

اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش سالانه استان زنجان با بررسی عدم قطعیت‌ها

محمد رضا خزائی^{۱*}، مطلب بایزیدی^۲ و احمد شرافتی^۳

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور

۲. استادیار، گروه آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج

۳. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۲/۱۵)

چکیده

هدف از این تحقیق ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای میانگین مکانی استان زنجان در مقیاس سالانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌هاست. بدین منظور از مدل سالانه ARMA استفاده شد. سری‌های بارش و دمای سالانه میانگین مکانی استان محاسبه و سپس توسط مدل استوکستیک سالانه ARMA مدل‌سازی شد. ۱۰۰ سری ۳۰ ساله بارش و دمای سالانه برای میانگین مکانی استان تولید شد. توسط این مدل‌ها سناریوهای آینده شش مدل GCM تحت سه سناریوی انتشار ریزمقیاس شد و برای هر سناریو، ۱۰۰ سری ۳۰ ساله بارش و دمای سالانه آینده تولید شد. با مقایسه دامنه ۹۰ درصد آماره‌های دوره فعلی با دامنه ۹۰ درصد مجموعه سناریوهای آینده، دامنه عدم قطعیت‌ها در نتایج بررسی شد. اعتبارسنجی مدل نشان از کفایت مدل برای شبیه‌سازی سری زمانی سالانه بارش و دما و کاهش مقیاس دارد. در حدود اطمینان ۹۰ درصد، انتظار می‌رود دمای میانگین مکانی استان زنجان طی دوره ۲۰۳۵-۲۰۶۴ از ۰/۶ تا ۳/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد و میانگین بارش از ۲۵ درصد کاهش تا ۱۵ درصد افزایش یابد. بر این مبنا عدم قطعیت‌های ناشی از ساختار مدل‌های GCM، نوسانات طبیعی اقلیم و سناریوهای انتشار شایان توجه است و لازم است در نظر گرفته شوند.

کلیدواژگان: استوکستیک؛ تغییر اقلیم؛ عدم قطعیت؛ مدل سالانه؛ ARMA.

مقدمه

سناریوهای منتشرشده توسط هیئت بین دول تغییر اقلیم (IPCC^۱) بیانکننده تغییر اقلیم کره زمین در آینده است [۱ و ۲]. مطالعات زیادی به پیش‌یابی آثار تغییر اقلیم در مناطق مختلف دنیا و ایران پرداخته‌اند [۳-۸]. البته ویژگی‌های تغییر اقلیم و آثار آن در مناطق مختلف متفاوت است و نتایج مطالعات تغییر اقلیم در هر منطقه را نمی‌توان به سایر مناطق تعمیم داد. برای کسب آمادگی برای شرایط اقلیمی آینده و کاهش آثار زیان‌بار تغییر اقلیم، لازم است که تأثیرات تغییر اقلیم را در هر منطقه پیش‌یابی کرد و آن را در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در نظر گرفت.

در حال حاضر نتایج مطالعات ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم با عدم قطعیت‌های مهم و اجتناب‌ناپذیری روبه‌روست. چشم‌پوشی از عدم قطعیت‌های نتایج چنین مطالعاتی می‌تواند به نتایج نامطمئن، غیر کاربردی و گمراه‌کننده منجر شود؛ ولی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، نتایج حالات مختلفی که ممکن است در آینده اتفاق بیفتد را در بر می‌گیرد و موجب افزایش قابلیت اعتماد نتایج برای تصمیم‌گیری و اتخاذ تدابیر احتیاطی می‌شود.

افزایش گازهای گلخانه‌ای موجب تغییر اقلیم می‌شود؛ ولی مشخص‌نبودن وضعیت انتشار و غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده از عوامل عدم قطعیت نتایج پیش‌یابی اقلیم آینده است. بر این مبنا IPCC، چهار سناریوی مختلف را منتشر کرده است که در آن‌ها انواع مختلفی از چگونگی انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد. این سناریوها دامنه وسیعی از شرایطی که ممکن است در آینده اتفاق بیفتد را در بر می‌گیرد [۹]. مدل‌های گردش عمومی (GCM^۲) واکنش اقلیم جهانی به غلظت گازهای گلخانه‌ای و نیز سناریوهای اقلیمی آینده را برای سراسر کره زمین شبیه‌سازی می‌کنند [۲]؛ ولی مدل‌های GCM متعددی توسعه یافته است و به دلیل تفاوت ساختار این مدل‌ها و تفاوت شرایط اولیه‌ای که تحت آن اجرا می‌شوند، نتایج آنها حتی برای یک سناریوی انتشار یکسان متفاوت است. بنابراین، تفاوت مدل‌های GCM از عوامل عدم قطعیت نتایج پیش‌یابی‌های اقلیم آتی است [۱۰]. همچنین به دلیل

وضوح^۳ مکانی کم خروجی GCMs، استفاده مستقیم از آنها برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم در مقیاس محلی مناسب نیست. برای استفاده در مطالعات منطقه‌ای، لازم است خروجی این مدل‌ها با استفاده از یک روش مناسب ریزمقیاس شود. از دیگر عوامل عدم قطعیت، نوسانات طبیعی اقلیمی است که حاصل ساختار تصادفی متغیرهای اقلیمی (از جمله بارش و دما) است و می‌تواند به‌عنوان مهم‌ترین عامل عدم قطعیت مطرح باشد [۱۰]. سری‌های مشاهداتی داده‌های اقلیمی (و همچنین خروجی‌های GCMs) بیشتر طول آماری کوتاهی (حدود ۳۰ سال) دارند. بنابراین، نوسانات طبیعی اقلیم را به مقدار کافی در بر نمی‌گیرد. بنابراین، به علت طبیعت بی‌نظم متغیرهای اقلیمی، کوتاهی طول آمار می‌تواند نتایج مقایسه اقلیم فعلی و آینده را تحت تأثیر قرار دهد و لازم است که در مطالعات ارزیابی آثار تغییر اقلیم مورد توجه قرار گیرد. با استفاده از روش‌های استوکستیک کاهش مقیاس، علاوه بر کاهش مقیاس سناریوهای اقلیمی می‌توان عدم قطعیت نوسانات طبیعی اقلیمی را بررسی کرد. مدل‌های استوکستیک از روش‌های آماری استفاده می‌کنند و سری‌های داده‌های هواشناسی مصنوعی را، که در خصوصیات آماری به سری‌های مشاهداتی شبیه‌اند، بازتولید می‌کنند. در حالی که سری‌های زمانی مشاهداتی فقط یک نمونه آماری از اقلیم را ارائه می‌کنند، مدل‌های استوکستیک می‌توانند نمونه‌های زیادی را بازتولید کنند که ضمن آنکه ویژگی‌های آماری سری مشاهداتی را حفظ می‌کنند، در جزئیات تفاوت‌های شایان توجهی با نمونه مشاهداتی دارند و دامنه وسیعی از حالات ممکن را فراهم می‌کنند [۱۱ و ۱۲]. پارامترهای مدل‌های استوکستیک از سری‌های مشاهداتی به‌دست می‌آیند. چنانچه این پارامترها را مطابق با سناریوهای تغییر اقلیم آینده GCMs تغییر داد، می‌توان نمونه‌های زیادی از سری‌های کاهش مقیاس یافته آینده را برای محل مد نظر تولید کرد [۱۳]. از مزایای ویژه این روش آن است که تعداد زیادی از سری‌های متغیرهای اقلیمی برای اقلیم آینده تولید می‌شود و بدین ترتیب عدم قطعیت بی‌نظمی‌های اقلیمی (نوسانات طبیعی اقلیم) در نتایج ارزیابی تغییر اقلیم قابل اندازه‌گیری است. علاوه بر آن، داده‌های هواشناسی با طول کافی برای ارزیابی ریسک در

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. General Circulation Model

کنند؛ اما به دلیل دشواری و معلوم نبودن چگونگی کاهش مقیاس بارش در این مدل، از آن برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم استفاده نشده است [۱۴]. Khazaei و همکارانش (۲۰۱۳) از مدل $AR(1)$ برای اصلاح نوسانات بین سالی دما در مدل IWG استفاده کردند [۱۴]. در این مدل استفاده از مدل ماهانه برای بارش مطرح نبود و از مدل برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم در مناطقی از ایران استفاده شد. Liu و همکارانش (۲۰۱۵) از مدل $ARMA$ در ارزیابی اثر تغییر اقلیم در دوره گذشته استفاده کردند، اما در این مطالعه موضوع تغییر اقلیم آینده و کاهش مقیاس سناریوهای مدل‌های اقلیمی مطرح نبود [۲۴].

در این مطالعه اثر تغییر اقلیم بر سری‌های بارش و دمای سالانه میانگین مکانی استان زنجان توسط مدل‌های استوکستیک سری زمانی $ARMA$ ارزیابی شده است. میانگین مکانی بارش و دمای استان زنجان توسط روش تیسن محاسبه شده است. مدل‌های $ARMA$ با درجات مختلف بر سری‌های زمانی بارش و دمای سالانه برازش شده و مدل با درجه مناسب برای این متغیرها انتخاب شده است. با استفاده از خروجی‌های ۶ مدل GCM تحت سه سناریوی انتشار $A2$ ، $A1B$ و $B1$ اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای استان زنجان ارزیابی شده است. بدین ترتیب اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای سالانه استان زنجان با بررسی عدم قطعیت‌های سناریوهای انتشار، مدل‌های GCM و نوسانات اقلیمی ارزیابی شده است. مطابق بررسی انجام شده، پیش از این از مدل $ARMA$ برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش استفاده نشده است. استفاده از مدل یادشده برای چنین مطالعاتی مزایای ویژه‌ای دارد که می‌تواند نوسانات بین سالی بارش را تولید کند و در کاهش مقیاس، علاوه بر تغییر میانگین، تغییر واریانس را در سناریوهای کاهش مقیاس یافته آینده اعمال می‌کند. علاوه بر آن، با تولید تعداد زیادی از نمونه‌های سری‌های متغیرهای اقلیمی برای اقلیم آینده، عدم قطعیت و سهم نوسانات و بی‌نظمی‌های طبیعی اقلیم را در تغییر سری‌های آینده نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

این مطالعه روی استان زنجان انجام شده است. استان

کاربردهای هیدرولوژیک یا کشاورزی فراهم شود [۱۱، ۱۲ و ۱۴]. از دیگر مزایای کاهش مقیاس توسط مدل‌های استوکستیک آن است که در سناریوهای کاهش مقیاس یافته، تغییرات هم در میانگین و هم در نوسانات اقلیمی در نظر گرفته می‌شود [۵، ۱۱ و ۱۴].

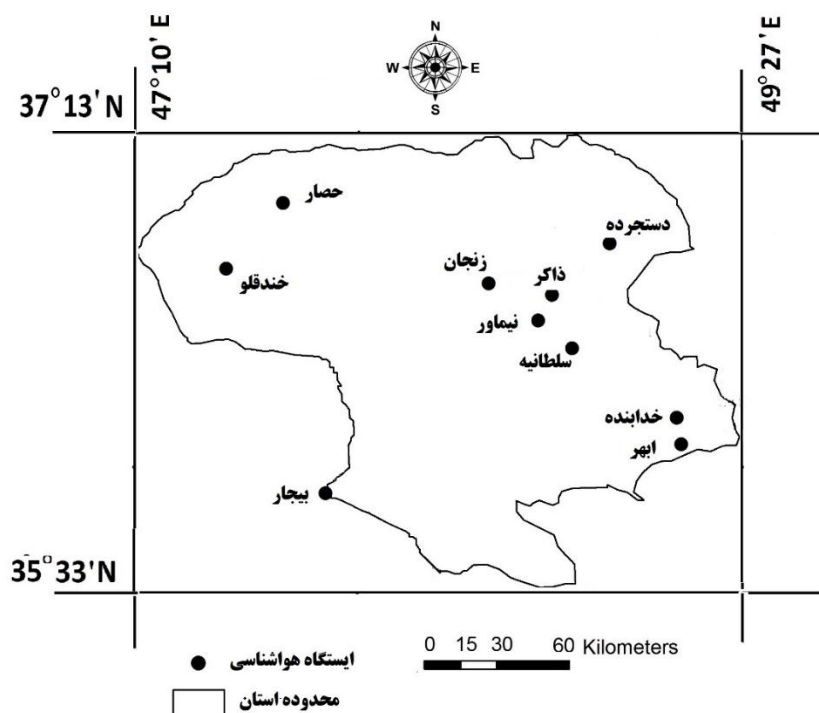
تعداد مطالعاتی که عدم قطعیت نوسانات طبیعی اقلیمی را بررسی کرده‌اند، نسبتاً اندک هستند. علاوه بر آن، چنین مطالعاتی نیز بیشتر عدم قطعیت نوسانات اقلیمی را در مقیاس زمانی روزانه و با استفاده از مدل‌های استوکستیک روزانه انجام داده‌اند [۱۰، ۱۴، ۱۵ و ۱۶]. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های مشهور $LARS-WG$ [۱۷] و $SDSM$ [۱۸] اشاره کرد. مدل‌های استوکستیک روزانه اغلب گشتاورهای مرتبه پایین بارش (میانگین و واریانس) و رفتار خشک - تر را در مقیاس روزانه بازتولید می‌کنند، اما واریانس بین سالی را به درستی بازتولید نمی‌کنند [۲، ۴، ۸، ۱۱، ۱۳، ۱۴، ۱۹ و ۲۰]. در بسیاری از مطالعاتی که کاهش مقیاس توسط مدل‌های روزانه انجام شده است، اثر تغییر اقلیم بر میانگین‌های ماهانه و سالانه نیز گزارش شده است؛ اما در این مطالعات عموماً در خصوص سری‌های زمانی سالانه (یا توزیع فراوانی متغیرهای سالانه)، نه عملکرد مدل بررسی شده است و نه اثر تغییر اقلیم ارزیابی شده است [۲۱-۲۳]. مدل‌های روزانه بیشتر قادرند اثر تغییر اقلیم بر میانگین‌های ماهانه و سالانه را ارزیابی کنند، اما به دلیل ضعف در بازتولید نوسانات بین سالی، در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سری زمانی و توزیع فراوانی در گام سالانه ناتوان‌اند.

در مواردی که ارزیابی اثر تغییر اقلیم در گام زمانی سالانه (یا ماهانه) مطلوب باشد، مناسب است به‌طور مستقیم از مدل‌های سالانه (یا ماهانه) استفاده شود. از مهم‌ترین مدل‌های استوکستیک سالانه (و ماهانه) مدل‌های نوع خودهمبسته میانگین متحرک ($ARMA^1$) هستند؛ اما بر مبنای بررسی نویسندگان این مقاله، تا کنون از مدل‌های $ARMA$ برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم آینده بر بارش سالانه (و ماهانه) استفاده نشده است. Dubrovsky و همکارانش (۲۰۰۴) [۱۳] مدل ماهانه $AR(1)$ را برای تولید میانگین‌های ماهانه بارش و دما در مدل استوکستیک روزانه $MET&RoI$ به کار بردند تا نوسانات بین سال این مدل روزانه را اصلاح

1. Auto Regressive Moving Average

ایستگاه‌هایی استفاده شود که آمار آنها برای محاسبه سری میانگین مکانی بارش و دمای استان قابل استفاده باشد. بدین منظور از ۱۰ ایستگاه زنجان، ذاکر، نیماور، دستجرده، سلطانیه، خدابنده، ابهر، حصار، خندقلو و بیجار استفاده شده است (شکل ۱).

زنجان در ناحیه مرکزی شمال غربی ایران حدود ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. در شکل ۱ موقعیت استان و ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شده نمایش داده شده است. با بررسی ایستگاه‌های هواشناسی منطقه، سعی شده است که از همه



شکل ۱. موقعیت استان زنجان و ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شده

بین داده‌های آن ایستگاه با ایستگاه مجاور بازسازی شد که همبستگی مناسبی با آن داشت. در رابطه رگرسیون، از همه آمار ثبت شده مشترک ایستگاه‌ها (از جمله آمار پس از ۲۰۰۰) استفاده شد.

مدل سازی سری زمانی ARMA (p,q)

آزمون‌های اولیه و نرمال و استانداردسازی داده‌ها ابتدا روند سری زمانی بررسی شد تا روند در صورت وجود حذف شود. سپس فرض نرمال بودن سری با استفاده از آزمون چولگی بررسی شد. برای سری سالانه ۳۰ ساله، در صورتی که قدر مطلق چولگی نمونه کوچک‌تر از ۰/۶۶۲ باشد، فرض نرمال بودن نمونه در سطح اعتماد ۱۰ درصد

محاسبه سری‌های سالانه بارش و دمای استان زنجان

متوسط بارندگی و دمای هر سال در سطح استان زنجان با استفاده از روش تیسن (رابطه ۱) انجام شد.

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n p_i a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (1)$$

که در آن p_i بارش متوسط ایستگاه i (میلی‌متر)، a_i سطح اثر ایستگاه i (مترمربع) و p بارش متوسط استان (میلی‌متر) است. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های استفاده شده برای محاسبه میانگین مکانی بارش و دمای استان زنجان را نشان می‌دهد. میانگین بارش هر ایستگاه مربوط به دوره مشترک اقلیم پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) است. در ایستگاه‌هایی که نواقص آمار وجود داشت، نواقص توسط رابطه رگرسیون

۲. آزمون پایداری پارامترها

آزمون پایداری پارامترها برای آن است که مدل شرط پایداری را داشته باشد و با تولید یک سری طولانی‌مدت، دچار روند نشود. شرط مانایی برای مدل $ARMA(1,0)$ ، آن است که:

$$-1 < \phi < 1 \quad (5)$$

۳. آزمون استقلال و نرمال بودن باقی‌مانده‌ها

با استفاده از مدل و سری زمانی مینا، باقی‌مانده‌ها محاسبه شد. دیگر آزمون‌های مدل، آزمون استقلال و نرمال بودن باقی‌مانده‌هاست.

۴. آزمون کفایت مدل در بازتولید آماره‌های سری مشاهداتی

در این آزمون کفایت مدل برای بازتولید آماره‌های مشاهداتی آزموده می‌شود. این آزمون معمولاً برای آماره‌هایی انجام می‌شود که برای مدل‌سازی مهم هستند. آماره‌های میانگین و واریانس معمولاً مشمول این آزمون هستند. شرط موفقیت مدل آن است که آماره‌های مشاهداتی حدود اطمینان مثلاً ۹۵ یا ۹۰ درصد آماره‌های سری‌های تولیدی توسط مدل قرار گیرد. این آزمون با تولید ۱۰۰ سری مصنوعی و مقایسه حدود ۹۰ درصد آماره‌های آنها با آماره‌های سری مشاهداتی انجام شد [۱۴].

تولید داده

برای تولید داده از مدل منتخب استفاده می‌شود که پارامترهای آن در مراحل قبل به دست آمده و با موفقیت آزموده شده است. شکل کلی این مدل در رابطه ۳ معرفی شد. برای هر گام زمانی یک مقدار مستقل ε_t به صورت تصادفی از توزیع نرمال استاندارد برداشته می‌شود. این مقدار در مدل منتخب وارد می‌شود و مقدار Z_t در گام زمانی t تعیین می‌شود. با استفاده از رابطه ۶ که معکوس رابطه ۲ است، مقدار Y_t (متغیر مصنوعی گام t) تولید می‌شود.

$$y_t = S Z_t + \bar{y} \quad (6)$$

سپس معکوس تبدیل نرمال‌سازی به مقادیر Y_t اعمال می‌شود و بدین ترتیب سری مصنوعی متغیر مدل شده (بارش یا دما) با طول دلخواه تولید می‌شود.

پذیرفته است. در غیر این صورت داده‌ها باید توسط یک تبدیل مناسب نرمال شود. سپس متغیرها با حذف میانگین و واریانس به متغیرهای نرمال استاندارد تبدیل می‌شوند.

$$z_i = \frac{y_i - \bar{y}}{S} \quad (2)$$

که در آن Z_t متغیر نرمال استاندارد، y_t متغیر نرمال سال t -ام، \bar{y} میانگین سری y و S انحراف معیار سری y است.

برازش مدل

مدل $ARMA(p,q)$ توسط رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \sigma_\varepsilon \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3)$$

در این مدل، Z_t متغیر نرمال استاندارد گام زمانی t است. Φ_1 تا Φ_p ضرایب قسمت خودهمبسته و θ_1 تا θ_q ضرایب قسمت میانگین متحرک مدل است. ε_t باقی‌مانده گام زمانی t است، σ_ε انحراف معیار خطاها و ε_t متغیر تصادفی نرمال استاندارد است. درجات p و q برای مدل سری زمانی $ARMA$ ، ابتدا از توابع خودهمبسته (ACF^1) و خودهمبسته جزئی $(PACF^2)$ تخمین زده می‌شود [۲۵]. برای تخمین پارامترهای مدل از روش کمترین مربع خطاها استفاده شد.

آزمون‌های مدل و انتخاب مدل برتر

۱. آزمون امساک در تعداد پارامترها

برای پرهیز از بیش‌برازش مدل^۳، باید مدل با مدل‌های با درجه نزدیک به خود مقایسه شود و مدلی انتخاب شود که ضمن توانایی شبیه‌سازی فرایند سری زمانی، کمترین تعداد پارامترها را داشته باشد. برای مقایسه مدل‌ها از نظر امساک در تعداد پارامترها، از معیار آکائیک^۴ (AIC) استفاده شده است که توسط رابطه ۴ تعریف می‌شود.

$$AIC(p, q) = N \ln(\sigma_\varepsilon^2) + 2(p + q) \quad (4)$$

که در آن، N تعداد داده‌ها در نمونه است. مدلی که معیار آکائیک آن حداقل باشد، به‌عنوان کاندید بهترین مدل است و اگر در سایر آزمون‌ها قبول شود، مدل نهایی خواهد بود.

1. Autocorrelation Coefficients
2. Partial Autocorrelation Coefficients
3. Over fitting
4. Akaike Information Criterion

کاهش مقیاس

برای کاهش مقیاس توسط مدل ARMA، آماره‌های مدل که از سری‌های مشاهداتی به دست آمده است، مطابق با سناریوهای تغییر اقلیم تغییر داده می‌شود. این روش اساس کاهش مقیاس توسط WGs استوکستیک است. بدین ترتیب، مدل ARMA که بر داده‌های اقلیم حال برازش شده است، با تغییر آماره‌ها به مدل اقلیم آینده تبدیل می‌شود؛ و با استفاده از آن سناریوهای ریزمقیاس شده آینده تولید می‌شود. در این روش میانگین و انحراف معیار اقلیم آینده از روابط ۷ و ۸ به دست می‌آید.

$$\bar{X}^F = \bar{X}^O \times \frac{X_{GCM}^{-F}}{X_{GCM}} \quad (7)$$

$$S^F = S^O \times \frac{S_{GCM}^F}{S_{GCM}^O} \quad (8)$$

که در آن، \bar{X}^O و S^O به ترتیب میانگین و انحراف معیار سری مشاهداتی و \bar{X}^F و S^F به ترتیب میانگین و انحراف معیار کاهش مقیاس یافته آینده برای ایستگاه مدنظر هستند. \bar{X}_{GCM}^F و S_{GCM}^F به ترتیب میانگین و انحراف معیار سناریوی آینده GCM، و \bar{X}_{GCM}^O و S_{GCM}^O به ترتیب میانگین و انحراف معیار سری GCM برای دوره کنترل در سلول GCM مربوط به منطقه مطالعه شده هستند. سپس در مدل ARMA برای تولید سناریوهای آینده، به جای میانگین و انحراف معیار سری تاریخی، به ترتیب از \bar{X}^F و S^F سناریوی بررسی شده استفاده می‌شود.

مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار

برای ارزیابی عدم قطعیت سناریوهای انتشار گازهای

گلخانه‌ای، مطالعه تحت سه سناریوی A1B، A2، B1 و A1B انجام شده است. این سه سناریو به ترتیب بیان‌کننده حالات بدبینانه، خوش‌بینانه و بینابینی شرایط انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند و تقریباً به ترتیب در موقعیت‌های حدود ۸۰ درصد بالا و پایین، و میانه سناریوهای انتشار قرار دارند. بنابراین، بیشتر مدل‌های GCM بر مبنای این سه سناریو اجرا شده‌اند که دامنه وسیعی از حالات ممکن انتشار گازهای گلخانه‌ای را در بر می‌گیرند.

در مطالعات زیادی، پیش‌یابی‌های مدل‌های GCM بزرگ‌ترین عامل عدم قطعیت در ارزیابی آثار تغییر اقلیم شناخته شده است [۱۲]. بنابراین، در این مطالعه از همه مدل‌های GCM در دسترس که شرایط استفاده در این مطالعه را داشته‌اند استفاده شده است. بر این مبنای پیش‌یابی‌های شش مدل GCM تحت سه سناریوی انتشار (جدول ۱) استفاده شده است.

نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری سری‌های بارش و دما

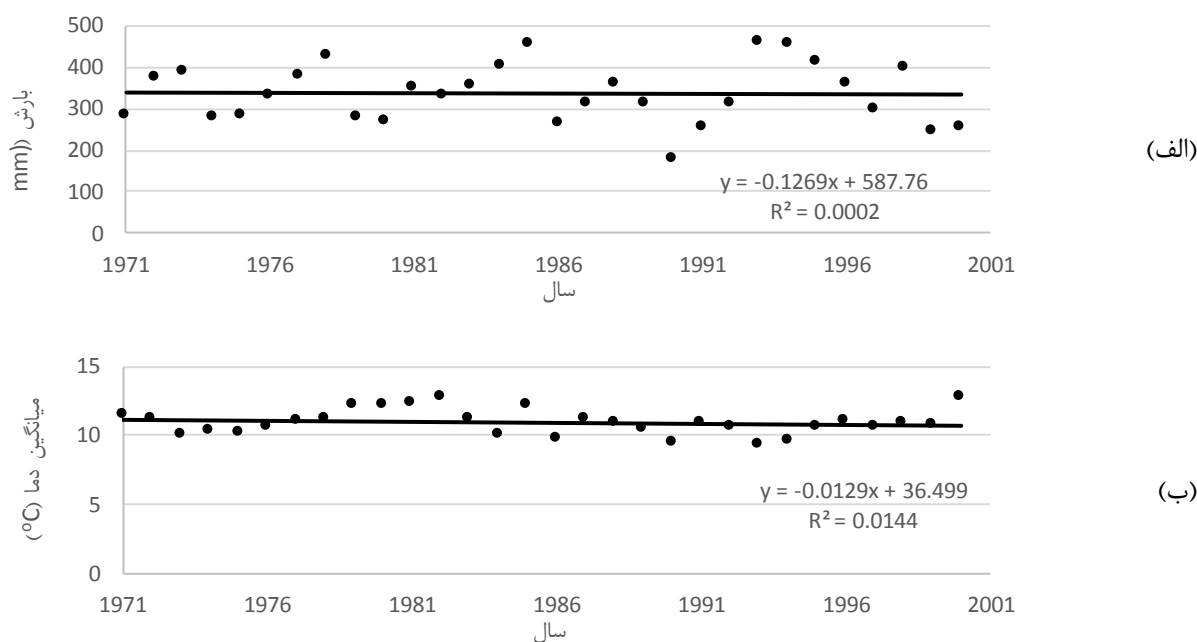
مشخصات آماری سری‌های زمانی بارش و دمای سالانه استان زنجان در جدول ۲ ارائه شده است. روند سری‌های بارش و دما در شکل ۲ بررسی شده است. در هر یک از این شکل‌ها، سری زمانی بارش یا دمای سالانه ترسیم و خط روند ۳۰ ساله بر آن برازش شده است. در این بازه زمانی هر یک از سری بارش و دمای مشاهداتی روند مهمی ندارد.

جدول ۱. مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار استفاده شده

سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای			مدل GCM
A2	B1	A1B	CGCM3-T63
A2	B1	A1B	HADCM3
A2	B1	A1B	BCM2.0
A2	B1	A1B	MIROC3.2 medres
A2	B1	A1B	CSIROMk3.5
A2	B1	A1B	INMCM3.0

جدول ۲. مشخصات آماری سری‌های زمانی سالانه بارش (میلی‌متر) و دمای (درجه سانتی‌گراد) استان زنجان

متغیر	میانگین	انحراف معیار	چولگی	ضریب خودهمبستگی با تأخیر یک
بارش (میلی‌متر)	۳۳۶	۶۹/۵	۰/۲۰۷	۰/۳
دما	۱۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۳۵	۰/۳۲



شکل ۲. بررسی روند سری‌های زمانی مشاهداتی بارش سالانه (الف) و دمای میانگین سالانه (ب) استان زنجان طی دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰

تعیین درجه مدل‌های ARMA

با استفاده از نمودارهای ACF و PACF مدل محتمل برای هر یک از سری‌های بارش و دما، مدل ARMA(1,0) تخمین زده شد. سپس برای انتخاب بهترین مدل با کمترین تعداد پارامترها، مدهای با درجه بیشتر و کمتر نیز بر هر یک از سری‌های زمانی بارش و دما برآزش شد و مدل‌ها توسط معیار آکائیک (AIC) مقایسه شدند. ضرایب و مشخصات مدل‌ها برای دما در جدول ۳ و برای بارش در جدول ۴ ارائه شده است.

برای دما، مدل ARMA (1,0) کوچک‌ترین مقدار AIC را دارد و تا این مرحله به‌عنوان مدل منتخب پذیرفته می‌شود. در ادامه، سایر آزمون‌ها برای این مدل انجام می‌شود.

جدول ۳. برآزش مدل‌های محتمل بر سری زمانی دمای سالانه (درجه سانتی‌گراد) و مقایسه معیار آکائیک آنها

ARMA(1,0)	ARMA(0,0)	ARMA(1,1)	ARMA(2,0)	
۱۰/۹۴	۱۰/۹۴	۱۰/۹۴	۱۰/۹۴	میانگین
۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	انحراف معیار
۰/۳۷۳۲	.	۰/۷۰۳۰	۰/۳۱۳۵	ضریب ϕ_1
.	.	.	۰/۱۵۲۷	ضریب ϕ_2
.	.	۰/۳۹۶۲	.	ضریب ϵ_1
۰/۸۷۸۷	۱	۰/۸۶۰۵	۰/۸۶۱۳	واریانس خطاها
۳۰/۵۶۵	۳۲/۱۴۳	۳۲/۴۱۸	۳۲/۴۴۵	AIC

روند ناچیز در دمای مشاهداتی منفی است که احتمالاً به دلیل عدم قطعیت نوسانات اقلیمی است؛ زیرا انتظار می‌رود دمای عمومی کره زمین روند افزایشی داشته باشد.

بررسی نرمال بودن سری‌ها

در ادامه نرمال بودن سری‌های زمانی بارش و دمای مشاهداتی بررسی شده است. چولگی سری مشاهداتی سالانه بار و دما به ترتیب برابر ۰/۲۰۷ و ۰/۳۵ است. چون قدر مطلق چولگی نمونه کوچک‌تر از ۰/۶۶۲ است، فرض نرمال بودن هر یک از سری‌های بارش دمای سالانه میانگین استان زنجان در سطح اعتماد ۱۰ درصد پذیرفته است [۲۵].

جدول ۴. برازش مدل‌های محتمل بر سری زمانی بارش سالانه (میلی‌متر) و مقایسه معیار آکائیک آنها

ARMA(1,0)	ARMA(0,0)	ARMA(1,1)	ARMA(2,0)	ARMA(3,0)	
۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	میانگین
۶۹/۵	۶۹/۵	۶۹/۵	۶۹/۵	۶۹/۵	انحراف معیار
-۰/۳۱۳۷	۰	-۰/۲۵۵۲	-۰/۳۹۴۱	-۰/۳۷۱۰	ضریب ϕ_1
۰	۰	۰	-۰/۳۱۰۵	-۰/۲۷۵	ضریب ϕ_2
۰	۰	۰	۰	-۰/۰۹۱	ضریب ϕ_3
۰	۰	-۰/۶۳۹	۰	۰	ضریب θ_1
۰/۹۰۶	۱	۰/۸۳۴	۰/۸۲۶	۰/۸۲۰	واریانس خطاها
۳۱/۴۸۷	۳۲/۱۴۳	۳۲/۵۲۹	۳۱/۱۸۸	۳۳/۶۵	AIC

در آزمون استقلال باقی‌مانده‌ها به روش *Porte* *Manteau lack*، برای $L=10$ ، برای دما $Q=6/6$ و برای بارش $Q=9/6$ به دست آمد. در سطح اعتماد ۵ درصد، برای $p=1$ و $q=0$ مقدار کای اسکور برابر ۱۵/۵ است. چون $Q < \chi^2$ در نتیجه فرض استقلال باقی‌مانده‌ها در هر دو مورد پذیرفته است. Q ، L و χ^2 در روش تحقیق معرفی شده‌اند.

کفایت مدل‌ها برای تولید آماره‌های سری مشاهداتی

با استفاده از مدل‌های منتخب ۱۰۰ سری ۳۰ ساله دما و بارش تولید شد و میانگین و انحراف معیار سری مشاهداتی و هر یک از سری‌های تولیدشده محاسبه شد. در جدول ۵ میانگین و انحراف معیار سری مشاهداتی با حدود ۹۰ درصد آماره‌های متناظر سری‌های تولیدشده مقایسه شده است. میانگین و انحراف معیار سری مشاهداتی در بازه ۹۰ درصد سری‌های تولیدشده قرار دارد که بیان‌کننده کفایت مدل در تولید آماره‌های مشاهداتی است. در خصوص چولگی نیز به دلیل نرمال بودن سری مشاهداتی و سری مدل شده، کفایت مدل مورد تأیید است.

برای بارش، مدل‌های $ARMA(1,0)$ و $ARMA(2,0)$ کوچک‌ترین مقادیر معیار آکائیک را دارند. اگرچه مقدار معیار آکائیک مدل $ARMA(2,0)$ اندکی از مدل $ARMA(1,0)$ کمتر است، تفاوت مقادیر آنها اندک است. با توجه به آنکه مدل $ARMA(1,0)$ مدل متداول‌تری برای بارش سالانه است، این مدل به‌طور موقت انتخاب می‌شود تا آزمون‌های تکمیلی بر آن انجام شود.

کنترل شرط مانایی پارامترهای مدل دما

برای مدل‌های $ARMA(1,0)$ برازش شده بر هر یک از متغیرهای بارش و دما، شرط $-1 < \phi_1 < 1$ برقرار است و در نتیجه هر دو مدل شرط مانایی پارامترها را دارند.

کنترل نرمال و مستقل بودن باقی‌مانده‌های مدل دما

بر هر یک از سری‌های دما و بارش سالانه، مدل منتخب برازش شد و باقی‌مانده‌ها محاسبه شدند. ضریب چولگی باقی‌مانده‌ها برای دما و بارش به ترتیب برابر ۰/۱۹ و ۰/۳- به دست آمد که چون قدر مطلق آنها از ۰/۶۶ کوچک‌تر است، در سطح اعتماد ۱۰ درصد فرض نرمال بودن باقی‌مانده‌ها پذیرفته است [۲۵].

جدول ۵. مقایسه آماره‌های سری‌های مدل شده و مشاهداتی دما (درجه سانتی‌گراد) و بارش سالانه (میلی‌متر)

آماره	سری مشاهداتی		سری‌های تولیدشده دما			سری‌های تولیدشده بارش		
	دما	بارش	حد بالای ۹۰٪	میان	حد پایین ۹۰٪	حد بالای ۹۰٪	میان	حد پایین ۹۰٪
میانگین	۱۰/۹۴	۳۳۶	۱۱/۳۸	۱۰/۹۷	۱۰/۵۸	۳۶۷	۳۳۸	۳۱۰
انحراف معیار	۰/۹۴	۷۰/۷	۱/۱۳	۰/۹۰	۰/۶۴	۸۵	۶۸	۴۸

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای سالانه استان زنجان

با استفاده از مدل‌های سری زمانی بارش و دمای استان زنجان، ۱۰۰ سری ۳۰ ساله برای بارش و برای دمای اقلیم حال تولید شد. آماره‌های مدل‌های بارش و دما متناسب با هر یک از سناریوهای اقلیم آینده آشفته شد و مدل‌های سناریوهای اقلیم آتی ایجاد شد. برای هر سناریوی تغییر اقلیم، ۱۰۰ سری بارش و دمای سالانه اقلیم آینده استان زنجان تولید شد. در جدول ۶ میانه و حدود ۹۰ درصد بارش و دمای میانگین اقلیم آینده بر مبنای هر یک از مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار ارائه شده است. در جدول ۷ حدود ۹۰ درصد میانگین‌های بارش و دمای استان زنجان برای اقلیم حال و همه سناریوهای اقلیم

آینده تحت همه سناریوهای انتشار و مدل‌های GCM ارائه شده است. نتایج این جدول بیان‌کننده اثر تغییر اقلیم بر میانگین بارش و دمای استان زنجان با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های GCM، سناریوهای انتشار و نوسانات اقلیمی است. این نتایج در شکل ۳ نیز به صورت روشن‌تر نشان داده شده است. بر این مبنای میانگین بارش استان زنجان در دوره تاریخی ۳۳۸ میلی‌متر است که حدود ۹۰ درصد به علت نوسانات تاریخی می‌تواند بین ۳۶۷ تا ۳۱۰ میلی‌متر باشد. این در حالی است که میانه بارش میانگین سالانه اقلیم آینده به ۳۱۹ میلی‌متر کاهش یافته است که با احتساب مجموعه عدم قطعیت‌های نوسانات اقلیمی، مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار، در سطح احتمال ۹۰ درصد، می‌تواند مقداری بین ۲۵۱ تا ۳۸۸ میلی‌متر باشد.

جدول ۶. اثر تغییر اقلیم بر میانگین سالانه بارش و دمای استان زنجان با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های GCM، سناریوهای انتشار و نوسانات اقلیمی

دوره زمانی	مدل GCM	سناریوی انتشار	بارش (میلی‌متر)			دما (درجه سانتی‌گراد)		
			حد بالایی ٪۹۰	میانه	حد پایینی ٪۹۰	حد بالایی ٪۹۰	میانه	حد پایینی ٪۹۰
-۲۰۰۰ ۱۹۷۱	دوره مشاهداتی	-	۳۶۷	۳۳۸	۳۱۰	۱۱/۴	۱۱	۱۰/۶
۲۰۳۵-۶۴	BCM2.0	A2	۳۳۶	۳۰۳	۲۷۲	۱۲/۸	۱۲/۴	۱۲
۲۰۳۵-۶۴	BCM2.0	A1B	۳۰۷	۲۷۸	۲۵۱	۱۳/۱	۱۲/۷	۱۲/۳
۲۰۳۵-۶۴	BCM2.0	B1	۳۵۲	۳۲۳	۲۹۶	۱۲/۴	۱۲	۱۱/۵
۲۰۳۵-۶۴	CGCM3-T63	A2	۳۴۲	۳۱۴	۲۸۸	۱۴/۲	۱۳/۸	۱۳/۵
۲۰۳۵-۶۴	CGCM3-T63	A1B	۳۴۸	۳۲۲	۲۹۸	۱۴	۱۳/۷	۱۳/۴
۲۰۳۵-۶۴	CGCM3-T63	B1	۳۷۲	۳۴۳	۳۱۵	۱۳/۳	۱۳	۱۲/۷
۲۰۳۵-۶۴	CSIROMk3.5	A2	۳۴۳	۳۱۷	۲۹۱	۱۳/۷	۱۳/۲	۱۲/۸
۲۰۳۵-۶۴	CSIROMk3.5	A1B	۳۳۱	۳۰۴	۲۷۹	۱۳/۸	۱۳/۳	۱۲/۹
۲۰۳۵-۶۴	CSIROMk3.5	B1	۳۶۲	۳۳۹	۳۱۶	۱۳/۱	۱۲/۷	۱۲/۴
۲۰۳۵-۶۴	HADCM3	A2	۳۸۸	۳۵۱	۳۱۵	۱۳/۶	۱۳/۱	۱۲/۷
۲۰۳۵-۶۴	HADCM3	A1B	۳۶۳	۳۲۹	۲۹۷	۱۳/۹	۱۳/۵	۱۳
۲۰۳۵-۶۴	HADCM3	B1	۳۵۶	۳۲۷	۳۰۰	۱۳/۳	۱۲/۹	۱۲/۴
۲۰۳۵-۶۴	INMCM3.0	A2	۳۴۰	۳۱۳	۲۸۸	۱۳/۳	۱۲/۹	۱۲/۴
۲۰۳۵-۶۴	INMCM3.0	A1B	۳۳۶	۳۰۲	۲۷۰	13/3	۱۲/۹	۱۲/۵
۲۰۳۵-۶۴	INMCM3.0	B1	۳۴۶	۳۱۴	۲۸۳	۱۲/۸	۱۲/۴	۱۲
۲۰۳۵-۶۴	MIROC3.2	A2	۳۷۶	۳۲۹	۲۸۵	۱۳/۶	۱۳/۱	۱۲/۶
۲۰۳۵-۶۴	MIROC3.2	A1B	۳۴۲	۳۰۱	۲۶۳	۱۴/۱	۱۳/۵	۱۳
۲۰۳۵-۶۴	MIROC3.2	B1	۳۳۹	۳۰۳	۲۶۸	۱۳/۵	۱۳/۱	۱۲/۸

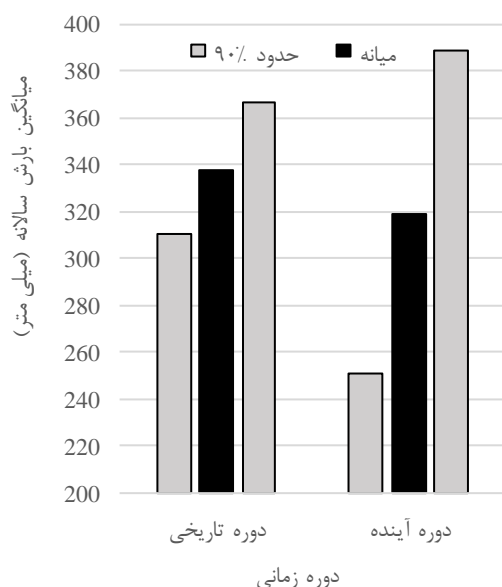
جدول ۷. اثر تغییر اقلیم بر میانگین دما و بارش استان زنجان با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های GCM، سناریوهای انتشار و نوسانات اقلیمی

متغیر	تاریخی (۱۹۷۱-۲۰۰۰)			آینده (۲۰۳۵-۲۰۶۴)		
	حد بالای ۹۰٪	میانگین	حد پایینی ۹۰٪	حد بالای ۹۰٪	میانگین	حد پایینی ۹۰٪
بارش (mm)	۳۶۷	۳۳۸	۳۱۰	۳۸۸	۳۱۹	۲۵۱
دما (°C)	۱۱/۴	۱۱	۱۰/۶	۱۴/۲	۱۲/۹	۱۱/۵

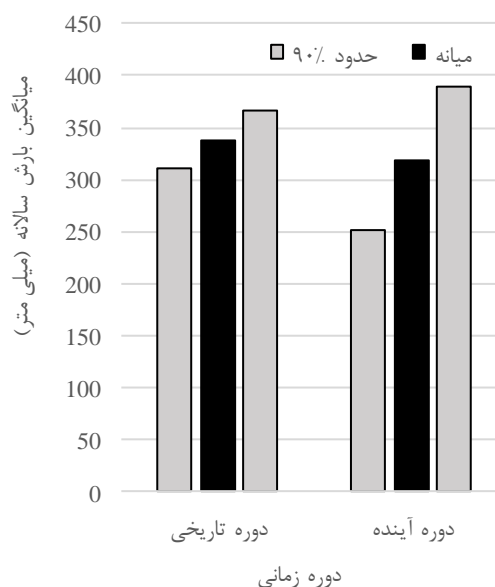
همان طور که در جدول ۷ و شکل ۳ مشاهده می‌شود، میانگین دمای استان در آینده افزایش می‌یابد. میانگین دمای استان زنجان در دوره تاریخی ۱۱ درجه سانتی‌گراد است که حدود ۹۰ درصد به علت نوسانات تاریخی می‌تواند بین ۱۰/۶ تا ۱۱/۴ درجه باشد. این در حالی است که میانگین دمای اقلیم آینده به ۱۲/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد که با احتساب مجموعه عدم قطعیت‌های نوسانات اقلیمی، مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار، در سطح احتمال ۹۰ درصد، می‌تواند مقداری بین ۱۱/۵ تا ۱۴/۲ میلی‌متر باشد. این نتایج نشان می‌دهد به‌رغم عدم قطعیت‌ها، اطمینان زیادی درباره افزایش دما در اقلیم آینده وجود دارد.

با استفاده از سری‌های ۳۰۰۰ ساله تولیدشده بارش و دمای سالانه توسط مدل‌های ARMA برای دوره تاریخی و

هر یک از ۱۸ سناریوی آینده، توزیع فراوانی بارش و دمای سالانه برای هر سری تولید شد. در شکل ۴ توزیع احتمال تجاوز دمای سالانه دوره تاریخی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) با حدود ۹۰ درصد توزیع‌های ۱۸ سناریوی آینده مقایسه شده است و مقادیر مربوط به آن در جدول ۸ ارائه شده است. با وجود عدم قطعیت‌ها، توزیع دوره تاریخی به کلی خارج از باند ۹۰ درصد سناریوهای آینده است. به‌طور نمونه، دمای سالانه با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در اقلیم تاریخی مقداری مساوی یا بزرگ‌تر از ۱۳/۱ است. در حالی که حدود ۹۰ درصد سناریوهای آینده، دمای سالانه با دوره بازگشت ۱۰۰ سال به ۱۴ تا ۱۵/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. این نتایج بدین معناست که اطمینان زیادی بر افزایش دمای استان زنجان در دوره‌های آینده تحت سناریوهای انتشار و مدل‌های GCM مختلف وجود دارد.



(ب)

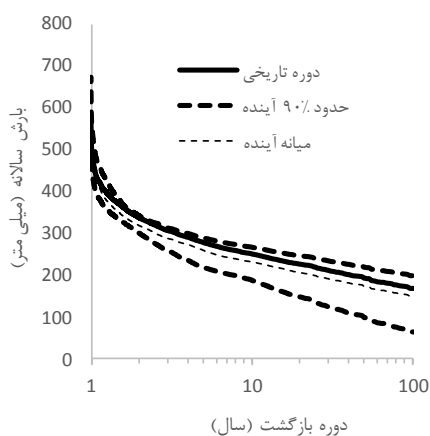


(الف)

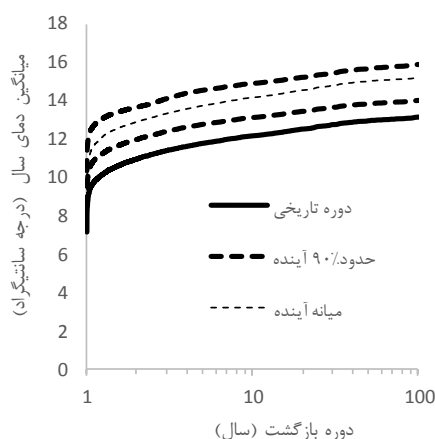
شکل ۳. مقایسه حدود ۹۰ درصد میانگین‌های ۱۰۰ سری ۳۰ ساله دوره تاریخی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) با حدود ۹۰ درصد ۱۰۰ سری ۳۰ ساله برای ۱۸ سناریوی آینده (۲۰۳۵-۲۰۶۴) برای بارش (الف) و دمای (ب) استان زنجان

مختلف کاهش می‌یابد، به‌علت عدم قطعیت‌ها احتمال افزایش در بارش آینده نیز وجود دارد. به‌طور نمونه، بارش با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در دوره تاریخی مقداری کوچک‌تر یا مساوی ۱۶۹ میلی‌متر است. این در حالی است که این مقدار در میانه سناریوهای آینده به ۱۵۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. با این حال، حدود ۹۰ درصد سناریوهای آینده، بارش با دوره بازگشت ۱۰۰ سال می‌تواند از کوچک‌تر یا مساوی ۶۵ تا کوچک‌تر یا مساوی ۱۹۹ میلی‌متر باشد.

در شکل ۵ توزیع‌های عدم تجاوز بارش سالانه دوره تاریخی و حدود ۹۰ درصد توزیع‌های سناریوهای اقلیم آینده مقایسه شده است. مقادیر مربوط به آن نیز برای دوره بازگشت‌های مختلف در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد میانه سناریوهای بارش آینده در دوره بازگشت‌های مختلف از مقادیر متناظر دوره تاریخی کمتر است؛ ولی توزیع بارش دوره تاریخی در باند ۹۰ درصد سناریوهای آینده قرار دارد. بنابراین، ضمن آنکه بر مبنای بیشتر سناریوهای آینده بارش در دوره بازگشت‌های



شکل ۵. مقایسه توزیع احتمال عدم تجاوز بارش سالانه اقلیم تاریخی با حدود ۹۰ درصد و میانه ۱۸ سناریوی اقلیم آینده



شکل ۴. مقایسه توزیع احتمال تجاوز دمای سالانه اقلیم تاریخی با حدود ۹۰ درصد و میانه ۱۸ سناریوی اقلیم آینده

جدول ۸. مقایسه دمای سالانه (درجه سانتی‌گراد) اقلیم تاریخی در دوره بازگشت‌های تجاوز (بزرگ‌تر شدن) مختلف با حدود ۹۰ درصد و میانه مقادیر متناظر ۱۸ سناریوی اقلیم آینده

دوره آینده (۲۰۳۵-۲۰۶۴)			دوره تاریخی	دوره بازگشت
حد بالای ۹۵٪	میانه	حد پایین ۹۵٪	۱۹۷۱-۲۰۰۰	(سال)
۱۲	۱۲/۹	۱۳/۷	۱۱	۲
۱۳/۴	۱۴/۵	۱۵/۲	۱۱/۵	۲۰
۱۳/۸	۱۵	۱۵/۷	۱۳	۵۰
۱۴	۱۵/۲	۱۵/۹	۱۳/۱	۱۰۰

جدول ۹. مقایسه بارش سالانه (میلی‌متر) اقلیم تاریخی در دوره بازگشت‌های عدم تجاوز (کوچک‌تر شدن) مختلف با حدود ۹۰ درصد و میانه مقادیر متناظر ۱۸ سناریوی اقلیم آینده

دوره آینده (۲۰۳۵-۲۰۶۴)			دوره تاریخی	دوره بازگشت
حد پایین ۹۰٪	میانه	حد بالای ۹۰٪	۱۹۷۱-۲۰۰۰	(سال)
۶۵	۱۵۰	۱۹۹	۱۶۹	۱۰۰
۹۹	۱۷۴	۲۱۹	۱۹۳	۵۰
۱۴۸	۲۰۶	۲۴۷	۲۲۷	۲۰
۳۰۰	۳۱۸	۳۴۲	۳۳۷	۲

نتیجه‌گیری

۲. با تولید و مقایسه نتایج برای ۱۰۰ سری ۳۰ ساله برای هر یک از ۱۸ سناریوی آینده و دوره مشاهداتی، عدم قطعیت نوسانات اقلیمی در نتایج را تعیین می‌کند.

۳. این مدل به‌خوبی نوسانات بین‌سالی (واریانس سالانه) را تولید می‌کند و در این‌باره ضعف مطرح در خصوص مدل‌های معمول استوکستیک روزانه را ندارد.

میانگین دمای استان زنجان در دوره ۳۰ ساله تاریخی حدود ۱۱ درجه سانتی‌گراد است که در میانه سناریوهای آینده به ۱۲/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و با احتساب مجموعه عدم قطعیت‌های نوسانات اقلیمی، مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار، در سطح احتمال ۹۰ درصد، در آینده (۲۰۳۵-۲۰۶۴) می‌تواند مقداری بین ۱۱/۵ تا ۱۴/۲ میلی‌متر برسد. همچنین دمای سالانه با دوره بازگشت‌های مختلف در آینده افزایش می‌یابد. به‌طور نمونه، دمای سالانه با دوره بازگشت ۵۰ سال از ۱۳ درجه در اقلیم تاریخی، حدود اطمینان ۹۰ درصد عدم قطعیت‌ها به مقداری بین ۱۳/۸ تا ۱۵/۷ در اقلیم آینده می‌رسد. همچنین حدود اطمینان ۹۰ درصد عدم قطعیت‌ها انتظار می‌رود که میانگین بارش آینده استان زنجان از ۲۵ درصد کاهش تا ۱۵ درصد افزایش یابد. در میانه سناریوهای آینده، انتظار می‌رود که بارش سالانه با دوره بازگشت‌های مختلف اندکی کاهش یابد. به‌طور نمونه، در میانه سناریوهای آینده انتظار می‌رود مقدار بارش با دوره بازگشت ۵۰ سال ۱۰ درصد کاهش یابد، ولی در حدود اطمینان ۹۰ درصد عدم قطعیت‌ها، می‌تواند از ۴۹ درصد کاهش تا ۱۴ درصد افزایش داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد عدم قطعیت در نتایج شایان توجه است و لازم است در تصمیم‌گیری‌های کاربردی در نظر گرفته شود. همچنین با توجه به محتمل بودن کاهش بارش و افزایش دما، تغییر اقلیم می‌تواند موجب کاهش منابع آب استان در آینده شود.

منابع

- [1]. IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; 2013.
- [2]. IPCC. Climate change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press; 2001.

اقلیم کره زمین در حال تغییر است و برای تدوین طرح‌های سازگاری با شرایط اقلیمی تغییر یافته آینده و کاهش آثار زیان‌بار تغییر اقلیم، لازم است شرایط اقلیمی آینده پیش‌بینی شود. عموماً نتایج ارزیابی آثار تغییر اقلیم با عدم قطعیت‌هایی همراه است که چشم‌پوشی از آنها می‌تواند به نتایج گمراه‌کننده‌ای در تصمیم‌گیری‌های کاربردی منجر شود. در این مقاله اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای میانگین مکانی استان زنجان در مقیاس سالانه با بررسی عدم قطعیت ارزیابی شده است. برای بررسی عدم قطعیت مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار، این مطالعه برای سناریوهای شش مدل GCM با عناوین BCM2.0, HADCM3, CGCM3-T63, MIROC3.2, CSIROmk3.5 و INMCM3.0 تحت سه سناریوی انتشار A2, A1B و B1 انجام شده است. کاهش مقیاس سناریوهای اقلیمی با استفاده از مدل استوکستیک سالانه ARMA انجام شده است. براساس بررسی نویسندگان این مقاله، پیش از این از مدل یادشده برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم آینده، به‌ویژه بر بارش استفاده نشده است.

با بررسی مدل‌های با درجات مختلف ARMA، مدل مناسب برای هر یک از بارش و دمای سالانه، مدل ARMA(1,0) نتیجه شد. نتایج آزمون‌های مختلف بیان‌کننده کفایت مدل‌های برازش‌شده در تولید سری‌های بارش و دمای سالانه استان است. همچنین با مقایسه آماره‌های مشاهداتی و حدود ۹۰ درصد آماره‌های ۱۰۰ سری تولیدشده توسط مدل، مشاهده شد که مدل آماره‌های مشاهداتی را به‌خوبی باز تولید می‌کند. با استفاده از این مدل‌ها سناریوهای اقلیم آینده (دوره ۲۰۳۵-۲۰۶۴) ریزمقیاس شد و برای هر یک از ۱۸ سناریوی آینده، ۱۰۰ سری ۳۰ ساله بارش و دما تولید شد. برای دوره مشاهداتی و هر یک از ۱۸ سناریوی آینده، حدود ۹۰ درصد توزیع‌های، مقادیر با دوره بازگشت‌های مختلف و میانگین‌های بارش و دمای ۱۰۰ سری تولیدشده محاسبه و اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای سالانه استان زنجان با بررسی عدم قطعیت‌ها ارزیابی شد. از مزایای استفاده از مدل استوکستیک سالانه ARMA در این مطالعه به موارد زیر اشاره می‌شود:

۱. در کاهش مقیاس سناریوهای اقلیمی سالانه، علاوه بر تغییرات میانگین، تغییرات نوسانات (واریانس) نیز اعمال شد.

- [3]. Devkota L.P. and D.R. Gyawali. Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin, Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015;4: 502-515.
- [4]. Rana AK, Foster T, Bosshard J, Olsson and Bengtsson L. Impact of climate change on rainfall over Mumbai using Distribution-based Scaling of Global Climate Model projections. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2014;1: 107-128.
- [5]. Khazaei MR, Zahabiyou B, and Saghafian B. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. *International Journal of Climatology*, 2012;32: 1997-2006.
- [6]. Ahmadvand Kahrizi M, Rouhani H. Assessing the conservation impacts of climate change based on temperature projected on 21 century (Case study: Arzkooseh and Nodeh stations). *Ecohydrology*, 2017;3(4): 597-609 (in Persian).
- [7]. Khazaei MR. Climate change impact assessment on hydrological regimes of a mountainous river basin in Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2016;5(3): 43-54 (in Persian).
- [8]. Fowler HJ, Blenkinsop S, and Tebaldi C. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 2007;27: 1547-1578.
- [9]. IPCC. General Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment, version 2, 2007.
- [10]. Kay AL, Davies HN, Bell VA, and Jones RG. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, 2009;92: 41-63.
- [11]. Semenov MA, Brooks RJ, Barrow EM, and Richardson CW. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 1998;10: 95-107.
- [12]. Chapman T. Stochastic modelling of daily rainfall: the impact of adjoining wet days on the distribution of rainfall amounts. *Environmental Modelling & Software*, 1998;13: 317-324.
- [13]. Dubrovsky M, Buchtele J, and Zalud Z. High-frequency and low-frequency variability in stochastic daily weather generator and its effect on agricultural and hydrologic modeling. *Climatic Change*, 2004;63: 145-179.
- [14]. Khazaei MR, Ahmadi S, Saghafian B, and Zahabiyou B. A new daily weather generator to preserve extremes and low-frequency variability. *Climatic Change*, 2013;119:631-645.
- [15]. Reaney SM, and Fowler HJ. Uncertainty estimation of climate change impacts on river flow incorporating stochastic downscaling and hydrological model parameterisation error sources, BHS 10th National Hydrology Symposium, Exeter, 2008.
- [16]. Minville M, Brissette F, and Leconte R. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology*, 2008;358:70-83.
- [17]. Semenov MA. Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007;144: 127-138.
- [18]. Wilby RL, Dawson CW, and Barrow EM. SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 2002;17: 147-159.
- [19]. Mavromatis T. and Hansen JW. Interannual variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001;109: 283-296.
- [20]. Hansen JW and Mavromatis T. Correcting low-frequency variability bias in stochastic weather generators. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001;109:297-310.
- [21]. Salahi B, Goudarzi M, Hosseini SA. Predicting the temperature and precipitation changes during the 2050s in Urmia Lake Basin. *Watershed Engineering and Management*, 2017;8(4): 425-438 (in Persian).
- [22]. Rezaee M, Nahtaj M, Moghadamniya A, Abkar A, Rezaee M. Comparison of Artificial Neural Network and SDSM Methods in the Downscaling of Annual Rainfall in the HadCM3 Modelling (Case study: Kerman, Ravar and Rabor). *Water Engineering*, 2015;8(24): 25-40 (in Persian).
- [23]. Semiromi ST, Moradi H, Khodaghali M. Predicted changes in some of climate variables using downscale model LARS-WG and output of HADCM3 model under different scenarios. *Watershed Engineering and Management*, 2015;7(2): 145-156 (in Persian).
- [24]. Liu Y, Wu J, Liu Y, Hu BX, Hao Y, Huo X, et al. Analyzing effects of climate change on

streamflow in a glacier mountain catchment using an ARMA model. *Quaternary International*, 2015;358:137-145.

[25]. Salas JD, Delleur JW, Yevjevich V, Lane WL. *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resources Publications, Littleton, CO, p 484, 1980.