Archive of SID

مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۹، شماره ٤، ۱۳۹٤، صفحه ۱۹-۳۳

کاربرد وایازش خطی چندمتغیره در پس‌پردازش مقادیر بارش حاصل از مدل RegCM4

صدیقه لوک‌زاده[۱]، نوذر قهرمان[۲*]، جواد بذرافشان[۲]، ایمان بابائیان[۳]، زهرا آقا شریعتمداری[٤]

[۱] دانش‌آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
[۲] دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
[۳] استادیار، گروه پژوهشی تغییر اقلیم، پژوهشکده اقلیم شناسی، مشهد، ایران
[٤] استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۱۴، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۹)

چکیده

پیش‌بینی‌های فصلی بارش در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در بخش‌های کشاورزی و منابع آب و نیز ارزیابی و پایش پدیده‌های فرین نظیر خشکسالی و سیل اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق به‌منظور ارزیابی کارایی مدل RegCM4 در پیش‌بینی بارش ماهانه، فصلی و سالانه در چند ایستگاه منتخب شمال غرب کشور و همچنین بررسی میزان دقت پیش‌بینی‌ها بعد از پس‌پردازش روی برون‌داد مدل، مدل در دوره ۳۰ ساله ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۱ با طرحوارهٔ بارش کو (Kuo) و گام زمانی ۱۰۰ ثانیه اجرا شد. داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل از مرکز ICTP با قالب NetCDF شامل داده‌های دوباره تحلیل‌شده وضع جوّی (NNRP1)، دمای سطح دریا (SST) و داده‌های سطح زمین (SURFACE) شامل داده‌های GTOPO، GLCC و GLZB دریافت شد. با در نظر داشتن آمار موجود در مقطع زمانی پیش‌گفته، چهار ایستگاه همدیدی ارومیه، تبریز، اردبیل و خوی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج روشن ساخت که برون‌داد خام (بدون پس‌پردازش آماری) بارش مدل RegCM4، در همهٔ ماه‌ها به‌جز ماه‌های گرم سال، دارای اُریبی تر و بیش‌برآوردی است. اجرای پس‌پردازش آماری با استفاده از همبستگی چندمتغیره خطی (و در بعضی موارد دومتغیره خطی) بر برون‌داد مدل پیش‌گفته منجر به تعدیل مقادیر بارش و همخوانی بیشتر آن با مقادیر دیده‌بانی‌شده، شد به‌طوری‌که اُریبی و خطای نسبی در پیش‌بینی‌های ماهانه، فصلی و سالانه در ۷۵٪ موارد کاهش یافت و در همهٔ ایستگاه‌های تحت بررسی، به‌جز ارومیه، پس‌پردازش به روش پیش‌گفته، در همه مقاطع زمانی موجب بهبود برون‌داد مدل دینامیکی RegCM شد.

واژه‌های کلیدی: بارش، پس‌پردازش، پیش‌بینی فصلی، ریزمقیاس نمایی، مدل RegCM4

۱ مقدمه

مدل‌های گردش کلی جوّ اغلب دارای تفکیک افقی بین ۲×۲ تا ۳×۳ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی هستند که هر شبکه آن محدوده‌ای معادل ۴۰۰۰۰ تا ۹۰۰۰۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. بدین مفهوم که شرایط پستی و بلندی و پوشش سطحی و شرایط اقلیمی یکسانی را برای یک شبکه با ابعاد چندصد کیلومتری در نظر می‌گیرد؛ درحالی‌که ممکن است شرایط واقعی سطح زمین در محدوده موردنظر دارای تفاوت‌های زیادی باشد. ریزمقیاس‌نمایی روشی است برای حصول به تفکیک مکانی بالا از برون‌داد مدل‌های گردش کلی جوّ که به دو روش دینامیکی و آماری صورت می‌گیرد.

فرانسیسکو و همکاران (۲۰۰۳) با اجرای مدل RegCM روی فیلیپین، سامانه پیش‌آگاهی سیل را در این

*نگارنده رابط: nghahreman@ut.ac.ir *Corresponding author:

www.SID.ir

Archive of SID

کشور ایجاد کردند. بدین ترتیب که خروجی RegCM را به‌منزلهٔ داده‌های اولیه به یک مدل آب‌شناسی (هیدرولوژی) وارد و پس از اجرای مدل پیش‌گفته، پیش بینی‌های مربوط به جریان رواناب و سیلاب در حوضه‌های گوناگون را عرضه کردند. افضل و حسین (۲۰۰۶) بارش مونسون سال ۱۹۹۲ پاکستان را با مدل RegCM3 شبیه‌سازی کردند. شرایط اولیه و مرزی مورد استفاده در تحقیق ایشان داده‌هایERA40 و تفکیک افقی ۶۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. نتایج روشن ساخت که طرحوارهٔ گرل FC بارش را ۳۹ درصد بیشتر از طرحوارهٔ گرل AS برآورد می‌کند؛ ضمن اینکه مجموع بارش شبیه‌سازی شده ۵۱ درصد بیش از داده‌های CRU و ۷۱ درصد بیش از داده‌های مشاهداتی بود لیکن الگوی بارش روی منطقه با الگوی واقعی همخوانی داشت. پال و همکاران (۲۰۰۷) توانمندی مدل اقلیمی RegCM را در شبیه‌سازی بارش و دمای دوره ۲۰۰۰–۱۹۸۷ در دو منطقه هندوستان و امریکای جنوبی (آمازون) که دارای بارش‌های شدید مونسونی هستند مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که به‌کارگیری طرحواره گرل در منطقه امریکای جنوبی موجب اُریبی خشک (منفی) بارش به میزان ۱۰ درصد در مقایسه با داده‌های CMAP می‌شود. در شبه جزیره هندوستان، باوجود اینکه اکثر مدل‌های گردش کلی جوّ نتوانستند الگوهای بارش این منطقه را به‌خوبی مدل‌سازی کنند، مدل RegCM توانست نواحی با بارش بیشینه را در این ناحیه مدل‌سازی کند. شمیدلی و همکاران (۲۰۰۷) به منظور ریزمقیاس‌نمایی بارش روزانه، شش مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDMs) را با سه مدل اقلیمی منطقه‌ای (RCMs) مورد مقایسه قرار دادند. نتایج روشن ساخت در فصل زمستان و در پستی‌بلندی‌های پیچیده، RCMs به‌طور معنی‌داری نسبت به SDMs عملکرد بهتری دارند. در فصل تابستان، روی نقاط مسطح، تفاوت‌ها کوچک‌تر بود. اسلام و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی با استفاده از مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM3 به شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در بنگلادش پرداختند. مدل با تفکیک افقی ۰/۵۴ × ۰/۵۴ درجه و با دو طرحوارهٔ گرل AS و گرل FC اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی بارندگی فصلی روشن ساخت که طرحوارهٔ گرل FC بارش دوره پیش مونسون را بیش از مقادیر واقعی و دوره مونسون را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است؛ درحالی‌که طرحوارهٔ گرل AS نتواسته است شبیه‌سازی مناسبی داشته باشد، بنابراین طرحواره گرل FC بهتر از طرحوارهٔ گرل AS بارش را برآورد کرده است. برونییت و همکاران (۲۰۱۱) توانایی مدل RegCM رابرای شبیه‌سازی بارش فصلی در مولداوی ارزیابی کردند. تفکیک مکانی مدل ده کیلومتر، داده‌های ورودی ERA40 و دوره مطالعاتی ۱۹۶۰–۱۹۹۷ بود. برون‌داد مدل با داده‌های CRU TS2.1 و داده‌های مشاهداتی ایستگاهی مقایسه شد. نتایج روشن ساخت که مدل پیش‌گفته به‌نحو سامان‌مند، مجموع بارش سالانه را بیش از مقادیر مشاهداتی و داده‌های CRU شبیه‌سازی می‌کند. زانگ و ونگ (۲۰۱۱) به ارزیابی و تحلیل مدل RegCM3 در شبیه‌سازی بارش تابستانه در حوضه رودخانه هوایه در چین پرداختند. مقایسه مقدار و توزیع بارش با مقادیر مشاهداتی روشن ساخت که RegCM3 قادر است که الگوی بارش و تغییرات سالانه آن را شبیه‌سازی کند. پِیت (۲۰۱۱) بارش ماهانه در غرب افریقا را با یک مدل اقلیمی منطقه‌ای شبیه‌سازی و با بارش دیدبانی مقایسه کرد. نتیجه حاکی از پیش‌بینی دست‌پایین مدل و نبود دستیابی به برخی جزئیات چرخه فصلی بارش در بخشی از افریقای غربی واقع در جنوب صحرای آفریقا بود. او از مدل آماری (همبستگی خطی چندگانه) به‌منظور تعدیل داده‌های شبیه‌سازی به ویژگی بارش مشاهداتی، با کمک متغیرهای شبیه‌سازی شده سطح مانند دما، فشار سطح دریا و مولفه‌های باد استفاده کرد. نتایج، بهبود اساسی در ناکارایی مدل اقلیم

www.SID.ir

Archive of SID

منطقه‌ای را روشن ساخت. ناندوزی و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌های RCM،UK و PRECIS را برای شبیه‌سازی بارش ودمای اوگاندا به کار بردند. نتایج تحقیق ایشان روشن ساخت که مدل‌های پیش‌گفته، سیگنال‌های جریان‌های بزرگ‌مقیاس که بارش و دما را در اوگاندا تحت تاثیر قرار می‌دهند به‌نحو نسبتاً خوبی آشکارسازی می‌کنند و شبیه‌سازی بارش و دما با RCMs سبت به GCMs بهتر است. ادنی (۲۰۱۳) به‌منظور شبیه‌سازی بارش، تحقیقی در غرب افریقا با عنوان حساسیت‌سنجی طرحواره‌های گوناگون همرفتی مدل RegCM4 را عملی ساخت. نتایج حاصل مبین این مطلب بود که طرحواره کو و گرل بارش کمتری را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی می‌کنند. فرانکو و کوپولا (۲۰۱۳) دما و بارش شبیه‌سازی‌شده با مدل RegCM4 را مورد ارزیابی قرار دادند. محدودهٔ انتخابی آنها مکزیک بود و دورهٔ اجرای مدل ۱۹۸۲–۲۰۰۸ و تفکیک افقی ۵۰ کیلومتر انتخاب شد. نتایج بررسی ایشان حاکی از بیش‌برآورد بارش با مدل در مناطق کوهستانی بود.

میرزایی و همکاران (۱۳۸۳) از مدل منطقه‌ای RegCM3 به منظور شبیه‌سازی عددی بارش‌های فصلی در منطقه جنوب و جنوب غرب ایران استفاده کردند. مقایسه خروجی مدل برای بارش تجمعی ماهانه و فصلی روشن ساخت که مدل به‌خوبی قادر به پیش‌بینی الگوی مکانی و زمانی بارش است. آزادی و همکاران (۱۳۸۷) از صافی کالمن برای کاهش خطای سامان‌مند برون‌داد مدل MM5 برای دمای بیشینه و کمینه در دو متری سطح زمین استفاده کردند. ایشان صافی کالمن را برای ۱۱۷ ایستگاه در کشور و به مدت ۱۲۰ روز اِعمال کردند. بررسی آماری روی نتایج روشن ساخت که صافی کالمن برای روزهایی که خطای مدل زیاد یا متوسط بود می‌تواند پیش‌بینی مدل را تا حد قابل‌قبولی اصلاح کند، اما برای روزهایی که خطای مدل کم بود، کاربرد آن تاثیر چندانی درتصحیح خطاها نداشت. مدیریان و همکاران (۱۳۸۸) بارش و دمای فصل‌های پاییز استان خراسان را با مدل RegCM3 شبیه‌سازی کردند. تفکیک افقی ۱۵ × ۱۵ کیلومترمربع و چهار طرحواره متفاوت گرل FC، گرل AS، کو و امانوئل برای دوره ده‌ساله ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی بارش با داده‌های واقعی و CMAP و نتایج دمای مدل‌سازی شده با داده‌های دیدبانی شده ایستگاه‌های هواشناسی استان و داده‌های دمای مرکز NCEP مقایسه و خطای مطلق میانگین و اُریبی آنها محاسبه شد. کمترین میانگین اُریبی فصلی نسبت به بارش واقعی به میزان ۷/۱- میلی‌متر در طرحوارهٔ کو، و کمترین اُریبی میانگین فصلی نسبت به داده‌های CMAP به میزان ۹/۳ میلی‌متر در طرحوارهٔ امانوئل مشاهده شد. هدایتی وهمکاران (۱۳۸۹) خروجی‌های بارش مدل MM5 را در مناطق گوناگون با روش‌های آماری، مورد راستی‌آزمایی قرار دادند تا دقت و صحت خروجی این مدل و در نتیجه کارایی مدل برای مناطق گوناگون ایران در پیش‌بینی‌های تا ۷۲ ساعته مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. ایشان با در نظر گرفتن ویژگی‌های ناهمواری، اقلیم و میانگین بارش، کشور را به ۹ منطقه تقسیم کردند و فرایند درستی‌سنجی را برای هر منطقه به‌طور جداگانه عملی ساختند. با در نظر گرفتن آستانه‌های بارشی و تشکیل جدول توافقی برای وقوع یا نبود وقوع بارش و نیز جدول‌های توافقی چندگانه برای آستانه‌های متفاوت بارش، امتیازهای مهارتی مدل برای بارش محاسبه و نتایج نهایی از جمع‌بندی تحلیل‌های صورت گرفته برای هر منطقه به‌دست آمد. نتایج روشن ساخت که مهارت مدل در پیش‌بینی بارش برای آستانه های بارش بسیار کم (کمتر از ۱/ ۰میلی‌متر) و یا زیاد (بیشتر از ۱۰ میلی‌متر) در ۲۴ ساعت بیشتر است. آزادی و همکاران (۱۳۸۹) برون‌داد مدل WRF برای بارندگی‌های ۲۴ ساعته را با دو روش بهترین برآوردکننده سامان‌مند (BES)و میانگین لغزان (MA) و برای ۲۰۵ ایستگاه

www.SID.ir

Archive of SID

هواشناسی تصحیح و پس‌پردازش کردند. نتایج روشن ساخت که هر دو روش پس‌پردازش مورد استفاده، برون‌داد مستقیم مدل را بهبود می‌بخشند؛ به گونه‌ای که در روش MA، میانگین مطلق خطا برای ایستگاه‌های گوناگون به‌طور میانگین حدود ۲۰ درصد و در روش BES به‌طور میانگین حدود ۱۵ درصد بهبود یافته است. آزادی و همکاران (۱۳۸۹) خروجی‌های بارش دو مدل MM5 و WRF را در مناطق گوناگون ایران با استفاده از جدول توافقی و کمیت‌های درستی‌سنجی مقایسه کردند. نتایج روشن ساخت که هر دو مدل در پدیده بارش، فراپیش‌بینی دارند، به گونه‌ای که در نزدیک به ۵۰ درصد مواردی که بارش رخ نداده است، وقوع آن را به اشتباه پیش‌بینی کرده‌اند. بابائیان و همکاران (۱۳۹۱) به‌منظور عرضه پیش‌بینی فصلی بارش استان خراسان رضوی، برون‌داد مدل دینامیکی MRI-CGCM3 در دورهٔ ۱۹۸۱-۲۰۰۷ را روی هفت ایستگاه هواشناسی آن استان با روش همبستگی چندمتغیره پس‌پردازش کردند. نتایج روشن ساخت که استفاده از این روش باعث افزایش دقت پیش‌بینی‌های فصلی می‌شود.

همان‌طور که مشخص شد اکثر تحقیقات– به‌جز موارد محدود- حاکی از فراپیش‌بینی بارش با طرحواره‌های متفاوت در مدل RegCM و سایر مدل‌ها است. همچنین پس‌پردازش به روش‌های گوناگون موجب بهبود نتایج می شود. در این تحقیق با هدف شبیه‌سازی بارش ماهانه، فصلی و سالانه شمال‌غرب کشور، برون‌دادهای متفاوت مدل RegCM4 استخراج شد و با کمک روش همبستگی خطی چندمتغیره، متغیر بارش قبل و بعد از اجرای پس‌پردازش با استفاده از داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. به‌این‌ترتیب میزان موفقیت یا نبود موفقیت در شبیه‌سازی بارش در منطقه مورد بررسی مشخص شود. آنچه که در این تحقیق بدان پرداخته می‌شود، ریزمقیاس-نمایی دینامیکی با استفاده از مدل RegCM است که به‌منظور افزایش صحت آن، روی برون‌داد داده‌های ریزمقیاس‌نمایی‌شده بارش، فرایند پس‌پردازش آماری صورت می‌گیرد.

۲ روش تحقیق

هدف این تحقیق ارزیابی کارایی مدل RegCM4 در پیش‌بینی بارش ماهانه، فصلی و سالانه در شمال غرب کشور و همچنین بررسی میزان دقت پیش‌بینی‌ها بعد از اجرای پس‌پردازش روی برون‌داد مدل پیش‌گفته است. تعداد ایستگاه‌های همدیدی در استان‌های آذربایجان غربی، شرقی و اردبیل ۳۶ ایستگاه است که دارای طول دورهٔ آماری متفاوتی هستند؛ به‌طوری‌که باقدمت‌ترین آنها (تبریز و ارومیه) از سال ۱۹۵۱ دارای آمار ثبت شده هستند. ازآنجاکه مدل در دوره زمانی ۳۰ ساله ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۱ اجرا شد فقط چهار ایستگاه در این مقطع زمانی دارای آمار بود که عبارت‌اند از ایستگاه‌های همدیدی ارومیه، تبریز، اردبیل و خوی. مشخصات ایستگاه‌های پیش‌گفته در جدول ۱ آورده شده است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل داده مشاهداتی و داده‌های مورد استفاده در بخش مدل‌سازی است. داده‌های مشاهداتی فقط بارش ایستگاه‌های ذکر شده برای پس‌پردازش آماری است و داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل منطقه‌ای اقلیمی RegCM4 ، از مرکز ICTP (International Centre for Theoretical Physics) با قالب NetCDF شامل سه دسته داده‌های وضع جوّی NNRP1 در مقیاس ۶ ساعته با تفکیک افقی ۲/۵ × ۲/۵ درجه از پایگاه داده‌های بازتحلیل (Reanalysis) مرکز ملی پیش‌بینی محیطی امریکا، داده‌های سطح دریا (SST) با تفکیک افقی ۱ × ۱ درجه از نوع (OISST) از سازمان ملی اقیانوس و جوّ امریکا و داده‌های سطح زمین (SURFACE) که شامل سه نوع داده‌های پستی و بلندی (GTOPO)، پوشش گیاهی یا کاربری اراضی (GLCC)

www.SID.ir

Archive of SID

و نوع خاک (GLZB) با تفکیک افقی ۳۰ × ۳۰ ثانیه از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحد امریکا، برای دورهٔ ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۱ دریافت شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی.

ایستگاه همدیدی	سال تاسیس	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	میانگین بارش سالانه (میلی‌متر)
تبریز	۱۹۵۱	٤٦°۱۷′	۳۸°۰٥′	۱۳٦۱	۲٥٤
ارومیه	۱۹٥۱	٤٥°۰۳′	۳۷°٤۰′	۱۳۲۸	۳۱٤/۱
خوی	۱۹٥۹	٤٤°٥۸′	۳۸°۳۳′	۱۱۰۳	۲۷۲/٤
اردبیل	۱۹۷٦	٤۸°۲٤′	۳۸°۲۰′	۱۳۱٤	۲۷٦/٥

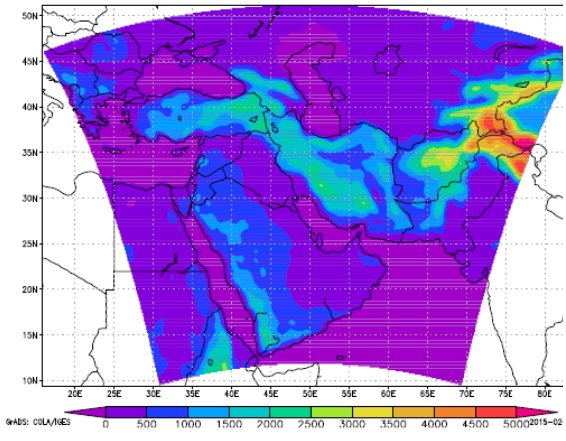
برای تعیین طرحواره مناسب بارش، سال ۲۰۰۹ به‌منزلهٔ نماینده سالی با بارش نرمال در بین دورهٔ شبیه‌سازی انتخاب و مدل با طرحواره‌های گوناگون در سال موردنظر اجرا شد.

بنابراین در اجرای اولیه، مدل به مدت یکسال از تاریخ ۱۷ دسامبر ۲۰۰۸ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۰۹، با زمان پایدارسازی (Spin up) ۱۵ روزه و با تفکیک‌های افقی متفاوت شامل ۹۰ ×۹۰، ۳۰×۳۰ و ۲۰×۲۰ کیلومتر مربع به‌صورت مجزا با هر سه طرحواره گرل، کو و امانوئل موجود در کد RegCM4.1.1 با شرایط یکسان از داده‌های مرزی و اولیه به اجرا گذاشته شد. خلاصه نتایج حاصل از اجرای آزمایشی پیش‌گفته در جدول ۲ آمده است. براین‌اساس و نیز نتایج حاصل از تحقیق صورت گرفته برای ایران (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۶) طرحواره کو با کمترین خطا در مقایسه با میزان بارش مشاهداتی ۳۶ ایستگاه همدیدی منطقه به‌منزلهٔ طرحواره اصلی، گام زمانی (dt) ۱۰۰ ثانیه، تفکیک مکانی ۳۰×۳۰ کیلومترمربع، تعداد نقاط شبکه ۱۵۲ در عرض (iy) و ۱۶۸ در طول جغرافیایی (jx) در طول دوره آماری ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۱ اجرا شد. مرکز محدودهٔ جغرافیایی اجرا شده در دوره پیش‌گفته در ۳۰/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ درجه طول شرقی قرار گرفت. شکل ۱ محدوده اجرای مدل را نشان می‌دهد. برون‌داد مدل شامل داده‌های جوّی (ATM)، پوشش سطحی (SRF) و تابشی (RAD) است که هرکدام حاوی تعداد زیادی از متغیرهای هواشناسی هستند و از بین آنها به‌جز بارندگی حاصل از مدل (tpr)، ۹ متغیر که ارتباط بیشتری با بارش داشتند شامل omega500، omega1000، u500، u1000، v500، v1000، ps، t2m و q2m استخراج شدند.

به‌منظور پس‌پردازش برون‌داد مدل از روش وایازش چندمتغیره خطی (MLR) و در مواردی دومتغیره خطی استفاده شد. متغیر وابسته یا پیش‌بینی‌شونده، بارش مشاهداتی در محل ایستگاه و متغیرهای مستقل (پیش‌بینی‌کننده‌ها) مجموعاً ۱۰ متغیر پیش‌گفته بودند. در طول دوره بررسی، ۸۰ درصد داده‌های ابتدای سری در تهیه معادله پس‌پردازش‌کننده پیش‌گفته (مرحله آموزش) وارد شد. شکل کلی معادله به‌صورت رابطه (۱) است:

$$y' = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \ldots + b_k x_k , \qquad (۱)$$

که y' متغیر وابسته یا پیش‌بینی‌شونده، x_k متغیرهای مستقل یا پیش‌بینی‌کننده‌ها و b_k ضرایب وایازش هستند. در تشکیل معادله همبستگی، آزمون‌های گوناگونی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. محدوده اجرای مدل RegCM4.

www.SID.ir

Archive of SID

پس از اینکه داده‌های بارش پس‌پردازش‌شده در دوره آموزش با داده‌های بارش مشاهداتی مقایسه و مشخص شد که بین بارش پس‌پردازش شده و مشاهداتی تفاوت معنی‌داری وجود ندارد، معادله‌های طراحی‌شده، به‌منظور درستی‌سنجی پیش‌بینی بارش در ۲۰ درصد انتهایی داده‌ها (۲۰۰۶-۲۰۱۱) مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور بررسی توانمندی روش پس‌پردازش صورت گرفته (وایازش خطی چندمتغیره) از سنجه‌های آماری چون میانگین اُریبی، میانگین خطای نسبی، ریشه میانگین مربعات خطاها، کارایی مدل، ضریب همبستگی (والاچ و همکاران، ۲۰۰۶)، امتیاز مهارتی میانگین مربعات (سازمان جهانی هواشناسی، ۱۹۹۲) و نسبت انحراف معیار برون‌داد مدل به داده‌های مشاهداتی (محمدی، ۱۳۹۲) استفاده شد که شکل کلی آنها به‌ترتیب در روابط ۲ تا ۸ آمده است:

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i), \qquad (۲)$$

$$MRE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(p_i - o_i)}{o_i}, \qquad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2}, \qquad (۴)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2}, \qquad (۵)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}[(o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})]}{\left[\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^{n}(p_i - \bar{p})^2\right]^{0.5}}, \qquad (۶)$$

$$MSSS = 1 - \frac{MSE_p}{MSE_o}$$
$$MSE_p = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2 \qquad (۷)$$
$$MSE_o = \left(\frac{n}{n-1}\right)^2 \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2$$

$$SD_p / SD_{obs} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(p_i - \bar{p})^2}{\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2}}, \qquad (۸)$$

که p_i و $\bar{p}$ به‌ترتیب مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل و متوسط آن و o_i و $\bar{o}$ به‌ترتیب مقادیر مشاهداتی و متوسط آن است.

همان‌طور که ذکر شد پس از اجرای مدل RegCM4، به‌غیر از متغیر بارش ، ۹ متغیر از میان متغیرهای گوناگون که بیشترین ارتباط با وقوع بارش دارند با نوشتن اسکریپت در نرم‌افزار GrADS به‌صورت ماهانه استخراج شد و در مدل پس‌پردازش آماری چندمتغیره خطی برای پس‌پردازش بارش مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲. خلاصه نتایج حاصل از مقایسه بارش ماهانه شبیه‌سازی‌شده با مدل RegCM4 در سال ۲۰۰۹ با تفکیک افقی و طرحواره‌های گوناگون همرفت و بارش مشاهداتی ۳۶ ایستگاه همدیدی شمال‌غرب ایران.

تفکیک افقی(کیلومتر)	طرحواره	میانگین اریبی(میلی‌متر)	میانگین خطای نسبی(درصد)
۲۰	امانوئل	۳۵/۷	۱۷۳/۷
	گرل	۱۵/۲	۷۰/۸
	کو	٤۰/٤	۱۷۳/۸
۳۰	امانوئل	۲٤/۹	۱۰٤/٦
	گرل	۲۳/۹	۹٤/۱
	کو	۱٦/۹	۵۹/۵
۹۰	امانوئل	۳۲/۱	۱۷۱/۰
	گرل	۱۷/۳	۷۹/۷
	کو	۱۳/٤	۵۳/٦

مقاطع زمانی مورد بررسی برای این‌منظور ماهانه، فصلی و سالانه بود. معادلات همبستگی حاصل در دوره آموزش پس از رعایت مفروضات وایازش خطی در جدول ۳ آمده است.

شکل‌های۲ تا ۴ کارایی مدل RegCM4 در پیش‌بینی بارش سالانه، فصلی و ماهانه تبریز را (برای نمونه) پیش و

www.SID.ir

Archive of SID

پس از پس‌پردازش نمایش می‌دهند. نکته قابل‌توجه هماهنگی افت‌وخیزهای برون‌داد خام مدل RegCM4 با داده‌های مشاهداتی در اکثر سال‌ها و فصل‌ها است؛ به‌طوری‌که در اغلب زمان‌هایی که بارش مشاهده‌ای در اوج بوده، برون‌داد خام بارش (پس‌پردازش نشده) مدل RegCM4 نیز بیشینه بوده است. علت این هم‌آهنگی‌ها را می‌توان به استفاده مدل از داده‌های بازتحلیل برای شرایط اولیه و مرزی نسبت داد چراکه داده‌های مشاهداتی در این‌گونه داده‌ها لحاظ می‌شود. در جدول ۴ مقادیر سنجه های مورد استفاده به‌منظور درستی‌سنجی مدل RegCM4 در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای، پیش و پس از فرایند پس‌پردازش برای همه ایستگاه‌ها و مقاطع کلی زمانی و در جدول‌های ۵ و ۶ برای ایستگاه تبریز برای نمونه و برای فصل‌ها و ماه‌های گوناگون داده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود از دیدگاه شاخص اُریبی و خطای نسبی اِعمال پس‌پردازش روی بارش سالانه تبریز منجر به کاهش این دو سنجه به‌ترتیب از ۸۱/۶ میلی‌متر و ۳۴/۶ درصد به ۳/۹ میلی‌متر و ۱/۶ درصد در مقایسه با برون‌داد خام مدل شده است. با کاربست پس‌پردازش آماری روی بارش شبیه‌سازی شدهٔ سالانه در ایستگاه اردبیل نیز ۳۷۵/۰ میلی‌متر اُریبی و ۱۶۷/۵ درصد خطای نسبی به‌ترتیب به ۱۱/۵ میلی‌متر و ۵/۲ درصد تقلیل یافت. اِعمال پس‌پردازش در ایستگاه خوی در همین مقطع زمانی نیز باعث بهبود برون‌داد مدل دینامیکی شد به طوری‌که اُریبی از ۸۹/۳ به ۴۰/۴- میلی‌متر و خطای نسبی از ۳۲/۲ به ۱۵/۰- درصد کاهش یافت. اما در ایستگاه ارومیه نتیجه اِعمال پس‌پردازش در هیچ مقطع زمانی رضایت‌بخش نبود به‌طوری‌که برون‌داد خام مدل دینامیکی به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌تر بود چراکه اُریبی ۴۸/۸- میلی‌متر به ۸۴/۵- و درصد خطای نسبی از ۱۴/۷- به ۲۵/۴- در مورد بارش سالانه افزایش یافته است.

جدول ۳. معادلات وایازش حاصله از دوره آموزشی ۱۹۸۲-۲۰۰۵.

ایستگاه همدیدی	مقاطع زمانی	معادله وایازش
تبریز	ماهانه	$y = 2.54 + 0.0394tpr - 0.0244t\,2m,$
	فصلی	$y = 16.1 + 0.389tpr,$
	سالانه	$y = 515.8 + 0.49tpr - 92659q\,2m,$
ارومیه	ماهانه	$y = 3.12 + 0.044tpr - 0.102t\,2m + 0.12v\,500,$
	فصلی	$y = 33.68 + 0.56tpr - 4384q\,2m,$
	سالانه	$y = 975.7 - 67.35t\,2m,$
خوی	ماهانه	$y = 2.247 + 0.0455tpr,$
	فصلی	$y = 81.09 + 15.777v\,1000,$
	سالانه	$y = 660.45 - 41.71t\,2m,$
اردبیل	ماهانه	$y = 2.1687 + 0.03tpr,$
	فصلی	$y = 61.085 + 0.43tpr + 4.355t\,2m - 19696q\,2m,$
	سالانه	$y = 882.73 - 59.65t\,2m,$

www.SID.ir

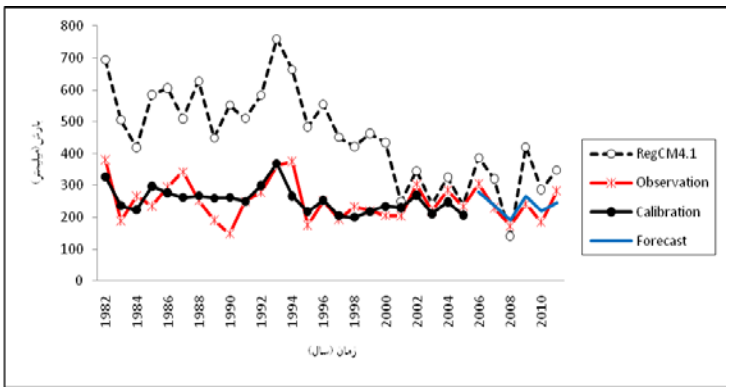
Archive of SID

جدول ٤. مقایسه کارایی روش دینامیکی و دینامیکی-آماری (با کاربرد روش پس‌پردازش آماری) در پیش‌بینی بارش ماهانه، فصلی و سالانه شمال‌غرب.

ایستگاه	مقاطع زمانی	EF		MBE(mm)		MRE		SDp/SDobs		RMSE(mm)		r		MSSS	
		raw	post	Raw	post	raw	Post	raw	post	Raw	post	raw	post	raw	post
تبریز	ماهانه	۱/٤۹	۰/٦۹	٦/۸	-٦/٦۹	۳٤/٦٤	-۳٤/۱	۱/٦۱	۰/٦	۲٤/۱۸	۱٦/٤٤	۰/٦۹	۰/٦٥	-۰/٤٤	۰/۳۳
	فصلی	۱/۲٥	۰/٤۳	۲۰/٤۱	-۱۱/۹۷	۳٤/٦٤	-۲۰/۳	۰/٦٥	۱/٦٦	٤۱/۷۲	۲٤/۳۹	۰/۸٥	۰/۸٥	-۰/۱٥	۰/٦۱
	سالانه	۰/۷٦	۰/۹۸	۸۱/٦٤	۳/۸۷	۳٤/٦٤	۱/٦٤	۱/۸۷	۱/۸۷	۱۰۲/۳	۲٦/۸۷	۰/۷٦	۰/۸۸	۰/۹۳	۰/۷۸
اردبیل	ماهانه	۸/۷٦	۰/٦۹	۳۱/۲٥	-۲/۱۹	۱٦۷/٤٦	-۱۱/۷	۲/۸٤	۰/۸۸	٥۰/۹٦	۱٤/۲۷	۰/٦٤	۰/٦۳	-۷/٥	۰/۳۳
	فصلی	۱٤/٤۷	۰/۷٦	۹۳/۷٦	۱۰/٦۱	۱٦۷/٤٦	۱۸/۹٥	۲/۹۷	۱/۰۲	۱۱۸/۱۷	۲۷/۰۹	۰/۷٥	۰/٦۸	-۱۲/۲۸	۰/۳۱
	سالانه	-۲/۱٤	۰/۹٤	۳۷٥/۰۲	۱۱/٥۳	۱٦۷/٤٦	٥/۱٥	۲/۳۲	۱/۷٦	۳۸۲/۹۳	٥۲/۲٤	-۰/۰٥	۰/۳٥	۰/۹۸	-۱/۰۹
ارومیه	ماهانه	۰/٥۸	۰/۷۸	-٤/۰۷	-۱۲/۹۲	-۱٤/۷	-٤٦/٦	۰/۹٥	۰/٥۲	۲۲/۸۷	۲٦/٤۳	۰/۷	۰/٦٥	۰/٤۳	۰/۲٤
	فصلی	۰/٤۹	۰/٦۷	-۱۲/۲۱	-۲۹/۰۹	-۱٤/٦۸	-۳٤/۹	۱/۰۳	۰/٥۸	۳۸/۲۷	٤٤/۸۱	۰/۷۹	۰/۸۲	۰/٥٥	۰/۳۹
	سالانه	۰/۹۱	۰/۸٤	-٤۸/۸٤	-۸٤/٤٦	-۱٤/٦۸	-۲٥/٤	۰/۸٥	۱/۱٦	۸۹/۷۱	۱۱٥/۷۹	۰/٤۲	۰/۱۱	-۰/٦۷	-۱/۲۷
خوی	ماهانه	۱/٥٦	۰/۷۸	۷/٤٤	-۷/۲٥	۳۳/۲٤	-۳۲/٤	۱/٥٤	۰/۷	۲٦/۱۸	۱۸/٤۸	۰/٦۳	۰/٥۹	-۰/٥۲	۰/۲٤
	فصلی	۱/٥٥	۱/۰۳	۲۲/۳۳	۰/۸۹	۳۳/۲٤	۱/۳	۱/٦۲	۰/۳۳	٤۸/۹٥	۳۹/۹۸	۰/۷٤	۰/۱۱	-۰/٤۲	۰/۰٥
	سالانه	۰/۷۸	۰/۹٦	۸۹/۳۲	-٤۰/٤۲	۳۳/۲٤	-۱٥/۰	۲/٦٤	۱/۰۳	۱۱٤/۹۸	٤۹/۸	۰/٦۱	۰/٦۳	۰/۸۱	-۰/٥٦

جدول ٥. مقایسه کارایی روش دینامیکی و دینامیکی-آماری (با کاربرد روش پس‌پردازش آماری) در پیش‌بینی بارش ماهانه ایستگاه تبریز.

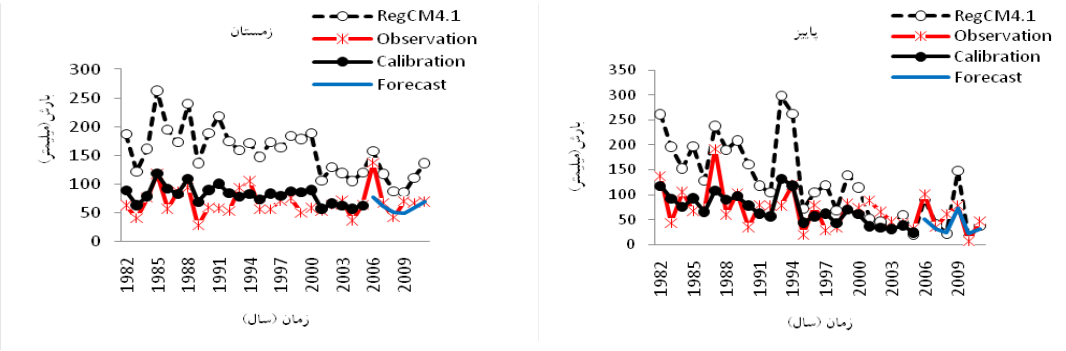
مقاطع زمانی	EF		MBE(mm)		MRE		SDp/SDobs		RMSE(mm)		r		MSSS	
	raw	post	raw	post	raw	Post	raw	post	raw	post	raw	post	raw	post
ژانویه	-۰/٦٥	۰/۰۳	۱۷/٥۲	-۰/٤۱	۱۰٦/۲۳	-۲/٤۹	۰/۸۱	۰/٥۲	۲۲/٥٥	۱٤/٦۹	۰/٥۸	۰/٥۹	-۰/۲٦	۰/٤۷
فوریه	۰/۳	۰/٦۳	۱۷/۲۱	-٦/۰۲	۷۱/٥۲	۲٤/۹۲	۰/۳٦	۰/٦۳	۲۰/۰۷	۱٤/٥۹	۰/۸٤	۰/۸۳	۰/۰۰۲	۰/٤۷
مارس	۰/۸	۰/٦۲	٥/٦۸	۱۸/۲۸	۱٦/۲۲	٥۲/۲۳	۱/۰۲	۰/۳۷	۱٦/٤۸	۲۲/٥۳	۰/٥۲	۰/٥۷	۰/۳۳	-۰/۲٥
آوریل	-۰/٦٦	۰/۸٦	٥۳/۱۷	-٤/۷۱	۱۱٤/۳۹	-۱۰/۱۲	۱/۸۸	۰/۷٤	٦۲/۰٥	۱۷/۸٦	۰/۷	۰/٦۷	-۸/٥	۰/۲۱
می	۰/۸۲	۰/٥	۱/۷۷	-۱۷/۳۸	٦/۱۹	-٦۰/۷	۰/۷	۰/۱۹	۱۳/۹۹	۲۳/٤۸	۰/٦۲	۰/٦	۰/٥۱	-۰/۳۷
ژوئن	۰/٦۸	۰/٤۲	-٤/٤۷	-٤/۳۱	-٤۸/۹۹	-٤۷/۲۹	۰/۳۹	۰/۰۸	۸/٥۳	۱۱/٥۳	۰/۹۷	۰/۹٦	۰/۸۲	۰/٦۷
ژوئیه	۰/۰۱	۰/۳۷	-۱/۹۷	-۰/٤۸	-٤۲/۱۲	-۱۰/۳۲	۰/٥۳	۰/۰۹	۷/۷	٦/۱۷	-۰/۲۸	-۰/۳۷	۰/۸٥	۰/۹۱
اوت	۰/۰٤	۰/٤۷	-۳/۱٥	۰/۰۹	-۷۹/۲٥	۲/۳٥	۰/۳٤	۰/۰۹	٥/۸۹	٤/۳۸	-۰/۳۹	-۰/۳٦	۰/۹۱	۰/۹٥
سپتامبر	۰/٤۹	۰/٤٥	-۸/٦۷	-۷/۰٤	-۷۱/۲۳	-٥۷/۷۸	۰/٥۱	۰/۱۱	۱۲/٤٦	۱۲/۸٦	۰/٦٤	۰/٦۳	۰/٦۱	۰/٥۹
اکتبر	-۰/۰۲	-۰/۱۹	-۱۸/۲۹	-۱۹/٥۸	-٦۹/٥۸	-۷٤/٥۲	۰/۲٤	۰/٥۰	۲۸/۲۹	۳۰/٦۱	۰/٥۳	۰/٥	-۰/۹۸	-۱/۳
نوامبر	۰/۷	۰/۷۹	۷/۱۹	-٦/۲	۳۷/۰۸	-۳۲	۱/٦۱	۰/٤۸	۱۱/۸۱	۹/۸٤	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/٦٥	۰/۷٦
دسامبر	-۲/۷٤	۰/٦٦	۱٥/۷	٤/۰٤	۱٦۷/٦	٤۳/۲	۲/۷۷	۰/۸۸	۲۳	٦/۹۳	۰/٦۷	۰/٦۹	-۰/۳۱	۰/۸۸



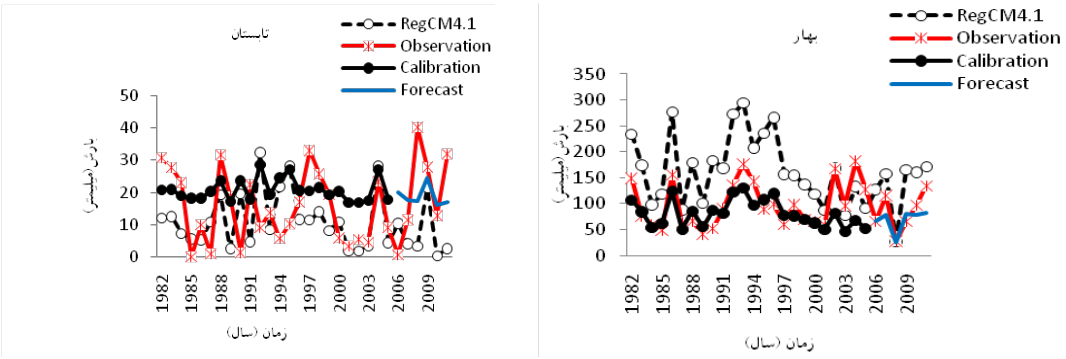
شکل ۲. کارایی مدل‌سازی بارش سالانه در ایستگاه تبریز (برای نمونه) با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM4. دورهٔ آموزش ۱۹۸۲-۲۰۰۵، دوره درستی‌سنجی ۲۰۰٦-۲۰۱۱. محور افقی سال و محور قائم بارش برحسب میلی‌متر است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. کارایی مدل‌سازی بارش فصلی در ایستگاه تبریز (برای نمونه) با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM4. دوره آموزش ۲۰۰۵-۱۹۸۲، دوره درستی‌سنجی ۲۰۰۶-۲۰۱۱. محور افقی سال و محور قائم بارش برحسب میلی‌متر است.



ادامه شکل ۳. کارایی مدل‌سازی بارش فصلی در ایستگاه تبریز (برای نمونه) با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM4. دوره آموزش ۲۰۰۵-۱۹۸۲، دوره درستی-سنجی ۲۰۰۶-۲۰۱۱. محور افقی سال و محور قائم بارش برحسب میلی‌متر است.

علت این اتفاق آن است که در دورهٔ واسنجی، در ایستگاه ارومیه مانند سایر ایستگاه‌ها بارش شبیه‌سازی بیش از بارش مشاهداتی بوده است، لذا مدل وایازشی از داده‌هایی برای تشکیل معادله خطی استفاده کرده که عمدتاً فراپیش‌بینی داشته‌اند. ازاین‌رو مدل در جهت کاهش مقادیر tpr و رسیدن به مقدار صحیح مشاهداتی مؤثر بوده است. اما ازآنجاکه دوسوم دورهٔ ارزیابی، مدل فروپیش‌بینی داشته، طبیعتاً اِعمال معادلهٔ وایازشی حاصل بر چنین داده‌هایی، موجب کاهش مقادیر بیشتر tpr شده و وضعیت را از حالت خام و اولیه بدتر کرده است.

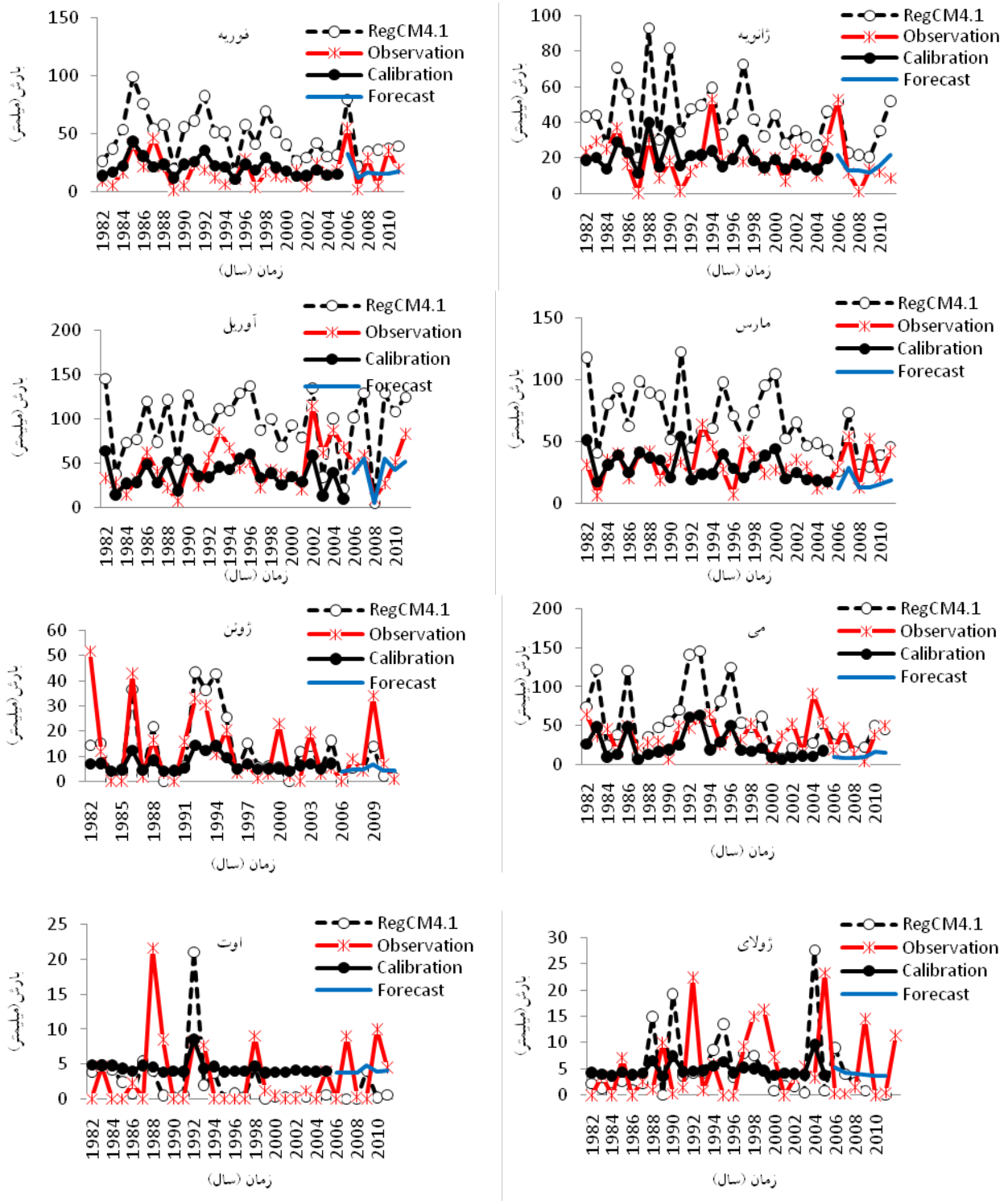
لازم به ذکر است سایر سنجه‌های آماری محاسباتی نیز کم و بیش همین نتایج را تأیید می‌کنند.

در شکل ۵، خطای نرمال بارش پیش‌بینی‌شده ماهانه تبریز، برای حالت‌های پیش و پس از پس‌پردازش نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای نمونه در ایستگاه تبریز خطای نرمال‌شده بارش پیش از پس‌پردازش

www.SID.ir

Archive of SID

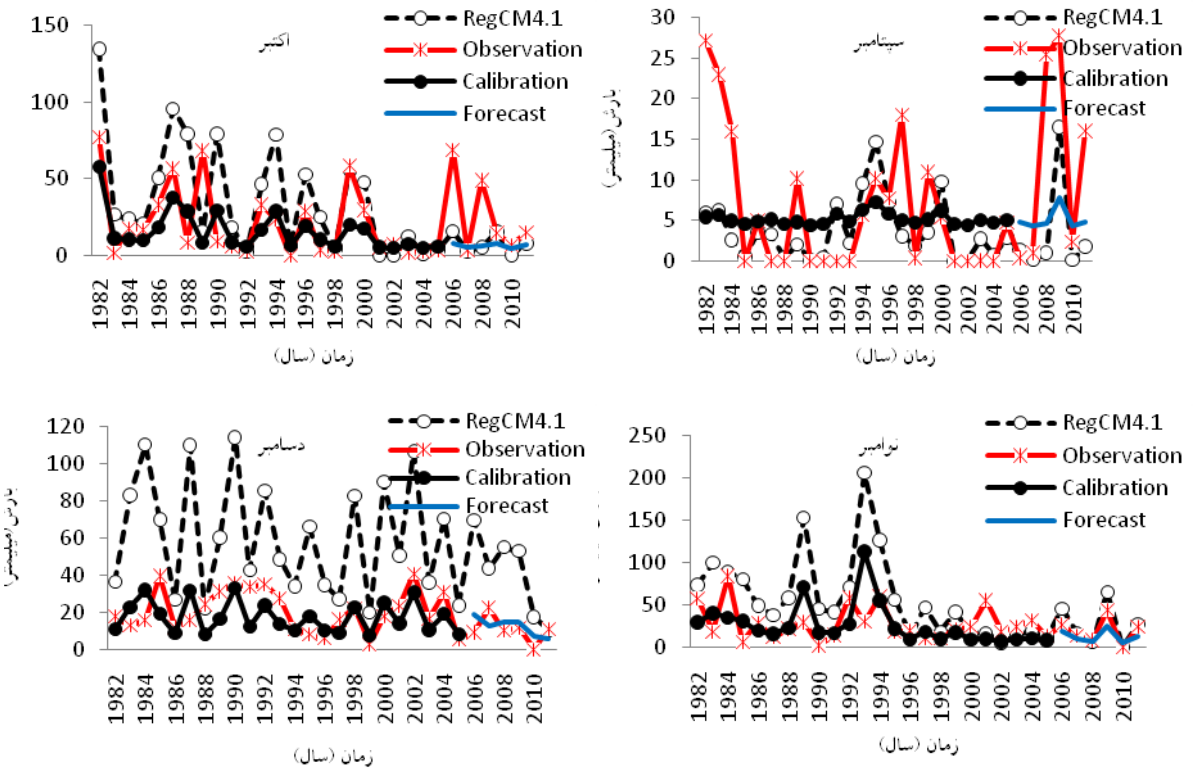
آماری دارای پراکنش بالاتر بوده و در حدود ۰/۹ میلی‌متر توزیع شده است؛ درحالی‌که پس از کاربست پس‌پردازش، پراکنش آن کمتر و میانگین آن صفر و بیانگر کاهش در اُریبی بارش ماهانه است.



شکل ٤. کارایی مدل‌سازی بارش ماهانه در ایستگاه تبریز (برای نمونه) با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM4. دوره آموزش ۲۰۰۵-۱۹۸۲، دوره درستی‌سنجی ۲۰۱۱-۲۰۰٦. محور افقی سال و محور قائم بارش برحسب میلی‌متر است.

www.SID.ir

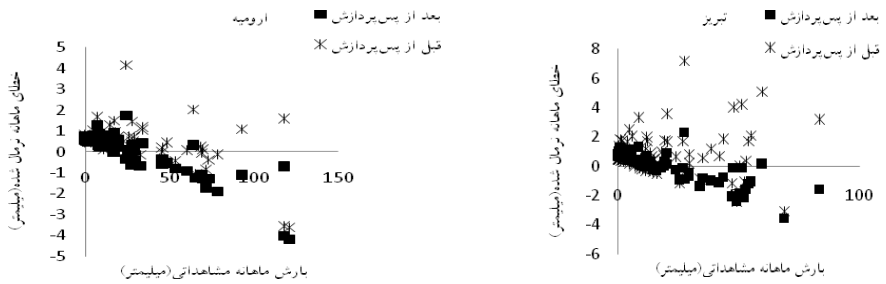
Archive of SID



ادامه شکل ٤. کارایی مدل‌سازی بارش ماهانه در ایستگاه تبریز (برای نمونه) با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM4. دوره آموزش ۲۰۰۵–۱۹۸۲، دوره درستی‌سنجی ۲۰۱۱–۲۰۰۶. محور افقی سال و محور قائم بارش برحسب میلی‌متر است.

جدول ٦. مقایسه کارایی روش دینامیکی و دینامیکی–آماری (با کاربرد روش پس‌پردازش آماری) در پیش‌بینی بارش فصلی ایستگاه تبریز.

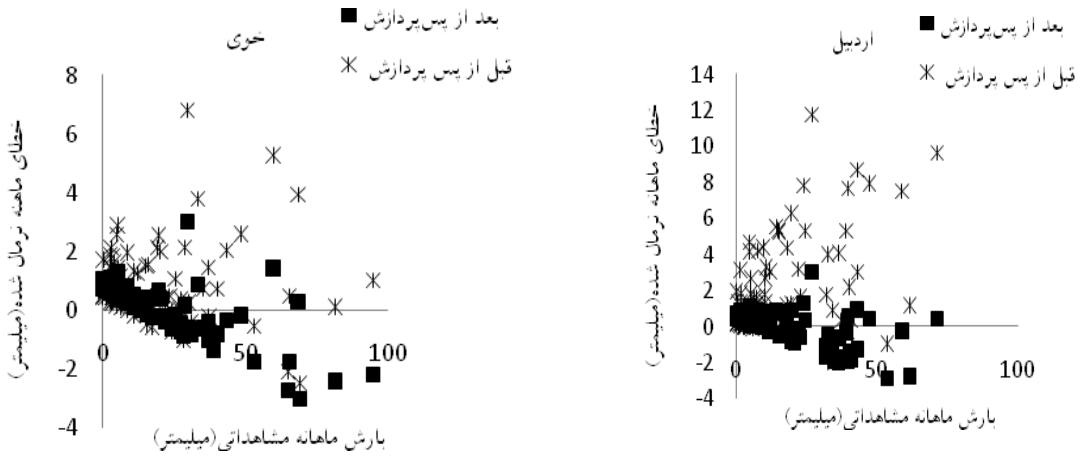
مقاطع	EF		MBE(mm)		MRE		SDp/SDobs		RMSE(mm)		r		MSSS	
زمانی	Raw	post	raw	post	raw	post	raw	post	raw	post	raw	post	raw	post
زمستان	۰/۵۲	۰/۸۳	٤۰/٤	−۱٤/٤	۵۳/٤۲	−۱۹/۰٤	۰/۸۷	۰/۳٤	٤٤/۱	۲٦/۳۸	۰/۸	۰/۸	−۰/۵۹	۰/٤۳
بهار	۰/۵۵	۰/۹	۵۰/٤۷	−۱۵/۷٤	۵۹/۹۲	−۱۸/٦۹	۱/٤۲	۰/۵۵	۵۹/۱۱	۲۷/۹٤	۰/۸	۰/۸	−۱/۸	۰/۳٦
تابستان	۰/۳۸	۰/۷۱	−۱۳/۷۹	−۱/۹۹	−٦٦/۲۲	−۹/۵٦	۰/۵۳	۰/۲	۲۰/٦۸	۱٤/۰۲	−۰/۰۱	−۰/۰۱	۰/٦۵	۰/۸٤
پاییز	۰/۵۸	۰/۷۳	٤/۵٦	−۱۵/۷٤	۸/۲۹	−۲۸/٦۱	۱/۵٤	۰/٦	۳۳/۰۷	۲٦/۵۹	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۱۱	۰/٤۲



شکل ۵. توزیع خطای بارش پیش‌بینی‌شده بارش ماهانه قبل و بعد از اِعمال پس‌پردازش.

www.SID.ir

Archive of SID



ادامه شکل ۵. توزیع خطای بارش پیش‌بینی‌شده بارش پیش و پس از کاربست پس‌پردازش.

به طور کلی با اِعمال فرایند پس‌پردازش، اُریبی و خطای نسبی محدوده مورد بررسی- با استناد به ایستگاه‌های تحت بررسی- در پیش‌بینی بارش سالانه از ۱۲۴/۳میلی‌متر و ۵۵/۲ درصد به‌ترتیب به ۲۷/۴- میلی‌متر و ۸/۴- درصد کاهش یافته است. این امر بدین معنا است که در صورت استفاده مستقیم از برون‌داد مدل دینامیکی RegCM4 با بارش‌هایی غیر واقعی و بیشتراز واقعیت منطقه مواجهیم، درحالی‌که کاربست پس‌پردازش منجر به تعدیل بارش‌های شبیه‌سازی شده و رساندن آنها حتی به اندکی پایین‌تر از مقادیر واقعی خواهد شد.

۳ نتیجه‌گیری

قرا گرفتن ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک که حاصل آن کمبود بارش است و در کنار آن پیامدهای محتمل تغییر اقلیم که تشدید بروز خشکسالی‌های ممتد و یا وقوع سیل‌های شدید و مخرب است، اهمیت پیش‌بینی بارش در مقیاس ماهانه تا سالانه را دوچندان می‌کند. هرگونه تصمیم‌گیری مدیریتی و برنامه‌ریزی در بخش آب مستلزم آگاهی از شرایط آینده منابع آبی است تا مدیران بخش آب، سیاست‌های آتی کشور را در جهت بهینه ساختن، صرف هزینه‌ها و بهره‌وری حداکثر برنامه‌ریزی کنند. در این راستا به‌کارگیری مدل‌های دینامیکی به‌خصوص از لحاظ روند وقوع بارش می‌تواند نقش موثری داشته باشد. اما برای بهره‌برداری از برون‌داد مدل‌های پیش‌گفته، بهتر است پس‌پردازش‌هایی بر آنها صورت گیرد. در این تحقیق فرایند پس‌پردازش آماری روی بارش مدل‌سازی شده با مدل‌دینامیکی RegCM4 که با تفکیک افقی ۳۰×۳۰ کیلومترمربع اجرا شده بود، صورت گرفت که منجر به بهبود عددی پیش‌بینی بارش شد؛ به‌طوری‌که در محدودهٔ مطالعاتی در مقطع سالانه ۱۲۴/۳ میلی‌متر اُریبی اولیه حاصل از برون‌داد خام مدل به ۲۷/۴- میلی‌متر، و ۵۵/۲ درصد خطای نسبی به ۸/۴- درصد کاهش یافت. این امر بدین مفهوم است که برون‌داد خام مدل RegCM براساس شرایط اجرای صورت گرفته از جمله فاصله نقاط شبکه، طول و عرض جغرافیایی مرکز مدل و محدودهٔ انتخابی مدل، دوره شبیه‌سازی، نوع داده‌های ورودی و

www.SID.ir

Archive of SID

داده‌های تحلیل شده، گام زمانی مدل و نوع طرحواره اجرایی، بارش را به‌طور متوسط با ۱۲۴/۳ میلی‌متر بیش‌برآورد شبیه‌سازی می‌کند. این در حالی است که کاربست پس‌پردازش، باعث کاهش میزان بارش و رسیدن آن به ۲۷/۴ میلی‌متر کمتر از میزان واقعی شده است. گرچه اُریبی نهایی باز هم با مقادیر مشاهداتی اندکی فاصله دارد لیکن نسبت به حالت بدون اِعمال پس‌پردازش مقبول‌تر است. اجرای پس‌پردازش در مقطع فصلی نیز موجب کاهش اُریبی از ۳۱ میلی‌متر به ۷/۴- و خطای نسبی از ۵۵/۲ درصد به ۸/۸- درصد شد. پیش‌بینی ماهانه نیز مؤید ضرورت اِعمال پس‌پردازش روی برون‌داد مدل بود چراکه اُریبی و خطای نسبی در محدودهٔ مورد بررسی به‌ترتیب از ۱۳/۴ به ۵/۳- میلی‌متر و ۸۱/۹ به ۲۱/۸- درصد کاهش داشت. به‌طور خلاصه می‌توان گفت در ایستگاه های همدیدی تبریز، اردبیل و خوی (به‌جز ایستگاه ارومیه) شبیه‌سازی بارش با مدل و شرایط اجرای پیش‌گفته، در اکثر موارد دارای بیش‌برآورد بوده و فاصله زیادی با واقعیت داشته است که اِعمال پس‌پردازش با روش همبستگی چندمتغیره در همهٔ موارد منجر به کاهش اُریبی بارش شده است. لیکن در ایستگاه ارومیه که در حالت خام نیز بارش کمتر از واقعیت شبیه‌سازی می‌شود، اِعمال پس‌پردازش باعث تشدید شرایط شده و مقدار بارش کمتر از قبل برآورد شده است. ممکن است با انتخاب روش دیگری برای پس‌پردازش آماری و یا طرحواره‌های بارشی دیگر بتوان اُریبی ایستگاه ارومیه را کاهش داد. البته این مسئله در مورد سایر ایستگاه‌ها نکته مثبت تلقی می‌شود و منجر به تعدیل مقدار شبیه‌سازی اولیه و همخوانی بیشتر با داده‌های مشاهداتی شده است. نتیجه حاصل با تحقیقات صورت گرفته در مناطق گوناگون کشور، چه در زمینه کارایی مدل RegCM و چه در زمینهٔ اِعمال پس‌پردازش، انطباق کامل دارد؛ برای نمونه، بررسی صورت گرفته برای پیش‌بینی بارش فصلی در استان فارس (محمدی، ۱۳۹۲) در ۵۷/۱ درصد موارد کاربست مدل RegCM4 و ۳۳/۳ درصد موارد اِعمال پس‌پردازش به روش وایازش چندمتغیره خطی را تأیید می‌کند. لذا با توجه به کارایی روش مورد استفاده، پیشنهاد می‌شود با تهیه داده‌های شرایط مرزی از مدل‌های گردش کلی جوّ، از مدل RegCM برای پیش‌بینی بارش در مقیاس زمانی ماهانه تا فصلی در کشور استفاده شود.

تشکر و قدردانی

نگارندگان از همکاری مؤثر گروه پژوهشی تغییر اقلیم پژوهشکدهٔ هواشناسی مشهد صمیمانه سپاسگزاری می‌کنند.

منابع

آزادی، م.، تقی‌زاده، ا. و معماریان، م.ح. ، ۱۳۸۹، مقایسه پیش‌بینی بارش دو مدل منطقه‌ای MM5 و WRF روی ایران: مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۳-۲۱ اردیبهشت، موسسه ژئوفیزیک، ۱۵۲-۱۴۸.

آزادی، م.، جعفری، س.، میرزایی، ا. و عربلی، پ.، ۱۳۸۷، پس‌پردازش برون‌داد مدل میان‌مقیاس MM5 برای دمای بیشینه و کمینه با استفاده از فیلتر کالمن: مجله فیزیک زمین و فضا، **۳٤** (۱) ، ۶۵-۶۱.

آزادی، م. شیرغلامی، م.ر. حجام، س. ، ۱۳۸۹، پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای بارندگی در ایران: مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران،۲۳-۲۱ اردیبهشت، موسسه ژئوفیزیک، ۹۴-۹۱.

بابائیان، ا.، کریمیان، م. و مدیریان، ر.، ۱۳۹۱، پس‌پردازش برون داد مدل دینامیکی MRI-CGCM3 برای پیش-بینی فصلی بارش استان خراسان رضوی: مجله ژئوفیزیک ایران، **۷** (۳) ، ۱۳۳-۱۱۹.

www.SID.ir

Archive of SID

مدیریان، ر.، بابائیان، ا. و کریمیان، م.، ۱۳۸۸، پیکربندی بهینه‌مدل RegCM3 برای شبیه‌سازی بارش و دما در فصل پاییز منطقه خراسان در دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۱: فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی ، ۷۰ ، ۱۲۰-۱۰۷.

میرزایی، ا. آزادی، م. و محب الحجه، ع.، ۱۳۸۳، مطالعه کمی اثر خلیج فارس و دریای عمان در تغذیه رطوبتی سامانه همدیدی در ایران با استفاده از مدل منطقه‌ای اقلیمیRegCM3 : نهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، ۱۹-۱۷ اسفند، دانشگاه شیراز.

محمدی، ف.، ۱۳۹۲، پیش‌بینی فصلی بارش استان فارس با مدل RegCM : اقلیم‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد،گروه جغرافیا.

هدایتی، ا.، آزادی، م.، ۱۳۸۹، راستی‌آزمایی پیش‌بینی بارش مدل منطقه‌ای MM5 روی ایران: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۶ (۳) ، ۱۲۹-۱۱۵.

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, 115(1), 305-322

Afzaal, M., and Hussain, A., 2006, Numerical simulation of summer monsoon precipitation of 1992 over Pakistan: Pakistan J. Meteorology, **3**(5), 57-67.

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.

Francisco, R., V., 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., 2014, Assessment of RegCM4 simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico: Clim. Dyn., **42**, 629-647.

Islam, N., and Rahman, M., Uddin Ahmed, A., Romee, A., 2007, Comparison of RegCM3 simulated meteorological parameters in Bangladesh, Part I-Preliminary result for rainfall: Sri Lankan J. Physics, **8**, 1-9.

Nandozi, C. S., Majaliwa, J. G. M., Omondi, P., Komutunga, E., Aribo, L., Isubikalu P., Tenywa, M. N., and Massa-Makuma, H., 2012, Reginal climate model performance and prediction of seasonal rainfall and surface temperature of Uganda: African Crop Science J,. 20, 213-225.

Schmidli, J., Goodess, C. M., Frei., C., Haylock, M. R., Hundecha, Y. Ribalaygua, J., and Schmith, T., 2007, Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps: J. Geophysical Research, 112, D04105, doi: 10.1029/2005JD007026.

Paeth, H., 2011, Post-processing of simulated precipitation for impact research in West Africa. Part I: Model output statistics for monthly data: Climate Dynamics, **36**(7), 1321-1336.

Pal, J., Giorgi, F., Bi, X., 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, 1396-1409.

Wallach, D., Makowski, D., and Jones, J. W., 2006, Working with Dynamic Crop Models. Evaluation, Analysis, Parameterization and Applications: Elsevier, e-book.

www.SID.ir

Archive of SID

and analysis of RegCM3 simulated summer rainfall over the Huaihe river of China: Acta Meteorologica Sinica, **25**, 386-394.

WMO, 1992, No. 485, New AttachmentII-8 to the Manual on the GDPFS. Standardised Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF).

Zong, P., and Wang, H., 2011, Evaluation

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir