

چشم‌انداز تغییرات اقلیم‌شناختی دما و بارش در دامنه CORDEX جنوب آسیا (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دز)

الهه عسگری (دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران)

elaheh.asgari2011@gmail.com

محمد باعقیده (دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران، نویسنده مسئول)

m.baaghideh@hsu.ac.ir

اصغر کامیار (دکتری اقلیم‌شناسی، اداره کل هواشناسی استان اصفهان، اصفهان، ایران)

asgharkhuzani@gmail.com

علیرضا انتظاری (دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران)

entezari@hsu.ac.ir

مجید حسینی (دانشیار آبخیزداری، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران)

mjhossaini@gmail.com

صص ۲۵۲ - ۲۲۵

چکیده

اهداف: از آنجایی که بررسی تغییرات اقلیمی، ارائه راهکارهای مناسب سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم در هر منطقه نیازمند پیش‌نگری صحیح متغیرهای اقلیمی در آن منطقه است؛ هدف این مقاله ارزیابی دقت مجموعه مدل‌های گردش کلی پایگاه CORDEX (جنوب آسیا) در شبیه‌سازی دما و بارش به‌عنوان متغیرهای تاثیرگذار در جریان حوضه آبخیز دز است.

روش: جهت پیش‌نگری دما و بارش حوضه مذکور، دقت ۱۷ مدل گردش کلی پروژه CORDEX - WAS (جنوب آسیا) مورد ارزیابی قرار گرفت. از روش عامل تغییر برای تصحیح خطای داده‌های شبیه‌سازی شده در دوره تاریخی و آینده و از نمره مهارت (SS) برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها استفاده شد. شبیه‌سازی این پارامترها برای سه دوره ۲۰ ساله (۲۰۹۹ - ۲۰۸۰، ۲۰۶۹ - ۲۰۵۰ و ۲۰۳۹ - ۲۰۲۰) و تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای ایستگاه‌های منتخب انجام شد.

یافته‌ها/ نتایج: خروجی‌ها نشان داد شبیه‌سازی مدل‌ها با خطا همراه است و باید قبل از استفاده از آن‌ها در مطالعات تصحیح شوند. براساس (SS) یک مجموعه ده تایی با نمره مهارت بالا انتخاب شد. اگرچه نتایج مدل‌های انتخابی بیانگر کاهش ۱۱ تا ۱۷ درصدی بارش سالانه برای سناریو RCP4.5 و ۸ تا ۱۸ درصدی برای سناریو RCP8.5 در حوضه مورد مطالعه است، ولی بارش فصل پاییز در این محدوده تغییرات افزایشی را نشان می‌دهد. خروجی دمای حداکثر حوضه برای سناریوی انتشار RCP4.5 افزایش ۱/۵ تا ۳ درجه و برای سناریو بدبینانه RCP8.5 افزایش ۱/۶ تا ۵/۸ درجه سلسیوس را پیش‌نگری می‌کند. این افزایش برای دمای حداقل برای سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب مابین ۱/۵ تا ۴/۲ و ۲/۷ تا ۵/۳ درجه سلسیوس در تغییر است.

نتیجه‌گیری: به طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش، بیانگر آن است که این محدوده در دهه‌های آتی به سمت اقلیمی با رطوبت کمتر و دمای بیشتر پیش می‌رود.
کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، تصحیح خطا، نمره مهارت (SS)، حوضه آبخیز دز، CORDEX.

۱. مقدمه

پدیده تغییر اقلیم و تأثیرات آن، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌رو در بخش‌های کشاورزی و منابع آب است. بخش عمده‌ای از تحقیقات انجام شده و در حال انجام در زمینه آب، از آخر قرن بیستم معطوف به بررسی این پدیده، اثرات و ارائه راهکارهایی در جهت سازگاری و کاهش تأثیرات آن بوده است (فوهرا، ۲۰۰۳، ص. ۳). دستیابی به این هدف نیازمند پیش‌نگری‌های صحیح متغیرهای اقلیمی در هر منطقه است تا با کسب آگاهی در این زمینه، توسعه استراتژی‌های مناسب و موثر صورت گیرد (تراندو، کلر و استرلینگ، ۲۰۱۲، ص. ۳۹). اما پیش‌نگری‌های صحیح متغیرهای اقلیمی متکی به مدل‌های گردش کلی است. اکنون در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم ابتدا نیاز به به کارگیری یک یا چند مدل GCM و

1. Fuhrer
2. Terando, Keller, & Easterling

سپس ریزمقیاس‌نمایی (یا تصحیح خطا) نتایج به منطقه مورد نظر است (پیرس، بارنت، سانتر و گلکلا، ۲۰۰۹، ص. ۸۴۴۳). اما سؤالی که در این‌گونه مطالعات مطرح می‌شود این است که با وجود تعدد زیاد مدل‌های GCM و همچنین عدم قطعیت در خروجی و نتایج متفاوت آن‌ها برای هر منطقه، در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم، این مدل‌ها چگونه باید انتخاب شوند (برکل، دتینگر، مرر و آندرسون^۲، ۲۰۰۸، ص. ۳۷۱). یک رویکردی که به طور فزاینده‌ای از آن استفاده می‌شود، تعریف معیارهایی برای مهارت مدل و تعیین کیفیت آن‌ها براساس توانایی‌هایشان در شبیه‌سازی‌ها می‌باشد (سگر و همکاران^۳، ۲۰۰۷، ص. ۱۱۸۱). که از این رویکرد در این پژوهش استفاده شد و با تعریف معیارهایی، عملکرد مدل‌های GCM ارزیابی گردید. قدرت تفکیک GCMs در پروژه CMIP5 معمولاً بین ۱ تا ۲ درجه طول و عرض جغرافیایی است و نمی‌تواند اطلاعات قابل قبولی ارائه کند. بنابراین، به ریزمقیاس‌نمایی سناریوهای آب و هوایی در سطح ملی نیازمندیم. این مهم را می‌توان با ریزمقیاس‌نمایی دینامیک و به کمک یک مدل منطقه‌ای آب و هوا (RCM)، انجام داد. در سال‌های اخیر مؤسسه WCRP^۴ در اقدامی هماهنگ با برنامه بین‌المللی ریزمقیاس‌نمایی منطقه‌ای (CORDEX)^۵ به منظور تولید مجموعه چند عضوی داده‌های ریزمقیاس‌نمایی شده، از خروجی مدل‌های آب و هوای منطقه‌ای مختلف در پروژه CMIP5 استفاده کردند که هدف شناسایی تغییرات منطقه‌ای اقلیم و ارائه راه‌کارهای سازگاری با آن بود (گورگی، جونز و اسرار^۶، ۲۰۰۹، ص. ۱۷۸). در پروژه CORDEX پهنه‌های خشکی زمین به ۱۴ بخش تقسیم و خروجی مدل‌های اقلیم جهانی با دقت مکانی ۰/۴۴، ۰/۲۲ و ۰/۱۱ درجه قوسی تولید می‌شوند. همچنین، دقت زمانی خروجی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی مورد استفاده در این طرح، شامل داده‌های سه ساعته، شش ساعته، روزانه و در نهایت داده‌های ماهانه و فصلی است. علاوه بر افزایش دقت مکانی و زمانی در مدل‌ها، تعداد و نوع متغیرهای ورودی و در نتیجه متغیرهای ریزمقیاس‌نمایی شده و محاسبه شده نیز افزایش قابل توجهی یافته است (تیلور، رونالد و گرالده^۷، ۲۰۱۲، ص. ۴۹۰). بنابراین، انتظار می‌رود مجموعه مدل‌های این پروژه مبنای بسیاری از مطالعات ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم قرار گیرد.

1. Pierce, Barnett, Santer, & Gleckler
2. Brekke, Dettinger, Maurer, & Anderson
3. Seager, Ting, Held, Kushnir, Lu, Vecchi, & Li
4. World Climate Research Program
5. Coordinated Regional climate Downscaling Experiment
6. Giorgi, Jones, & Asrar
7. Taylor, Ronald, & Gerald

۲. پیشینه تحقیق

بررسی‌های متعددی از خروجی‌های مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا پروژه CORDEX در نواحی مختلف جهان انجام شده است که در زیر به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود: عملکرد ۱۰ مدل اقلیم منطقه‌ای CORDEX در شبیه‌سازی الگوهای بارندگی در شرق آفریقا به صورت منفرد و گروهی مورد بررسی قرار گرفت خروجی‌ها حکایت از توانایی‌های ترکیبی این مدل‌ها در برآورد بارش این منطقه در آینده دارد (اندریس و همکاران^۱، ص. ۸۴۵۳). ارزیابی تغییرات سالانه بارش در جنوب مکزیک و آمریکای مرکزی و ارتباط آن با دمای سطح دریا (SST)^۲ در اقیانوس اطلس و آرام با استفاده از مجموعه شبیه‌سازهای CMIP5 و RegCM4 CORDEX نشان داد که رابطه بین بارش و SST در دوره حاضر، تحت شرایط آب و هوایی آینده تغییر نمی‌کند (فوئنتس همکاران^۳، ۲۰۱۳، ص. ۴۲۵).

شانگو و همکاران^۴ (۲۰۱۵، ص. ۱۹۹) در پژوهشی به بررسی داده‌های شبیه‌سازی شده بارش ماهانه در محدوده CORDEX - Africa با ۱۰ مدل اقلیم منطقه‌ای در بازه ۲۰۰۷ - ۱۹۹۱ پرداختند؛ نتایج مقایسه داده‌های شبیه‌سازی با مشاهداتی کارایی مناسب همه مدل‌ها را به ویژه در شمال محدوده مورد مطالعه نشان داد.

ایچ و همکاران^۵ (۲۰۱۷، ص. ۱) به ارزیابی تغییرات اقلیمی گذشته و آینده افغانستان با استفاده از عملکرد ۱۲ مدل اقلیم منطقه‌ای CORDEX - South Asia پرداختند که در این راستا علاوه بر دما و بارش از ۵ شاخص اقلیم - کشاورزی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 نیز استفاده کردند. خروجی‌ها نشان داد که میانگین دما در گذشته نسبت به میانگین جهانی ۱/۸ درجه سلسیوس افزایش داشته است. همچنین نتایج مدل‌های آب و هوایی در دوره‌های آتی نیز گویای آن است که این روند افزایش دما با توجه به وابستگی آن به میزان انتشار دی‌اکسید کربن بین ۲/۳ تا ۶/۴ درجه سلسیوس برای RCP8.5 متغیر است. از سوی دیگر کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق، شدت تنش‌های موجود در افغانستان را افزایش خواهد داد و آنان خواستار تأکید بر سازگاری مناسب با تغییرات آب و هوایی شدند.

1. Endris, Omondi, Jain, Lennard, Hewitson, Chang'a, & Panitz
2. sea surface temperature
3. Fuentes-Franco, Coppola, Giorgi, Pavia, Diro, & Graef
4. Shongwe, Lennard, Liebmann, Kalognomou, Ntsangwane, & Pinto
5. Aich, Akhundzadah, Knuerr, Khoshbeen, Hattermann, Paeth, & Paton

اثرات تغییر اقلیم بر بارش‌های حدى در چهار شهر ساحلى آفريقا (کيب تاون، ماپوتو، لاگوس و پورت سعید) با استفاده از ۱۶ مدل اقلیم منطقه‌ای نشان داد که مدل‌ها، شبیه‌سازی واقعی از ویژگی‌های بارندگی شدید را در شهرها ارائه می‌دهند. از دیگر نتایج این مطالعه کاهش روزهای مرطوب و افزایش دوره‌های خشک در هر چهار نقطه و افزایش شدت و فرکانس رخدادهای شدید بارش تنها در لاگوس می‌باشد (عابیدون و همکاران^۱، ۲۰۱۷، ص. ۳۹۹).

تغییرات دما و بارش فصلی مرکز آسیا (CORDEX-Central Asia) برای سه دوره نزدیک، میانه و دور و با استفاده از عملکرد دو مدل HadGEM2-ES و MPI-ESM-MR مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج نشان از افزایش ۳ تا ۷ درجه سلسیوس دما برای دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۷۰ و کاهش بارش برای منطقه مورد مطالعه دارد. این بررسی نیز برای CORDEX - Middle East (خاورمیانه) و North Africa (MENA) (منا) انجام شد که خروجی‌های آن گویای افزایش ۳ تا ۹ درجه سلسیوس دما و کاهش شدید بارش و خشک شدن منطقه مورد مطالعه داشت (اختارک، ترپ، تورکس و کرناز^۲، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸). سعید، آلمازوری، اسلام و خان^۳ (۲۰۱۷، ص. ۱۶۳۵) در پژوهشی به ارزیابی اثرات تشدید امواج گرمایی در آینده با استفاده از سه مدل‌های منطقه‌ای CORDEX در پاکستان پرداختند. دو رویکرد متفاوت (ثابت و نسبی) برای ارزیابی امواج گرمایی در نظر گرفته شد، رویکرد ثابت زمانی است که درجه حرارت به بیش از ۴۵ درجه سلسیوس برسد و برای مدت چندین روز ادامه یابد که بسیار خطرناک است و رویکرد نسبی که ممکن است به طور مستقیم تهدیدکننده زندگی نباشد، اما باعث ذوب برف و یخ و افزایش سیلاب شود و به ترتیب بر امنیت غذایی کشور در فصل تابستان و زمستان تأثیر بگذارد. نتایج نشان از وقوع رویکرد ثابت در مناطق شرقی (دشت‌های پنجاب و سند) و رویکرد نسبی در مناطق شمالی (نواحی با برف و یخ بسیار که ذوب آن در تابستان سبب طغیان و سیلاب می‌شود) دارد.

سانجای، کریشن، شرسستا، رجه‌ندری و رن^۴ (۲۰۱۷، ص. ۱۸۵) از مدل‌های ترکیبی پروژه CORDEX-Southeast Asia برای بررسی جنبه‌های کیفی تغییرات آینده میانگین فصلی دما و بارش هندوکش هیمالیا تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای دو دوره استفاده کردند. نتایج حکایت از افزایش ۵/۴ درجه سلسیوس دما در زمستان نسبت به تابستان و افزایش ۲۲ درصدی بارش‌های

1. Abiodun, Adegoke, Abatan, Ibe, Egbebiyi, Engelbrecht, & Pinto
2. Ozturk, Turp, Türkeş, & Kurnaz
3. Saeed, Almazroui, Islam, & Khan
4. Sanjay, Krishnan, Shrestha, Rajbhandari, & Ren

فصلی مونسون تابستانی دارد. وارناتج و رییدی^۱ (۲۰۱۹، ص. ۳۷۸) در تحقیقی به ارزیابی توانایی مدل‌های گردش کلی (GCMs) و مدل‌های آب و هوایی منطقه‌ای (RCMs) برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در مالوای پرداختند نتایج نشان داد که این مدل‌ها تغییرات روند در متغیرهای دما را بخوبی شبیه‌سازی کردند ولی خروجی‌های شبیه‌سازی شده برای بارش تغییرپذیری بالایی داشت. کامیار، موحدی و یزدان‌پناه (۱۳۹۶، ص. ۳۷) در پژوهشی به بررسی چشم‌انداز دمای کمینه و بیشینه استان اصفهان در افق زمانی (۲۰۵۰ - ۲۰۱۷) تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند. نتایج حاکی از روند افزایشی این دو پارامتر برای هر دو سناریو در دهه‌های آتی است. ارزیابی دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای دو محدوده CORDEX - WAS (جنوب آسیا) و CORDEX - MNA (منا) برای ایران نشان داد که مدل‌های موجود در برنامه CORDEX برای بارش همبستگی زیادی با داده‌های مشاهداتی ندارد ولی برای دو پارامتر دمای حداقل و حداکثر همبستگی بالا و خطای کمتر از یک درجه سلسیوس را نشان می‌دهد (کامیار، یزدان‌پناه و موحدی، ۱۳۹۷، ص. ۱۶۱). واکاوی اثرات اقلیمی دما و بارش بر وضعیت منابع آبی نسبت به پارامتر جمعیت در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از پروژه CORDEX نشان داد که در هر سه مدل اقلیمی EARTH-EC، CNRM و GFDL، حوضه آبریز مند و کل - مهران به ترتیب بیشترین و کمترین میزان تنش آبی را نسبت به پارامتر جمعیت در دهه‌های آتی خواهند داشت. (خوش‌بیان، عراقی‌نژاد و آقاشریعتمداری، ۱۳۹۸، ص. ۶۱۶).

اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب به‌عنوان موضوعی چالش برانگیز در بسیاری از مناطق خشک دنیا مطرح بوده به طوری که هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم بیان می‌دارد که منابع آب قابل دسترس در منطقه خاورمیانه تحت اثر تغییرات اقلیمی، در وضعیت هشدار قرار دارند (IPCC, 2007). انتظار می‌رود که تغییر در متوسط متغیرهای اقلیمی (به ویژه دما و بارندگی) تأثیر قابل توجهی بر منابع آب در دسترس آینده بگذارد، به گونه‌ای که طبق مطالعات قبلی صورت گرفته، تغییرات ۱۰ درصدی میزان نزولات جوی عمدتاً منجر به تغییرات ۱۵ تا ۲۵ درصدی جریان رودها می‌شود، و این در حالی است که افزایش دو درجه سلسیوس دما معمولاً منجر به کاهش ۵ تا ۱۲ درصدی جریان‌ها می‌گردد (ژانگ، وانگ، هی و لیو، ۲۰۰۹، ص. ۱۵۵؛ لیوزو، نوتو، ویونی و لالوژیا، ۲۰۱۰، ص. ۱۱۰). متأسفانه کشور

1. Warnatzsch & Reay
2. Zhang, Wang, He, & Liu
3. Liuzzo, Noto, Vivoni, & La Loggia

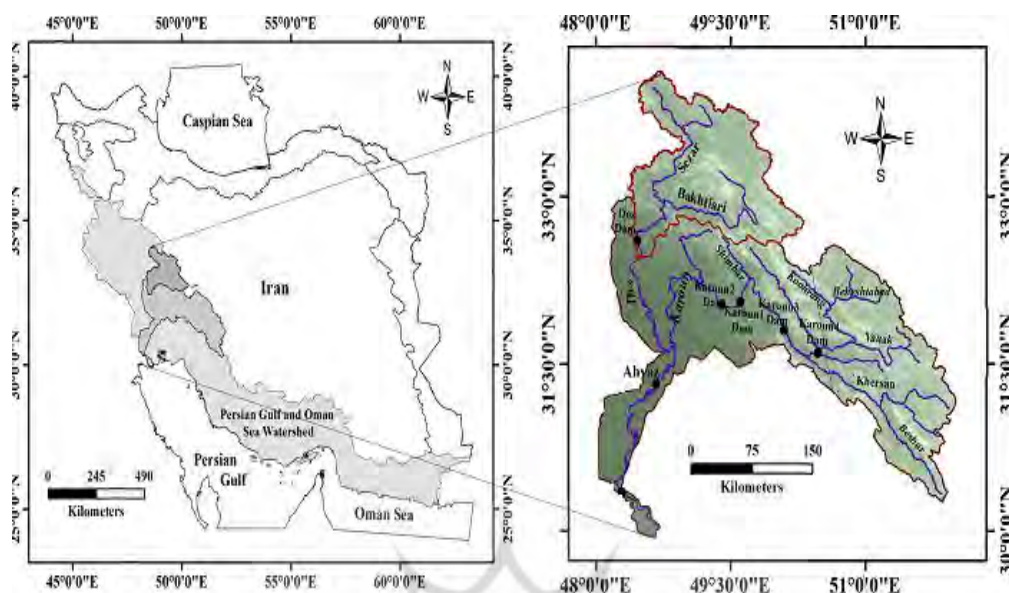
ایران نیز از این تغییرات بزرگ مقیاس مستثنی نبوده و اثرات آن در بسیاری از حوضه‌های آبخیز کشور مشاهده شده است. حوضه آبخیز دز از زیر حوضه‌های کارون بزرگ از نظر آب و هوایی جزو مناطق نیمه‌خشک کوهستانی ایران محسوب می‌شود که سد دز به‌عنوان سومین سد مرتفع ایران (پنجاهمین سد بلند دنیا) با متوسط آورد طبیعی ۲۷۰ متر مکعب در ثانیه، در انتهای آن واقع شده است (موسوی و معرفی، ۱۳۹۵، ص. ۳۳۵).

جریان‌های سطحی و ذخیره‌ای این حوضه در اقتصاد کشاورزی، تولید انرژی، صنعت و شرب در مقیاس منطقه‌ای و ملی بسیار تعیین کننده بوده است. از آنجا که تغییر اقلیم سبب تغییر در مؤلفه‌های اقلیمی شده و این امر بر دسترسی به منابع آب سطحی در این منطقه اثرگذار بوده آگاهی از تغییرات و پیش‌نگری این پارامترها در آینده امری ضروری است. برخی از مطالعات در رابطه با بررسی تغییرات اقلیمی بر روی حوضه‌های آبخیز ایران در دوره‌های اخیر و آتی بر اساس مدل‌های ارزیابی گزارش چهارم و گزارش پنجم (CMIP3, CMIP5) انجام پذیرفته است که دارای قدرت تفکیک‌پذیری پایین است (جوان، نصیری صالح و طاهری شهربانی، ۲۰۱۳، ص. ۳۰۰). بنابراین به نظر می‌رسد که مطالعات تغییر اقلیم در حوضه‌های آبخیز توسط مدل‌های اقلیمی با وضوح بالا و به ویژه توسط مدل‌های پایگاه CORDEX امری ضروری به نظر می‌رسد. به طوری که مدل‌های فوق درکی بهتر از این مناطق در دوره‌های زمانی آتی نسبت به مدل‌های پیشین برای مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب فراهم می‌نماید. از این رو هدف کلی این مقاله ارزیابی توانایی مجموعه مدل‌های برنامه CORDEX در شبیه‌سازی دما و بارش به عنوان متغیرهای تاثیرگذار در جریان حوضه آبخیز دز است.

۳. روش‌شناسی تحقیق

۳.۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه دز به لحاظ موقعیت جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مساحت کل حوضه بالغ بر ۲۱۷۲۰ کیلومتر مربع و متوسط ارتفاع آن حدود ۱۶۰۰ متر می‌باشد. منطقه مورد مطالعه قسمتی از حوضه آبخیز در بالادست سد دز به مساحت ۱۷۳۶۵ کیلومتر مربع است.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز دز در حوضه کارون بزرگ

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

۲.۳. روش تحقیق

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های دما و بارش روزانه ایستگاه‌های الیگودرز، بروجرد، اراک، خرم‌آباد، کشور، دزفول، کوه‌رنگ، سازمان آب بروجرد و زردفهره در بازه زمانی ۲۰۰۵ - ۱۹۸۶ است که از شرکت مدیریت منابع آب ایران و سازمان هواشناسی کل کشور تهیه گردید (جدول ۱). شبیه‌سازی ۱۷ مدل گردش کلی پروژه CORDEX - WAS (جنوب آسیا) از پایگاه داده ESGF^۱ دریافت شد. شایان ذکر است که داده‌های اقلیمی در مدل‌های برنامه CORDEX تا پایان سال ۲۰۰۵ میلادی به عنوان دوره تاریخی و از اول ژانویه ۲۰۰۶ تا ۳۱ دسامبر ۲۱۰۰ میلادی برای سناریوهای انتشار آینده در نظر گرفته شده است. برای اجرای این پروژه، نخست برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB برای استخراج داده‌های مدل در محدوده ایران و سپس مقایسه داده‌های مشاهداتی با داده‌های مدل با در نظر گرفتن این شرط که در قدرت تفکیک ۰/۴۴، ایستگاه‌های مشاهداتی با یاخته مناظر فاصله‌ای کمتر از ۲۵ کیلومتر داشته باشد، تنظیم شد. مبنای انتخاب این فاصله (۲۵ کیلومتر) به کارگیری بیشترین تعداد ایستگاه‌ها در تنظیم داده‌های دوره پایه به منظور ارزیابی دقت

1. <http://www.cordex.org>

خروجی مدل‌های منطقه‌ای است. پس از اعمال این شرط تعداد ۹ ایستگاه با داده‌های یاخته متناظرشان مقایسه شدند.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

ردیف	ایستگاه	ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نوع ایستگاه
۱	دزفول	۱۴۳	۳۲/۴	۴۸/۳۸	سینوپتیک
۲	کشور	۷۷۰	۳۳/۱۴	۴۸/۶۳	بارانسنجی
۳	خرم‌آباد	۱۱۴۸	۳۳/۴۴	۴۸/۲۸	سینوپتیک
۴	بروجرد سازمان آب	۱۴۹۰	۳۳/۷۸	۴۸/۸	بارانسنجی
۵	بروجرد	۱۶۱۹	۳۳/۵۵	۴۸/۴۵	سینوپتیک
۶	اراک	۱۷۰۸	۳۴/۰۷	۴۹/۷۸	سینوپتیک
۷	الیگودرز	۲۰۲۲	۳۳/۲۴	۴۹/۴۲	سینوپتیک
۸	کوه‌رنگ	۲۳۶۵	۳۲/۴۵	۵۰/۱۳	سینوپتیک
۹	زردفهره	۲۴۴۱	۳۳/۰۱	۴۹/۸۱	بارانسنجی

۳.۳. روش تصحیح خطا

به منظور تصحیح خطای داده‌های شبیه‌سازی شده ماهانه بارش و دما در دوره تاریخی و سپس دوره آینده در هریک از ایستگاه‌ها و برای هر سه پارامتر هر مدل، از روش عامل تغییر استفاده شد (اویانگ و همکاران، ۲۰۱۵، ص. ۱۷۸۳). در این روش پس از استخراج ماهانه دما و بارندگی دوره پایه و آتی از مدل، با محاسبه تفاوت ماهانه درازمدت دما و درصد تغییرات بارندگی در دوره آتی نسبت به دوره پایه، سناریوی اقلیمی مطابق روابط ۱ و ۲ برآورد و به داده‌های مشاهداتی حوضه اضافه (برای دما) و ضرب (برای بارندگی) می‌شود:

$$T_i = T_{obs,i} + (\bar{T}_{GCM,fut,i} - \bar{T}_{GCM,bas,i}) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$P_i = P_{obs,i} \times (\bar{P}_{GCM,fut,i} / \bar{P}_{GCM,bas,i}) \quad \text{رابطه ۲}$$

در روابط فوق، T_i و P_i به ترتیب بیانگر سری زمانی تعدیل شده دما و بارش حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی برای هر ماه i ، $T_{obs,i}$ و $P_{obs,i}$ به ترتیب بیانگر سری زمانی دما و بارندگی

مشاهداتی در دوره پایه هر ماه $TGCM, fut, i$ و $PGCM, fut, i, i$ به ترتیب بیانگر متوسط درازمدت بارش و دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های GCM در دوره آتی برای هر ماه i ، $TGCM, bade, i$ و $PGCM, bade, i$ به ترتیب بیانگر متوسط درازمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های GCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه i می‌باشند.

همچنین از نمودار تیلور برای رسیدن به دیدی کلی و جامع از مقایسه مدل‌ها در پهنه مورد مطالعه استفاده شد. این نمودار به طور گسترده به منظور بررسی ابعاد پیچیده و پیمایش توان نسبی چند مدل یا طرحواره همرفت به کار می‌رود (تیلور، ۲۰۰۱، ص. ۷۱۸۴). نرم‌افزار NCL-6.5.0 شامل توابعی است که آماره‌های مورد نیاز برای ترسیم نمودار تیلور را فراهم می‌کند.

۳.۴. نمره مهارت (Skill Score)

از آنجایی که در بررسی عملکرد مدل‌ها حالات متفاوتی پیش می‌آید از جمله ممکن است میانگین مقادیر مشاهده شده (\bar{O}) و مدل (\bar{m}) برابر و ضریب همبستگی (Rm, O) نیز ۱ باشد، اما واریانس (تغییرپذیری) مقادیر مشاهده شده (σ^2) و مدل (σ^2) برابر نباشد یا میانگین مقادیر مشاهده شده و مدل برابر و واریانس (تغییرپذیری) آن‌ها نیز برابر، اما ضریب همبستگی صفر باشد یا واریانس آن‌ها (تغییرپذیری) برابر و ضریب همبستگی نیز ۱ باشد، اما میانگین مقادیر مشاهده شده و مدل برابر نباشد در تمام این حالات شبیه‌سازی مدل کاملاً بر مشاهدات منطبق نیست. بنابراین، برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی نیاز به شاخصی است که همزمان این سه پارامتر (میانگین، واریانس و همبستگی) را لحاظ کند. بنابراین از نمره مهارت (SS) بین شبیه‌سازی مدل‌ها و مشاهدات به صورت زیر استفاده شد:

$$SS = [R2m.o] - \left[Rm.o - \left(\frac{\sigma m}{\sigma o} \right) \right]^2 - \left[\frac{(m - \sigma)}{\sigma} \right]^2$$

رابطه ۳

سه جمله سمت راست رابطه ۳ به ترتیب همبستگی، خطای سیستماتیک (غیرشرطی) و خطای غیرسیستماتیک (شرطی) را برای شبیه‌سازی مدل‌ها نسبت به مشاهدات به صورت کمی نشان می‌دهد (ویلکز، ۲۰۱۱، ص. ۳۳۱).^۲

1. Taylor

2. Wilks

مدلی که دقیقاً کلیه خصوصیات مشاهدات را بازتولید کند نمره مهارت آن ۱ است. چنانچه میانگین و واریانس مقادیر مشاهده شده و مدل برابر و ضریب همبستگی صفر باشد نمره مهارت مدل ۱- است. حدود تغییرات نمره مهارت (SS) از منفی بی نهایت تا ۱ می‌باشد. در این مطالعه ۳۹ معیار برای مهارت مدل که شامل ۳۶ معیار برای متغیر ماهانه دما (حداقل و حداکثر) و بارش (۱۲ ماه) و ۳ معیار برای متغیر سالانه دما و بارش تعریف شد. عملکرد مدل‌ها در دوره تاریخی بر اساس معیارهای تعریفی برای هر مدل و پارامتر، در هر ایستگاه ارزیابی شد. سپس کیفیت مدل‌ها بر اساس مقدار (Δ) فاصله اقلیدی از کم به زیاد مرتب شد. Δ برای هر مدل، فاصله اقلیدی نمره مهارت آن از نقطه‌ای با نمره مهارت کامل (۱،۱،۱،...) است که مقادیر کمتر Δ نشان‌دهنده توافق بهتر شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات می‌باشد. از آنجایی که نتایج مدل‌های اقلیمی، اساس شبیه‌سازی‌های تغییر اقلیم آینده را فراهم می‌کند که با عدم قطعیت همراه می‌باشند، یکی از روش‌هایی که امکان ارزیابی طیف وسیعی از عدم قطعیت را در مطالعات تغییر اقلیم ایجاد می‌کند، استفاده از multi model ensembles می‌باشد (IPCC, 2010).

در این پژوهش سعی شد با در نظر گرفتن ترکیب مدل‌ها با نمره مهارت متفاوت، علاوه بر حصول به بهترین شبیه‌سازی، تا اندازه قابل قبولی عدم قطعیت را کاهش داد تا بتوان شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تری از تغییرات بارش و دما در دهه‌های آتی را فراهم نمود. از این رو ترکیب‌های بسیار متفاوتی از ۱۷ مدل مورد بررسی قرار گرفت (از جمله ترکیب‌های متفاوت ۲ تایی، ۳ تایی، ... ۱۷ تایی) که در نهایت ترکیب ۱۰ تایی که کمترین مقدار Δ را برای کل منطقه داشت، انتخاب گردید (پیرس، بارت، سانتر و گلکлер، ۲۰۰۹، ص. ۸۴۴۸).

جدول ۲- مشخصات مدل‌ها و مؤسسات آماده‌سازی پروژه CORDEX

مأخذ: <http://www.cordex.org>

شماره مدل	مدل	مؤسسات تحقیقاتی تدوین کننده مدل‌ها
M1	SMHI.IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL, Institute Pierre Simon Laplace, France
M2	SMHI.CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
M3	SMHI.MOHC-HadGEM2-ES	MOHC, Met Office Hadley Center, UK
M4	SMHLEARTH	European community Earth-System Model

شماره مدل	مدل	موسسات تحقیقاتی تدوین کننده مدل‌ها
M5	SMHI.NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	NOAA, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
M6	SMHI.MPI-M-MPI-ESM-LR	Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology
M7	SMHI.MIROC-MIROC5	MIROC, Center for Climate System Research, Japan
M8	SMHI.NorESM1-M	NCC, Norwegian Climate Center, Norway
M9	SMHI.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	Météo-France Centre National de Recherches Météorologiques
M10	SMHI.CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia
M11	IITM.CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia
M12	IITM.IPSL-IPSL-CM5A-LR	Institutes Pierre-Simon Laplace
M13	IITM.CCCma-CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
M14	IITM.MPI-M-MPI-ESM-MR	Institute for Atmospheric and Environmental Sciences (IAES), Goethe University, Frankfurt am Main (GUF), Germany
M15	IITM.NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	NOAA, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
M16	IITM.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques
M17	MPI-M-MPI-ESM-LR	Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center Germany

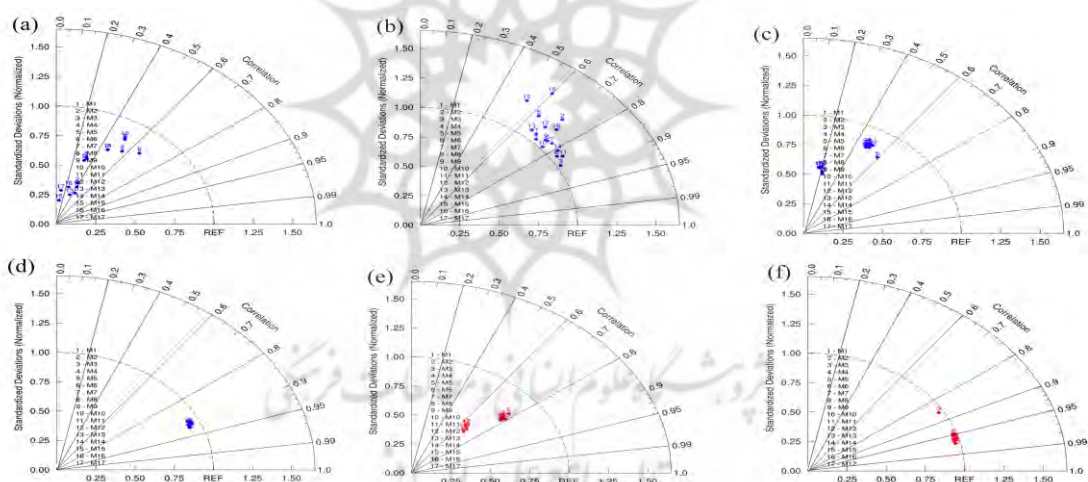
۴. یافته‌های تحقیق

به منظور ارزیابی اولیه بین شبیه‌سازی مدل‌های GCM و مشاهدات اقلیمی در منطقه مورد مطالعه، از نمودار تیلور استفاده شد. شکل ۲ میزان شباهت شبیه‌سازی مدل‌ها با مشاهدات برای متغیر بارش، دمای حداکثر و حداقل را قبل و بعد از تصحیح خطا در نمودار تیلور نشان می‌دهد.

همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی مدل‌ها و مقادیر مشاهده‌شده بارش قبل از تصحیح خطا مابین ۰/۱۵ تا ۰/۵ بوده که بعد از تصحیح خطا به حدود ۰/۵ تا ۰/۸۵ رسیده است؛ این مقادیر برای دمای حداکثر قبل از تصحیح بین ۰/۶ تا ۰/۸ متغیر بوده که با تصحیح خطا این مقادیر تا ۰/۹۵ افزایش یافت. برای پارامتر حداقل دما مقدار همبستگی قبل از تصحیح بین ۰/۲ تا ۰/۴ است که به مانند دو پارامتر قبلی با تصحیح خطا این مقدار افزایش یافت به بیش از ۹۰ درصد رسید.

تصحیح خطا برای پارامتر دما و بارش در دوره تاریخی سبب افزایش همبستگی تا ۰/۹۸ برای دمای حداقل و حداکثر و ۰/۶۵ برای بارش شده است که این امر نشان می‌دهد تصحیح خطا سبب کاهش RMSE و افزایش همبستگی و نزدیک شدن واریانس مقادیر شبیه‌سازی مدل‌ها به مشاهدات شده است. دقت مدل‌ها براساس نمره مهارت در جدول ۲ آورده شده است. ابتدا نمره مهارت (SS) هر مدل در شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش برای هر ایستگاه در حوضه مورد مطالعه (ماهانه، سالانه، ۳۹ تا SS) محاسبه گردید. سپس کیفیت مدل‌ها براساس مقدار (Δ) فاصله اقلیدسی از کم به زیاد مرتب شد (جدول ۲).

در نهایت ترکیب ده تایی (M7, M11, M2, M12, M6, M14, M4, M9, M10, M3) با کمترین مقدار Δ (۳/۱) برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. ترکیب مدل‌های فوق دارای Δ کمتری نسبت به تک تک مدل‌ها می‌باشد که حاکی از بهترین شبیه‌سازی است.



شکل ۲- نمودار تیلور برای متغیر ماهانه (a,c,e) به ترتیب بارش، حداکثر و حداقل دما قبل از تصحیح خطا، (b,d,f) به ترتیب بارش، حداکثر و حداقل دما بعد از تصحیح خطا

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

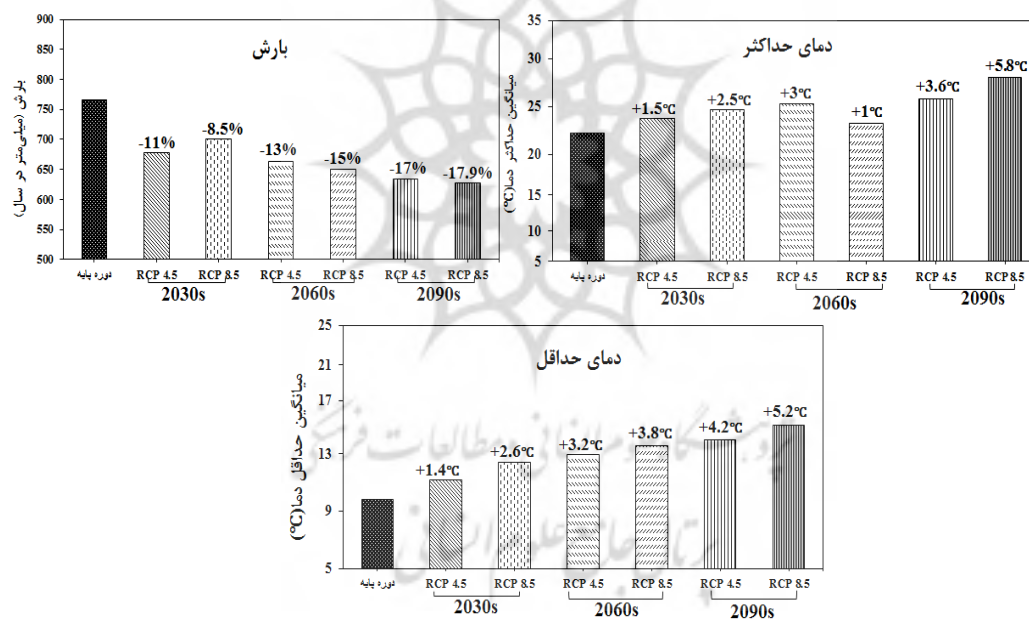
۴. ۱. خروجی‌های مدل‌های GCM در حوضه آبخیز دز

پس از ارزیابی دقت مدل‌ها برای دوره پایه و انتخاب مدل‌های مناسب (۱۰ مدل منتخب) اقدام به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی دما و بارش برای دوره‌های آتی شد. مدل برای سه دوره ۲۰ ساله (۲۰۸۰-۲۰۹۹، ۲۰۶۹-۲۰۸۰، ۲۰۵۰-۲۰۶۹ و ۲۰۳۹-۲۰۲۰) در قرن ۲۱ و تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای ایستگاه‌های مورد مطالعه اجرا گردید. جدول ۴ پیش‌نگری تغییرات بارش و دما کل حوضه آبخیز دز را برای سه دوره (نزدیک، متوسط و دور) نسبت به دوره پایه، تحت سناریوهای مذکور نشان می‌دهد. به طور کلی بارش حوضه روند کاهشی داشته است. مطابق جدول ۳ در سناریوی RCP4.5 میانگین بارش سالانه در دوره ۲۰ ساله اول، دوم و سوم به ترتیب ۶۷۸، ۵/۶۶۳ و ۶۶۳ میلی‌متر برآورد گردیده که نسبت به دوره پایه (۷۶۵ میلی‌متر) بین ۱۱ تا ۱۷ درصد کاهش بارش را نشان می‌دهد، این کاهش در سناریوی RCP8.5 بین ۸ تا ۱۸ درصد متغیر است. طبق مطالعات انجام شده توسط قدمی، سلطانی، گودرزی، نادری و تیموری (۱۳۹۷) و اسکانی کزازی (۱۳۹۵) تغییر اقلیم موجب کاهش بارش در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه در این حوضه خواهد شد که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. در منطقه مورد مطالعه، افزایش دمای حداکثر نسبت به دوره پایه برای سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب مابین ۵/۸ تا ۱/۶ و ۳ تا ۱/۵ درجه سلسیوس متغیر است. این مقادیر برای دمای حداقل مابین ۱/۵ تا ۴/۲ و ۲/۷ تا ۵/۳ درجه سلسیوس است که بیشترین افزایش دمای حداقل و حداکثر برای این سناریوها در دهه‌های آتی مربوط به سناریو انتشار RCP8.5 است. این اختلاف بین سناریوهای انتشار در پیش‌نگری افزایش دما (حداکثر و حداقل) به ویژه در آینده دور به علت تفاوت در مسیر تعریف شده انتشار گازهای گلخانه‌ای در سناریوها است. به طوری که سناریو RCP8.5 تا پایان قرن افزایش دائمی انتشار گازهای گلخانه‌ای را نشان می‌دهد که خروجی‌های این بخش نیز با تحقیق سیدکابلی (۱۳۹۵) برای حوضه دز همسو است. همچنین نتایج مطالعات انجام شده توسط آذری، مرادی، ثقفیان و فرامرزی (۱۳۹۲)، نادری، گودرزی، قدمی دهنو (۱۳۹۶) و توکلی، کریمی و نورالهی

(۱۳۹۷) به ترتیب بر روی حوضه‌های گرگان‌رود، سیمره و گل‌گل با نتایج این پژوهش همسویی دارند.

جدول ۴- میانگین درازمدت پارامترهای اقلیمی نسبت به دوره پایه تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

RCP8.5			RCP4.5			پایه	پارامتر
(2090s)	(2060s)	(2030s)	(2090s)	(2060s)	(2030s)		
۶۲۷/۸	۶۴۹/۴	۷۰۰/۴	۶۳۳/۴	۶۶۳/۵	۶۷۸/۳	۷۶۵/۳	بارش
۲۸/۱	۲۵/۸	۲۳/۸	۲۵/۳۳	۲۴/۷۴	۲۳/۷۵	۲۲/۲۵	دمای حداکثر
۱۲/۹	۱۱/۵	۱۰/۴	۱۱/۹	۱۰/۹	۹/۲	۷/۷	دمای حداقل



شکل ۳- پیش‌نگری دما و بارش حوضه آبخیز دز در دهه‌های آتی
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

۲.۴. بررسی تغییرات سالانه پارامترهای اقلیمی

حوضه مورد مطالعه بر اساس ویژگی‌های توپوگرافی و دو پارامتر اقلیمی دما و بارش به سه طبقه ارتفاعی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰، ۱۰۰۱ تا ۲۰۰۰ و بالاتر از ۲۰۰۰ متر تقسیم شد و در هر طبقه یک ایستگاه به‌عنوان نماینده انتخاب گردید. بدین ترتیب که دزفول (۱۵۰ متر)، بروجرد (۱۶۰۰ متر) و کوه‌رنگ (۲۳۶۵ متر) به ترتیب نماینده هر یک از طبقات ارتفاعی با توپوگرافی جلگه، پیاکوهی و کوهستان هستند. در ادامه تغییرات سالانه و ماهانه پارامترهای اقلیمی ایستگاه‌های منتخب برای سه دوره، تحت دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 نسبت به دوره پایه تشریح می‌شود.

۲.۴.۱. دزفول

مطابق جدول ۵ تغییرات میانگین بارش سالانه ایستگاه دزفول در دوره‌های پایه و آینده بر اساس سناریوهای مورد بررسی حکایت از افزایش شرایط بارشی این ایستگاه در دهه‌های آتی جز دوره (۲۰۸۰-۲۰۹۹) در سناریو RCP4.5 دارد. خروجی‌ها نشان می‌دهد دزفول در آینده بارشی مابین ۰/۷ تا ۱۱ درصد را دریافت خواهد کرد. پیش‌نگری مقادیر دمای بیشینه در آینده نزدیک برای سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 حدود ۱/۴ درجه سلسیوس، در آینده متوسط مابین ۲/۲ تا ۳/۳ درجه سلسیوس و در آینده دور بین ۲/۸ تا ۵/۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. نمودار دمای حداقل دزفول برای سه دوره آینده نشان می‌دهد که مقادیر این پارامتر از دو ایستگاه کوه‌رنگ و بروجرد در هر دو سناریوی انتشار تا سال ۲۱۰۰ افزایش بیشتری خواهد داشت (شکل ۴). این افزایش در سناریوی RCP8.5 نسبت به RCP4.5 بیشتر بوده و میانگین دما از ۱۶ درجه سانتی‌گراد در دوره پایه به ۲۱/۵ درجه سلسیوس در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ می‌رسد.

۲.۴.۲. بروجرد

پیش‌نگری میانگین بارش سالانه بروجرد در سناریوی RCP4.5 دوره ۲۰ ساله اول، دوم و سوم به ترتیب ۴۵۷ و ۴۴۳ و ۴۳۶ میلی‌متر برآورد گردیده که نسبت به دوره پایه (۴۵۶ میلی‌متر) این ایستگاه در بازه‌های زمانی ۲۰۶۹-۲۰۵۰ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ بین ۲/۹ تا ۴/۵

درصد کاهش بارش را تجربه می‌کند. در سناریوی RCP8.5 نیز به مانند سناریو قبلی بیشترین کاهش بارش شبیه‌سازی شده در دوره‌های دوم و سوم بین ۵ تا ۷ درصد اتفاق افتاده است. خروجی حداکثر دمای این ایستگاه در آینده نزدیک برای سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 حدود ۱/۵ درجه سلسیوس، در آینده متوسط بین ۲/۵ تا ۳/۶ درجه سلسیوس و در آینده دور بین ۳ تا ۵/۹ درجه سلسیوس متغیر است؛ نتایج حکایت از افزایش دما نسبت به دوره پایه دارد. شبیه‌سازی سالانه مقادیر دمای کمینه در سناریوی RCP4.5 حاکی از این است که مقادیر این پارامتر از سال ۲۰۲۰ به بعد روند افزایشی داشته و بیشترین مقدار آن در دوره پایانی قرن ۲۱ یعنی سال‌های ۲۰۸۰-۲۰۹۹ مشاهده می‌گردد. روند افزایشی دمای حداقل در سناریوی RCP8.5 نسبت به RCP4.5 مشخص‌تر است و همانند سناریوی متوسط این روند افزایشی در دوره سوم (۲۰۸۰-۲۰۹۹) قرن با ۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه، بسیار بالا است (جدول ۵). این بخش از یافته‌ها با نتایج پژوهش جهانگیر، نوروزی و یاراحمدی (۱۳۹۷) برای این ایستگاه مطابقت دارد.

۴.۲.۳. کوهرنگ

پیش‌نگری متغیرهای بارش، حداکثر و حداقل دمای سالانه ایستگاه کوهرنگ در دوره‌های پایه و آینده در جدول ۵ آمده است. شبیه‌سازی بارش کوهرنگ در سناریوی RCP4.5 روند افزایشی دارد. میانگین بارش سالانه در این سناریو در دوره‌های آتی به ترتیب ۱۴۰۸ و ۱۴۰۰ و ۱۳۴۹ میلی‌متر برآورد گردیده که نسبت به دوره پایه (۱۳۶۹ میلی‌متر) در دوره اول و دوم ۲/۸ و ۲/۲ درصد افزایش بارش و در دوره سوم ۱/۵ درصد کاهش را پیش‌نگری کرده است. شرایط افزایش بارش در سناریوی RCP8.5 فقط در بازه زمانی ۲۰۲۰ - ۲۰۳۹ در حدود ۱۰/۸ درصد اتفاق افتاده است، در حالی که دو دوره دیگر، کوهرنگ کاهش ۳ تا ۱۰ درصدی را تجربه خواهد کرد. خروجی شبیه‌سازی دمای حداکثر برای این ایستگاه نشان می‌دهد که مقادیر این پارامتر در هر دو سناریوی انتشار تا سال ۲۱۰۰ افزایش خواهد داشت. میانگین دما از ۱۶/۲ در دوره پایه به ۱۹/۳ درجه سلسیوس در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ در سناریوی RCP4.5 می‌رسد. این تغییرات براساس سناریوی بدبینانه روند افزایشی محسوس‌تری نسبت به دوره

پایه نشان می‌دهد، بدین ترتیب که مقادیر دما در دو دوره ۲۰۵۰-۲۰۶۹ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ به ترتیب ۳/۶ و ۵/۹ درجه سلسیوس افزایش داشته است. دمای حداقل در ایستگاه کوه‌رنگ در آینده نزدیک، برای سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 بین ۱/۱ تا ۲/۱ درجه سلسیوس، در آینده متوسط مابین ۳ تا ۳/۲ درجه سلسیوس و در آینده دور بین ۳/۶ تا ۵ درجه سلسیوس متغیر است.

جدول ۵- میانگین درازمدت پارامترهای اقلیمی ایستگاه‌های کوه‌رنگ بروجرد و دزفول نسبت به

دوره پایه تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

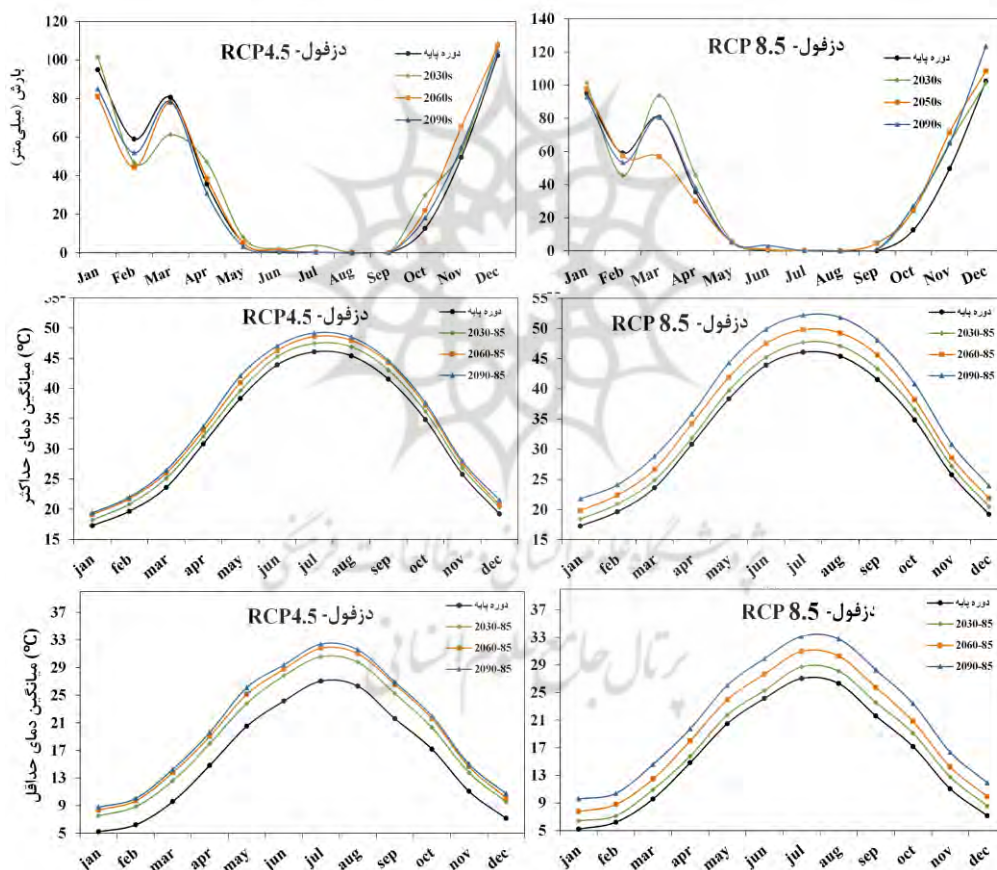
RCP8.5 RCP8.5(2060s) RCP8.5(2030s)			RCP4.5 RCP4.5 RCP4.5			سناریو	پارامتر	ایستگاه
(2090s)	(2060s)	(2030s)	(2090s)	(2060s)	(2030s)	پایه		
۴۸۹/۸	۴۵۱/۶	۴۸۰	۴۲۸/۸	۴۴۳/۹	۴۵۲/۶	۴۴۰/۷	بارش (م)	دزفول
۳۷/۸	۳۵/۵	۳۳/۷	۳۵/۱	۳۴/۵	۳۳/۵	۳۲/۳	دمای حداکثر	
۲۱/۵	۲۰/۱	۱۹	۲۰/۶	۱۹/۳	۱۷/۴	۱۵/۹	دمای حداقل	
۴۲۲/۳	۴۳۱	۴۷۷	۴۳۵/۲	۴۴۲/۶	۴۵۷	۴۵۵/۷	بارش (م)	بروجرد
۲۶/۸۵	۲۴/۵۸	۲۲/۵	۲۳/۹۷	۲۳/۴۸	۲۲/۴	۲۰/۹۶	دمای حداکثر	
۱۲/۲۴	۱۱/۱	۹/۶	۱۱/۱	۱۰/۲	۸/۴۳	۷/۳	دمای حداقل	
۱۲۳۸/۹	۱۳۲۶	۱۵۱۷	۱۳۴۹/۲	۱۴۰۰	۱۴۰۷/۵	۱۳۶۹	بارش (م)	کوه‌رنگ
۲۲/۱۳	۱۹/۸۳	۱۷/۷۷	۱۹/۳۲	۱۸/۷۶	۱۷/۶۶	۱۶/۲۴	دمای حداکثر	
۸/۱	۶/۳	۵/۲	۶/۷	۶/۱	۴/۱۸	۳/۱۲	دمای حداقل	

۳.۴. بررسی تغییرات ماهانه پارامترهای اقلیمی

۳.۴.۱. دزفول

برخلاف دو ایستگاه قبلی، عدم قطعیت در بارش برای دزفول بیشتر است و این بی‌نظمی از نمودار آن مشخص است. میانگین بارش در این ایستگاه بجز در دوره اول در اکثر ماه‌های دوره دوم و سوم کاهش خواهد داشت. پربارش‌ترین ماه‌ها ژوئن، اکتبر، نوامبر و دسامبر در تمام طول دوره و در هر دو سناریو است. بیشترین تغییرات در میانگین ماهانه دمای بیشینه این

ایستگاه مربوط به ماه‌های ژوئن، ژولای، آگوست و سپتامبر بوده است. به طور کلی حداکثر دما در هر سه دوره و تحت دو سناریو افزایش می‌یابد که کمترین افزایش در بازه زمانی ۲۰۳۹-۲۰۲۰ در سناریو RCP4.5 و بیشترین افزایش آن در دوره ۲۰۹۹-۲۰۸۰ تحت سناریو RCP8.5 رخ خواهد داد. براساس شکل ۴ بیشترین تغییرات در میانگین دمای کمینه در سناریو انتشار RCP4.5 مربوط به ماه‌های آوریل تا اکتبر بوده است. در سناریو RCP8.5 نیز دمای کمینه در ماه‌های تابستان افزایش چشمگیری را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. نتایج روند افزایشی دما با پژوهش نیکبخت شهبازی (۱۳۹۷) منطبق می‌باشد.



شکل ۴- تغییرات پارامترهای اقلیمی دزفول در دهه‌های آتی تحت سناریوهای انتشار RCP8.5 و

RCP4.5 در مقایسه با دوره پایه

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

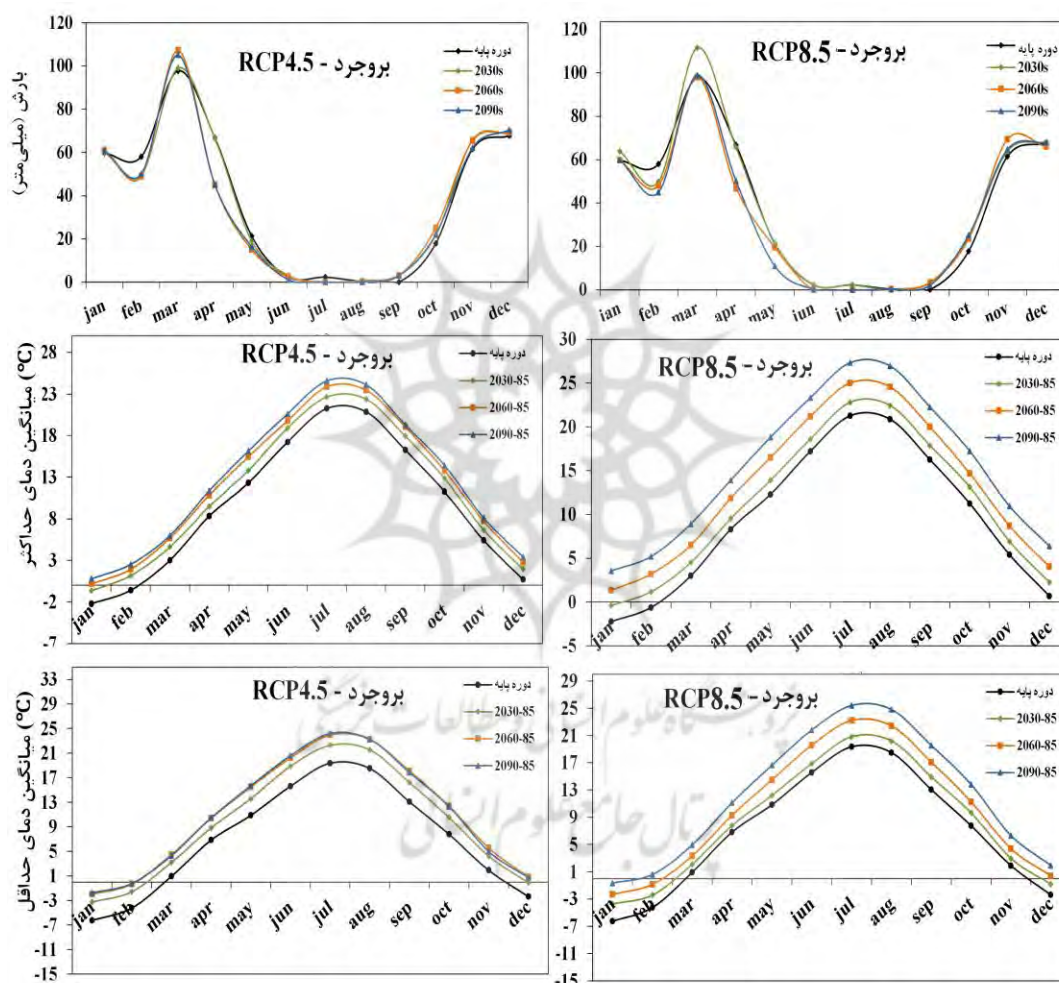
۴.۳.۲. بروجرد

تغییرات ماهانه بارش ایستگاه بروجرد در دوره‌های پایه و آینده بر اساس سناریوهای مورد بررسی در شکل ۵ آورده شده است. مطابق شکل مقدار بارش در ماه‌های ژانویه، مارس، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر در هر سه بازه و در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. به طور کلی می‌توان گفت بارش در فصل پاییز و زمستان افزایش و در فصل بهار و تابستان کاهش خواهد یافت. پیش‌نگری تغییرات میانگین ماهانه حداکثر دمای ایستگاه بروجرد برای دهه‌های آتی نشان می‌دهد که میانگین حداکثر دما در کلیه ماه‌ها در دوره‌های آینده افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات در میانگین دمای بیشینه مربوط به ماه‌های آگوست، سپتامبر و نوامبر بوده که در سناریو RCP8.5 به طور متوسط تا ۶ درجه سلسیوس افزایش دما را در دوره پایانی قرن ۲۱ نشان می‌دهند. خروجی میانگین ماهانه حداکثر دمای ایستگاه بروجرد برای دهه‌های آتی نشان می‌دهند که بیشترین تغییرات در میانگین دمای کمینه مربوط به ماه‌های فصل تابستان و به ویژه در سناریوی RCP8.5 بوده است که در توافق با نتایج صورت گرفته توسط نصیری و یارمرادی (۱۳۹۶) و جهانگیر، نوروزی و یاراحمدی (۱۳۹۷) برای این ایستگاه می‌باشد.

۴.۳.۳. کوه‌رنگ

شکل ۶ روند تغییرات ماهانه مقادیر پیش‌نگری شده پارامترهای اقلیمی کوه‌رنگ را در دو سناریو واداشت تابشی نسبت به دوره مشاهده نشان می‌دهد. میانگین بارش در کوه‌رنگ در اکثر ماه‌های دوره آینده کاهش خواهد داشت. نتایج نشان می‌دهد که میانگین بارش در ماه‌های اکتبر تا دسامبر یعنی در فصل پاییز افزایش یافته است. خروجی میانگین ماهانه حداکثر دمای ایستگاه کوه‌رنگ برای دهه‌های آتی نشان می‌دهد این پارامتر در سناریوهای مورد بررسی در همه ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش در آن مربوط به ماه‌های فصل زمستان و تابستان و به ویژه در سناریو RCP8.5 بوده است. نتایج تغییرات میانگین ماهانه حداقل دمای برای دهه‌های آتی نشان می‌دهند که در سناریوی RCP4.5 حداقل دما به ویژه در فصل تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) از سال ۲۰۵۰ به بعد افزایش یافته است. تغییرات یاد شده در

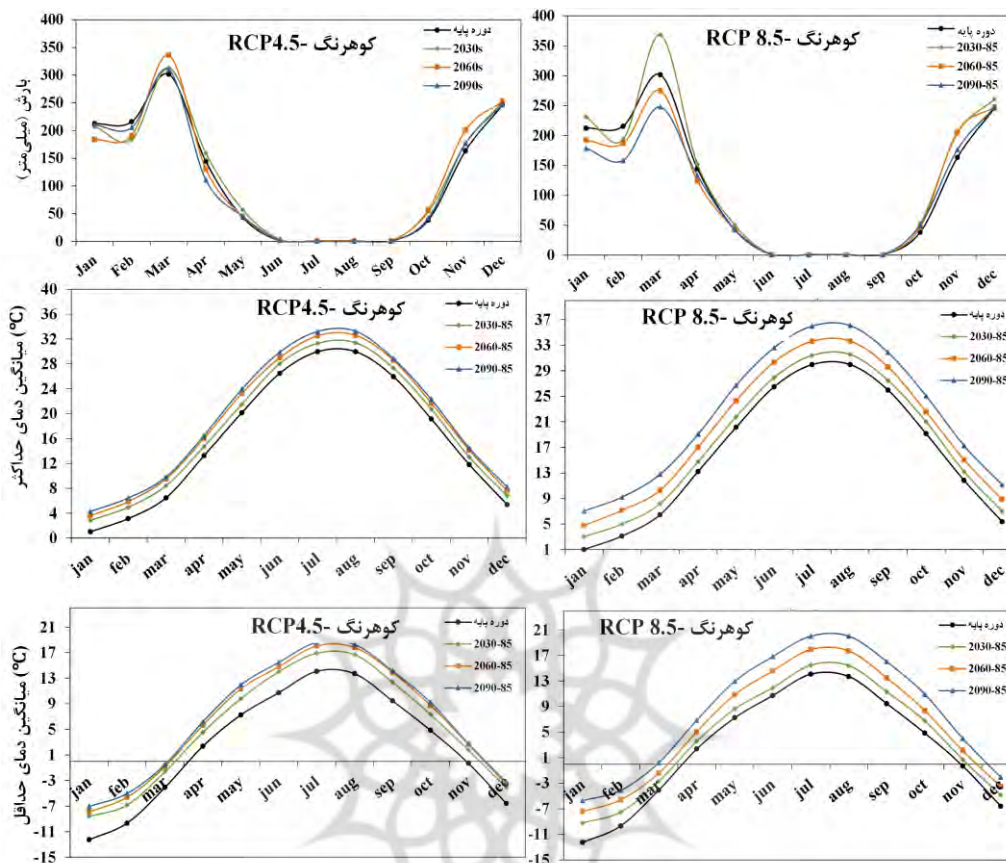
سناریوی RCP8.5 بارزتر است، این روند رو به بالا در سناریو مذکور در همه ماه‌های سال شدیدتر بوده و کمینه دما به مقدار ۶ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش داشته است. نتایج به دست آمده با مطالعات حصیرچیان، ذهبیون و خزایی (۱۳۹۷) برای ایستگاه یاسوج در محدوده جغرافیایی مشترک با ایستگاه کوه‌رنگ همسو می‌باشد.



شکل ۵- تغییرات پارامترهای اقلیمی بروجرد در دهه‌های آتی تحت سناریوهای انتشار RCP8.5 و

RCP4.5 در مقایسه با دوره پایه

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۶- تغییرات پارامترهای اقلیمی کوه‌رنگ در دهه‌های آتی تحت سناریوهای انتشار RCP8.5 و

RCP4.5 در مقایسه با دوره پایه

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تغییر اقلیم می‌تواند با تغییر در متوسط مؤلفه‌های اقلیمی (به‌ویژه دما و بارندگی) تأثیر قابل توجهی بر منابع آب در دسترس بگذارد. در این پژوهش دقت ۱۷ مدل گردش کلی از CORDEX-WAS (جنوب آسیا) در پیش‌نگری دما و بارش حوضه آبخیز دز مورد ارزیابی قرار گرفت. خروجی‌ها نشان داد شبیه‌سازی مدل‌ها با خطا همراه است و باید قبل از استفاده از آن‌ها در مطالعات تصحیح شوند از روش عامل تغییر برای تصحیح خطای شبیه‌سازی مدل‌ها استفاده شد. از آنجایی که انتخاب یک مدل برای تجزیه و تحلیل‌های تغییر

اقلیم نمی‌تواند تمامی محدوده عدم قطعیت‌های را پوشش دهد. از این‌رو در این مطالعه یک مجموعه ۱۰ تایی (M7, M11, M2, M12, M6, M14, M4, M9, M10, M3) با نمره مهارت (SS) بالا انتخاب شد تا منجر به پیش‌نگری دقیق‌تری از تغییرات اقلیمی شود. نتایج مدل‌های انتخابی حکایت از کاهش ۱۱ تا ۱۷ درصدی بارش برای سناریو RCP4.5 و ۸ تا ۱۸ درصدی برای سناریو RCP8.5 برای کل حوضه داشت. خروجی دمای حداکثر حوضه برای سناریوی انتشار RCP4.5 افزایش ۱/۵ تا ۳ درجه و برای سناریوی بدبینانه RCP8.5 افزایش ۵/۸ تا ۱/۶ درجه سلسیوس را پیش‌نگری می‌کند. این افزایش برای دمای حداقل برای سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب بین ۱/۵ تا ۴/۲ و ۲/۷ تا ۵/۳ درجه سلسیوس در تغییر است. بررسی‌ها برای ایستگاه‌های منتخب در سه محدوده توپوگرافی مختلف این حوضه نیز نشان داد شاخص‌های دماهای حداکثر و حداقل برای تمام ماه‌ها تحت هر دو سناریو افزایش خواهند یافت. اگرچه پیش‌نگری بارش با بی‌نظمی‌هایی همراه بوده است، اما موضوع مشترک در محدوده‌های توپوگرافی مورد بررسی کاهش بارش سالیانه علیرغم افزایش بارش‌های پاییزی بوده است. به‌طورکلی، پژوهش انجام شده در حوضه آبخیز دز و نتایج حاصل از آن، بیانگر این است که این محدوده در دهه‌های آتی به سمت اقلیمی با رطوبت کمتر و دمای بیشتر پیش می‌رود. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق به نظر می‌رسد پایگاه داده‌ای CORDEX قابلیت مناسبی در پیش‌نگری دما و بارش حوضه‌های مطالعاتی مشابه داشته باشد. از آنجایی که حوضه مذکور جزو نواحی پربارش محسوب می‌شود و از طرفی پارامتر بارش ضریب تغییرپذیری بالاتری نسبت به دما دارد، ممکن است مدل‌های انتخابی در پژوهش، در حوضه‌هایی با بارش کمتر یا نواحی اقلیمی خشک‌تر نتایج قابل قبولی ارائه ندهند. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد محققین برای رسیدن به نتایج مطلوب روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی مانند (تابع توزیع تجمعی، تابع توزیع احتمال، یا تابع انتقال) را با یکدیگر مقایسه و مناسب‌ترین روش را برای منطقه مورد مطالعه خود انتخاب نمایند.

کتاب‌نامه

۱. آذری، م؛ مرادی، ح؛ تفتیان، ب؛ فرامرزی، م. (۱۳۹۲). ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه آبخیز گرگانرود. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۳(۲۷)، ۵۴۷-۵۳۷.
۲. اسکانی‌کزازی، غ. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب حوضه آبریز کارون بزرگ و مدیریت بحران (مورد شهر اهواز). *فصل‌نامه علمی-پژوهشی جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)*، ۱(۷)، ۲۴۲-۲۳۵.
۳. توکلی، م؛ کریمی، ح؛ نورالهی، ه. (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه آبخیز سد ایلام. *نشریه علمی - پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۲(۲)، ۱۷۰-۱۵۷.
۴. جهانگیر، م؛ نوروزی، ا؛ یاراحمدی، ی. (۱۳۹۷). بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی شهرستان بروجرد در ۲۰ سال آتی با استفاده از مدل HadCM3. *اکو هیدرولوژی*، ۴(۴)، ۱۳۵۳-۱۳۴۵.
۵. حصیرچیان، م؛ ذهبیون، ب؛ خزائی، م. (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد مدل SDSM در بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دما. *فصل‌نامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب*، ۹(۳۴)، ۱۱۹-۱۰۸.
۶. خوش‌بیان، ع؛ عراقی‌نژاد، ش؛ آقاشریعتمداری، ز. (۱۳۹۸). بررسی اثرات پارامترهای اقلیمی دما و بارش بر وضعیت منابع آبی حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از پروژه CORDEX. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۳(۵۰)، ۶۲۴-۶۱۶.
۷. سیدکابلی، ح. (۱۳۹۵). تصویرسازی دمای هوا و تبخیر از مخازن آب، در شرایط تغییر اقلیم آتی (مطالعه موردی: سد دز). *مجله پژوهش آب ایران*، ۴(۴)، ۱۰۱-۱۱۰.
۸. قدمی، م؛ سلطانی، س؛ گودرزی، م؛ نادری، س؛ تیموری، ح. (۱۳۹۷). اثر تغییر اقلیم بر جریان روزانه در حوضه رودخانه سزار. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۴۱(۴۱)، ۸۵-۹۵.
۹. کامیار، ا؛ موحدی، س؛ یزدان‌پناه، ح. (۱۳۹۶). چشم‌انداز دمای کمینه و بیشینه استان اصفهان در افق ۲۰۱۷-۲۰۵۰. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۲۹(۲۹)، ۵۴-۳۷.
۱۰. کامیار، ا؛ یزدان‌پناه، ح؛ موحدی، س. (۱۳۹۷). ارزیابی دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب و هوا در ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۰(۱)، ۱۷۶-۱۶۱.
۱۱. موسوی، ر؛ معروفی، ص. (۱۳۹۵). بررسی پاسخ هیدرولوژیکی جریان رودخانه به تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد دز). *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۶(۲۳)، ۳۴۸-۳۳۳.

۱۲. نادری، س؛ گودرزی، م؛ قدمی دهنو، م. (۱۳۹۶). اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی در حوزه سیمره. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، (۳۹)، ۷۶-۶۹.
۱۳. نصیری، ب؛ یارمرادی، ز. (۱۳۹۶). پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی استان لرستان در ۵۰ سال آتی با استفاده از مدل HADCM. *فصل‌نامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۲۶(۱۰۱)، ۱۵۴-۱۴۳.
۱۴. نیکبخت شهبازی، ع. (۱۳۹۷). بررسی میزان تغییرات بارش و تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی در استان خوزستان تحت تأثیر تغییر اقلیم. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، (۶)، ۱۳۹ - ۱۲۳.
15. Abiodun, B. J., Adegoke, J., Abatan, A. A., Ibe, C. A., Egbebiyi, T. S., Engelbrecht, F., & Pinto, I. (2017). Potential impacts of climate change on extreme precipitation over four African coastal cities. *Climatic Change*, 143(3-4), 399-413.
16. Aich, V., Akhundzadah, N., Knuerr, A., Khoshbeen, A., Hattermann, F., Paeth, H., & Paton, E. (2017). Climate change in Afghanistan deduced from reanalysis and coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) - South Asia simulations. *Climate*, 5(2), 1-25.
17. Brekke, L. D., Dettinger, M. D., Maurer, E. P., & Anderson, M. (2008). Significance of model credibility in estimating climate projection distributions for regional hydroclimatological risk assessments. *Climatic Change*, 89(3-4), 371-394.
18. Endris, H. S., Omondi, P., Jain, S., Lennard, C., Hewitson, B., Chang'a, L., & Panitz, H. J. (2013). Assessment of the performance of CORDEX regional climate models in simulating East African rainfall. *Journal of Climate*, 26(21), 8453 - 8475.
19. Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Giorgi, F., Pavia, E. G., Diro, G. T., & Graef, F. (2015). Inter-annual variability of precipitation over Southern Mexico and Central America and its relationship to sea surface temperature from a set of future projections from CMIP5 GCMs and RegCM4 CORDEX simulations. *Climate Dynamics*, 45(1-2), 425-440.
20. Fuhrer, J. (2003). Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97, 1-20.
21. Giorgi, F., Jones, C., & Asrar, G. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *World Meteorol Organ (WMO) Bull*, 58, 175-183.
22. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). *Summary for policymakers. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press.

23. Javan, K., Nasirisaleh, F., & TaheriShahraiyini, H. (2013). The influences of climate change on the runoff Gharesoo River Watershed. *American Journal of Climate Change*, 2(4), 296-305.
24. Liuzzo, L., Noto, L. V., Vivoni, E. R., & La Loggia, G. (2010). Basin-scale water resources assessment in Oklahoma under synthetic climate change scenarios using a fully distributed hydrologic model. *Journal of hydrologic engineering*, 15(2), 107-122.
25. Ouyang, F., Zhu, Y., Fu, G., Lü, H., Zhang, A., Yu, Z. and Chen, X. (2015). Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(7), 1781-1795.
26. Ozturk, T., Turp, M. T., Türkeş, M., & Kurnaz, M. L. (2017). Projected changes in temperature and precipitation climatology of Central Asia CORDEX Region 8 by using RegCM4. 3.5. *Atmospheric Research*, 183, 296 - 307.
27. Ozturk, T., Turp, M. T., Türkeş, M., & Kurnaz, M. L. (2018). Future projections of temperature and precipitation climatology for CORDEX-MENA domain using RegCM4. 4. *Atmospheric Research*, 206, 87-107.
28. Pierce, D. W., Barnett, T. P., Santer, B. D., & Gleckler, P. J. (2009). Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21), 8441-8446.
29. Saeed, F., Almazroui, M., Islam, N., & Khan, M. S. (2017). Intensification of future heat waves in Pakistan: a study using CORDEX regional climate models ensemble. *Natural Hazards*, 87(3), 1635 - 1647. 53446903
30. Sanjay, J., Krishnan, R., Shrestha, A. B., Rajbhandari, R., & Ren, G. Y. (2017). Downscaled climate change projections for the Hindu Kush Himalayan region using CORDEX South Asia regional climate models. *Advances in Climate Change Research*, 8(3), 185-198.
31. Seager, R., Ting, M., Held, I., Kushnir, Y., Lu, J., Vecchi, G., & Li, C. (2007). Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. *Science*, 316(5828), 1181 - 1184.
32. Shongwe, M. E., Lennard, C., Liebmann, B., Kalognomou, E. A., Ntsangwane, L., & Pinto, I. (2015). An evaluation of CORDEX regional climate models in simulating precipitation over Southern Africa. *Atmospheric Science Letters*, 16(3), 199-207.
33. Taylor, K. E., Ronald, J. S. & Gerald A. M. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.
34. Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
35. Terando, A., Keller, K., & Easterling, W. E. (2012). Probabilistic projections of agro climate indices in North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D8).

36. Warnatzsch, E. A., & Reay, D. S. (2019). Temperature and precipitation change in Malawi: Evaluation of CORDEX-Africa climate simulations for climate change impact assessments and adaptation planning. *Science of the Total Environment*, 654, 378-392.
37. Wilks, D.S.(2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic Press.
38. Zhange, J. Y., Wang, G. Q., He, R. M., & Liu, C. S. (2009). Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River Basin and its response to climate change. *Adventure Water Sciences*. 20, 153-158.

