



ارزیابی تغییرات اقلیمی در اکوسیستم‌های تالابی با استفاده از مدل GCM، مطالعه موردی: تالاب‌های آلاگل، آجی گل و آلمانگل، استان گلستان

صالح آرخي^۱✉، ابوالقاسم ممشلی^۲، عبدالحافظ پناهی^۳، سمیه عمادالدین^۴

۱ - دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

۲ - دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی نقشه برداری، موسسه غیر انتفاعی - غیردولتی لامعی گرگانی، گرگان، ایران

۳ - دکتری تخصصی آب و هواشناسی - اداره کل هواشناسی استان گلستان، گلستان، ایران

۴ - استادیار، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	تحقیقات پژوهشگران طی سالهای گذشته نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی اثرات متفاوتی بر روی مولفه‌های اقلیم و مولفه‌های هیدرولوژیکی دارد. نتایج یافته‌های دانشمندان گویای این نظر است که وقوع تغییرات اقلیمی در آینده نمود بیشتری خواهد داشت، لذا تحلیل و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع مورد بررسی، از نوع توصیفی تحلیلی است و از نوع مطالعات کاربردی با تأکید بر روش‌های کمی است که با استفاده از مدل GCM انجام گرفت. به‌منظور اجرای اهداف در نظر گرفته شده، شامل: مدل‌سازی تغییر اقلیم تالاب‌های آلاگل، آجی گل و آلمانگل از آمار ایستگاه هواشناسی ایستگاه اینچه‌برون که دارای آمار ۲۰ ساله میانگین بارش و میانگین دما در فواصل سال‌های (۲۰۲۰-۲۰۲۱) در مقیاس ماهانه و سالانه استفاده شده است. در تحقیق حاضر، پیش‌بینی داده‌های بارش و دما با استفاده از خروجی‌های مدل HadCM3 انجام شده است. داده‌های شبیه‌سازی شده میانگین بارندگی حاصل از مدل Hadcm3 در LARS-WG تحت سناریو SRA1B برای ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو و تولید داده مصنوعی برای دوره آتی با استفاده از سه سناریوی B1، A2 و AIB (به ترتیب خوشبینانه، بدبینانه و متوسط) تأیید شده توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ برآورد شده است. بدین منظور، برای انتخاب بهترین روش درون‌یابی از شاخص‌های آماری از قبیل RMSE، ME و MSE استفاده شد. یکی از مهمترین راهبردهای موجود در زمینه وزن‌دهی، تکنیک‌های کمی و ریاضی است. بر اساس نتایج تحقیق، آزمون‌های همگنی روند تطابق بسیار مناسبی با یکدیگر داشته‌اند. در مواقعی که آزمون روندیابی حاکی از روند معنی‌دار آماری در سری زمانی بوده، آزمون‌های همگنی نیز عدم همگن بودن آن سری را تأیید می‌کنند. سری‌های بارش در ایستگاه اینچه‌برون با روند کاهش تقریبی همراه بود. همچنین، دمای حداکثر و حداقل روند افزایشی را نشان داد. مدل‌سازی سری‌های بارش در ایستگاه اینچه‌برون با روند کاهش تقریبی همراه بوده و همچنین دمای حداکثر و دمای حداقل روند افزایشی را داد.



Evaluation of climate changes in wetland ecosystems using GCM model, Case Study: Alagol, Ajigol, and Almagol wetlands, Golestan province

Saleh Arekhi^{1✉}, Abolghasem Mamashli², Adolhafez Panahi³, Somia Emadaddian⁴

1. Associated Professor, Department of Geography, Faculty of Human Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran,
2. Master's degree in Geographical Information System, Department of Civil Engineering, Non-Profit-Non-Governmental Institute, Gorgani Lamai, Gorgan, Iran.
3. PhD in Meteorology - General Department of Meteorology of Golestan Province, Golestan, Iran
4. Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Human Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

Article Info	Abstract
Article type: Research Article Article history: Received: 2024/10/28 Accepted: 2025/02/03 Available online: 2025/05/05 Keywords: Climate Change, Modeling, LARS-WG Model, Alagol Wetland, Almagol Wetland, Ajigol Wetland	Research over recent years has shown that climate change exerts varying effects on climatic and hydrological components. Scientific findings indicate that the impacts of climate change will become more pronounced in the future; therefore, analyzing and predicting these changes is of significant importance. This study, given its subject and nature, is a descriptive-analytical and applied research with an emphasis on quantitative methods, conducted using the General Circulation Model (GCM). To achieve the study objectives—including modeling climate change in the Alagol, Ajigol, and Almagol wetlands—data from the Incheh-Borun meteorological station were used. This station provides 20 years of monthly and annual average precipitation and temperature data (2001–2020). Forecasting of precipitation and temperature was carried out using outputs from the HadCM3 model in this study. The simulated average precipitation data, obtained from HadCM3 and downscaled in LARS-WG under the SRA1B scenario, were used to generate synthetic data for the future period (2021–2050) based on three IPCC-approved scenarios: B1 (optimistic), A2 (pessimistic), and A1B (moderate). To determine the best interpolation method, statistical indicators such as RMSE, ME, and MSE were applied. One of the most effective strategies in data weighting is the application of quantitative and mathematical techniques. According to the study results, the homogeneity tests demonstrated a high level of consistency. When trend analysis indicated a statistically significant trend in the time series, the homogeneity tests confirmed the non-homogeneity of those series. The precipitation series at Incheh-Borun station showed a generally decreasing trend, while both maximum and minimum temperatures exhibited increasing trends.

* Corresponding author E-mail address: S.arekhi@gu.ac.ir

مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین مسائل جامعه جهانی، موضوع گرمایش جهانی و پیامدهای آن بر زندگی و فرآیند توسعه در جوامع انسانی است. به طور کلی، تغییر اقلیم، نوسان کلی و گسترده آب‌وهوای منطقه است و در حال حاضر زیاد شدن دمای کره زمین، کاهش بارندگی‌ها و افزایش وزش بادهای شدید بخشی از تغییر اقلیم قلمداد می‌شوند. از این‌رو، تغییرات اقلیمی یکی از مسائل چالش‌برانگیز برای آینده توسعه به‌ویژه در مناطق خشک است؛ چالشی که کاهش تولید محصولات کشاورزی و تهدید معیشت روستایی از آثار احتمالی آن بر خدمات اکوسیستم است (Mertz et al., 2009). عوامل زیادی اعم از طبیعی یا انسان‌ساخت بر تغییرات آب‌وهوا مؤثرند. در مورد دلایل این پدیده، نظریه‌های متعددی وجود دارد که برخی گازهای گلخانه‌ای و برخی دیگر فرآیندهایی نظیر فعالیت‌های آتش‌فشانی و زمین‌گرمایی و همچنین فعالیت‌های خورشیدی را دلیل این پدیده می‌دانند. دلیل وقوع تغییر اقلیم هر چه باشد، امروزه به‌عنوان ابزاری برای تحمیل سیاست‌های کشورهای شمال به کشورهای درحال توسعه از طریق اعمال سیاست‌های مختلف با نام محیط‌زیست، و دیدگاه نشر آلاینده‌ها به‌صورت محلی و آسیب‌رسانی آلاینده‌ها به‌طور منطقه‌ای و جهانی است (Kazeminia, 2017). بررسی‌ها نشان داده که میزان متوسط دما در سطح زمین در قرن بیستم ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. بر هم خوردن تعادل سیستماتیک سامانه اقلیم باعث بروز آشفته‌گی‌ها و ناهنجاری‌های رفتاری شده است که بیشترین آثار آن بر محیط‌های طبیعی و به‌خصوص گیاهان که دارای قدرت و سرعت کم سازگاری هستند، می‌باشد. نتایج بررسی‌هایی که توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ IPCC گزارش شده، حاکی از آن است که مهم‌ترین عواقب تغییر اقلیم بر کشاورزی، عبارت‌اند از: تشدید بحران‌های اقلیمی، گرم شدن عرض‌های جغرافیایی بالا، کاهش قابلیت دسترسی به آب و پیشرفت باران‌های موسمی به سمت قطب است. تالاب‌ها خدمات اکولوژیکی ارزشمندی نظیر حفظ تنوع زیستی، حفظ کیفیت آب، جلوگیری از سیل و خشکسالی، کاهش آلودگی‌ها و زیستگاه حیات وحش را فراهم می‌کنند (Kim and Lee, 2011). ضرورت بررسی‌های جامعی برای شناسایی اثرات تغییرات اقلیمی و مدل‌سازی و پیش‌بینی برای آینده اقلیمی بر روی تالاب‌ها برای حفظ و حراست از آن نیاز حیاتی است.

Kim and Lee (۲۰۱۱) اثرات تغییر اقلیم روی کارکردهای تالابی را در بزرگ‌ترین تالاب کشور کره مورد بررسی قرار داد که پس از ارزیابی اثرات تغییر اقلیم روی عملکردهای تالاب با استفاده از سناریو اقلیم، مدل اقلیم و آنالیز تغییر اقلیم مشخص گردید که حدود ۱۰ درصد عملکردهای تالاب در آینده در اثر تغییر اقلیم، دست خوش تغییر خواهند شد. Henareh Khalyani و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای با استفاده از روش ریزمقیاس نمایی آماری و تحت سه سناریو اقلیمی A2، A1B1 و B2 به بررسی بارش، تبخیر و تعرق، کمبود بارش و کاهش نسبی عملکرد-محصول پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که در اثر تغییر اقلیم، فصل بارش مرطوب‌تر و فصل خشکی خشک‌تر خواهد شد. همچنین، نتایج آنها نشان داد که میزان تبخیر و تعرق در ماه‌های خشک با کاهش بارندگی و افزایش دما افزوده خواهد شد. Shrestha and Lohpaisankrit (۲۰۱۶) در مقاله خود ارزیابی خطر سیل تحت سناریوهای تغییر آب و هوا در حوضه رودخانه یانگ تایلند، از روش^۲ LARS-WG و مدل روان آب استفاده کرده و نتایج حاصل نشان می‌دهد: از خروجی‌های اصلاح شده از سه مدل گردش کلی (GCM) برای سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ ساخته شده نتایج نشان می‌دهد که حوضه در آینده گرم‌تر و مرطوب‌تر می‌شود. حداقل و حداکثر دمای حوضه در آینده روند افزایشی پیش‌بینی شده و نیز میزان بارندگی سالانه در آینده بیشتر می‌گردد.

ضیانی و همکاران (۱۴۰۰) در مقاله پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی دوره‌های آتی با کاربرد مدل HadCM3 و سناریوهای اقلیمی، مطالعه موردی: ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب حوضه حبله‌رود اقدام به بررسی اثر پدیده تغییر اقلیم بر تغییرات برخی از متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) کردند. نتایج نشان داد که بارش حوضه به طور متوسط در آینده نزدیک بین ۰/۲۳ تا ۴/۸۰ میلی‌متر افزایش و در آینده میانه ۰/۰۸ تا ۰/۱۵ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. کمینه دما برای آینده نزدیک بین ۰/۵۰ تا ۰/۶۷ درجه سانتی‌گراد و در آینده میانه بین ۱/۵۴ تا ۱/۹۷ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. بیشینه دمای حوضه حبله‌رود برای

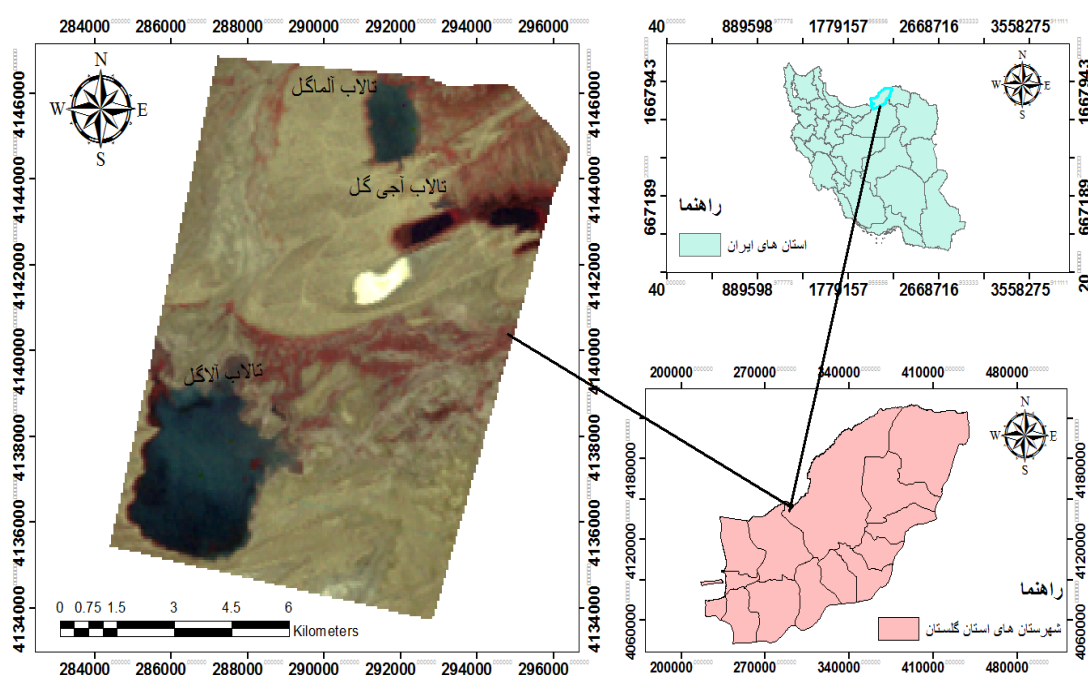
^۱. Intergovernmental Panel on Climate Change

^۲. Lang Ashton Research Station Weather Generator

آینده نزدیک بین ۰/۴۳ تا ۰/۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و برای آینده میانه بین ۱/۴۷ تا ۱/۸۹ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت بنابراین، با توجه به این موضوع و نیز آگاهی از اثرات منفی مستقیم و غیرمستقیم تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف حوضه (کشاورزی، منابع آبی، محیط زیست، منابع طبیعی، بهداشت، صنعت و اقتصاد)، برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استراتژیک برای مدیریت شرایط جدید، امری ضروری است. حاجی‌وندی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش خود به بررسی اثرات منطقه‌ای پدیده تغییر اقلیم در شمال استان خوزستان با بهره‌گیری از مدل HadCM3 تحت ریزمقیاس نمایی LARS-WG در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۳۰ و ۲۰۵۰-۲۰۳۰ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که بارش سالانه در منطقه روند نزولی را طی کرده است و بیشترین افزایش دما، در دمای کمینه بوده است و این افزایش در فصل زمستان مشهودتر است و بیشترین افزایش دما در سناریو A2 برای افق ۲۰۵۰ مشاهده شد. کرمی و همکاران (۱۴۰۳) در مقاله ارزیابی تغییرات اقلیمی در حوضه تالاب بین‌المللی هامون با استفاده از مدل LARS-WG6 با استفاده از مدل‌های مختلف گردش عمومی مدل ریزمقیاس گردان LARS-WG6 در دو سناریوی انتشار RCP5.4 و RCP5.8 در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ براساس داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک زابل در دوره پایه ۱۹۸۳-۲۰۱۹ پرداختند. نتایج ریزمقیاس گردانی نشان داد میانگین دمای کمینه و بیشینه در همه ماه‌ها در هر سه دوره، تحت دو سناریوی در همه مدل‌ها افزایش خواهد یافت. بیشترین و کمترین افزایش در میانگین دمای کمینه و بیشینه ماهانه به ترتیب در مدل HadGEM2-EC، سناریوی RCP5.8 و مدل MPI-ESM-MR، سناریوی RCP5.4 پیش‌بینی شده است. طی دوره ۲۰۸۰-۲۰۲۱ دامنه تغییرات دمای بیشینه ماهانه در سناریوهای RCP5.4 و RCP5.8 به ترتیب ۰/۳-۲۹/۸۵ و ۰/۵۴-۵/۸۰ درجه سلسیوس و دامنه تغییرات دمای کمینه ماهانه به ترتیب ۰/۱۸-۳/۵۱ و ۰/۶۱-۵/۳۸ درجه سلسیوس خواهد بود. بیشترین میزان افزایش میانگین بارش ماهانه در ماه مارس توسط مدل HadGEM2-EC در سناریوی RCP5.4 به میزان ۸/۶ میلی‌متر در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ پیش‌بینی شده است. بیشترین میزان کاهش میانگین بارش ماهانه در ماه ژانویه توسط مدل MIROC5 در سناریوی RCP5.4 به میزان ۳/۶۸ میلی‌متر در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ پیش‌بینی شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند در اتخاذ راهکارهای معیشتی و شیوه‌های کشاورزی سازگار با اقلیم برای مدیران عرصه‌های منابع طبیعی مفید باشد. آرخی و همکاران (۱۴۰۳) در تحقیق خود پهنه‌بندی خطر سیلاب تحت تاثیر تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو، استان گلستان). نتایج نشان داد که بر اساس برآورد مدل LARS-WG برای سناریوهای مورد بررسی در دوره‌های آبی میانگین دمای حوضه آبخیز قره‌سو به میزان ۰/۵۶ تا ۴ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. مقدار بارش نیز در مقایسه با دوره پایه به میزان ۱۰ تا ۲۴ درصد کاهش نشان می‌دهد. در پایان نیز سیلاب حوضه مورد مطالعه با تلفیق نقشه متوسط رواناب تحت سناریو A2، فاصله از رودخانه و ضریب شکل حوضه با استفاده از روش Fuzzy-AHP در محیط GIS پهنه‌بندی شده است. با توجه به پهنه‌بندی، ۴۴ درصد در خطر زیاد و بسیار زیاد می‌باشد. پناهی و همکاران (۱۴۰۳) در مقاله‌ای تحت عنوان سنجش و پیش‌بینی پتانسیل وقوع سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود) با استفاده از مدل LARS-WG و HadCM3 تحت سناریو SRA1B بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵ برآورد شده است. نتایج نشان داده‌اند که تغییر اقلیم و ساختار محیط طبیعی در منطقه پیامدها و اثراتی از جمله تغییر الگوی بارش، به وجود آمدن ناهمگنی در سری داده‌های تاریخی، تغییر سطح آب رودخانه‌ها و کاهش تولیدات کشاورزی، تغییر در ترکیب و تولید گیاهی مراتع، تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، بروز مشکلات اجتماعی و اقتصادی و ... بوجود آورده است. بنابراین اطلاع از چگونگی رخداد تغییرات بارندگی و دما و ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم در آینده، با توجه به اهمیت اکولوژیکی، زیباشناختی و اقتصادی-اجتماعی تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلمانگل (استان گلستان) و نقش مهمی که این تالاب‌ها در حیات منطقه و استان گلستان دارد، ضروری است. به ویژه اینکه می‌تواند در مدیریت محیط زیستی به خصوص در مدیریت منابع آب و خشکسالی، کشاورزی پایدار در منطقه، جلوگیری از بروز سیلاب‌های فصلی و پیشگیری از فرسایش خاک در حوضه، مؤثر واقع شود. هدف اصلی این تحقیق بررسی تغییرات دما، بارش و شاخص‌های اقلیمی در تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلمانگل می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تالاب‌های بین‌المللی آلاگل، آجی گل و آلاگل در استان گلستان و در نزدیکی مرز ایران و ترکمنستان در فاصله نزدیکی نسبت به هم در بخش‌داشلی برون واقع شده‌اند. آلاگل با وسعت ۲۵۰۰ هکتار در ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی، آجی گل با ۳۲۰ هکتار وسعت در شمال شرقی تالاب آلاگل با مختصات ۳۷ درجه و ۲۴ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و تالاب آلاگل با مساحت ۲۰۷ هکتار در شمال تالاب آجی گل با مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی است. ارتفاع زمین از سطح دریای آزاد در عمیق‌ترین نقاط تالاب در آلاگل (۶-) و در تالاب‌های آجی گل و آلاگل (۴-) گزارش شده است. خاک‌های منطقه متعلق به دوران چهارم زمین‌شناسی و از اراضی پست محسوب می‌شود که مواد اولیه تشکیل دهنده آن را سنگ آهک، ماسه و شیست تشکیل می‌دهند. کوه‌های اطراف این منطقه اکثراً از سنگ‌های آهکی و سنگ‌های آتشفشانی مربوط به دوره کرتاسه میانی است. سنگ‌های میوسن بالایی و تحتانی به مقدار کم در کوه‌های اطراف منطقه وجود دارند. آب و هوای منطقه، مدیترانه‌ای گرم و دارای تابستان‌های خشک و گرم و زمستان‌های ملایم است. میزان بارندگی سالیانه ۳۰۰-۲۵۰ میلی‌متر است - تنها در دی و بهمن میزان بارندگی از تبخیر بیشتر است - میزان رطوبت نیز بین ۲۶ تا ۱۰۰ درصد و تبخیر سالیانه ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ میلیمتر متغیر است. جهت وزش باد نیز در این منطقه از غرب به شرق است. دما در تابستان ۴۶ درجه و در زمستان ۱۲- درجه سانتی‌گراد گزارش شده است، اما به طور متوسط حداقل ۵- و حداکثر ۴۲ درجه سانتی‌گراد است.



شکل (۱) نقشه موقعیت تالاب‌های آلاگل، آلاگل و آجی گل در استان گلستان و ایران

(ترسیم: نگارنده‌گان، ۱۴۰۳)

پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع مورد بررسی، از نوع توصیفی-تحلیلی است و از نوع مطالعات کاربردی با تأکید بر روش‌های کمی است، در تحقیق حاضر ارزیابی تغییرات اقلیم بر اکوسیستم‌های تالابی با استفاده از مدل^۱ GCM انجام گرفت

^۱. General Circulation Model

به منظور اجرا از آمار ایستگاه هواشناسی که دارای آمار ۲۰ ساله میانگین بارش و میانگین دما در فواصل سال‌های (۲۰۰۱-۲۰۲۰) بوده‌اند و در مقیاس ماهانه و سالانه استفاده شده است. این اطلاعات از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو اخذ شد. در تحقیق حاضر پیش‌بینی داده‌های بارش و دما با استفاده از خروجی‌های مدل HadCM3 انجام شده است. این مدل از نوع مدل‌های گردش عمومی جفت شده جو-اقیانوسی (AOGCM^۱) است. از نرم‌افزار ArcGIS10.8 مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات و اعتبار سنجی مدل، استفاده گردیده است. داده‌های شبیه‌سازی شده میانگین بارندگی حاصل از مدل Hadcm3^۲ در LARS-WG تحت سناریو SRA1B بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ برآورد شده است بدین منظور جهت انتخاب بهترین روش درونیابی از شاخصهای آماری خطای میانگین مربعات از قبیل RMSE، ME و MSE استفاده گردید. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

جدول (۱) مشخصات ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	اینچه‌برون	کلیما تولوژی	۱۰	۵۴/۷۲	۳۷/۴۵

در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG و اطمینان بیشتر از توانایی آن در پیش‌بینی پارامترهای آب و هوایی دما و بارش، علاوه بر آزمون‌های آماری (Chi-square و t-test, F-test) که در خود مدل در مرحله اعتبارسنجی صورت می‌گیرد، شاخص‌های عملکردی، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز به کار گرفته شده است. ضریب تبیین معیاری بدون بعد است و بهترین مقدار برای آن برابر یک است. میانگین خطای مدل و مجذور میانگین مربعات خطا، نشان‌دهنده میزان خطای مدل هستند و بهترین مقدار برای آن‌ها برابر صفر است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \mu_y)^2}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

در روابط فوق X_i و Y_i به ترتیب i امین داده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل هستند. μ_x و μ_y میانگین کل داده‌های X_i و Y_i در جامعه آماری و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی هستند.

پس از بررسی نتایج مرحله واسنجی و مقادیر بالای ضریب تعیین و مقادیر پایین شاخص‌های خطاسنجی محاسبه شده، از قابلیت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی اطمینان حاصل شد. سپس این مدل جهت ریزمقیاس نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو و تولید داده مصنوعی برای دوره آبی با استفاده از سه سناریوی B1، A2 و AIB (به ترتیب خوشبینانه، بدبینانه و متوسط) تأیید شده توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و مدل Hadcm3 اجرا شد. بدین ترتیب مقادیر روزانه پارامترهای مذکور برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ تولید گردید. خصوصیات سناریوهای اقلیمی مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- A1B: رشد سریع اقتصادی، بیشینه رشد جمعیت در نیمه قرن و پس از آن روند کاهشی، رشد سریع فناوری‌های نوین و مؤثر.
B1: همگرایی جمعیت در سطح جهان، تغییر در ساختار اقتصاد (کاهش مواد آلاینده و معرفی منابع فناوری پاک و مؤثر).

^۱. Atmosphere-Ocean General Circulation Model

^۲. Hadley Centre Coupled Model, version 3

A2: رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت سریع اقتصادی.

نتایج و بحث

به منظور آشکارسازی تغییرات بلند مدت اقلیمی به کمک آزمون‌های غیرپارامتری، اقدام به تعیین روند سری‌های زمانی با استفاده از آزمون Mann-Kendall شد و سپس رخداد جهش در سری زمانی از طریق Kruskal-Wallis مشخص می‌شود. از آنجا که تجزیه و تحلیل سری زمانی در اقلیم‌شناسی مبتنی بر تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی گسسته در قلمرو زمان است، بنابراین ابتدا غیرتصادفی بودن داده‌ها و وجود همگنی در آنها را بررسی می‌کنیم. بنابراین در صورتی که عدم همگنی در سری داده‌هایی تأیید شود، احتمال وجود روند یا جهش در این داده‌ها وجود دارد. بدین ترتیب این آزمون‌ها برای تمامی سری‌های زمانی بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل ایستگاه مورد مطالعه در منطقه مورد مطالعه در مقیاس فصلی و سالانه صورت گرفت. آماره‌های به دست آمده از این آزمون‌ها مربوط به پارامترهای بارش متوسط، دمای حداکثر و دمای حداقل به ترتیب در جداول (۲، ۳ و ۴) مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که مقادیر مثبت و منفی آماره آزمون روند به ترتیب نشان دهنده روند صعودی و نزولی در سری زمانی مورد بررسی است.

جدول (۲) نتایج آزمون‌های همگنی، روند و جهش بارش متوسط ایستگاه اینچه برون

سری زمانی	آزمون‌های همگنی		آزمون روند	آزمون جهش	
	انحراف تجمعی	ران - تست		کروسکال - والیس	نقطه جهش
سالانه	۰/۰۴	۰/۲۹	۰/۱۶	-۲/۰۲۵	۲۶/۲۹
پاییز	۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۵۱	۱/۹۲	۱۴/۲۹
زمستان	۰/۰۲۵	۰/۳۰۵	-۰/۱۸۵	-۰/۳۴	۱۱
بهار	۰/۰۱۵	۰/۳۴	-۰/۱۶	۱/۱۹	۱۰/۱۸
تابستان	۰/۰۳	۰/۲۱۵	-۰/۶۳	-۳/۳۲۵	۲۲/۱۵

جدول (۳) نتایج آزمون‌های همگنی، روند و جهش دمای حداکثر ایستگاه اینچه برون

سری زمانی	آزمون‌های همگنی		آزمون روند	آزمون جهش	
	انحراف تجمعی	ران - تست		کروسکال - والیس	نقطه جهش
سالانه	۰/۰۴۵	۰/۰۰۲	۱/۷۲	۳/۶۷	۱۰/۲۸
پاییز	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۷۶۵	-۲/۸۹	۲/۲۸
زمستان	۰/۰۰۵	۰/۱۸	۱/۲۹	۲/۳۴	۱۰/۲۸
بهار	۰/۰۵۵	۰/۰۵	۱/۱۱	۳/۰۹۵	۱۰/۱۸
تابستان	۰/۰۶۵	۰/۳	۲/۱۸	-۳/۲۷	۵/۱۵

جدول (۴) نتایج آزمون‌های همگنی، روند و جهش دمای حداقل ایستگاه اینچه برون

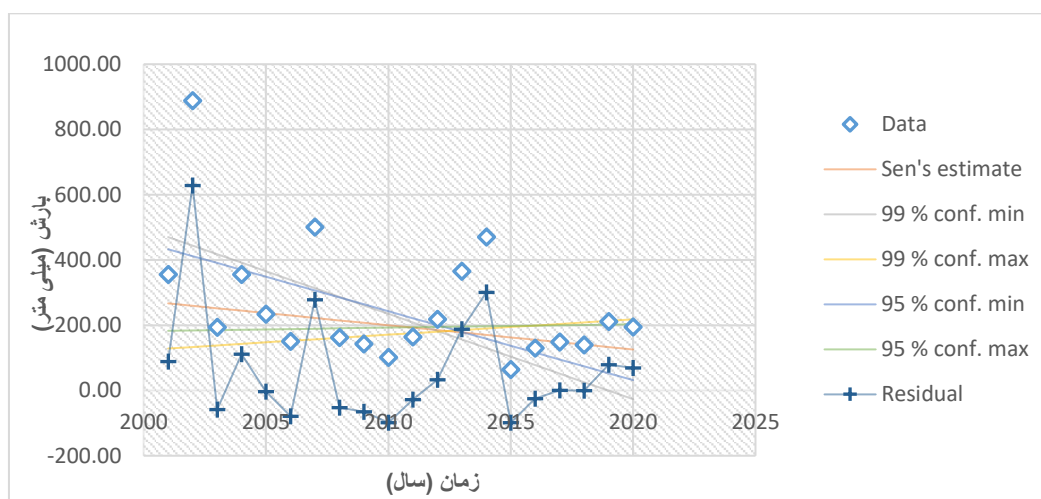
سری زمانی	آزمون‌های همگنی		آزمون روند	آزمون جهش	
	انحراف تجمعی	ران - تست		کروسکال - والیس	نقطه جهش
سالانه	۰/۱۳۵	۰/۱۸	۱/۰۶	۳/۲۵	۱۰/۲۸
پاییز	۰/۱۰۵	۰/۳۶	۰/۲۳	-۲/۷۲	۲/۱۶
زمستان	۰/۰۳	۰/۴۸	۰/۹۵	۲/۳۹	۱۰/۲۸
بهار	۳/۲۵	۰/۲۹	۰/۹۲	۲/۵۱	۱۰/۱۸
تابستان	۰/۰۶	۰/۲۹	۰/۳۳	-۲/۲۲	۱۰/۱۳

در آزمون‌های همگنی، فرض صفر آزمون مبنی بر همگن بودن داده‌ها است. چنانچه آماره آزمون در ناحیه بحرانی قبول فرض صفر قرار گیرد، همگن بودن داده‌ها تأیید می‌گردد. در غیر این صورت عدم همگنی سری مورد تأیید است. با توجه به جداول ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که هر سری زمانی که روند معنی‌دار آن به وسیله آزمون من-کندال تأیید شده است، عدم همگنی آن نیز به وسیله آزمون‌های انحراف تجمعی و ران-تست تأیید می‌شود. به طور مثال دمای حداقل سالانه در ایستگاه اینچه‌برون دارای روند افزایشی بوده و از آنجایی که P-value آن بیشتر از ۰/۰۵ بوده فرض صفر مبنی بر همگنی آن رد می‌شود. در بعضی از سری‌های زمانی مورد آزمون، همگنی سری مورد نظر توسط آزمون‌های همگنی تأیید شده است و روند معنی‌دار نیز در این سری‌ها توسط آزمون روند اثبات نشده است.

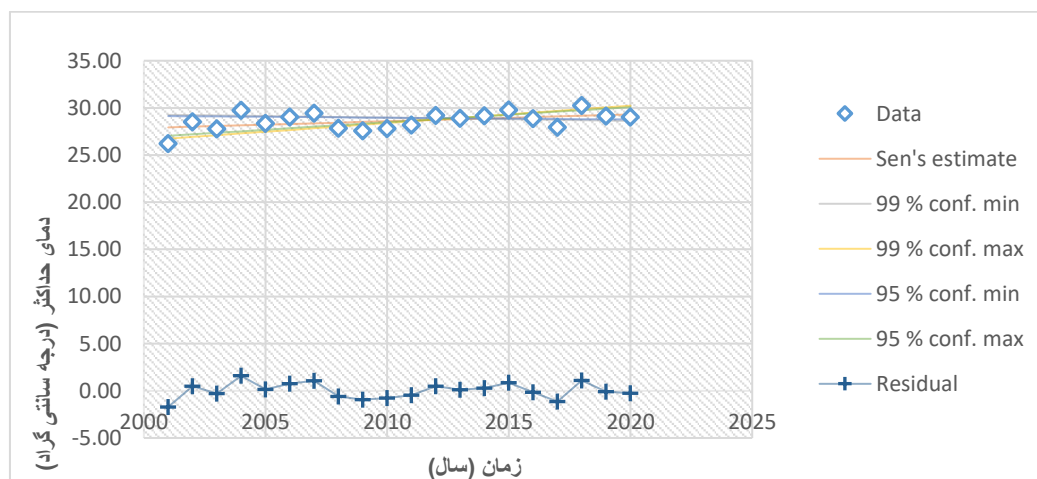
برای انجام آزمون جهش، ابتدا باید نقاط احتمالی که جهش (تغییر میانگین) در آن‌ها رخ داده است، تعیین شوند. برای تعیین این نقاط نیز از آزمون‌های همگنی استفاده شده است. مقادیر حداکثر و حداقل در هر کدام از آزمون‌های همگنی، یک برآورد مناسب از نقطه تغییر میانگین را ارائه می‌دهند. در نتیجه با استفاده از محل رخداد حداکثر و حداقل مقادیر، محل احتمالی جهش در سری زمانی مورد آزمون مشخص شده است. نقاط جهش که در جداول ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، بیان کننده سال وقوع جهش در سری مورد بررسی هستند. به طور کلی می‌توان گفت که در رابطه با آزمون تعیین روند Mann-Kendall اگر آماره آزمون بیشتر از ۱/۹۶ و یا کمتر از ۱/۹۶ باشد، فرض صفر مبنی بر فاقد روند بودن سری زمانی رد می‌شود. اما اگر آماره مربوطه بین مقادیر بحرانی بیان شده قرار گیرد، فرض صفر قبول است و سری فاقد روند تشخیص داده می‌شود.

بررسی روند تغییرات دما و بارش در دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱

ایستگاه اینچه برون به عنوان ایستگاه مبناء برای بررسی تغییرات اقلیمی منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد که در ادامه به بحث و بررسی تغییرات بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل در این ایستگاه در دوره پایه و آینده پرداخته می‌شود. در ابتدا روند تغییر دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش در دوره پایه ۲۰۲۰-۲۰۰۱ مورد بررسی قرار گرفت. مجموع بارش سالانه ایستگاه اینچه‌برون در دوره اقلیمی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ برابر با ۲۵۹/۷ میلیمتر می‌باشد. مقادیر حداقل و حداکثر آن مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۰۲ میلادی با مقادیر به ترتیب ۶۳/۸۵ و ۸۸۸ میلی‌متر بوده است.



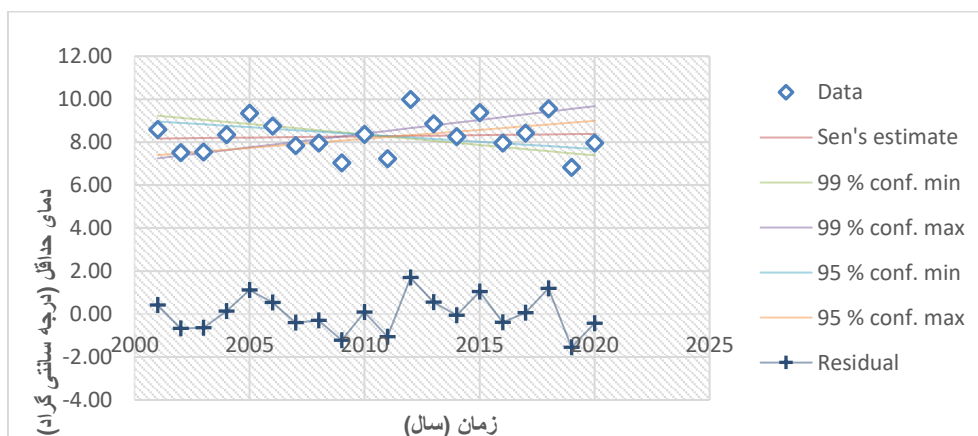
شکل (۲) خط روند بارندگی سالانه در ایستگاه اینچه برون طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱



شکل (۳) خط روند دمای حداکثر سالانه در ایستگاه اینچه برون طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱

شکل (۲) خط روند بارندگی سالانه در ایستگاه اینچه برون در دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱ را نشان می‌دهد. طبق این نمودار، شیب خط روند منفی می‌باشد که حاکی از کاهش باران در طول سال‌های این دوره است. طبق این نمودار می‌توان انتظار داشت که در دوره آینده این روند ادامه پیدا کند و بارش کاهش یابد. در بین سال‌های مطالعاتی، کمترین دمای حداکثر در ایستگاه اینچه برون مربوط به سال ۲۰۰۱ میلادی با دمای حداقل ۲۶/۲۳ درجه سانتی‌گراد و بالاترین دمای حداکثر مربوط به سال ۲۰۱۸ میلادی با دمای ۳۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. طبق این اطلاعات، دامنه تغییرات دمای حداکثر حدود ۴ درجه سانتی‌گراد و نسبتاً پایین می‌باشد.

شکل (۳) خط روند دمای حداکثر سالانه در ایستگاه اینچه برون در دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱ را نشان می‌دهد. طبق این نمودار، شیب خط روند مثبت می‌باشد که حاکی از افزایش دما در طول سال‌های گذشته است. طبق این نمودار می‌توان انتظار داشت که در دوره آینده این روند ادامه پیدا کند و هم‌چنان افزایش دما حداکثر ادامه یابد.



شکل (۴) خط روند دمای حداقل سالانه در ایستگاه اینچه برون طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱

شکل (۴) خط روند دمای حداقل سالانه در ایستگاه اینچه برون در دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱ را نشان می‌دهد. طبق این نمودار، شیب خط روند مثبت می‌باشد که حاکی از افزایش دمای حداقل در طول سال‌های گذشته است. طبق این نمودار می‌توان انتظار داشت که در دوره آینده این روند ادامه پیدا کند و هم‌چنان افزایش دمای حداقل ادامه یابد. در بین سال‌های مطالعاتی کمترین دمای حداقل مربوط به سال ۲۰۱۹ میلادی با دمای ۶/۸۲ درجه سانتی‌گراد و بالاترین دمای حداقل مربوط به سال‌های ۲۰۱۲ میلادی

با دمای ۹/۹۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. طبق این اطلاعات، دامنه تغییرات دمای حداقل حدود ۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که نسبت به دمای حداکثر این دامنه کمتر می‌باشد. جدول ۵، شیب روند بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را طی دوره پایه نشان می‌دهد. طبق این جدول و نمودارهای ارائه شده در بالا، در دوره گذشته دما افزایش و بارش کاهش یافته است. همچنین شیب افزایش دمای حداکثر بیشتر از افزایش دمای حداقل می‌باشد.

جدول (۵) شیب روند دما و بارش سالانه در ایستگاه اینچه برون طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰

پارامتر اقلیمی	بارش	دمای حداکثر	دمای حداقل
شیب روند	-۱۴/۲	۰/۰۷۴	۰/۰۰۹۸

نتایج اجرای مدل LARS-WG¹

همان‌طور که بیان شد، نرم‌افزار LARS-WG پیش از تولید داده‌های آینده بر اساس سناریوهای اقلیمی اقدام به بازتولید داده‌های دوره پایه بر اساس پارامترهای اقلیمی این دوره می‌کند. سپس با استفاده از روش‌های آماری به مقایسه داده‌های مصنوعی و مشاهداتی می‌کند. جدول ۶ نتایج آزمون‌های Chi-square، t و F پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را در ایستگاه اینچه برون نشان می‌دهد. سطح معنی داری برای این آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. همچنین، نتایج آزمون t در مورد بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر نشان می‌دهد که با اطمینان ۹۵٪ فرض صفر قابل قبول است. در واقع، میانگین داده‌های مشاهداتی و باز تولید شده مشابه هستند. آزمون F جهت مقایسه واریانس‌های داده‌های مشاهداتی و مصنوعی به کار می‌رود. اما مدل LARS-WG این آزمون را تنها برای داده‌های بارش انجام می‌دهد. زیرا داده‌های بارش تغییرپذیری زیادی دارند و از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. نتیجه آزمون F برای پارامتر بارش نشان می‌دهد که به جز ماه‌های آگوست و ژولای در بقیه ماه‌ها P-Value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ بوده و فرض صفر مبنی بر برابری واریانس‌ها پذیرفته می‌شود. بنابراین با توجه به مقادیر به دست آمده نتیجه می‌گیریم که عملکرد مدل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی دمای حداقل و حداکثر بسیار خوب است و در مورد بارش، عملکرد آن در حد قابل قبول است. زیرا با بررسی داده‌های مشاهداتی اصلی در منطقه، مشاهده می‌شود بارش در این دو ماه پراکندگی و تغییرات زیادی دارد.

جدول (۶) مقادیر آزمون‌های t و F محاسباتی توسط مدل LARS-WG در مرحله اعتبار سنجی در ایستگاه اینچه برون

پارامتر	بارش		دمای حداقل		دمای حداکثر	
	آزمون t	آزمون F	آزمون t	آزمون F	آزمون t	آزمون F
ژانویه	۰/۳۲۳	۱/۳۹۳	۰/۹۳۴	۹/۳۱۷	۰/۹۲۳	۹/۱۱۵
فوریه	۰/۰۷۵	۱/۲۶۷	۰/۸۴۶	۴/۳۸۸	۰/۰۲۴	۲/۸۷۵
مارس	۰/۷۴۷	۱/۸۸۷	۰/۴۱۵	۶/۳۶۶	۰/۹۷۱	۱۱/۶۶۸
آوریل	۰/۶۳۱	۱/۰۸۰	۰/۴۱۲	۲/۷۰۵	۰/۵۹۲	۵/۹۱۹
می	۰/۳۹۸	۵/۹۲۳	۰/۴۳۰	۳/۱۹۸	۰/۹۹۷	۰/۷۰۸
ژوئن	۰/۲۳۸	۵/۱۳۹	۰/۷۶۹	۶/۰۱۳	۰/۷۰۸	۳/۳۰۸
جولای	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۱۵۸	۸/۱۶۸	۰/۴۰۵	۲/۷۹۸
آگوست	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۱۱	۱۲/۱۱۸	۰/۶۶۰	۱/۶۳۹
سپتامبر	۰/۰۰	۹/۴۴۵	۰/۲۲۷	۴/۲۷۵	۰/۱۶۲	۲/۴۶۸
اکتبر	۰/۰۳۲	۵/۶۶۴	۰/۳۱۴	۱۴/۱۰۶	۰/۲۲۰	۱۴/۷۴۸
نوامبر	۰/۱۸	۲/۲۷۶	۰/۰۰۸	۶/۱۸۲	۰/۵۵۸	۴/۱۵۳
دسامبر	۰/۵۶۲	۱/۹۵۱	۰/۵۸۰	۴/۵۲۱	۷/۲۵۴	۰/۰۰۰

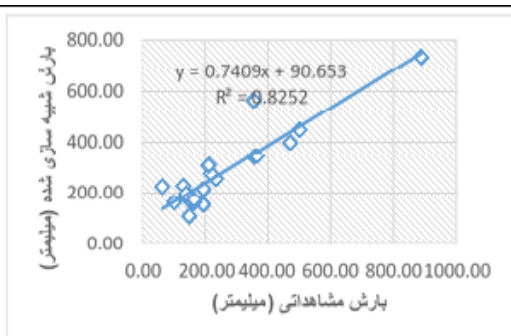
¹. Lang Ashton Research Station Weather Generator

با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE)، ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های واقعی (مشاهده شده) موجود در دوره پایه، انجام شد. جدول ۶، نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های واقعی دوره پایه را نشان می‌دهد. چنانچه در جدول مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین در همه موارد از میزان قابل توجهی برخوردار می‌باشد. نزدیکی این مقدار به یک، دقت مدل را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

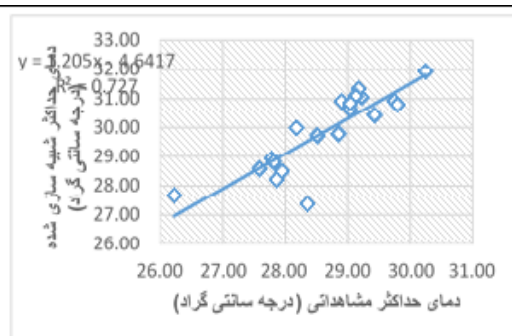
جدول (۷) مقادیر آماره‌های واسنجی جهت ارزیابی مدل LARS-WG در دوره پایه (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

پارامترهای آماری	بارش (mm)	دمای حداقل (C)	دمای حداکثر (C)
MAE	۱/۶	۰/۸۷	۰/۹۳
RMSE	۲/۶	۰/۲۴	۰/۳۳
R ²	۰/۸۲۵۲	۰/۷۲۷	۰/۸۰۳۴

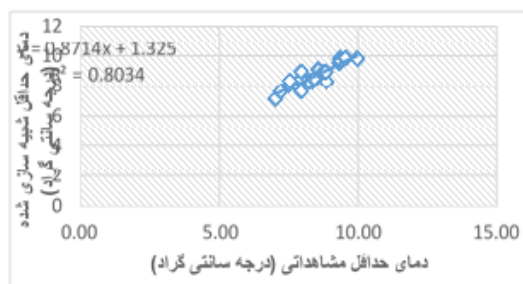
اشکال (۵)، (۶) و (۷) مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهداتی در ایستگاه اینچه‌برون برای پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را نشان می‌دهد. همان گونه که این نمودارها نشان می‌دهند مقادیر ضریب تعیین برای تمامی متغیرهای اقلیمی بالا است. همچنین مقادیر شاخص‌های خطاسنجی در جدول ۶، نیز نسبتاً پایین می‌باشد که موید انطباق نسبی و قابل قبول مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده دوره پایه است. لذا با توجه به این موارد، قابلیت و توانایی مدل در داده‌سازی مورد تایید قرار گرفت و پس از آن شبیه‌سازی داده‌ها برای دوره آینده صورت گرفت.



شکل (۶): مقایسه دمای حداکثر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده



شکل (۵): مقایسه بارش مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده



شکل (۷): مقایسه دمای حداقل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده

نتایج ریزمقیاس کردن و تولید داده برای دوره آینده

پس از تعیین سناریوها و مدل‌های اقلیمی مورد نظر، تولید داده برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ انجام شد و پس از آن خروجی‌های مدل برای هر متغیر اقلیمی (درجه حرارت حداقل، درجه حرارت حداکثر و بارش) به صورت ماهانه میانگین‌گیری شد. در ابتدا از داده‌های اقلیمی تولید شده توسط مدل اقلیمی Hadcm3 تحت سه سناریو B1، A1B و A2 میانگین‌گیری صورت گرفت و میانگین دو مدل تحت سه سناریو مورد بررسی قرار گرفت. جدولهای ۸ و ۹، نتایج تولید داده‌های دمای حداکثر و دمای حداقل در ایستگاه اینچه‌برون توسط سه سناریو در دوره آتی و همچنین مقادیر این پارامترها را برای دوره پایه نشان می‌دهد. همانطور که در این جدولها نشان داده شده است، تمامی سناریوها دمای بیشتری را در دوره آتی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند. به طوری که انتظار می‌رود دمای منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بین ۰/۵ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد. نتایج حاکی از افزایش دما در همه ماه‌ها برای تمامی سناریوهای اقلیمی است. به طور کلی، دمای سالانه نیز افزایش پیدا می‌کند و با توجه به اینکه سناریو A2 به عنوان بحرانی‌ترین سناریو محسوب می‌شود بالاترین مقدار افزایش دما و سناریو B1 که سناریو خوش‌بینانه معرفی شده کمترین مقدار افزایش و سناریو A1B به عنوان سناریو میانه، افزایش دما در حد متوسط را نشان می‌دهد.

جدول (۸) مقادیر دمای حداکثر دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

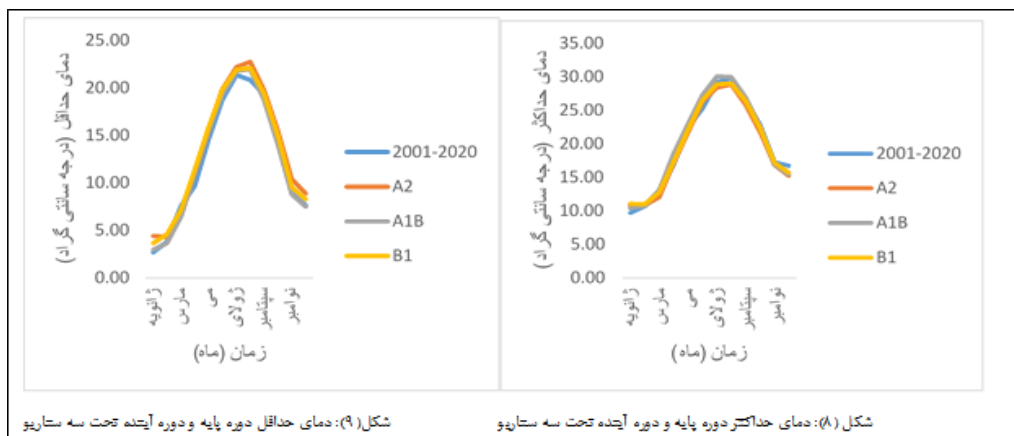
ماه	دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰	دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰		
		A2	A1B	B1
ژانویه	۹/۷۰	۱۰/۸۶	۱۰/۴۲	۱۱/۰۸
فوریه	۱۰/۶۹	۱۰/۸۴	۱۰/۷۸	۱۱/۰۰
مارس	۱۳/۰۵	۱۲/۰۸	۱۳/۱۱	۱۲/۷۵
آوریل	۱۶/۸۹	۱۷/۱۹	۱۸/۵۳	۱۷/۳۲
می	۲۲/۵۲	۲۱/۷۲	۲۳/۰۳	۲۲/۱۵
ژوئن	۲۵/۲۵	۲۶/۳۹	۲۷/۲۸	۲۶/۵۱
ژوئیه	۲۹/۲۴	۲۸/۴۳	۳۰/۰۹	۲۸/۹۰
آگوست	۲۹/۷۷	۲۸/۸۶	۲۹/۹۹	۲۹/۰۲
سپتامبر	۲۶/۳۷	۲۵/۸۲	۲۶/۹۴	۲۶/۳۶
اکتبر	۲۲/۸۸	۲۱/۸۲	۲۲/۶۳	۲۲/۴۰
نوامبر	۱۷/۲۵	۱۶/۸۸	۱۶/۸۷	۱۷/۱۸
دسامبر	۱۶/۷۴	۱۵/۲۲	۱۵/۴۰	۱۵/۷۰
سالانه	۲۰/۰۳	۱۹/۶۷	۲۰/۴۲	۲۰/۰۳

جدول (۹) مقادیر دمای حداقل دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

ماه	دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰	دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰		
		A2	A1B	B1
ژانویه	۲/۶۶	۴/۴۱	۲/۹۵	۳/۶۴
فوریه	۳/۸۱	۳/۳۴	۳/۶۷	۴/۵۸
مارس	۷/۵۶	۶/۵۷	۶/۴۳	۷/۱۴
آوریل	۹/۶۶	۱۰/۹۶	۱۱/۱۵	۱۱/۳۵

می	۱۴/۵۹	۱۵/۴۹	۱۵/۶۱	۱۵/۸۸
ژوئن	۱۸/۷۶	۱۹/۸۷	۱۹/۳۵	۱۹/۸۴
ژولای	۲۱/۳۶	۲۲/۱۸	۲۱/۷۹	۲۱/۹۰
آگوست	۲۰/۸۳	۲۲/۷۴	۲۱/۹۵	۲۲/۰۸
سپتامبر	۱۹/۳۱	۱۹/۸۰	۱۸/۷۳	۱۹/۴۰
اکتبر	۱۴/۵۱	۱۵/۴۲	۱۳/۹۸	۱۴/۹۴
نوامبر	۸/۹۹	۱۰/۴۰	۸/۸۰	۹/۵۴
دسامبر	۷/۶۱	۸/۸۶	۷/۴۸	۸/۲۷
سالانه	۱۲/۴۷	۱۳/۴۲	۱۲/۶۶	۱۳/۲۱

شکل‌های (۸ و ۹) روند تغییرات دمای حداکثر و حداقل را در دوره پایه و آتی تحت سه سناریو نشان می‌دهند. در این اشکال به خوبی نتایج ذکر شده قابل رویت است. طبق نمودارهای بالا، دمای حداقل و حداکثر در تمامی ماه‌های سال افزایش می‌یابد. افزایش دما با افزایش تبخیر و تعرق و تاثیرگذاری روی ذوب برف می‌تواند پیامدهای متعددی در بیلان آب تالاهای مورد مطالعه داشته باشد. جدول ۱۰، تغییرات دمای حداکثر در دوره آتی نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. طبق این جدول، دما در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش دما در سه سناریوی مورد بررسی در ماه آگوست یا اواسط تابستان می‌باشد و کمترین افزایش دما در ماه ژانویه یا اوایل زمستان می‌باشد. به طور کلی دمای حداکثر در سناریوی بدبینانه A2 حدود ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد و در سناریو خوشبینانه B1 حدود ۰/۷۱ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی افزایش می‌یابد.



شکل (۹): دمای حداقل دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

شکل (۸): دمای حداکثر دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

جدول (۱۰) تغییرات ماهانه و سالانه دمای حداکثر برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مبنا تحت سناریوها مختلف

ماه	دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰		
	A2	A1B	B1
ژانویه	۱/۱۶	۰/۷۲	۱/۳۸
فوریه	۱/۱۴	۱/۰۸	۱/۳۰
مارس	۲/۳۸	۳/۴۱	۳/۰۵
آوریل	۷/۴۹	۸/۸۳	۷/۶۲
می	۱۲/۰۲	۱۳/۳۳	۱۲/۴۵

ژوئن	۱۶/۵۹	۱۷/۵۸	۱۶/۸۱
ژوئای	۱۸/۷۳	۲۰/۳۹	۱۹/۲۰
آگوست	۱۹/۱۶	۲۰/۲۹۲	۱۹/۳۲
سپتامبر	۱۶/۱۲	۱۷/۲۴	۱۶/۶۶
اکتبر	۱۲/۱۲	۱۲/۹۳	۱۲/۷۰
نوامبر	۷/۱۸	۷/۱۷	۷/۴۸
دسامبر	۵/۵۲	۵/۷۰	۶/۰۰
سالانه	۹/۹۷	۱۰/۷۲	۱۰/۳۳

جدول (۱۱) تغییرات درجه حرارت حداقل در دوره آتی نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. طبق این جدول، دما در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش دما در سه سناریوی مورد بررسی، در ماه آگوست یا اواسط تابستان می‌باشد و کمترین افزایش دما در سه سناریو، در ماه مارس یا اوایل بهار می‌باشد. به طور کلی دمای حداقل در سناریو بدبینانه A2 حدود ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد و در سناریو خوش‌بینانه B1 حدود ۱/۳ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی افزایش می‌یابد. بنابراین طبق نتایج انتظار می‌رود بازخورد بارزی در بیلان آبی منطقه به دلیل کاهش پوشش برف در اثر افزایش دما و افزایش تبخیر به وجود آمده و همچنین پتانسیلی برای تغییر در وقایع جوی و هیدرولوژی تالاب آلاگل، آجی گل و آلاگل به وجود آید.

جدول (۱۱) تغییرات ماهانه و سالانه دمای حداقل برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مبنای سناریوهای مختلف

	سال	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اگوست	ژولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه
A2	۰/۹۵	۱/۲۵	۱/۴۱	۰/۹۱	۰/۴۹	۱/۹۱	۰/۸۲	۱/۱۱	۰/۹۰	۱/۳۰	۰/۹۹	۰/۵۳	۱/۷۵
A1B	۰/۱۹	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۵۳	۰/۵۸	۱/۱۲	۰/۴۳	۰/۵۹	۱/۰۲	۱/۴۹	۱/۱۳	۰/۱۴	۰/۲۹
B1	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۵۵	۰/۴۳	۰/۰۹	۱/۲۵	۰/۵۴	۱/۰۸	۱/۲۹	۱/۶۹	۰/۴۲	۰/۷۷	۰/۹۸

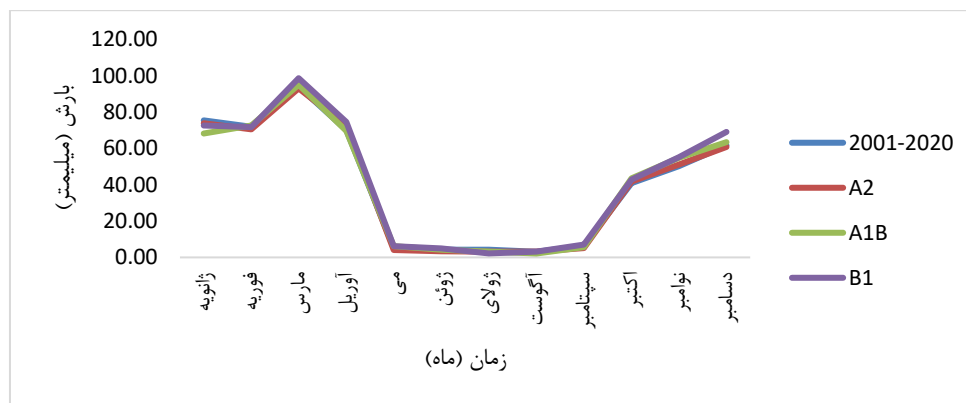
جدول (۱۲) نتایج تولید داده‌های بارندگی در ایستگاه اینچه‌برون توسط سه سناریو در دوره آتی و نیز مقادیر این پارامتر را در دوره پایه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، بیشترین و کمترین بارش منطقه در دوره پایه به ترتیب در ماه مارس و آگوست با مقادیر ۹۴/۰۵ و ۳/۱۲ میلی‌متر است. طبق نتایج جدول تمامی سناریوها کاهش بارندگی را در دوره آتی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند.

جدول (۱۲) مقادیر بارش در دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

ماه	دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱	دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱		
		A2	A1B	B1
ژانویه	۷۵/۵۴	۷۳/۹۶	۶۸/۳۱	۷۲/۵۷
فوریه	۷۱/۹۹	۷۰/۵۸	۷۲/۶۲	۷۱/۷۴
مارس	۹۴/۰۵	۹۳/۱۲	۹۵/۰۸	۹۸/۷۲
آوریل	۷۰/۱۲	۷۲/۴۶	۶۹/۶۷	۷۴/۵۳
می	۵/۱۲	۴/۱۳	۶/۱۵	۶/۱۹
ژوئن	۴/۱۶	۳/۲۹	۴/۱۸	۵/۰۴
ژوئای	۴/۲۹	۳/۱۷	۳/۱۵	۲/۱۹

۳/۱۱	۲/۱۵	۳/۲۱	۳/۱۲	آگوست
۷/۱۳	۵/۶۱	۵/۱۸	۶/۳۵	سپتامبر
۴۲/۷۸	۴۳/۵۶	۴۱/۸۵	۴۰/۹۳	اکتبر
۵۵/۱۷	۵۴/۸۳	۵۱/۱۵	۵۰/۲۷	نوامبر
۶۹/۱۲	۶۳/۵۷	۶۰/۹۱	۶۱/۷۴	دسامبر
۴۲/۳۶	۴۰/۷۴	۴۰/۲۵	۴۰/۶۴	سالانه

شکل (۱۰) نمودار بارش در دوره پایه و دوره آتی تحت سه سناریو و در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. طبق این شکل در رفتار و الگوی بارش تغییراتی مشاهده می‌شود. به طوری که ماکزیمم بارش به انتهای فصل سرد جابه‌جا می‌شود همچنین کاهش بارش در انتهای فصل پاییز و ابتدای فصل زمستان خطری جدی در اثر تغییر اقلیم برای منطقه می‌باشد.



شکل (۱۰) بارش شبیه سازی شده تحت سه سناریو و مشاهداتی

طبق جدول (۱۳) که درصد تغییرات بارندگی در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت سه سناریو را نشان می‌دهد بارش در اکثر ماه‌ها کاهش پیدا کرده است. میزان بارندگی منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بین ۶ تا ۸ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. به طور کلی بارندگی سالانه نیز کاهش پیدا می‌کند و با توجه به اینکه سناریو A2 به عنوان بحرانی‌ترین سناریو محسوب می‌شود، بیشترین مقدار کاهش بارش و سناریو B1 که سناریو خوش‌بینانه معرفی شده کمترین مقدار کاهش و سناریو A1B به عنوان سناریو میانه کاهش بارش در حد متوسط را نشان می‌دهد. همچنین میزان کاهش باران در سناریو A2 در ماه مارس بیش از سایر ماه‌ها و حدود ۷۵ درصد بوده و در سناریو B1 میزان بارش در ماه فوریه بیشتر از ماه‌های دیگر و حدود ۵۵ درصد کاهش یافته است. علاوه بر کاهش بارش که در اکثر ماه‌ها مشاهده می‌شود، در برخی ماه‌ها نیز شاهد افزایش بارش در دوره آتی هستیم. افزایش بارش در ماه‌های خشک سال معنی‌دار نیست.

جدول (۱۳) تغییرات ماهانه و سالانه بارش برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مبنا تحت سناریوهای مختلف

سال	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اگوست	ژولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	
A2	-۳۵/۲۹	-۱۴/۶۳	-۲۴/۳۹	-۳۳/۶۹	-۷۰/۳۶	-۷۳/۳۳	-۷۲/۳۷	-۷۲/۲۵	-۷۱/۴۱	-۳/۰۸	-۵۸/۱۷	-۴/۹۶	-۱/۵۸
A1B	-۳۴/۸۰	-۹۷/۱۱	-۲۰/۷۱	۳۱/۹۸	-۶۹/۹۳	-۷۳/۳۹	-۷۲/۳۹	-۷۱/۳۶	-۶۹/۳۹	-۵/۸۷	-۱۹/۵۴	-۲/۹۲	-۷/۲۳
B1	-۳۳/۱۸	-۶/۴۲	-۲۰/۳۷	-۳۲/۷۶	-۶۸/۴۱	-۷۲/۴۳	۷۳/۳۵	-۷۰/۵۰	-۶۹/۳۵	-۱/۰۱	-۲۳/۱۸	-۳/۸۰	-۲/۹۷

نتیجه گیری

مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهداتی در ایستگاه اینچه برون برای پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تعیین برای تمامی متغیرهای اقلیمی بالا است. نتایج تولید داده‌های دمای حداکثر و دمای حداقل در ایستگاه اینچه برون توسط سه سناریو در دوره آتی، تمامی سناریوها دمای بیشتری را در دوره آتی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند. به طوری که انتظار می‌رود دمای منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بین ۰/۵ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد، دمای حداکثر در سناریوی بدبینانه A2 حدود ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد و در سناریو خوشبینانه B1 حدود ۰/۷۱ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی افزایش می‌یابد، دمای حداقل در سناریو بدبینانه A2 حدود ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد و در سناریو خوشبینانه B1 حدود ۱/۳ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی افزایش می‌یابد. بیشترین و کمترین بارش منطقه در دوره پایه به ترتیب در ماه مارس و آگوست با مقادیر ۹۴/۰۵ و ۳/۱۲ میلی‌متر می‌باشد. طبق نتایج تمامی سناریوها کاهش بارندگی را در دوره آتی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند.

نمودار بارش در دوره پایه و دوره آتی تحت سه سناریو و در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد که در رفتار و الگوی بارش تغییراتی مشاهده می‌شود به طوری که بیشترین بارش به انتهای فصل سرد جابه‌جا می‌شود. همچنین کاهش بارش در انتهای فصل پاییز و ابتدای فصل زمستان خطری جدی در اثر تغییر اقلیم برای منطقه می‌باشد. میزان بارندگی منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بین ۶ تا ۸ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. به طور کلی بارندگی سالانه نیز کاهش پیدا می‌کند و با توجه به اینکه سناریو A2 به عنوان بحرانی‌ترین سناریو محسوب می‌شود، بالاترین مقدار کاهش بارش و سناریو B1 که سناریو خوش‌بینانه معرفی شده کمترین مقدار کاهش و سناریو A1B به عنوان سناریو میانه کاهش بارش در حد متوسط را نشان می‌دهد. همچنین میزان کاهش باران در سناریو A2 در ماه مارس بیش از سایر ماه‌ها و حدود ۷۵ درصد بوده و در سناریو B1 میزان بارش در ماه فوریه بیشتر از ماه‌های دیگر و حدود ۵۵ درصد کاهش یافته است. علاوه بر کاهش بارش که در اکثر ماه‌ها مشاهده می‌شود، در برخی ماه‌ها نیز شاهد افزایش بارش در دوره آتی هستیم. افزایش بارش در ماه‌های خشک سال معنادار نمی‌باشد. نتایج این تحقیق در قسمت مدل‌سازی و سناریوهای اقلیمی (Hadcm3 و سناریوهای A2، A1B1 و B2) و مدل LARS-WG با تحقیقات آرخی و همکاران (۱۴۰۲)، پناهی و همکاران (۱۴۰۲) و کرمی و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت دارد و نیز در قسمت تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تالاب‌ها و محیط طبیعی با تحقیقات (Kim et al., 2011) مشابهت دارد.

پیشنهاده‌ها

- ارزیابی ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیم بر اکوسیستم‌های تالابی آلاگل، آجی گل و آلماگل
- بررسی میزان تاب‌آوری تالاب‌های آلاگل، آجی گل و آلماگل در مقابل تغییرات اقلیمی و ارائه نقشه به منظور مدیریت پهنه‌های با حساسیت بالا.
- پهنه‌بندی ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم در تالاب‌های آلاگل، آجی گل و آلماگل با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور به منظور شناسایی دقیق مناطق مستعد به خشکسالی و مدیریت آن.
- مدل‌سازی خشکسالی تالاب‌های آلاگل، آجی گل و آلماگل با استفاده از سری‌های زمانی.
- مدل‌سازی و پیش‌بینی سطح تراز تالاب و میزان تبخیر-تعرق با استفاده از مدل‌های تغییر اقلیم و تصاویر ماهواره‌ای.

منابع

- آرخی، صالح، گرکز، سمیرا، و عمادالدین، سمیه. ۱۴۰۲. پهنه‌بندی خطر سیلاب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو، استان گلستان). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۱۴(۱)، ۱-۲۶.

- پناهی، عبدالحافظ، جانباز قبادی، غلامرضا، متولی، صدرالدین، و خالدی، شهریار. ۱۴۰۲. سنجش و پیش‌بینی پتانسیل وقوع سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود). مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی، ۴(۲)، ۴۵-۶۱.
- پناهی، عبدالحافظ، جانباز قبادی، غلامرضا، متولی، صدرالدین، و خالدی، شهریار. ۱۴۰۲. پیش‌بینی و پهنه‌بندی پتانسیل وقوع سیلاب برحسب الگوریتم‌های تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود). جغرافیا (فصلنامه علمی انجمن جغرافیایی ایران)، ۲۱(۷۸): ۱۰۹-۱۳۴.
- حاجی‌وندپایداری، سمیه، یزدان‌پناه، حجت‌اله، و اندرزیان، سیدبهرام. ۱۴۰۱. بررسی اثرات منطقه‌ای پدیده تغییر اقلیم در شمال استان خوزستان با بهره‌گیری از مدل HadCM3 تحت ریزمقیاس نمایی LARS-WG در دوره آماری ۲۰۳۰-۲۰۱۰ و ۲۰۵۰-۲۰۳۰. جغرافیا و روابط انسانی، ۵(1) 299-314.
- رحیمی‌بلوچی، لیلا، و ملک‌محمدی، بهرام. ۱۳۹۰. ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی تالاب بین‌المللی شادگان بر اساس شاخص‌های عملکرد اکولوژیکی. مجله محیط‌شناسی، سال سی‌ونهم، ۱، ۱۱۲-۱۰۱.
- ضیایی، نوید، اونق، مجید، عسگری، حمیدرضا، مساح‌بوانی، علیرضا، سلمان‌ماهینی، عبدالرسول، و حسین‌علیزاده، محسن. ۱۳۹۸. پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی دوره‌های آتی با کاربرد مدل HadCM3 و سناریوهای اقلیمی، مطالعه موردی: ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب حوضه حبله‌رود. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۳)، ۷۷۱-۷۸۳.
- کرمی، رقیه، رضائی، حسن، سلمان‌ماهینی، عبدالرسول، و قربانی‌نصرآبادی، خلیل. ۱۴۰۱. ارزیابی تغییرات اقلیمی در حوضه تالاب بین‌المللی هامون با استفاده از مدل LARS-WG6. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۱)، ۱۰۷-۱۲۲.
- کاظمی‌نیا، علیرضا. ۱۳۹۶. کاربرد سنجش‌از دور و GIS در بررسی پوشش گیاهی. نشریه علمی ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، ۹(۱): ۷۵-۸۶.
- Dekens, [Julie](#), Natalia Zamudio, [Alicia](#), & McCandless, [Matthew](#). (2013). Sustainable Wetland Management in the Face of Climate Risks in Niger: the Case of La Mare de Tabalak. National environment council for sustainable development, 1-57.
- Henareh Khalyani, A., Gould, W., Harmsen, E., Terando, A., Quinones, M., & Collazo, J. (2015). Climate change implications for tropical islands: Interpolating and interpreting statistically downscaled GCM projections for management and planning. J. Appl. Meteor. Climatol.
- IPCC., 2001. Climate change 2001: The scientific Basis, Contribution of working Group to the Third Assessment Report of the intergovernmental Panell on climate change .Cambridge Univ. Perss, New York, NY, USA, 881 P.
- Kim, K.G., Lee, H., & Lee, D.H. (2011). Wetland Restoration to Enhance Biodiversity in Urban Areas- A Comparative Analysis. Landscape Ecol Eng. 7: 27-32.
- Lemley, A.D. (1997). Risk assessment as an environmental management tool: consideration for freshwater wetlands. Environmental Management. 47:117-134.
- McKee, T., Doesken, B., Nolan, J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Paper presented at the Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Decision Making and Geographic Information System.
- Mertz, O., Mbow, C., Reenberg, A., & Diouf, A. (2009). Farmers' perceptions of climate change and agricultural adaptation strategies in Rural Sahel, Environmental Management, 43, 804-816.
- Rahimi-Balochi, L., & Malek Mohammadi, B. (2011). Assessment of environmental risks of Shadegan International Wetland based on ecological performance indicators. Journal of Environmental Sciences, Year 39. 1, 101-112.
- Ramsar Convention Secretariat. (2007). Ramsar Handbooks for the Wise Use of Wetlands. 3rd edn. Ramsar Convention Secretariat: Gland, Switzerland.

- Semenov, M.A., & Brooks, R.J. (1998). Comparison of the WGEN and LARSWG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10: 95-107.
- Semenov, M.A., Barrow, E.M. (2002). LARS-WG A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Manual, Version 0/3: 28
- Semenov, M.A. (2008). Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. *Climate Research*, 35, 203-212.
- Shrestha, S., & Lohpaisankrit, W. (2017). Flood hazard assessment under climate change scenarios in the Yang River Basin, Thailand. *International Journal of Sustainable Built Environment*.