انتظار می‌رود) نمی‌باشد. از سوی دیگر، در استفاده از استنتاج فازی برای فرآیندی مانند پیش‌بینی، نیاز به ایجاد توابع عضویت و قواعد صحیح در بازه‌های مؤثر می‌باشد. لیکن این امر مستلزم فراهم بودن دانش کافی در مورد تأثیرگذاری هر ورودی بر خروجی و حتی بر ورودی‌های دیگر و یا استفاده از سعی و خطاست که در هنگام به‌کارگیری این شیوه برای پدیده‌هایی با عدم قطعیت بالای تخمین، این سختی‌ها دوچندان خواهد شد. لذا یکی از راه‌های مؤثر در بهبود پیش‌بینی، ترکیب یک روش بهینه‌سازی با استنتاج فازی می‌باشد تا هم ضرایب فازی به نحو مناسبی بهینه شوند و هم پاسخ‌های به‌دست‌آمده از انعطاف بالاتری برخوردار باشند.

تمامی مراحل و جزئیات مربوط به پیش‌بینی با ICA، هنگام ترکیب آن با استنتاج فازی نیز اعمال شد. با این تفاوت که تعداد متغیرها در حالت جدید، بر اساس تعداد و نوع توابع عضویت در نظر گرفته شد زیرا در این حالت، الگوریتم وظیفه بهینه ساختن بازه‌های توابع عضویت، ساختار قواعد و ایجاد قواعد شرطی را بر عهده داشت و حالت‌های مختلف ورودی، به‌صورت دستی به تابع وارد شد. همچنین به دلیل اینکه به‌کارگیری استنتاج فازی به‌عنوان تابع ورودی، افزایش چندین برابری زمان محاسبات را به دنبال دارد، به‌ناچار ۳ حالت از بهترین حالات به‌دست‌آمده از اجرای تنهای ICA در پیش‌بینی وقوع و عدم وقوع بارش در هر ایستگاه، برای حالت ترکیب‌شده نیز به‌کاربرده شد تا بهبود یا عدم بهبود عملکرد سنجیده شود.

در حالت ترکیبی مورد استفاده، از میان استلزامات موجود، استلزام ممدانی به دلیل کاربرد بیشتر در زمینه‌های مختلف انتخاب شد. در ادامه، بر اساس نتایج بخش قبل و ۳ نتیجه برتر، تعداد ورودی‌ها تعیین و بین ۲ تا ۵ متغیر، متفاوت در نظر گرفته شد. همچنین تعداد توابع عضویت برای هر ورودی بر اساس سعی و خطا به‌صورت جداول ۱۰ و ۱۱ برای هر سه ایستگاه به‌دست آمد.

جدول ۱۰. تعداد و نوع توابع عضویت هر یک ازمتغیرهای ورودی و خروجی.

پارامترها	گوسی	ذوزنقه‌ای	مجموع
دمای تر	۳	۲	۵
نقطه شبنم	۳	۲	۵
نم نسبی	۵	۰	۵
میزان ابرناکی	۵	۰	۵
بارش	٦	۰	٦
خروجی	۰	۲	۲

برای ایجاد قواعد نیز ۵ حالت اختیار شد که برحسب تعداد ورودی، بین ۵ تا ۸ ستون داشتند. نمونه این قواعد در معادله (۶) آورده شده است:

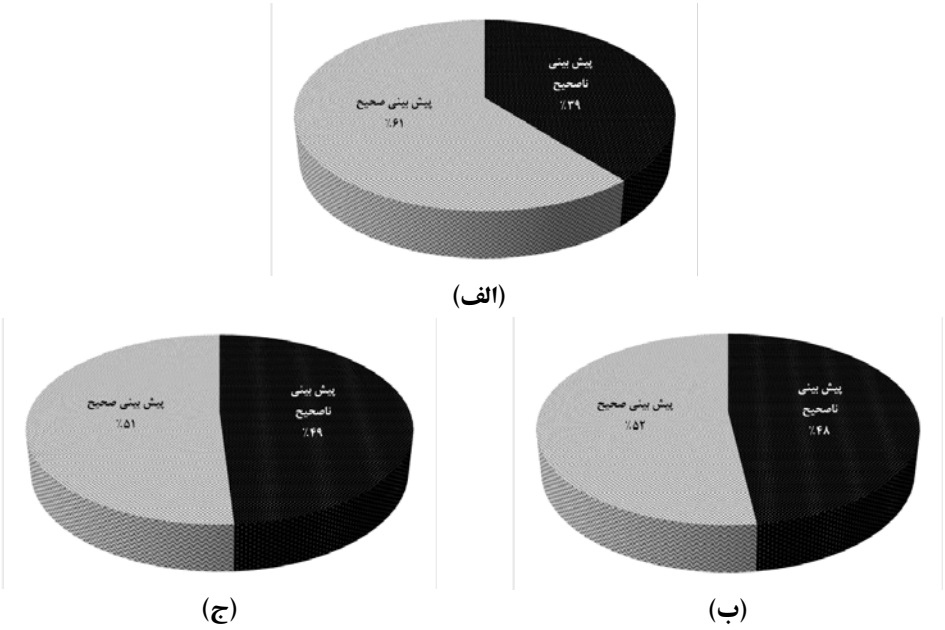
$$\text{Rule} = \{\text{Num}_{\text{MF}_{i1}}, \text{Num}_{\text{MF}_{i2}}, \cdots, \text{Num}_{\text{MF}_{in}}, \text{Num}_{\text{MF}_{o}}, w, r\}, \quad (۶)$$

که در آن $\text{Num}_{\text{MF}_{ni}}$ شماره MF از ورودی n، $\text{Num}_{\text{MF}_{o}}$ شماره MF از خروجی، w وزن مربوط به ورودی‌ها و r عمگر مربوط (۱ به معنی AND و ۲ به معنی OR) است.

جدول ۱۱. حدود بازه و نحوه نام‌گذاری توابع عضویت در حالت ترکیبی.

پارامترها	دسته‌بندی‌ها	بازه‌ها
دمای تر	بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا، بسیار بالا	۱٦/۳ تا ۹/۸-
نقطه شبنم	بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا، بسیار بالا	۱۱/۹ تا ۲٦-
نم نسبی	بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا، بسیار بالا	۷/۸ تا ۹۸/٤
میزان ابرناکی	بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا، بسیار بالا	۰ تا ۸
بارش	صفر، بسیار کم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد	۰ تا ۳۷
خروجی	خشک، تر	۰ تا ۱

پس از اجرای کد نوشته‌شده در حالات مختلف و برای سه ایستگاه مورد مطالعه و به‌دست آوردن جواب‌های بهینه، سه پاسخ مناسب‌تر گزینش و به‌عنوان پاسخ نهایی انتخاب شد که ویژگی‌های آنها در جدول ۱۲ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در جواب بهینه روش ترکیبی ایستگاه کرمان، از ۴ ورودی استفاده‌شده و تنها نم نسبی در نظر گرفته نشده است. تعداد متغیرهای تصمیم، ۷۲ مورد که شامل ۲۸ متغیر در قسمت قواعد برای انتخاب نحوه ترکیب توابع عضویت در تشکیل قواعد و ۴۴ متغیر در قسمت توابع عضویت می‌باشد که شامل انحراف معیار و مختصات بالاترین ارتفاع در توابع گوسی و کران‌های بالا و پایین در توابع ذوزنقه‌ای می‌باشد. این در حالی است که در ایستگاه‌های رفسنجان و زرند، تنها به ترتیب ۲ و ۳



شکل۳. درصد پیش‌بینی صحیح و ناصحیح حالت روزها در: (الف) ایستگاه کرمان، (ب) ایستگاه رفسنجان، (ج) ایستگاه زرند.

ورودی در به‌دست آوردن پاسخ بهینه به کارگرفته شده است و درصد پیش‌بینی صحیح کمتری نسبت به ایستگاه کرمان صورت پذیرفته که می‌تواند به دلیل سال‌های آماری نه‌چندان زیاد این دو ایستگاه باشد.

درمجموع پس از پیاده‌سازی کد موردنظر بر روی‌داده‌های ۳۰ ساله ایستگاه کرمان (۶۳۹۰ روز)، تنها در ۶۶۲ روز، پیش‌بینی به‌درستی صورت نگرفت. همچنین از ۲۱۳۰ روز ایستگاه‌های رفسنجان و زرند، به‌ترتیب پیش‌بینی ۳۷۶ و ۵۵۰ روز با خطا همراه بود. بیشتر موارد ناصحیح در هر سه ایستگاه، مربوط به‌روزهای خشک بود و در اکثر موارد، فاصله کمی با حد بارش و خشکی در نظر گرفته‌شده برای این پژوهش جهت خشک یا تر در نظر گرفتن یک روز داشتند.

برای نمونه، قواعد تشکیل‌شده در حالت ارائه جواب بهینه در ایستگاه کرمان به‌صورت زیر درآمدند:

- اگر دمای تر در بازه بسیار پایین و نقطه شبنم در بازه بسیار بالا باشد، بارش در بازه صفر است (AND).
- اگر میزان ابرناکی در بازه بسیار پایین باشد، بارش در بازه صفر است (AND).
- اگر بارش در بازه زیاد و ابرناکی در بازه بسیار بالا و دمای تر در بازه بالا باشد، بارش در بازه یک است (AND).
- اگر دمای تر در بازه بسیار بالا و نقطه شبنم در بازه پایین و بارش در بازه متوسط و ابرناکی در بازه بالا باشد، بارش در بازه یک است (AND).

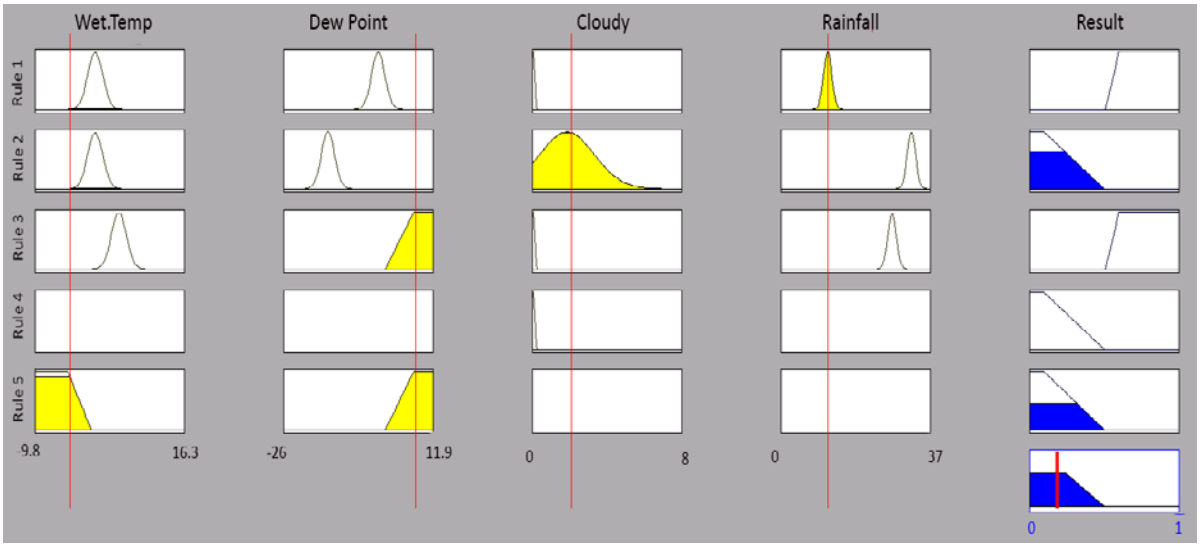
در شکل ۴ نمای کلی از ساختار نهایی فازی به‌دست‌آمده برای ایستگاه کرمان آورده شده است.

۳ نتیجه‌گیری

همانگونه که از نتایج مشهود است، الگوریتم رقابت استعماری به تنهایی عملکرد متوسطی در پیش‌بینی‌وقوع یا عدم‌وقوع بارش دارد و درصد قابل قبول روزهای صحیح پیش‌بینی شده حتی با دوره آماری کوتاه مدت، نشان دهنده توانایی مناسب این الگوریتم است.

جدول ۱۲. ویژگی‌های فازی بهترین پاسخ‌های به‌دست‌آمده برای ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	تعداد ورودی	پارامترهای ورودی	تعداد متغیر	تعداد قاعده ایجادشده	مجموع تعداد توابع عضویت	درصد پیش‌بینی صحیح
کرمان	٤	دمای تر، نقطه شبنم، میزان ابرناکی، بارش	٧٢	٤	٢٣	٨٩/٦٣
رفسنجان	٢	میزان ابرناکی، بارش	٤٢	٤	١٣	٨٢/٣١
زرند	٣	دمای تر، نم نسبی، بارش	٥٦	٤	١٨	٧٤/١٢



شکل ٤. ساختار نهایی فازی مورداستفاده پس از اجرا برای ایستگاه کرمان.

همچنین برتری این روش نسبت به روش‌هایی مانند شبکه عصبی، بررسی حالات بیشتر و استفاده از داده‌های چند ایستگاه به صورت هم‌زمان است، به‌گونه‌ای که بهترین حالت، به‌عنوان جواب عرضه می‌شود. با ترکیب این الگوریتم و استنتاج فازی، نتایج پیش‌بینی صحیح به شکل چشمگیری بهبود می‌یابد که نشان‌دهنده انعطاف مناسب این مدل ترکیب‌شده در پیش‌بینی پدیده‌هایی با عدم‌قطعیت بالای تخمین مانند بارش است. البته دقت نتایج حاصل‌شده به نوع و تعداد داده ورودی، تعیین مناسب متغیرهای الگوریتم، استفاده مناسب از داده‌های روزهای قبل و ایستگاه‌های مجاور در الگوریتم رقابت استعماری و همچنین نوع و تعداد بازه‌ها، تعداد ورودی‌ها و ایجاد قواعد مناسب در استنتاج فازی وابسته است.

منابع

ابراهیمی، ر.، زهرایی، ب. و ناصری، م.، ۱۳۸۹، پیش‌بینی میان‌مدت خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از روش استنتاج فازی: مجله آب و فاضلاب، شماره ۷۸، ص ۱۲۵-۱۱۲.

ثامنی، م. و خان‌تیموری، ع.، ۱۳۹۰، بررسی عوامل مؤثر در پدیده بارندگی و میزان تأثیر هرکدام از آنها با استفاده از شبکه‌های بیزین: اولین اجلاس ملی فناوری اطلاعات و جهاد اقتصادی، دانشگاه سلمان فارسی، کازرون.

خلیلی، ن.، خداشناس، س. و داوری، ک.، ۱۳۸۵، پیش‌بینی بارش با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی: دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان.

عراقی‌نژاد، ش.، مروتی، ر. و حسینی موغاری، م.، ۱۳۹۲، بررسی عملکرد الگوریتم رقابت استعماری در بهره‌برداری بهینه از مخزن: اولین همایش ملی بحران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان.

فلاح قالهری، غ.، وحیدیان کامیاد، ع.، موسوی بایگی، م.، و حبیبی، م.، ۱۳۸۵، کاربرد سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و سیستم استنباط فازی ممدانی در پیش‌بینی بارش سالانه: اولین کنگره مشترک سیستم‌های فازی و سیستم‌های هوشمند، دانشگاه فردوسی، مشهد.

کارآموز، م.، ۱۳۸۴، پیش‌بینی درازمدت بارش با استفاده از سیگنال‌های هواشناسی: پروژه شماره ۳۴۲ سازمان هواشناسی کشور.

محمدیان، ه.، و کی‌نیا، ف.، ۱۳۹۱، یک استراتژی هیبرید برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت سرعت باد توسط ترکیب الگوریتم رقابت استعماری (ICA) با شبکه عصبی پرسپترون چندلایه: مجموعه مقالات دومین همایش ملی انرژی باد و خورشید، تهران.

میرموسوی، ح.، و زهره‌وندی، ح.، ۱۳۹۰، مدل‌سازی احتمالات بارش هفته‌ای جهت تحلیل روزهای خشک متوالی (نمونه موردی: ایستگاه هواشناسی نهاوند، استان همدان): دومین اجلاس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، شرکت آب منطقه‌ای زنجان.

Carrano, L. A., Taylor, B. J., Robert, E. Y., Richard, L. L., Daniel, E. S., 2004, Fuzzy knowledge-based modeling and regression in abrasive wood machining: For. Prod. J., 54 (5), 66–72.

Chuan, C. S., 1997, Weather prediction using artificial neural network: J. Hydrol., 230, 101–119.

Crowell, K., 2005, Precipitation Precdition Using Artificial Neural Networks: M.Sc. Thesis, University of Georgia, USA, 1–4.

Dash, P. R., 2012, A Markov chain modelling of daily precipitation occurrences of Odisha: International J. Advanced Computer and Mathematical Sciences, 3(4), 482–486.

Duan, H., Xu, C., Liu, S., and Shao, S., 2009, Template matching using chaotic imperialist competitive algorithm: Pattern Recognition Letters, 39(6), 1362–1381.

Halid, H. and Ridd, P., 1999, Modeling inter-annual variation of a local rainfall data using a fuzzy logic technique: Proceeding of International Forum on Climate Prediction, James Cook University, Australia, 166–170.

Hung, N. Q., Babel, M. S., Weesakul, S., Tripathi, N. K., 2008, An artificial neural network model for rainfall forecasting in Bankok, Thailand: J. Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 1413–1425.

Shao, J., 2000, Fuzzy categorization of weather conditions for thermal mapping: J. Appl. Meteorol., 39, 1784–1790.

Wong, K. W., Wong, P. M., Gedeon, T. D., Fung, C. C., 2003, Rainfall prediction model using soft computing technique: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 7(6), 1432–7643.