



پیش‌نگری بارش و دمای شرق کشور با استفاده از مقیاس‌های ترکیبی دینامیکی-آماري

ایمان بابائیان^۱، مریم کریمیان^{۲*}، راهله مدیریان^۲، یاشار فلامرزی^۳، منصوره کوهی^۴

^۱استادیار، گروه پژوهشی مدل‌سازی و پیش‌آگاهی اقلیمی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران.
^۲کارشناس ارشد پژوهشی، گروه پژوهشی مدل‌سازی و پیش‌آگاهی اقلیمی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران.
^۳استادیار، گروه پژوهشی مدل‌سازی و پیش‌آگاهی اقلیمی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران.
^۴استادیار، گروه پژوهشی مخاطرات و تغییرات اقلیمی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران.
 تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۱

چکیده

این مطالعه با هدف ارائه چشم‌اندازی از اقلیم استان‌های محور شرقی کشور در دهه‌های آینده جهت برنامه‌ریزی کلان و اتخاذ روش‌های سازگاری و کاهش پیامدهای گرمایش جهانی انجام شده است. مطالعه حاضر با استفاده از مقیاس‌های ترکیبی دینامیکی-آماري شامل مدل منطقه‌ای اقلیمی RegCM4.5.11 به عنوان مدل دینامیکی و عامل تغییر به عنوان مدل آماری و با بکارگیری داده‌های شرایط مرزی مدل گردش کلی CanESM از سری مدل‌های CMIP5 بر روی متغیرهای بارش و دما در منطقه شرق کشور از جمله استان‌های خراسان رضوی، جنوبی و سیستان و بلوچستان انجام گرفت. پس از انتخاب پیکر بندی بهینه مدل منطقه‌ای RegCM، برونداد مدل منطقه‌ای RegCM به روش عامل تغییر پس‌پردازش آماری شد. مدل ترکیبی یادشده برای مقیاس‌های برونداد مدل گردش کلی برای دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۹) و آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۷۱) با استفاده از دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بکار گرفته شد. نتایج این تحقیق در مورد دما برای دوره آینده نزدیک حاکی از افزایش سالانه ۴/۲ درجه‌ای در سناریوی RCP4.5 و ۵/۵ درجه در سناریوی RCP8.5 می‌باشد. در دوره آینده دور نتایج نشان دادند که دمای سالانه ۵/۲ درجه در سناریوی RCP4.5 و ۸/۹ درجه در سناریوی RCP8.5 افزایش می‌یابد. اگر در فرآیند مقیاس‌های ترکیبی، سناریوی متوسط به عنوان میانگین پیش‌نگری‌ها در نظر گرفته شود، در آن صورت تغییرات بارش شرق کشور در آینده نزدیک بین ۱۱- تا ۱۵- درصد و در آینده دور بین ۸- تا ۱۴۹+ درصد نسبت به دوره دیدبانی خواهد بود. علیرغم اینکه تعداد اندکی از سناریوها، افزایش بارش را برای منطقه پیش‌نگری کرده‌اند، اما به نظر می‌رسد هر گونه اثرات افزایش بارش به دلیل افزایش دمای پیش‌نگری شده در منطقه بلاثر شده و منطقه در آینده درگیر تنش آبی خواهد شد که نیازمند اتخاذ روش‌های سازگاری و کاهش پیامدهای گرمایش جهانی در منطقه است.

واژه‌های کلیدی: سناریوی RCP، مدل RegCM4.5، شرق ایران، بارش، دما

مقدمه

از دهه ۱۹۷۰ با کاربردی شدن روش‌های عددی در هواشناسی، تلاش‌ها برای توسعه مدل‌های گردش عمومی و منطقه‌ای شتاب بیشتری گرفتند و از آن هنگام مدل‌های مختلف با هدف پیش‌بینی روزانه و اقلیمی توسعه یافتند. اولین مدل‌ها با هدف ارائه پیش‌بینی‌های کوتاه مدت وضع هوا توسعه داده شدند.

آنها با به کارگیری معادلات بسط هوا، قوانین ترمودینامیک، بقای جرم و قانون عمومی گازها به صورت تفاضل محدود، پیش‌بینی‌های کمتر از یک هفته را ارائه نمودند. از دهه ۱۹۸۰ مدل‌های اقلیمی برای پیش‌بینی فصلی، شناسایی رفتار منطقه‌ای اقلیم، انجام مطالعات واسنجی و مقیاس‌های برونداد مدل‌های گردش عمومی مورد استفاده قرار گرفتند.

*نویسنده مسئول: mkarimian59@yahoo.com

محاسبه شد. اقتداری و همکاران (۱۳۹۷) به مقایسه بارش بهاری حاصل از چهار محصول شبکه‌بندی شده و شبیه‌سازی شده توسط RegCM و ارزیابی آنها با مقادیر مشاهداتی در دشت قزوین پرداختند. در این مطالعه عملکرد چهار محصول مختلف با تفکیک مکانی بالا، شامل برون داد AgMERRA و CHIRPS، CFSR و PERSIANN-CCS و همچنین شبیه‌سازی‌های بارش روزانه توسط مدل اقلیمی RegCM در فصل بهار با استفاده از داده‌های مشاهداتی در دشت قزوین در سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و بر مبنای نمایه‌های آماری پیوسته و طبقه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه پایگاه داده AgMERRA در مقیاس روزانه در مقطع زمانی مورد نظر، از اعتبار بیشتری برخوردار است. در دو پژوهش که توسط هوی و همکاران (۲۰۱۸) انجام شد، ابتدا توانایی مدل‌های RegCM4 و WRF در شبیه‌سازی اقلیم چین در بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۰۰ توسط مقیاس کاهی مدل‌های جهانی CMIP5 (EC-Earth و IPSL-CM5A) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که مقیاس کاهی داده‌های مدل IPSL-CM5A، شبیه‌سازی‌های دما و بارش را بهبود می‌بخشد، در حالی که بهبود نتایج EC-Earth محدودتر بود. مقایسه دو مدل اقلیم منطقه‌ای نیز نشان داد که RegCM4 برای شبیه‌سازی دمای هوای سطحی و WRF برای بارش از عملکرد بهتری برخوردار بوده‌اند. بخش دوم پژوهش، با تکیه بر نتایج حاصل از بخش اول و با هدف تعیین متوسط شرایط اقلیمی و همچنین وقایع حدی دما و بارش برای دوره ۲۰۶۰-۲۰۲۰ با استفاده از مقیاس‌کاهی دینامیکی مدل‌های EC-EARTH و IPSL-CM5A تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 انجام شده است. بررسی متوسط شرایط اقلیمی آینده نشان داد که مقدار بارش متوسط، دمای سطحی و همچنین فراوانی باران‌های متوسط تا شدید، افزایش خواهد یافت. به طور کلی سراسر کشور چین هوای گرم و مرطوب‌تری را تجربه خواهد کرد (Hui et al., 2018). از ترک و همکاران (۲۰۱۷) پژوهشی را با هدف ارائه پیش‌نگری متوسط دما (°C) و

مدل RegCM یکی از متداول‌ترین مدل‌های منطقه‌ای است که برای انجام مطالعات اقلیمی و مقیاس‌کاهی دینامیکی برون‌داد مدل‌های گردش عمومی مورد استفاده قرار گرفته است. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی رفتار اقلیم مناطق مختلف کره زمین با استفاده از این مدل در داخل و خارج از کشور انجام شده است (ایران نژاد و همکاران، ۱۳۸۳؛ احمدی گیوی و همکاران، ۱۳۸۳؛ آزادی و همکاران، ۲۰۰۳؛ باذیان و همکاران، ۱۳۸۴؛ مدیریان و همکاران، ۱۳۸۴؛ بابائیان و همکاران، ۱۳۸۶؛ کریمیان و همکاران، ۱۳۸۸؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Giorgi et al., 2007; Wang et al., 2002; et al., 1993; Pal et al., 2007). بابائیان و همکاران (۱۳۹۸) برخی فراسنج‌های اقلیمی بر روی ایران را با به کارگیری مدل‌های گردش عمومی سری CMIP5 برای دوره ۲۰۲۰-۲۱۰۰ مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با توجه به کاهش بارش و افزایش دما، انتظار می‌رود مناطق غرب کشور و به ویژه زاگرس در معرض خشک‌سالی، تنش آبی، کاهش سطح پوشش جنگلی، کاهش منابع آبی، کاهش عملکرد نیروگاه‌های تولید برقابی و افزایش رخداد‌های حدی اقلیمی قرار گیرد. مدیریان و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای چشم‌انداز تغییر اقلیم خراسان رضوی را با استفاده از مقیاس‌کاهی دینامیکی برون‌داد مدل CanESM توسط مدل RegCM4 انجام دادند. نتایج حاصل نشان دهنده افزایش بارش در فصول بهار و پاییز در شمال استان می‌باشد. یافته‌های آنها همچنین نشان داد که رفتار بارش در آینده گرایش به رگباری داشته و سهم بارش برف در استان کاهش می‌یابد. شکوهی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP5 در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم بویژه مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران پرداختند. آنها دریافتند که شبیه‌سازی‌ها با خطا همراه است و بایستی قبل از استفاده تصحیح شوند. از این‌رو ترکیبی بهینه از مدل‌های متناسب با منطقه انتخاب شد و بالاترین متوسط مقدار نمره مهارت برای شبیه‌سازی متوسط سالانه بارش و دما به ترتیب ۰/۴ و ۰/۳۸ برای مدل‌های انتخابی در بین ایستگاه‌ها

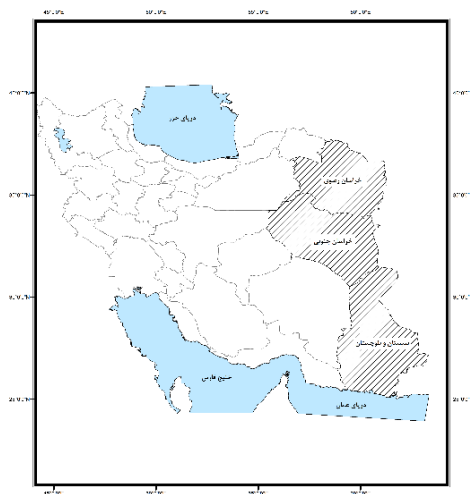
آب و تغییرپذیری مکانی و زمانی رطوبت خاک با مدل RegCM4 را بهبود می‌بخشد، در حالی که در شبیه‌سازی دمای تابستان تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند. همچنین اگرچه شبیه‌سازی بارش زمستان با استفاده از معادله اصلاح شده برای برخی مناطق مناسب بوده است اما در سایر بخش‌های مورد بررسی سبب افزایش خطا شده است (Yu et al., 2014). ماریوتی و همکاران (۲۰۱۱) به مقایسه بین شبیه‌سازی‌های تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای و شبیه‌سازی‌های حاصل از مدل‌های گردش کلی تحت سناریوی انتشار A1B، پرداختند. بررسی نتایج دما و بارش در دوره کنترل نشان داد که هر دو مدل جهانی و منطقه‌ای در تعیین مقدار اریبی، از عملکرد یکسانی برخوردارند اما الگوی مکانی اریبی متفاوتی دارند. به طور کلی الگوی اریبی در برون داد مدل RegCM با استفاده از داده‌های شرایط مرزی مدل ECHAM5 به نتایج حاصل از شبیه‌سازی RegCM با داده‌های بازکاوی ERA Interim نزدیک‌تر است. پیش‌نگری‌های انجام شده تغییر اقلیم توسط هر دو مدل بیانگر افزایش ۵ درجه‌ای دمای فصل‌های DJF (زمستان) و JJA (تابستان) در اواخر قرن ۲۱ می‌باشد. همچنین نتایج مدل منطقه‌ای RegCM3 در مقایسه با مدل ECHAM5 در تعیین موقعیت صحیح ناهنجاری‌های بارش حاصل از پدیده انسوز عملکرد بهتری برخوردار بوده است (Mariotti et al., 2011). بررسی مطالعات انجام شده در داخل و خارج از کشور نشان از لزوم مقیاس‌های دینامیکی برون‌داد مدل‌های گردش کلی را نشان می‌دهد. اغلب مطالعات انجام شده در مراکز بین‌المللی از مدل منطقه‌ای RegCM4 برای مقیاس‌های دینامیکی استفاده کرده‌اند. بر این اساس در این مطالعه چشم‌انداز اقلیم شرق کشور به عنوان یک منطقه حساس اقلیمی، با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM4.5.11 انجام می‌شود.

مواد و روش‌ها

مدل اقلیم منطقه‌ای RegCM4: در این مطالعه برای پیش‌نگری اقلیم کشور از مدل منطقه‌ای اقلیمی

بارش (mm/day) فصلی برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۱) برای منطقه آسیای مرکزی با استفاده از مدل اقلیم منطقه‌ای (RegCM4.3.5) انجام دادند. نتایج حاصل بیان کرد که به طور تقریبی در تمامی بخش‌های دامنه مطالعاتی، افزایش نسبتاً شدید دما در فصل گرم و کاهش بارندگی روی خواهد داد. روند افزایش دما به خصوص برای بخش شمالی دامنه در طول فصل سرد نیز قابل توجه است. همچنین نتایج نشان داد که مطابق سناریوهای انتشار برای دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ در مقایسه با دوره گذشته ۲۰۰۰-۱۹۷۱، دمای هوای سطحی در منطقه به طور میانگین در حدود ۳ تا ۷ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. بنابراین افزایش دما و کاهش بارش پیش‌بینی شده بر سیستم اکولوژیکی و همچنین اجتماعی-اقتصادی منطقه مورد نظر که در حال حاضر نیز از شرایط خشک و نیمه خشک برخوردار است، اثر منفی خواهد گذاشت (Ozturk et al., 2017). جکشوسکی و همکاران (۲۰۱۴)، کاربرد مدل اقلیم منطقه‌ای RegCM3.1 را در ارزیابی تغییرات پتانسیل چند شاخص دمایی برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ در کشور لهستان بررسی کردند. این شاخص‌های دمایی شامل تعداد روزهایی با دمای حداقل کمتر از صفر درجه سلسیوس (fd)، تعداد روزهای با حداکثر دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس (id)، تعداد روزهای با دمای حداکثر بیشتر از ۲۵ درجه سلسیوس (sd) و همچنین تعداد روزهای با دمای حداکثر بیش از ۳۰ درجه سلسیوس (hd) می‌باشند. نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از افزایش شاخص sd و hd و کاهش شاخص id و fd بود. بیشترین کاهش شاخص fd و id در پاییز و افزایش در بهار مشاهده شد. بیشترین افزایش شاخص hd و sd نیز در تابستان قابل مشاهده است (Jaczewski et al., 2014). یو و همکارانش (۲۰۱۴) اثر معادله اصلاح شده ریچاردز بر مدل‌سازی اقلیم منطقه‌ای با استفاده از RegCM4 در شرق آسیا را بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که کاربرد معادله اصلاح شده ریچاردز نتایج حاصل از شبیه‌سازی عمق

RegCM4 استفاده شده است که توسط جورجی و همکارانش (۱۹۹۳) توسعه یافته و سپس توسط جورجی و شلد (۱۹۹۹) و پال (۲۰۰۰) تکامل یافته است.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه شرق کشور شامل استان‌های خراسان رضوی، جنوبی و سیستان و بلوچستان

هسته دینامیکی مدل RegCM برگرفته از معادلات هیدروستاتیکی با سیستم مختصات سیگما است. معادلات مورد استفاده در این مدل عبارتند از: اندازه حرکت افقی، پیوستگی و تغییرات فشار (σ), ترمودینامیک، امگا (ω) و هیدروستاتیک. معادلات مورد استفاده در مدل بر اساس مقاله جورجی و همکاران (۱۹۹۳) به شرح زیر است.

$$\frac{d\sigma}{dt} = P^* - P_t \quad \text{و} \quad \sigma = \frac{d\sigma}{dt} \quad \text{بوده که } P_s, P_t \text{ و } \sigma \text{ به ترتیب فشار در بالاترین لایه، فشار سطح زمین و مختصه فشاری بی بعد می‌باشند. توضیحات کاملی از سایر معادلات مورد استفاده در مدل در مقاله جورجی و همکاران آمده است (Giorgi, 1993). این مدل از طرحواره بیه سفر- اتم سفر (BATS^۱) برای مدل سازی فرایندهای سطحی استفاده می‌کند و طرحواره لایه مرزی آن بر اساس مفهوم پخش غیرمحلّی توسط هولسلاگ (Holtslag, 1993) ارائه شده است. مدل برای محاسبه تابش از طرحواره تابش مدل CCM3^۲ (Kiehl, 1996) استفاده می‌کند. تابش ابر بر حسب درصد ابرناکی و میزان آب موجود در آن برآورد می‌گردد (Hsie, 1984). بارش‌های همرفتی از طرحواره‌های شار جرمی گرل با دو فرضیه AS و FC و همچنین از طرحواره‌های امانوئل و کو برای مدلسازی تشکیل ابر استفاده می‌کند. مدل RegCM دارای چهار گزینه مختلف سیستم تصویر شامل لامبرت^۳,$$

۱. Biosphere Atmosphere Transfer Scheme
۲. Community Climate Model version3

$$\frac{\partial p^* u}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial p^* u u / m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v u / m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* u \sigma}{\partial \sigma} \quad (۱)$$

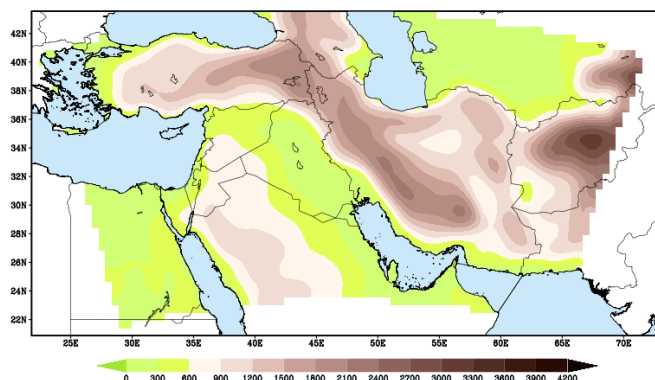
$$- m p^* \left[\frac{RT_V}{(P^* + P_t / \sigma)} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + f p^* v + F_H u + F_V u \quad (۲)$$

که در آن u و v به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در جهت x و y , T_V دمای مجازی، ϕ ارتفاع ژئوپتانسیل، f پارامتر کوریولیس، R ثابت گازها برای هوای خشک و m فاکتور مقیاس نقشه برای هر یک از سیستم‌های تصویر مرکاتور، لامبرت یا استریوگرافیک قطبی است. F_H و F_V تأثیرات افقی و عمودی انتشار را نشان می‌دهند و

شرق کشور برای مطالعه اثر گرمایش جهانی بر اقلیم آنها در دهه‌های آتی انتخاب شدند. دامنه مدل‌سازی در محدوده عرض جغرافیایی ۱۵ تا ۵۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۳۰ تا ۸۰ درجه شرقی قرار دارد. قدرت تفکیک ۶۰×۶۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. برای لحاظ اثرات سیستم‌های غربی، بخش اعظم دریای مدیترانه و بخش‌هایی از دریا‌های سرخ، سیاه و همچنین بخش‌هایی از اقیانوس هند دامنه مدل‌سازی را تشکیل می‌دهند (شکل ۲).

استریوگرافی قطبی^۱، مرکاتور نرمال^۲ و مرکاتور چرخشی می‌باشد که در آن فاکتور مقیاس نقشه به صورت نسبت فاصله نقاط در شبکه محاسباتی به فاصله آنها در زمین تعریف می‌شود.

محدوده مدل‌سازی: منطقه مورد مطالعه، شرق کشور شامل استان‌های خراسان رضوی، جنوبی و سیستان و بلوچستان را پوشش می‌دهد (شکل ۱). با توجه به ضرورت آمایش سرزمین در مناطق مرزی (مختاری و همکاران، ۱۳۹۳)، سه استان مناطق مرزی



شکل ۲: محدوده مقیاس‌گاهی دینامیکی توسط مدل منطقه‌ای RegCM4

می‌شود. برای انتخاب دمای سطح دریا (SST) دو گزینه وجود دارد: دمای سطح آب و یخ در مقیاس جهانی (GISST) به صورت ماهانه و با دقت یک درجه از مرکزهای انگلیس و داده‌های OISST به صورت هفتگی و با دقت یک درجه (در طول و عرض جغرافیایی) از مرکز NOAA قابل دریافت می‌باشند (وب سایت ICTP/RegCM) در این مطالعه از داده‌های OISST استفاده شده است. انتخاب طرحواره مناسب بر اساس دو دسته از داده‌های مدل و دیدبانی در دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ انجام گرفت. در این مطالعه از داده‌های دیدبانی ۲۴ ایستگاه همدید واقع در استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی و خراسان رضوی استفاده شد (جدول ۱). دوره پیش‌نگری بارش و دمای کشور دو دوره آینده نزدیک ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۹ و آینده دور ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۹ در نظر گرفته شد.

داده‌ها و دوره مورد مطالعه

در این مطالعه، از داده‌های مدل گردش کلی CanESM2 بعنوان داده‌های شرایط اولیه و مرزی مورد نیاز مدل RegCM4.5.11 استفاده شده است. این داده‌ها دارای تفکیک افقی ۲,۷۹۰×۲,۸۱۲۵ درجه طول در عرض جغرافیایی می‌باشد. داده‌های مدل CanESM2 شامل متغیرهای رطوبت نسبی، فشار، دما و باد در دو راستای افقی و تحت دو سناریوی واداشت تابشی RCP4.5 و RCP8.5 از پایگاه مرکز یاد شده اخذ شدند. همچنین مدل RegCM4.5.11 از داده‌های GTOPO و GLCC برای اطلاعات پوشش گیاهی و توپوگرافی استفاده می‌کند. داده‌های GLCC با استفاده از سنجنده AVHRR از آوریل ۱۹۹۲ تا مارس ۱۹۹۳ موجود است و بر اساس نوع پوشش گیاهی و سطح زمین، توسط طرحواره BATS تعیین

جدول ۱: مشخصات ایستگاههای دیدبانی همدید مورد مطالعه

استان	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دوره آماری
خراسان رضوی	قوچان	۵۸/۵	۳۷/۰۶	۱۲۸۷	۳۷
	سرخس	۶۱/۱۷	۳۶/۵۳	۲۷۸	۳۷
	سبزوار	۵۷/۷۲	۳۶/۲	۹۶۲	۶۷
	گلمکان	۵۹/۲۸	۳۶/۴۸	۱۱۷۶	۳۴
	مشهد	۵۹/۶۳	۳۶/۲۷	۹۹۹/۲	۷۰
	نیشابور	۵۸/۸	۳۶/۲۷	۱۲۱۳	۳۰
	تربت حیدریه	۵۹/۲۲	۳۵/۲۷	۱۴۵۱	۶۲
	کاشمر	۵۸/۴۷	۳۵/۲	۱۱۰۹/۷	۳۵
	گناباد	۵۸/۶۸	۳۴/۳۵	۱۰۵۶	۳۴
سیستان و بلوچستان	تربت جام	۶۰/۵۸	۳۵/۲۵	۹۵۰/۴	۲۸
	زابل	۶۱/۴۸	۳۱/۰۳	۴۸۹/۲	۵۹
	زاهدان	۶۰/۸۸	۲۹/۴۷	۱۳۷۰	۷۰
	خاش	۶۱/۲	۲۸/۲۲	۱۴۲۷	۳۵
	سراوان	۶۲/۳۳	۲۷/۳۳	۱۱۸۲	۳۵
	ایران شهر	۶۰/۷	۲۷/۲	۵۹۱/۱	۵۷
	کنارک (فرودگاه)	۶۰/۳۷	۲۵/۴۳	۳۰	۳۷
	چابهار	۶۰/۶۲	۲۵/۲	۸	۵۸
	زهک	۳۳/۶۸	۳۰/۹	۴۹۵	۲۹
خراسان جنوبی	طیس	۵۶/۹۲	۳۳/۶	۷۱۱	۶۱
	فردوس	۵۸/۱۷	۳۴/۰۲	۱۲۹۳	۳۶
	قاین	۵۹/۱۷	۳۳/۷۲	۱۴۳۲	۳۴
	بیرجند	۵۹/۲	۳۲/۸۷	۱۴۹۱	۶۶
	نهبندان	۶۰/۰۳	۳۱/۵۳	۱۱۸۸	۳۵
	بشرویه	۵۷/۴۵	۳۳/۹	۸۷۹	۳۳

براساس مطالعه راجو و همکاران (۲۰۱۵) انجام شد. براین اساس مدل RegCM4.5.11 با ۹ طرحواره مختلف برای سالهای ۱۹۹۲ و ۱۹۹۶ اجرا شد (جدول ۲).

مقیاس‌گاهی دینامیکی: ابتدا برای انتخاب بهترین طرحواره همرفت (CPS)، بارش دیدبانی ۱۱۳ ایستگاه منتخب از بین ایستگاههای کل کشور با بارش برون داد مدل در دوره مورد مطالعه ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ مورد مقایسه قرار گرفت. به دلیل اینکه بیشترین بارش‌های همرفتی در فصل بهار رخ می‌دهد، لذا انتخاب بهترین طرحواره همرفتی بر اساس توانایی مدل در شبیه‌سازی بارش‌های بهار انجام گرفت. برای این منظور سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۶ که دارای بیشترین بارش در فصل بهار بودند، برای شبیه‌سازی طرحواره CPS انتخاب گردیدند. انتخاب طرحواره‌های مختلف با دو گزینه طرحواره همرفتی روی خشکی و بر روی دریا لحاظ گردید. انتخاب این دو گزینه

برای بررسی کارایی برون‌داد مدل، از نمایه‌های اریبی^۱، خطای میانگین^۲، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۳، ضریب همبستگی و منحنی تیلور استفاده

شد (منصوهر، ۱۳۸۲). بر این اساس، آزمایش KK یا طرحواره شماره ۹ (Kain-F - Kain-F) به‌عنوان بهترین طرحواره همرفتی انتخاب شد (جدول ۳).

جدول ۲: طرحواره‌های همرفتی به کار رفته در شبیه‌سازیها

آزمایش	طرحواره همرفت	
	Ocean	Land
GG	Grell	Grell
EG	Emanuel	Grell
KG	Kain-F	Grell
GE	Grell	Emanuel
GK	Grell	Kain-F
EE	Emanuel	Emanuel
KE	Kain-F	Emanuel
EK	Emanuel	Kain-F
KK	Kain-F	Kain-F

جدول ۳: کارایی خروجی مدل در طرحواره‌های مختلف با استفاده از شاخص‌های آماری

طرحواره	KK	KG	KE	GK	GG	GE	EE	EG	EK
خطای میانگین	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲
ریشه میانگین	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲
مربعات خطای نرمال شده	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲
ضریب همبستگی	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۱۹۹۲

مقیاس‌های آماری: مقیاس‌های دینامیکی هیچگاه نمی‌تواند تا سطح ایستگاهی انجام گیرد. با توجه به توان محاسباتی حال حاضر پردازشگرها، دینامیک، فیزیک و روش‌های عددی مورد استفاده در مدل‌های منطقه‌ای، اغلب تفکیک مدل‌های اقلیمی در حول و حوش نیم درجه قوسی است، لذا در این تحقیق علاوه بر اعمال مقیاس‌های دینامیکی توسط مدل منطقه‌ای RegCM بر روی داده‌های شرایط مرزی مدل گردش کلی CanESM، داده‌های مقیاس‌های شده دینامیکی به روش عامل تغییر^۴ (معادلات ۳ و ۴) مجدداً تا سطح ایستگاه (نقطه‌ای) مقیاس‌های شدند:

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut_i} - \bar{T}_{GCM, base_i}) \quad (3)$$

$$\Delta P_i = \left(\frac{\bar{P}_{GCM, fut_i}}{\bar{P}_{GCM, base_i}} \right) \quad (4)$$

که در روابط بالا، ΔT_i و ΔP_i به ترتیب بیانگر تغییرات میانگین بلندمدت بارش و دمای ماهانه برای ماه i ام است. $\bar{T}_{GCM, fut_i}$ و $\bar{P}_{GCM, fut_i}$ میانگین بلندمدت دما و بارش برای i امین ماه که توسط مدل‌های GCM تحت سناریوهای RCP برای آینده شبیه‌سازی شده است. $\bar{T}_{GCM, base_i}$ و $\bar{P}_{GCM, base_i}$ میانگین بلندمدت دما و بارش برای i امین ماه که توسط مدل‌های GCM تحت سناریوهای مذکور برای دوره پایه شبیه‌سازی شده است. این روش توسط ویبلی و هریس (۲۰۰۶)، مرید و مساح‌بوانی (۲۰۰۸) و زارعیان و همکاران (۲۰۱۵) بکار گرفته شده است. پس از محاسبه عامل تغییر، داده‌های پیش‌نگری شده با استفاده از روابط زیر تصحیح می‌شوند:

$$T = T_{obs} + \Delta T$$

4. Change Factor

1. Bias
2. RMSE
3. NRMSE

(۶)

$$P = P_{obs} * \Delta P$$

که در معادلات بالا T_{obs} و P_{obs} میانگین دمای دیدبانی در دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) و میانگین بارش دیدبانی در دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) می باشد.

یافته‌های تحقیق

مقیاس‌های دینامیکی (RegCM): برای واسنجی مدل، برونداد مدل با داده‌های دیدبانی ۲۴ ایستگاه همدید (جدول ۱) شرق کشور در دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۵ مقایسه شد و نمایه‌های آماری مورد بررسی قرار گرفتند. در جدول ۴ نمایه‌های آماری مربوط به توانمندی مدل در شبیه‌سازی دما آورده شده است. بیشترین مقدار اریبی دما مربوط به ماه‌های می و ژوئن به ترتیب با مقادیر ۷/۹۳ و ۶/۸۲ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار آن ۰/۳ درجه سانتی‌گراد مربوط به ماه ژانویه می باشد. نتایج نشان‌دهنده اریبی نسبتاً زیاد در روش مقیاس‌های دینامیکی می‌باشد، برای این منظور

مقیاس برونداد مدل منطقه‌ای به روش عامل تغییر تا سطح ایستگاه کاهش یافت. بررسی ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که مقادیر حاصل از مدل سازی‌های دما همبستگی نسبتاً خوبی با داده‌های دیدبانی دارد، بطوریکه بیشترین همبستگی مربوط به ژانویه با ۰/۹۸ و کمترین آن مربوط به ماه‌های ژوئن و جولای با ۰/۷۲ می باشد. در جدول یاد شده، نمایه‌های میانگین ریشه مربعات و نسبت انحراف معیار به تفکیک ماه آورده شده است. بیشترین خطای RMSE دما در ماه‌های گرم سال (می تا سپتامبر) و کمترین آن در ماه‌های سرد سال (دسامبر تا مارس) رخ داده است. علاوه بر این انحراف معیار مدل بین ۳۶ تا ۱۱ درصد کمتر از انحراف معیار داده‌های دیدبانی است که نیاز به تصحیح انحراف معیار در داده‌های مقیاس‌های شده دینامیکی توسط مدل RegCM را آشکار می‌سازد. برای افزایش انحراف معیار (تغییرپذیری) داده‌های مدل حداقل تا سطح داده‌های دیدبانی، از روش مقیاس‌های آماری تصحیح انحراف معیار استفاده شد.

جدول ۴: ضریب همبستگی، میانگین ریشه مربعات خطا و نسبت انحراف معیار دمای مدل (°C) در مقایسه با دوره دیدبانی مشابه (۱۹۸۴-۲۰۰۵)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دمای مدل	۷/۱۴	۱۰/۵۶	۱۵/۹۷	۲۵/۱۶	۳۳/۰۶	۳۶/۶۵	۳۶/۷۸	۳۴/۳۶	۳۱/۲۱	۲۴/۴۶	۱۷/۱۷	۹/۹۶
دمای دیدبانی	۶/۸۵	۸/۸۵	۱۳/۵	۲۰/۱۳	۲۵/۱۳	۲۹/۸۲	۳۰/۹۸	۲۹/۴۳	۲۵/۵۰	۱۹/۶۸	۱۳/۸۳	۸/۷۵
اریبی	۰/۳۰	۱/۷۱	۲/۴۷	۵/۰۳	۷/۹۳	۶/۸۲	۵/۸۱	۴/۹۳	۵/۷۲	۴/۷۸	۳/۳۴	۱/۲۱
ضریب همبستگی	۰/۹۸*	۰/۹۶*	۰/۹۳*	۰/۸۳*	۰/۷۴*	۰/۷۲*	۰/۷۲*	۰/۷۸*	۰/۷۵*	۰/۸۸*	۰/۹۴*	۰/۹۷*
RMSE	۱/۸۸	۲/۷۷	۳/۲۹	۵/۶۵	۸/۴۵	۷/۲۷	۶/۲۴	۵/۳۴	۶/۱۷	۵/۲۳	۳/۹۲	۲/۳۰
نسبت انحراف معیار	۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۶۸

* در سطح ۱ درصد معنی دار است.

نمایه‌های درستی-سنجی مدل منطقه‌ای اقلیمی RegCM در مورد شبیه‌سازی بارش منطقه مورد مطالعه در ماه‌های مختلف در جدول ۵ درج شده است. مدل دارای اریبی خشک بسیار زیاد در تمامی ماه‌ها می باشد که بیشترین آن در ماه‌های پربارش (دسامبر تا مارس) رخ داده است، در حالیکه کمترین اریبی در

ماه‌های گرم سال (ژوئن تا سپتامبر) مشاهده می‌شود. بیشترین و کمترین ضرایب همبستگی به ترتیب متعلق به ماه‌های پربارش (اکتبر تا می) و کم بارش (ژوئن تا سپتامبر) می باشد. ضرایب همبستگی در ماه‌های پربارش و سرد معنی‌دار ولی در ماه‌های کم‌بارش معنی‌دار نیستند. عدم وجود همبستگی بین

که سناریوهای بارش و دمای بنگلادش را برای دوره اواسط قرن ۲۱ با استفاده از مدل RegCM مطالعه نمود، مطابقت دارد. توانمندی نسبتاً مناسب مدل در شبیه‌سازی ضرایب همبستگی دما در ماههای مختلف و توانایی آن در شبیه‌سازی ضرایب همبستگی در ماه‌های پربارش با یافته‌های بابائیان و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی پیش‌بینی احتمالاتی بارش سالانه کشور در دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۴ با استفاده از برون‌داد مدل‌های دینامیکی برنامه A2D سازمان جهانی هواشناسی سازگار می‌باشد.

داده‌های مدل و دیدبانی در ماههای کم‌بارش ممکن است ناشی از تغییرپذیری بیشتر بارش در ماههای گرم سال به ویژه در مناطق جنوبی کشور که بعضاً شاهد بارش‌های مونسونی در فصول گرم هستند، باشد. نمایه آماری میانگین ریشه مربعات خطا در ماههای پربارش بیشتر از ماههای کم‌بارش است. نسبت انحراف معیار مدل به دیدبانی نسبتاً کم و قابل قبول نیست. برای فائق آمدن به این مشکل، تصحیح انحراف به روش آماری انجام گرفت که در ادامه توضیحات آن آورده می‌شود. اریبی گرم دما و خشک بارش در برخی ماههای سال با یافته‌های رحمان و همکاران (۲۰۱۲)

جدول ۵: مقادیر ضریب همبستگی، میانگین ریشه مربعات خطا و نسبت انحراف معیار بارش مدل در مقایسه با دوره دیدبانی مشابه (۲۰۰۵-۱۹۸۴)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
بارش مدل (م.م)	۰/۳۰	۰/۴۲	۱/۷۱	۱/۴۴	۰/۵۹	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۳۴	۱/۰۷
بارش دیدبا نی (م.م)	۲۴/۸۷	۲۷/۰۸	۳۵/۸۰	۱۹/۰۹	۸/۴۰	۱/۸۸	۱/۷۸	۰/۸۷	۰/۷۱	۳/۶۹	۷/۹۲	۲۲/۶۰
اریبی (م.م)	-۲۴/۵۶	-۲۶/۶۶	۳۴/۰۹	-۱۷/۶۵	-۷/۸۱	-۱/۸۰	-۱/۷۷	-۰/۷۷	-۰/۵۹	-۳/۵۵	-۷/۵۷	-
ضریب همبستگی	۰/۴۵*	۰/۴۹*	۰/۴۸*	۰/۷۸**	۰/۸۳**	-۰/۰۳	۰/۳۱	۰/۰۳	-۰/۲۳	۷۵**	۱۸۵**	۰/۴۲*
RMSE	۲۶	۲۸/۵۲	۳۶/۸۷	۲۱/۹۴	۱۰/۵۷	۲/۸۳	۳/۰۱	۱/۶۳	۱/۱۴	۴/۶۵	۹/۲۱	۲۲/۶۷
نسبت انحراف معیار	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۴۶	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۱۹

* در سطح نیم درصد و ** در سطح ۱ درصد معنی دار است.

مقیاس‌کاهی آماری (Change Factor): نتایج مدل‌سازی دینامیکی نشان داد که مدل نتوانسته است افت و خیزها (انحراف معیار بارش) را در ماههای آوریل، می، نوامبر و دسامبر و همچنین اریبی ماهانه را در اغلب ماهها بخوبی شبیه‌سازی کند (جدول ۱). برای فائق آمدن بر چنین مشکلی، تصحیحات انحراف معیار و اریبی با بکارگیری مقیاس‌کاهی آماری به روش عامل تغییرانجام شد. تصحیح در دو گروه ماههای گرم (اغلب کم بارش) و سرد (اغلب پربارش) انجام شد که عبارتند از:

- ماههای کم بارش-گرم: ژوئن، جولای، اوت و سپتامبر (چهار ماه)

- ماههای پرباران-سرد: اکتبر تا می (هشت ماه)
یکی از اهداف مهم در مقیاس‌کاهی تصحیح انحراف معیار است، به‌طوری که افت و خیز برون‌داد مدل منطقه‌ای RegCM در دوره پایه به اندازه دیدبانی شود. همانطور که در جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، انحراف معیار شبیه‌سازی شده توسط مدل تفاوت عمده‌ای با مقادیر دیدبانی دارد که این نقص در مورد بارش کاملاً مشهود است. در فرایند تصحیح انحراف معیار، پس از ضرب مقادیر ناهنجاری برون‌داد مدل در ضریب تصحیح انحراف معیار، از حالت ناهنجاری خارج می‌شوند. ضریب انحراف معیار نسبت انحراف معیار مدل به دیدبانی است که برای ماههای گرم و سرد جداگانه انجام می‌گیرد. در جدول ۶ ضرایب همبستگی

داده‌های تصحیح شده آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این روش موجب شده است تا به مقدار بسیار زیادی داده‌های مدل به دیدبانی نزدیک شده و خطای انحراف معیار تصحیح گردد، تنها در ایستگاه ایرانشهر داده‌های پس‌پردازش شده همبستگی خوبی با داده‌های دیدبانی ندارند.

جدول ۶: ضرایب همبستگی بارش دوره پایه مدل قبل و بعد از تصحیح

ایستگاه	ضریب همبستگی قبل از تصحیح	ضریب همبستگی پس از تصحیح	ایستگاه	ضریب همبستگی قبل از تصحیح	ضریب همبستگی پس از تصحیح
قوچان	۰/۶۷	۰/۷۸	خاش	۰/۰۷	-۰/۱۲
سرخس	۰/۴	۰/۶۲	سراوان	۰/۲۹	۰/۲۴
سبزوار	۰/۸۳	۰/۸۶	ایرانشهر	۰/۳۵	۰/۰۳
گلمکان	۰/۸۳	۰/۸۶	کنارک	-۰/۴۵	-۰/۴۳
مشهد	۰/۸۱	۰/۸۴	چابهار	-۰/۴۷	-۰/۴۰
نیشابور	۰/۸۱	۰/۸۲	زهک	۰/۲۴	۰/۲۵
ترت حیدریه	۰/۷۴	۰/۷۵	طیس	۰/۶۴	۰/۷۹
کاشمر	۰/۷۳	۰/۷۹	فردوس	۰/۶۰	۰/۷۷
گناباد	۰/۷۰	۰/۸۴	قاین	۰/۷۳	۰/۸۴
ترت جام	۰/۷۵	۰/۸۲	بیرجند	۰/۶۸	۰/۷۶
زابل	۰/۵۱	۰/۳۶	نهبندان	۰/۰۷	۰/۰۳
زاهدان	-۰/۳۶	-۰/۳۷	بشرویه	۰/۶۹	۰/۸۱

پیش‌نگری بارش: در این بخش نتایج پیش‌نگری بارش استان‌های خراسان شمالی، خراسان رضوی و سیستان و بلوچستان به روش مقیاس‌های دینامیکی با بکارگیری مدل منطقه‌ای RegCM4.5 و سپس اعمال روش عامل تغییر به برون‌داد مدل RegCM4.5 آورده شده است.

الف-مقیاس‌های دینامیکی: در جدول ۷ مقدار افزایش بارش پیش‌نگری شده طی دو دوره آینده نزدیک و دور در استان‌های مورد مطالعه نسبت به دوره پایه نشان داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده در ناحیه مورد مطالعه، تحت دو سناریوی واداشت تابشی افزایش بارش رخ خواهد داد. بیشترین افزایش بارش در استان سیستان و بلوچستان در سناریوی RCP4.5 برآورد شده است. براساس گزارش ارزیابی پنجم تغییر اقلیم (AR5^۱) بیش از ۵۰ درصد مدل‌های سری CMIP5 افزایش بارش را برای نوار جنوبی و به ویژه جنوب شرق ایران برآورد کرده‌اند که موید یافته‌های مقاله حاضر است. یک دلیل افزایش بارش در

استان‌های جنوبی و جنوب شرقی ایران می‌تواند افزایش دمای پهنه‌های آبی هم‌سایه در جنوب کشور به دلیل گرمایش جهانی و فرارفت رطوبت از پهنه‌های آبی جنوب (اقیانوس هند، دریای سرخ و خلیج فارس) به سمت جزیره‌العرب و جنوب فلات ایران باشد. چنین وضعیتی موجب تقویت فاز گرم دورپیوند دو قطبی اقیانوس هند^۲ می‌گردد. فاز گرم IOD موجب گرم شدن بیش از نرمال دمای اقیانوس هند استوایی در ساحل شرق آفریقا (محدوده سواحل سومالی و همسایه آن) می‌گردد که پیامد آن افزایش تبخیر از سطح اقیانوس و مهیا شدن شرایط برای شکل‌گیری سامانه‌های کم‌فشار و جبهه‌زایی در این منطقه و نفوذ آن به سمت جزیره‌العرب و جنوب فلات ایران می‌شود.

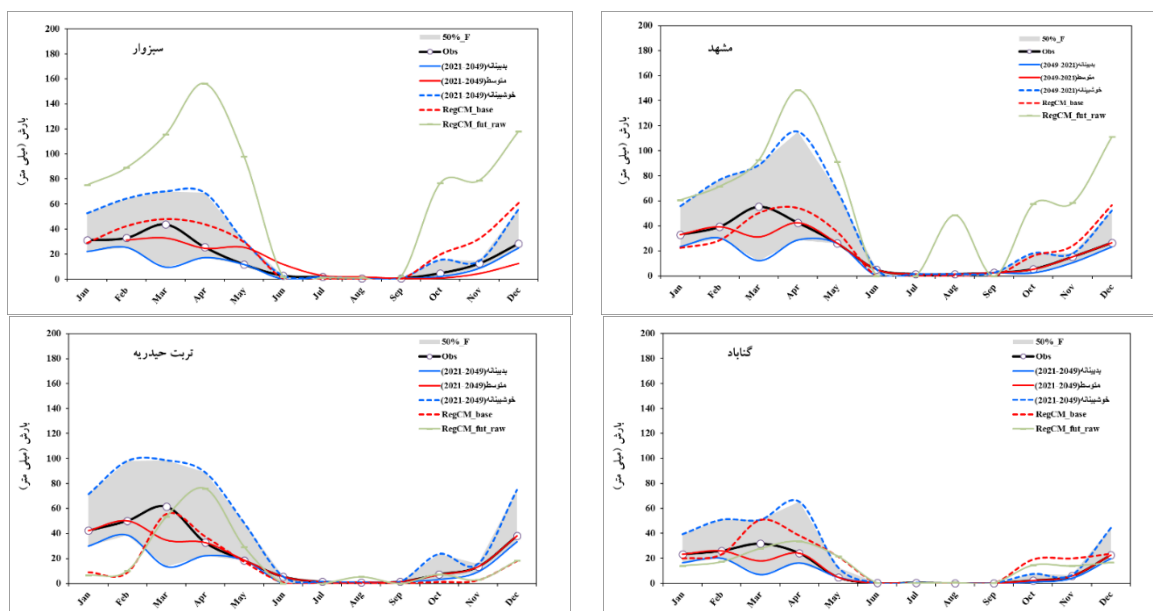
ب-مقیاس‌های آماری: مقیاس برون‌داد بارش مدل دینامیکی منطقه‌ای RegCM با استفاده از روش عامل تغییر تا سطح ایستگاهی کاهش یافت. برای کاهش اثرات محلی پیش‌نگری بارش آینده، عامل تغییر به صورت کلان و در مقیاس استانی در نظر گرفته شده

صدک‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ در نظر گرفته شد. در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ پیش‌نگری بارش دوره‌های آینده نزدیک و دور بر مبنای سه حالت یادشده نشان داده شده است. با توجه به تعداد زیاد ایستگاههای مورد مطالعه و تعدد شکل‌ها، نمودار تعدادی از ایستگاههای منتخب هر یک از استان‌ها آورده شده است. در شکل‌های یادشده، منطقه‌هاشور خاکستری دامنه عدم قطعیت پیش‌نگری را پس از اعمال مقیاس‌های به روز عامل تغییر بر پرونداد مدل منطقه‌ای RegCM4.5 نشان می‌دهد؛ همچنین خط مشکی پررنگ نشان‌دهنده میانگین ماهانه بارش دوره مشاهداتی است.

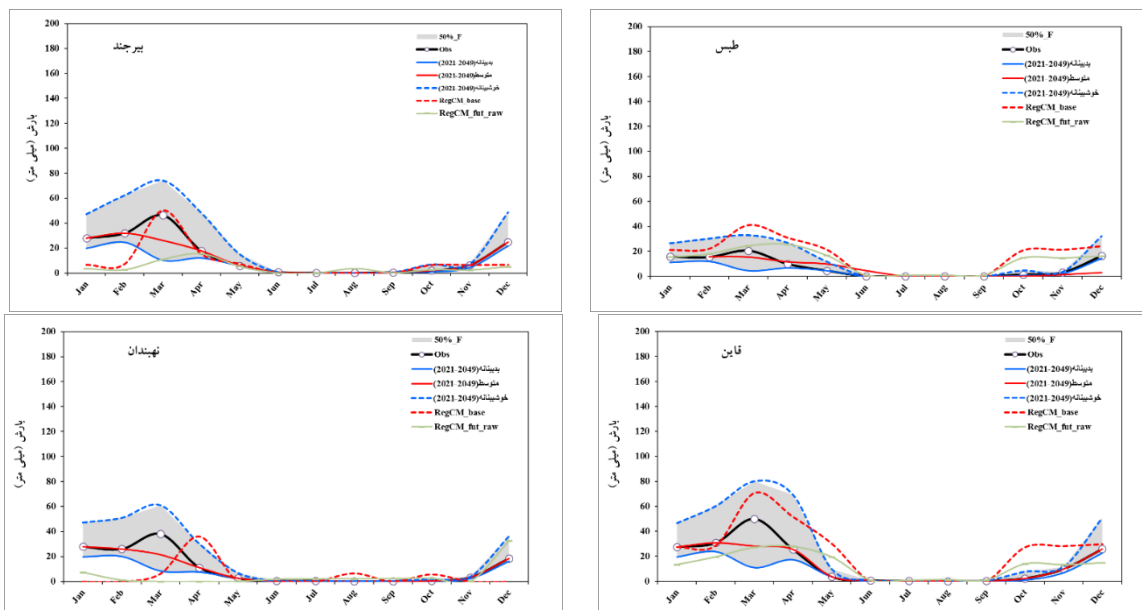
زیرا اثرات گرمایش جهانی عمدتاً به صورت بزرگ‌مقیاس ظاهر می‌شود تا محلی؛ به عبارت دیگر یک منطقه عموماً ایستگاههای مختلف هواشناسی به یک اندازه متأثر از گرمایش جهانی هستند و مدل‌های گردش کلی در برآورد تغییر اقلیم در مقیاس نقطه‌ای خطای نسبتاً زیادی دارند، لذا برای یک منطقه با اقلیم مشابه، استفاده از میانگین عامل تغییر منطقه‌ای می‌تواند به واقعیت نزدیک‌تر باشد تا ایستگاهی. برای بدست آوردن بارش تصحیح شده نهایی، مقدار عامل تغییر استانی در بارش دیدبانی هر ماه ضرب شد، در عین حال برای لحاظ عدم قطعیت ناشی از میانگین‌گیری عامل تغییر، سه حالت خوشبینانه، متوسط و بدبینانه برای عامل تغییر به ترتیب بر مبنای

جدول ۷: افزایش بارش (درصد) پیش‌نگری شده تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نسبت به دوره پایه با روش مقیاس‌های دینامیکی

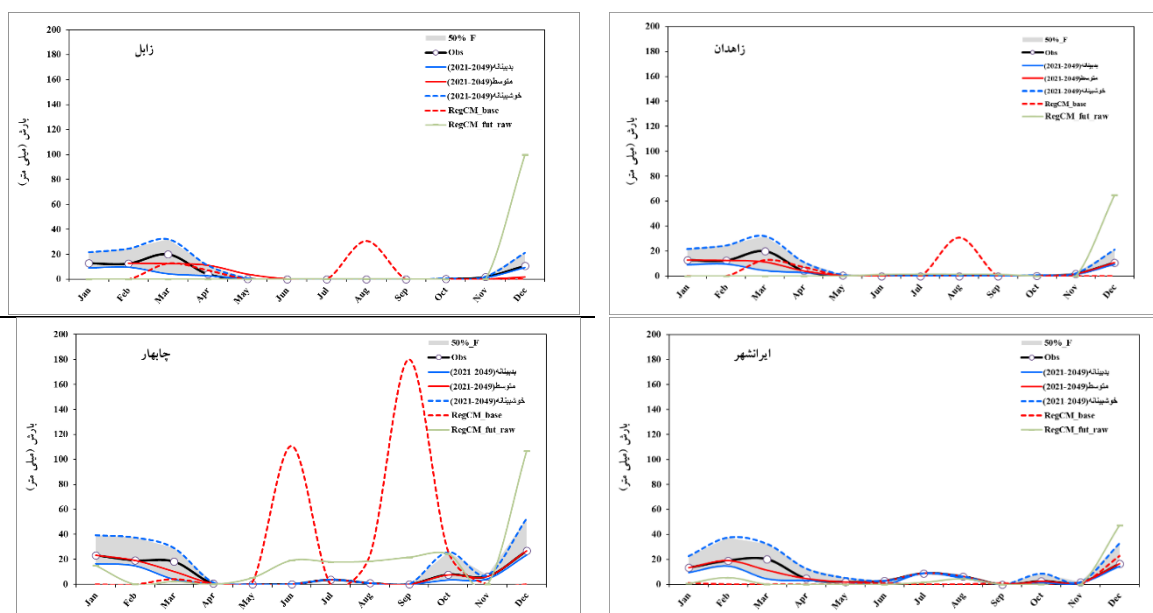
سناریو	دوره	خراسان رضوی	خراسان جنوبی	سیستان و بلوچستان	کل منطقه
RCP4.5	۲۰۲۱-۲۰۴۹	۱۵۹/۹	۲/۲	۳۱۵/۲	۱۶۸/۸
	۲۰۷۱-۲۰۹۹	۱۲۹/۴	۳۳/۷	۵۵۳/۹	۲۶۷/۲
RCP8.5	۲۰۲۱-۲۰۴۹	۱۲۶/۳	۱۳/۳	۰/۱	۳۷/۷
	۲۰۷۱-۲۰۹۹	۳۶۳/۱	۲۳۵/۱	۱۳۲/۰	۲۲۷/۱



شکل ۳: پیش‌نگری بارش برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۹) تحت سناریوی RCP4.5 بر مبنای سه حالت از عامل تغییر خوشبینانه، متوسط و بدبینانه برای ایستگاههای منتخب خراسان رضوی.



شکل ۴: پیش‌نگری بارش برای دوره آینده نزدیک (۲۰۴۹-۲۰۲۱) تحت سناریوی RCP4.5 بر مبنای سه حالت از عامل تغییر خوشبینانه، متوسط و بدبینانه، ایستگاههای منتخب خراسان جنوبی. محدوده عدم قطعیت به صورت‌هاشور نشان داده شده است.



شکل ۵: پیش‌نگری بارش برای دوره آینده نزدیک (۲۰۴۹-۲۰۲۱) تحت سناریوی RCP4.5 بر مبنای سه حالت از عامل تغییر خوشبینانه، متوسط و بدبینانه، ایستگاههای منتخب سیستان و بلوچستان. محدوده عدم قطعیت به صورت‌هاشور نشان داده شده است.

نزدیک تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دو حالت بدبینانه و متوسط کاهش می‌یابد که محدوده آن بین ۱۵- تا ۳۷- درصد بوده که کاهش در سناریوی RCP8.5 بیشتر از RCP4.5 می‌باشد. اما بر مبنای عامل تغییر خوشبینانه، تحت هر دو سناریو، افزایش

در جدول ۸ مقدار افزایش بارش در استان‌های خراسان رضوی، جنوبی و سیستان و بلوچستان بر مبنای صدک ۲۵ (بدبینانه)، صدک ۵۰ (میان، متوسط) و صدک ۷۵ (خوش بینانه) آورده شده است. بر این اساس بارش در شرق ایران در دوره آینده

خوشبینانه افزایش بارش بین ۸ تا ۳۴۴ در صد برآورد می‌گردد. اما در سناریوی RCP4.5 تغییرات بارش بین ۴۰- تا ۶۵+ درصد است. در این دوره هم اگر سناریوی متوسط به عنوان میانگین پیش‌نگری‌ها در نظر گرفته شود، در آن صورت تغییرات بارش منطقه بین ۸- تا ۱۴۹+ درصد خواهد بود.

بارش بین ۴۹ تا ۹۰ درصد برای منطقه مورد انتظار است. اگر در این دوره سناریوی متوسط به عنوان میانگین پیش‌نگری‌ها در نظر گرفته شود، در آن صورت تغییرات بارش شرق کشور در آینده نزدیک بین ۱۱- تا ۱۵- درصد است. در آینده دور تحت سناریوی RCP8.5 در هر سه حالت بدبینانه، متوسط و

جدول ۸: افزایش بارش (بر حسب درصد) پیش‌نگری شده برای دوره‌های آینده نزدیک و دوره تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بر مبنای سه حالت برآورد شده بدبینانه، متوسط و خوشبینانه برای عامل تغییر در سه استان مورد مطالعه

سناریو	دوره	بارش	خراسان رضوی	خراسان جنوبی	سیستان و بلوچستان	شرق ایران
RCP8.5	۲۰۴۹-۲۰۷۱	بدبینانه	-۳۳/۹۸	-۳۶/۶۳	-۳۶/۵۸	-۳۵/۵۱
		متوسط	-۱۲/۹۱	-۱۷/۰۸	-۱۵/۲۷	-۱۴/۷۴
		خوشبینانه	۵۶/۶۱	۴۶/۶۴	۴۰/۷۴	۴۸/۸۳
	۲۰۷۱-۲۰۹۹	بدبینانه	۸	۹/۶۴	۷/۹۹	۸/۴۰
		متوسط	۱۴۵/۵۴	۱۵۰/۸۵	۱۵۲/۵۹	۱۴۹/۲۲
		خوشبینانه	۳۳۷/۶۲	۳۵۴/۵۳	۳۴۳/۷۰	۳۴۳/۸۷
RCP4.5	۲۰۴۹-۲۰۷۱	بدبینانه	-۳۶/۴۲	-۳۸	-۳۶/۸۸	-۳۶/۹۷
		متوسط	-۹/۷۹	-۱۱/۵۳	-۱۰/۷۹	-۱۰/۵۶
		خوشبینانه	۹۶/۱۸	۹۰/۶۲	۸۱/۰۸	۸۹/۷۶
	۲۰۷۱-۲۰۹۹	بدبینانه	-۳۹/۰۳	-۴۱/۰۲	-۳۸/۶۱	-۳۹/۳۹
		متوسط	-۷/۰۸	-۹/۲۶	-۶/۷۷	-۷/۵۲
		خوشبینانه	۶۸/۲۴	۶۴/۸۳	۵۹/۷۸	۶۴/۵۷

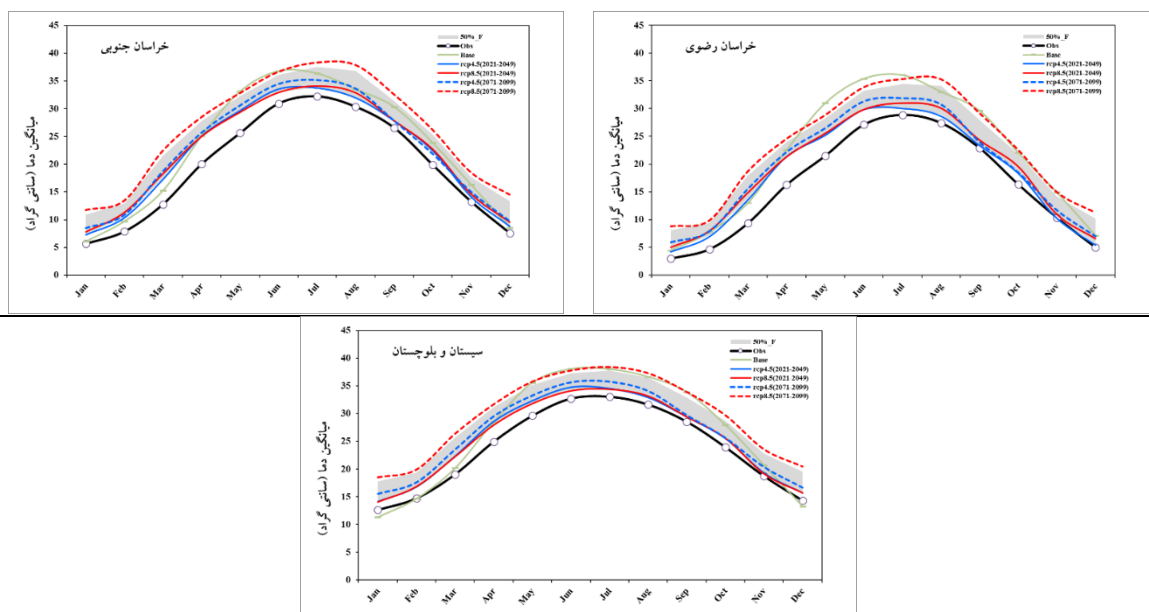
دور نشان داده شده است. در هر سه استان افزایش دمای آینده دور بیش از آینده نزدیک و سناریوی RCP8.5 بیش از RCP4.5 است.

دامنه تغییرات دما در استان خراسان رضوی بین ۳/۱ درجه در آینده نزدیک تحت سناریوی RCP4.5 تا ۴/۳ درجه سلسیوس در آینده دور تحت سناریوی RCP8.5 است. مقادیر مذکور برای استان‌های خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان به ترتیب در محدوده ۴/۳ تا ۸/۸ و ۲/۵ تا ۱۰/۲ درجه سلسیوس است (جدول ۹).

پیش‌نگری دما: مطابق جدول ۳، مقیاس‌گاهی دینامیکی توسط مدل RegCM به خوبی توانسته است، افت و خیز (انحراف معیار) و ضرایب همبستگی دما را شبیه‌سازی کند، لذا تصحیح انحراف معیار بر روی داده‌ها انجام نگرفت. اما به دلیل ارببی گرم در برون‌داد مدل منطقه‌ای به ویژه در ماه‌های گرم سال، تصحیح ارببی با بکارگیری روش عامل (معادلات شماره ۱ و ۳) انجام گرفت. در شکل ۶، افزایش دمای میانگین استان‌های مورد مطالعه تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌های پایه، آینده نزدیک و

جدول ۹: افزایش دما در استان‌های مورد مطالعه در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۹) و دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹) نسبت به دوره پایه

استان	آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۹)		آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹)	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
خراسان رضوی	۳/۱	۳/۸	۴/۳	۷/۷
خراسان جنوبی	۴/۳	۴/۸	۵/۱	۸/۸
سیستان و بلوچستان	۵/۲	۶/۹	۷	۱۰/۲
شرق ایران	۴/۲	۵/۲	۵/۵	۸/۹



شکل ۶: میانگین دمای استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره‌های پایه، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۹) و دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹)

جمع‌بندی

در این پژوهش چشم‌انداز بارش و دمای استان‌های محور شرق کشور شامل خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان مورد مطالعه قرار گرفته است. از داده‌های مدل گردش کلی CanESM2 مجموعه مدل‌های سری CMIP5 تحت دو سناریوی واداشت تابشی RCP8.5 و RCP4.5 به عنوان شرایط اولیه و مرزی مورد نیاز مدل RegCM4.5 استفاده شده است. از داده‌های GLCC و GTOPO در مدل RegCM4.5 برای اطلاعات پوشش گیاهی و توپوگرافی استفاده شد. واسنجی مدل با بکارگیری داده‌های ۱۱۲ ایستگاه همدید کشور در دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ و ۲۴ ایستگاه همدید استان‌های مذکور در دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۵ میلادی انجام شد. به منظور درستی‌سنجی نتایج، از نمایه‌های اریبی، خطای میانگین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، ضریب همبستگی استفاده شد. برای افزایش درستی پیش‌نگری اقلیمی از روش مقیاس‌های ترکیبی دینامیکی-آماري استفاده شد؛ به این‌صورت که در گام اول مقیاس داده‌های با تفکیک مکانی $2/5 \times 2/5$ درجه جغرافیایی مدل گردش کلی CanESM توسط مدل دینامیکی منطقه‌ای RegCM4.5 تا حد 60×60 کیلومتر کاهش شد. سپس

در گام دوم با هدف افزایش کارایی مقیاس‌های، مقیاس برون‌داد مدل منطقه‌ای به روش عامل تغییر تا سطح ایستگاهی کاسته شد. مقیاس‌های ترکیبی به مقدار قابل توجهی توانایی شبیه‌سازی را در دو نمایه آماری اریبی و انحراف معیار افزایش داد. برای کاهش اثرات محلی بر مقیاس‌های بارش و دمای آینده و اینکه اثرات گرمایش جهانی عمدتاً در مقیاس کلان تظاهر پیدا می‌کند تا محلی، لذا عامل تغییر به صورت میانگین منطقه‌ای در نظر گرفته شد. بر اساس یافته‌های این پژوهش و با لحاظ مقیاس‌های ترکیبی (روش دینامیکی RegCM4.5 و روش آماری عامل تغییر)، در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۹) بارش در شرق ایران تحت سناریوی متوسط بین ۱۱ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد، اما در آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹) تغییرات بارش بین ۸- و ۱۴۹+ درصد خواهد بود. ممکن است یکی از دلایل افزایش بارش در آینده دور، گرمایش بیشتر در پهنه‌های اقیانوسی جنوب کشور باشد که فرارفت رطوبت را به سوی ایران موجب می‌شود. نتایج نشان دادند که در هر سه استان افزایش دما در آینده دور بیش از آینده نزدیک و در سناریوی RCP8.5 بیش از RCP4.5 است. کمترین (تحت سناریوی RCP4.5) و بیشترین (RCP8.5) افزایش

کلان برنامه‌ریزی شده ملی برای منطقه مانند انتقال آب از خلیج فارس، طرح توسعه سواحل مکران، نیاز به پژوهش‌های تغییر اقلیم برای کاهش اثرات تغییر اقلیم، روش‌های سازگاری با آن و آمایش سرزمین در منطقه ضروری است. این پژوهش و سایر پژوهش‌های منطقه‌ای می‌تواند به مسئولین و برنامه‌ریزان کمک نماید. در عین حال برنامه‌ریزی‌های کلان منطقه‌ای بایستی با لحاظ نتایج سایر مدل‌ها و روش‌های مقیاس‌های انجام گیرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پروژه "پیش‌نگری اقلیم کشور به روش مقیاس‌های دینامیکی، مطالعه موردی: شرق کشور" (کد پروژه: C300C003M) است که در پژوهشکده اقلیم‌شناسی انجام شده است.

منابع

۱. احمدی گیوی، فرهنگ. سلطان زاده، ایمان. ایران نژاد، پرویز. پازوکی، روزبه. ۱۳۸۳. بررسی تاثیر کوهستانها و کاربری اراضی اقلیم منطقه ایران با استفاده از مدل اقلیمی منطقه‌ای: ۲- بررسی تاثیر طرحواره زیر شبکه ای BATS در مدل منطقه ای RegCM، مقاله نامه همایش پیش بینی عددی وضع هوا، ۳۴.
۲. اقتداری، مهنوش. ایران نژاد، پرویز. وظیفه دوست، مجید. بذرافشان، جواد. قهرمان، نوذر. ۱۳۹۷. مقایسه بارش بهاری حاصل از چهار محصول شبکه بندی شده و شبیه سازی شده توسط RegCM و ارزیابی آنها با مشاهدات در دشت قزوین، تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۴، ۴۴-۳۱.
۳. اصغری جعفر آبادی، محمد. سلطانی، اکبر. و محمدی، سیده مومنه. ۱۳۹۲. سری آمار: همبستگی و رگرسیون، مجله دیابت و لیپد ایران، دوره ۱۲، ۵۰۶-۴۷۹.
۴. ایران نژاد، پرویز. پازوکی، روزبه. احمدی گیوی، فرهنگ. سلطان زاده، ایمان. ۱۳۸۳. بررسی تاثیر کوهستانها و کاربری اراضی اقلیم منطقه ایران با استفاده از مدل اقلیمی منطقه ای: ۱- بررسی اجمالی ساختار داخلی مدل

دمای مورد انتظار در استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان برای آینده نزدیک (۲۰۴۹-۲۰۲۱) به ترتیب بین ۳/۱ تا ۴/۳، ۴/۳ تا ۵/۱ و ۵/۲ تا ۷ درجه سلسیوس و برای آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹) به ترتیب ۳/۸ تا ۷/۷، ۴/۸ تا ۸/۸ و ۶/۹ تا ۱۰/۲ درجه سلسیوس است. بر این اساس با لحاظ گرمایش حدود یک درجه‌ای رخ داده در کشور نسبت به قبل از انقلاب صنعتی، اثر گرمایش جهانی بر میانگین دمای شرق کشور در حالت خوشبینانه حدود ۴/۲ درجه بیش از آستانه تعیین شده در توافقنامه آب‌وهوایی پاریس (۲۰۱۵) است.

با توجه به اثرات گرمایش جهانی در استان‌های محور شرقی کشور مانند خشکسالی‌های گسترده، رخدادهای حدی اقلیمی، کاهش شدید منابع آب زیرسطحی و سطحی، تغییر اقلیم زراعی، چالش در عملکرد محصولات استراتژیک (از جمله، زعفران، پسته، ...)، مهاجرت‌های اقلیمی و همچنین طرح‌های

RegCM، مقاله نامه همایش پیش بینی عددی وضع هوا، ۲۳.

۵. باباییان، ایمان. کریمیان، مریم. مدیریان، راحله. میرزایی، ابراهیم. ۱۳۹۸. پیش‌نگری فراسنجهای اقلیمی کشور با به کارگیری مدلهای گردش کلی سری CMIP5 برای دوره ۲۰۲۰-۲۱۰۰ میلادی. مجله نیوار، شماره ۱۰۴-۱۰۵، بهار و تابستان، ۷۰-۶۱.
۶. باباییان، ایمان. مدیریان، راحله. کریمیان، مریم. جوانشیری، زهره. کوهی، منصوره. ۱۳۹۸. در بررسی پیش بینی احتمالاتی بارش سالانه کشور در دوره ۲۰۲۴-۲۰۲۰ با استفاده از ریز مقیاس نمایی برون داد مدل‌های دینامیکی بر نامه A2D سازمان جهانی هواشناسی، پروژه پژوهشکده اقلیم شناسی.
۷. باباییان، ایمان. مدیریان، راحله. کریمیان، مریم. ۱۳۸۶. شبیه سازی بارش ماههای سرد سالهای ۱۳۷۶ و ۱۳۷۹ با استفاده از مدل اقلیمی RegCM3، مجله جغرافیا و توسعه، شماره پیاپی ۱۰، ۵۵-۷۲.
۸. باباییان، ایمان. کریمیان، مریم. مدیریان، راحله. ۱۳۸۴. اجراء و ارزیابی مدل منطقه‌های اقلیمی بر روی ایران- مطالعه موردی زمستان سالهای ۱۹۹۷ و ۲۰۰۰. پروژه خاتمه یافته RegCM3 پژوهشکده اقلیم شناسی.

۹. منصور فر، کریم. ۱۳۸۲. روش‌های آماری، انتشارات دانشگاه تهران، تهران-ایران.
۱۰. کریمیان، مریم. مدیریان، راهله. باباییان، ایمان. ۱۳۸۸. بررسی توانمندی مدل RegCM3 در مدل سازی بارش و دمای استان خراسان، مطالعه موردی: زمستان‌های دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۱، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۹۷، ۱۸۶-۱۶۸.
۱۱. مختاری، حسین. مومنی، مهدی. باقری، مهرداد. ۱۳۹۳. تدوین راهبردهای آمایش مناطق مرزی؛ مطالعه موردی مرزهای شرقی کشور، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۹، شماره سوم، شماره پیاپی ۱، ۲۳۷-۲۵۴.
۱۲. شکوهی، مجتبی. ثنایی نژاد، سید حسین. بنایان، محمد. ۱۳۹۷. ارزیابی شبیه سازی دما و بارش مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مطالعات منطقه ای تغییر اقلیم: مطالعه موردی: مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۳۲، شماره ۵، آذر - دی ۱۳۹۷، ۱۰۱۳-۱۰۲۴.
۱۳. محمدی، فهیمه. زرین، آذر. باباییان، ایمان. ۱۳۹۴. کارایی مدل اقلیمی RegCM4 در شبیه سازی دوره سرد استان فارس، مطالعه موردی: دوره ۲۰۱۰-۱۹۹۰، فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۱، شماره ۳، ۵۲۴-۵۱۱.
۱۴. مدیریان، راهله. کریمیان، مریم. بذرافشان، بهاره. باباییان، ایمان. حلبیان، امیرحسین. فلامرزی، یاشار. ۱۳۹۸. پردازش دینامیکی تغییرات اقلیمی خراسان رضوی. ششمین کنفرانس بین‌المللی تغییر اقلیم، تهران.
۱۵. مدیریان، راحله. کریمیان، مریم. باباییان، ایمان. ۱۳۸۴. شبیه سازی بارش‌های مونسونی جنوب مقاله نامه همایش پیشبینی و وضع هوا. RegCM. شرق ایران با استفاده از مدل اقلیمی ۳-سازمان هواشناسی کشور.
16. Azadi, M., Singh G.P., and Mohandas, S. 2003. Impact of SST in the REGCM on the Spring Rainfall over Middle East Asia, ICTP Workshop on the Theory and Use of Regional Climate Models, Trieste Italy
17. Giorgi, F., Marinucci, M., and Betes, G. 1993a, Development of a second generation regional climate model (regcm 2) i: Boundary layer and radiative transfer processes. Monthly Weather Review 121:2794-2813.
18. Giorgi, F., Marinucci, M., Betes, G., and DeCanio, G. 1993b, Development of a second generation regional climate model (regcm2) ii: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions, Monthly Weather Review 121: 2814-2832.
19. Giorgi, F., and Shields C. 1999. Tests of precipitation parameterizations (regcm) over the continental united states. J Geophys Res 104(D6), PP. 6353-6375.
20. Giorgi, F., Marinucci, M., and Betes, G. 1993b, Development of a second generation regional climate model (regcm 2) i: Boundary layer and radiative transfer processes, Monthly Weather Review, 2794-2813.
21. Giorgi, F. et al. 1993c, Development of a second generation regional climate model (regcm2) ii: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions, Monthly Weather Review, 2814-2832.
22. Holtzlag, A., de Bruijn, E., and Pan, H.-L. 1990. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, Monthly Weather Rev. 118: 1561-1575.
23. Hui P., Tang J., Wang S., Niu X., Zong P., and Dong X. 2018. Climate change Projections over China using regional climate models forced by two CMIP5 global models: Part II: projections of future climate. International Journal of climatology, DOI: 10.100/joc.5409.
24. Hsie, E., Anthes, R., and Keyser, D. 1984. Numerical simulation of frontogenesis in a moist atmosphere, Journal of Atmospheric Sciences, PP. 2581-2594.
25. Islam, N., Rahman, M., Uddin Ahmed, A.U., and Afroz, R. 2007. "Comparison of RegCM3 simulated meteorological parameters in Bangladesh". Part I- preliminary result for rainfall. Sri Lankan Journal of Physics. 8: 1-9.
26. Jaczewski, A., Brzoska, B., and Wibig J. 2014. Comparison of temperature indices for three IPCC SRES scenarios based on RegCM simulations for Poland in 2011–2030 period. Meteorologische Zeitschrift, 24(1): 99-106, DOI: 10.1127/metz/2015/0457.
27. Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G., Boville, B., Breigleb, B., Williamson, D. and Rasch, P. 1996. Description of the ncar community climate model (ccm3), Technical report, NCAR/TN-420+STR,

- National Center for Atmospheric Research.
28. Mariotti, L., Coppola, E., Sylla, M.B., Giorgi, F., and Piani, C. 2011. Regional climate model simulation of projected 21st century climate change over an all-Africa domain: Comparison analysis of nested and driving model results. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 116, D15111, doi: 10.1029/2010JD015068, 2011.
 29. Morid, S., and Massah Bavani, A. 2008. Exploration of potential adaptation strategies to climate change in the Zayandeh Rud irrigation system, Iran, Irrigation Drainage, 59 (2): 226-238.
 30. Ozturk, T., Turp, M.T., Turkes, M., and Kurnaz, M.L. 2017. Projected changes in temperature and precipitation climatology of Central Asia CORDEX Region 8 by 36.
 36. Wang, Y., Sen, O.L., and Wang, B. 2002. A Highly Resolved Regional Climate Model and its Simulation of the 1998 Sever Precipitation Event over China, Part 1: Model Description and Verification of Simulation, Jurnal of Climate, 19: 1721.
 37. Wilby, Robert. L., and Harris, Ian, 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impact: low-flow scenarios for the River Thames, UK, Water Resources Research, 42 (2): 1-10.
 38. Zareian, A., Eslamian, M.J., Safavi. S., and Hamid. R. 2015, A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale, Theoretical and Applied Climatology, 122 (3): 497-516.
 - using RegCM4.3.5. Atmospheric Research, 83: 296-307, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.09.008>.
 31. Pal, J., Small, E., and Eltahir, E. 2000. Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within regcm, Journal of Geophysical Research-Atmospheres 105: 29579-29594.
 32. Pal, J., Giorgi, F., BiX., Elguindi, N., Salmon, F., Gao X., Rauscher, S.A., Francisco, R., Zakey, A., Winter, J., Ashfagh, M., Syed, F.S., Bell, J., Diffenbaugh, J.K., Konare, A., Martinez, D., Rocha, R., Sloan, L. and Steiner, A. 2007. "Regional Climate modeling for the Developing World, the ICTP and RegCNET". Bulletin of American meteorological society. pp. 1396-1409
 33. Rahman, M., Islam, N., Ahmed, A., and Georgi, F. 2012. Rainfall and temperature scenarios for Bangladesh for the middle of 21st century using RegCM, Earth Syst. Sci., 121(2): 287-295, DOI: 10.1007/s12040-012-0159-9.
 34. Raju P.V.S., Bhatla R., Almazroui M., and Assiria M. 2015. Performance of convection schemes on the simulation of summer monsoon features over the South Asia CORDEX domain using RegCM-4.3, Int. J. Climatol. 35: 4695-4706.
 35. Yu Y., Xie Z., and Zeng X. 2014. Impacts of modified Richards equation on RegCM4 regional climate modeling over East Asia. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, PP: 12642-12659, DOI: 10.1002/2014JD021872.

