

Assessing the impact of climate change on surface water resources (Case study: Babolrood watershed)

Saleh Arakhi^{1*}, Somayeh Emadodin², Sayed Hussein Roshun³

¹ Associate Professor, Department of Geography and GIS, Faculty of Human Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.

² Associate Professor, Department of Geography and GIS, Faculty of Human Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.

³ Ph.D. Graduated in Watershed Management, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

Received Date: 02 July 2025 Accepted Date: 19 October 2025

Abstract

Background and Objective: In recent years, climate change and human activities have increasingly intensified the global water scarcity crisis. These changes have disrupted the hydrological cycle, placing surface water resources under serious threat in terms of accessibility, quality, and sustainability.

Methodology: To assess the impact of climate change on surface water resources in the Babolrood watershed, meteorological and hydrometric data were initially collected. After addressing statistical deficiencies, removing outliers, and selecting a common temporal baseline, future climate variables (precipitation, minimum temperature, and maximum temperature) were projected for the period 2020–2100 using the CanESM5 climate model under IPCC AR6 scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 within the SDSM framework. Streamflow simulation for the future period was conducted using downscaled data processed through an Artificial Neural Network (ANN). Finally, to identify trends in the projected data, non-parametric Mann–Kendall and Sen’s slope estimator tests were applied using the R software environment.

Results and Findings: Trend analysis of streamflow using the Mann–Kendall test, Sen’s slope estimator, and the ANN model over the period 2021–2100 revealed a weak and statistically insignificant decreasing trend across all SSP climate scenarios. The most pronounced decline was observed under the SSP5-8.5 scenario. Minimum temperature exhibited a non-significant increasing trend, potentially indicating nighttime or cold-season warming, while precipitation showed no discernible trend. The ANN model results were consistent with the statistical tests, confirming a gradual reduction in streamflow, thereby underscoring the need for sustainable water resource management in the face of climate change. These findings not only confirm the direct impact of climate change on surface water resources but also highlight the importance of employing intelligent models for long-term analysis and sustainable water resource management. Moreover, they underscore the necessity of integrated approaches and region-specific analyses in future studies.

Keywords: Artificial Neural Network (ANN), Babolrood watershed, Hydrological modeling, Mann–Kendall test, SSP emission scenarios.

* Corresponding Author Email: s.arakhi@gu.ac.ir

Cite this article: Arakhi, S., Emadodin, S. and Roshun, S. H. (2026). Assessing the impact of climate change on surface water resources (Case study: Babolrood watershed). Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS), 7(2), 1-14.



شاپا: ۰۷۶۴-۲۷۸۳

دوره ۷، شماره ۲، شماره پیاپی ۲۴، تابستان ۱۴۰۵

Journal Homepage <https://www.srds.ir/>
<https://www.srds.ir/article/234548.html?lang=fa>

ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب‌های سطحی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بابلرود)

صالح آرخی^{۱*}، سمیه عمادالدین^۲، سیدحسین روشن^۳

۱. دانشیار، گروه جغرافیا و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.
۲. دانشیار، گروه جغرافیا و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.
۳. دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی موجب تشدید بحران کمبود منابع آب در سطح جهانی شده‌اند. این تغییرات با اختلال در چرخه هیدرولوژیکی، منابع آب سطحی را از نظر دسترسی، کیفیت و پایداری در معرض تهدید جدی قرار داده‌اند.

روش‌شناسی: به منظور بررسی اثر تغییرات اقلیم بر روی منابع آب‌های سطحی حوضه بابلرود ابتدا داده‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه جمع‌آوری گردید. بعد از رفع نواقص آماری، حذف داده‌های پرت و انتخاب پایه زمانی مشترک، اقدام به پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی (بارش، حداقل دما و حداکثر دما) برای دوره آینده (۲۰۲۰-۲۱۰۰) بر اساس داده‌های گزارش ششم IPCC AR6 و مدل اقلیمی CanESM5 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مدل SDSM شد. برای شبیه‌سازی دبی جریان در دوره آینده از داده‌های ریزمقیاس‌نمایی شده بر اساس شبکه عصبی مصنوعی (ANN) استفاده گردید در نهایت، به منظور تعیین روند در داده‌های آینده از آزمون‌های ناپارامتری من‌کندال و تخمین‌گر شیب‌سن در محیط نرم افزار R استفاده شد.

نتایج و یافته‌ها: تحلیل روند دبی جریان با استفاده از آزمون من-کندال، شیب سن و مدل ANN طی دوره ۲۰۲۱-۲۱۰۰ نشان داد که در تمامی سناریوهای اقلیمی SSP، روندی کاهشی ضعیف و آماری غیرمعنادار وجود دارد. بیشترین کاهش در سناریوی SSP5-8.5 مشاهده شد. دمای حداقل روند افزایشی غیرمعنادار داشته و بارش فاقد روند مشخص است. نتایج مدل ANN با آزمون‌های آماری همخوانی داشته و کاهش تدریجی دبی جریان را تأیید می‌کند، که بر ضرورت مدیریت پایدار منابع آب در مواجهه با تغییر اقلیم تأکید دارد. این یافته‌ها ضمن تأیید تأثیر مستقیم تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی، بر اهمیت بهره‌گیری از مدل‌های هوشمند در تحلیل بلندمدت و مدیریت پایدار منابع آب تأکید داشته و ضرورت استفاده از رویکردهای ترکیبی و تحلیل‌های منطقه‌ای در مطالعات آینده را برجسته می‌سازد.

کلید واژه‌ها: آزمون من-کندال، حوضه آبخیز بابلرود، سناریوهای انتشار SSP، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مدل‌سازی هیدرولوژیکی.

* نویسنده مسئول: s.arakhi@gu.ac.ir

ارجاع به این مقاله: آرخی، صالح، عمادالدین، سمیه و روشن، سیدحسین. (۱۴۰۵). ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب‌های سطحی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بابلرود). فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، ۷(۲)، ۱-۱۴.

مقدمه و بیان مسأله

آب برای زندگی ضروری و نقش کلیدی در تنظیم اقلیم جهانی از طریق انتقال گرما ایفا می‌کند. با این حال، تغییر اقلیم به‌طور قابل توجهی منابع آب سطحی را از نظر دسترسی، کیفیت و توزیع تهدید می‌کند؛ این تهدیدها ناشی از افزایش دما، تغییر الگوهای بارندگی، بالا آمدن سطح دریاها و رخدادهای شدید آب‌وهوایی هستند که چرخه هیدرولوژیکی را مختل می‌سازند (Ray و Tikuye, 2025). تغییر اقلیم به معنای دگرگونی‌های قابل توجه در الگوهای آب‌وهوایی، به‌ویژه دما و میزان بارندگی، در یک منطقه خاص یا در سطح جهانی و طی یک دوره زمانی طولانی است (Rummukainen, 2012). رشد سریع فعالیت‌های صنعتی و در پی آن افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر، موجب برهم خوردن تعادل اقلیمی زمین و به عبارتی، بروز پدیده تغییر اقلیم شده است (IPCC, 2001; Ali و Kamraju, 2023).

بر اساس گزارش‌های پنل بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC)، دمای سطح زمین از دوران پیش‌صنعتی تاکنون حدود ۱/۱ درجه سلسیوس افزایش یافته و این روند با شدت گرفتن چرخه هیدرولوژیکی، نوسانات بیشتری در توزیع و شدت بارش‌ها ایجاد کرده است (Caretta و همکاران, 2022). بر این اساس، تا سال ۲۱۰۰ میانگین دمای جهانی ممکن است بین ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (IPCC, 2007). این تغییرات اقلیمی اثرات عمیقی بر منابع آب‌های سطحی، از جمله رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها، داشته و دارد. منابع آب سطحی، که بخش عمده‌ای از تأمین آب شرب، کشاورزی و صنایع را بر عهده دارند، در معرض تهدیدات دوگانه کمی و کیفی قرار گرفته‌اند. از منظر کمی، تغییرات اقلیمی منجر به افزایش خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی شده که بر اساس شواهد، حدود ۴۵۴ میلیون هکتار از زمین‌های زراعی جهان را تحت تأثیر قرار داده و خسارات اقتصادی به ارزش ۱۶۶ میلیارد دلار (بین سال‌های ۱۹۸۳ تا ۲۰۰۹) به بار آورده است (Caretta و همکاران, 2022). علاوه بر این، کاهش جریان رودخانه‌ها در مناطق نیمه‌خشک و یخچال‌نشین تا ۴۰ درصد پیش‌بینی می‌شود، در حالی که افزایش سیلاب‌ها در نواحی گرمسیری و نیمه‌گرمسیری، مدیریت منابع را پیچیده‌تر می‌کند (Whitehead و همکاران, 2009). از سوی دیگر، اثرات کیفی شامل تشدید یوتروفیکاسیون (غنی‌شدگی مواد مغذی)، افزایش غلظت مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر، و کاهش اکسیژن محلول است که عمدتاً ناشی از افزایش دما و تغییر در جریان‌ها می‌باشد (Bi و همکاران, 2018).

تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر منابع آب، مدیریت این منابع را با چالش‌های جدی مواجه کرده و لزوم اتخاذ راهکارهای سازگارانه را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. برای ارزیابی تغییرات اقلیمی، مدل‌های اقلیم جهانی (GCMs) طراحی شده‌اند. این مدل‌ها تمامی عوامل اقلیمی مهم را در نظر می‌گیرند و تعاملات میان اقیانوس، جو، یخ‌های دریایی و خشکی‌ها را به‌صورت سلسله‌مراتبی و در قالب یک سیستم یکپارچه شبیه‌سازی می‌کنند. مدل‌های گردش عمومی جو به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های چرخش عمومی جو (AGCM)، مدل‌های چرخش عمومی اقیانوس (OGCM) و مدل‌های مزدوج جو-اقیانوس (AOGCM). این مدل‌ها ابزارهای کلیدی برای بازسازی اقلیم گذشته و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده به شمار می‌روند (فهمی‌راد و همکاران, 1401).

مبانی نظری

مدل CanESM5

مدل CanESM5، توسعه‌یافته توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیم کانادا (CCCma)، یکی از سامانه‌های پیشرفته برای شبیه‌سازی اقلیم جهانی است که در بازسازی اقلیم گذشته، پیش‌بینی‌های بلندمدت، و تولید سناریوهای فصلی و دهه‌ای کاربرد دارد. این مدل شامل اجزای یکپارچه‌ای مانند مدل جو (CanAM)، اقیانوس (CanNEMO)، یخ دریایی و چرخه‌های کربن خشکی و اقیانوس است و با رزولوشن T63 برای جو و تفکیک مکانی یک درجه‌ای برای اقیانوس، توانایی بازسازی دقیق اقلیم را دارد. ویژگی برجسته CanESM5، حساسیت اقلیمی بالای آن نسبت به نسخه قبلی (CanESM2) است؛ به‌طوری‌که حساسیت تعادلی آن حدود ۶/۵ درجه کلونین گزارش شده، در حالی که مدل CanESM2 حدود ۳/۷ درجه است (Swart et al., 2019). این ویژگی موجب واکنش دقیق‌تر مدل به عوامل خارجی مانند افزایش گازهای گلخانه‌ای شده است. همچنین، توان تولید مجموعه‌های بزرگ (ensemble) و ساختار ماژولار آن، CanESM5 را به ابزاری کلیدی در مطالعات جهانی و منطقه‌ای، از جمله بررسی منابع آب، کشاورزی و رخدادهای حدی اقلیمی، تبدیل کرده است (Sigmond و همکاران, 2023).

مدل SDSM

مدل SDSM ابزاری قدرتمند برای ریزمقیاس‌نمایی آماری در مطالعات اقلیمی است که امکان شبیه‌سازی دقیق متغیرهای اقلیمی در مقیاس محلی را فراهم می‌سازد. مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM یکی از ابزارهای پرکاربرد در مطالعات تغییر اقلیم است که به‌منظور تبدیل داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) به اطلاعات اقلیمی با تفکیک مکانی بالا در سطح ایستگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل با بهره‌گیری از روش‌های آماری، ارتباط بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در مقیاس بزرگ (مانند داده‌های GCM یا NCEP) و متغیرهای اقلیمی محلی (مانند دما و بارش) را برقرار می‌سازد (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۷). SDSM از الگوریتم‌های رگرسیون چندمتغیره و تولید داده‌های تصادفی بهره می‌برد تا بتواند داده‌های اقلیمی را برای دوره‌های آینده شبیه‌سازی کند. این مدل به‌ویژه در مناطقی که داده‌های مشاهداتی محدود هستند، کاربرد فراوانی دارد و امکان ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی را فراهم می‌سازد (جوادی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷).

یکی از مزایای مهم SDSM، قابلیت آن در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای حیاتی مانند منابع آب، کشاورزی، و رخدادهای حدی اقلیمی است. با وجود محدودیت‌هایی مانند وابستگی به کیفیت داده‌های ورودی و فرض‌های آماری، SDSM همچنان یکی از ابزارهای قابل اعتماد در مطالعات اقلیم‌شناسی محسوب می‌شود (صمدی نقاب و همکاران، ۱۳۹۰). مدل SDSM با فراهم‌سازی بستری برای تحلیل تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی، نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های محیطی و مدیریت منابع طبیعی ایفا می‌کند و به‌ویژه در کشورهایی با تنوع اقلیمی بالا، مانند ایران، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳؛ حمیدیان‌پور و همکاران، ۱۴۰۰).

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی بر تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب‌های سطحی تمرکز کرده‌اند و نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در الگوهای هیدرولوژیکی، کاهش سطح آب و افزایش خشکسالی‌ها هستند. Sheikha-BagemGhaleh و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل‌های WEAP-MODFLOW بر حوضه آبخیز مهاباد را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه با استفاده از مدل‌های WEAP برای شبیه‌سازی منابع سطحی و MODFLOW برای منابع زیرزمینی، سناریوهای تغییر اقلیم (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) را برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۴۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاهش بارش (به ویژه در ماه‌های پربارش مانند ژانویه و دسامبر، حدود ۱۰ میلی‌متر تحت سناریوی RCP2.6) و افزایش دما (تا ۲/۴۵ درجه سلسیوس در سپتامبر تحت RCP8.5) منجر به کاهش رواناب سطحی و دبی رودخانه‌ها می‌شود، هرچند تأثیر کلی بر منابع سطحی کمتر از منابع زیرزمینی است.

Zhang و همکاران (۲۰۲۵) تلفات ناشی از آب‌های سطحی و کل ذخیره آب در شمال شرقی آسیا ناشی از تغییرات اقلیمی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، تصاویر ماهواره‌ای Landsat و Sentinel-2، داده‌های حاصل از مأموریت GRACE و نسخه تکمیلی آن، به‌همراه داده‌های اقلیمی و انسانی تلفیق شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در منطقه شرق دور روسیه، طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، سطح خالص منابع آب سطحی به میزان ۱۶ هزار کیلومتر مربع کاهش یافته است که عمدتاً ناشی از افزایش دما و تبخیر بوده است. در مقابل، در شمال شرقی چین، سطح آب سطحی به میزان ۳ هزار کیلومتر مربع افزایش یافته که دلیل اصلی آن افزایش بارندگی و توسعه زیرساخت‌های آبیاری بوده است. آنها بیان داشتند که حدود ۱۸۵ میلیون نفر در حوضه‌های آبریز مورد مطالعه زندگی می‌کنند که با کاهش سطح آب سطحی یا ذخیره کل آب مواجه‌اند.

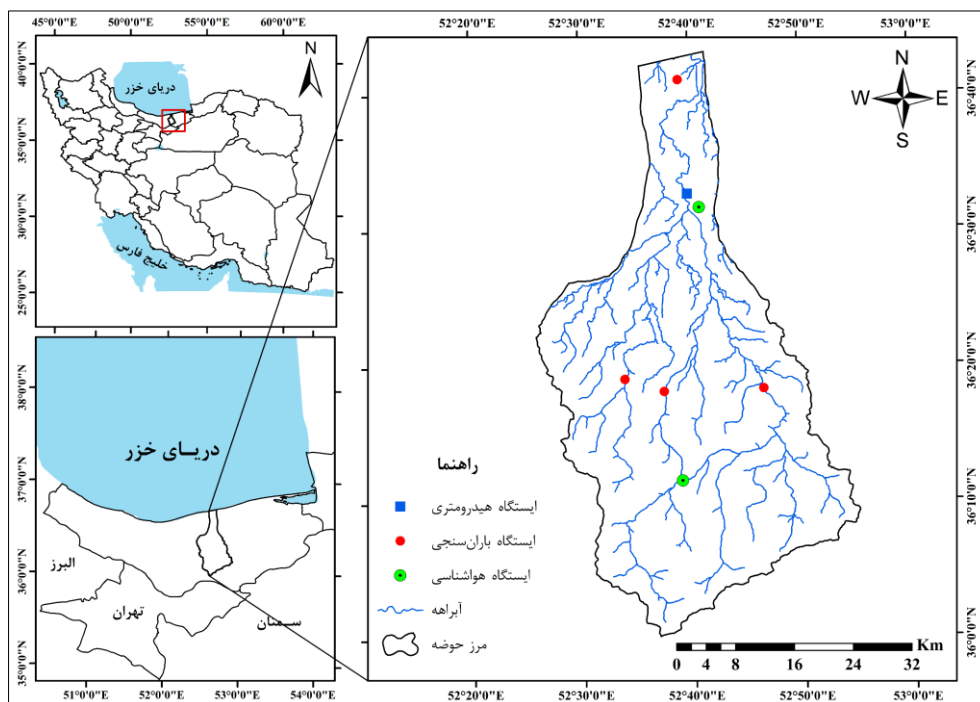
Wrzesiński و Sobkowiak (۲۰۲۴) تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب را در مناطق متنوعی از جمله برونی، هند، ایالات متحده غربی، چین و ایران بررسی کرد. یافته‌ها حاکی از افزایش تقاضای آبیاری به دلیل رشد دما و تبخیر (ETc) تحت سناریوهای SSP^۱ (مانند SSP585) است؛ برای مثال، در طرح برنج واسان برونی، نیاز آبیاری در فصل خارج از فصل افزایش می‌یابد، هرچند بارش‌های بیشتر در فصل اصلی آن را جبران می‌کند. در ایران (تهران، مشهد و غیره)، مدل‌های CMIP6 خشکسالی‌های شدید را پیش‌بینی

می‌کنند که منجر به کاهش سطح سدها و فرونشست زمین می‌شود. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که تغییر اقلیم با کاهش بارندگی، افزایش دما و تبخیر، تأثیرات قابل توجهی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق مختلف جهان دارد. این تغییرات منجر به کاهش رواناب، افت ذخایر آب، افزایش تقاضای آبیاری و تشدید خشکسالی‌ها شده‌اند، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و پرجمعیت. نتایج این پژوهش‌ها ضرورت مدیریت پایدار منابع آب را در مواجهه با فشارهای اقلیمی و انسانی برجسته می‌سازند. با توجه به نقش حیاتی منابع آب در حوزه بابلرود برای کشاورزی، تأمین آب شرب و حفظ اکوسیستم‌های طبیعی، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر آب‌های سطحی این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف این مطالعه بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی این حوزه با استفاده از داده‌های اقلیمی گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC AR6) و مدل‌سازی سناریوهای آینده است.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بابلرود در استان مازندران، یکی از حوضه‌های مهم شمال ایران است که بین طول‌های $52^{\circ} 26' 04''$ تا $52^{\circ} 55' 01''$ شرقی و عرض‌های $36^{\circ} 00' 06''$ تا $36^{\circ} 42' 55''$ شمالی قرار گرفته است. از نظر زمین‌شناسی، این حوضه در زون البرز شمالی قرار دارد و شامل واحدهای رسوبی و آبرفتی جوان، سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگی و شیل‌های دوران سوم زمین‌شناسی است. توپوگرافی منطقه از ارتفاعات البرز مرکزی آغاز شده و به دشت‌های ساحلی منتهی می‌شود، به طوری که شیب‌های تند در نواحی کوهستانی و شیب‌های ملایم در دشت‌های پایین‌دست، الگوی جریان آب و رواناب را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. از نظر هیدرولوژیکی، رودخانه بابلرود با تغذیه از چشمه‌ها، بارش‌های سنگین و رواناب سطحی، نقش مهمی در تأمین منابع آب کشاورزی، شرب و صنعت منطقه دارد. بارش سالانه در این حوضه بیش از ۸۰۰ میلی‌متر است که به صورت پراکنده و با شدت بالا در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد، و همین امر موجب افزایش خطر سیلاب و فرسایش خاک می‌شود. کاربری اراضی در این حوضه شامل جنگل‌های هیرکانی در ارتفاعات، اراضی کشاورزی در دشت‌ها، باغ‌های مرکبات و مناطق مسکونی پراکنده است. موقعیت جغرافیایی این حوضه در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

با توجه به هدف پژوهش، ابتدا داده‌های اقلیمی و هیدرولوژی شامل مقادیر بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و دبی جریان در ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری موجود در حوضه در مقیاس روزانه از اداره کل هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان

مازندران اخذ گردید. موقعیت و نوع ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. سپس با رفع داده‌های پرت، رفع نواقص آماری و تست همگنی و تصادفی بودن، پایه زمانی مشترک بین ایستگاه‌ها از تاریخ ۱۳۷۳/۰۷/۰۱ تا ۱۴۰۳/۰۶/۳۱ انتخاب شد و برای ورود به مدل آماده شدند.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق

ردیف	نام ایستگاه	مختصات جغرافیایی		ارتفاع از سطح دریا (متر)	نوع ایستگاه
		طول	عرض		
۱	دیوا	۶۴۰۴۹۳	۴۰۲۰۲۸۰	۱۶۰	باران‌سنجی
۲	گلوگاه	۶۴۵۸۳۳	۴۰۱۸۶۵۱	۲۰۰	باران‌سنجی
۳	میاندشت	۶۴۷۵۸۴	۴۰۶۱۰۲۵	-۱۸	باران‌سنجی
۴	قران تالار	۶۵۹۳۶۷	۴۰۱۹۱۷۸	۱۰۲	باران‌سنجی
۵	کشتارگاه بابل	۶۴۸۸۹۵	۴۰۴۵۵۱۹	-۲	هیدرومتری
۶	فیروزجاه	۶۴۸۳۷۴	۴۰۰۶۵۷۴	۷۸۷	هواشناسی
۷	محوطه اداره	۶۵۰۵۲۴	۴۰۴۳۷۱۸	۵	هواشناسی

بعد از تحلیل اولیه داده‌ها و انتخاب پایه زمانی مشترک اقدام به پیش‌بینی داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آینده گردید. بدین منظور از داده‌های گزارش ششم^۱ IPCC AR6 (CMIP6) و مدل اقلیمی CanESM5 برای دوره‌ی از سال ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری^۲ SDSM استفاده گردید. به منظور ایجاد داده‌های تصادفی دوره‌های آینده، داده‌های روزانه در ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه با دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۴) و داده‌های خروجی مدل گردش عمومی تحت سناریوهای مختلف مذکور انتخاب شدند. بدلیل محدودیت دوره تاریخی مدل‌های CMIP6 تا سال ۲۰۱۴ و وجود داده‌های اندازه‌گیری شده در این دوره آماری است. بعد از پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی (بارش، حداقل دما و حداکثر دما) برای دوره آینده، برای شبیه‌سازی دبی جریان از داده‌های تولید شده آینده بر اساس شبکه عصبی مصنوعی^۳ (ANN) استفاده گردید سپس به منظور تعیین روند آنها از آزمون‌های ناپارامتری من کندال^۴ و تخمین گر شیب‌سن^۵ در محیط نرم افزار R استفاده شد.

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) از جمله الگوریتم‌های قدرتمند یادگیری ماشین هستند که در دسته‌ی مدل‌های جعبه سیاه قرار می‌گیرند. این مدل‌ها با الهام از ساختار نورون‌های زیستی مغز انسان طراحی شده‌اند و از مجموعه‌ای از گره‌های به‌هم‌پیوسته تشکیل شده‌اند که داده‌ها را دریافت، پردازش و تحلیل کرده و بر اساس آن تصمیم‌گیری می‌کنند. ویژگی برجسته‌ی این شبکه‌ها، توانایی آنها در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین داده‌های ورودی و خروجی بدون نیاز به شناخت دقیق از فرآیندهای فیزیکی حاکم بر سیستم است (شیخی و همکاران، ۱۴۰۲). ساختار پایه‌ی ANN شامل سه لایه‌ی اصلی است: لایه‌ی ورودی که داده‌ها را دریافت می‌کند، لایه‌ی پنهان که شامل نورون‌های پردازشگر است و عملیات محاسباتی در آن انجام می‌شود، و لایه‌ی خروجی که نتایج پیش‌بینی‌شده را ارائه می‌دهد (باباعلی و دهقانی، ۱۳۹۶). این شبکه‌ها از طریق فرآیند آموزش و با استفاده از الگوریتم‌هایی نظیر پس‌انتشار خطا^۶ و گرادیان نزولی^۷، وزن‌های بین نورون‌ها را بهینه‌سازی کرده و دقت پیش‌بینی را افزایش

1- Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report

2- Statistical Downscaling Model

3- Artificial Neural Network

4- Mann-Kendall Test

5- Sen's Slope Test

6- Backpropagation

7- Gradient Descent

می‌دهند. مطالعات نشان داده‌اند که شبکه‌های عصبی مصنوعی ابزارهای مؤثری برای مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده در حوزه‌ی هیدرولوژی و مدیریت سیلاب هستند (Stretch و Oyeboode، ۲۰۱۹؛ Dawson و Wilby، ۲۰۰۱).

کمیته تخصصی انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE) تأکید کرده است که ANNها در مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی مانند رواناب بارندگی، جریان رودخانه، مدیریت آب‌های زیرزمینی و شبیه‌سازی کیفیت آب عملکرد قابل قبولی دارند و پس از آموزش مناسب، قادر به تولید نتایج دقیق هستند (ASCE، ۲۰۰۰).

Gacu و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که استفاده از هوش مصنوعی، به‌ویژه ANNها، در پیش‌بینی جریان آب در حوزه‌های فاقد ایستگاه اندازه‌گیری^۱ بسیار مؤثر بوده و می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل‌های سنتی باشد، به‌ویژه در شرایطی که داده‌های مشاهداتی محدود هستند. در مجموع، شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی در یادگیری روابط پیچیده، تعمیم‌پذیری بالا، و سرعت پردازش مناسب، به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای مدل‌سازی داده‌محور در حوزه‌های محیطی و مهندسی آب شناخته می‌شوند. پیاده‌سازی مدل ANN در محیط نرم‌افزار R و با بهره‌گیری از بسته‌های کاربردی neuralnet و caret انجام گرفت. ابتدا داده‌های مشاهداتی شامل دبی جریان (Q)، بارش (Precip)، دمای حداقل (Tmin) و دمای حداکثر (Tmax) از فایل‌های CSV خوانده شده و پس از تبدیل فرمت تاریخ، به ترتیب زمانی مرتب شدند. داده‌ها به دو بخش آموزش (۸۰ درصد) و آزمون (۲۰ درصد) تقسیم گردیدند. برای افزایش دقت مدل، داده‌های ناقص و دارای مقادیر گمشده (NA) حذف شدند. همچنین، متغیرهای ورودی با واریانس صفر یا ثابت شناسایی و از مدل حذف شدند تا از بروز خطا در فرآیند آموزش جلوگیری شود. داده‌های آموزش شامل سه متغیر اقلیمی به‌عنوان ورودی و دبی جریان به‌عنوان خروجی بودند. این داده‌ها با استفاده از تابع scale نرمال‌سازی شدند تا مدل بتواند روابط غیرخطی بین متغیرها را بهتر شناسایی کند. ساختار مدل ANN شامل یک لایه پنهان با سه نرون بود که با تنظیم پارامترهای threshold (۰/۱) و stepmax (1e6) برای همگرایی مناسب آموزش داده شد. تابع هدف مدل به‌صورت دینامیک تعریف شد تا متغیرهای ورودی به‌طور خودکار در ساختار مدل لحاظ شوند.

آزمون من‌کندال و تخمین‌گر شیب‌سن

آزمون من-کندال نخستین بار در سال ۱۹۴۵ توسط من معرفی شد و در سال ۱۹۷۵ توسط کندال توسعه و بسط یافت. این آزمون به‌عنوان یکی از روش‌های غیرپارامتری پرکاربرد، به‌طور گسترده در تحلیل روند داده‌های سری زمانی در حوزه‌های هواشناسی و هیدرولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lettenmaier و همکاران، ۱۹۹۴). از جمله ویژگی‌های برجسته‌ی این آزمون، استقلال آن از نوع توزیع آماری داده‌ها است؛ به‌عبارت دیگر، آزمون من-کندال برای مقیاس‌های زمانی مختلف قابل استفاده بوده و نیازی به فرض نرمال بودن داده‌ها ندارد. این ویژگی، آن را به ابزاری مناسب برای تحلیل داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی که اغلب دارای نوسانات و مقادیر حدی هستند، تبدیل کرده است. همچنین، حساسیت پایین این آزمون نسبت به مقادیر حدی در سری‌های زمانی، یکی دیگر از مزایای آن محسوب می‌شود. فرض صفر در آزمون من-کندال بیانگر عدم وجود روند و تصادفی بودن داده‌ها است. در صورتی که فرض صفر رد شود، نتیجه‌ی آزمون نشان‌دهنده‌ی وجود روند معنادار در داده‌های مورد بررسی خواهد بود (Sudarsan و Lasitha، ۲۰۲۳). این آزمون به‌ویژه در مطالعات تغییرات اقلیمی، تحلیل خشکسالی، بررسی روند بارش و دما، و پایش منابع آب کاربرد فراوانی دارد. در بخش بعدی، مراحل محاسبه‌ی آماره‌ی آزمون من-کندال (Z) به‌صورت گام‌به‌گام ارائه خواهد شد تا امکان تحلیل دقیق روندهای زمانی فراهم گردد. ابتدا اختلاف بین تک تک مشاهدات با یک‌دیگر مشخص، سپس عملکرد تابع و پارامتر S استخراج می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sig}(X_j - X_k) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن n: تعداد مشاهدات سری، X_j و X_k به ترتیب داده‌های Zام و kام سری هستند. علامت تابع هم به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \text{Sign}(X_j - X_k) = -1, & \text{for}(X_j - X_k) < 0 \\ \text{Sign}(X_j - X_k) = 0, & \text{for}(X_j - X_k) = 0 \\ \text{Sign}(X_j - X_k) = 1, & \text{for}(X_j - X_k) > 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۲)}$$

^۱- Ungauged Watersheds

E(S) مقادیر میانگین و Var(S) واریانس آماره S به صورت زیر بیان می‌شود:

رابطه (۳) $E(S) = 0$

رابطه (۴) $Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i-5)}{18}$ if : $n > 10$

رابطه (۵) $Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$ if : $n \leq 10$

که در آن n تعداد داده‌های مشاهده‌ای و m بیانگر تعداد سری‌هایی می‌باشد که حداقل یک داده‌ی تکراری در آنها وجود داشته باشد. t معرف فراوانی داده‌هایی است که ارزش یکسانی دارند. آماره z با به کارگیری یکی از رابطه‌های زیر استخراج می‌شود:

رابطه (۶)
$$sig = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & , S > 0 \\ 0 & , S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & , S < 0 \end{cases}$$

در آزمونی دارای دو دامنه برای به دست آوردن روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر زمانی پذیرش می‌شود که رابطه‌ی زیر صادق باشد.

رابطه (۷) $|z| = z_a/2$

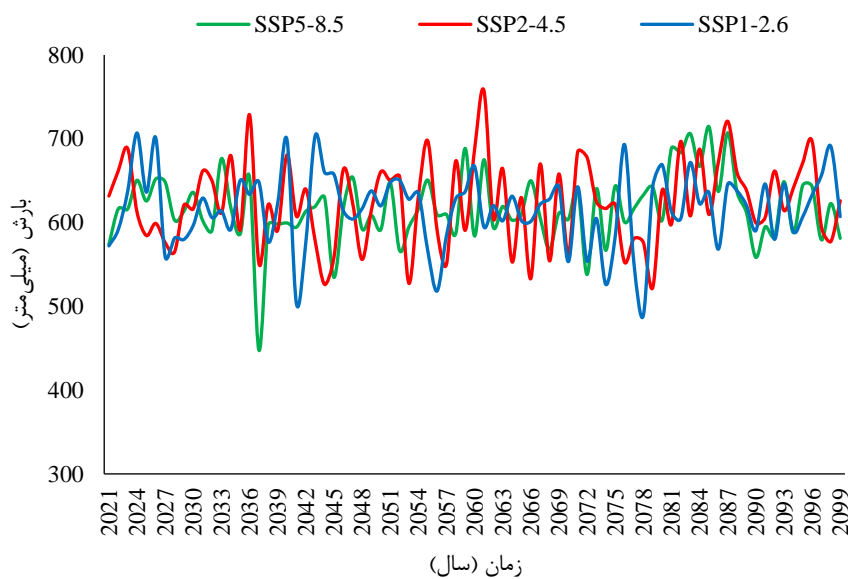
که در آن a سطح معنی‌داری آزمون است و z_a آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری a است و به دلیل اینکه آزمون دو دامنه بود تقسیم بر دو a/2 می‌شود. آماره z اگر مثبت بود سری داده‌ها دارای روند صعودی و اگر منفی بود روند نزولی است. β شیب خط است که در سری داده‌های تاریخی روند یکنواختی را نمایش می‌دهد. با روش تخمین گر Sen مقدار شیب خط روند با بکارگیری رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

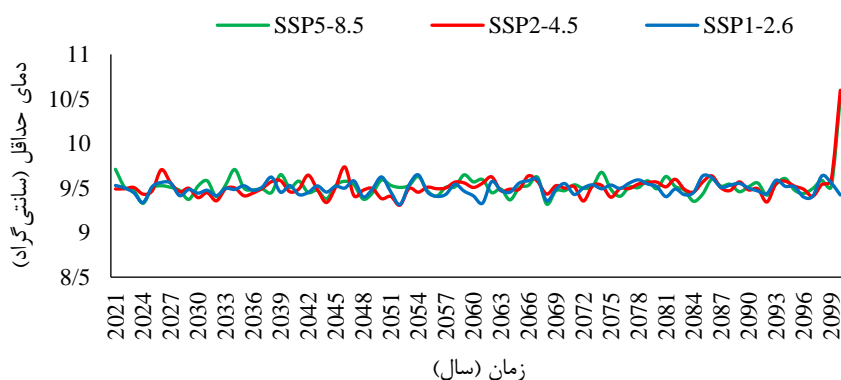
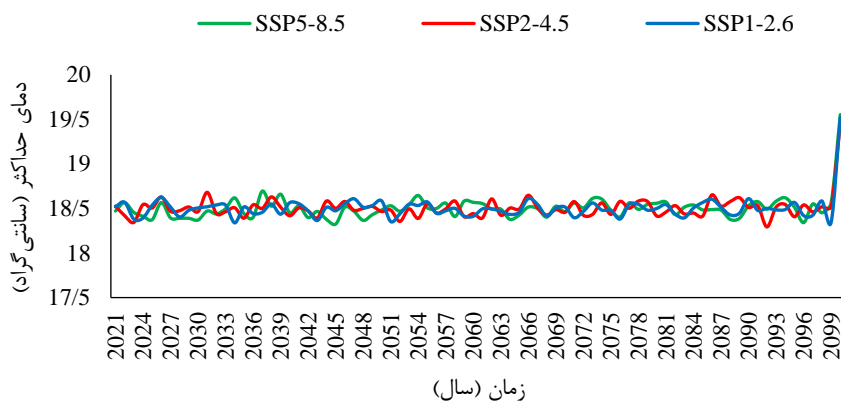
رابطه (۸) $\beta = Median \left(\frac{x_i - x_l}{j - l} \right) \quad \forall \quad l < j$

که β : شیب خط روند را برآورد می‌کند. اگر مقدار β مثبت و منفی شود به ترتیب، شیب خط روند داده‌ها صعودی و نزولی می‌باشد.

یافته‌ها و بحث

نتایج حاصل از پیش‌بینی متغیرهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر با استفاده از داده‌های گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از مدل جهانی اقلیم CanESM5 در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ در مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM به صورت زیر قابل مشاهده است (شکل ۲).





شکل ۲- مقادیر متغیرهای اقلیمی پیش‌بینی شده با سناریوهای مختلف تا سال ۲۱۰۰

نتایج آزمون من کندال و تخمین‌گر شیب سن

بعد از پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌ی آینده به منظور بررسی و تحلیل روند از آزمون‌های آزمون من کندال و تخمین‌گر شیب سن در محیط نرم افزار R استفاده شد که نتایج آن در زیر ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج تحلیل روند داده‌های آینده متغیرهای اقلیمی با آزمون MK و تخمین‌گر شیب‌سن

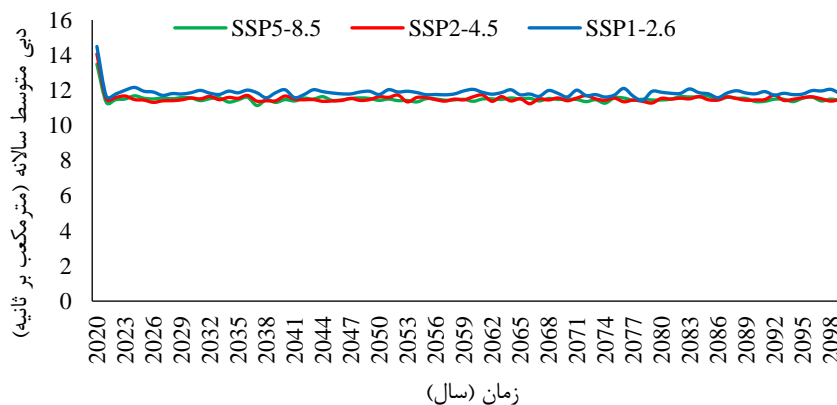
متغیر	سناریو	شاخص Z	p-value	تاو کندال (tau)	Sen's slope
دمای حداکثر	SSP1-2.6	۱/۴۷۸	۰/۱۳۹	۰/۰۰۵۷	۵/۹۹e-۶
	SSP2-4.5	۱/۶۲۹	۰/۱۰۳	۰/۰۰۶۳	۶/۵۶e-۶
	SSP5-5.8	۱/۹۲۶	۰/۰۵۴	۰/۰۰۷۵	۷/۹۴e-۶
دمای حداقل	SSP1-2.6	۱/۳۴۷	۰/۱۷۷	۰/۰۰۵۲	۵/۱۶e-۶
	SSP2-4.5	۱/۴۰۵	۰/۱۵۹	۰/۰۰۵۵	۵/۳۶e-۶
	SSP5-5.8	۱/۰۴۸	۰/۲۹۴	۰/۰۰۴۱	۴/۰۱e-۶
بارش	SSP1-2.6	-۰/۵۱۹	۰/۶۰۳	-۰/۰۰۲۳	۰
	SSP2-4.5	۰/۵۹۷	۰/۵۵۰	۰/۰۰۲۶	۰
	SSP5-5.8	۱/۱۱۱	۰/۲۶۶	۰/۰۰۴۸	۰

با توجه به جدول ۱ نتایج دمای حداکثر در تمامی سناریوها، شاخص Z مثبت بوده و مقدار آن از ۱/۴۷۸ تا ۱/۹۲۶ متغیر است. این موضوع نشان‌دهنده وجود روند افزایشی در دمای حداکثر است. مقدار p-value در سناریوی SSP5-8.5 برابر با ۰/۰۵۴ و در آستانه

معنی‌داری آماری (سطح ۰/۰۵) قرار دارد، در حالی که در دو سناریوی دیگر کمی بالاتر از این سطح است. مقدار τ کندال نیز در هر سه سناریو مثبت بوده که بیانگر شدت بسیار ضعیف روند افزایشی است. شیب سن نیز در هر سه حالت مثبت است، که نشان‌دهنده نرخ افزایش تدریجی دما در طول زمان می‌باشد. بنابراین روند افزایشی دمای حداکثر در هر سه سناریو مشاهده شده، اما تنها در سناریوی SSP5-8.5 این روند در آستانه معنی‌داری آماری قرار دارد. شدت روند بسیار ضعیف است، اما با توجه به حجم بالای داده‌ها، این روند می‌تواند از نظر اقلیمی قابل توجه باشد. از طرفی نتایج دمای حداقل بیانگر اینست که شاخص Z در این متغیر نیز در هر سه سناریو مثبت است، اما مقادیر آن (۱/۰۴۸ تا ۱/۳۴۷) کمتر از دمای حداکثر بوده و p-value در هیچ‌یک از سناریوها به سطح معنی‌داری آماری نمی‌رسد (بیشتر از ۰/۱۵). بر این اساس، روند افزایشی دمای حداقل ضعیف‌تر از دمای حداکثر بوده و از نظر آماری معنادار نیست. با این حال، جهت روند مثبت است و می‌تواند نشان‌دهنده گرمایش تدریجی شب‌ها یا فصل‌های سرد باشد. تحلیل داده‌های بارش نیز نشان داد که در سناریوی SSP1-2.6، شاخص Z منفی و برابر با ۰/۵۱۹- است که نشان‌دهنده روند کاهشی ضعیف در بارش است، اما مقدار p-value برابر با ۰/۶۰۳ بوده و کاملاً غیرمعنادار است. در دو سناریوی دیگر، شاخص Z مثبت ولی کمتر از ۱/۲ و p-value نیز بالاتر از ۰/۲۵ است. مقدار τ کندال در همه سناریوها بسیار کوچک (کمتر از ۰/۰۰۵) و شیب سن برابر با صفر است. بنابراین هیچ روند معناداری در تغییرات بارش مشاهده نمی‌شود. شیب صفر و مقادیر آماره‌های آماری نشان‌دهنده عدم وجود تغییرات قابل توجه در بارش در بازه زمانی مورد بررسی می‌باشد.

نتایج پیش‌بینی دبی دوره‌ی آینده با مدل ANN

در راستای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی، استفاده از مدل‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به‌عنوان ابزار قدرتمند پیش‌بینی در مطالعات هیدرولوژیکی اهمیت فزاینده‌ای یافته است. نتایج حاصل از پیش‌بینی دبی جریان برای دوره‌ی آینده (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) با بهره‌گیری از مدل ANN ارائه شده است (شکل ۳). داده‌های ورودی به مدل شامل پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی‌شده نظیر بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSP) بوده است.



شکل ۳- تغییرات دبی متوسط سالانه (مترمکعب بر ثانیه) تحت سناریوهای مختلف در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱

در راستای بررسی تغییرات بلندمدت منابع آب سطحی تحت تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی، تحلیل روندیابی داده‌های دبی جریان با استفاده از آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن انجام شد. این روش‌ها به‌عنوان ابزارهای آماری غیرپارامتری، امکان شناسایی جهت و شدت روندهای زمانی را بدون نیاز به فرض توزیع خاص برای داده‌ها فراهم می‌سازند. داده‌های دبی جریان که با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و بر پایه پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی‌شده (بارش، دمای حداقل و حداکثر) تولید شده‌اند، تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد تحلیل قرار گرفتند (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تحلیل روند داده‌های آینده دبی جریان با آزمون MK و تخمین گر شیب سن

متغیر	سناریو	شاخص Z	p-value	تاو کندال (tau)	Sen's slope
	SSP1-2.6	-۰/۹۳۴	۰/۳۵۰	-۰/۰۰۳۶	۳/۳۶e-۶
دبی جریان	SSP2-4.5	-۱/۲۰۳	۰/۲۲۸	-۰/۰۰۴۷	-۴/۲۴e-۶
	SSP5-5.8	-۱/۴۸۳	۰/۱۳۸	-۰/۰۰۵۸	-۴/۵۳e-۶

بر اساس جدول ۲ در هر سه سناریو، شاخص Z منفی بوده و بیانگر وجود روند کاهشی در دبی جریان می‌باشد، هرچند که مقدار p-value در هیچ‌یک از سناریوها به سطح معنی‌داری آماری (۰/۰۵) نمی‌رسد. با این حال، در سناریوی SSP5-8.5 مقدار p برابر با ۰/۱۳۸ بوده که نسبت به دو سناریوی دیگر به آستانه معنی‌داری نزدیک‌تر است. همچنین، مقدار τ کندال در تمامی سناریوها منفی و بسیار کوچک (کمتر از ۰/۰۰۶) است که نشان‌دهنده شدت بسیار ضعیف روند کاهشی می‌باشد. تخمین‌گر شیب سن نیز در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مقدار منفی‌تری نسبت به SSP1-2.6 دارد، این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش شدت تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، نرخ کاهش دبی جریان نیز افزایش می‌یابد. چنین روندی می‌تواند ناشی از افزایش دما، تبخیر و تعرق بیشتر، تغییر در الگوی بارش، و افزایش خشکسالی‌های دوره‌ای باشد که همگی از پیامدهای شناخته‌شده تغییر اقلیم هستند. در مجموع، اگرچه روند کاهشی دبی جریان از نظر آماری هنوز معنادار نیست، اما جهت و شدت آن در سناریوهای با انتشار گاز گلخانه‌ای بالا نگران‌کننده است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر بالقوه تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی بوده و ضرورت برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب در آینده را برجسته می‌سازد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، روند تغییرات دبی جریان سطحی در دوره زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با استفاده از آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این تحلیل، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و بررسی جهت و شدت تغییرات بلندمدت در رفتار هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه است. روند تغییرات متغیرهای هیدرواقلمی با استفاده از آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن، تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بررسی گردید. نتایج نشان داد که در هر سه سناریو، شاخص Z منفی بوده و مقدار τ کندال نیز منفی و بسیار کوچک است، که نشان‌دهنده روند کاهشی ضعیف اما پیوسته در دبی جریان است. مقدار شیب سن نیز در سناریوی SSP5-8.5 بیشترین مقدار منفی را دارد (m³/s/year)، که بیانگر نرخ کاهش بیشتر در شرایط اقلیمی شدیدتر است. نتایج این بخش با مطالعه Mimeau و همکاران (۲۰۲۵) در شبکه رودخانه‌های اروپا نشان داد که تغییر اقلیم منجر به افزایش خشکی و کاهش جریان‌های پیوسته شده است، به‌ویژه در مناطق با سناریوهای انتشار بالا (SSP5-8.5) که با افزایش دما و تغییر الگوی بارش همراه هستند. همچنین، تحقیق Goswami و همکاران (۲۰۲۵) در حوضه رودخانه Subansiri هند نشان داد که تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، دبی جریان کاهش یافته و نوسانات بیشتری را تجربه کرده است، که با نتایج ما در کاهش تدریجی دبی همخوانی دارد. مطالعه دیگری توسط Benti و همکاران (۲۰۲۵) در حوضه رودخانه Olifants آفریقای جنوبی نیز نشان داد که تحت سناریوهای SSP، به‌ویژه SSP5-8.5، کاهش قابل توجهی در دبی جریان مشاهده شده است، که با افزایش تبخیر و کاهش بارش مؤثر مرتبط است. این مطالعات تأکید می‌کنند که تغییر اقلیم نه‌تنها بر میانگین دبی جریان اثر می‌گذارد، بلکه الگوهای زمانی و شدت جریان را نیز دستخوش تغییر می‌کند. در نتیجه، با توجه به نتایج این مطالعه و مقایسه با مطالعات جهانی، می‌توان گفت که تغییر اقلیم در قرن ۲۱ به‌ویژه تحت سناریوهای با انتشار بالا، منجر به کاهش تدریجی دبی جریان سطحی خواهد شد. این روند اگرچه در حال حاضر از نظر آماری معنادار نیست، اما جهت و شدت آن هشداردهنده است و نیازمند اقدامات مدیریتی و برنامه‌ریزی بلندمدت برای حفظ منابع آب و تاب‌آوری اکوسیستم‌های آبی می‌باشد.

پیش‌بینی دبی جریان با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های اقلیمی سناریوهای SSP نشان‌دهنده کاهش تدریجی جریان سطحی در آینده است. نتایج حاصل از مدل ANN نشان داد که در تمامی سناریوها، روند دبی جریان سطحی کاهشی است. این کاهش در سناریوی SSP5-8.5 که نمایانگر مسیر انتشار بالا و گرمایش شدیدتر است، بیشترین شدت را دارد. این یافته با نتایج آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن نیز همخوانی دارد، به‌طوری‌که شاخص Z در تمامی سناریوها منفی و مقدار τ کندال نیز

منفی و بسیار کوچک است. مطالعاتی از جمله عباسزاده و همکاران (۲۰۲۵) در حوضه رودخانه میناب در استان هرمزگان از مدل ANN برای پیش‌بینی دبی جریان تحت سناریوهای اقلیمی استفاده کرده‌اند و کاهش قابل توجهی در جریان سطحی را به‌ویژه در سناریوهای با انتشار بالا مشاهده کردند. همچنین، حشمتی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از مدل ANFIS و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حوضه‌های خشک نشان دادند که دبی جریان در آینده با نوسانات شدید و کاهش تدریجی مواجه خواهد بود، که با نتایج این مطالعه هم‌راستا است. در مطالعه دیگری توسط Singh et al. (۲۰۲۳) در مناطق کوهستانی هند با استفاده از داده‌های CMIP6 و مدل‌های یادگیری عمیق نشان داد که افزایش دما و تغییر الگوی بارش منجر به کاهش جریان‌های سطحی و افزایش نوسانات فصلی شده است. این موضوع اهمیت استفاده از مدل‌های هوشمند مانند ANN را در تحلیل دقیق و پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی در شرایط اقلیمی متغیر برجسته می‌سازد.

استفاده از ANN به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده بین متغیرهای ورودی و خروجی، به‌ویژه در سیستم‌های هیدرولوژیکی، انتخاب مناسبی برای پیش‌بینی بلندمدت دبی جریان محسوب می‌شود. نتایج نشان داد که تغییر اقلیم در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف SSP منجر به کاهش تدریجی دبی جریان سطحی شده است. استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در این مطالعه توانسته است روندهای بلندمدت دبی جریان را با دقت مناسبی شناسایی کند. کاهش دبی جریان در سناریوهای با انتشار بالا، به‌ویژه SSP5-8.5، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی است. این کاهش می‌تواند ناشی از افزایش دما، تبخیر و تعرق بیشتر، تغییر در زمان‌بندی و شدت بارش، و افزایش خشکسالی‌های دوره‌ای باشد. همچنین، مدل ANN با استفاده از داده‌های اقلیمی پیش‌بینی شده توانسته است روابط پیچیده بین متغیرهای اقلیمی و پاسخ هیدرولوژیکی را به‌خوبی مدل‌سازی کند. بنابراین، نتایج این مطالعه ضمن تأیید روند کاهشی دبی جریان در آینده، بر اهمیت استفاده از مدل‌های هوشمند در تحلیل و مدیریت منابع آب تأکید دارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از مدل‌های ترکیبی (مانند ANN با الگوریتم‌های بهینه‌سازی یا مدل‌های فازی) و تحلیل‌های فصلی و منطقه‌ای استفاده شود تا بتوان اثرات محلی تغییر اقلیم را با دقت بیشتری ارزیابی کرد و راهکارهای مدیریتی مؤثرتری ارائه داد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید است.

مشارکت نویسندگان

مقاله بصورت تک نویسنده می‌باشد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر، مستخرج از طرح پژوهشی و با حمایت معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه گلستان می‌باشد.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود را یاری نمودند، سپاسگزاری می‌کنم.

منابع و مأخذ

جوادی‌زاده، ف.، کردوانی، پ.، علیجانی، ب.، اسدیان، ف. (۱۳۹۷). کارایی الگوهای مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در حوضه آبریز میناب. جغرافیای طبیعی، ۱۱(۴۲)، ۴۷-۶۶.

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1397.11.42.4.2>

حمیدیان پور، م.، فلاح قاهره‌ری، غ.، علیم‌رادی، م.ر. (۱۴۰۰). ارزیابی کارایی مدل SDSM در بررسی پیامدهای تغییر اقلیم برای پهنه‌های اقلیمی مختلف ایران. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، دوره ۲، شماره ۵، ۱-۱۴.

<https://doi.org/10.30488/ccr.2020.248188.1023>

رضایی، م.، نهتانی، م.، آبکار، ع.، رضایی، م.، میرکازه‌ی ریگی، م. (۱۳۹۳). بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در دو اقلیم خشک و فراخشک (مطالعه موردی: کرمان و بم). پژوهشنامه مدیریت حوزه

آبخیز، سال ۵، شماره ۱۰، ۱۳۱-۱۱۷. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-417-fa.html>

صمدی نقاب، س.، حبیبی نوخندان، م.، زابل عباسی، ف. (۱۳۹۰). بکارگیری مدل SDSM جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های GCM بارش و دما مطالعه موردی: پیش‌بینی‌های اقلیمی ایستگاهی در ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، جلد ۲، شماره ۵ و ۶، ۵۷-۶۸.

فهمی‌راد، ز.، رجایی، ط. و شاه‌کرمی، ن. (۱۴۰۱). اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی و رواناب حوضه سد کمال صالح استان مرکزی. مهندسی آبیاری و آب، ۱۲(۴۷)، ۲۸۲-۲۶۱. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.146407>

یوسفی، ح.، امینی، ل.، قاسمی، ل.، امرایی، ن. (۱۳۹۷). بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک کرج). مجله اکوهیدرولوژی، دوره ۵، شماره ۳، ۹۶۸-

<https://doi.org/10.22059/ije.2018.254290.847> ۹۵۷

Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Katipoğlu, O. M., & Jamshid, S. (2025). Harnessing artificial intelligence for streamflow predictions under climate change scenarios in arid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(4), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05451-w>

Ali, M. A., & Kamraju, M. (2023). Climate Change and Natural Resources. In *Natural Resources and Society: Understanding the Complex Relationship Between Humans and the Environment* (pp. 143-158). Cham: Springer Nature Switzerland.

ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. (2000). Artificial neural networks in hydrology. II: Hydrologic applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 124-137.

Benti, K. K., Dinka, M. O., Rwanga, S. S., & Aredo, M. R. (2025). Assessing Streamflow Response to Climate Change Under Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) in the Olifants River Basin, South Africa. *Hydrology*, 12(9), 244. <https://doi.org/10.3390/hydrology12090244>

Bi, W., Weng, B., Yuan, Z., Ye, M., Zhang, C., Zhao, Y., ... & Xu, T. (2018). Evolution characteristics of surface water quality due to climate change and LUCC under scenario simulations: a case study in the Luanhe River Basin. *International journal of environmental research and public health*, 15(8), 1724. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081724>

Caretta, M. A., et al. (2022). Water. In *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (pp. 551-712). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>

Dawson, C. W., & Wilby, R. L. (2001). Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in physical Geography*, 25(1), 80-108. <https://doi.org/10.1177/030913330102500104>

Fahimirad, Z., Rajaei, T., & Shahkarami, N. (2022). The effect of climate change on climatic variables and runoff in the Kamal Saleh Dam watershed, Markazi Province. *Irrigation and Water Engineering*, 12(47), 261-282. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.146407> [In Persian].

Gacu, J. G., Monjardin, C. E. F., Mangulabnan, R. G. T., & Mendez, J. C. F. (2025). Application of artificial intelligence in hydrological modeling for streamflow prediction in ungauged watersheds: A review. *Water*, 17(18), 2722. <https://doi.org/10.3390/w17182722>

Goswami, G., Prasad, R. K., & Mandal, S. (2025). Streamflow variability under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios using QSWAT plus for Subansiri River Basin in Arunachal Pradesh, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(5), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05496-x>

- Hamidianpour, M., Fallah Qalehri, G., & Alimoradi, M. R. (2021). Evaluation of the efficiency of the SDSM model in assessing climate change impacts for different climatic zones of Iran. *Climate Change Research*, 2(5), 1–14. <https://doi.org/10.30488/ccr.2020.248188.1023> [In Persian].
- Heshamati, S., Nazari, B., & Nikoo, M. R. (2025). Enhancing accuracy in streamflow prediction under climate change scenarios based on an integrated machine learning–metaheuristic optimization approach. *Journal of Water and Climate Change*, 16(2), 456–473. <https://doi.org/10.2166/wcc.2025.499>
- IPCC, 2001. Climate change 2001: IPCC Special Report Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change, ISBN: 92-9169, 113-115.
- IPCC, 2007. The scientific Basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press. New York, USA.
- Javadizadeh, F., Kardavani, P., Alijani, B., & Asadian, F. (2019). Efficiency of statistical downscaling model (SDSM) patterns in predicting temperature parameters in the Minab watershed. *Physical Geography*, 11(42), 47–66. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1397.11.42.4.2> [In Persian].
- Kendall, M.G. (1975) Rank Correlation Methods. 4th Edition, Charles Griffin, London.
- Lettenmaier, D.P., Wood, E.R. & Wallis, J.R. (1994). Hydro-Climatological Trends in the Continental United States, 1948-88. *Journal of Climate*, 7(4), 586-607.
- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend, *Econometrica* 13:163-171. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mimeau, L., Künné, A., Devers, A., Branger, F., Kralisch, S., Lauvernet, C., ... & Datry, T. (2025). Projections of streamflow intermittence under climate change in European drying river networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(6), 1615-1636. <https://doi.org/10.5194/hess-29-1615-2025>
- Oyebode, O., & Stretch, D. (2019). Neural network modeling of hydrological systems: A review of implementation techniques. *Natural Resource Modeling*, 32(1), e12189.
- Ray, R. L., & Tikuye, B. G. (2025). Impact of Climate Change on Surface Water Resources. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1011407>
- Rezaei, M., Nahtani, M., Abkar, A., Rezaei, M., & Mirkazahi Rigi, M. (2014). Evaluation of the efficiency of the statistical downscaling model (SDSM) in predicting temperature parameters in two arid and hyper-arid climates (Case study: Kerman and Bam). *Watershed Management Research Journal*, 5(10), 117–131. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-417-fa.html> [In Persian].
- Rummukainen, M. (2012). Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(2), 115-129.
- Samadi Neqab, S., Habibi Nokhandan, M., & Zabol Abbasi, F. (2011). Application of the SDSM model for downscaling GCM precipitation and temperature data: A case study of station-based climate projections in Iran. *Climatology Research*, 2(5–6), 57–68.
- Sheikha-BagemGhaleh, S., Babazadeh, H., Rezaie, H., & Sarai-Tabrizi, M. (2023). The effect of climate change on surface and groundwater resources using WEAP-MODFLOW models. *Applied Water Science*, 13(6), 121. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01923-4>
- Sigmond, M., Anstey, J., Arora, V., Digby, R., Gillett, N., Kharin, V., Yang, D., (2023). Improvements in the Canadian Earth system model (CanESM) through systematic model analysis: CanESM5. 0 and CanESM5. 1. *Geoscientific Model Development*, 16(22): 6553-6591. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6553-2023>
- Singh, D., Vardhan, M., Sahu, R., Chatterjee, D., Chauhan, P., & Liu, S. (2023). Machine-learning-and deep-learning-based streamflow prediction in a hilly catchment for future

- scenarios using CMIP6 GCM data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(5), 1047-1075. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1047-2023>
- Sobkowiak, L., & Wrzesiński, D. (2024). Impacts of Climate Change on Water Resources: Assessment and Modeling-First Edition. *Water*, 16(24), 3578. <https://doi.org/10.3390/w16243578>
- Sudarsan, G., & Lasitha, A. (2023). Rainfall Trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope test estimation-A case study. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 405, p. 04013). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340504013>
- Swart, N. C., Cole, J. N., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., ... & Winter, B. (2019). The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823-4873. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>
- Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological sciences journal*, 54(1), 101-123. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>
- Yousefi, H., Amini, L., Ghasemi, L., & Emraei, N. (2018). Evaluation of the efficiency of the statistical downscaling model (SDSM) in simulating and predicting climatic parameters (Case study: Karaj synoptic station). *Ecohydrology Journal*, 5(3), 957-968. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.254290.847> [In Persian].
- Zhang, C., Xiao, X., Wang, X., Yi, S., Meng, C., Qin, Y., ... & Dong, J. (2025). Climate-induced losses of surface water and total water storage in Northeast Asia. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 479. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02449-0>