

عملکرد نسخه چهارم مدل اقلیمی منطقه‌ای با پارامترسازی‌های فیزیکی مختلف در کشور ایران: مطالعه موردی سال ۲۰۱۰

امید علیزاده چوبیری^{۱*}، ساجده مرجانی^۲، و مرتضی قدیمی^۲

^۱ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹)

چکیده

عملکرد RegCM4 با چهار پارامترسازی مختلف برای شبیه‌سازی دمای هوای نزدیک سطح زمین و بارش در منطقه ایران طی سال ۲۰۱۰ در مقایسه با داده‌های مشاهداتی CRU بررسی شد. در این بررسی از داده‌های مدل CFSv2 به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی RegCM4 استفاده شد. بررسی الگوی اریبی دمای هوا در این شبیه‌سازی‌ها نشان داد که بیشترین اریبی منفی در سواحل جنوبی دریای خزر و ارتفاعات رشته کوه البرز و بیشترین اریبی مثبت در دشت لوت و جنوب ایران و از نظر زمانی در اواخر فصل بهار، فصل تابستان و اوایل فصل پاییز اتفاق می‌افتد. بررسی میانگین ماهانه قدرمطلق اریبی دمای هوا نشان داد که در دو مورد از شبیه‌سازی‌ها با طرحواره لایه مرزی هلستلگ (Holstlag) اریبی کمتری وجود دارد. بررسی خطای ریشه میانگین مربعات دمای هوا برای این چهار شبیه‌سازی نشان داد که طرحواره‌های لایه مرزی هلستلگ و UW PBL به ترتیب در ماه‌های سرد و گرم سال عملکرد بهتری دارند. همچنین استفاده از طرحواره همرفت Tiedtke در کنار طرحواره لایه مرزی هلستلگ می‌تواند خطای ریشه میانگین مربعات دمای هوا را در فصل‌های گرم سال به شدت کاهش دهد؛ بنابراین استفاده از طرحواره لایه مرزی هلستلگ در RegCM4 برای فصل‌های سرد سال و استفاده از همین طرحواره در کنار طرحواره همرفت Tiedtke برای کل سال در منطقه ایران پیشنهاد می‌شود. در هر چهار شبیه‌سازی در بیشتر ماه‌های سال اریبی مثبت بارش برای منطقه ایران مشاهده شد. با بررسی همبستگی چهار شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی طی ماه‌های مختلف سال، بیشترین همبستگی در جنوب شرق، شرق، مرکز، غرب و شمال غرب ایران و کمترین همبستگی در ارتفاعات البرز، دامنه‌های غربی رشته کوه زاگرس و نیمه غربی جنوب ایران و شمال غرب دشت کویر مشاهده شد. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از طرحواره همرفت Tiedtke، بارش شبیه‌سازی شده همبستگی زمانی و مکانی بیشتری با بارش مشاهداتی در منطقه ایران خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: مدل اقلیمی منطقه‌ای، دمای هوا، بارش، طرحواره لایه مرزی، طرحواره همرفت

۱ مقدمه

از آنجاکه تغییرات دمای سطح دریا، رطوبت خاک، پوشش برف و میزان یخ دریا در مقایسه با تغییرات جوّی به نسبت آهسته است، پیش‌بینی فصلی شرایط اقلیمی امکان‌پذیر شده است. با آگاهی از تکامل دینامیکی و برهم‌کنش این مؤلفه‌های کندی‌سامانه زمین که به‌عنوان شرایط مرزی برای جوّ عمل می‌کنند، پیش‌بینی فصلی در طول سال‌های گذشته تکامل یافته است (تروکولی، ۲۰۱۰).

پیش‌بینی‌های فصلی اغلب براساس یکی از روش‌های آماری یا دینامیکی بنا نهاده شده‌اند، اگرچه به‌منظور افزایش کیفیت این پیش‌بینی‌ها، ترکیبی از روش‌های دینامیکی و آماری نیز استفاده می‌شود (برای مثال، روش پس‌پردازش آماری پیش‌بینی‌های دینامیکی). روش‌های آماری که از اواخر دهه ۱۸۰۰ به‌کارگرفته شده‌اند، با توجه به داده‌های مربوط به گذشته به مدل‌سازی رابطه بین متغیرهای اقلیمی که می‌خواهند پیش‌بینی شوند و واداشت‌های مؤثر (مثل دمای سطح دریا) می‌پردازند. این روش‌ها از نظر محاسباتی کم‌حجم هستند، اما به‌کارگیری آنها به داده‌های طولانی‌مدت با تفکیک مکانی بالا نیاز دارد (ویلی، ۱۹۹۸ و یانگ و همکاران، ۲۰۱۲). درمقابل، روش‌های دینامیکی که در چند دهه اخیر گسترش یافته‌اند، براساس روابط فیزیکی حاکم بر جوّ و اقیانوس و دیگر مؤلفه‌های سامانه زمین بنا نهاده شده‌اند (تروکولی، ۲۰۱۰). در روش‌های دینامیکی، مؤلفه‌های مختلف سامانه زمین و برهم‌کنش بین آنها با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی شبیه‌سازی می‌شوند. برخلاف روش‌های آماری، در روش دینامیکی به داده‌های طولانی‌مدت با تفکیک مکانی بالا نیاز نیست، اما فرایندهای فیزیکی در مدل اقلیمی باید به‌خوبی بیان شوند تا پیش‌بینی‌های انجام‌شده مدل گردش کلی را بهبود بخشند. مدل‌های دینامیکی اغلب به‌دلیل پیچیدگی و هزینه محاسباتی گزافی که دارند، کمتر از

مدل‌های آماری برای پیش‌بینی‌های فصلی استفاده شده‌اند. باوجوداین، گسترش مدل‌های دینامیکی باعث درک بهتر تکامل و برهم‌کنش مؤلفه‌های مختلف سامانه زمین و بهبود عملکرد پیش‌بینی‌های اقلیمی شد (تروکولی، ۲۰۱۰). با وجود محدودیت مدل‌های دینامیکی برای پیش‌بینی فصلی مانند تأثیر نوفه جوّ و رشد خط‌های اولیه در این مدل‌ها، نتایج بسیاری از مطالعات نشان می‌دهند مدل‌های دینامیکی اغلب نسبت به مدل‌های آماری عملکرد بهتری در پیش‌بینی فصلی دارند (برای مثال، ون‌الدنورگ و همکاران، ۲۰۰۵ و لندمن و همکاران، ۲۰۰۹). این موضوع به‌ویژه زمانی بهتر نمایان شد که پیشرفت‌هایی در آغازگری مدل‌های دینامیکی با استفاده از داده‌گواهی حاصل شد (بالماسدا و اندرسون، ۲۰۰۹).

اولین بار در دهه ۱۹۸۰ میلادی، از مدل‌های دینامیکی برای پیش‌بینی رویدادهای انسو استفاده شد (کین و همکاران، ۱۹۸۶). پس از آن با پیشرفت‌هایی که در فناوری رایانه‌ها صورت گرفت، مدل‌های جفت‌شده گردش کلی جوّ و اقیانوس (Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) استفاده شدند. با پیشرفت‌هایی که در زمینه پارامترسازی فرایندهای زیرشبکه (sub-grid) صورت گرفت، نتایج این مدل‌های جفت‌شده بهبود یافتند و در نتیجه، در دهه ۱۹۹۰ مراکز پیش‌بینی فصلی در دنیا شروع به استفاده از مدل‌های گردش کلی برای پیش‌بینی‌های فصلی کردند (جی و همکاران، ۱۹۹۴ و استاکدل و همکاران، ۱۹۹۸). البته مدل‌های دینامیکی گردش کلی از دو روش متفاوت برای پیش‌بینی فصلی استفاده می‌کنند. در روش اول، تنها از یک مدل گردش کلی جوّ استفاده می‌شود و دمای سطح دریا، که با یک مدل اقیانوسی یا با استفاده از روش‌های آماری تعیین شده است، در مدل تعیین و استفاده می‌شود. در روش دوم، یک مدل جفت‌شده به‌کار می‌رود که در آن همه زیرسامانه‌های اقلیمی به‌طور هم‌زمان با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند.

مدل‌های گردش کلی جفت‌شده که بیانگر فرایندهای فیزیکی رخ داده در جو، اقیانوس، سطح زمین و یخ کره هستند، پیشرفته‌ترین مدل‌های دینامیکی هستند که امروزه اغلب در مطالعات اقلیمی در مقیاس جهانی استفاده می‌شوند (دومنگت و رزنی، ۲۰۱۸). با این حال، به دلیل محدودیت‌هایی که در سرعت پردازش کامپیوترها وجود دارد، مدل‌های گردش کلی اغلب با تفکیک افقی و قائم پایین اجرا می‌شوند. به همین دلیل، این مدل‌ها به خوبی می‌توانند فرایندهای اقلیمی بزرگ‌مقیاس نظیر گردش کلی جو و اقیانوس را شبیه‌سازی کنند، اما در شبیه‌سازی ویژگی‌های منطقه‌ای یا محلی سامانه اقلیمی به خوبی عمل نمی‌کنند. یکی از دلایل اصلی که باعث خطای سامانمند (systematic error) در نتایج مدل‌های گردش کلی می‌شود این است که به دلیل تفکیک‌های افقی و قائم پایین، برخی از مهم‌ترین فرایندهای اقلیمی باید پارامترسازی شوند. همچنین تفکیک افقی پایین باعث می‌شود که پیش‌بینی‌ها برای مناطق با گستره مکانی کوچک چندان مناسب نباشد؛ در نتیجه، از اواخر دهه ۱۹۸۰ مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (Regional Climate Models, RCMs) با تفکیک افقی و قائم بالاتر، براساس قوانین فیزیکی حاکم بر جو گسترش یافت و پس از آن در مراکز مختلف استفاده شد.

اولین سری از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای را دیکسون و همکاران (۱۹۸۹) و جیورجی و بیس (۱۹۸۹) توصیف کردند. مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای از شبیه‌سازی مدل‌های گردش کلی یا داده‌های بازتحلیل جهانی به عنوان شرایط اولیه و مرزی استفاده می‌کنند و این داده‌ها را به طور مکانی و زمانی در یک منطقه مشخص مقیاس کاهی دینامیکی می‌کنند. به این ترتیب، مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای، ویژگی‌های جغرافیایی (مثل عوارض زمین، نوع و پوشش سطح و مناطق ساحلی) و پدیده‌های هواشناسی (مثل گردش‌های همرفتی میان‌مقیاس) را که مدل‌های گردش کلی قادر به

شبیه‌سازی آنها نیستند، به خوبی مدل‌سازی می‌کنند (جیورجی و گاتوسکی، ۲۰۱۵). به عبارت دیگر، مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای در پاسخ به واداشت‌هایی که در مقیاس منطقه‌ای دریافت می‌کنند، اطلاعات منطقه‌ای بیشتری را در مقایسه با مدل‌های گردش کلی در اختیار قرار می‌دهند که در نتیجه آن، تغییرپذیری منطقه‌ای شرایط اقلیمی و وقوع رویدادهای فرین هواشناسی بهتر بیان می‌شوند. شایان ذکر است که در چند دهه اخیر پارامترسازی فیزیکی در مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای گسترش قابل توجهی داشته که منجر به بهبود عملکرد این مدل‌ها شده است (برای مثال، لیانگ و همکاران، ۲۰۰۱ و ساح و همکاران، ۲۰۱۲).

با توجه به اینکه مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای فرایندهای محلی و منطقه‌ای را بهتر شبیه‌سازی می‌کنند، نتایج مطالعات گذشته نیز تأیید کرده‌اند که پیش‌بینی‌های فصلی تا دهه‌ای مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای در مقایسه با مدل‌های گردش کلی دقیق‌ترند. برای مثال، دیز و همکاران (۲۰۱۱) به منظور پیش‌بینی فصلی در منطقه اروپا از روش مقیاس کاهی دینامیکی داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت وضع هوا (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)) استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مقیاس کاهی دینامیکی در مقایسه با نتایج مدل گردش کلی پیش‌بینی‌های بهتری را در فصل پاییز و برای رویدادهای خشک ارائه می‌دهد. دایرو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نسخه سوم مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM3 (Climate Model version 3) داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت وضع هوا (ERA-Interim) را در بخش‌هایی از منطقه آفریقا برای یک دوره ده ساله مقیاس کاهی دینامیکی کردند. نتایج نشان داد که در نتیجه مقیاس کاهی دینامیکی، اریبی (bias) بارش در این منطقه کاهش و تغییرات بین‌سالانه بارش نیز بهبود می‌یابد. جیورجی و گاتوسکی (۲۰۱۵) نشان دادند که

عربستان بیش‌برآورد بارش داشت که به شرایط اولیه و مرزی استخراج‌شده از ECMWF نسبت داده شد. از جمله مطالعاتی که در زمینه مقیاس‌کاهی دینامیکی در ایران انجام شده است می‌توان به مطالعه بابائیان و همکاران (۱۳۹۰) و زرین و همکاران (۱۳۹۴) اشاره کرد. بابائیان و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل منطقه‌ای PRECIS با تفکیک افقی ۰/۴۴ در شبکه‌ای با ابعاد ۲۵۰۰ کیلومتر، برونداد مدل گردش کلی جو HADAM3P را روی ایران در دوره ۱۹۷۶ تا ۱۹۹۰ مقیاس‌کاهی دینامیکی کردند و داده‌های بارش ایران در مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی در دو حالت با و بدون چرخه سولفور را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که میانگین خطای شبیه‌سازی-ها روی ایران در حدود ۵/۳ درصد است و اریبی مثبت بارش در نواحی جنوبی ایران وجود دارد که آن را به تریق رطوبت از یاخته‌های بزرگ مقیاس مدل گردش کلی به ساختار ریز مدل منطقه‌ای نسبت دادند. همچنین اریبی منفی بارش در مناطق جنوبی دریای خزر مشاهده شد که ناشی از ضعف مدل منطقه‌ای PRECIS در پارامترسازی بارش‌های همرفتی این منطقه است. نتایج آنها به‌طور کلی نشان داد که مدل منطقه‌ای PRECIS توانایی شبیه‌سازی بارش در ایران را دارد، اما توانمندی آن در شبیه‌سازی بارش منطقه‌ای و همرفتی ضعیف است. زرین و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از RegCM4 داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR با تفکیک افقی $2/5^\circ \times 2/5^\circ$ را به 20×20 کیلومتر در منطقه فارس مقیاس‌کاهی دینامیکی کردند و سپس از پس‌پردازش آماری به روش رگرسیون چندمتغیره استفاده کردند. نتایج نشان داد مقیاس‌کاهی دینامیکی با RegCM4 تا حد قابل‌قبولی می‌تواند به‌خوبی بارش‌های فصل زمستان را در استان فارس پیش‌بینی کند، درحالی‌که استفاده از روش پس‌پردازش آماری منجر به بهبود نتایج مدل نشد.

همبستگی بین بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در منطقه آلپ اروپا بین ۰/۲ تا ۰/۷ برای مدل گردش کلی EC-Earth و بین ۰/۷۹ تا ۰/۸۵ برای مدل اقلیمی منطقه‌ای است که از داده‌های این مدل گردش کلی به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی استفاده کرده است. نتایج تورما و همکاران (۲۰۱۵) نیز بهبود پیش‌بینی الگوی بارش در مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای را در مقایسه با مدل‌های گردش کلی تأیید کرده است. برانکوویچ و پاتارسیس (۲۰۰۸) داده‌های عملیاتی ECMWF را با استفاده از RegCM با تفکیک افقی ۵۰ کیلومتر در منطقه اروپا و مدیترانه مقیاس‌کاهی دینامیکی کردند. نتایج آنها نشان داد که RegCM برای رویدادهای فرین هواشناسی و در مناطق کوهستانی که به تفکیک افقی بهتری نیاز است، به‌خوبی عمل می‌کند. پاتارسیس و برانکوویچ (۲۰۱۲) با استفاده از RegCM3، نه مورد از پیش‌بینی‌های فصلی همادی ECMWF را مقیاس‌کاهی دینامیکی کردند. نتایج پیش‌بینی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین نشان داد که وقتی رطوبت خاک آغازین از پیش‌بینی‌های فصلی ECMWF استخراج شود، نتایج RegCM در مقایسه با مدل جهانی بهبود می‌یابد. دایرو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از RegCM3 داده‌های بازتحلیل پیش‌بینی‌های همادی فصلی ECMWF را در شرق آفریقا برای یک دوره ۱۰ ساله مقیاس‌کاهی دینامیکی کردند. نتایج آنها نشان داد که RegCM3 به‌خوبی توزیع مکانی و تغییرات بین‌سالانه بارش را در منطقه شرق آفریقا شبیه‌سازی می‌کند و در مقایسه با داده‌های مدل جهانی ECMWF، تغییرات بین-سالانه بارش با RegCM3 بهتر شبیه‌سازی می‌شود. در مطالعه مذکور، از RegCM3 برای پیش‌بینی‌های یک تا چهار ماهه در دوره آینده نیز استفاده شده است. این مدل اقلیمی منطقه‌ای به‌خوبی تغییرپذیری مکانی و زمانی بارش را در منطقه شبیه‌سازی کرد، اما در منطقه شبه‌جزیره

لحاظ کردن دیگر واداشت‌های اقلیمی طبیعی مثل نوسان اطلس شمالی (North Atlantic Oscillation (NAO))، دوقطبی اقیانوس هند (Indian Ocean Dipole (IOD)) و الگوی اقیانوس آرام-آمریکای شمالی (Pacific North American (PNA)) نیز در مدل‌های اقلیمی باعث بهبود پیش‌بینی‌های فصلی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای شده است (تروکولی، ۲۰۱۰). با وجود اهمیت اثرهای دورپیوندی اشاره‌شده، نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهند که به‌منظور بهبود نتایج پیش‌بینی‌های فصلی، به برخی دیگر از ویژگی‌های سامانه اقلیمی نیز باید توجه شود (سیگموند و همکاران، ۲۰۱۳ و کوهن و همکاران، ۲۰۱۷)؛ برای مثال، کوهن و همکاران (۲۰۱۷) استدلال کردند که در چند دهه اخیر که پدیده تقویت شمالگان (Arctic amplification) اتفاق افتاده است، علاوه بر اهمیت تأثیر وقوع رویدادهایی نظیر انسو در مناطق حاره‌ای بر تغییرپذیری بین‌سالانه اقلیم در عرض‌های میانی، تأثیر شرایط حاکم در قطب شمال بر الگوهای جوی در عرض‌های میانی نیز باید در مدل‌های گردش کلی گنجانده شود. سیگموند و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان دادند که لحاظ کردن برهم‌کنش پوشش سپهر/وردسپهر در مدل‌های اقلیمی باعث بهبود عملکرد پیش‌بینی‌های فصلی مدل‌های گردش کلی می‌شود.

با توجه به اقلیم نیمه‌خشک و خشک اغلب مناطق ایران، تغییر دمای هوا و میزان بارش در سال‌های مختلف تأثیر چشمگیری بر کشاورزی و اقتصاد ایران می‌گذارد؛ بنابراین استفاده از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای با تفکیک مکانی بالا جهت صدور پیش‌بینی‌های ماهانه و فصلی در منطقه ایران حائز اهمیت است. جهت استفاده از نتایج این مدل‌ها، ابتدا باید عملکرد آنها ارزیابی شود؛ از این رو هدف از مطالعه حاضر، بررسی عملکرد نسخه چهارم مدل اقلیمی منطقه‌ای (Regional Climate Model version 4 (RegCM4)) با چهار پارامترسازی مختلف در شبیه‌سازی دمای هوای نزدیک سطح زمین و بارش در منطقه ایران

شایان ذکر است که از روش‌های آماری نیز جهت مقیاس‌کاهی در ایران به کرات استفاده شده است؛ برای مثال، بابائیان و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از روش‌های آماری رگرسیون چندگانه، میانگین متحرک و شبکه عصبی مصنوعی برای پس‌پردازش برونداد مدل دینامیکی MRI-CGCM3 جهت پیش‌بینی‌های ماهانه برخی متغیرهای هواشناسی در سه ایستگاه همدیدی مشهد، سبزوار و تربت حیدریه استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که اعمال پس‌پردازش آماری برونداد مستقیم مدل دینامیکی موجب بهبود پیش‌بینی ماهانه بارش بین شش درصد در روش میانگین متحرک تا بیست درصد در روش رگرسیون چند-متغیره می‌شود و کارایی روش رگرسیون چندگانه به‌مراتب از دو روش میانگین متحرک و شبکه عصبی بهتر است. براساس منحنی ROC (Receiver Operating Characteristic) پیش‌بینی‌های در محدوده نرمال تا بیش از نرمال از صحت بیشتری برخوردار هستند.

در زمینه عوامل دورپیوندی مختلف تأثیرگذار بر تغییرات بین‌فصلی و سالانه اقلیم مناطق مختلف دنیا و لزوم لحاظ کردن آنها در مدل‌های اقلیمی مورد استفاده برای پیش‌بینی فصلی نیز به‌ویژه در سال‌های اخیر مطالعات زیادی انجام شده است. ال‌نینو-نوسان جنوبی (انسو) (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) مهم‌ترین عامل تغییر-پذیری سامانه اقلیمی در مقیاس جهانی است (نیلین، ۲۰۱۱)؛ بنابراین انسو در مناطق حاره‌ای و جنب‌حاره‌ای مهم‌ترین عاملی است که در پیش‌بینی‌های فصلی مورد توجه قرار می‌گیرد (تروکولی، ۲۰۱۰) به‌ویژه اینکه مطالعه علیزاده چوبیری و همکاران (۲۰۱۸) و علیزاده چوبیری و نجفی (۲۰۱۸) به‌خوبی نشان داد که فازهای مختلف انسو بر تغییر-پذیری بین‌سالانه اقلیم ایران تأثیرگذارند. گفتنی است که پیش‌بینی وقوع انسو با مدل‌های اقلیمی به‌دلیل بی‌نظمی در دوره تکرار آن (کلیمن، ۲۰۰۸) به‌نسبت دشوار است؛ بنابراین پیش‌بینی‌های فصلی نیز با مشکل مواجه می‌شوند.

شده است. دلیل استفاده از داده‌های CFSv2 به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی برای انجام مقیاس‌گامی دینامیکی در این شبیه‌سازی‌ها، بی‌درنگ (real-time) بودن داده‌ها است؛ در نتیجه با استفاده از آنها امکان عملیاتی کردن پیش‌بینی‌های ماهانه و فصلی وجود دارد. ویژگی پارامترسازی‌های مختلف به‌کاررفته در این چهار شبیه‌سازی با RegCM4_1، RegCM4_2، RegCM4_3 و RegCM4_4 بیان شده‌اند که ویژگی پارامترسازی‌های مختلف به‌کاررفته در آنها در جدول ۱ آورده شده است. نتایج ارائه‌شده، میانگین ماه‌های مختلف سال ۲۰۱۰ برای هر یک از چهار شبیه‌سازی است. داده‌های CRU تفکیک افقی ۰/۵ درجه دارند، در حالی که تفکیک افقی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با RegCM4، ۳۰ کیلومتر است. از آنجا که هدف از این مطالعه، مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های RegCM4 با داده‌های CRU است و داده‌های CRU، مرجع در نظر گرفته شده‌اند، نقاط شبکه‌ای داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های RegCM4 به نقاط شبکه‌ای داده‌های CRU درونیابی شده‌اند. برای این منظور از روش درونیابی پایستار (conservative) استفاده شده است که بیشتر برای داده‌های با تفکیک بالا به‌کار می‌رود.

۳ صحت‌سنجی RegCM4 با پارامترسازی‌های مختلف

ارایی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین با چهار شبیه‌سازی RegCM4 برای مناطق مختلف ایران در شکل

است. به‌این ترتیب از بین چهار پارامترسازی انتخاب‌شده در RegCM4، بهترین طرحواره‌های فیزیکی در شبیه‌سازی دمای هوای نزدیک سطح زمین و بارش برای منطقه ایران مشخص می‌شود. شایان ذکر است با توجه به اینکه شرایط اولیه و مرزی و پیکربندی مدل در همه شبیه‌سازی‌ها یکسان است و تنها طرحواره‌های فیزیکی متفاوتی استفاده شده‌اند، تفاوت در نتایج شبیه‌سازی‌ها ناشی از استفاده از طرحواره‌های فیزیکی متفاوت است.

۲ داده‌ها

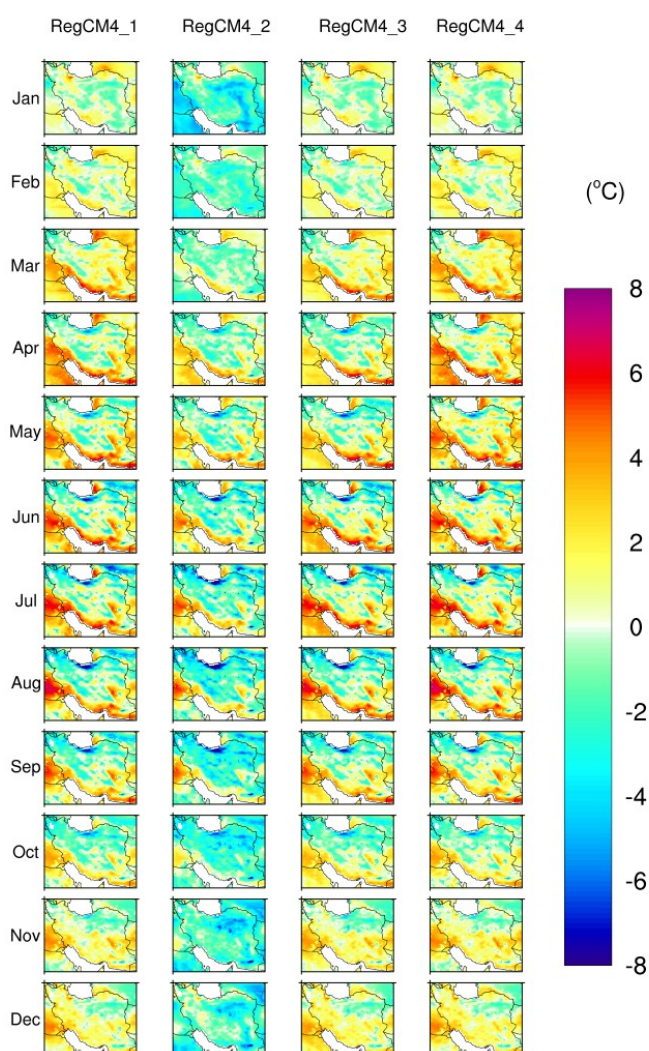
در این مطالعه عملکرد RegCM4 با چهار پارامترسازی مختلف برای شبیه‌سازی دمای نزدیک سطح زمین و بارش در منطقه ایران در مقایسه با داده‌های مشاهداتی CRU بررسی شده است. با توجه به اینکه در داده‌های CRU، از اطلاعات تعداد زیادی از ایستگاه‌های هم‌مدیدی مناطق مختلف جهان از جمله ایران استفاده می‌شود، این داده‌ها در مقایسه با داده‌های بازتحلیل مطابقت بیشتری با مشاهدات دارند. در مقابل، داده‌های بازتحلیل که اغلب با داده‌های سنجش از دور صحت‌سنجی شده‌اند، خطای به‌نسبت زیادی به‌ویژه برای بارش و دمای هوای نزدیک سطح زمین دارند. مقیاس‌گامی دینامیکی با RegCM4 بر داده‌های مدل گردش کلی (CFSv2) (Climate Forecast System version 2) (ساها و همکاران، ۲۰۱۴) در سال ۲۰۱۰ انجام

جدول ۱. ویژگی‌های پارامترسازی‌های فیزیکی به‌کاررفته در چهار شبیه‌سازی انجام‌شده با RegCM4

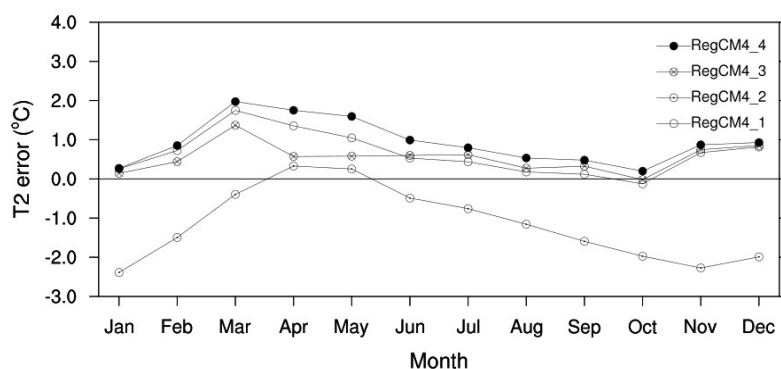
شبیه‌سازی‌ها	طرحواره لایه مرزی	طرحواره همرفت	طرحواره شار اقیانوسی	طرحواره رطوبت	شرایط مرزی جانبی
RegCM4_1	هلستلگ و همکاران (۱۹۹۰)	امانوئل (۱۹۹۱)	زنگ و همکاران (۱۹۹۸)	SUBEX پال و همکاران (۲۰۰۰)	روش واهلش نمایشی (Exponential relaxation technique)
RegCM4_2	مک‌کا و برثرتون (۲۰۰۴)	امانوئل (۱۹۹۱)	زنگ و همکاران (۱۹۹۸)	SUBEX پال و همکاران (۲۰۰۰)	روش واهلش نمایشی
RegCM4_3	هلستلگ و همکاران (۱۹۹۰)	Tiedtke (۱۹۹۶)	زنگ و همکاران (۱۹۹۸)	SUBEX پال و همکاران (۲۰۰۰)	روش واهلش نمایشی
RegCM4_4	هلستلگ و همکاران (۱۹۹۰)	کین-فریچ (۱۹۹۰) و کین (۲۰۰۴)	زنگ و همکاران (۱۹۹۸)	SUBEX پال و همکاران (۲۰۰۰)	روش واهلش نمایشی

و RegCM4_4 نشان می‌دهد که اریبی‌های منفی و مثبت دمای هوا در شمال و جنوب ایران در ماه‌های فصل زمستان مقادیر کمی دارند، اما در فصل بهار به تدریج شروع به افزایش می‌کنند به طوری که در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت به بیشترین مقادیر می‌رسند و مجدداً در فصل پاییز شروع به کاهش می‌کنند. شایان ذکر است بیشینه اریبی‌های سرد و گرم در شبیه‌سازی RegCM4_2 در فصل تابستان نیز مشابه سه شبیه‌سازی دیگر است. با توجه به اینکه تفکیک افقی داده‌های CRU نیم درجه

۱ نشان داده شده است. به جز نتایج شبیه‌سازی RegCM4_2 که الگوی اریبی آن در بیشتر مناطق ایران منفی است، سه شبیه‌سازی دیگر شباهت‌های زیادی از نظر موقعیت مکانی اریبی‌های مثبت و منفی دمای هوا دارند. در این سه شبیه‌سازی، اغلب بیشترین اریبی منفی دمای هوا در سواحل جنوبی دریای خزر و ارتفاعات رشته کوه البرز مشاهده می‌شود، در حالی که بیشترین اریبی مثبت دمای هوا در جنوب ایران و دشت لوت وجود دارد. الگوی اریبی دمای هوا در شبیه‌سازی‌های RegCM4_1، RegCM4_3،



شکل ۱. اریبی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای چهار شبیه‌سازی مختلف با RegCM4 در سال ۲۰۱۰. پارامترسازی‌های فیزیکی به کاررفته در چهار شبیه‌سازی مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند.



شکل ۲. میانگین ماهانه اریبی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در منطقه ایران برای چهار شبیه‌سازی مختلف انجام‌شده با RegCM4 در سال ۲۰۱۰. پارامترسازی‌های فیزیکی به‌کاررفته در چهار شبیه‌سازی مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند.

اگرچه در اجرای RegCM4_2 مقادیر اریبی متفاوت است. این روند مشابه می‌تواند متأثر از شرایط مرزی باشد که از داده‌های CFSv2 گرفته شده است. به‌نظر می‌رسد با توجه به اینکه واداشتی که از بیرون سامانه اعمال می‌شود برای هر چهار شبیه‌سازی یکسان است، تغییر در پارامترسازی‌های فیزیکی در این چهار شبیه‌سازی، روند کلی نمودار اریبی دما را تغییر نداده بلکه آن را جابه‌جا کرده است.

نتایج شبیه‌سازی RegCM4_1 برای دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در ماه‌های ژانویه و فوریه، همه ماه‌های فصل تابستان و پاییز و ماه دسامبر اریبی ناچیزی را نشان می‌دهد. درمقابل، شبیه‌سازی RegCM4_1 برای ماه‌های مارس، آوریل و می اریبی به‌نسبت بزرگی (بیشتر از ۱ °C) را برای دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی RegCM4_2 برای ماه‌های فصل بهار و ژوئن اریبی بسیار اندکی را در دمای هوای ۲ متری از سطح زمین نشان می‌دهد، درحالی‌که برای ماه‌های دیگر سال بیشترین اریبی در مقایسه با دیگر شبیه‌سازی‌ها دیده می‌شود. مقادیر اریبی دمای هوا برای شبیه‌سازی RegCM4_3 تقریباً برابر با مقادیر اریبی شبیه‌سازی RegCM4_1 است با این تفاوت که در ماه‌های مارس، آوریل و می کمتر است.

است و ایستگاه‌های مشاهداتی محدودی به‌ویژه در مناطق کوهستانی مرتفع ایران وجود دارد، می‌توان نتیجه گرفت اریبی منفی دمای هوا در ارتفاعات رشته کوه البرز به‌این دلیل است که شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با RegCM4 نسبت به نتایج CRU به واقعیت نزدیک‌تر هستند و دماهای کم در مناطق مرتفع را به‌خوبی تشخیص می‌دهند. به‌دلیل تفکیک افقی بهتر شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با RegCM4، این شبیه‌سازی‌ها با دقت بهتری می‌توانند الگوی دمای هوا را در مناطق کوهستانی شبیه‌سازی کنند. بیشتر بودن اریبی منفی دمای هوا در مناطق کوهستانی به‌خصوص در شمال ایران در اواخر فصل بهار، طی فصل تابستان و در اوایل فصل پاییز می‌تواند به این دلیل باشد که در این زمان‌ها دامنه‌های کوهستانی کاملاً گرم شده‌اند و عاری از برف هستند، درحالی‌که در ارتفاع‌های بالا که با داده‌های CRU با تفکیک پایین قابل تشخیص نیست، همچنان ممکن است برف وجود داشته باشد و در نتیجه دمای هوا کم است.

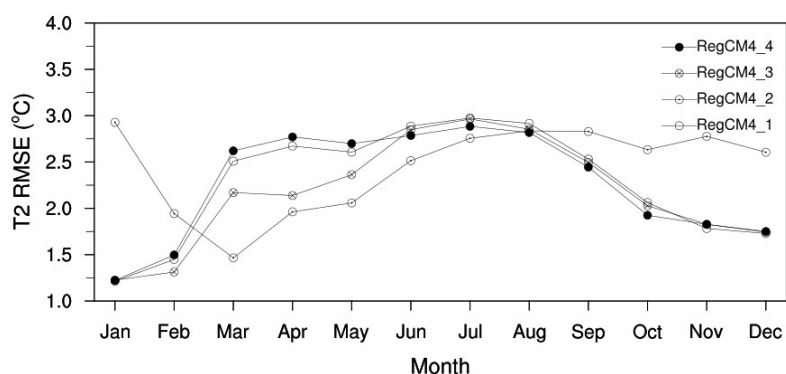
اریبی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین طی ماه‌های مختلف سال برای چهار شبیه‌سازی انجام‌شده که روی ایران میانگین‌گیری شده است، در مقایسه با داده‌های CRU در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که روند تغییرات اریبی دما طی ماه‌های مختلف سال در این چهار شبیه‌سازی مشابه یکدیگر است،

ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در منطقه ایران، به ترتیب شبیه‌سازی‌های RegCM4_3 و RegCM4_1 بهترین عملکرد را دارند. از آنجا که در این دو شبیه‌سازی از طرحواره لایه مرزی هلمستگ (۱۹۹۰) استفاده شده و بیشترین اریبی مربوط به RegCM4_2 است که در آن طرحواره UW PBL به کار رفته است، استفاده از این طرحواره موجود در RegCM4 برای شبیه‌سازی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای منطقه ایران پیشنهاد می‌شود.

بررسی اریبی دمای هوا در منطقه گسترده‌ای مانند ایران نمی‌تواند به تنهایی منجر به نتیجه‌گیری درستی درباره دقت شبیه‌سازی‌ها شود؛ زیرا برای مثال، اریبی‌های منفی بزرگ دمای هوا در شمال ایران و اریبی‌های مثبت بزرگ دمای هوا در جنوب ایران می‌توانند یکدیگر را خنثی کنند که در نهایت منجر به اریبی کوچکی در منطقه ایران می‌شود. به همین دلیل در ادامه، از عملگر آماری ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error (RMSE)) استفاده می‌شود. با استفاده از این عملگر می‌توان بدون خنثی کردن اریبی‌های مثبت و منفی دمای هوا در مناطق مختلف ایران، دقت شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در مناطق مختلف ایران را با یکدیگر مقایسه کرد.

گفت که شبیه‌سازی RegCM4_3 در بیشتر ماه‌های سال اریبی دمای هوای نزدیک سطح کمتری را در مقایسه با شبیه‌سازی‌های دیگر دارد، اگرچه طی ماه مارس نتایج شبیه‌سازی RegCM4_2 به وضوح بهتر از سه شبیه‌سازی دیگر است. مقادیر اریبی دمای هوای نزدیک سطح زمین در شبیه‌سازی RegCM4_4 در تمام ماه‌های سال بزرگ‌تر از سه شبیه‌سازی دیگر است، اما این تفاوت‌ها به غیر از ماه‌های فصل بهار و ژوئن چندان بزرگ نیستند.

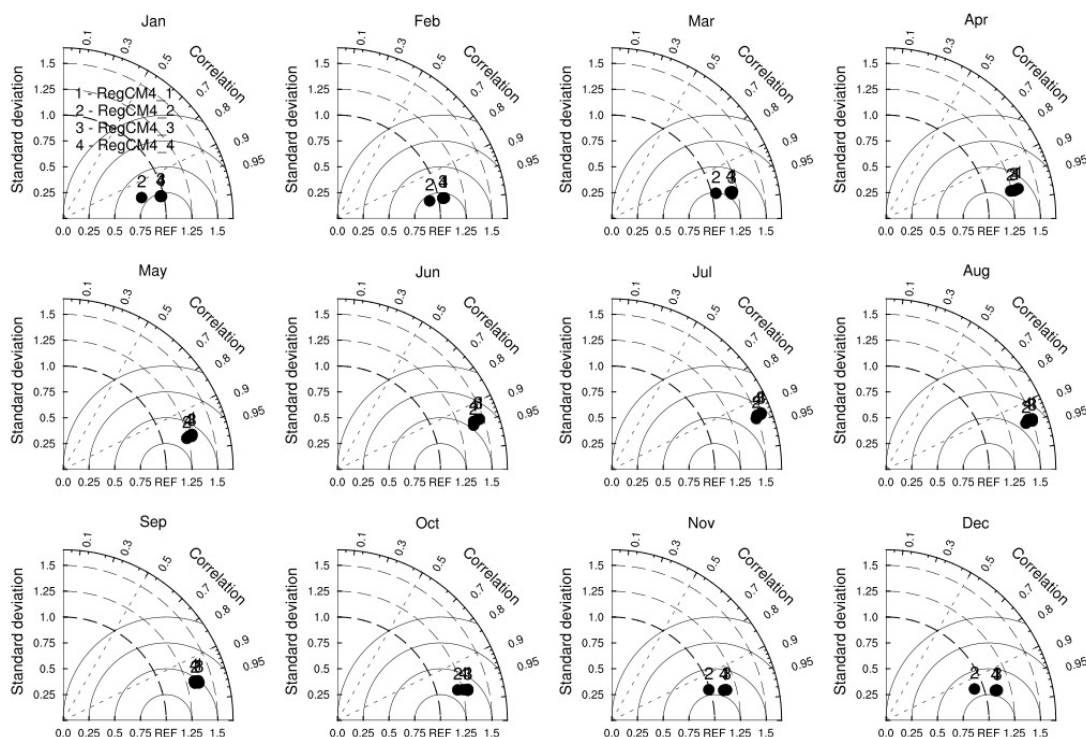
به طور کلی می‌توان گفت اریبی دمای هوای نزدیک سطح زمین در شبیه‌سازی‌های RegCM4_1، RegCM4_3 و RegCM4_4 نزدیک هم است و در بین آنها شبیه‌سازی RegCM4_3 به دلیل اریبی کمتر آن طی ماه‌های فصل بهار عملکرد بهتری دارد. در مقابل، شبیه‌سازی RegCM4_2 تنها برای فصل بهار و ماه ژوئن اریبی کمی را نشان می‌دهد، در حالی که در دیگر ماه‌های سال عملکرد مناسبی ندارد. اریبی دمای هوای نزدیک سطح در شبیه‌سازی RegCM4_2 طی ماه‌های آوریل، می و ژوئن با تفاوت ناچیزی به اریبی شبیه‌سازی RegCM4_3 نزدیک است. با توجه به اینکه میانگین قدرمطلق اریبی ماهانه دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای این چهار شبیه‌سازی به ترتیب ۰/۷، ۱/۳، ۰/۵ و ۰/۹ است، در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که برای دمای هوا در



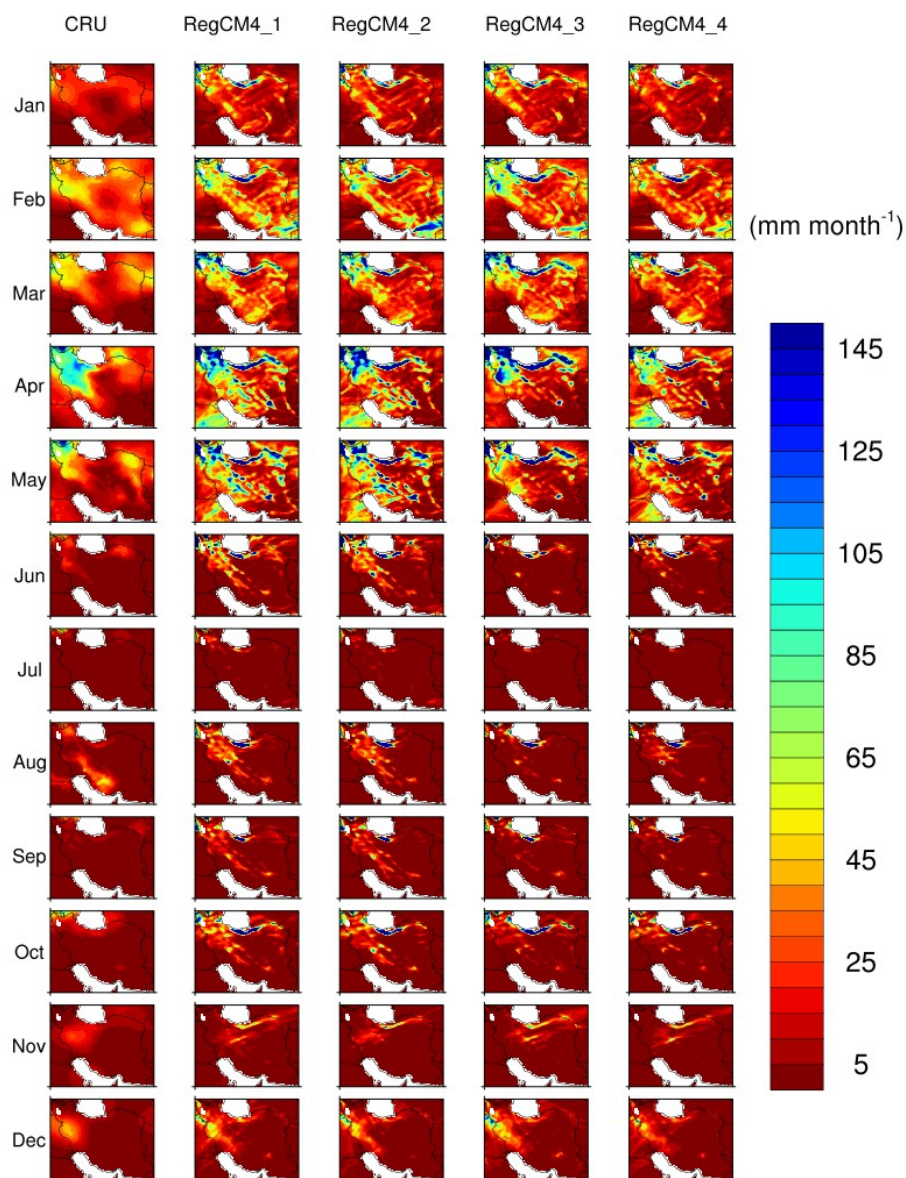
شکل ۳. میانگین ماهانه خطای ریشه میانگین مربعات دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در منطقه ایران برای چهار شبیه‌سازی مختلف انجام‌شده با RegCM4 در سال ۲۰۱۰. پارامترسازی‌های فیزیکی به کار رفته در چهار شبیه‌سازی مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند.

هلسلنگ در ماه‌های سرد سال (پاییز و زمستان) و طرحواره UW PBL در ماه‌های گرم سال (بهار و تابستان) عملکرد بهتری دارد. از بین سه شبیه‌سازی که در آنها از طرحواره لایه مرزی هلسلنگ استفاده شده است، خطای ریشه میانگین مربعات در شبیه‌سازی RegCM4_3 در ماه‌های فصل بهار بهتر از شبیه‌سازی‌های RegCM4_1 و RegCM4_4 است و مقادیر آن نزدیک به شبیه‌سازی RegCM4_2 است؛ در نتیجه، به‌طور کلی شبیه‌سازی RegCM4_3 عملکرد بهتری نسبت به بقیه شبیه‌سازی‌ها در کل سال از خود نشان داده است. میانگین مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات برای شبیه‌سازی‌های RegCM4_1، RegCM4_2، RegCM4_3 و RegCM4_4 به ترتیب ۲/۲، ۲/۱، ۲/۲ و ۲/۲ است که این مقادیر نیز نتیجه فوق را تصدیق می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت استفاده از طرحواره همرفت Tiedtke در کنار طرحواره لایه مرزی هلسلنگ بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای منطقه ایران دارد.

خطای ریشه میانگین مربعات دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین طی ماه‌های مختلف سال برای چهار شبیه‌سازی با RegCM4 در منطقه ایران در مقایسه با داده‌های CRU محاسبه و در شکل ۳ نشان داده شده است. روند تغییرات مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات در شبیه‌سازی‌های RegCM4_1، RegCM4_3 و RegCM4_4 در طی سال تقریباً یکسان است. مشاهده می‌شود که در ماه‌های ژانویه، فوریه، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات در این سه شبیه‌سازی به‌وضوح کمتر از شبیه‌سازی RegCM4_2 است. از طرفی، مشاهده می‌شود که مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات در ماه‌های مارس، آوریل، می، ژوئن و ژوئیه در شبیه‌سازی RegCM4_2 کمتر از سه شبیه‌سازی دیگر است. از آنجاکه در سه شبیه‌سازی RegCM4_1، RegCM4_3 و RegCM4_4 از طرحواره لایه مرزی هلسلنگ و در شبیه‌سازی RegCM4_2 از طرحواره لایه مرزی UW PBL استفاده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که طرحواره لایه مرزی



شکل ۴. نمودار تیلور بررسی همبستگی بین میانگین ماهانه دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای منطقه ایران با چهار شبیه‌سازی انجام شده با RegCM4 در مقایسه با داده‌های CRU در سال ۲۰۱۰. پارامترسازی‌های فیزیکی به‌کاررفته در چهار شبیه‌سازی مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند.



شکل ۵. بارش مشاهداتی با استفاده از داده‌های CRU و شبیه‌سازی‌شده با RegCM4 با چهار پارامترسازی مختلف در سال ۲۰۱۰. پارامترسازی‌های فیزیکی به-کاررفته در چهار شبیه‌سازی مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند.

مجموع موفقیت‌آمیز بوده است. در شکل ۴ منظور از انحراف معیار، نسبت انحراف معیار هر یک از شبیه‌سازی-ها به انحراف معیار داده مشاهداتی CRU است که به آن انحراف معیار استانداردشده نیز گفته می‌شود. انحراف معیار استانداردشده هر چهار شبیه‌سازی برای سه ماه آغازین سال میلادی (ژانویه تا مارس) بین ۱ و ۱/۲۵ است و با گذشت زمان و نزدیک شدن به ماه‌های گرم سال به-

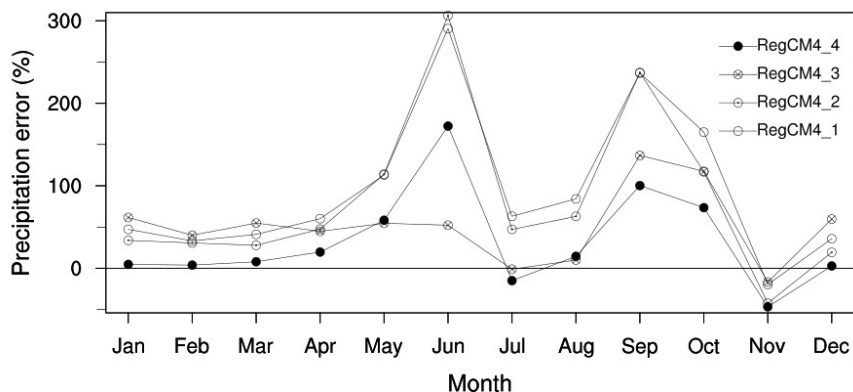
شکل ۴ نمودار تیلور را برای چهار شبیه‌سازی انجام-شده با RegCM4 در ماه‌های مختلف سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که روی ایران میانگین‌گیری شده است. مشاهده می‌شود که برای هر چهار شبیه‌سازی در همه ماه‌های سال همواره همبستگی مکانی دمای هوای مشاهداتی و شبیه-سازی‌شده بیشتر از ۰/۹ است؛ بنابراین، مقیاس‌کاهی دینامیکی انجام‌شده با RegCM4 در منطقه ایران در

اریبی نسبی بارش ماهانه میانگین‌گیری شده در منطقه ایران برحسب درصد برای چهار شبیه‌سازی توصیف شده در جدول ۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. الگوی کلی سری زمانی اریبی‌ها در این چهار شبیه‌سازی تا حد زیادی شبیه هم است. اریبی بارش در چهار ماه نخست سال اندک است، در ماه‌های می و ژوئن افزایش قابل توجهی می‌یابد (به‌جز شبیه‌سازی RegCM4_3)، در ماه ژوئیه کاهش و در ماه‌های اوت و سپتامبر مجدداً افزایش می‌یابد. اریبی در ماه‌های اکتبر و نوامبر کاهش و در ماه دسامبر افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که برای دمای هوای نزدیک سطح زمین مطرح شد، روند مشابه تغییرات اریبی بارش در ماه‌های مختلف سال برای چهار شبیه‌سازی مختلف انجام شده می‌تواند تحت تأثیر شرایط مرزی اخذ شده از داده‌های CFSv2 باشد؛ تغییر در پارامترسازی‌های فیزیکی در این چهار شبیه‌سازی، روند کلی نمودار اریبی بارش را تغییر نداده است. به‌طور کلی در هر چهار شبیه‌سازی، در بیشتر ماه‌های سال اریبی مثبت بارش وجود دارد به‌جز برای شبیه‌سازی‌های RegCM4_3 و RegCM4_4 در ماه ژوئیه و هر چهار شبیه‌سازی در ماه نوامبر، بقیه مقادیر مثبت هستند.

اریبی بارش هر چهار شبیه‌سازی در ماه ژوئن (به‌جز در RegCM4_3) و ماه‌های سپتامبر و اکتبر به‌نسبت بزرگ است. RegCM4_2 اریبی‌های بزرگ در شبیه‌سازی‌های RegCM4_1 و RegCM4_4 در ماه ژوئن و بزرگ‌تر

تدریج افزایش می‌یابد به‌نحوی که در ماه‌های ژوئیه و اوت به حدود ۱/۵ می‌رسد. با نزدیک شدن به ماه‌های سرد سال مجدداً انحراف معیار استاندارد شده این شبیه‌سازی‌ها کاهش می‌یابد به‌طوری که مقادیر انحراف معیار شبیه‌سازی‌های RegCM4_1، RegCM4_3 و RegCM4_4 مجدداً بین ۱ و ۱/۲۵ قرار می‌گیرد. در مجموع می‌توان گفت بیشترین نسبت انحراف معیار استاندارد شده در هر چهار شبیه‌سازی متعلق به فصل تابستان است که به‌سبب وجود اریبی منفی بزرگ دمای هوا در مناطق به‌نسبت خنک و اریبی مثبت بزرگ دمای هوا در مناطق به‌نسبت گرم ایران در این فصل از سال نسبت به فصول دیگر سال است که قبلاً درباره آن بحث شد.

بارش میانگین ماهانه در منطقه ایران با استفاده از داده‌های CRU و نتایج اجرای چهار شبیه‌سازی با RegCM4 در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق آنچه داده‌های مشاهداتی CRU نشان می‌دهند، بیشترین بارش در ایران طی پنج ماهه نخست سال میلادی اتفاق افتاده است. با شروع فصل تابستان، بارش در ایران به‌شدت کاهش پیدا کرده و در ماه ژوئیه به کمترین مقدار رسیده است. در نگاه نخست، الگوهای بارش در چهار شبیه‌سازی اجرا شده تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند به‌طوری که ماه‌های پربارش سال و مکان‌های پربارش ایران به‌خوبی با هر چهار شبیه‌سازی نشان داده شده‌اند.

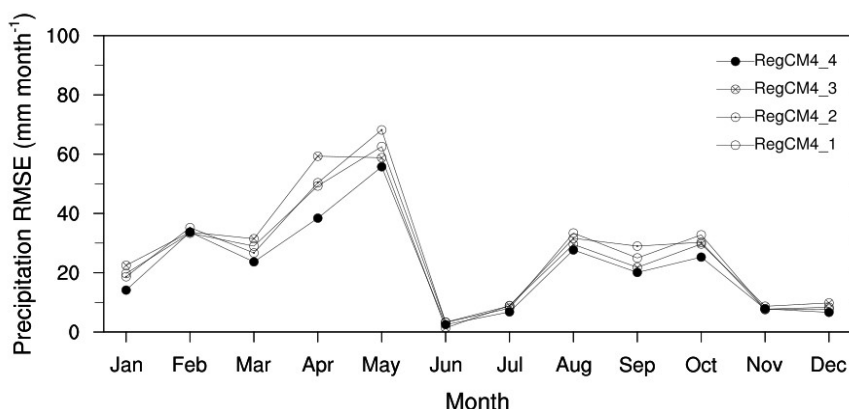


شکل ۶. مشابه شکل ۲، اما برای بارش

مربوط به ماه‌های ژوئن و سپتامبر است که تا ۳۰٪ هم می‌رسد ولی با توجه به اینکه بارش مشاهداتی در این ماه‌ها به ترتیب تنها ۳/۶ و ۲ میلی‌متر است و از ماه‌های کم‌بارش این سال هستند، خطای نسبی زیاد در این ماه‌ها به منزله بیش‌برآورد بزرگ بارش نیست؛ در نتیجه، تنها براساس میانگین اریبی نسبی بارش منطقه نمی‌توان تحلیل درستی درباره توانمندی این چهار شبیه‌سازی در پیش‌بینی بارش مشاهداتی ارائه داد. به همین دلیل، از سنجنده‌های آماری دیگری نیز استفاده می‌شود. بررسی خطای ریشه میانگین مربعات در منطقه ایران برای چهار شبیه‌سازی توصیف شده در مقیاس ماهانه در شکل ۷ نشان داده شده است. روند کلی خطای ریشه میانگین مربعات ماهانه در هر چهار شبیه‌سازی شباهت زیادی به یکدیگر دارد. میانگین خطای ریشه میانگین مربعات در پنج ماه نخست سال که بیشترین بارش ایران در این ماه‌ها اتفاق افتاده است، در شبیه‌سازی‌های RegCM4_1، RegCM4_2، RegCM4_3 و RegCM4_4 به ترتیب ۳۹، ۴۰، ۴۱ و ۳۳ میلی‌متر در ماه است و در کل سال به ترتیب ۲۶، ۲۶، ۲۶ و ۲۲ میلی‌متر است؛ بنابراین می‌توان گفت با توجه به مقایسه مقادیر اریبی و خطای ریشه میانگین مربعات، شبیه‌سازی RegCM4_4 که در آن از طرحواره همرفت کین-فریج (۱۹۹۰) و کین (۲۰۰۴) استفاده شده است، عملکرد بهتری نسبت به سه شبیه‌سازی دیگر در پیش‌بینی بارش ایران در سال ۲۰۱۰ نشان داده است.

بودن اریبی‌ها در شبیه‌سازی‌های RegCM4_1 و RegCM4_2 نسبت به شبیه‌سازی‌های RegCM4_3 و RegCM4_4 در ماه سپتامبر که در شکل ۶ نشان داده شده است، با اریبی‌های مثبت نشان داده شده در شکل ۵ کاملاً هماهنگ هستند به طوری که با مراجعه به شکل ۵ می‌توان دریافت علت این اختلاف اریبی بین چهار شبیه‌سازی، ناشی از بیش‌برآورد بارش رشته کوه زاگرس در این ماه‌ها است. میانگین قدرمطلق اریبی بارش برای کل سال در منطقه ایران در این چهار شبیه‌سازی به ترتیب ۹۹٪، ۹۱٪، ۵۴٪ و ۴۳٪ و برای پنج ماه نخست سال به ترتیب ۲۴٪، ۲۱٪، ۲۱٪ و ۸٪ است؛ یعنی میانگین قدرمطلق اریبی بارش به ترتیب در شبیه‌سازی‌های RegCM4_3 و RegCM4_4 برای کل سال و شبیه‌سازی RegCM4_4 برای پنج ماه نخست سال، کمتر از شبیه‌سازی‌های دیگر است.

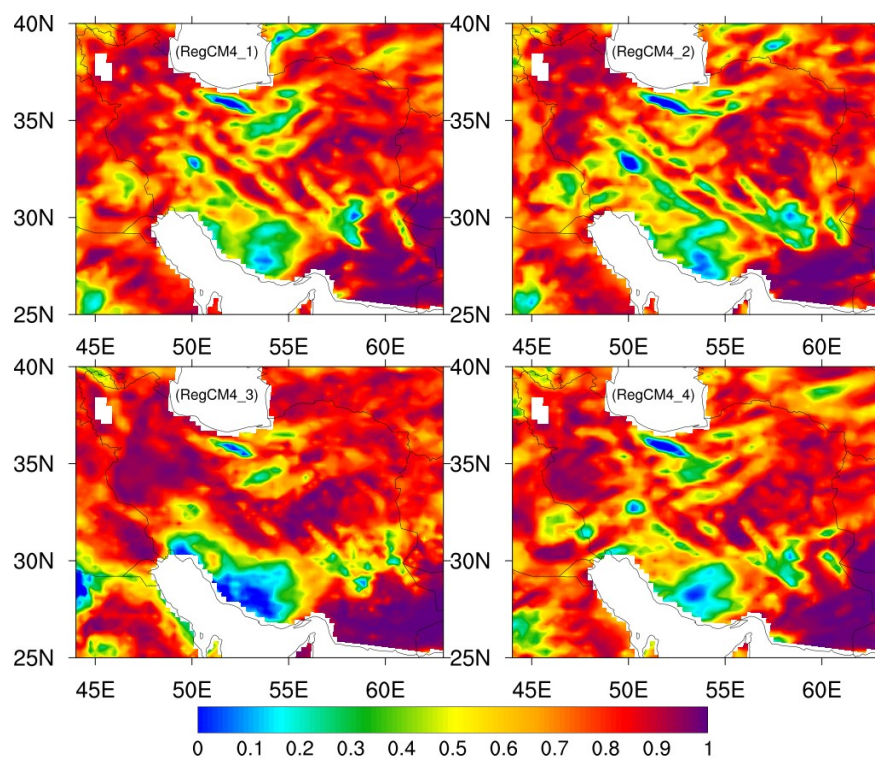
شکل ۶ الگوی میانگین اریبی نسبی بارش را در منطقه‌ای وسیع با عوارض پیچیده در سطح زمین نشان می‌دهد. اریبی‌های کم در این منطقه به معنی شبیه‌سازی‌های نزدیک به واقعیت نیست؛ برای مثال، اندازه اریبی بارش شبیه‌سازی‌های RegCM4_1 و RegCM4_3 در ماه نوامبر کمتر از ۲۰ درصد است. با وجود این، در این ماه مکان بیشینه بارش براساس این شبیه‌سازی‌ها در شمال و مرکز ایران است در حالی که براساس داده‌های CRU، بیشینه بارش در مناطقی از غرب ایران اتفاق افتاده است (شکل ۵). از طرفی، بیشترین اریبی بارش ایران



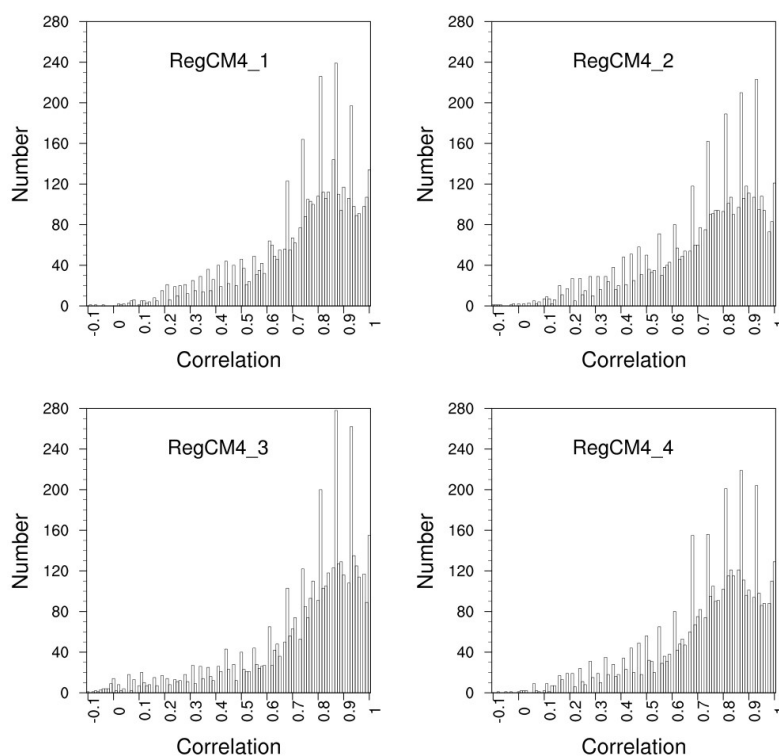
شکل ۷. مشابه شکل ۳، اما برای بارش

بارش شبیه‌سازی شده با بارش مشاهداتی، از ضریب همبستگی تغییر یافته استفاده شده است؛ یعنی همبستگی مکانی پس از کسر میانگین بارش مقادیر غیر صفر از مقادیر غیر صفر محاسبه می‌شود. با توجه به فرمول همبستگی، مناطقی که بارشی برای آنها ثبت نشده است، در محاسبه همبستگی بی‌تأثیر خواهند بود. مقادیر همبستگی مکانی بارش ماهانه برای هر چهار شبیه‌سازی RegCM4 با داده‌های CRU و همچنین نسبت انحراف معیار مکانی آنها به انحراف معیار داده‌های CRU در نمودار تیلور شکل ۱۰ نشان داده شده است. همبستگی مکانی این چهار شبیه‌سازی در شش ماه آغازین سال میلادی بین ۰/۴ تا ۰/۶ است به طوری که در چهار ماه نخست سال بیشترین همبستگی مکانی متعلق به شبیه‌سازی RegCM4_3 و کمترین همبستگی متعلق به RegCM4_4 است. در ماه‌های می و ژوئن بیشترین همبستگی‌ها متعلق به RegCM4_1 و RegCM4_2 است. کمترین همبستگی‌های مکانی این چهار شبیه‌سازی، با مقادیر همبستگی بین ۰/۱۵ تا ۰/۴، در ماه‌های اوت، سپتامبر، اکتبر و نوامبر اتفاق افتاده است. در ماه‌های اوت، سپتامبر و اکتبر کمترین همبستگی‌ها متعلق به RegCM4_4 است، در حالی که RegCM4_3 بیشترین مقدار همبستگی مکانی را با مشاهدات دارد. در ماه نوامبر نیز RegCM4_4 کمترین و RegCM4_2 بیشترین همبستگی مکانی را با مشاهدات دارد. همچنین بیشترین همبستگی‌های مکانی در هر چهار شبیه‌سازی در ماه‌های ژوئیه و دسامبر اتفاق افتاده است. بیشترین همبستگی مکانی در ماه دسامبر متعلق به RegCM4_3 و کمترین همبستگی متعلق به RegCM4_4 است. کمتر بودن خطای نسبی و خطای ریشه میانگین مربعات (شکل‌های ۶ و ۷) همراه با همبستگی بیشتر از ۰/۷ در این ماه‌ها دلالت بر توانایی زیاد هر چهار شبیه‌سازی در پیش‌بینی بارش ماه‌های ژوئیه و دسامبر در ایران دارد.

الگوی همبستگی زمانی میانگین ماهانه بارش بین چهار شبیه‌سازی انجام شده با RegCM4 و داده‌های مشاهداتی CRU در شکل ۸ نشان داده شده است. بیشترین مقادیر همبستگی اغلب در جنوب شرق، شرق، مرکز، غرب و شمال غرب ایران مشاهده می‌شود. در بین این مناطق، شمال غرب ایران از مناطق پربارش محسوب می‌شود. کمترین مقادیر همبستگی در مناطق کوهستانی ایران، شامل منطقه‌ای در شمال ایران واقع در رشته کوه البرز، دامنه‌های غربی رشته کوه زاگرس و نیمه غربی جنوب ایران از سواحل خلیج فارس تا ارتفاعات رشته کوه زاگرس و همچنین شمال غرب دشت کویر (منطقه‌ای کم ارتفاع بین دو رشته کوه البرز و زاگرس) مشاهده می‌شود. به طور کلی، الگوی همبستگی هر چهار شبیه‌سازی با داده‌های CRU تقریباً مشابه هستند و فقط وسعت منطقه مربوط به همبستگی‌ها تفاوت‌های اندکی دارد. بررسی فراوانی وقوع مقادیر همبستگی زمانی بارش در منطقه ایران (شکل ۹) نشان می‌دهد که در هر چهار شبیه‌سازی، تقریباً ۸۵ درصد از مناطق ایران همبستگی زمانی بیشتر از ۵۰ درصد را تجربه کرده‌اند. در شبیه‌سازی RegCM4_3، ۷۲ درصد از مناطق ایران همبستگی زمانی بیشتر از ۷۰ درصد را تجربه کرده‌اند، در حالی که برای سه شبیه‌سازی دیگر، این میزان همبستگی در ۶۷ درصد از مناطق ایران اتفاق افتاده است. همچنین در شبیه‌سازی RegCM4_3، ۵۷ درصد از مناطق ایران همبستگی زمانی بیشتر از ۸۰ درصد را تجربه کرده‌اند، در حالی که این میزان همبستگی برای شبیه‌سازی‌های RegCM4_1، RegCM4_2 و RegCM4_4 به ترتیب در ۵۲، ۴۸ و ۵۰ درصد از مناطق ایران اتفاق افتاده است. تفاوت‌های مطرح شده جزئی هستند، اما دلالت بر برتری نسبی ضریب همبستگی زمانی شبیه‌سازی RegCM4_3 با داده‌های مشاهداتی در مقایسه با دیگر شبیه‌سازی‌ها دارد. از آنجاکه بارش در بسیاری از مناطق ایران در ماه‌های گرم سال اتفاق نمی‌افتد، برای محاسبه همبستگی مکانی



شکل ۸. همبستگی زمانی بارش برای چهار شبیه‌سازی انجام‌شده با RegCM4 در مقایسه با داده‌های CRU در سال ۲۰۱۰. پارامترسازی‌های فیزیکی به‌کاررفته در چهار شبیه‌سازی مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند.



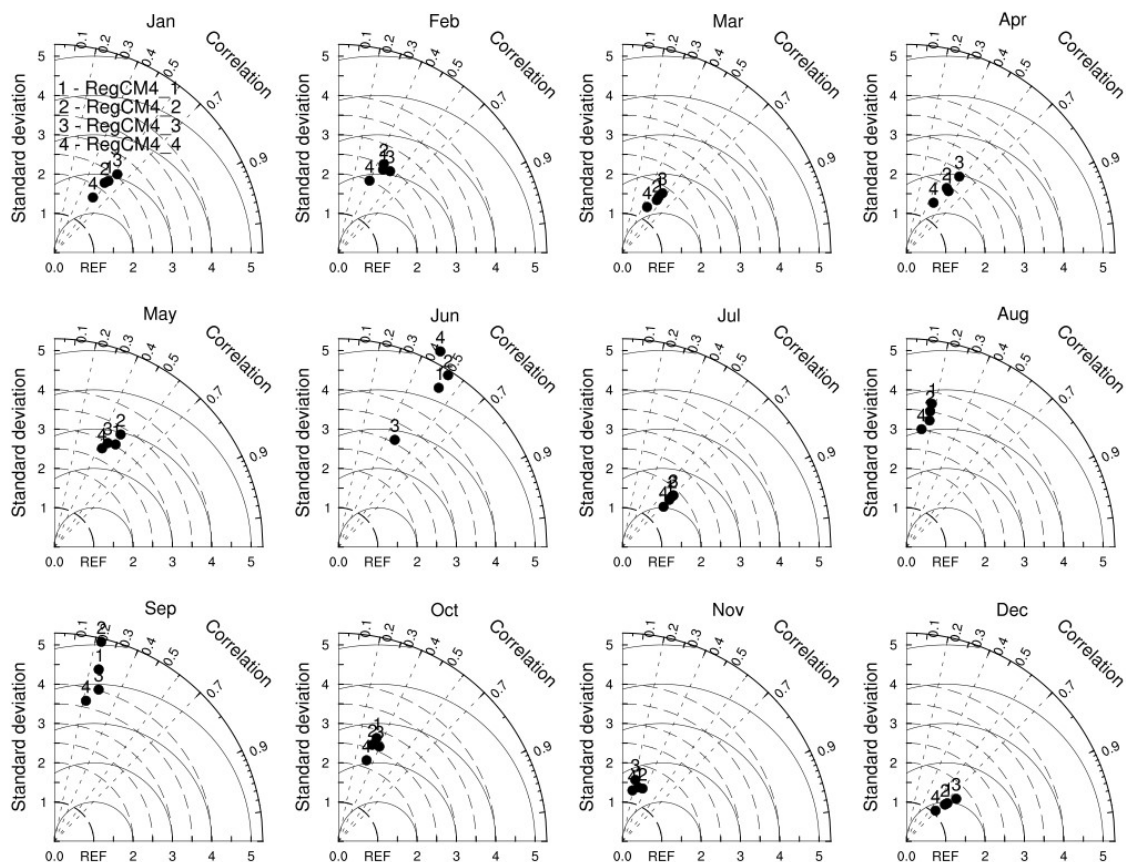
شکل ۹. فراوانی وقوع همبستگی زمانی بارش ایران برای چهار شبیه‌سازی انجام‌شده با RegCM4 در مقایسه با CRU در سال ۲۰۱۰. محور افقی مقادیر همبستگی و محور قائم تعداد وقوع آن را در ایران نشان می‌دهد. پارامترسازی‌های فیزیکی به‌کاررفته در چهار شبیه‌سازی مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند.

RegCM4_3 و پس از آن متعلق به شبیه‌سازی RegCM4_4 است. شایان ذکر است بیشترین نسبت انحراف معیارها در این چهار شبیه‌سازی نیز در ماه‌های ژوئن و سپتامبر اتفاق افتاده است که در قسمت مربوط به الگو و اندازه اریبی نسبی بارش (شکل‌های ۴ و ۵) درباره تفاوت چشمگیر بارش شبیه‌سازی شده با مشاهدات در این دو ماه بحث شد.

با توجه به ضعف چشمگیر شبیه‌سازی RegCM4_4 در زمینه همبستگی مکانی آن با داده‌های مشاهداتی، نمی‌توان آن را به‌عنوان مناسب‌ترین شبیه‌سازی برای پیش‌بینی بارش منطقه ایران انتخاب کرد. با توجه به اینکه RegCM4_3 در بررسی اریبی بهتر از RegCM4_1 و RegCM4_2 عمل کرده است و مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات نیز برای هر چهار شبیه‌سازی تقریباً نزدیک به یکدیگر هستند و با توجه به برتری

میزان اریبی نسبی و خطای ریشه میانگین مربعات در شبیه‌سازی RegCM4_4 نسبت به شبیه‌سازی‌های دیگر کمتر است (شکل‌های ۶ و ۷)، اما همبستگی مکانی آن با مشاهدات نیز کمتر از دیگر شبیه‌سازی‌ها است. از نظر مقدار همبستگی مکانی سه شبیه‌سازی اول با مشاهدات، تقریباً هر سه شرایط یکسانی دارند و RegCM4_3 با تفاوت کوچکی نسبت به دو شبیه‌سازی دیگر برتری دارد. گفتنی است که معناداری تفاوت مقادیر همبستگی RegCM4_3 و RegCM4_4 برای این دوازده ماه بررسی شد و نتایج نشان داد که در همه ماه‌ها به غیر از سه ماه می، ژوئیه و نوامبر تفاوت همبستگی مکانی این دو شبیه‌سازی با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۰/۹۵ معنادار است.

در بین چهار شبیه‌سازی بررسی شده، نزدیک‌ترین مقادیر انحراف معیار به انحراف معیار CRU متعلق به شبیه‌سازی



شکل ۱۰. مشابه شکل ۴، اما برای بارش

در بررسی میانگین قدرمطلق اریبی ماهانه دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سال ۲۰۱۰، شبیه‌سازی RegCM4_1 و RegCM4_3 که در آنها از طرحواره لایه مرزی هلستلگ استفاده شده است، اریبی کمتری را در مقایسه با مشاهدات نشان دادند. بررسی خطای ریشه میانگین مربعات دمای هوا برای این چهار شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از طرحواره لایه مرزی هلستلگ در ماه‌های سرد سال و طرحواره UW PBL در ماه‌های گرم سال عملکرد بهتری دارد. از آنجاکه استفاده از همرفت Tiedtke در کنار لایه مرزی هلستلگ می‌تواند مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات را در فصل‌های گرم سال به شدت کاهش دهد و کمترین خطای ممکن را در طول کل سال در پی دارد، استفاده از طرحواره لایه مرزی هلستلگ در RegCM4 برای فصل‌های سرد سال و استفاده از همین طرحواره در کنار طرحواره همرفت Tiedtke برای شبیه‌سازی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای کل سال در منطقه ایران پیشنهاد می‌شود.

بررسی همبستگی مکانی دمای هوای نزدیک سطح مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در هر چهار شبیه‌سازی و در همه ماه‌های سال همواره مقادیر بیشتر از ۰/۹ را نشان داد. در بررسی بارش در منطقه ایران مشاهده شد که گسترده‌گی مکانی مناطق پربارش و کم‌بارش در این چهار شبیه‌سازی تا حد زیادی شبیه هم هستند و همچنین ماه‌های پربارش در هر چهار شبیه‌سازی به خوبی نشان داده شده‌اند. بررسی اریبی نسبی بارش و خطای ریشه میانگین مربعات بارش در منطقه ایران نشان داد که الگوی کلی سری زمانی هر یک از آنها در چهار شبیه‌سازی انجام شده تا حد زیادی شبیه هم است. به طور کلی در هر چهار شبیه‌سازی در بیشتر ماه‌های سال اریبی مثبت بارش برای منطقه ایران مشاهده شد که نشان‌دهنده بیش‌برآورد بارش با RegCM4 است. بیشترین اریبی‌های بارش در ماه‌های ژوئن و سپتامبر

RegCM4_3 در همبستگی زمانی و مکانی منطقه ایران، می‌توان RegCM4_3 را که در آن از طرحواره همرفت Tiedtke استفاده شده است، مناسب‌ترین طرحواره برای شبیه‌سازی بارش در منطقه ایران معرفی کرد.

۴ نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، عملکرد RegCM4 با چهار پارامترسازی مختلف (جدول ۱) در شبیه‌سازی دمای هوای نزدیک سطح زمین و بارش در منطقه ایران طی سال ۲۰۱۰ در مقایسه با داده‌های مشاهداتی CRU بررسی شد. داده‌های مدل گردش کلی CFSv2، شرایط اولیه و مرزی RegCM4 بودند. بررسی الگوی اریبی دمای هوا در این شبیه‌سازی‌ها نشان داد که بیشترین اریبی منفی دمای هوای نزدیک سطح زمین در سواحل جنوبی دریای خزر و ارتفاعات رشته کوه البرز و بیشترین اریبی مثبت دمای هوا در دشت لوت و جنوب ایران و از نظر زمانی در اواخر فصل بهار، فصل تابستان و اوایل فصل پاییز اتفاق می‌افتد. بیشتر بودن اریبی منفی دمای هوا در مناطق کوهستانی به خصوص در شمال ایران در ماه‌های به نسبت گرم سال می‌تواند به این دلیل باشد که در ماه‌های گرم سال دامنه‌های کوهستانی کاملاً گرم شده‌اند و عاری از برف هستند؛ بنابراین در ارتفاع‌های بالا همچنان ممکن است برف وجود داشته باشد و در نتیجه دمای هوا کم است، در حالی که داده‌های CRU به دلیل تفکیک افقی پایین و نبود ایستگاه‌های مشاهداتی در مناطق مرتفع نمی‌تواند دمای هوای به نسبت کم در مناطق مرتفع را به خوبی تشخیص دهد. به دلیل وجود همین اریبی بزرگ منفی دمای هوا در مناطق به نسبت خنک و اریبی بزرگ مثبت دمای هوا در مناطق به نسبت گرم ایران در فصل تابستان، انحراف معیار استاندارد شده هر چهار شبیه‌سازی نیز بیشترین مقادیر را در همین فصل دارد.

همبستگی مکانی بارش نشان داد که به‌طور کلی بیشترین همبستگی به شبیه‌سازی RegCM4_3 و کمترین همبستگی مکانی به شبیه‌سازی RegCM4_4 تعلق دارد؛ بنابراین اگرچه میزان اریبی نسبی و خطای ریشه میانگین مربعات شبیه‌سازی RegCM4_4 نسبت به شبیه‌سازی‌های دیگر کمتر است، همبستگی مکانی آن نیز کمتر از دیگر شبیه‌سازی‌ها است.

باتوجه به اینکه در بررسی اریبی، شبیه‌سازی RegCM4_3 بهتر از شبیه‌سازی‌های RegCM4_1 و RegCM4_2 عمل کرده است و مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات برای هر چهار شبیه‌سازی تقریباً نزدیک به یکدیگر هستند، بارش شبیه‌سازی شده RegCM4_3 از نظر همبستگی زمانی و مکانی با بارش مشاهداتی در منطقه ایران نسبت به سه شبیه‌سازی دیگر برتری دارد؛ در نتیجه طرحواره همرفت Tiedtke در RegCM4 برای شبیه‌سازی بارش در منطقه ایران پیشنهاد می‌شود.

در پایان شایان ذکر است که در این مطالعه به‌دلیل محدودیت‌های سخت‌افزاری، ارزیابی عملکرد RegCM4 تنها در سال ۲۰۱۰ با چهار سری پارامترسازی انجام شد. نگارندگان در مطالعات آینده در نظر دارند که هم طرحواره‌های متنوع‌تر موجود در RegCM4 را ارزیابی کنند و هم دوره شبیه‌سازی را طولانی‌تر در نظر بگیرند.

سپاس‌گزاری

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۳۰۴۴۹/۰۱/۰۷ با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است.

منابع

بابائیان، ا.، کریمیان، م.، مدیریان، ر.، بیاتانی، ف.، فهیمی‌نژاد، ا.، ۱۳۹۵، کارایی روش‌های پس‌پردازش آماری در بهبود پیش‌بینی ماهانه بارش مدل MRI-

اتفاق افتاده است. دلیل اصلی تفاوت اریبی بارش در این چهار شبیه‌سازی بیش‌برآورد بارش در رشته کوه زاگرس است. شبیه‌سازی RegCM4_3 در ماه ژوئن و شبیه‌سازی‌های RegCM4_3 و RegCM4_4 در ماه سپتامبر برای بارش رشته کوه زاگرس نسبت به دیگر شبیه‌سازی‌ها دقت بیشتری دارند. میانگین قدرمطلق اریبی بارش ماهانه برای همه ماه‌های سال در منطقه ایران به‌ترتیب در شبیه‌سازی‌های RegCM4_4 و RegCM4_3 مقادیری کمتر از دو شبیه‌سازی دیگر را نشان داد. بررسی میانگین خطای ریشه میانگین مربعات برای پنج ماه نخست سال نشان داد که با تفاوت ۴ میلیمتر در ماه، شبیه‌سازی RegCM4_4 بهتر از شبیه‌سازی‌های دیگر عمل می‌کند.

همبستگی چهار شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی طی ماه‌های مختلف سال بررسی شد و نتایج نشان داد که در ارتفاعات البرز، دامنه‌های غربی رشته کوه زاگرس و نیمه غربی جنوب ایران (از سواحل خلیج فارس تا دامنه‌های زاگرس) و همچنین شمال‌غرب دشت کویر، کمترین مقدار (صفر تا پنجاه درصد) همبستگی وجود دارد. درمقابل، بیشترین مقادیر همبستگی بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اغلب در جنوب‌شرق، شرق، مرکز، غرب و شمال‌غرب ایران مشاهده شد که در بین این مناطق، شمال‌غرب ایران از مناطق پربارش محسوب می‌شود. به‌طور کلی در هر چهار شبیه‌سازی، تقریباً ۸۵ درصد از منطقه ایران همبستگی زمانی بیشتر از ۵۰ درصد را تجربه کرده است و شبیه‌سازی RegCM4_3 با تفاوت اندکی همواره منطقه وسیع‌تری از ایران را با همبستگی بیشتر نسبت به شبیه‌سازی‌های دیگر نشان می‌دهد. نتایج بررسی همبستگی مکانی در نمودار تیلور نشان داد که کمترین همبستگی مکانی با بارش مشاهداتی در این شبیه‌سازی‌ها در ماه‌های اوت، سپتامبر، اکتبر و نوامبر اتفاق افتاده است که همواره کمتر از ۰/۴ است، درحالی‌که در بقیه ماه‌های سال این همبستگی مکانی بین ۰/۴ تا ۰/۷ است. بررسی

- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., and Kennedy, A. P., 1993, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model, Technical Report: National Center for Atmospheric Research Tech Note NCAR/TN-387+STR.
- Díez, E., Orfila, B., FrR'ias, M. D., Fern'andez, J., Cofiño, A. S., and Guti'erez, J. M., 2011, Downscaling ECMWF seasonal precipitation forecasts in Europe using the RCA model: Dynamical downscaling of seasonal precipitation forecasts: *Tellus A, Dynamic Meteorology and Oceanography*, **63**(4), 757–762.
- Diro, G. T., Tompkins, A. M., and Bi, X., 2012, Dynamical downscaling of ECMWF Ensemble seasonal forecasts over East Africa with RegCM3: *Journal of Geophysical Research*, **117**(D16), 103.
- Dommengot, D., and Rezny, M., 2018, A caveat note on tuning in the development of coupled climate models: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **10**, 78–97.
- Emanuel, K. A., 1991, A scheme for representing cumulus convection in large-scale models: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **48**(21), 2313–2335.
- Giorgi, F., and Bates, G. T., 1989, The climatological skill of a regional climate model over complex terrain: *Monthly Weather Review*, **117**, 2325–2347.
- Giorgi, F., and Gutowski, W. J., 2015, Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative: *Annual Review Environment and Resources*, **40**, 467–490.
- Holtslag, A. A. M., De Bruijn, E. I. F., and Pan, H. -L., 1990, A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting: *Monthly Weather Review*, **118** (8), 1561–1575.
- Ji, M., Kumar, A., and Leetmaa, A., 1994, A multiseason climate forecast system at the National Meteorological Center: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **75**, 569–577.
- Kain, J.S., 2004, The Kain–Fritsch convective parameterization: An update: *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 170–181.
- Kain, J. S., and Fritsch, J. M., 1990, A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective CGCM3 در خراسان رضوی: تحقیقات منابع آب ایران، **۱۲**(۲)، ۸۳–۹۲.
- بابائیان، ا.، مدیریان، ر.، کریمیان، م.، ملیوسی، ش.، ۱۳۹۰، بررسی توانمندی مدل اقلیمی PRECIS در شبیه-سازی بارش‌های منطقه‌ای ایران: پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، **۷۷**(۴۳)، ۱۲۵–۱۴۰.
- زرین، آ.، محمدی، ف.، بابائیان، ا.، ۱۳۹۴، شبیه‌سازی بارش فصل زمستان در استان فارس با استفاده از مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM4: نخستین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- Alizadeh-Choobari, O., Adibi, P., and Irannejad, P., 2018, Impact of the El Niño-Southern Oscillation on the climate of Iran using ERA-Interim data: *Climate Dynamics*, **51**, 2897–2911.
- Alizadeh-Choobari, O., and Najafi, M. S., 2018, Climate variability in Iran in response to the diversity of the El Niño-Southern Oscillation: *International Journal of Climatology*, **38**, 4239–4250.
- Balmaseda, M., and Anderson, D., 2009, Impact of initialization strategies and observations on seasonal forecast skill: *Geophysical Research Letters*, **36**, L01701.
- Bretherton, C. S., and McCaa J. R., 2004, A new parameterization for shallow cumulus convection and its application to marine subtropical cloud-topped boundary layers. Part II: Regional simulations of marine boundary layer clouds: *Monthly Weather Review*, **132**, 883–896.
- Branković, Č., and Patarčić, M., 2008, Downscaling of ECMWF seasonal integrations by RegCM: *Proc. ECMWF, Workshop on Ensemble Prediction*, ECMWF, Reading, United Kingdom, 141–150.
- Cane, M. A., Zebiak, S. E., and Dolan, S. C., 1986, Experimental forecasts of El Niño, *Nature*, **321**, 827–832.
- Cohen, J., Pfeiffer, K., and Francis, J., 2017, Winter 2015/16: A turning point in ENSO-based seasonal forecasts: *Oceanography*, **30** (1), 82–89.

- ocean-atmosphere model: *Nature*, **392**, 370–373.
- Suh, M. S., Oh, S. G., Lee, D. K., Cha, D. H., Choi, S. J., Jin, C. S., and Hong, S. Y., 2012, Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea: *Journal of Climate*, **25**, 7067–7082.
- Tiedtke, M., 1996, An extension of cloud-radiation parameterization in the ECMWF model: The representation of subgrid-scale variations of optical depth. *Monthly Weather Review*, **124**, 745–750.
- Torma, C., Giorgi, F., and Coppola, E., 2015, Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain-precipitation over the Alps: *Journal of Geophysical Research*, **120**, 3957–3972.
- Troccoli, A., 2010, Seasonal climate forecasting: *Meteorological Applications*, **17**, 251–268.
- Van Oldenborgh, G. J., Balmaseda, M. A., Ferranti, L., Stockdale, T. N., and Anderson, D. L. T., 2005, Did the ECMWF seasonal forecast model outperform statistical ENSO forecast models over the last 15 years?: *Journal of Climate*, **18**, 3240–3249.
- Wilby, R. L., 1998, Statistical downscaling of daily precipitation using daily airflow and seasonal teleconnection indices: *Climate Research*, **10**, 163–178.
- Yang, T., Li, H., Wang, W., Xu, C., and Yu, Z., 2012, Statistical downscaling of extreme daily precipitation, evaporation, and temperature and construction of future scenarios: *Hydrological Processes*, **26**, 3510–3523.
- Zeng, X., Zhao, M., and Dickinson, R. E., 1998, Intercomparison of Bulk Aerodynamic Algorithms for the Computation of Sea Surface Fluxes Using TOGA COARE and TAO Data: *Journal of Climate*, **11**, 2628–2644.
- parameterization: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **47**, 2784–2802.
- Kleeman, R., 2008, Stochastic theories for the irregularity of ENSO: *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **366**, 2511–2526.
- Landman, W. A., Kgatuke, M. J., Mbedzi, M., Beraki, A., Bartman, A., and Piesanie, A. D., 2009, Performance comparison of some dynamical and empirical downscaling methods for South Africa from a seasonal climate modeling perspective: *International Journal of Climatology*, **29**, 1535–1549.
- Liang, X. Z., Kunkel, K. E., and Samel, A. N., 2001, Development of a regional climate model for U.S. Midwest applications. Part I: Sensitivity to buffer zone treatment: *Journal of Climate*, **14**, 4363–4378.
- Neelin, J. D., 2011, *Climate Change and Climate Modeling*: Cambridge University Press, Cambridge, p282.
- Pal, J. S., Parsons, Small E. E., and Eltahir, E. A. B., 2000, Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM: *Journal of Geophysical Research*, **105**, 29579–29594.
- Patarčić, M., and Branković, Č., 2012, Skill of 2-m Temperature Seasonal Forecasts over Europe in ECMWF and RegCM Models: *Monthly Weather Review*, **140**, 1326–1346.
- Saha, S., et al., 2014, The NCEP Climate Forecast System version 2: *Journal of Climate*, **27**, 2185–2208.
- Sigmond, M., Scinocca, J. F., Kharin, V. V., and Shepherd, T. G., 2013, Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings: *Nature Geoscience*, **6**, 98–102.
- Stockdale, T. N., Anderson, D. L. T., Alves, J. O. S., and Balmaseda, M. A., 1998, Global seasonal rainfall forecasts using a coupled

Performance of the Regional Climate Model version 4 (RegCM4) with different physical parameterizations over Iran: A case study in 2010

Omid Alizadeh-Choobari^{1*}, Sajedeh Marjani², and Morteza Qadimi²

¹Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

²M. Sc., Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 16 April 2019, Accepted: 19 June 2019)

Summary

Providing reliable monthly to seasonal forecasts of the climate system using regional climate models with a relatively high spatial resolution is essential to reduce the socio-economic impacts of extreme climate events. In this study, performance of the Regional Climate Model version 4 (RegCM4) with four different sub-grid scale parameterization schemes in simulating 2-m temperature and precipitation over Iran against the observational Climate Research Unit (CRU) dataset in 2010 is evaluated. The climate forecast system version 2 (CFSv2) data are used as initial and boundary conditions for RegCM4. Analysis of 2-m temperature biases of these four simulations by RegCM4 indicated that the largest negative bias is located in the southern coastal plains of the Caspian Sea and over the Alborz Mountain, while the largest positive bias is located over Dast-e Lut and southern Iran. It is found that the largest temperature biases over Iran mostly occur in late spring, during summer and early autumn. Analysis of absolute monthly mean 2-m temperature biases indicated that in two of the conducted simulations the bias is lower, in both of which the Holstlag boundary-layer scheme is used. The root mean square errors (RMSE) of 2-m temperature for these four simulations are also examined and it is found that the Holstlag boundary-layer scheme and UW PBL perform better in cold and warm months, respectively. Using a combination of the Tiedtke convection scheme and the Holstlag boundary-layer scheme significantly reduces the RMSE of 2-m temperature in warm months of the year and leads to the least bias during the whole year over Iran. Thus, to conduct simulations with RegCM4 over Iran, the Holstlag boundary-layer scheme in cold months of the year and the same boundary-layer scheme along with the Tiedtke convection scheme during the whole year are recommended in order to have the least 2-m temperature biases. In the conducted four simulations, positive precipitation biases are observed over Iran in most months of the year, suggesting that RegCM4 generally overestimates precipitation over Iran. Results also indicated that the largest correlation between the observed and simulated precipitation is seen over southeastern, eastern, central, western and northwestern Iran, while the least correlation is seen over the Alborz Mountain, western foothills of the Zagros Mountains, western parts of southern Iran and some parts of Dasht-e Kavir. It is also found that in the RegCM4 simulation with the Tiedtke convection scheme, there are larger spatial and temporal correlations between the observed and simulated precipitation.

Keywords: Regional Climate Model (RegCM), temperature, precipitation, boundary-layer scheme, convection scheme