

## پس‌پردازش آماری برون‌داد بارش الگوی RegCM4 روی شمال غرب ایران

نوذر قهرمان\* - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

ایمان بابائیان- استادیار گروه پژوهشی تغییر اقلیم پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد

مجید آزادی- دانشیار پژوهشکده هواشناسی و علوم جو

صدیقه لوک‌زاده- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۸ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۲/۱۶

### چکیده

این پژوهش به منظور تعیین روش برتر پس‌پردازش آماری بر بارش حاصل از اجرای الگوی RegCM4 در شمال غرب انجام گرفت. داده‌های مورد نیاز اجرای الگوی RegCM4 شامل داده‌های بازتحلیل وضع جوی (NNRP1)، داده‌های دمای سطح دریا (SST) و داده‌های سطح زمین (SURFACE) از مرکز ICTP دریافت شد. به منظور اجرای این الگو، آزمون تعیین طرحواره همرفت و جداسازی افقی مناسب انجام گرفت که با استناد به آن، طرحواره Kuo به نسبت دو طرحواره Grell و Emanuel خطای کمتری را در اجرای الگو سازی بارش منطقه داشت. جداسازی افقی نیز سی کیلومتر انتخاب شد. پس از اجرای الگو، برون‌داد بارش با استفاده از روش‌های شبکه پرسپترون چندلایه (MLP) و میانگین متحرک (MA) پس‌پردازش شد. براساس نتایج، اعمال پس‌پردازش روی داده‌های بارش خام سالانه الگو، موجب کاهش میانگین اریبی خطای داده‌های به دست آمده و رسیدن به رقم ۸/۹ میلی‌متر شد؛ در حالی که این آماره برای برون‌داد خام سالانه الگو ۱۲۴/۳ میلی‌متر بود. در مقیاس‌های زمانی فصلی و ماهانه نیز میانگین اریبی خطای بارش شبیه‌سازی به ترتیب برابر ۳۱/۱ و ۱۰/۴ میلی‌متر بود که پس از اعمال پس‌پردازش به روش‌های یادشده، این آماره به ترتیب به ۰/۳- و صفر میلی‌متر رسیده است. روش برتر پس‌پردازش نیز در تمام مقاطع زمانی، MA بوده است.

کلیدواژه‌ها: پس‌پردازش، ریزگردانی دینامیکی، شبکه عصبی مصنوعی، طرحواره‌های بارش همرفت، میانگین متحرک وزنی.

### مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در کاربرد الگوهای گردش عمومی جو (GCM) برای ارزیابی اثرهای منطقه‌ای، جداسازی مکانی پایین آنهاست که لازم است با استفاده از الگوهای دینامیکی یا آماری ریزگردانی شود. در عین حال، با توجه به وجود خطای نظام‌مند در برون‌داد این الگوها، اعمال پس‌پردازش ضروری است. فرانسیسکو (۲۰۰۳) با اجرای الگوی RegCM بر روی فیلیپین، سامانه پیش‌آگاهی سیل را در این کشور ایجاد کرد؛ به این ترتیب که داده‌های خروجی RegCM به مثابه داده‌های اولیه به یک الگوی هیدرولوژی وارد شد. افضل و حسین (۲۰۰۶) بارش مونسون سال ۱۹۹۲

پاکستان را با الگوی RegCM3 شبیه‌سازی کردند. براساس نتایج، مجموع بارش شبیه‌سازی‌شده، ۵۱ درصد بیشتر از داده‌های CRU و ۷۱ درصد بیشتر از داده‌های مشاهداتی بود؛ اما الگوی بارش روی منطقه با الگوی واقعی همخوانی داشت. الگوئندی و جورجی (۲۰۰۶) شبیه‌سازی‌هایی را با استفاده از الگوی RegCM4 برای دوره ۱۹۴۸-۱۹۹۰ به منظور بررسی واکنش سطح دریای خزر به تغییرات اقلیمی انجام دادند. آنها تغییرات ارتفاع سطح دریای خزر را با استفاده از معادله ساده هیدرولوژی پیش‌بینی کردند. در این پژوهش مشخص شد که الگو تغییرات مشاهده سطح دریای خزر با مقادیر الگوشده را به خوبی شبیه‌سازی کرده است؛ به طوری که همبستگی بین دو مقدار یادشده، ۰/۹۱ به دست آمد. بابائیان و همکاران (۱۳۸۶) به حساسیت‌سنجی الگوی RegCM3 نسبت به طرحواره‌های مختلف بارش همرفت ماه‌های سرد سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۷۹ روی ایران پرداختند. براساس نتایج پژوهش آنها، بارش شبیه‌سازی‌شده با طرحواره کو، برای جنوب شرق، شمال شرق، جنوب غرب و شمال غرب ایران و جنوب غرب خزر، با طرحواره امانوئل برای مرکز و غرب ایران و با طرحواره گرل برای شمال غرب ایران کمترین خطا را در برخواهد داشت. پال و همکاران (۲۰۰۷) توانمندی الگوی اقلیمی RegCM را در شبیه‌سازی بارش و دما در دو منطقه هندوستان و آمریکای جنوبی (آمازون) که دارای بارش‌های سنگین مونسونی است، بررسی کردند. آنها دریافتند که به کارگیری طرحواره گرل در منطقه آمریکای جنوبی موجب اریبی خشک (منفی) بارش به مقدار ده درصد در مقایسه با داده‌های CMAP می‌شود. در شبه‌جزیره هندوستان، با اینکه بیشتر الگوهای گردش عمومی جو، الگوهای بارش این منطقه را به خوبی الگوسازی نکردند، الگوی RegCM، نواحی با بارش بیشینه را در این ناحیه الگوسازی کرد. اسلام و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی با استفاده از الگوی اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM3 به شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در بنگلادش پرداختند. براساس نتایج شبیه‌سازی بارندگی فصلی، طرحواره گرل FC بارش دوره پیش‌مونسون را بیش از مقادیر واقعی و دوره مونسون را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است؛ در حالی که طرحواره گرل AS، شبیه‌سازی مناسبی نداشته است. شمیدلی و همکاران (۲۰۰۷) برای ریزگردانی بارش روزانه، شش الگوی ریزگردانی آماری (SDM) را با سه الگوی اقلیمی منطقه‌ای (RCM) در منطقه‌ای با توپوگرافی پیچیده مقایسه کردند. براساس نتایج این مقایسه، در فصل زمستان و در توپوگرافی‌های پیچیده، الگوهای RCM به‌طور معناداری نسبت به SDM عملکرد بهتری داشتند؛ در فصل تابستان، بر روی نقاط مسطح اختلاف‌ها کمتر بود. در تابستان، به‌طور کلی بین RCMها اختلاف کمتر بود؛ اما بین SDMها و بین RCMها و SDMها اختلاف شدید بود. میکسوسکی و همکاران (۲۰۱۰) روش‌های آماری را برای پس‌پردازش برون‌داد RCM به کار بردند. براساس نتایج این پژوهش، مقادیر حدی نه‌تنها با الگوهای اصلاحی ساده بلکه با روش‌های پیچیده نیز بهبودیافتنی نبود. زانگ و وانگ (۲۰۱۱) به ارزیابی و تحلیل الگوی RegCM3 در شبیه‌سازی بارش تابستانه در حوضه رودخانه هوآی‌هه در چین پرداختند. مقایسه مقدار و توزیع بارش با مقادیر مشاهداتی نشان داد که RegCM3، الگوی بارش و تغییرات سالانه آن را شبیه‌سازی می‌کند؛ اما شبیه‌سازی الگو برای تابستان ۲۰۰۳ برای توزیع مکانی بارش مناسب نبود و مقدار بارش را اندک‌تر برآورد کرد. برونینت و همکاران (۲۰۱۱) توانایی الگوی RegCM را برای شبیه‌سازی بارش فصلی در مولداوی ارزیابی کردند؛ برون‌داد الگو با داده‌های CRU TS2.1 و داده‌های مشاهداتی ایستگاهی مقایسه شد. براساس نتایج، این الگو به‌طور نظام‌مندی مجموع بارش سالانه را بیش از مقادیر مشاهداتی و

داده‌های CRU شبیه‌سازی کرد. پیت (۲۰۱۱) بارش ماهانه در غرب آفریقا را با یک الگوی اقلیمی منطقه‌ای شبیه‌سازی و با بارش دیدبانی مقایسه کرد؛ نتیجه حاکی از پیش‌بینی اندک‌تر الگو و عدم دستیابی به برخی جزئیات چرخه فصلی بارش در جنوب منطقه صحرا<sup>۱</sup> در آفریقای غربی بود. او از الگوی آماری (همبستگی خطی چندگانه) به منظور تعدیل داده‌های شبیه‌سازی به ویژگی بارش مشاهداتی، با کمک متغیرهای شبیه‌سازی شده سطحی مانند دما، فشار سطح دریا و مؤلفه‌های باد استفاده کرد. نتایج، بهبود اساسی در ناکارایی الگوی اقلیم منطقه‌ای را نشان داد. ناندوزی و همکاران (۲۰۱۲) الگوی PRECIS را برای شبیه‌سازی بارش و دمای اوگاندا به کار بردند. براساس نتایج پژوهش آنها، این الگو سیگنال‌های جریان‌های بزرگ‌مقیاس که بارش و دما را در اوگاندا تحت تأثیر قرار می‌دهند، تا حد مناسبی به دست گرفت و شبیه‌سازی بارش و دما با آن، نسبت به GCMs بهبود یافت. ادنی (۲۰۱۳) در پژوهشی در غرب آفریقا با عنوان «حساسیت‌سنجی طرحواره‌های مختلف همرفتی» الگوی RegCM4 را به منظور شبیه‌سازی بارش استفاده کرد. نتایج پژوهش وی بیان‌کننده این است که تمام طرحواره‌های همرفتی از نوعی اریبی برخوردارند. طرحواره کو و گرل، بارش کمتری را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی کرد؛ در حالی که بارش تخمین زده شده به وسیله طرحواره امانوئل برای سپتامبر ۱۹۸۹ و ۱۹۹۸ بیشتر از مقدار مشاهداتی بود. فرانکو و کوپولا (۲۰۱۳) دما و بارش شبیه‌سازی با الگوی RegCM4 را ارزیابی کردند. نتایج بررسی‌های آنها حاکی از برآورد بیشتر بارش به وسیله الگو در مناطق کوهستانی بود. تورکو و همکاران (۲۰۱۳)، برون‌داد بارش الگوی COSMO-CLM را با چندین روش آماری پس‌پردازش کردند و به این نتیجه رسیدند که تمام روش‌ها موجب بهبود برون‌داد الگو می‌شود. بیشتر نتایج پژوهش‌های یادشده، حاکی از بیش‌برآوردی بارش با طرحواره‌های مختلف در الگوی RegCM و دیگر الگوهای منطقه‌ای بوده و اعمال پس‌پردازش موجب بهبود نتایج شده است. آنچه در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود، ریزگردانی با استفاده از الگوی RegCM4 است که به منظور افزایش صحت برون‌داد بارش، فرایند پس‌پردازش آماری انجام می‌گیرد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در حوزه جغرافیایی خاورمیانه- آسیای شرقی در کشور ایران بر روی استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و اردبیل انجام گرفته است؛ این استان‌ها در مجموع، با وسعتی بیش از ۱۰۰ هزار و ۵۰۲ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران، ۶/۱ درصد از مساحت کشور را به خود اختصاص داده‌اند. در این پژوهش، با توجه به دوره آماری و آمار در دسترس داده‌های هواشناسی، بررسی‌ها بر روی چهار ایستگاه همدیدی سازمان هواشناسی در استان‌های یادشده شامل تبریز، ارومیه، خوی و اردبیل انجام گرفت. داده‌های لازم در اجرای الگوی منطقه‌ای اقلیمی RegCM4 از مرکز ICTP<sup>۲</sup> دریافت شد که شامل سه دسته داده‌های بازتحلیل وضع جوی NNRPI در مقیاس روزانه (شش‌ساعته) با جداسازی افقی ۲/۵ درجه از پایگاه داده‌های بازتحلیل مرکز ملی پیش‌بینی محیطی آمریکا<sup>۳</sup>، داده‌های دمای سطح دریا (SST) با

1. Sub-Saharan  
2. International Centre for Theoretical Physics  
3. NCEP/NCAR

شبکه‌بندی یک درجه از نوع OISST از سازمان ملی اقیانوس و جو آمریکا<sup>۱</sup> و داده‌های سطح زمین (SURFACE) که خود شامل سه نوع داده‌های توپوگرافی (GTOPO)، داده‌های پوشش گیاهی یا کاربری اراضی (GLCC) و داده‌های نوع خاک (GLZB) با دقت سی ثانیه از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا<sup>۲</sup> بود. دو دسته اول داده‌ها (NNRP1, SST) برای دوره زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۱ دریافت شد. گروه دیگر از داده‌ها شامل مقادیر کمیت بارش دیده‌بانی به‌منظور بررسی توانمندی الگوی اقلیمی منطقه‌ای و اعمال پس‌پردازش در ایستگاه‌های سینوپتیک پیش‌گفته بود که از سازمان هواشناسی کشور (IRIMO) دریافت شد. توضیح این نکته ضروری است که برون‌داد بارش الگو، مجموع بارش بزرگ‌مقیاس و همرفت است؛ اما از آنجا که بارش بزرگ‌مقیاس حاصل اندرکنش سامانه‌های بزرگ‌مقیاس است و کمتر متأثر از عوارض سطحی و عوامل هواشناسی سطوح زیرین جو است، در الگوسازی‌های هواشناسی به‌ویژه الگوهای منطقه‌ای بیشتر به طرحواره‌های مختلف بارش همرفت پرداخته می‌شود. بنابراین، به‌منظور تعیین طرحواره مناسب همرفت، سالی با بارش معمولی در بین دوره شبیه‌سازی (۲۰۰۹) انتخاب و الگو با طرحواره‌های مختلف همرفت، در این سال اجرا شد. برای این منظور، با تهیه فایل اسکریپت متنی<sup>۳</sup> که خلاصه‌ای از آن در جدول ۱ ارائه شده است، اطلاعات اجرایی الگو از جمله فاصله نقاط شبکه برحسب کیلومتر، طول و عرض جغرافیایی مرکز الگو و محدوده انتخابی الگو برحسب درجه، تاریخ شروع و پایان شبیه‌سازی، نوع داده‌های ورودی و داده‌های بازتحلیل، گام زمانی الگو و نوع طرحواره‌های اجرایی ویرایش شد.

جدول ۱. خلاصه اسکریپت متنی (Namelist) اجرای الگوی RegCM4

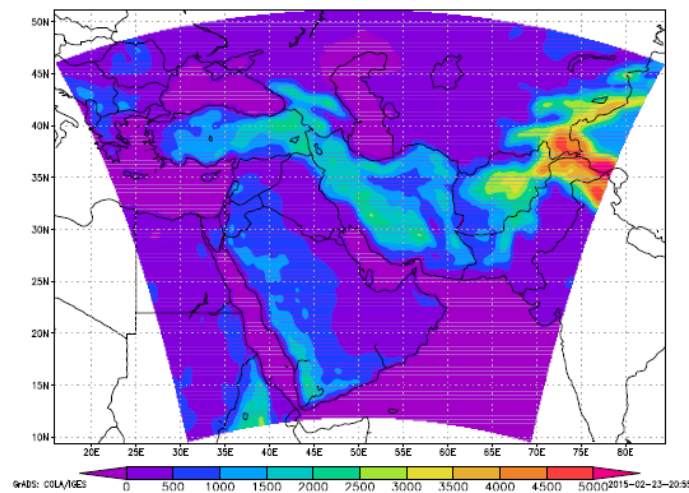
	iy=۱۵۲
dimparam	jx=۱۶۸
	kz=۱۸
	iproj=LAMCON
	ds=۳۰
geoparam	clat=۳۰/۵
	clon=۵۰
	ssttyp=OI_WK
	dattyp=NNRP1
globdatparam	globidate1=۲۰۰۸۱۲۱۷۰۰
	globidate2=۲۰۰۹۱۲۳۱۰۰
	domname = shomalqarb
terrainparam	lakedpth = true
	radfrq=۳۰
	abemh=۱۸
timeparam	abatm=۳۰۰
	dt=۱۰۰

1. National Oceanic and Atmospheric Administration
2. United States Geological Survey
3. Namelist

بنابراین، در اجرای اولیه، الگو به مدت یک سال از تاریخ ۱۷ دسامبر ۲۰۰۸ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۰۹، با زمان پایدارسازی<sup>۱</sup> پانزده روزه و با جداسازی های ۲۰، ۳۰ و ۹۰ و سپس با لانه گزینی جداسازی سی کیلومتر در خروجی های حاصل از جداسازی نود کیلومتر به صورت جداگانه با هر سه طرحواره گزل، کو و امانوئل موجود در کد RegCM4.1.1 (در مجموع دوازده اجرای جداگانه) با شرایط یکسان از داده های مرزی و اولیه به اجرا گذاشته شد. خلاصه نتایج مقایسه بارش ماهانه شبیه سازی با الگوی RegCM4 در سال ۲۰۰۹ با جداسازی افقی و طرحواره های مختلف همرفت و بارش مشاهداتی ۳۶ ایستگاه سینوپتیک شمال غرب ایران به وسیله آماره های میانگین اریبی خطا و میانگین خطای نسبی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. خلاصه نتایج اجرای آزمایشی الگوی RegCM4 در سال ۲۰۰۹ با جداسازی افقی و طرحواره های مختلف همرفت

جداسازی افقی (کیلومتر)	طرحواره	میانگین اریبی (میلی متر)	میانگین خطای نسبی (درصد)
۲۰	امانوئل	۳۵/۷	۱۷۳/۷
	گزل	۱۵/۲	۷۰/۸
	کو	۴۰/۴	۱۷۳/۸
۳۰	امانوئل	۲۴/۹	۱۰۴/۶
	گزل	۲۳/۹	۹۴/۱
	کو	۱۶/۹	۵۹/۵
۳۰ آزمایش شده در اجرای ۹۰	امانوئل	۴۳/۷	۲۵۲/۵
	گزل	۲۵/۴	۱۵۴/۷
	کو	۲۹/۴	۱۴۸/۲



شکل ۱. محدوده اجرای الگوی RegCM4

بر این اساس، طرحواره کو و جداسازی مکانی سی کیلومتر با کمترین خطا در مقایسه با مقدار بارش مشاهداتی برای اجرای اصلی انتخاب شد. همچنین، تعداد نقاط شبکه ۱۵۲ در عرض (iy) و ۱۶۸ در طول جغرافیایی (jx) و دوره آماری ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۱ در نظر گرفته شد. مرکز محدوده جغرافیایی اجرا شده در دوره مذکور در ۳۰/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ درجه طول شرقی قرار گرفت. شکل ۱ محدوده اجرای الگو را نشان می‌دهد. برون داد الگو شامل داده‌های اتمسفری (ATM)، پوشش سطحی (SRF) و تابشی (RAD) است که هر کدام حاوی تعداد زیادی از متغیرهای هواشناسی است که از بین آنها به جز بارندگی حاصل از الگوی tpr، نه متغیر که بیشترین تأثیر را بر فرایند شکل‌گیری متغیر پیش‌بینی‌شونده (بارش) دارند، شامل omega1000، omega500، au1000، au500، v1000، v500، ps، t2m و q2m استخراج شد.

برای پس‌پردازش برون‌داد الگو، از روش میانگین متحرک (MA)<sup>۱</sup> و روش شبکه عصبی مصنوعی (MLP)<sup>۲</sup> استفاده شد. در روش MA که از شاخص درجه موازنه جرم (DBM)<sup>۳</sup> استفاده می‌شود، تعیین مناسب‌ترین دوره زمانی گذشته (طول پنجره) با اهمیت است. این شاخص براساس رابطه ۱ و مقادیر بارش اصلاحی، با رابطه ۲ (مک‌کالر و استول، ۲۰۰۸) محاسبه می‌شود.

$$DMB_n = \frac{\sum_{k=1}^n X_k^p}{\sum_{k=1}^n X_k^o} \quad (1)$$

$$QPF = \frac{DMO}{DMB_n} \quad (2)$$

$DMB_n$  شاخص درجه موازنه جرم با طول پنجره  $n$ ؛  $\sum_{k=1}^n X_k^p$  مجموع بارش الگو با طول زمان  $n$  و  $\sum_{k=1}^n X_k^o$

مجموع بارش مشاهداتی در همان زمان است. <sup>۴</sup>  $QPF$  مقدار بارش تصحیح‌شده الگو و <sup>۵</sup>  $DMO$  برون‌داد مستقیم الگوست. بنابراین، در هر مقطع زمانی به‌طور جداگانه، مناسب‌ترین طول پنجره (دوره زمانی گذشته) از نظر کمتر بودن میانگین اریبی مقادیر پس‌پردازش شده انتخاب شد. خلاصه نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. از آنجاکه در این پژوهش، مبنای انتخاب دوره‌های واسنجی و راستی‌آزمایی، تقسیم داده‌ها به‌صورت هشتاد و بیست درصد بوده است، داده‌ها به‌صورت انتخابی و نه تصادفی انتخاب شد.

برای ساختن شبکه عصبی مصنوعی نیز بر همین اساس سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۵ برای آموزش و ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ برای آزمایش الگو در نظر گرفته شد. شبکه عصبی مصنوعی استفاده‌شده، پرسپترون چندلایه بود. شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، در زمره کاربردی‌ترین شبکه‌های عصبی‌اند. این شبکه‌ها با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی، نگاهت غیرخطی‌ای را متناسب با تابع هدف تعریفی انجام می‌دهند. در این شبکه‌ها، هر نورون در هر لایه، به

1. Moving Average
2. Multi-Layer Perceptron
3. Degree of Mass Balance
4. Quantitative Precipitation Forecast
5. Direct Model Output



به منظور بررسی دقت و برآورد مقدار خطای پیش‌بینی در مقایسه با بارش دیدبانی، از شاخص‌های آماری میانگین خطای اریبی<sup>۱</sup>، میانگین خطای نسبی<sup>۲</sup>، میانگین خطای مطلق<sup>۳</sup> و ضریب همبستگی (رابطه‌های ۳ تا ۷) استفاده شد (والاچ و همکاران، ۲۰۰۶)؛ اما با توجه به اینکه هدف از الگوهای اقلیمی، اطلاع از شرایط کلی بارش است، آنچه در این پژوهش ملاک مقایسه روش‌ها برای تعیین کاراترین قرار گرفت، شاخص آماری میانگین اریبی خطا بود.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i), \quad (3)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(p_i - o_i)}{o_i}, \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - o_i|, \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}, \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})]}{\left[ \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \right]^{0.5}}, \quad (7)$$

در این رابطه‌ها،  $o_i$  بارش مشاهداتی؛  $p_i$  بارش الگو و  $n$  تعداد داده‌هاست.

## یافته‌های پژوهش

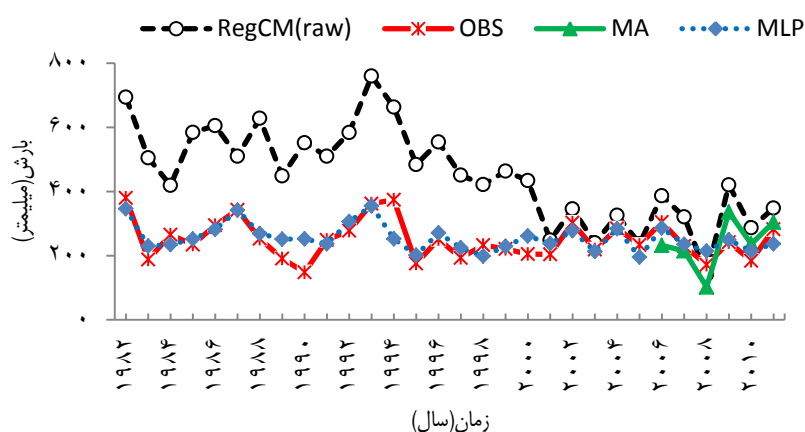
همان‌طور که گفته شد، پس از اجرای الگوی RegCM4، به غیر از متغیر بارش، نه متغیر از میان متغیرهای مختلف که بیشترین تأثیر را بر فرایند شکل‌گیری بارش داشتند، با نوشتن اسکریپت در نرم‌افزار GrADS به صورت ماهانه استخراج شد و در الگوهای پس‌پردازش بارش، از آنها استفاده شد. مقاطع زمانی بررسی‌شده برای این منظور، ماهانه، فصلی و سالانه بود. گفتنی است هشتاد درصد داده‌ها در هر مقطع زمانی برای آموزش و بیست درصد برای راستی‌آزمایی این الگو به کار رفت. شکل‌های ۲ تا ۴ کارایی الگوی RegCM4 را پیش و پس از پس‌پردازش در پیش‌بینی بارش سالانه، فصلی و ماهانه تبریز (برای نمونه) نمایش می‌دهد. نکته شایان توجه، هماهنگی افت‌وخیزهای برون‌داد خام الگوی RegCM4 با داده‌های مشاهداتی در بیشتر سال‌ها و فصل‌ها (به جز ماه‌های گرم سال) است.

در جدول‌های ۵ تا ۷، مقادیر سنجه‌های استفاده‌شده برای راستی‌آزمایی الگوی RegCM4 در مقایسه با داده‌های

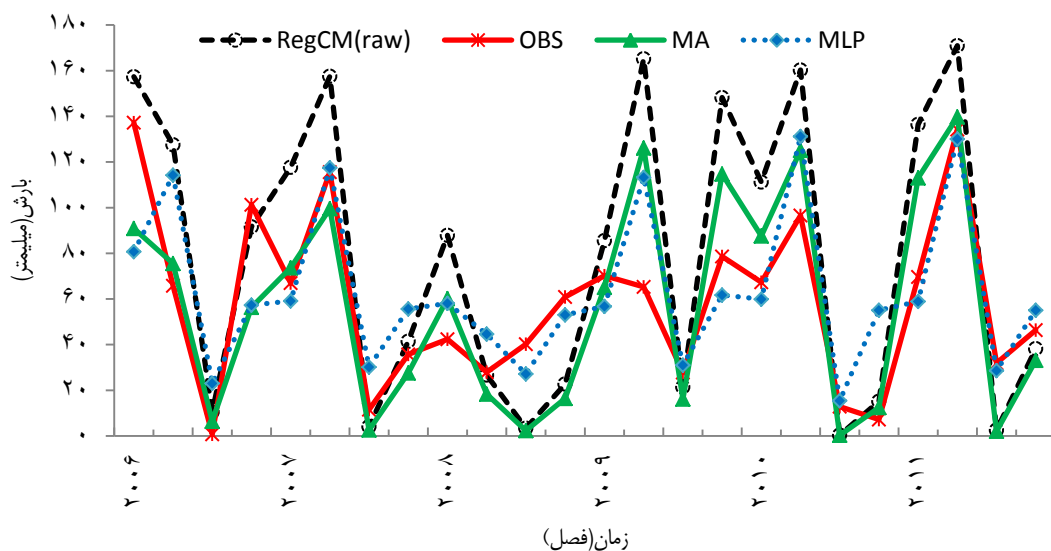
1. Mean Bias Error  
2. Mean Relative Error  
3. Mean Absolute Error



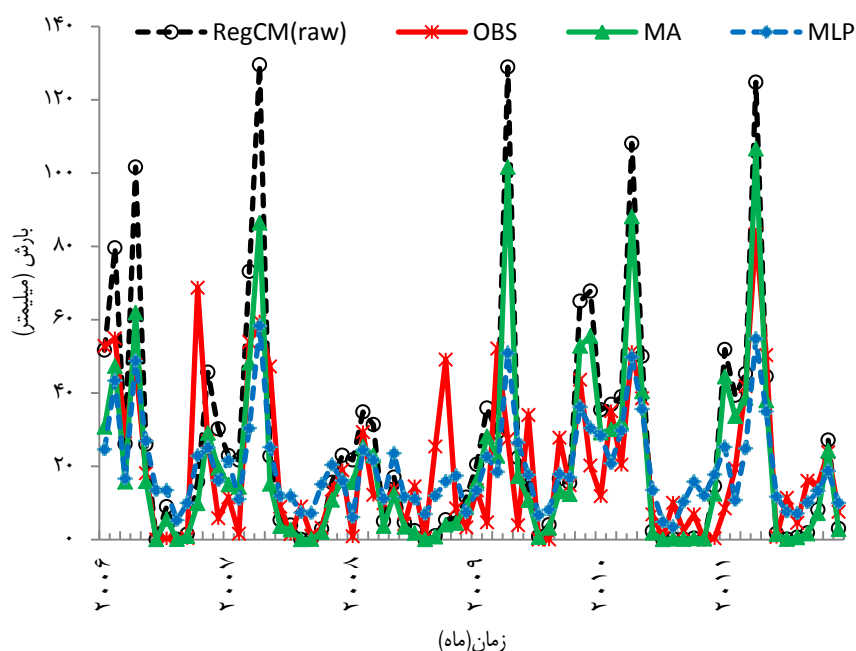
دیدبانی، پیش و پس از فرایند پس‌پردازش برای همه ایستگاه‌ها و مقاطع زمانی ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود از دیدگاه شاخص میانگین اریبی و خطای نسبی اعمال پس‌پردازش بر روی بارش سالانه تبریز، به کاهش این دو سنجه به ترتیب از ۸۱/۶۴ میلی‌متر و ۳۴/۶۴ درصد به ۲/۰۱ میلی‌متر و ۰/۸۵ درصد با روش MA در مقایسه با برون‌داد خام الگو منجر شد.



شکل ۲. نمودار الگوسازی بارش سالانه ایستگاه تبریز با استفاده از الگوی منطقه‌ای RegCM4 و اعمال پس‌پردازش در دوره واسنجی و راستی آزمایشی



شکل ۳. نمودار الگوسازی بارش فصلی ایستگاه تبریز با استفاده از الگوی منطقه‌ای RegCM4 و اعمال پس‌پردازش در دوره واسنجی و راستی آزمایشی. ترتیب فصل‌ها روی محور افقی، زمستان، بهار، تابستان و پاییز است.



شکل ۴. نمودار الگوسازی بارش ماهانه ایستگاه تبریز با استفاده از الگوی منطقه‌ای RegCM4 و اعمال پس‌پردازش در دوره استی‌آزمایی. ترتیب ماه‌ها روی محور افقی، از ژانویه تا دسامبر است.

با اعمال پس‌پردازش آماری MA بر روی بارش شبیه‌سازی‌شده سالانه در ایستگاه اردبیل نیز  $375/02$  میلی‌متر اریبی و  $167/46$  درصد خطای نسبی به ترتیب به  $0/7$  میلی‌متر و  $-0/31$  درصد تقلیل یافت. اعمال پس‌پردازش MA در ایستگاه خوی در همین مقطع زمانی نیز سبب بهبود برونداد الگوی دینامیکی شد؛ به طوری که اریبی از  $89/32$  به  $7/07$  میلی‌متر و خطای نسبی از  $32/24$  به  $2/63$  درصد کاهش یافت. در ایستگاه ارومیه، روش MLP آماره‌های میانگین اریبی و درصد خطای نسبی را به ترتیب از  $48/84$  میلی‌متر به  $27/1$  میلی‌متر و  $14/68$  درصد به  $8/15$  درصد بهبود بخشید. روش MA نیز همین مقادیر را با بیش‌برآوردی به دست داد.

براساس جدول ۶ اعمال پس‌پردازش بر روی بارش فصلی تبریز، به کاهش میانگین اریبی از  $20/41$  میلی‌متر به  $2/03$  با روش MA در مقایسه با برونداد خام الگو منجر شد. با اعمال پس‌پردازش آماری MA بر روی بارش شبیه‌سازی‌شده فصلی در ایستگاه اردبیل نیز  $93/76$  میلی‌متر اریبی به  $0/38$  میلی‌متر تقلیل یافت. اعمال پس‌پردازش به روش MLP در ایستگاه خوی در همین مقطع زمانی نیز سبب بهبود برونداد الگوی دینامیکی شد؛ به طوری که اریبی از  $22/33$  به  $1/63$  میلی‌متر کاهش یافت. اما در ایستگاه ارومیه، نتیجه اعمال پس‌پردازش با روش MLP رضایت‌بخش نبود؛ به طوری که برونداد خام الگوی دینامیکی به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌تر بود. اما روش MA آماره‌های میانگین اریبی را از  $12/21$  میلی‌متر به  $1/2$  میلی‌متر بهبود بخشید.

جدول ۵. سنجه های آماری پس پردازش بارش سالانه شبیه سازی شده با الگوی RegCM4 در دوره راستی آزمایی (۲۰۰۶-۲۰۱۱)

ایستگاه سینوپتیک	الگوها	میانگین اریبی (میلی متر)	میانگین خطای نسبی (درصد)	ریشه میانگین مربعات خطا (میلی متر)	میانگین خطای مطلق (میلی متر)	ضریب همبستگی با دیدبانی
تبریز	RegCM4	۸۱/۶۴	۳۴/۶	۱۰۲/۳	۹۱/۸۷	۰/۷۶
	MA	۲/۰۱	۰/۸۵	۶۱/۰۴	۵۴/۱۵	۰/۵۷
	MLP	۳/۷۵	۱/۵۹	۲۹/۵	۲۵/۰۳	۰/۸۷
اردبیل	RegCM4	۳۷۵/۰۲	۱۶۷/۴۶	۳۸۲/۹۳	۳۷۵/۰۲	-۰/۰۵
	MA	-۰/۷	-۰/۳۱	۳۳/۸۴	۲۷/۹۱	۰/۳۲
	MLP	۳۴/۹۸	۱۵/۶۲	۴۳/۵۶	۳۵/۰۲	۰/۵۵
ارومیه	RegCM4	-۴۸/۸۴	-۱۴/۶۸	۸۹/۷۱	۷۵/۶۱	۰/۴۲
	MA	-۲۷/۱۲	-۸/۱۵	۱۰۳/۸۹	۸۴/۸۳	۰/۳۳
	MLP	۲۷/۱	-۸/۱۵	۶۶/۰۵	۶۲/۳۶	۰/۳۹
خوی	RegCM4	۸۹/۳۲	۳۳/۲۴	۱۱۴/۹۸	۹۹/۳۳	۰/۶۱
	MA	۷/۰۷	۲/۶۳	۷۰/۵۹	۶۰/۲۴	۰/۶
	MLP	-۱۳/۴۴	-۵/۰۰	۳۸/۴۰	۳۰/۷۶	۰/۰۱

جدول ۶. سنجه های آماری پس پردازش بارش فصلی شبیه سازی شده با الگوی RegCM4 در دوره راستی آزمایی (۲۰۰۶-۲۰۱۱)

ایستگاه سینوپتیک	الگوها	میانگین اریبی (میلی متر)	میانگین خطای نسبی (درصد)	ریشه میانگین مربعات خطا (میلی متر)	میانگین خطای مطلق (میلی متر)	ضریب همبستگی با دیدبانی
تبریز	RegCM4	۲۰/۴۱	۳۴/۶۴	۴۱/۷۲	۳۲/۸۹	۰/۸۵
	MA	-۲/۰۳	-۳/۴	۲۷/۴۷	۲۲/۰۱	۰/۸
	MLP	۴/۳۱	۷/۳۱	۲۵/۸۹	۱۹/۷۴	۰/۷۵
اردبیل	RegCM4	۹۳/۷۶	۱۶۷/۴۶	۱۱۸/۱۷	۹۷/۳۵	۰/۷۵
	MA	۰/۳۸	۰/۶۸	۲۲/۳۳	۱۹/۰۸	۰/۷۷
	MLP	۴/۲۵	۷/۵۹	۲۶/۸۵	۲۰/۴۶	۰/۶۱
ارومیه	RegCM4	-۱۲/۲۱	-۱۴/۶۸	۳۸/۲۷	۲۵/۳۶	۰/۷۹
	MA	-۱/۲	-۱/۴۸	۴۹/۸۸	۳۹/۵۷	۰/۷۴
	MLP	-۱۵/۱۲	-۱۸/۱۸	۳۶/۶۶	۲۷/۹۳	۰/۸
خوی	RegCM4	۲۲/۳۳	۳۳/۲۴	۴۸/۹۵	۳۶/۸۶	۰/۷۴
	MA	۲/۶۵	۳/۹۵	۳۵/۳۲	۲۸/۴۵	۰/۷۴
	MLP	۱/۶۳	۲/۴۳	۱۶/۹۶	۱۳/۸۱	۰/۹۱

در مقیاس ماهانه، اعمال پس‌پردازش به روش MA برای تمام ایستگاه‌ها مؤثر واقع شد؛ به طوری که براساس نتایج مندرج در جدول ۷، در ایستگاه تبریز به کاهش میانگین اریبی خطا از ۶/۸ میلی‌متر به ۰/۱ میلی‌متر در مقایسه با برون‌داد خام الگو منجر شد، در ایستگاه اردبیل نیز ۳۱/۳ میلی‌متر اریبی به ۰/۲ میلی‌متر تقلیل یافت. اعمال پس‌پردازش در ایستگاه خوی، اریبی را از ۷/۴ به ۰/۱ میلی‌متر رساند. در ایستگاه ارومیه نیز که نتیجه اعمال پس‌پردازش با روش‌های MLP به کم‌برآوردی بیشتر بارش در مقایسه با برون‌داد خام الگوی RegCM منجر شد، با این روش میانگین اریبی از ۴/۱- میلی‌متر به ۰/۴- میلی‌متر رسید. بنابراین، روش MA نیز بارش را با کم‌برآوردی اما با شدت کمتری نسبت به برون‌داد خام و دو روش پس‌پردازش به دست داد. گفتنی است دیگر سنج‌های آماری محاسباتی نیز کم‌وبیش همین نتایج را تأیید می‌کنند.

جدول ۷. سنج‌های آماری پس‌پردازش بارش ماهانه شبیه‌سازی شده با الگوی RegCM4 در دوره رانستی آزمایی (۲۰۰۶-۲۰۱۱)

ایستگاه سینوپتیک	الگوها	میانگین اریبی (میلی‌متر)	میانگین خطای نسبی (درصد)	ریشه میانگین مربعات خطا (میلی‌متر)	میانگین خطای مطلق (میلی‌متر)	ضریب همبستگی با دیدبانی
تبریز	RegCM4	۶/۸	۳۴/۶	۲۴/۲	۱۵/۴	۰/۶۹
	MA	۰/۱	۰/۵	۱۸/۲	۱۱/۸	۰/۶۷
	MLP	-۸/۶	-۰/۵۵	۱۶/۵	۱۱/۴	۰/۷۳
اردبیل	RegCM4	۳۱/۳	۱۶۷/۵	۵۱/۰	۳۵/۲	۰/۶۴
	MA	۰/۲	۱۱/۰	۱۵/۰	۱۱/۰	۰/۶۵
	MLP	۳/۱	۱۶/۸۷	۱۴/۶	۱۱/۸	۰/۵۹
ارومیه	RegCM4	-۴/۱	-۱۴/۷	۲۲/۹	۱۳/۲	۰/۷
	MA	-۰/۴	-۱/۵	۲۸/۶	۱۷/۳	۰/۵۹
	MLP	-۶/۰	-۲۱/۷	۲۴/۳	۱۵/۹	۰/۶۲
خوی	RegCM4	۷/۴	۳۳/۲	۲۶/۲	۱۷/۸	۰/۶۳
	MA	۰/۱	۰/۳	۲۰/۳	۱۵/۰	۰/۶۲
	MLP	-۳/۶	-۱۶/۰۳	۱۵/۶	۱۱/۵	۰/۶۹

## نتیجه‌گیری

براساس نتایج، در منطقه بررسی شده در دوره رانستی آزمایی ۲۰۰۶-۲۰۱۱ میانگین اریبی بارش سالانه خام الگوی RegCM4 برابر ۱۲۴/۳ میلی‌متر بود؛ در حالی که ایستگاه اردبیل با میانگین اریبی ۳۷۵/۰۲ میلی‌متر، بیشترین خطا (اریبی مثبت) و ارومیه کمترین خطا و اریبی منفی برابر ۴۸/۸۴- را داشت. به طور خلاصه، در این دوره در مقیاس زمانی سالانه در تمام ایستگاه‌های بررسی شده، اعمال پس‌پردازش مؤثر واقع شد و ۷۵ درصد ایستگاه‌ها روش MA را کاراتر معرفی کردند. در ۲۵ درصد نیز دو روش تفاوتی نداشتند. متوسط میانگین اریبی خطا بعد از اعمال روش‌های پس‌پردازش MA و MLP در محدوده بررسی شده، به ترتیب ۴/۷- و ۱۳/۱ میلی‌متر بود.

در مقیاس فصلی، متوسط اریبی خطای محدوده در دوره‌ی راستی‌آزمایی برابر ۳۱/۱ میلی‌متر بود که پس از اعمال پس‌پردازش به شدت کاسته شد؛ ضمن اینکه در این مقیاس زمانی نیز روش MA برتر بود. متوسط میانگین اریبی خطای روش‌های MA و MLP در محدوده‌ی بررسی شده به ترتیب ۰/۰۵- و ۱/۲- میلی‌متر بود.

در مقیاس زمانی ماهانه، متوسط اریبی در ایستگاه‌های بررسی شده ۱۰/۴ میلی‌متر بود و اعمال پس‌پردازش با کاربرد روش منتخب هر ایستگاه به کاهش آن و رسیدن به رقم صفر منجر شد. روش برتر پس‌پردازش نیز مانند دیگر مقاطع زمانی MA بود. متوسط میانگین اریبی روش‌های MA و MLP در محدوده‌ی بررسی شده، به ترتیب صفر و ۳/۸- میلی‌متر بود. در جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که الگوی اقلیمی منطقه‌ای RegCM4 در پیش‌بینی بارش، به‌طور عمده بیش‌برآوردی دارد؛ اما اعمال پس‌پردازش میانگین اریبی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. مناسب‌ترین روش نیز روش ساده‌ی میانگین متحرک است و الگوهای پیچیده برای این امر ضرورتی ندارد. نتیجه با پژوهش‌های انجام‌گرفته در مناطق مختلف کشور، چه در زمینه‌ی کارایی الگوی RegCM و چه در زمینه‌ی اعمال پس‌پردازش انطباق دارد؛ برای نمونه پژوهش انجام‌گرفته برای پیش‌بینی بارش فصلی در استان فارس (محمدی و زرین، ۱۳۹۲) در ۵۷/۱ درصد موارد، کاربست الگوی RegCM4 و ۳۳/۳ درصد موارد، اعمال پس‌پردازش را تأیید می‌کند. روش پس‌پردازش در این پژوهش، رگرسیون چندگانه خطی بوده است. همچنین در پژوهشی دیگر (آزادی و همکاران، ۱۳۸۹) که برون‌داد الگوی WRF برای بارندگی‌های ۲۴ ساعته با دو روش بهترین برآوردکننده‌ی نظام‌مند (BES) و میانگین لغزان (MA) برای ۲۰۵ ایستگاه هواشناسی تصحیح و پس‌پردازش شد، هر دو روش پس‌پردازش استفاده‌شده، برون‌داد مستقیم الگو را بهبود بخشیدند. بنابراین، در نهایت می‌توان پیشنهاد کرد اعمال پس‌پردازش روی برون‌داد مستقیم بارش -چه مقاطع زمانی کوتاه‌مدت و چه بلندمدت- به دلیل وجود خطای نظام‌مند، ضروری است و از بین روش‌های مختلف، کاربست روش MA افزون‌بر داشتن مزیت‌های سهولت انجام گرفتن و سرعت در آن و عدم نیاز به متغیرهای مختلف هواشناسی، روش کاراست.

## منابع

- آزادی، م.، شیرغلامی، م.ر. و حجام، س. (۱۳۸۹). «پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای بارندگی در ایران». مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت. مؤسسه ژئوفیزیک، ص ۹۱-۹۴.
- بابائیان، ا.، مدیریان، ر.، کریمیان، م. و حبیبی نوخندان، م. (۱۳۸۶). «شبیه‌سازی بارش ماه‌های سرد سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۷۹ با استفاده از مدل اقلیمی RegCM3». مجله جغرافیا و توسعه، ش ۱۰، ص ۵۵-۷۲.
- محمدی، ف. و زرین، آ. (۱۳۹۲). «پیش‌بینی فصلی بارش استان فارس با مدل RegCM». پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته اقلیم‌شناسی. مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد. گروه جغرافیا.
- Adeniyi, M., O. (2013). "Sensitivity of different convection schemes in RegCM4.0 for simulation of precipitation during the Septembers of 1989 and 1998 over West Africa". *Theor Appl Climatol*.
- Afzaal, M. and Hussain, A. (2006). "Numerical Simulation of Summer Monsoon Precipitation of 1992 Over Pakistan". *Pakistan Journal of Meteorology*. Vol. 3. No. 5.
- Azadi, M., Shirqolami, M.R. and Hajjam, S. (2010). "Post processing of WRF model output for Iran precipitation". *14 th geophysic conference*. pp. 91-94. (In Persian).
- Babaeian, I., Modirian, R., Karimian, M., and Habibi Nokhandan, M. (2007). "Simulation of precipitation on cold months for 1997 and 2000 with RegCM3 climate model". *Journal of Geography and Development*. No. 10. pp. 55-72. (In Persian).

- Boroneant, C., Potop, V. and Caian, M. (2011). "Validation of RegCM precipitation simulation over Republic of Moldova, Application for Standard Precipitation Indices calculated for the period 1960-1997". *Source and Limit of Social Development*. International Scientific Conference. 6th-9th September 2011. Topolcianky. Slovakia.
- Elguindi, N. and Giorgi, F. (2006). "Simulating Multi-decadal Variability of Caspian Sea Level Changes Using Regional Climate Model Outputs". *Climate Dynamics*. Vol. 26. pp. 167-181.
- Francisco, R. (2003). "Some Experiments in Running the RegCM over the Philippines, ICTP Workshop on the Theory and Use of Regional Climate Models". Trieste Italy.
- Fuentes-Franco, R., and Coppola, E. (2013). "Assessment of RegCM4 simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico". *Clim Dyn*. Vol. 42. pp. 629-647.
- ICTP/RegCM4 Homepage <http://www.ictp.trieste.it/~pubregcm/>
- Islam, N., Rahman, M., Uddin Ahmed, A.U. and Afroz, R. (2007). "Comparison of RegCM3 simulated meteorological parameters in Bangladesh". Part I-preliminary result for rainfall. *Sri Lankan Journal of Physics*. Vol. 8. pp. 1-9.
- McCOLLER D. and STULL R. (2008). "Hydrometeorological Accuracy Enhancement via Postprocessing of Numerical Weather Forecasts in Complex Terrain". *American Meteorological Society*. pp. 131-144
- Mikovsky, J.; Skalak, P. and Stepanek, P. (2010). "Intercomparison of statistical techniques for postprocessing the RCM-generated data". *10th EMS Annual Meeting. 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts*.
- Mohammadi, F. and Zarrin, A. (2013). "Prediction of seasonal precipitation on Fars with RegCM model". *Thesis for degree of M.Sc.in climatology*. Mashhad: Ferdowsi University. (In Persian).
- Nandozi, C.S. Majaliwa, J.G.M., Omondi, P., Komutunga, E., Aribo, L., Isubikalu, P., Tenywa, M.M and Massa-Makuma, H. (2012). "Reginal Climate Model Performance and of seasonal rainfall and surface temprature of Uganda". *African Crop Science Journal*. Vol. 20. pp. 213-225.
- Paeth, H. (2011). "Postprocessing of simulated precipitation for impact research in West Africa, Part I: model output statistics for monthly data". *Climate Dynamics*. DOI. Vol. 36. No. 7. pp. 1321-1336.
- Pal, J., Giorgi, F., BiX., Elguindi, N., Salmon, F., Gao X., Rauscher, S. A., Francisco, R., Zakey, A., Winter, J., Ashfagh, M., Syed, F.S., Bell, J., Diffenbaugh, J.K., Konare, A., Martinez, D., Rocha, R., Sloan, L. and Steiner, A. (2007). "Regional Climate modeling for the Developing World, the ICTP and RegCNET". *Bulletin of American meteorological society*. pp. 1396-1409.
- Schmidli, J., Goodess, C. M., Frei, C., Haylock, M. R., Hurrell, J. W., Ribalaygua, J. and Schmith, T. (2007). "Statistical and dynamical downscaling of precipitation". An evaluation and comparison of scenarios for the european Alps. *Journal of Geophysical Reserch*. Vol. 112.
- Turco, M., Zollo, A., Rianna, G., Cattaneo, L., Vezzoli, R. and Mercogliano, P. (2013). "Post-processing methods for COSMO-CLM precipitation over Italy, Center Euro-Mediterraneo". *Research Papers*. Issue RP0171.
- Wallach, D., Makowski, D. and Jones, J.W. (2006). *working with dynamic crop models. Evaluation, analysis, parameterization and applications*. ELSEVIER. e-book.
- Zong, P. and Wang, H. (2011). "Evaluation and analysis of RegCM3 simulated summer rainfall over the Huaihe river of China". *Acta Meteorologica Sinica*. Vol. 25. pp. 386-394.