

## پس پردازش برون داد مدل دینامیکی MRI-CGCM3 برای پیش بینی فصلی بارش استان خراسان رضوی

ایمان بابائیان<sup>۱\*</sup>، مریم کریمیان<sup>۱</sup> و راهله مدیریان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده اقلیم شناسی، سازمان هواشناسی کشور، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۲۹)

### چکیده

مدیریت منابع آبی در کشور به سبب وابستگی بخش عمده‌ای از فعالیت‌های اقتصادی به مقدار و توزیع زمانی بارش دارای اهمیت بسیار زیادی است و پیش‌بینی فصلی یکی از ابزارهای مهم در مدیریت بهینه منابع آبی محسوب می‌شود. در این تحقیق به منظور عرضه پیش‌بینی فصلی بارش استان خراسان رضوی، برون‌داد متغیرهای متفاوت مدل دینامیکی MRI-CGCM3، در دوره ۱۹۸۱-۲۰۰۷ روی هفت ایستگاه هواشناسی استان خراسان رضوی پس‌پردازش شدند. داده‌های مدل از سازمان هواشناسی ژاپن اخذ شدند. نتایج نشان داد که استفاده از این روش باعث افزایش دقت پیش‌بینی‌های فصلی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در ایستگاه مشهد با اعمال فرایند پس‌پردازش آماری با استفاده از روش همبستگی چندمتغیره خطی، آریبی و خطای نسبی پیش‌بینی فصلی بارش به ترتیب از ۱۰۷/۴۳ به ۲/۹۹ میلی‌متر و از ۶۶/۱۵ به ۰/۷۸ کاهش یافت. همچنین میانگین آریبی بارش در کل استان از ۹۴/۳ به ۳/۵ میلی‌متر کاهش یافت. در این پژوهش پیش‌بینی فصلی در پنج طبقه بیش از نرمال، نرمال تا بیش از نرمال، نرمال، نرمال تا کمتر از نرمال و کمتر از نرمال تهیه و با داده‌های متناظر بارش دیدبانی مقایسه شد. نتایج نشان داد که توانمندی پیش‌بینی فصلی خام مدل ۲۵/۳ درصد است و با اعمال پس‌پردازش آماری تا ۶۲/۲ درصد افزایش می‌یابد که حاکی از بهبود ۳۶/۹ درصدی در توانمندی پیش‌بینی‌ها است. همچنین مشخص شد که اگر تعداد طبقات پیش‌بینی بارش از پنج طبقه به سه طبقه بیش از نرمال، نرمال و کمتر از نرمال کاهش یابد، توانمندی پیش‌بینی به ۷۳/۶ درصد افزایش خواهد یافت. به علت آریبی بسیار زیاد داده‌های خام مدل، اجرای فرایند پس‌پردازش آماری موجب شد تا خطای پیش‌بینی در همه ایستگاه‌ها بیش از صددرصد بهبود یابد. علاوه بر این مقایسه نتایج بارش پیش‌بینی شده با استفاده از روش جاری نشان می‌دهد که مدل توانسته است بارش‌های فصل پاییز ۱۳۹۱ را به‌خوبی پیش‌بینی کند. همچنین نتایج روشن ساخت که برخی شاخص‌هایی که برای راستی‌آزمایی پیش‌بینی عددی کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار می‌گیرند، پاسخ صحیحی برای پیش‌بینی‌های فصلی به‌دست نمی‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بارش، پس‌پردازش آماری، پیش‌بینی فصلی، ریزمقیاس‌نمایی، مدل MRI-CGCM3

### Statistical post processing MRI-CGCM3 output for seasonal precipitation forecast over Khorasan-Razavi province, Iran

Iman Babaeian<sup>\*1</sup>, Maryam karimian<sup>2</sup> and Rahele Modirian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Climatological Research Institute (National Centre for Climatology), Mashad, Iran

(Received: 22 January 2013, accepted: 19 May 2013)

\*Corresponding author:

ibabaeian@yahoo.com

\*نگارنده رابط:

## Summary

In recent years, due to frequent climatic extreme events, demands for reliable seasonal precipitation forecasts have been increased. The seasonal to interannual climate forecasts have become essential for policy makers and risk managers in planning several activities, including those related to agriculture, water resource management and many others which directly or indirectly affect the society, especially in water resources and agricultural, environmental and health sectors. Although numerical models are being increasingly used to generate operational seasonal forecasts, the reliability of these products remains relatively low. In this regard, for improving the accuracy of seasonal precipitation forecasts, the outputs of the MRI-CGCM3 seasonal forecast model have been used for the statistical post-processing of the model precipitation over the synoptic weather stations of Khorasan-Razavi Province in Iran over the period of 1981-2007. We had the model output data from the Tokyo Climate Centre. The outputs of MRI-CGCM3 are available to registered National Meteorological and Hydrological Services (NMHSs) on the website of the Tokyo Climate Center of the Japan Meteorological Agency (JMA/TCC).

Regression-based post processing methods have proven useful in increasing forecast skills. The current study tests this hypothesis applying both linear regressions to the correction of climate hind casts produced by MRI-CGCM3 general circulation models. Statistically significant predictions are produced from the model output with no forecast skill prior to post-processing. MRI-CGCM3 has produced 30 years of reforecast covering a period of 1981-2008. The reforecast data was used to produce post-processing multivariate relations between reforecast parameters and the observed precipitation in the training period of 1981-2001. Model variables and indices which were used in the post-processing were WIO rain, Z2030, Z5060, WIO SST, T850, T2m, SST, NINOWEST SST, WNP RAIN, NINO3 SST, Z3040, H500, SLP, SAMOI RAIN, MC RAIN, DL RAIN, THMD, THTR and total precipitation. The skill of multivariate post-processing was evaluated using Mean Square Skill Score, Mean Bias Error, relative error and categorical skill score over the training and evaluation periods. Categorical skill score is determined by computing the skill of the post processed and the raw model data in forecasting five precipitation categories i.e. above normal, above normal to normal, normal, normal to below normal and below normal. The area of study covered Khorasan-Razavi province stations including Mashad, Golmakan, Ghuchan, Sarakhs, Torbate-Heydarieh, Kashmar and Sabzvar.

Post processed precipitations were compared to the observed precipitations to investigate the capability of the statistical post processing method. After post processing, the bias and relative error decreased from 107.43 to 2.99 and 66.15 to 0.78 at Mashad station, respectively. Station average bias error decreased from 94.3 to 3.5mm and categorical skill was improved from 25.3% in raw data to 62.2% in the post processed data. The bias and relative error were significantly decreased in the other stations. The skill of the post-processing of precipitation was compared to the observed precipitation for all months. The result showed that the multiple regression method can be significantly used to increase the accuracy of the model predictions over Khorasan-Razavi province.

**Keywords:** Precipitation, post processing, seasonal forecasting, statistical downscaling, MRI-CGCM3

## ۱ مقدمه

مدل‌های گردش کلی جو (GCM) که در نقاط شبکه‌ای فضازمانی تحول زمانی سامانه هوا و اقلیم را مدل‌سازی می‌کنند، با دو دیدگاه عمده مورد استفاده قرار می‌گیرند: پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده در مقیاس زمانی دهه‌ای و بالاتر با استفاده از سناریوهای انتشار توصیه شده از سوی هیئت میان‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) و پیش‌بینی وضعیت اقلیم آینده در مقیاس زمانی ماهانه برای یک دوره زمانی کمتر از یک سال. هر چند هر دو دیدگاه فوق از مدل‌های دینامیکی گردش کلی جو برای پیش‌بینی آینده استفاده می‌کنند، اما تفاوتی عمده در این دو روش وجود دارد، که آن تعریف نوع میدان‌های اولیه متغیرهای هواشناسی موردنیاز برای آغازگری شبیه‌سازی‌ها و یا نوع داده‌های شرایط مرزی موردنیاز است. در روش اول داده‌های شرایط مرزی براساس فرضیات هیئت میان‌دولتی تغییر اقلیم تهیه می‌شود که خطای آن به نسبت زیاد است، اما در روش دوم از شرایط مرزی واقعی استفاده می‌شود (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۱). استخراج اطلاعات محلی از برون‌داد (output) مدل‌های گردش کلی با کمک مدل‌های آماری برازش شده به داده‌های مشاهداتی ریزمقیاس‌نمایی آماری نامیده می‌شود (زوریتا و استورچ، ۱۹۹۸). اگر چه مدل‌های گردش کلی بطور قابل‌قبولی ویژگی‌های اصلی جریان‌های بزرگ‌مقیاس را نشان می‌دهند اما آنها در شبیه‌سازی جزئیات اقلیم منطقه‌ای بسیار ضعیف عمل می‌کنند (ادوارد، 2000b). تفکیک فضایی این مدل‌ها بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر است. خروجی این گونه مدل‌ها در مقیاس اولیه قادر به فراهم کردن اطلاعات دقیق مقیاس محلی و منطقه‌ای نیست؛ به‌ویژه بارش منطقه‌ای در این مدل‌ها به‌خوبی شبیه‌سازی نمی‌شود، زیرا بارش فراسنجی است که تحت‌تاثیر فرایندهای ریزمقیاس (درون شبکه‌ای) مانند طرحواره بارش، ویژگی‌های جغرافیای طبیعی مانند شرایط

جغرافیایی است. بنابراین، برون‌داد مدل‌های گردش کلی بایستی با استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به مقیاس منطقه‌ای و محلی تبدیل شوند. ریزمقیاس‌نمایی به دو روش دینامیکی و آماری صورت می‌گیرد (مورفی و همکاران، ۱۹۹۹). ترکیب دو روش بالا «روش ریزمقیاس‌نمایی آماری دینامیکی» نامیده می‌شود. نتایج تحقیقات مدل‌سازی در مقیاس‌های دینامیکی و منطقه‌ای نشان می‌دهد که مدل‌سازی دینامیکی و ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی مدل‌های جهانی را بهبود می‌بخشد (هنسن و همکاران، ۲۰۰۵). در روش ریزمقیاس‌نمایی آماری، اطلاعات اقلیمی محلی از طریق یک ارتباط آماری بین فراسنج محلی و میدان‌های بزرگ‌مقیاس به دست می‌آید (جورجی و همکاران، ۲۰۰۱). در روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی معادلات حاکم جو در مقیاس شبکه‌ای حل می‌شوند. یکی از مزیت‌های استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری نسبت به دینامیکی این است که می‌توان تغییرپذیری‌ها را در سطح ایستگاه بررسی کرد، همچنین زمان پردازش با رایانه در مقایسه با روش دینامیکی بسیار کوتاه‌تر است (چن و همکاران، ۲۰۰۴). ژن و رنویک (۲۰۰۳) پیش‌بینی فصلی دمای نیوزلند را با به‌کارگیری روش همبستگی چندمتغیره خطی و استفاده از فراسنج‌های دمای هوا، بارش و دمای سطح پهنه‌های آبی اقیانوس آرام عملی ساختند. مولر (۲۰۱۱) روش پالایه کالمن و MOS را برای پس‌پردازش برون‌داد مدل MM5 به منظور ارتقا کیفیت پیش‌بینی دما و باد در ۱۱۵۰ ایستگاه هواشناسی اروپای مرکزی مورد استفاده قرار داد. او روشن ساخت که استفاده از روش MOS می‌تواند تا ۳۵٪ توانمندی پیش‌بینی‌ها را در مقایسه با روش پالایه کالمن افزایش دهد. موناش و همکاران (۲۰۱۱) از طرحواره‌های پالایه کالمن و آنالوگ برای کاهش خطای سامان‌مند و تصادفی مدل WRF در پیش‌بینی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر برای ۴۰۰ ایستگاه هواشناسی غرب

پیش‌بینی‌کننده میدان‌های دمای دو متر را تا حد معنی‌داری افزایش دهد. پس‌پردازش برون‌داد مدل MM5 برای دمای بیشینه و کمینه در دو متری سطح زمین برای ۱۱۷ ایستگاه ایران و به مدت ۱۲۰ روز با استفاده از پالایه کالمن نشان داد که این روش می‌تواند برای روزهایی که خطای مدل زیاد یا متوسط بود، پیش‌بینی مدل را تا حد قابل‌قبولی اصلاح کند؛ اما برای روزهایی که خطا کم بود، کاربست پالایه کالمن تاثیر چندانی در تصحیح خطا نداشت (آزادی و همکاران، ۱۳۸۷). پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF به روش پالایه کالمن غیرخطی در بازه‌های زمانی متفاوت، ابتدا برای تندی باد در ارتفاع ده متر از سطح زمین و سپس به‌منظور ارزیابی کاربرد این روش و مقایسه نتایج، برای دمای هوا در ارتفاع دو متر از سطح زمین در ۸ ایستگاه همدیدی بوشهر اجرا شد. نتایج، حاکی از آن است که برای هر دو فراسنج تندی باد و دما پس از اعمال پالایه، میانگین خطاها به صفر یا نزدیک صفر می‌رسد که این امر نشان می‌دهد پالایه غیرخطی کالمن خطای سامان‌مند مدل را تقریباً حذف کرده است، به‌نحوی که خطاها به‌صورت تصادفی حول صفر توزیع شده‌اند (راستگو و همکاران، ۱۳۸۹). با اجرای مدل WRF در دو حوزه ۴۵ و ۱۵ کیلومتر برای یک دوره ۶ ماهه پُربارش و سپس اعمال فرایند پس‌پردازش به دو روش بهترین برآوردکننده سامان‌مند و میانگین لغزان روی برون‌داد بارش ۲۰۵ ایستگاه هواشناسی، میانگین مطلق خطای برون‌داد بارش مدل به‌طور متوسط بین ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش یافت (آزادی و دیگران، ۱۳۸۹). پزی و کایانو (۲۰۰۸) با استفاده از روش همبستگی چندگانه توانمندی پیش‌بینی فصلی مدل CPTEC را افزایش دادند و با به‌کارگیری تحلیل موجک، توانایی روش پس‌پردازش مورد استفاده در تحقیق را با داده‌های مشاهداتی از نظر میزان شبیه‌سازی واریانس‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. برای مقایسه نتایج مدل با تفکیک ۱/۸ در ۱/۸ درجه با مقادیر بارش

امریکا در یک دوره ۶ ماهه استفاده کردند. آنها نشان دادند که طرحواره آنالوگ می‌تواند در مقایسه با پالایه کالمن توانمندی پیش‌بینی را بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بهبود بخشد (موناش و همکاران، ۲۰۱۱). فدرسون و همکاران (۲۰۰۴) برون‌داد ۳ مدل پیش‌بینی فصلی ECMWF، Metro France و UK-Met Office را پس از پس‌پردازش آماری به‌صورت احتمالاتی با همدیگر تلفیق کرده و پیش‌بینی‌های بارش و دما را بهبود بخشیدند. چویی و همکاران (۲۰۱۱) از روش پالایه کالمن برای پس‌پردازش برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی فصلی NCEP و MSC استفاده کردند. سپس آنها نتایج به‌دست آمده از دو مدل پیش‌گفته را برای صدور پیش‌بینی فصلی چندگانه به کار بردند. آنها نتیجه‌گیری کردند که اعمال این روش موجب بهبود قابل‌توجهی در پیش‌بینی فصلی امریکا و کانادا می‌شود. کاروری و ژانگ (۲۰۰۸) با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری متغیرهای بزرگ‌مقیاس برون‌داد مدل NCC-CGCM سازمان هواشناسی چین، پیش‌بینی فصلی را برای شهر اسلام‌آباد پاکستان تهیه کردند و نتایج مقادیر ریزمقیاس شده را با داده‌های واکاوی شده NCEP مقایسه کردند. در تحقیق یاد شده، الگوی همبستگی بین بارش تابستانه اسلام‌آباد و متغیرهای مدل CGCM بررسی شد. متغیرهایی به منزله پیش‌بینی‌کننده انتخاب شدند که همبستگی بین آنها و بارش در محدوده  $0.4 \pm < r$  بود. آنها دریافتند که مقادیر ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روی جنوب اقیانوس آرام، دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روی جنوب غرب دریای عرب و فشار سطح متوسط دریا روی جنوب اقیانوس آرام، مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ها در مدل آماری همبستگی چندمتغیره در ریزمقیاس‌نمایی بارش اسلام‌آباد هستند (کاروری و ژانگ، ۲۰۰۸). گوسوامی و مالیک (۲۰۱۰) روشن ساختند که به‌کارگیری روش غیرخطی حذف‌آرایی در برون‌داد مدل منطقه‌ای MM5 می‌تواند توانمند نبودن مدل

پیش‌گفته با به‌کارگیری روش آماری رگرسیون چندگانه خطی پس‌پردازش شد.

## ۲ روش تحقیق

این تحقیق به‌منظور عرضه پیش‌بینی ماهانه تا فصلی در استان خراسان رضوی صورت گرفت. استان خراسان رضوی دارای ۱۲ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک است که دارای طول دوره آماری متفاوتی هستند. از آنجاکه پیش‌بینی‌های گذشته‌نگر (Reforecast) مدل پیش‌بینی فصلی مورد استفاده در این تحقیق از سال ۱۹۸۱ قابل دسترس بود، لذا از بین ایستگاه‌های موجود استان فقط هفت ایستگاه مشهد، گل‌مکان، قوچان، سرخس، تربت حیدریه، کاشمر و سبزوار که مبدا طول دوره آماری آنها با طول دوره آماری داده‌های مدل هماهنگ بود، انتخاب شد.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل دو مجموعه داده مشاهداتی و مدل‌سازی از ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۸ است. داده‌های مشاهداتی شامل بارش ماهانه ایستگاه‌های پیش‌گفته و داده‌های مربوط به برون‌دادهای گذشته‌نگر مدل MRI-CGCM3 در دو گروه داده‌های مربوط به متغیرهای محلی پیش‌بینی شده و شاخص‌های اقلیمی دورپیوندی مانند انسو، میانگین ضخامت بین لایه‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در محدوده عرض‌های ۳۰ تا ۴۰ شمالی و سایر شاخص‌های مندرج در جدول ۱ با مدل در ایستگاه مورد تحقیق هستند که عبات‌اند از: بارش، فشار سطح متوسط دریا، ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، دمای ۸۵۰ هکتوپاسکال و دمای هوا در ارتفاع ۲ متر در شبکه مدل در طول و عرض جغرافیایی ایستگاه. تفکیک داده‌های مدل ۱/۸ در ۱/۸ درجه است. مشخصات همه متغیرهای محلی و شاخص بزرگ‌مقیاس به تعداد ۲۰ مورد در جدول ۱ آورده شده است.

مشاهداتی از داده‌های بارش GCPC (Global Precipitation Climatology Project) که دارای تفکیک ۲/۵ در ۲/۵ درجه هستند، استفاده شد. برای این منظور داده‌های مدل روی شبکه داده‌های GCPC درون‌یابی شد (پزی و کایانو، ۲۰۰۸). فینس و همکاران (۲۰۱۱) دو روش همبستگی خطی و غیرخطی را برای پس‌پردازش برون‌داد بارش گذشته‌نگر مدل پیش‌بینی فصلی CGCM3 در منطقه امریکای جنوبی مورد استفاده قرار دادند. نتایج روش مورد استفاده آنها حاکی از بهبود قابل‌ملاحظه در پیش‌بینی مدل پس از اعمال فرایند پس‌پردازش است (فینس و همکاران، ۲۰۱۱). رولین و وانیتسم (۲۰۱۱) با استفاده از روش همبستگی توسعه‌یافته بارش ناحیه‌ای پیش‌بینی شده گذشته‌نگر مدل ECMWF را روی دو حوضه آبریز کشور بلژیک از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ پس‌پردازش کردند. این روش موجب بهبود شاخص‌های ارزیابی برای پیش‌بینی بارش دوازده در فصل‌های زمستان و بارش پنج‌روزه در فصل تابستان شد. از آنجاکه پدیده‌های دورپیوند آرام-آمریکای شمالی (PNA) و نوسان اطلس شمالی (NAO) تاثیر مهمی بر بارش و دمای امریکای شمالی دارند، جیا و همکاران (۲۰۰۸) با اعمال فرایند پس‌پردازش به روش همبستگی چندمتغیره، توانستند توانمندی مدل‌های پیش‌بینی فصلی تحت‌عنوان HFP (Historical Forecasting Project) را در پیش‌بینی پدیده‌های پیش‌گفته ارتقا دهند و از این طریق، به توانمندی پیش‌بینی بارش و دمای منطقه، بهبود قابل‌توجهی دهند.

در این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی بارش ماهانه تا فصلی استان خراسان رضوی، برون‌داد بارش مدل MRI-CGCM3 سازمان هواشناسی ژاپن با استفاده از داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان رضوی و همچنین سایر برون‌دادهای هواشناسی و اقیانوسی مدل

می‌رود. رگرسیون روشی است که به‌خوبی از عهده پیش‌بینی و آزمون فرضیه بر می‌آید. در مرسوم‌ترین حالت رگرسیون به بررسی رابطه بین یک متغیر وابسته و چند متغیر مستقل پرداخته می‌شود. شکل کلی معادله همبستگی چندمتغیره به‌صورت رابطه (۱) است:

(۱)

$$Y_t = \alpha + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \beta_3 X_{3t} + \dots + \beta_k X_{kt} + \varepsilon_t$$

که  $Y_t$  متغیر وابسته یا پیش‌بینی‌شونده و  $X_{kt}$  متغیرهای وابسته یا پیش‌بینی‌کننده‌ها هستند (یاراحمدی و عزیزی،

از آنجا که مدل‌های گردش کلی به‌علت تفکیک کم، قادر به آشکارسازی متغیرهای هواشناسی با جزئیات و در مقیاس ریز نیستند، لذا در این تحقیق برون‌داد بارش شبکه‌ای مدل MRI-CGCM3 با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره خطی و به‌کارگیری متغیرهای منتخب موجود در جدول ۱ پس‌پردازش شد.

رگرسیون چندمتغیره روشی برای ساختن معادله مدل از سری داده‌های گذشته است (شیمی زوکاوا و همکاران، ۲۰۰۹). این روش یکی از قوی‌ترین روش‌ها برای تبیین ارتباط بین متغیرهای مدل شده و مشاهداتی به شمار

جدول ۱. مشخصات متغیرهای محلی و شاخص‌های بزرگ‌مقیاس برون‌داد مدل MRI-CGCM3 مورد استفاده در فرایند پس‌پردازش آماری.

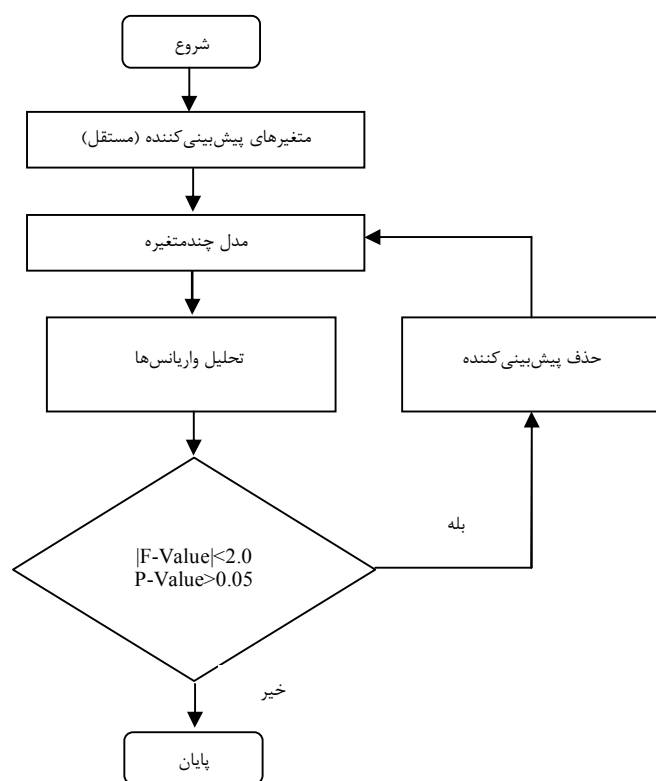
نام	متغیر	ناحیه
Z4050	میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی ۵۰۰ هکتوپاسکال	طول ۰ تا ۳۶۰ و عرض ۴۰ تا ۵۰ شمالی
Z5060	ارتفاع ژئوپتانسیلی ۵۰۰ هکتوپاسکال	۰ تا ۵۰ و ۳۶۰ تا ۶۰ شمالی
THMD	ضخامت بین سطح ۷۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال	۰ تا ۳۰ و ۳۶۰ تا ۵۰ شمالی
THEX	ضخامت بین سطح ۷۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال	۰ تا ۳۰ و ۳۶۰ تا ۹۰ شمالی
H500	ارتفاع ژئوپتانسیلی ۵۰۰ هکتوپاسکال	متغیر محلی در ایستگاه
SLP	فشار سطح متوسط دریا	متغیر محلی در ایستگاه
SST	دمای سطح آب	متغیر محلی در ایستگاه
T2M	دمای ارتفاع ۲ متر	متغیر محلی در ایستگاه
T850	دمای ۸۵۰ هکتوپاسکال	متغیر محلی در ایستگاه
Model-Pr	بارش	متغیر محلی در ایستگاه

نام	متغیر	ناحیه
NINOSST	دمای سطح آب	۹۰ تا ۱۵۰ درجه غربی و ۵ درجه جنوبی تا ۵ درجه شمالی
NINOWESTSST	دمای سطح آب	۱۳۰ تا ۱۵۰ شرقی و ۰ تا ۱۵ شمالی
WIOSST	دمای سطح آب	۴۰ تا ۷۰ شرقی و ۰ تا ۲۰ شمالی
WIORAIN	بارش	۴۰ تا ۷۰ شرقی و ۰ تا ۲۰ درجه شمالی
SAMORAIN	بارش	۸۰ تا ۱۴۰ شرقی و ۵ تا ۲۵ شمالی
WNPRAIN	بارش	۱۱۰ تا ۱۶۰ شرقی و ۱۰ تا ۲۰ شمالی
MCRAIN	بارش	۱۱۰ تا ۱۳۵ شرقی و ۵ درجه جنوبی تا ۵ درجه شمالی
DLRAIN	بارش	۱۷۰ شرقی تا ۱۷۰ غربی و ۵ جنوبی تا ۵ درجه شمالی
Z2030	ارتفاع ژئوپتانسیلی ۵۰۰ هکتوپاسکال	۰ تا ۳۶۰ و ۲۰ تا ۳۰ شمالی
Z3040	ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال	۰ تا ۳۶۰ و ۳۰ تا ۴۰ شمالی

نزدیک‌تر می‌شوند. مقادیر منفی ضریب تعیین متعادل شده قابل قبول نیستند. روش انتخاب متغیرهای ورودی مدل چندمتغیره در شکل ۱ نشان داده شده است.

با به‌کارگیری این روش، روابط بین خروجی مدل با داده‌های دیدبانی مربوط، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت معادلات پس‌پردازش ماهانه به‌دست آمد. سپس شاخص‌های آماری از قبیل اُریبی، میانگین خطا و شاخص کمترین خطای مربعات روی نتایج حاصل در دو حالت قبل و بعد از فرایند پس‌پردازش محاسبه شد. مزیت روش همبستگی چندگانه خطی در این است که با داشتن اطلاعات کمی از فرایندهای فیزیکی در جو، می‌توان ارتباطی بین فراسنج پیش‌بینی‌شونده محلی و فراسنج‌های پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس برون‌داد مدل گردش کلی

(۱۳۸۵). از آنجا که از تعداد ۲۰ متغیر برون‌داد مدل پیش‌بینی فصلی برای توسعه مدل همبستگی چندمتغیره استفاده شده است که تعدادی از آنها ارتباط معنی‌داری با بارش مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی استان ندارند، لذا برای حذف متغیرهای بی‌تاثیر، از روش حذف پس‌رو (Backward) استفاده شد. در این روش ابتدا همه متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (مستقل) وارد مدل می‌شود و سپس متغیری که دارای همبستگی کمتری است، حذف می‌شود. در انتخاب متغیرهای نهایی ضریب تعیین  $R^2$ ، ضریب تعیین متعادل شده  $R^2-Adjust$  و آماره‌های  $F$  و  $t$  نیز موثر هستند.  $R^2$  درصد تغییرات متغیر پیش‌بینی‌شونده با متغیرهای پیش‌بینی‌کننده را توضیح می‌دهد.  $R^2-Adjust$  یا  $R^2$  متعادل شده وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که تعداد متغیرهای مستقل افزایش یابد. هرچه تعداد نمونه‌ها افزایش یابد  $R^2$  و  $R^2-Adjust$  به هم



شکل ۱. نمودار گردش نحوه انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها در مدل چندمتغیره پس‌پردازش آماری.

فصلی، ارائه چشم‌انداز بارش و روند آن در فصل آتی در مقایسه با شرایط نرمال است، لذا در این تحقیق امتیاز مهارتی توانمندی پیش‌بینی طبقه‌ای بارش نیز مطابق رابطه (۵) محاسبه شد

$$CFSS = 1 - \frac{CFS_f}{CFS_p}, \quad (5)$$

که  $CFS_f$  و  $CFS_p$  به ترتیب درصد صحت پیش‌بینی طبقه‌ای بارش در پنج طبقه بیش از نرمال (بارش بیش از ۱۲۰ درصد نرمال)، نرمال تا بیش از نرمال (بارش بین ۹۰ تا ۱۱۰ درصد نرمال)، نرمال تا کمتر از نرمال (بارش بین ۸۰ تا ۹۰ درصد نرمال) و کمتر از نرمال (بارش کمتر از ۸۰ درصد نرمال) است. مقادیر  $CFSS = 1$  نشان‌دهنده پیش‌بینی دقیق است و مقادیر بیشتر از یک نشان می‌دهد که استفاده از پس‌پردازش آماری موجب بهبود پیش‌بینی‌ها شده است (بابائیان و دیگران، ۱۳۹۱).

علاوه بر شاخص یاد شده، شاخص‌های میانگین آریبی (Mean Bias Error) و میانگین خطای نسبی نیز در بررسی توانمندی روش پس‌پردازش مورد استفاده قرار گرفتند که از رابطه زیر محاسبه می‌شوند

$$MBE = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n O_i \right), \quad (6)$$

که  $M_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی و مشاهداتی‌اند. خطای نسبی پیش‌بینی‌ها از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$RE = \frac{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n O_i \right)}{\sum_{i=1}^n O_i}. \quad (7)$$

### ۳ یافته‌ها و بحث

همان‌طور که گفته شد، ابتدا از بین متغیرهای جدول ۱، متغیرهایی که دارای بیشترین همبستگی با بارش ماهانه هریک از ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی بودند

جو برقرار کرد و آن‌را برای ریزمقیاس‌نمایی فراسنج محلی مانند بارش، مورد استفاده قرار داد (لی، ۲۰۰۳).

برای بررسی توانمندی روش پس‌پردازش انتخاب شده از شاخص‌های ارزیابی (MSSS) Mean Square Skill (Score)، آریبی و خطای نسبی استفاده شد. شاخص MSSS دقت نسبی پیش‌بینی حاصل از مدل پس‌پردازش شده در مقایسه با مقادیر واقعی داده‌های مشاهداتی را محاسبه می‌کند. برای محاسبه این شاخص در ابتدا محاسبه خطای میانگین مربعات (Mean Square Error) داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی، لازم است. خطای میانگین مربعات برای داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MSE_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - X_i)^2, \quad (2)$$

$$MSE_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i)^2, \quad (3)$$

که  $f_i$  و  $X_i$  به ترتیب اُمین مقدار پیش‌بینی و اُمین مقدار مشاهداتی هستند.  $n$  تعداد داده‌ها را نشان می‌دهد.

برای به دست آوردن امتیاز مهارتی MSSS مقادیر  $RMSE_c$  و  $RMSE_f$  را به ترتیب از راه جذر گرفتن از مقادیر میانگین خطای مربعات پیش‌بینی و مشاهداتی به دست می‌آوریم و سپس مقدار MSSS را از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$MSSS = 1 - \frac{RMSE_f}{RMSE_c}. \quad (4)$$

از آنجا که در یک پیش‌بینی دقیق مقدار جذر میانگین مربعات خطای پیش‌بینی صفر خواهد شد، لذا مقدار MSSS در یک پیش‌بینی دقیق، ۱ می‌شود. مقدار  $MSSS = 0$  نشان می‌دهد که استفاده از برون‌داد مدل پیش‌بینی یا استفاده از مقادیر مشاهده شده اقلیمی تفاوتی با هم ندارند. مقادیر  $MSSS > 0$  نشان می‌دهد که دقت مدل پیش‌بینی در مقایسه با میانگین‌های اقلیمی موفق‌تر است (گنتی، ۲۰۰۷). از آنجا که راهبرد اساسی در پیش‌بینی



جدول ۲. متغیرهای ورودی معادلات پس‌پردازش مدل رگرسیونی چندمتغیره برای پس‌پردازش بارش ایستگاه مشهد براساس داده‌های دیدبانی و پیش‌بینی گذشته‌نگر در دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۷.

ماه	متغیرهای ورودی مدل آماری پس‌پردازش	MSSS	صحت پیش‌بینی طبقه‌ای (%)	میانگین آریبی (میلی‌متر)		میانگین خطا نسبی	
				قبل از پس‌پردازش	بعد از پس‌پردازش	قبل از پس‌پردازش	بعد از پس‌پردازش
ژانویه	WIO rain,Z2030, Z5060	۰/۸۹	۶۱/۱۱	۶۷/۱	۲/۲۹	۲/۰۷	۰/۰۷
فوریه	WIO SST, WIO RAIN, T850	۰/۳۵	۶۶/۶۷	۹۶/۳۲	۱۵/۱۸	۴/۳۲	۰/۶۸
مارس	Z5060, T2m, SST	۰/۳۷	۵۷/۵۳	۹۹/۸۱	۱۲/۰۵	۴/۸۲	۰/۵۸
آوریل	NINOWEST SST, WIO RAIN, WNP RAIN	۰/۱۱	۱۰۰	۱۴۷/۷۲	-۰/۸۹	۱۲۴/۸۳	-۰/۷۶
می	NINO3 SST, NINOWEST SST, WNP RAIN	-۴/۵۰	۴۴/۴۵	۱۲۴/۷۶	۳/۳۴	۱۰۵/۴۳	۲/۸۲
ژوئن	WIO RAIN, NINO3 SST, NINOWEST SST	-۰/۷۲	۶۶/۶۷	۱۰۰/۰۵	۰/۹۲	۸۴/۵۵	۰/۷۸
ژوئیه	Z3040, H500, SLP	-۷/۰۶	۵۴/۳۴	۹۹/۸۵	۳/۹۳	۸۴/۳۸	۳/۳۲
اوت	Tpr, H500, SLP	-۲/۸۸	۷۷/۷۷	۱۰۲/۵۵	۱/۳۳	۸۶/۶۶	۱/۱۲
سپتامبر	SAMOI RAIN, Z3040, Tpr	-۰/۲۶	۴۸/۴۴	۱۰۸/۰۸	۱/۴۷	۹۱/۳۳	۱/۲۴
اکتبر	WIO RAIN, SAMOI RAIN, MC RAIN	-۰/۰۹	۹۴/۴۴	۱۰۵/۸۶	۰/۰۴	۸۹/۴۶	۰/۰۳
نوامبر	DL RAIN, THMD, THTR	۰/۱۶	۵۰	۱۲۱/۱۵	-۴/۱۶	۲۲/۲۹	-۰/۷۶
دسامبر	NINOWEST SST, SAMOI RAIN, Z3040	-۰/۰۳	۸۳/۳۳	۱۱۵/۹۵	۰/۳۸	۹۷/۹۸	۰/۳۲
	میانگین		۶۷/۱	۱۰۷/۴۳	۲/۹۹	۶۶/۱۵	۰/۷۸

جدول ۳. شاخص‌های ارزیابی توانمندی روش پس‌پردازش در ارتقا توانمندی پیش‌بینی ماهانه مدل MRI-CGCM3.

شاخص صحت‌سنجی	خطای نسبی		MBE (میلی‌متر)		پیش‌بینی طبقه‌ای (درصد)	
	raw	post	raw	post	raw	post
مشهد	۶۶/۲۵	۰/۸	۱۰۷/۴۳	۲/۹۹	۲۵/۳	۵۷/۹
گلمکان	۱۵۶/۳	-۰/۲	۹۶/۵	-۷	۱۶/۳	۵۵/۱
قوچان	۱۵	۰/۱۸	۸۲/۷	-۵	۲۱/۵	۵۹/۴
سرخس	۷۴/۴	۰/۵	۹۷	-۴/۶	۳۸/۲	۶۶/۱
تربت حیدریه	۳۸/۵	۰/۲	۸۲/۹	-۱/۶	۲۵/۵	۶۶/۱
کاشمر	۳۵/۳	۰/۱	۹۷/۶	-۲/۱	۳۵/۲	۷۶/۱
سبزوار	۱۶۸/۲	۰/۵۸	۹۵/۳	-۴	۱۵/۱	۵۰/۱
استان	۷۹/۱	۰/۲	۹۴/۳	۳/۵	۲۵/۳	۶۲/۲

شکل ۲، برای نمونه، توانمندی مدل دینامیکی MRI-CGCM3 پس از اعمال فرایند ریزمقیاس‌نمایی در پیش‌بینی بارش ماهانه مشهد برای ماه‌های فوریه، می، اوت

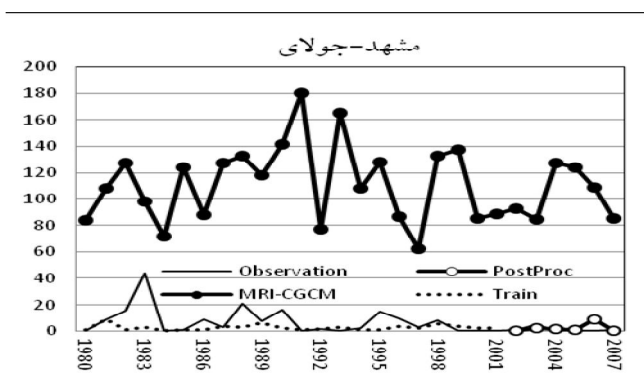
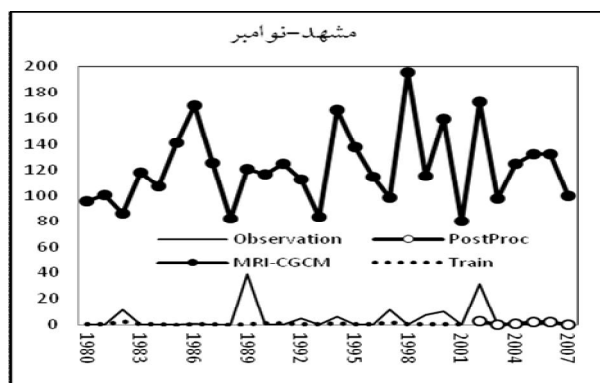
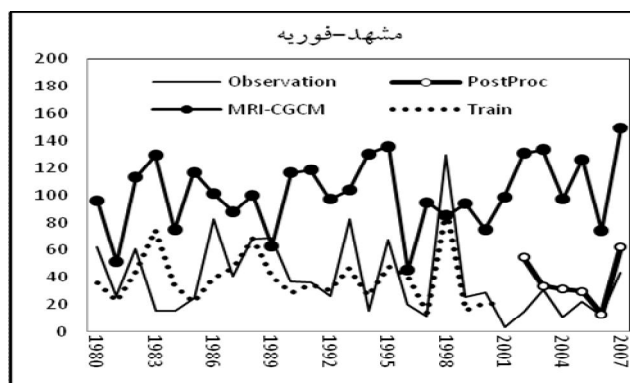
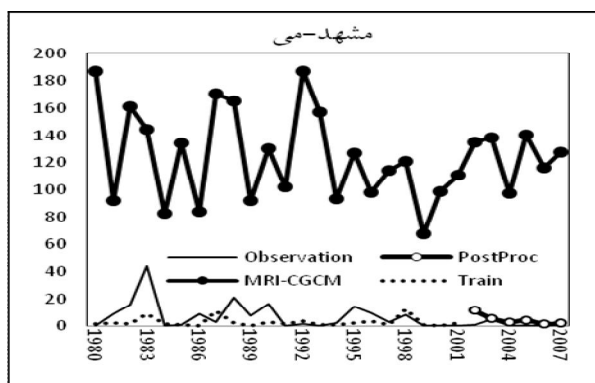
انتخاب شدند و در مدل پس‌پردازش آماری چندمتغیره خطی برای پس‌پردازش بارش شبکه‌ای برون‌داد مدل MRI-CGCM3 مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۲). در

نرمال، نرمال، نرمال تا بیشتر از نرمال و بیش از نرمال را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

از دیدگاه شاخص کمترین خطای مربعات (MSSS)، بهترین توانمندی مدل پس‌پردازش در ماه ژانویه با ۰.۸۹ مشاهده شد. هرچند مقدار عددی شاخص MSSS برای برخی ماه‌ها مطلوب نیست، اما بررسی توانمندی مدل با شاخص‌های دیگر قابل قبول است. شاخص پیش‌بینی طبقه‌ای بارش استان در پنج طبقه بیش از نرمال، نرمال تا بیشتر از نرمال، نرمال، نرمال تا کمتر از نرمال و کمتر از نرمال محاسبه شد که میانگین سالانه آن ۶۷.۴ درصد است. با اعمال فرایند پس‌پردازش ارزیابی و خطای نسبی پیش‌بینی استان به ترتیب از ۹۴/۳ میلی‌متر به ۳/۵ میلی‌متر و از ۱.۰/۷۹ به ۰/۲ کاهش یافت.

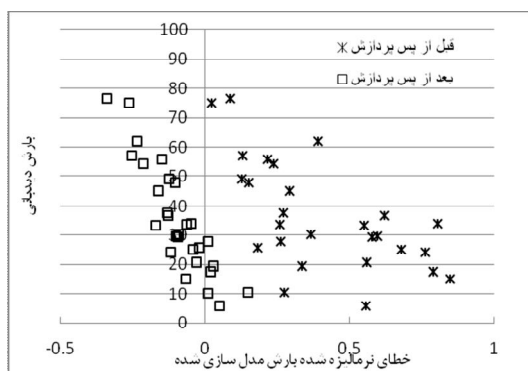
و نوامبر آورده شده است. برای پرهیز از طولانی شدن مطلب، از آوردن شکل‌های سایر ماه‌های سال مربوط به ایستگاه مشهد و شکل‌های مربوط به دیگر ایستگاه‌ها صرف‌نظر، و فقط نتایج نهایی آنها در این مقاله آورده شده است.

در جدول ۲ متغیرهای ورودی معادلات پس‌پردازش بارش، میانگین مربعات خطا، صحت پیش‌بینی طبقه‌ای بارش ماهانه و ارزیابی برای دو حالت قبل و بعد از فرایند پردازش آورده شده است. لازم به توضیح است که شاخص صحت پیش‌بینی طبقه‌ای بارش ماهانه، توانمندی مدل در پیش‌بینی کیفی بارش ماهانه در طبقات کیفی بارش شامل حالت‌های کمتر از نرمال، نرمال تا کمتر از



شکل ۲. توانمندی مدل پیش‌بینی فصلی MRI-CGCM3 در پیش‌بینی بارش ماهانه مشهد. دوره آموزش ۲۰۰۱-۱۹۸۱ و پیش‌بینی پس‌پردازش شده ۲۰۰۲-۲۰۰۷ در نظر گرفته شده است. محور قائم بارش برحسب میلی‌متر است.

داده‌های خام مدل MRI-CGCM3 دارای آریبیی تر بسیار زیاد در فصل تابستان است؛ به طوری که بارش ایستگاه مشهد که در این ایام از سال فاقد بارش قابل ملاحظه است را بیش از ۱۰۰ میلی‌متر پیش‌بینی کرده است که با اعمال فرایند پس‌پردازش این مقدار به کمتر از ۵ میلی‌متر کاهش یافته است که تطابق بسیار خوبی با مقادیر مشاهداتی ایستگاه دارد. بیشترین خطای مدل بعد از پس‌پردازش در ماه‌های مارس و آوریل رخ داده است که حاکی از ضعف مدل در آشکارسازی ارتباط بین بارش مشاهداتی و برون‌داد مدل در ماه‌های یاد شده است و امکان دارد ناشی از نبود امکان مدل‌سازی بارش‌های همرفتی فصل بهار با مدل MRI-CGCM3 باشد.



شکل ۳. توزیع خطای نرمال بارش پیش‌بینی شده ایستگاه مشهد قبل و بعد از اعمال پس‌پردازش.

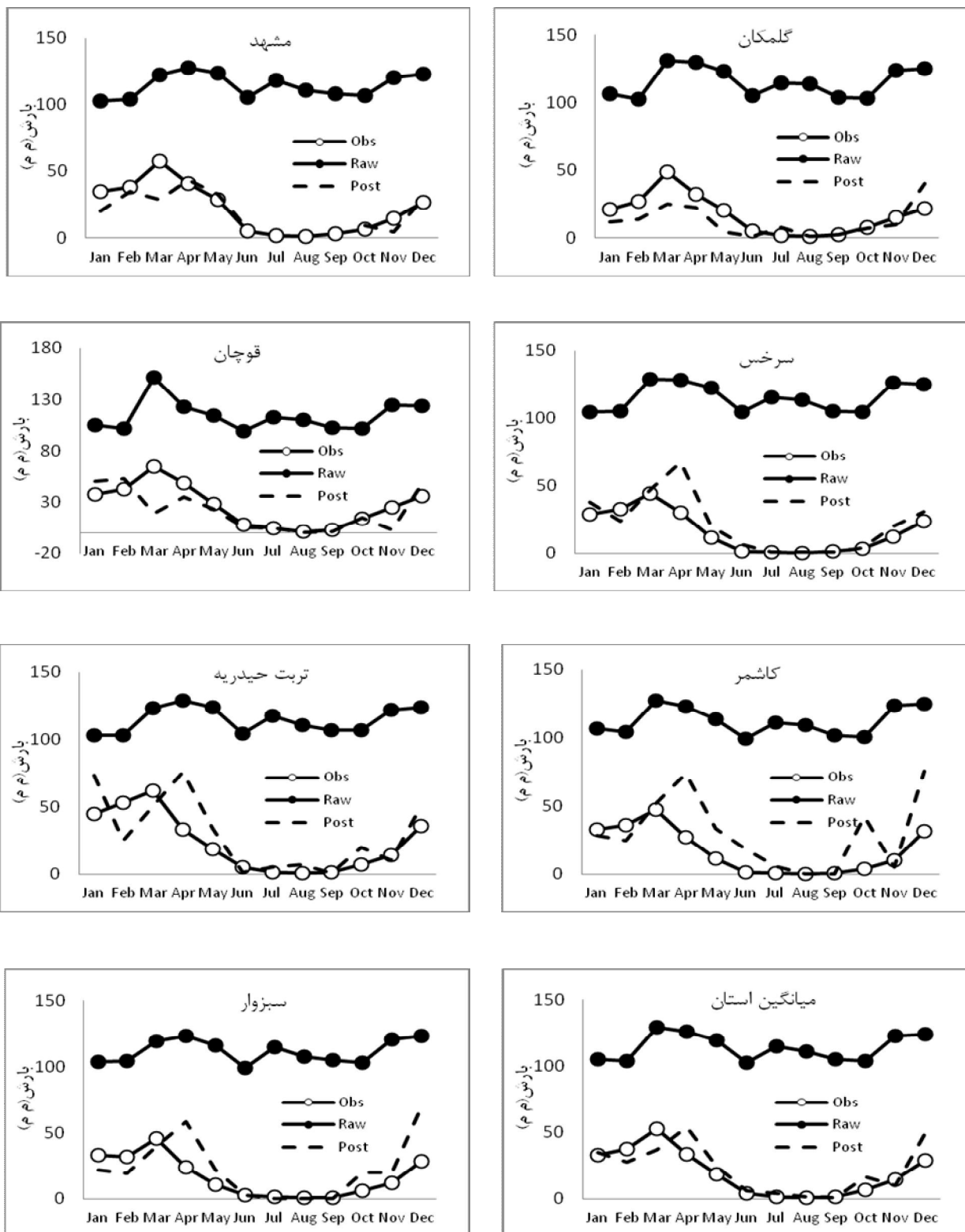
#### ۴ نتیجه‌گیری

بارش یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار و تعیین کننده در عملکرد بخش‌های اقتصادی نظیر کشاورزی، آب و مانند آن است، لذا پیش‌بینی آن از مهم‌ترین دغدغه‌های محققان و برنامه‌ریزان منطقه ای است. در حال حاضر، با توجه به شرایط موجود و فقدان دسترسی به داده‌های شرایط مرزی برای اجرای مدل‌های دینامیکی پیش‌بینی فصلی، بهترین روش برای افزایش صحت پیش‌بینی‌های فصلی روی کشورمان، استفاده از پس‌پردازش برون‌داد مدل‌های

با توجه به اینکه اغلب مراکز اقلیمی پیش‌بینی‌های خود را به صورت طبقه‌ای در طبقات نرمال، نرمال تا کمتر از نرمال و نرمال تا بیشتر از نرمال به دست می‌دهند، لذا توانمندی مدل از دیدگاه شاخص پیش‌بینی طبقه‌ای بارش نیز محاسبه شد که میانگین سالانه آن در ایستگاه‌های پیش‌گفته عبارت‌اند از: مشهد ۶۷/۱، گلکمان ۵۸/۵، قوچان ۶۷/۲، سرخس ۶۶/۱، تربت حیدریه ۷۰/۴، کاشمر ۷۶/۱. سبزوار ۶۶/۳ درصد. میانگین صحت پیش‌بینی طبقه‌ای استان ۶۷/۴ با احتساب طبقه‌بندی بارش‌ها در پنج طبقه گفته‌شده؛ در صورتی که تعداد طبقات پیش‌بینی از ۵ به ۳ کاهش یابد، در آن صورت صحت پیش‌بینی‌ها به ۷۳/۶ درصد افزایش می‌یابد. آریبیی و خطای نسبی پیش‌بینی‌های ماهانه هریک از ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، اعمال فرایند پس‌پردازش موجب بهبودی قابل ملاحظه‌ای در توانمندی پیش‌بینی مدل در ایستگاه‌های مورد بررسی شده است. ستون آخر جدول پیش‌گفته امتیاز مهارتی پیش‌بینی طبقه‌ای بارش را در ایستگاه‌های متفاوت استان خراسان رضوی نشان می‌دهد. بهترین امتیاز مهارتی مربوط به ایستگاه‌های سبزوار و گلکمان چنان‌با امتیاز ۰/۷ است.

در شکل ۳، خطای نرمال شده بارش پیش‌بینی شده برای حالت‌های قبل و بعد از پس‌پردازش نشان داده شده است. براساس نمودار ملاحظه می‌شود که خطای نرمال شده بارش قبل از پس‌پردازش آماری در نزدیک ۰/۵ انحراف معیار توزیع شده است؛ درحالی که بعد از اعمال فرایند پس‌پردازش میانگین آریبیی حدود صفر است که این حاکی از کاهش قابل ملاحظه‌ای در آریبیی تر بارش ماهانه است.

در شکل ۴ نمودارهای بارش‌های خام مدل (raw)، بارش پس‌پردازش شده (post) و مشاهداتی (obs) رسم شده است. نمودارهای شکل پیش‌گفته نشان می‌دهد که



شکل ۴. مقایسه بارش خام (raw)، پس پردازش شده (post) و دیدبانی (obs) در ایستگاههای مورد بررسی استان خراسان رضوی.

تحقیق همچنین نشان می‌دهد که استفاده از پس‌پردازش آماری برای پیش‌بینی فصلی بارش می‌تواند به‌نحو بسیار مطلوبی صحت پیش‌بینی‌های بارش ماهانه تا فصلی استان خراسان رضوی را ارتقا بخشد.

پیشنهاد می‌شود سازمان هواشناسی و نهادهای علمی و فناوری کشور با حمایت از طرح‌های پیش‌بینی عددی کوتاه‌مدت و فصلی، به‌ویژه با هدف دستیابی به مدل ملی پیش‌بینی کره‌ای، موجبات تهیه داده‌های شرایط مرزی موردنیاز مدل‌های منطقه‌ای را فراهم کند تا با اجرای فرایند تلفیقی پس‌پردازش دینامیکی آماری، صحت پیش‌بینی‌های فصلی کشور ارتقا یابد.

#### تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از نتایج فاز اول طرح «ایجاد سامانه جامع هشدار و پیش‌آگاهی خشکسالی» است که با حمایت مالی سازمان هواشناسی کشور در پژوهشکده اقلیم‌شناسی (مرکز ملی اقلیم‌شناسی) اجرا شده است. لذا نویسندگان لازم می‌دانند از حمایت‌های سازمان هواشناسی کشور تشکر و قدردانی کنند.

#### منابع

- آزادی م.، شیرغلامی م. ر. و حجام س.، ۱۳۸۹، پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای بارندگی در ایران: مقاله نامه چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۳-۲۱ اردیبهشت ۱۳۸۹، تهران، موسسه ژئوفیزیک، ۹۴-۹۱.
- آزادی م.، جعفری س.، میرزائی ا. و عربلی پ.، ۱۳۸۷، پس‌پردازش برون‌داد مدل میان‌مقیاس MMS برای دمای بیشینه و کمینه با استفاده از پالایه کالمن: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۴(۱)، ۶۱-۴۵.
- بابائیان، ا.، کریمیان، م.، مدیریان، ر.، محمدیان، آ.، خزانه داری، ل.، کوهی، م.، قندهاری، ش.، عباسی، ف. و

جهانی پیش‌بینی فصلی است. در این تحقیق پس از به‌کار بردن پس‌پردازش آماری روی برون‌داد مدل جهانی MRI-CGCM3، توانمندی روش پس‌پردازش در پیش‌بینی بارش به‌طور چشمگیری افزایش یافت؛ به‌نحوی که میانگین آریبی بارش مدل در استان پس از فرایند پس‌پردازش از ۹۴/۳ میلی‌متر به ۳/۵ میلی‌متر کاهش یافت. در این تحقیق مشخص شد که کمترین مربع خطاها در ماه‌های پربارش رخ می‌دهد و بیشترین ضعف مدل در پیش‌بینی بارش ماه‌های گرم سال است. همچنین در صورت حذف پیش‌بینی‌های ماه‌های گرم سال، توانمندی پیش‌بینی طبقه‌ای این مدل در سه طبقه نرمال، نرمال تا کمتر از نرمال و نرمال تا بیشتر از نرمال بیش از ۷۰ درصد است؛ اما در صورت افزایش طبقات پیش‌بینی بارش به پنج طبقه صحت آن به ۶۲/۲ درصد تنزل می‌یابد. در این تحقیق همچنین مشخص شد که علی‌رغم توانایی به‌نسبت ضعیف این روش در امتیاز مهارتی میانگین مربع خطاها، توانایی پیش‌بینی فصلی با به‌کارگیری سایر شاخص‌ها و امتیازات مهارتی در پیش‌بینی فصلی قابل‌قبول است و ممکن است در برخی موارد، شاخص‌های مورد استفاده در پیش‌بینی‌های عددی کوتاه‌مدت روزانه، در پیش‌بینی‌های فصلی، قابل استفاده نباشند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که مدل دینامیکی MRI-CGCM3، علی‌رغم آریبی بسیار زیاد آن در پیش‌بینی بارش روی ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی، می‌تواند رفتار بارشی ایستگاه‌های پیش‌گفته را به‌خوبی تبیین کند، تاجاییکه به‌کارگیری روش پس‌پردازش آماری به روش چندمتغیره می‌تواند رفتار بارش پیش‌بینی شده مدل را شناسایی و تبیین کند. مقایسه نتایج پیش‌بینی بارش فصلی در وب‌گاه سازمان هواشناسی ژاپن-مرکز اقلیم توکیو با نتایج بارش پس‌پردازش شده در تحقیق حاضر نشان از توانمندی مناسب روش به‌کار رفته در تحقیق حاضر برای پیش‌بینی فصلی استان خراسان رضوی است. نتایج این

- Goswami, P., and Mallick, S., 2010, Objective bias correction for improved skill in forecasting diurnal cycles of temperature over multiple locations: The summer case: *Journal of Weather and Forecasting*, **26**, 26-43.
- Hanssen-Bauer, I., Achberger, C., Benestad, R., Chen, D., and Førland, E., 2005, Empirical-statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia: a review: *Climate Research*, **29**, 255-268.
- Jia, X. J., Derome, J., and Lin, H., 2008, Improving seasonal forecast skill for the surface air temperature and the precipitation, Technical report, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, McGill University, Montréal, Québec, Canada, 62.
- Karori, M. A., and Zhang, P., 2008, Downscaling NCC-CGCM output for seasonal prediction over Islam abad -Pakistan: *Pakistan Journal of Meteorology*, **4**, 59-72.
- Lee, J. Y., 2003, Data and Model Description, Assessment of Potential Seasonal Predictability with a Multi-Model Dynamical-Statistical Ensemble System: Ph.D. thesis, Faculty of the Graduate School of the Seoul National University.
- Monashe, L. D., Nipen, T., Liu, Y., Roux, G., and Stull, R., 2011, Kalman Filter and Analog Schemes to Post-process Numerical Weather Predictions: *Monthly Weather Review*, **139**, 3554-3570.
- Muler, M. D., 2011, Effects of Model Resolution and Statistical Post-processing on Shelter Temperature and Wind Forecasts: *Journal of Applied Meteorology*, **50**, 1627-1636.
- Murphy, J., 1999, An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate: *Journal of Climate*, **12**, 2256-2284.
- Pezzi, L. P., and Kayano, M. T., 2008, An analysis of the seasonal precipitation forecasts in South America using wavelets: *International Journal of Climatology*, DOI:10.1002/joc
- Roulin, E., and Vannitsem S., 2011, Post-processing of ensemble precipitation predictions with extended logistic regression based on hindcasts: *Monthly Weather Review*, **140**, 874-888.
- Shimizukawa, J., Chen C. Y., and Iba, K., 2009, Multi-regression model for peak load forecast in demand side like university Campus: Presented at the International Conference on Electrical Engineering 2009.
- Zheng, X., and Renwick J. A., 2003, A regression-based scheme for seasonal صمدی، س.، ۱۳۹۱، گزارش نهایی طرح جامع هشدار و پیش‌آگاهی خشکسالی کشور، مجری پژوهشکده اقلیم‌شناسی، کارفرما: سازمان هواشناسی کشور، ۳۵۸.
- راستگو، ا. آزادی، م. و حجام، س.، ۱۳۸۹، پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF با استفاده از روش پالایه کالمن غیرخطی برای تندی باد در تراز ده متری و دمای هوا در تراز دو متری: *مجله پژوهش‌های اقلیمی*، (۱ و ۲)، ۹۳-۱۰۶.
- کریمیان، م.، بابائیان، ا. و مدیریان، ر.، ۱۳۹۱، پیش‌بینی فصلی بارش استان خراسان رضوی با استفاده از پس‌پردازش آماری مدل دینامیکی MRI-CGCM3: مقاله‌نامه کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، تیرماه ۱۳۹۱.
- یاراحمدی، د. و عزیزی، ق.، ۱۳۸۶، تحلیل چندمتغیره ارتباط میزان بارش فصلی ایران و شاخص‌های اقلیمی: *مجله پژوهش‌های جغرافیایی*، ۶۲، ۱۷۴-۱۶۱.
- Chen, D., and Li, X., 2004, Scale dependent relationship between maximum ice extent in the Baltic Sea and atmospheric circulation: *Global and Planetary Change*, **41**, 275-283
- Cui, B., Toth, Z., Zhu, Y., and Hou, D., 2011, Bias Correction for Global Ensemble Forecast: *Journal of Weather and Forecasting*, **27**, 396-410.
- Edwards, P. N., 2000b, A Brief History of Atmospheric General Circulation Modeling, in Heard, D. A., Randall, eds, In the General Circulation Model Development: Academic Press, 67-90.
- Fedderson, H., and Andersen, E., 2004, A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions: *Tellus*, March 2004, 1-10.
- Finnis, J., Hsieh, W. W., Lin, H., and Merryfield, W., 2011, Nonlinear post-processing of numerical seasonal climate forecasts: *Journal of Atmosphere-Ocean*, **26**, 1-34.
- Giorgi, F., Hewitson, B., Christensen, J., Hulme, M., Von Storch, H., Whetton, P., Jones, R., Mearns, L., and Fu, C., 2001, Regional climate simulation, evaluation and projections, in Heard, J. T., Houghton, Eds., *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, 944.

method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods: *Journal of Climate*, **12**, 2474-2489.

forecasting of New Zealand temperature: *Journal of Climate*, **16**, 1843-1853.  
Zorita, E., and Storch, V., 1998, The Analog