

ارزیابی دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در ایران

اصغر کامیار- دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
حجت‌الله یزدان‌پناه- دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
سعید موحدی* - دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۱

چکیده

بررسی تغییرات منطقه‌ای آب و هوا به منظور سازگاری و ارائه خط‌مشی‌های تعدیلی در سطح ملی یکی از موضوعات مهم در مطالعه تغییر اقلیم است. هدف از این پژوهش بررسی دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در پروژه ریزمقیاس‌نمایی هماهنگ منطقه‌ای (CORDEX) در ایران است. بدین منظور، خروجی‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه برای سه RCM در دو محدوده CORDEX شامل شمال افریقا- خاورمیانه (MNA) با قدرت تفکیک ۲۵ و ۵۰ کیلومتر و جنوب آسیا (WAS) با قدرت تفکیک ۵۰ کیلومتر از پایگاه داده ESGF و داده‌های ایستگاه‌های هم‌مدیدی به عنوان داده‌های مشاهده‌ای جهت ارزیابی خروجی مدل‌ها از سازمان هواشناسی کشور طی دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۵ دریافت شد. سپس، نزدیک‌ترین ایستگاه به یاخته متناظرش شناسایی شد و با روش‌های میانگین خطا، همبستگی پیرسن، و RMSE مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که به‌طور کلی مدل‌های موجود در پروژه CORDEX برای بارش همبستگی زیادی با داده‌های مشاهده‌ای نداشتند؛ ولی مقدار خطا و RMSE در مدل RCA4-MNA0.22 کمتر از سایر مدل‌ها بود. همچنین، در ارتباط با دمای بیشینه و کمینه به ترتیب مدل‌های RegCM4.1 و HadRM3P در محدوده جنوب آسیا برآورد نسبتاً درستی داشتند و در بیشتر نواحی کشور همبستگی بالا و خطایی کمتر از یک درجه سلسیوس را با داده‌های مشاهده‌ای نشان دادند.

کلیدواژه‌ها: ایران، ریزمقیاس‌نمایی، مدل منطقه‌ای آب و هوا، CORDEX

مقدمه

در همه مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم به داده‌های آب و هوایی با مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی نیاز است. فقدان داده‌های دما و بارش با قدرت تفکیک مکانی بالا مانعی بزرگ جهت تحلیل تغییرات آینده آب و هوا است. اگرچه مدل‌های جهانی آب و هوا (GCMs) بسیار در پیش‌بینی آینده به‌کار می‌روند، قدرت تفکیک مکانی خروجی این مدل‌ها برای استفاده در مطالعات تغییر آب و هوا مناسب نیست. علاوه‌براین، خروجی مدل‌ها خطای زیادی دارند که باید اصلاح شوند، وگرنه خطایی قابل توجه در ارزیابی اثر تغییر آب و هوا به‌وجود می‌آورند. بنابراین، شناسایی بهترین مدل آب و هوای منطقه‌ای در ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های جهانی آب و هوا امری ضروری جهت شناخت بهتر آب و هوا در مقیاس محلی و منطقه‌ای است (گورگی و میرز، ۱۹۹۱؛ کیدسون و تومپسون، ۱۹۹۸؛ مورفی، ۱۹۹۹؛ احمد و همکاران، ۲۰۱۳). در تبیین آب و هوای منطقه‌ای، ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های GCMs جهت دستیابی به جزئیات ریزتر متغیرهای آب و هوایی و به‌ویژه برای کارهای کاربردی همچون دستیابی به شاخص‌های آب و هواشناسی کشاورزی سودمند است. قدرت تفکیک GCMs در پروژه CMIP5 معمولاً بین ۱ تا ۲ درجه طول و عرض جغرافیایی است و نمی‌تواند اطلاعات قابل اطمینانی ارائه کند. بنابراین، به ریزمقیاس‌نمایی سناریوهای آب و هوایی در مطالعات آسیب‌پذیری و سازگاری با تغییر آب و هوا در سطح ملی

نیازمندیم. این مهم را می‌توان با ریزمقیاس‌نمایی دینامیک و به کمک یک مدل منطقه‌ای آب و هوا (RCM)، که خروجی‌های GCM را به قدرت تفکیک ریزتر تبدیل می‌کند، انجام داد. روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیک در پژوهش‌های مختلفی که در سراسر جهان صورت گرفته پذیرفته شده است (گورگی و هویتسون، ۲۰۰۱؛ جونز و همکاران، ۲۰۰۴؛ پل و همکاران، ۲۰۰۷). در چند سال اخیر با استفاده از مدل‌های آب و هوای منطقه‌ای مختلف و به منظور تولید مجموعه چند عضوی داده‌های ریزمقیاس‌نمایی‌شده در پروژه CMIP5 توسط WCRP^۱ در اقدامی هماهنگ با انجمن بین‌المللی ریزمقیاس‌نمایی منطقه‌ای که CORDEX^۲ نامیده شد با هدف شناسایی تغییرات منطقه‌ای آب و هوا به عنوان ورودی در مطالعات اثر تغییر آب و هوا و راه‌های سازگاری با آن ایجاد شد (گورگی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱).

در مناطق مختلف جهان ارزیابی خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در محدوده‌های گوناگون پروژه CORDEX با داده‌های مشاهداتی صورت گرفته است. به عنوان نمونه، المزروعی و همکاران (۲۰۱۶) برای ارزیابی صحت خروجی‌های حاصل از مدل منطقه‌ای RegCM4 و انتخاب بهترین طرحواره همرفتی در محدوده CORDEX-MNA داده‌های ERA-Interim و CRU^۳ را به کار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که مناسب‌ترین طرحواره همرفتی در مدل RegCM4 از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. در مناطق داخلی این محدوده، طرحواره همرفت گرل با بستار^۴ فریج چاپل (GFC) در شبیه‌سازی بارش و برای دما در خشکی طرحواره گرل و در دریا طرحواره امانوئل با مشخصه خشکی (GLEO dry) کمترین خطا را در مقایسه با داده‌های CRU دارند. دوسیو (۲۰۱۶) برای ارزیابی صحت داده‌های EURO-CORDEX از نسخه ۱۰ داده‌های EOBS (ارائه‌شده توسط هیلوک و همکاران، ۲۰۰۸) به عنوان داده مشاهداتی استفاده کرد و تعدادی از شاخص‌های فرین آب و هوایی را برای اصلاح اربب داده‌ها طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰ محاسبه کرد. نتایج نشان داد که شاخص‌های مطلق - آستانه با اصلاح اربب، که به میانگین کنونی آب و هوا وابسته است، تا حد زیادی از آن تأثیر خواهد پذیرفت. شاخص‌های صدکی مانند شاخص‌های تداوم رخداد کمترین تأثیر را از اصلاح اربب می‌گیرد و شاخص‌هایی چون مجموع بارش بیش از صدک نودوپنجم (R95ptot) تا حد زیادی با اصلاح اربب تعدیل می‌شوند. کاسانووا و همکاران (۲۰۱۶) در دو منطقه اسپانیا و آلپ برای ارزیابی خروجی‌های بارش روزانه در EORU-CORDEX از داده‌های درون‌یابی‌شده حاصل از ۲۷۰۰ ایستگاه در منطقه آلپ و داده‌های APGD^۵ (ارائه‌شده توسط ایسوتا و همکاران، ۲۰۱۳) در اسپانیا به عنوان داده مشاهداتی در محاسبه شاخص‌های فرین آب و هوایی استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که تفاوت بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی‌شده به شدت به نوع RCM، فصل، و شاخص آب و هوایی وابسته است. دوسیو و همکاران (۲۰۱۵) برای ارزیابی بارش روزانه حاصل از ریزمقیاس‌نمایی مدل گردش عمومی CCLM در پروژه CORDEX-Africa از داده‌های UDEL، CRU، GPCP، و TRMM به عنوان داده مشاهداتی استفاده کردند. آن‌ها با تحلیل انحراف معیار و توابع توزیع احتمال (PDF)^۶ به این نتیجه رسیدند که خروجی‌های CCLM به داده‌های مشاهداتی بسیار نزدیک است. امانوئل و همکاران (۲۰۱۲) داده‌های بارش و دمای حاصل از CORDEX-MED^۷ را با داده‌های ایستگاهی و با توابع تجمعی توزیع (CDF)^۸ به صورت فصلی مقایسه

1. World Climate Research Program
2. COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
3. Climatic Research Unit
4. Closur
5. Alpine Precipitation Grid Dataset
6. Probability Distribution Functions
7. Mediterranean
8. Cumulative Distribution Functions

کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اختلافاتی بین داده‌های شبکه‌بندی شده و نزدیک‌ترین ایستگاه محلی به هر یاخته وجود دارد. راجو و همکاران (۲۰۱۵) کارایی طرحواره‌های همرفتی در شبیه‌سازی ویژگی‌های موسمی تابستانه در محدوده CORDEX-WAS^۱ را با مدل منطقه‌ای RegCM4.3 بررسی کردند. آن‌ها از چهار طرحواره امانوئل^۲، گرل^۳، تایدکی^۴، و ترکیبی (امانوئل روی خشکی و گرل روی اقیانوس) با قدرت تفکیک مکانی ۴۵ کیلومتر استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی‌های بارش و دما را با داده‌های CRU، TRMM، و ECMWF به عنوان داده پایه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد طرحواره همرفتی ترکیبی در شبیه‌سازی دما و بارش در شبه‌جزیره هند سازگاری بهتری با داده‌های TRMM در مقایسه با سه طرحواره دیگر دارد. شانگو و همکاران (۲۰۱۵) صحت داده‌های شبیه‌سازی شده بارش ماهانه در محدوده CORDEX-Africa با ۱۰ مدل منطقه‌ای آب و هوا طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۰۷ را بررسی کردند. آن‌ها با توجه به فقدان داده‌های مشاهداتی، در محدوده مورد مطالعه از داده‌های GPCC به عنوان داده پایه جهت ارزیابی کارایی مدل‌های منطقه‌ای استفاده کردند. نتایج مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی کارایی مناسب همه مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا را به‌خصوص در شمال محدوده مطالعاتی نشان داد. ژو و همکاران (۲۰۱۶) از مدل CCLM برای شبیه‌سازی منطقه‌ای آب و هوا در محدوده CORDEX-EA-II^۵ استفاده کردند. آن‌ها به کمک داده‌های ERA-Interim توان مدل را برای دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۰ با قدرت تفکیک ۰٫۲۲° در بازسازی میانگین و فرین‌های آب و هوایی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل CCLM در شناسایی عناصر اصلی آب و هوای شرق آسیا همچون الگوهای میانگین فصلی، نوسانات درون‌سالانه، چرخه‌های سالانه، و شاخص‌های فرین آب و هوایی دما و بارش توان مناسبی دارد. جی و کانگ (۲۰۱۵) رویدادهای فرین آب و هوایی را تا پایان سده بیست‌ویکم به کمک مدل RegCM4 در چین بررسی کردند. صحت خروجی‌های مدل از مقایسه داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده در دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۵ اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که مدل RegCM4 به‌خوبی می‌تواند توزیع مکانی رویدادهای فرین را در چین بازسازی کند. شوچی و همکاران (۲۰۱۲) صحت خروجی‌های مدل RegCM3 را با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر این نکته بود که مدل RegCM3 ساختار فضایی مناسبی از دما و بارش را بازسازی می‌کند. با توجه به پژوهش‌های صورت‌گرفته، هدف اصلی از این پژوهش ارزیابی دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در پروژه CORDEX برای دو محدوده شمال آفریقا-خاورمیانه (MNA) و جنوب آسیا (WAS) با دو قدرت تفکیک ۲۵ و ۵۰ کیلومتر در ایران است.

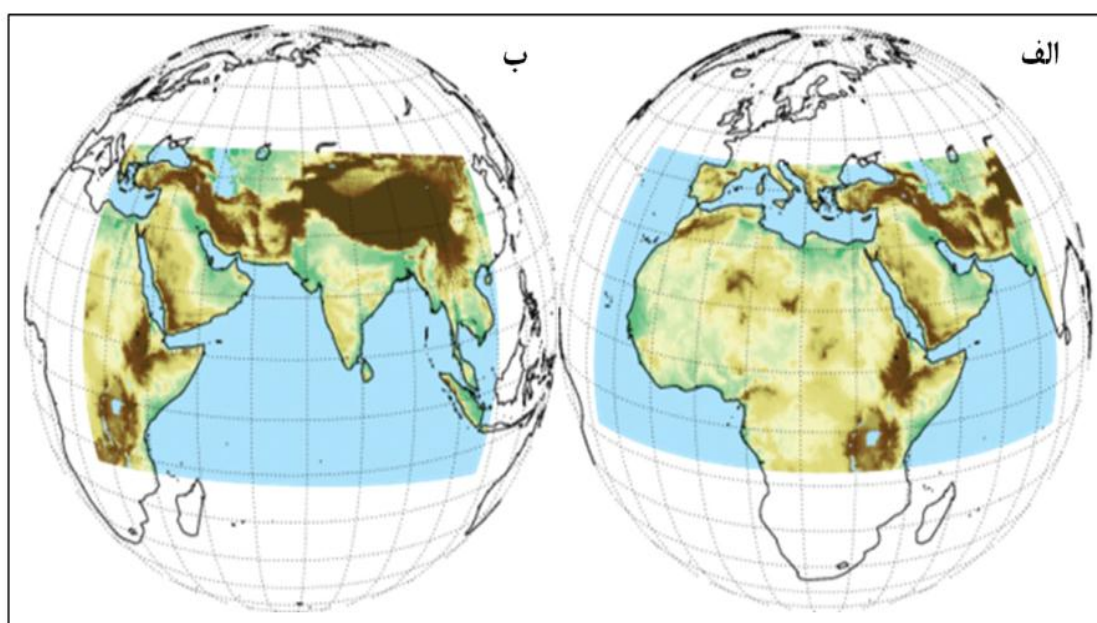
داده‌ها و روش‌ها

در پروژه CORDEX دو محدوده وجود دارد که ایران را کاملاً پوشش می‌دهند. این دو محدوده شامل شمال آفریقا-خاورمیانه (CORDEX-MNA) در عرض جغرافیایی ۷° جنوبی تا ۴۵° شمالی و طول جغرافیایی ۲۷° غربی تا ۷۶° شرقی و جنوب آسیا (CORDEX-WAS) در عرض جغرافیایی ۱۳° جنوبی تا ۴۴° شمالی و طول جغرافیایی ۲۷° شرقی تا ۱۰۷° شرقی است (شکل ۱). در این پروژه بین‌المللی مراکز مدل‌سازی آب و هوایی در سراسر جهان برای اجرای شبیه‌سازی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در محدوده‌هایی مشخص دعوت شدند. قدرت تفکیک افقی شبیه‌سازی‌های بزرگ‌مقیاس

1. South Asia
2. Emanuel
3. Grell
4. Tiedtke
5. second phase of CORDEX-East Asia

(۴۴°/۰ تقریباً ۵۰ کیلومتر) به منظور فرصت‌دادن به مراکز با قدرت محاسباتی نه چندان بالا برای شرکت در این پروژه در نظر گرفته شد. همچنین، از مراکز با ظرفیت محاسباتی بالا برای شبیه‌سازی با قدرت تفکیک بالاتر (۲۲°/۰ و ۱۱°/۰ به ترتیب تقریباً ۲۵ و ۱۲ کیلومتر) دعوت شد.

برای اجرای این پژوهش، نخست خروجی‌های روزانه بارش و دمای بیشینه و کمینه از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۵ برای سه مدل منطقه‌ای آب و هوا با قدرت تفکیک ۲۲°/۰ و ۴۴°/۰، که توسط سه مؤسسه معتبر هواشناسی اجرا شده، از سایت ESGF دریافت شد (جدول ۱). دلیل انتخاب این دوره زمانی این بود که با در نظر گرفتن دوره زمانی نسبتاً جدید تعداد بیشتری ایستگاه همدید در ارزیابی در نظر گرفته شود؛ دلیل دیگر وجود خروجی‌های تاریخی مدل‌های منطقه‌ای تا سال ۲۰۰۵ است.

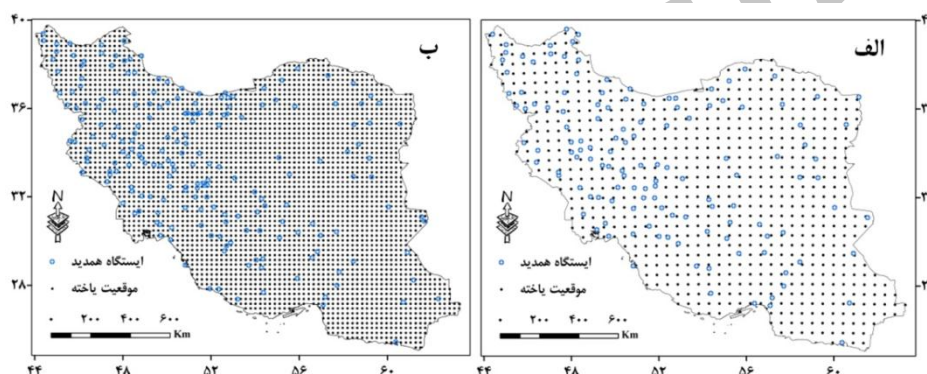


شکل ۱. محدوده‌هایی از CORDEX با پوشش کلی پهنه سرزمینی ایران. الف) محدوده CORDEX-MNA؛ ب) محدوده CORDEX-WAS (منبع: <http://www.cordex.org>)

جدول ۱. مشخصات مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در پروژه CORDEX به کاررفته در این پژوهش

RegCM4.1, RegCM4.4	RCA4	HadRM3P	نام مدل منطقه‌ای آب و هوا
Indian Institute of Tropical Meteorology	Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre	Met Office Hadley Centre	نام مؤسسه اجراکننده مدل
IITM	SMHI	MOHC	شناسه مؤسسه اجراکننده مدل
WAS-0.44°	WAS-0.44°, MNA-0.22°, MNA-0.44°	WAS-0.44°	محدوده و قدرت تفکیک هر مدل
http://gforge.ictp.it/gf/project/regcm	http://www.smhi.se/en/Research/Research-departments/climate-research-rossby-centre	http://www.metoffice.gov.uk	منبع

داده‌های ثبت‌شده در ۳۰۴ ایستگاه‌های همدید کشور برای این سه متغیر به صورت روزانه از سازمان هواشناسی کشور دریافت و ماتریسی به ابعاد 304×58144 تشکیل شد. برای اجرای این پژوهش، نخست برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB برای استخراج داده‌های مدل در محدوده ایران و سپس مقایسه داده‌های مدل با داده‌های مشاهداتی با در نظر گرفتن این دو شرط نوشته شد. شرط اول اینکه در قدرت تفکیک 0.44° (ماتریس مکان-زمان با ابعاد 740×58144) ایستگاه مشاهداتی با یاخته متناظر فاصله‌ای کمتر از ۲۵ کیلومتر داشته باشد و شرط بعدی اینکه در قدرت تفکیک 0.22° (ماتریس مکان-زمان با ابعاد 3218×58144) فاصله‌ای کمتر از ۱۲ کیلومتر بین یاخته‌های مدل و ایستگاه‌های مشاهداتی وجود داشته باشد (امانول و همکاران، ۲۰۱۲؛ کاسانوا و همکاران، ۲۰۱۶). مبنای در نظر گرفتن این فاصله‌ها این است که بیشترین ایستگاه زمینی به عنوان داده پایه در ارزیابی دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای به کار گرفته شود. پس از اعمال این دو شرط و حذف ایستگاه‌هایی با دوره آماری کمتر از ۱۹۹۰-۲۰۰۵، در قدرت تفکیک 0.44° به طور متوسط داده‌های ۱۳۰ ایستگاه و در قدرت تفکیک 0.22° داده‌های ۱۵۰ ایستگاه با یاخته متناظرشان مقایسه شدند (شکل ۲).



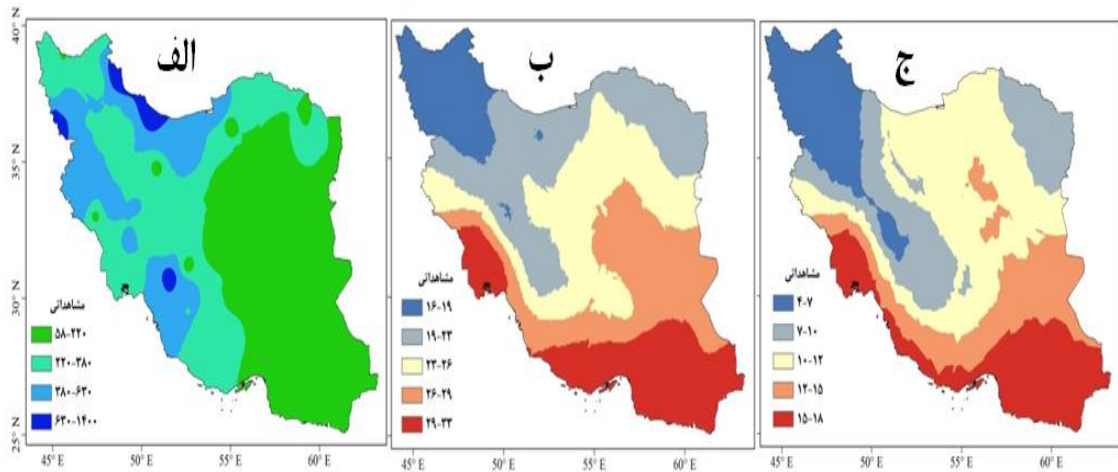
شکل ۲. موقعیت یاخته‌ها، الف) قدرت تفکیک 0.44° ؛ ب) قدرت تفکیک 0.22° و ایستگاه‌های همدید با کمترین فاصله

در ادامه اختلاف داده‌های زمینی با یاخته متناظر آن با روش‌های میانگین خطا (ME)، ضریب همبستگی پیرسن، RMSE، و انحراف معیار به صورت نقشه و نمودار بررسی شد. پس از اجرای محاسبات آماری، برای نمایش میانگین خطا و همبستگی به صورت پهنه، از روش کریجینگ در نرم‌افزار ArcMap 10.4.1 استفاده شد. همچنین، نمودارهای مقایسه‌ای-باکس ویسکر و تیلور^۱ (نموداری برای رسیدن به دیدی کلی و جامع)- برای انتخاب بهترین مدل در پهنه ایران با یکدیگر مقایسه شدند. نمودار تیلور به طور گسترده به منظور بررسی ابعاد پیچیده و پیمایش توان نسبی چند مدل یا طرحواره همرفت به کار می‌رود (تیلور، ۲۰۰۱؛ عزیز و همکاران، ۱۳۹۵: ۴۱). این نمودار یک چارچوب دیداری برای مقایسه متغیرهای یک یا چند مجموعه داده با متغیرهای یک یا چند نوع داده مبنای فراهم می‌کند. نرم‌افزار NCL-6.5.0 شامل توابعی است که آماره‌های مورد نیاز برای ترسیم نمودار تیلور را فراهم می‌کند.

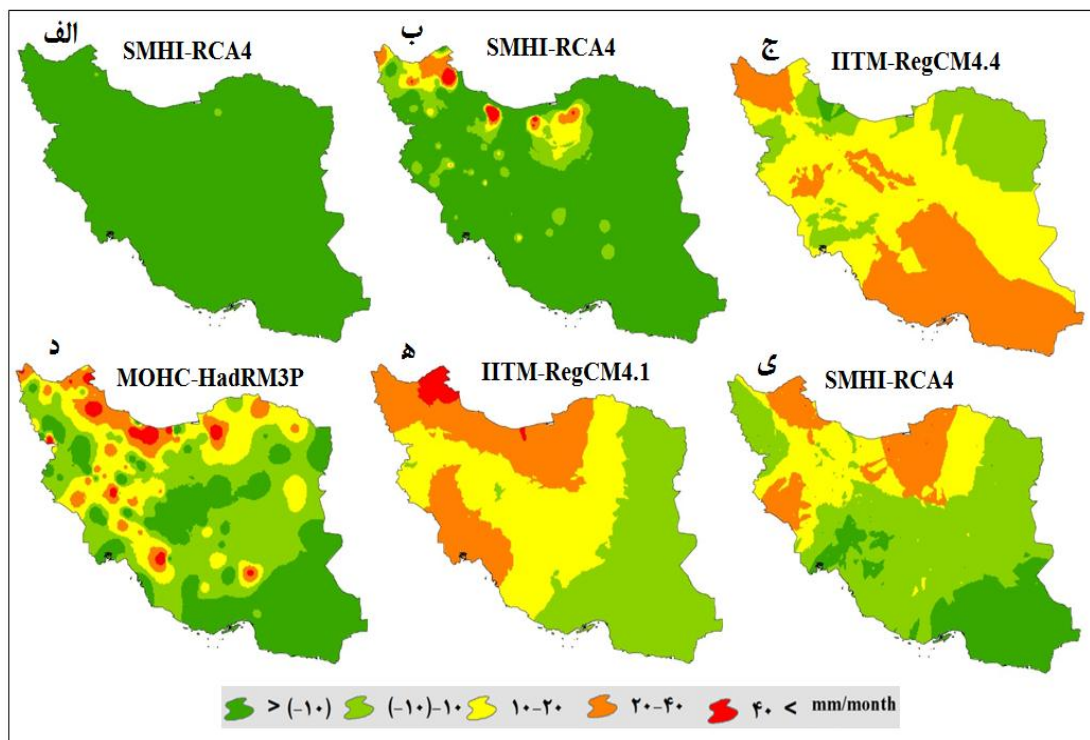
یافته‌های پژوهش

دقت خروجی بارش مدل‌های منطقه‌ای آب و هوایی ارائه‌شده توسط مؤسسات هواشناسی مختلف (جدول ۱) در دو محدوده CORDEX-MNA و CORDEX-WAS در ایران با داده‌های ایستگاهی (شکل ۳-الف) مقایسه شد. مدل

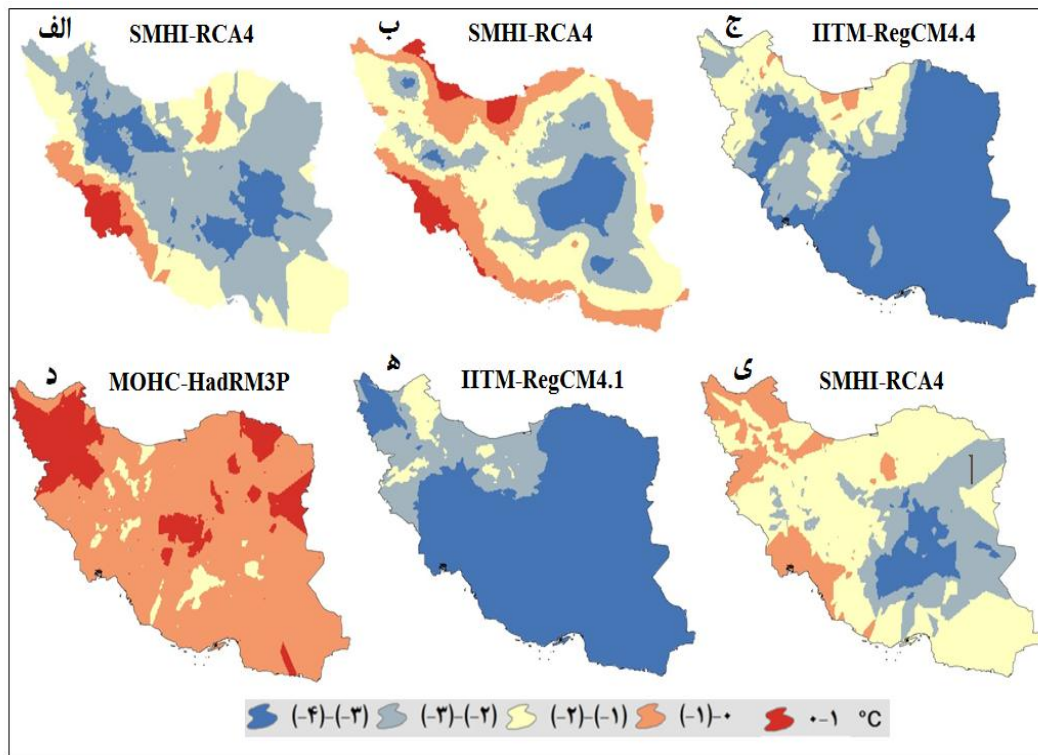
RCA4 در محدوده MNA-0.22 در کل محدوده ایران کم‌برآوردی بیش از ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. خروجی‌های این مدل در محدوده MNA-0.44 در کرانه‌های شمالی کشور و بخش‌هایی از شمال غرب بیش‌برآوردی تا بیش از ۴۰ میلی‌متر را برآورد می‌کند و در دیگر مناطق کشور این مقدار به کم‌برآوردی تا کمتر از ۱۰ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۴-الف، ب). خروجی‌های بارش برای مدل RegCM4.4 در محدوده WAS-0.44 در کرانه‌های جنوبی کشور بیش‌برآوردی ۲۰-۴۰ میلی‌متری دارد و در بخش‌های مرکزی این مقدار بین ۱۰-۲۰ میلی‌متر متغیر است. در شمال شرق، جنوب غرب کرانه‌های شمالی، و در بخش‌هایی از غرب نیز اختلاف داده‌های ایستگاهی و خروجی‌های مدل بین ۱۰ تا ۱۰- میلی‌متر در نوسان است (شکل ۴-ج). مدل منطقه‌ای HadRM3P در جنوب شرق و بخش‌هایی از مرکز کشور کم‌برآوردی ۱۰- میلی‌متر و کمتر را شبیه‌سازی کرده است. مقدار بارش برآوردشده به وسیله این مدل در مناطق کوهستانی کشور با بیش‌برآوردی بین ۱۰ تا بیش از ۴۰ میلی‌متر در نوسان است (شکل ۴-د). خروجی‌های مدل RegCM4.1 در نیمه شرقی کشور اختلافی بین ۱۰ تا ۱۰- میلی‌متر دارد. مقدار خطا در مناطق مرکزی به ۱۰-۲۰ میلی‌متر می‌رسد و در کرانه‌های شمالی کشور، شمال غرب، و جنوب غرب بین ۲۰ تا بیش از ۴۰ میلی‌متر در نوسان است (شکل ۴-ه). در نهایت، خروجی‌های مدل RCA4 در محدوده WAS-0.44 در جنوب شرق کشور اختلاف ۱۰- میلی‌متر و کمتر را با داده‌های ایستگاهی دارد و در مناطق مرکزی، کرانه‌های خلیج فارس، و شرق کشور بین ۱۰ تا ۱۰- میلی‌متر اختلاف با داده‌های واقعی دارد (شکل ۴-ی). مقایسه خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا با داده‌های ایستگاهی برای دمای بیشینه (شکل ۳-ب) حاکی از آن است که مدل RCA4 در محدوده MNA-0.22 در جنوب غرب و کرانه‌های خلیج فارس کمترین اختلاف را با داده‌های واقعی نشان می‌دهد. همچنین، این مدل در محدوده MNA-0.44 در کرانه‌های شمالی و جنوبی و بخش‌هایی از شرق و شمال غرب کشور کمترین خطا را با داده‌های واقعی دارد (شکل ۵-الف، ب). مدل RegCM4.4 و RegCM4.1 در محدوده WAS-0.44 در هیچ یک از بخش‌های کشور برآورد مناسبی از مقدار دمای بیشینه ندارد (شکل ۵-ج، ه). مدل HadRM3P به غیر از بخش‌هایی از مرکز در دیگر مناطق کمترین اختلاف را با داده‌های واقعی نشان می‌دهد (شکل ۵-د). مدل RCA4 به غیر از بخش‌هایی از شمال غرب و جنوب غرب در دیگر بخش‌ها برآورد صحیحی از مقادیر دمای کمینه ایران ندارد (شکل ۵-ی). خروجی مدل‌های منطقه‌ای نیز برای دمای کمینه با داده‌های ایستگاهی (شکل ۳-ج) مقایسه شد که در مدل RCA4 در محدوده MNA-0.22 جنوب غرب کشور کمترین اختلاف را با داده‌های ایستگاهی نشان داد. این مدل با قدرت تفکیک 0.44° در غرب کشور و کرانه‌های خلیج فارس برآورد مناسبی از دمای کمینه دارد (شکل ۶-الف، ب). مدل RegCM4.4 به غیر از بخش‌هایی از مرکز و شمال کشور در دیگر مناطق برآورد مناسبی از دمای کمینه نشان می‌دهد (شکل ۶-ج). مدل HadRM3P اختلاف بسیار زیادی با داده‌های ایستگاهی دارد و مقدار دمای کمینه را به درستی برآورد نکرده است (شکل ۶-د). این در حالی است که مدل RegCM4.1 کمترین اختلاف را با داده‌های واقعی در بیشتر بخش‌های کشور نشان می‌دهد (شکل ۶-ه). مدل RCA4 در محدوده WAS-0.44 به غیر از بخش‌هایی از جلگه خوزستان در دیگر بخش‌ها برآورد مناسبی از مقدار کمینه دما ندارد (شکل ۶-ی).



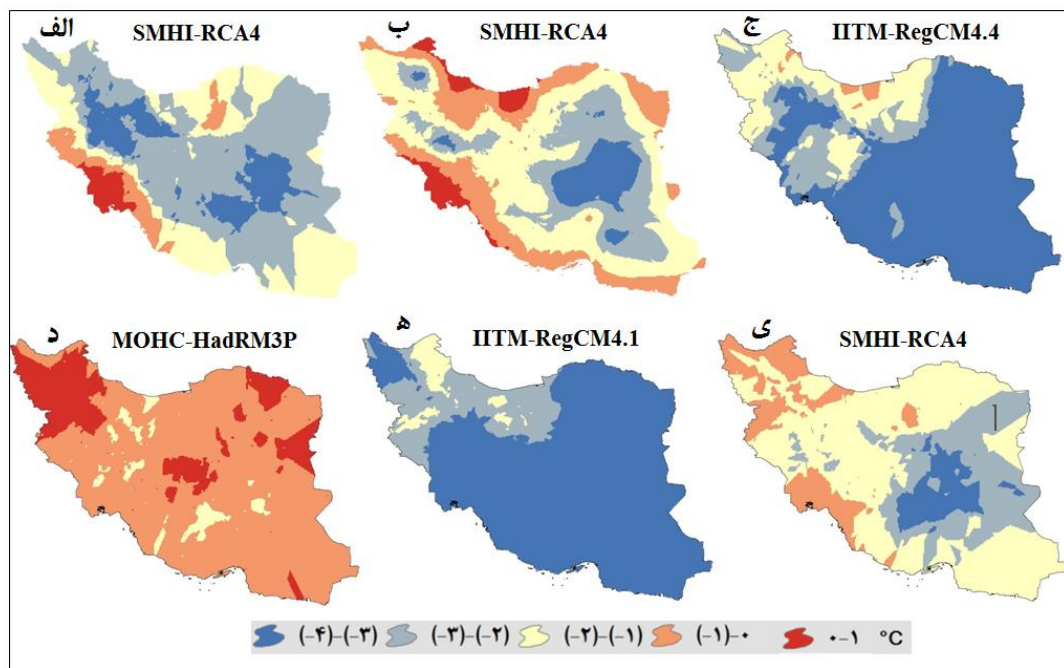
شکل ۳. میانگین مشاهداتی: الف) بارش؛ ب) دمای بیشینه؛ ج) دمای کمینه در دوره مطالعاتی (۱۹۹۰-۲۰۰۵)



شکل ۴. اختلاف داده‌های بارش مشاهداتی با خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۵: الف) MNA-0.22؛ ب) MNA-0.44؛ ج) WAS-0.44؛ د) MOHC-HadRM3P؛ ه) IITM-RegCM4.1؛ و) SMHI-RCA4



شکل ۵. اختلاف داده‌های دمای بیشینه مشاهداتی با خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۵: الف) MNA-0.22 (ب) MNA-0.44؛ ج - ی) WAS-0.44



شکل ۶. اختلاف داده‌های دمای کمینه مشاهداتی با خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۵: الف) MNA-0.22 (ب) MNA-0.44؛ ج - ی) WAS-0.44

انتخاب بهتر مدل

بارش

محاسبه و پهنه‌بندی همبستگی بین داده‌های بارش ایستگاهی و خروجی مدل منطقه‌ای RCA4 نشان داد که در نیمه شرقی و مناطق شمالی کشور همبستگی مناسب و در مناطق مرکزی و سواحل جنوبی کشور نامناسب است (شکل ۸-الف). این مدل با قدرت تفکیک 0.44° همبستگی ضعیفی را در بیشتر مناطق کشور با داده‌های واقعی دارد (شکل ۸-ب). مدل RegCM4.4 و RegCM4.1 نیز همبستگی ضعیفی را در نیمه شمالی کشور نشان می‌دهد (شکل ۸-ج، ه)؛ این در حالی است که مدل HadRM3P در جنوب شرق و شمال غرب همبستگی 0.84 را با داده‌های ایستگاهی این مناطق دارد (شکل ۸-د). در مدل RCA4 در محدوده WAS-0.44 در بخش‌هایی از خلیج فارس، شرق، و شمال غرب همبستگی خوبی با داده‌های واقعی وجود دارد (شکل ۸-ی). در نمودار باکس ویسکر، که ضرایب همبستگی را بین داده‌های ایستگاهی و یاخته‌های متناظر در نیمه شمالی و جنوبی کشور مقایسه کرده، به‌طور کلی در هیچ یک از مدل‌ها اختلاف چشم‌گیری بین مقادیر همبستگی وجود ندارد و مدل‌های مورد بررسی برآورد درستی از بارش در ایران ندارند (شکل ۷-الف).

دمای بیشینه

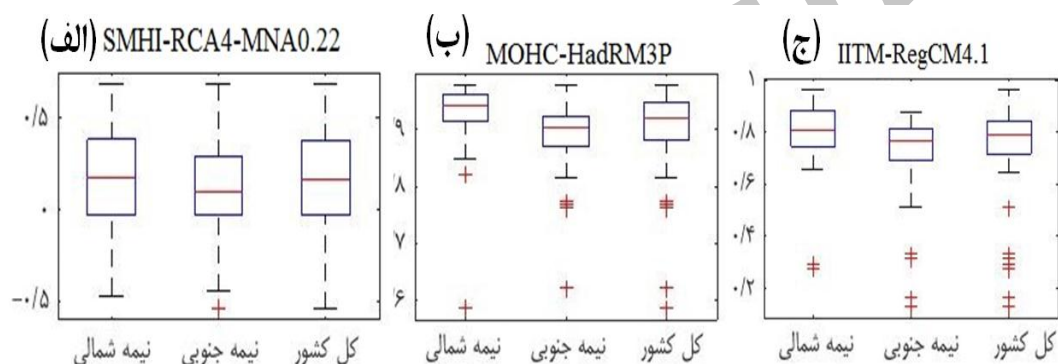
مقادیر همبستگی بین داده‌های ایستگاهی و خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در مدل RCA4 در محدوده MNA با قدرت تفکیک 0.22° در نیمه شمالی کشور در بیشینه مقدار خود قرار دارد (شکل ۹-الف). خروجی این مدل با قدرت تفکیک 0.44° در سواحل دریای خزر، جلگه خوزستان، و بخش‌هایی از کرانه‌های جنوبی کشور همبستگی مناسبی با داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد (شکل ۹-ب). در مدل RegCM4.4 نیز در جنوب غرب، بخش‌هایی از سواحل خلیج فارس، و دریای خزر همبستگی ضعیفی را شاهد هستیم (شکل ۹-ج). خروجی‌های دمای بیشینه مدل HadRM3P در بیشتر بخش‌های کشور همبستگی بسیار قوی را با داده‌های واقعی از خود نشان می‌دهد. همچنین، در این مدل بخش‌هایی از شرق و سواحل جنوبی دارای همبستگی ضعیفی هستند (شکل ۹-د). در مدل RegCM4.1 در جنوب شرق، بخش‌هایی از غرب، و کرانه‌های شمالی کشور همبستگی قوی با داده‌های ایستگاهی وجود دارد (شکل ۹-ه). در نهایت، مدل RCA4 در محدوده WAS0.44 در کل کشور به غیر از جنوب شرق، بخش‌هایی از غرب، و سواحل خلیج فارس همبستگی ضعیفی با داده‌های ایستگاه متناظر با نزدیک‌ترین یاخته نشان می‌دهد (شکل ۹-ی). نمودار باکس ویسکر برای مدل‌های مختلف نشان داد که خروجی‌های مدل HadRM3P در نیمه شمالی کشور همبستگی بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد و در بیشتر یاخته‌ها ضریب همبستگی بیش از 0.8 است (شکل ۷-ب).

دمای کمینه

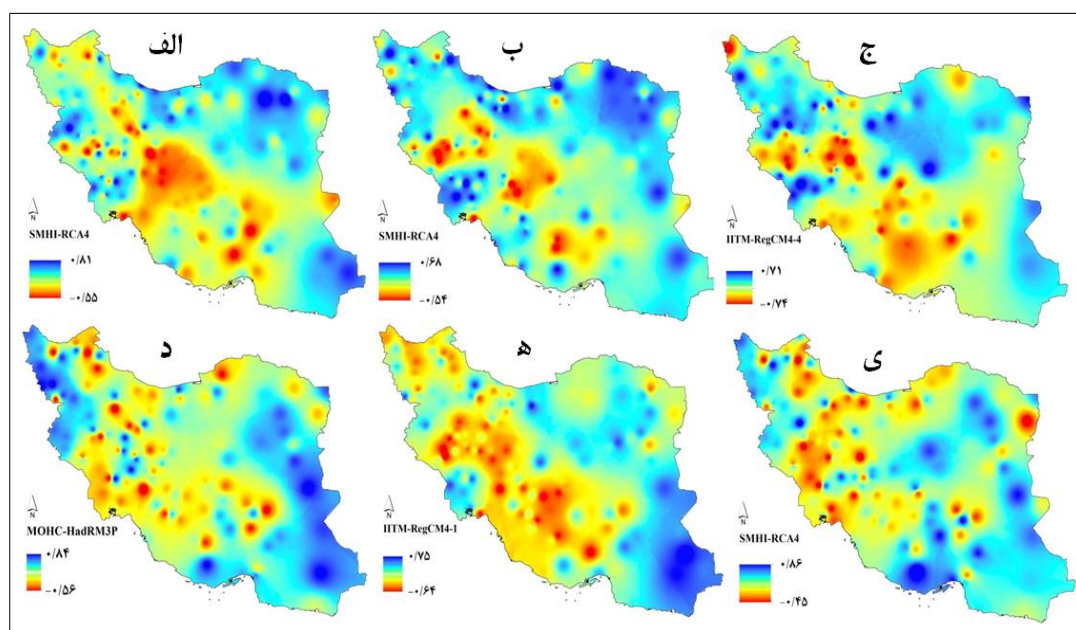
همبستگی بین داده‌های دمای کمینه و خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا برای مدل RCA4 در محدوده MNA-0.22 در شمال غرب کشور مناسب است و در دیگر مناطق مقدار همبستگی ضعیف است (شکل ۱۰-الف). این مدل با قدرت تفکیک 0.44° در بخش‌های بیشتری از کشور دارای همبستگی مناسب است که این بخش‌ها شامل شمال غرب، شرق، و کرانه‌های دریای خزر و خلیج فارس است (شکل ۱۰-ب). مدل RegCM4.4 نیز در شمال غرب و کرانه‌های دریای خزر دارای همبستگی مناسب است (شکل ۱۰-ج). مدل HadRM3P در نیمه غربی کشور و کرانه‌های دریای

خزر همبستگی قوی را با داده‌های واقعی نشان می‌دهد (شکل ۱۰-د)؛ در حالی که مدل RegCM4.1 در بیشتر بخش‌های کشور به غیر از جنوب غرب و بخش‌هایی از شمال شرق همبستگی قوی با داده‌های دمای کمینه دارد (شکل ۱۰-ه). همچنین، مدل RCA4 در محدوده WAS-0.44 در غرب، شرق، و کرانه‌های دریای خزر همبستگی بالایی با داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد (شکل ۱۰-ی). نمودار باکس ویسکر برای مدل RegCM4.1 در بیشتر مناطق دارای همبستگی قوی بین داده‌های مشاهداتی و خروجی‌های این مدل است و در نیمه شمالی کشور مقدار همبستگی نسبت به نیمه جنوبی بیشتر است (شکل ۷-ج).

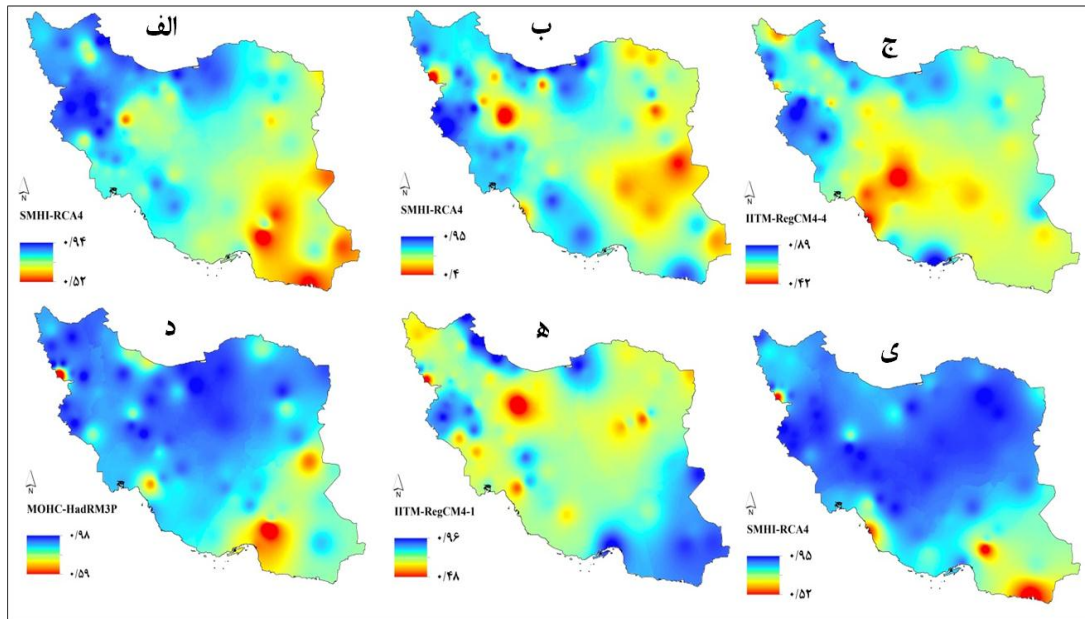
خطا و RMSE داده‌های بارش برای مدل RCA4 در محدوده MNA و با قدرت تفکیک 0.22° برآورد بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها از مقدار بارش ایران نشان می‌دهد. محاسبه این آماره‌ها برای دمای بیشینه در نیمه شمالی و جنوبی کشور بیانگر این است که مدل HadRM3P کمترین اختلاف را با داده‌های واقعی دارد. دمای کمینه کمترین خطا را در مدل RegCM4.1 با داده‌های واقعی دارد که این خطا زیر یک درجه سلسیوس است (شکل ۱۱).



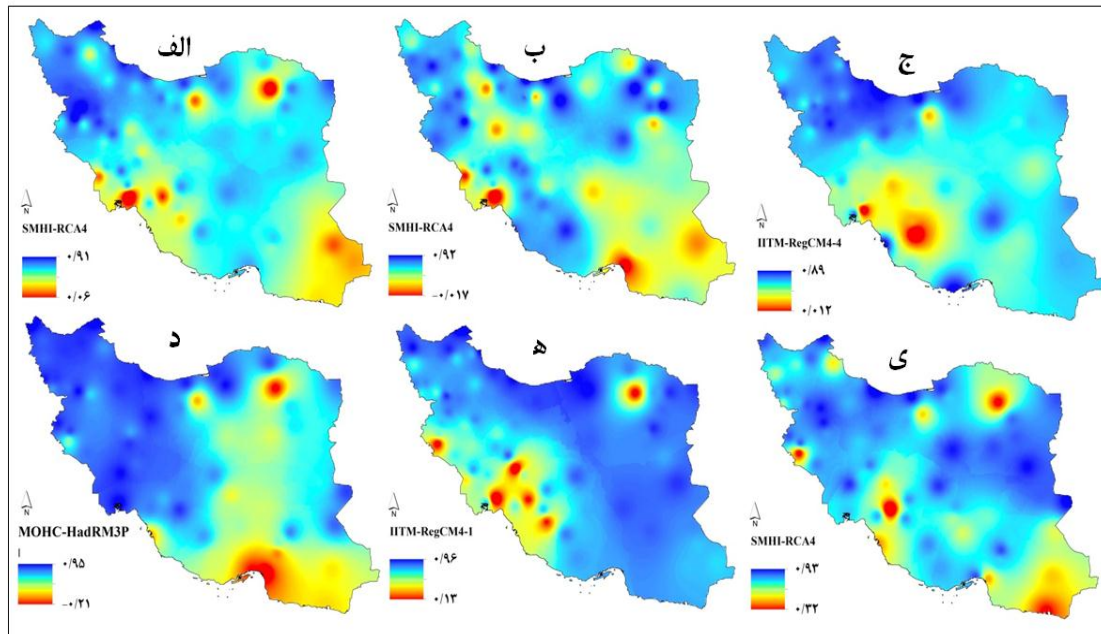
شکل ۷. نمودار باکس ویسکر ضریب همبستگی: (الف) بارش؛ (ب و ج) دمای کمینه و بیشینه در نیمه شمالی و جنوبی ایران



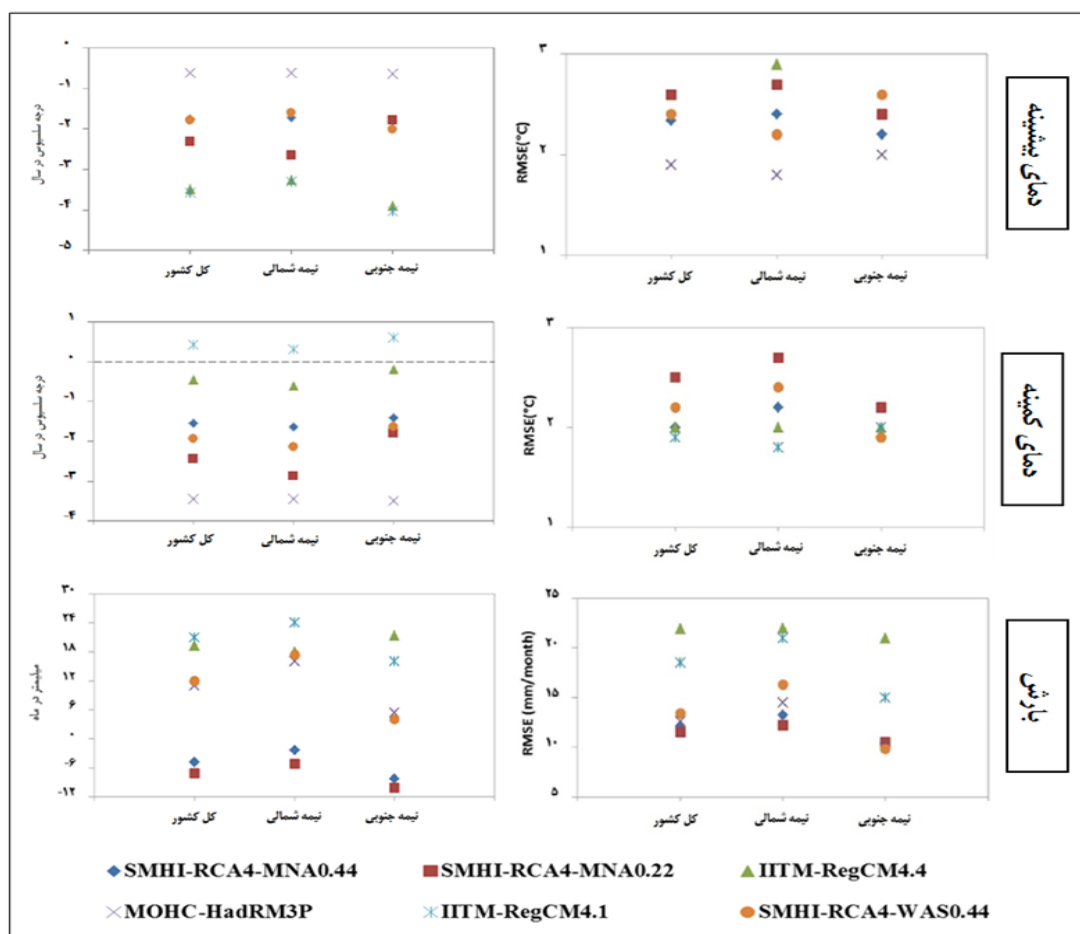
شکل ۸. همبستگی داده‌های واقعی بارش با خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در پهنه ایران: (الف) MNA-0.22؛ (ب) MNA-0.44؛ (ج) WAS-0.44



شکل ۹. همبستگی داده‌های واقعی دمای بیشینه با خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در پهنه ایران: الف) MNA-0.22؛ ب) WAS-0.44؛ ج - ی) MNA-0.44

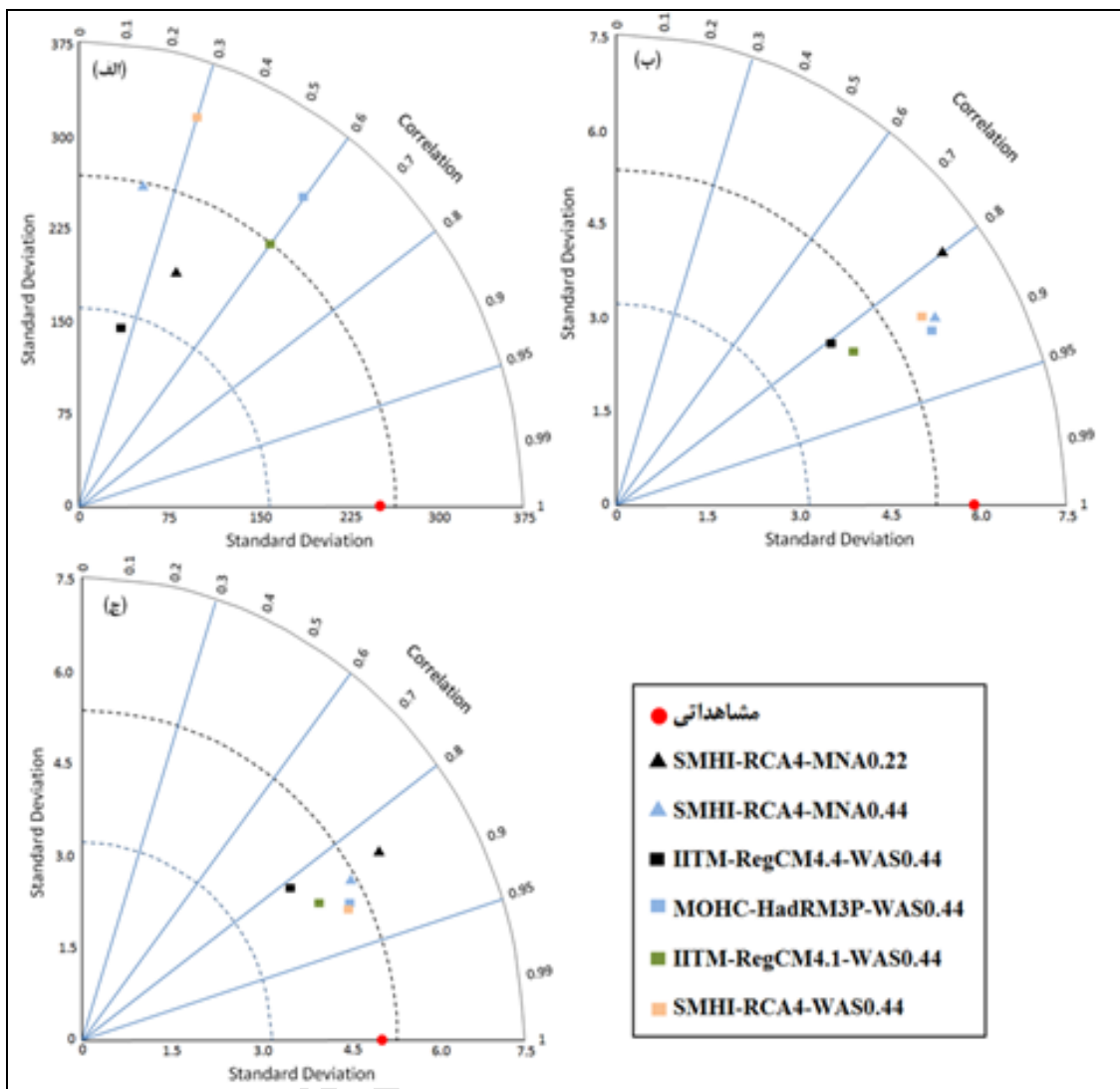


شکل ۱۰. همبستگی داده‌های واقعی دمای کمینه با خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در پهنه ایران: الف) MNA-0.22؛ ب) WAS-0.44؛ ج - ی) MNA-0.44



شکل ۱۱. مقدار خطا و RMSE بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه در مدل‌های منطقه‌ای مختلف طی دوره مورد مطالعه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) در نیمه شمالی و جنوبی ایران

نمودار تیلور، که مقدار همبستگی و انحراف معیار داده‌ها را با هم ارائه می‌کند، بیانگر این است که خروجی مدل‌های منطقه‌ای برآورد مناسبی از مقادیر بارش در ایران ندارند. از بین مدل‌های منطقه‌ای، RegCM4.1 بهترین برآورد را از مقادیر بارش با همبستگی ضعیف و با انحراف استاندارد نزدیک به داده‌های مشاهداتی دارد (شکل ۱۲-الف). خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا برای دمای بیشینه همبستگی بین ۰/۸ تا ۰/۹ را با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. این داده‌ها به ترتیب در سه مدل HadRM3P، RCA4-MNA-0.44، و RCA4-WAS0.44 بیشترین همبستگی و کمترین اختلاف را با انحراف معیار داده‌های مشاهداتی دارند (شکل ۱۲-ب). خروجی مدل‌های منطقه‌ای دمای کمینه نیز همبستگی بین ۰/۸ تا ۰/۹ دارد و انحراف معیار داده‌ها هم نزدیک به داده‌های مشاهداتی است. دو مدل RCA4-WAS0.44 و HadRM3P بیشترین همبستگی و کمترین اختلاف را با انحراف معیار داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند (شکل ۱۲-ج).



شکل ۱۲. نمودار سالانه تیلور برای مدل‌های مختلف منطقه‌ای آب و هوایی در پروژه CORDEX طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۵ در ایران: الف) بارش؛ ب) دمای بیشینه؛ ج) دمای کمینه

نتیجه‌گیری

در این پژوهش دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در دو محدوده جنوب آسیا (WAS) و شمال آفریقا- خاورمیانه (MNA) از پروژه CORDEX در ایران بررسی شد. نتایج نشان داد که خروجی‌های بارش در هر دو محدوده خطای زیادی با داده‌های مشاهداتی دارد. مقدار خطا و RMSE داده‌های بارش از بین خروجی مدل‌های مختلف حاکی از آن است که مدل منطقه‌ای RCA4 در محدوده CORDEX-MNA با قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتر خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. ارزیابی همبستگی داده‌های بارش نیز بیانگر این است که بیشتر مدل‌ها در مناطق مرکزی و کوهستانی کشور همبستگی خوبی با داده‌های مشاهداتی ندارند. از دلایل این امر عبارت است از فقدان شبکه ایستگاه زمین با پراکنش مناسب و متراکم و فاصله‌داشتن ایستگاه با یاخته متناظرش (امانوتل و همکاران، ۲۰۱۲). در نهایت، می‌توان بیان کرد که هیچ یک از مدل‌ها برآورد درستی از مقدار بارش در ایران ندارند. برای تصحیح خطا، گسترش مرزهای شرقی محدوده CORDEX-MNA جهت خارج شدن ایران از مناطق حاشیه‌ای محدوده شبیه‌سازی یا تعریف محدوده‌های جدید

برای این منطقه از جهان ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، اجرای مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا با قدرت تفکیک بالاتر نیز در کاهش خطای خروجی‌های بارش می‌تواند مؤثر باشد (المزروعی و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش‌هایی که در این زمینه صورت گرفته بیان شده که، به سبب تغییرات مکانی- زمانی شدید و طیف متغیر عدم قطعیت و خطا، برآورد بارش یکی از دشوارترین برآوردهای آب و هوایی در مدل‌های منطقه‌ای است (المزروعی، ۲۰۱۳؛ ایسلام، ۲۰۰۹). بررسی خروجی دمای بیشینه در مدل‌های مختلف نشان داد که مدل HadRM3P خطای کمتری با داده‌های مشاهداتی در پهنه ایران دارد. پراکنش مکانی همبستگی در کشور حاکی از آن است که دو مدل HadRM3P و RCA4-WAS0.44 به ترتیب دارای همبستگی قوی‌اند و تغییر مقادیر ضریب همبستگی در مدل HadRM3P نسبت به سایر مدل‌ها هم در نیمه شمالی و هم در نیمه جنوبی کشور کم است. بررسی کلی خطای این متغیر آب و هوایی اختلاف کمتر از یک درجه سلسیوس را بین داده‌های مشاهداتی و مدل HadRM3P به صورت کم‌برآوردی نشان می‌دهد، که این مقدار خطا کمترین خطا بین همه مدل‌های مورد مطالعه است. نمودار تیلور نیز ثابت می‌کند که این مدل انحراف معیاری برابر با داده‌های مشاهداتی و همبستگی قوی‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. در نهایت می‌توان بیان کرد که مدل HadRM3P، که مرکز هواشناسی هدلی آن را اجرا کرده، بهترین مدل منطقه‌ای آب و هوا در پروژه CORDEX برای برآورد دمای بیشینه ایران است. همچنین، مدل RegCM4.1، که مؤسسه هواشناسی حاره‌ای هند آن را اجرا کرده، برای دمای کمینه کمترین اختلاف را با داده‌های مشاهداتی به جز نواحی جنوب‌غربی و بخش‌هایی از شرق نشان می‌دهد. این مدل در نیمه شمالی کشور همبستگی بیشتری نسبت به نیمه جنوبی داشت. همچنین، بررسی میانگین این متغیر در کل ایران اختلافی کمتر از یک درجه سلسیوس با داده‌های واقعی دارد و نسبت به مدل‌های دیگر برآورد مناسب‌تری از دمای کمینه کشور دارد. در پایان به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود پیش از استفاده از داده‌های ریزمقیاس‌نمایی‌شده در پروژه CORDEX از روش‌های تابع توزیع تجمعی، تابع توزیع احتمال یا تابع انتقال (دوسیو، ۲۰۱۶؛ امانوئل و همکاران، ۲۰۱۲) برای تصحیح خطای خروجی‌های منطقه‌ای استفاده کنند.

منابع

- عزیزی، ق.؛ صفرا، ط.؛ فرجی، ح. و محمدی، ح. (۱۳۹۵). ارزیابی و مقایسه داده‌های بازکاوی شده بارش جهت استفاده در ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۸(۱): ۳۳-۴۹.
- Ahmed, K.F.; Wang, G.; Silander, J.; Wilson, A.M.; Allen, J.M.; Horton, R. and Anyah, R. (2013). Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast, *Global and Planetary Change*, 100: 320-332.
- Almazroui, M.; Islam, M.N.; Al-Khalaf, A.K. and Saeed, F. (2016). Best convective parameterization scheme within RegCM4 to downscale CMIP5 multi-model data for the CORDEX-MENA, Arab domain, *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3): 807-823. doi:10.1007/s00704-015-1463-5
- Almazroui, M. (2013). Simulation of present and future climate of Saudi Arabia using a regional climate model (PRECIS), *Int J. Climatol*, 33: 2247-2259. doi:10.1002/joc.3721.
- Azizi, Gh.; Safarrad, T.; Faraji, H.A. and Mohamadi, H. (2016). Evaluate and Comparison Reanalyzed Data for Using in Iran, *Journal of Physical Geography Quarterly*, 48(1): 33-49. (In Persian).
- Casanueva, A.; Kotlarski, S.; Herrera, S.; Fernández, J.; Gutiérrez, J.M.; Boberg, F. and Vautard, R. (2016). Daily precipitation statistics in a EURO-CORDEX RCM ensemble: added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations, *Climate Dynamics*, 47(3): 719-737. doi:10.1007/s00382-015-2865-x.
- Dosio, A. (2016). Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(10): 5488-5511. doi:10.1002/2015JD024411.
- Dosio, A.; Panitz, H.-J.; Schubert-Frisius, M. and Lüthi, D. (2015). Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value, *Climate Dynamics*, 44(9): 2637-2661. doi:10.1007/s00382-014-2262-x.
- Emmanouil, F.; Philippe, D.; Marco, B.; Jean-Christophe, C.; Guy, D.; Efrat, M.; ... and Roberta, T. (2012). Assessment of gridded observations used for climate model validation in the Mediterranean region: the HyMeX and MED-CORDEX framework, *Environmental Research Letters*, 7(2): 024017.
- Giorgi, F. and Mearns, L.O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: a review, *Reviews of Geophysics*, 29(2): 191-216, <http://dx.doi.org/10.1029/90RG02636>.
- Giorgi F. and Hewitson, B. (2001). Regional climate information-evaluation and projections. In: Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Xiaoosu D. (eds) *Climate change 2001: the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Giorgi, F.; Jones, C. and Asrar, G. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *World Meteorol Organ (WMO) Bull*, 58: 175-183.
- Isotta, F.A.; Frei, C.; Weigluni, V.; Percec Tadi, C.M.; Lassagues, P.; Rudolf, B.; Pavan, V.; Cacciamani, C.; Antolini, G.; Ratto, S.M.; Munari, M.; Micheletti, S.; Bonati, V.; Lussana, C.; Ronchi, C.; Panettieri, E.; Marigo, G. and Verta_cnik, G. (2013). The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data, *International Journal of Climatology*, DOI 10.1002/joc.3794.
- Islam, M.N. (2009). Rainfall and temperature scenario for Bangladesh, *Open Atmos Sci J.*, 3: 93-103.
- Ji, Zhenming and Kang, Sh. (2015). Evaluation of extreme climate events using a regional climate model for China, *International Journal of Climatology*, 35: 888-902.

- Jones, R.G.; Noguer, M. and Hassell, D.C. (2004). Generating high-resolution climate change scenarios using PRECIS, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
- Haylock, M.R.; Hofstra, N.; Klein Tank, A.M.G.; Klok, E.J.; Jones, P.D. and New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006, *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD010201.
- Kidson, J.W. and Thompson, C.S. (1998). A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations, *Journal of Climate*, 11: 735-753.
- Murphy, J. (1999). An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate, *Journal of Climate*, 12(8): 2256-2284.
- Pal, J.S.; Giorgi, F.; Bi, X. and Elguindi, N. (2007). The ICTP RegCM3 and RegCNET: regional climate modeling for the developing world, *Bull Am Meteorol Soc*, 88(9): 1395-1409.
- Raju, P.V.S.; Bhatla, R.; Almazroui, M. and Assiri, M. (2015). Performance of convection schemes on the simulation of summer monsoon features over the South Asia CORDEX domain using RegCM-4.3, *International Journal of Climatology*, 35(15): 4695-4706. doi:10.1002/joc.4317.
- Shongwe, M.E.; Lennard, C.; Liebmann, B.; Kalognomou, E.-A.; Ntsangwane, L. and Pinto, I. (2015). An evaluation of CORDEX regional climate models in simulating precipitation over Southern Africa, *Atmospheric Science Letters*, 16(3): 199-207. doi:10.1002/asl2.538.
- Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192. doi: 10.1029/2000JD900719
- XueJie, G.; Shi, Ying; ZhangDong, F.; Giorgi, F. (2012). Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model, *Chin Sci Bull*, 57(10).
- Zhou, W.; Tang J.; Wang, X.; Wang, S.; Niu, X.; Wang, Y. (2016). Evaluation of regional climate simulations over the CORDEX-EA-II domain using the COSMO-CLM model, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Volume 52, Number 2, Page 107.