اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان

علیرضا مساح بوانی و سعید مرید[1]

چکیده

تحقیق حاضر آثار ناشی از تغییر اقلیم روی دما، بارندگی و رواناب در حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود اصفهان را تحت دو سناریوی اقلیمی و برای دو دوره سی‌ساله ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ میلادی، تجزیه و تحلیل می‌نماید. اطلاعات مورد نیاز از مدل گردش عمومی (GCM) HadCM3 شامل مقادیر بارندگی و درجه حرارت (متوسط، حداقل و حداکثر) ماهانه در دوره‌های آتی، تحت دو سناریوی A2 و B2 از سناریوهای تولید گازهای گلخانه‌ای SRES تأمین شده است. در سناریوی A2 به دلیل تأکید بر رشد صنایع و توجه کمتر به محیط زیست افزایش بیشتری در گازهای گلخانه‌ای نسبت به سناریوی B2 که توجه بیشتری به محیط زیست دارد، فرض شده است. نتایج در مجموع نشان از کاهش بارندگی و افزایش درجه حرارت در هر دو دوره و به خصوص در دوره دوم را داشته، به طوری‌که در طی این دوره‌ها میزان کاهش بارندگی ۱۰ و ۱۶ درصد و افزایش درجه حرارت به میزان ۴/۶ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب در سناریوهای A2 و B2 پیش‌بینی می‌شود. جهت بررسی تأثیر این تغییرات بر جریان ورودی به سد چادگان با استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network, ANN) و با بررسی ورودی‌ها و معماری‌های مختلف، شبیه‌سازی بارش - رواناب در حوضه انجام شده که خروجی‌های مدل، کاهش جریان تا ۵/۸ درصد و افزایش ضریب تغییرات جریان تا ۳ برابر را برای دوره‌های آتی نشان می‌دهد. مقایسه سناریوهای A2 و B2 نشان از وضعیت بحرانی‌تر سناریوی A2 در این حوضه دارد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیم، مدل گردش عمومی، سناریو اقلیمی، شبکه عصبی مصنوعی، حوضه زاینده‌رود

مقدمه

گزارش‌های (Intergovernmental Panel on Climate Change) IPCC حاکی از آن است که به دلیل افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های گذشته در جو زمین، خروج امواج حرارتی (طول موج بلند) از زمین با موانع بیشتری رو به رو شده که افزایش دمای هوا را به دنبال داشته است. این افزایش به میزان ۰/۳ تا ۰/۶ درجه سانتی‌گراد در طول قرن گذشته بوده که در دهه‌های اخیر شتاب بیشتری یافته است (۱۱). این در حالی است که اگر انتشار این گازها کاهش نیابد متوسط دمای سطحی کره زمین می‌تواند به میزان ۱ تا ۳/۵ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ افزایش یابد. طبق گزارش‌های IPCC تغییر اقلیم منتج از فرایند فوق باعث ایجاد تغییرات در

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]

رژیم هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده است. به طوری که بارندگی و جریان‌های سطحی در عرض‌های جغرافیایی بالا و میانی بیشتر و در عرض‌های پایینی کمتر شده و احتمال مواجهه با رخدادهای حداکثر اقلیمی مانند سیلاب و خشک‌سالی افزایش یافته است (۱۱ و ۱۴).

به دلیل اهمیت تغییر اقلیم و اثراتی که می‌تواند روی منابع آب داشته باشد، در سال‌های اخیر این مهم برای حوضه‌های آبریز مختلف در سطح کره زمین مد نظر قرار گرفته است. انگل و هاف (۱۹۹۷) در پژوهشی تغییرات توزیع بارش‌های شدید (≥۵۱ mm) در غرب آمریکا را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که ایستگاه‌های تحت مطالعه در سال‌های اخیر شانس بیشتری برای مواجهه با بارندگی شدید یک روزه داشته‌اند که نشان از وقوع نوعی عدم ایستایی(Non stationary) در سری‌های زمانی بوده و برازش توزیع‌های آماری روی داده‌های گذشته بارندگی در این منطقه می‌تواند با اشکال همراه باشد (۴). گلنز و رولین (۱۹۹۸) تأثیر این پدیده را بر جریان رودخانه اصلی در حوضه بلژیک، تحت خروجی‌های شش مدل گردش عمومی (GCM، General circulation model) مورد بررسی قرار دادند. تمام مدل‌ها به جز دو مدل، افزایش فراوانی سیلاب را در ماه‌های زمستان در این رودخانه نشان دادند (۹). یاتز و استرزپک (۱۹۹۸) با مدل کردن حوضه رودخانه نیل تحت تأثیر سناریو اقلیم با استفاده از ۵ مدل گردش عمومی، نشان دادند که این حوضه در دوره‌های آتی نسبت به تغییر اقلیم حساس بوده و به‌خصوص مقادیر متوسط دبی در آن افزایش خواهد یافت (۱۷). نتایج پژوهش کامگا (۲۰۰۱) در بالادست رودخانه بنو در کامرون نشان داد که تا سال ۲۱۰۰ این منطقه می‌تواند شاهد افزایش بارندگی به میزان ۴ تا ۱۳ درصد، افزایش دما به میزان ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد و تغییرات متوسط سالانه جریان به میزان ۳- تا ۱۸+ درصد باشد (۱۳). بررسی آثار تغییر اقلیم در حوضه آبریز رودخانه فراسر در کانادا و تأثیر آن بر روی تخم‌گذاری ماهی آزاد که توسط مریسون و همکاران (۲۰۰۲) انجام شد، نشان داد که در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ متوسط جریان رودخانه به میزان ۵ درصد (۱۵۰ m3/s) افزایش و حداکثر متوسط جریان به میزان ۱۸ درصد (۱۶۰۰ m3/s) کاهش خواهد داشت. در همین دوره متوسط دمای تابستانی آب ۱/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش نشان داد که روی تخم‌گذاری این ماهی‌ها اثر منفی داشته است (۱۵). یو و همکاران (۲۰۰۲) تأثیر تغییر اقلیم روی منابع آب جنوب تایوان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان از افزایش دما در دوره‌های طولانی‌مدت و تغییرات شدید در احتمال انتقال (transition probabilities) رخداد بارندگی روزانه بوده به طوری که برای اکثر ماه‌ها احتمال انتقال روز تر به تر کاهش یافته است (۱۸).

هدف از تحقیق حاضر بررسی آثار تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان است. در این راستا دو سناریو اقلیمی برای دو دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ (آینده نزدیک) و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ (آینده دور) میلادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این بررسی بخشی از طرح تحقیقاتی بین‌المللی تطبیق با تغییرات اقلیم (ADAPT) می‌باشد که هم‌زمان در ۷ حوضه در سطح دنیا شامل Mekong در جنوب شرقی آسیا، Rhine در غرب اروپا، Sacramento در ایالات متحده امریکا، Syr Darya در آسیای مرکزی و Walawe در سریلانکا انجام رسیده است.

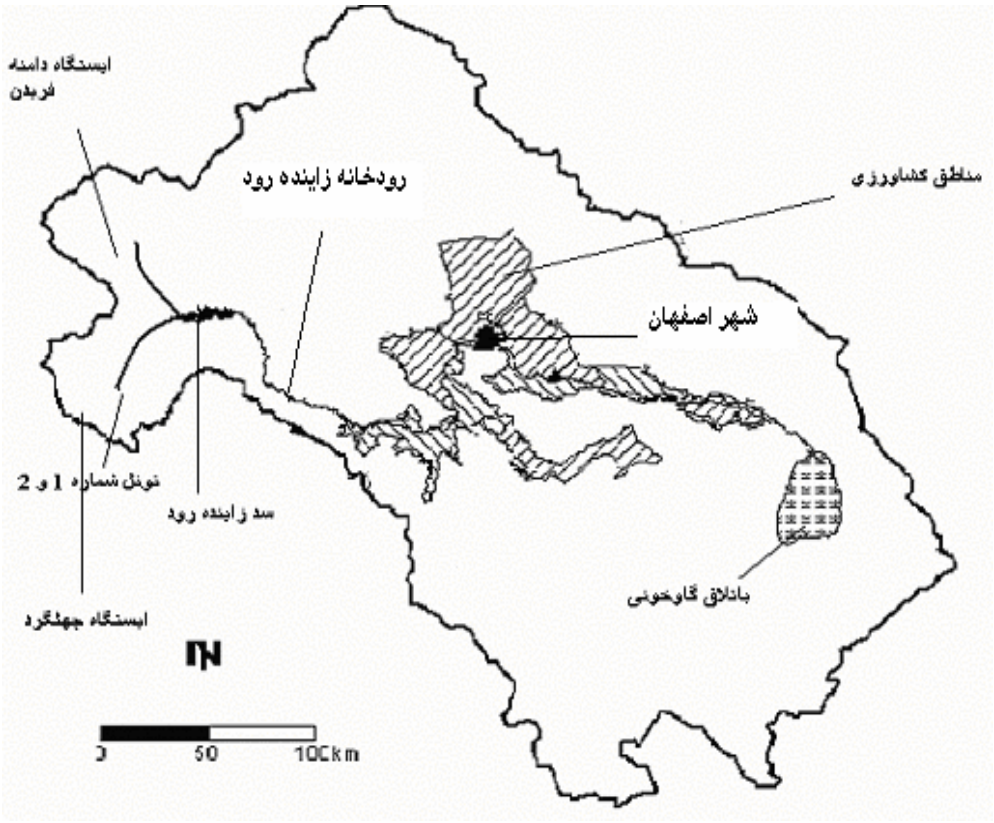
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

حوضه زاینده‌رود با مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومترمربع در استان اصفهان واقع شده است. رودخانه اصلی این حوضه با مسیری غربی- شرقی از کوه‌های زاگرس سرچشمه گرفته و به باطلاق گاوخونی ختم می‌شود و در طی مسیر ضمن استفاده بخشی از صنایع منطقه و شهر اصفهان از آن، اراضی کشاورزی را نیز مشروب می‌سازد. سد چادگان روی این رودخانه قرار دارد که علاوه بر ذخیره آب نابهنگام رودخانه، جریان انتقالی از تونل‌های شماره ۱ و ۲ کوهرنگ را در خود جای می‌دهد. (شکل ۱).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی و رودخانه زاینده‌رود

مدل‌های تولید داده برای دوره‌های آتی با توجه به تغییر اقلیم

بارندگی و دما، دو متغیر هواشناسی هستند که در بررسی تغییر اقلیم نقش تعیین کننده‌ای را ایفا می‌کنند. به منظور شبیه‌سازی آنها برای دوره‌های آتی تحت آثار این پدیده، از مدل‌های اقلیمی مختلفی استفاده می‌شود. این مدل‌ها به دو دسته مدل‌های آماری و مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) تقسیم می‌شوند (۱۲). استفاده از مدل‌های GCM بیشتر مورد تایید و توجه بوده (۹، ۱۱، ۱۲، ۱۶ و ۱۷) و در این پژوهش از آن بهره گرفته شده است.

مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)

مدل‌های GCM مدل‌های عددی بوده که فرایندهای مابین اتمسفر، اقیانوس، یخ کره (Cryosphere) و سطح زمین را به طور سه بعدی شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها با در نظر گرفتن یک شبکه سه بعدی، نوعا با مقیاس افقی (طول جغرافیایی) ۶۵۰ × (عرض جغرافیایی) ۲۵۰ کیلومتر، ۱۰ تا ۲۰ لایه عمودی در اتمسفر بخش خشکی زمین و بیش از ۳۰ لایه در اقیانوس‌ها، پارامترهای اقلیمی را تولید می‌نمایند. تاکنون مدل‌های گردش عمومی مختلفی در مراکز مختلف تحقیقاتی تدوین و طراحی شده است. از آن جمله می‌توان به مدل‌های GFDL, GFDLT, GISS UKMO, MPI, CCC, ECHAM4 و HadCM3 اشاره کرد (۱۱ و ۱۷). از آنجا که مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی بوده و از طرف دیگر محاسبه و تعیین انتشار این گازها در دوره‌های آتی به طور قطعی امکان‌پذیر نمی‌باشد، از این رو سناریوهای مختلفی که شامل چگونگی تغییرات این گازها در آینده می‌باشد، ارائه شده

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]

است که آنها را سناریوهای انتشار (Emission scenario) می‌نامند. IPCC در سال ۱۹۹۸ سری جدید سناریوهای انتشار با نام SRES (Special Report on Emission Scenarios) را ارائه داد. در این سناریوها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با توجه به پیش‌بینی محرک‌هایی (Drivers) مانند میزان جمعیت، نرخ رشد اقتصادی و میزان اهمیت به محیط زیست برای دوره‌های آتی تعیین می‌شود. جدول ۱ بعضی از ویژگی‌های ۴ سناریوی شاخص از مجموعه این سناریوها را در سال ۲۱۰۰ نشان می‌دهد (۱۲). لازم به ذکر است که به دلیل هزینه‌بر بودن اجرای تمامی سناریوها توسط مدل‌های GCM، اجرای تمامی آنها توسط این مدل‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در این تحقیق از خروجی‌های مدل HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 از مجموعه سناریوهای SRES استفاده شده که داده‌های آن در مقیاس °۲/۵ (عرض جغرافیایی) × °۳/۷۵ (طول جغرافیایی) است (۱۱).

در سناریوی A2، جهان، دنیایی متمایز با وضعیت فعلی آن خواهد بود. موضوع در برگیرنده این سناریو تقویت نیروهای جمعیتی منطقه‌ای با تأکید بر ارزش خانواده و رسوم آن، رشد زیاد جمعیت و نوسانات کمتر در سرعت پیشرفت اقتصادی می‌باشد. ولی سناریوی B2 جهانی است که تأکید آن بر راه‌حل‌های منطقه‌ای برای تقویت مسایل اقتصادی، اجتماعی و محیط زیست می‌باشد. این یک دنیای ناهمگون با سرعت تغییرات تکنولوژی کمتر، ولی با تنوع بیشتر می‌باشد. تأکید قوی در این سناریو، بر ابتکار عمل جامعه و نوآوری‌های آن برای یافتن راه‌حل‌های منطقه‌ای می‌باشد (۱۲).

کوچک مقیاس کردن (Downscaling)

با توجه به وضوح مکانی (Resolution) پایین مدل‌های GCM، استفاده از آنها در مقیاس منطقه‌ای امکان‌پذیر نبوده و از طرف دیگر مقایسه خروجی‌های آنها برای دوره‌های گذشته با داده‌های مشاهداتی نشان از وجود اختلاف دارد. از این رو لازم است هنگام استفاده از آنها تصحیحاتی اعمال گردد. این تصحیحات شامل دو مرحله کوچک مقیاس کردن و تغییر میدان (Change field) داده‌ها می‌باشد (۱۲). در کوچک مقیاس کردن داده‌های GCM تلاش این است تا وضوح مکانی اطلاعات بالا رود مانند این تحقیق که داده‌ها به روش زمین آماری (Kriging) توسط مرکز ITC هلند از مقیاس °۲/۵ (عرض جغرافیایی) × °۳/۷۵ (طول جغرافیایی) به °۰/۵×°۰/۵ ارتقا یافتند.

به منظور تغییر میدان داده‌های GCM، از خروجی این مدل‌ها که برای دوره‌های گذشته اجرا شده و داده‌های اندازه‌گیری شده در دوره آماری مشابه استفاده می‌شود. در این خصوص تعدیلاتی صورت می‌گیرد که خصوصیات آماری (مانند میانگین) داده‌های GCM با خصوصیات آماری داده‌های اندازه‌گیری شده یکسان گردد. سپس این تعدیلات برای داده‌های آتی GCM اعمال می‌گردد. در این پژوهش از روش ارائه شده توسط گروه Alcamo/Doll از دانشگاه Kassel (۲) استفاده شده است.

$$T'_{GCM,fut} = (\overline{T}_{obs} - \overline{T}_{GCM,his}) + T_{GCM,fut} \qquad [۱]$$

$$P'_{GCM,fut} = (\overline{P}_{obs} / \overline{P}_{GCM,his}) \times P_{GCM,fut} \qquad [۲]$$

در روابط بالا $\overline{T}_{obs}$ و $\overline{P}_{obs}$ به ترتیب برابر میانگین دما و بارندگی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد نظر، $\overline{T}_{GCM,his}$ و $\overline{P}_{GCM,his}$ میانگین دما و بارندگی داده‌های گذشته مدل گردش عمومی (دوره مشترک با مشاهدات)، $T_{GCM,fut}$ و $P_{GCM,fut}$ داده‌های اولیه مدل گردش عمومی برای دوره‌های آتی و $T'_{GCM,fut}$ و $P'_{GCM,fut}$ همین داده‌ها پس از تصحیح می‌باشند.

شبیه‌سازی بارش - رواناب

جهت بررسی آثار تغییر اقلیم بر رواناب لازم است تا داده‌های بارندگی تولید شده توسط مدل GCM به رواناب تبدیل شوند. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی بارش- رواناب وجود دارد و یکی از تکنیک‌های جدید که برای این شبیه‌سازی مورد توجه زیادی قرار گرفته، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) می‌باشد (۵ و ۶) که در این تحقیق مورد استفاده واقع شده است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]

جدول ۱. خلاصه‌ای از مشخصات سناریوهای اقلیمی SRES در سال ۲۱۰۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ (۱۱)

خصوصیت سناریو	۱۹۹۰	A1	A2	B1	B2
جمعیت جهان (میلیارد)	۵/۲۵۲	۷/۱	۱۵/۱	۷/۰	۱۰/۴
غلظت CO_2 در اتمسفر زمین(PPM)	۳۵۴	۶۸۰	۸۳۴	۵۴۷	۶۰۱
شاخص رشد اقتصادی جهانی (GDP) (10^{12}\$/yr)	۲۱	۵۵۰	۲۴۳	۳۲۸	۲۳۵

ANN یک سیستم پردازش اطلاعات می‌باشد که از تعداد زیادی عصب‌های (Neuron) پردازشگر که به طور متراکم با یکدیگر در ارتباط هستند تشکیل شده است. مدل شبکه عصبی مصنوعی قادر می‌باشد تا با استفاده از الگوهای موجود از فرایند مورد نظر (در این جا فرایند بارش - رواناب) روابط پیچیده بین آنها را شناسایی کرده و یاد گیرد و در نهایت بر اساس مجموعه‌ای از ورودی‌ها، خروجی مورد نظر را شبیه‌سازی نماید. مهم‌ترین کار در استفاده از این تکنیک شناسایی ورودی‌های موثر بر فرایند مورد بررسی است. برای این تحقیق بارندگی و دما به عنوان ورودی به مدل ارزیابی شد. به علاوه با توجه به برفی بودن حوضه و نقش موثر تابش خورشیدی در شبیه‌سازی رواناب در این‌گونه حوضه‌ها (۱) این متغیر هواشناسی هم به عنوان ورودی دیگر مورد ارزیابی قرار گرفت. ولی به دلیل نبود آمار کافی از آن بر اساس روش هارگریوز و سامانی برآورد گردید (۱۰):

$$R_s= k_r(T_{max}-T_{min})^{0/5} R_a \qquad [۳]$$

در این رابطه R_s و R_a به‌ترتیب تابش خورشید رسیده به سطح زمین و بالای جو (انرژی) و T_{max} و T_{min} درجه حرارت حداکثر و حداقل (°C) تابش می‌باشد. k_r ضریب تجربی بوده که R_s را برای شرایط مختلف آب و هوایی تعدیل می‌کند که محدوده‌ای بین ۰/۱۶ تا ۰/۲ داشته و با توجه به شرایط حوضه ۰/۱۹ در نظر گرفته شده است (۳). هم‌چنین شرح محاسبه R_a در منبع ۸ آمده است.

نتایج و بحث

عمده منابع آبی رودخانه زاینده‌رود اصفهان از حوضه‌های بالادست تامین می‌شود. از این رو متغیرهای اقلیمی ایستگاه‌های این ناحیه برای تحلیل‌های مورد نیاز این تحقیق و بخصوص فرایند بارش- رواناب بررسی شدند.

شبیه‌سازی بارش - رواناب بر اساس داده‌های ثبت شده

همان‌گونه که آمد برای برآورد جریان رودخانه برای دوره‌های آتی و با توجه به بحث تغییر اقلیم از مدل ANN استفاده شد. به منظور آموزش و صحت‌یابی شبکه، ابتدا تمامی ایستگاه‌های هواشناسی بالادست سد چادگان مورد آزمون قرار گرفتند که از این بین داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های دامنه فریدن و چهل‌گرد بهترین نتایج را در عملکرد بهتر شبکه به همراه داشتند. دوره آماری مورد استفاده از این ایستگاه‌ها سال‌های ۱۳۶۶ لغایت ۱۳۸۰ بوده و آمار ورودی به سد نیز برای همین دوره تهیه گردید که جریان طبیعی رودخانه و آب انتقالی از تونل‌های ۱ و ۲ کوهرنگ را شامل می‌شود. از این آمار، سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۷۴ برای آموزش و دوره ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۰ برای دوره صحت‌یابی در نظر گرفته شد. سپس شبکه‌های مختلف عصبی با مدل‌های ورودی زیر مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$Q(t)= f (R(t)) \qquad \text{(مدل ۱)}$$

$$Q(t)= f (R(t), T_{avg}(t)) \qquad \text{(مدل ۲)}$$

$$Q(t)= f (R(t), T_{min}(t), T_{max}(t)) \qquad \text{(مدل ۳)}$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]

$$Q(t)= f (R(t), T_{min}(t), T_{max}(t), Rs(t)) \quad \text{(مدل ۴)}$$

$$Q(t)= f (R(t), R(t-1), T_{min}(t), T_{min}(t-1), T_{max}(t), T_{max}(t-1), Rs (t)) \quad \text{(مدل ۵)}$$

که در آن Q دبی ماهانه ورودی به سد، R متوسط بارندگی ماهانه ایستگاه چهل‌گرد، T_{min} و T_{max} متوسط دمای حداقل و حداکثر ماهانه ایستگاه دامنه فریدن، R_s تابش خورشید ورودی به سطح زمین در عرض جغرافیایی منطقه سد و t نشان دهنده زمان کنونی می‌باشد.

برای طراحی شبکه، مدل‌های ورودی فوق در کنار معماری‌های مختلف، توابع انتقال متفاوت و شبکه‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور بررسی عملکرد مدل‌های مورد آزمون از سه پارامتر ضریب هم‌بستگی (رابطه ۴)، RMSE (Root Mean Square Error) (رابطه ۵) و MAE (Mean Absolute Error) (رابطه ۶) استفاده گردید. جدول ۲ بهترین نتایج حاصل از ورودی‌های فوق را نشان می دهد که در آن مدل ۵ ورودی‌ها با معماری [۷،۲،۱]، تابع انتقال LogSig و شبکه Elman (۸) بهترین عملکرد را دارد. ویژگی شبکه Elman در نظر گرفتن خروجی مدل در یک گام زمانی قبل به عنوان یکی از ورودی‌های فعلی می‌باشد که به نوعی ذخیره در حوضه را در شبیه‌سازی دخالت می‌دهد.

$$R^2 = \frac{\sum_{m=1}^{K} X_m Y_m}{\sqrt{\sum_{m=1}^{K} X_m^2 \sum Y_m^2}} \quad [۴]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{K} (X_m - Y_m)^2}{K}} \quad [۵]$$

$$MAE = \frac{\sum_{m=1}^{K} |X_m - Y_m|}{K} \quad [۶]$$

در روابط فوق X_m مقادیر مشاهداتی، Y_m مقادیر برآورد شده و K تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

با توجه به نتایج تحلیل بالا در مرحله بعدی، اثر تغییر اقلیم روی ورودی‌های مدل ۵ و ایستگاه‌های دامنه فریدن و چهل‌گرد ارزیابی می‌گردد.

کوچک مقیاس کردن و تصحیح داده‌های مدل گردش عمومی HadCM3

اشاره شد که بنا بر روش‌شناسی طرح ADAPT، داده‌های بارندگی و دمای (متوسط، حداقل وحداکثر) ماهانه مربوط به مدل گردش عمومی HadCM3 برای دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ تحت دو سناریوی A2 و B2 مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بالا بردن دقت وضوح مکانی این داده‌ها با استفاده از روش کریجینگ (Kriging)، به ابعاد °۰/۵×°۰/۵ کوچک مقیاس شدند که شرح آن در مرجع ۱۱ آمده است. هم‌چنین جهت تغییر میدان داده‌های GCM بر اساس اطلاعات ایستگاه دامنه فریدن برای دما و چهل‌گرد برای بارندگی، داده‌های این مدل برای سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۶۱ نیز تهیه و با استفاده از روابط ۱ و ۲ تصحیح شدند.

تجزیه و تحلیل بارندگی بر اساس داده‌های تغییر اقلیمی

با توجه به آنچه آمد مقادیر بارندگی برای دوره‌های زمانی آتی تولید گردیده و با دوره آماری دراز مدت موجود مقایسه شدند. برای ایستگاه چهل‌گرد، میزان متوسط سالانه ۳۰ ساله بارندگی در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ تحت سناریوی A2، ۱۲ میلی‌متر افزایش و در سناریوی B2، ۳۱ میلی‌متر کاهش نسبت به دوره ۲۰۰۰- ۱۹۷۱ داشته است. این تغییرات برای دوره ۲۰۷۰- ۲۰۹۹ برابر ۲۳۴ میلی‌متر کاهش در سناریوی A2 و ۱۴۹ میلی‌متر کاهش در سناریوی B2 قابل پیش‌بینی است (جدول ۳). شکل‌های ۲ و ۳ نشان دهنده افزایش بارندگی در ماه‌های پاییز و کاهش آن در سایر ماه‌ها می‌باشد. علاوه بر میانگین‌ها، فراوانی سال‌های خشک و توالی آنها نیز بررسی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

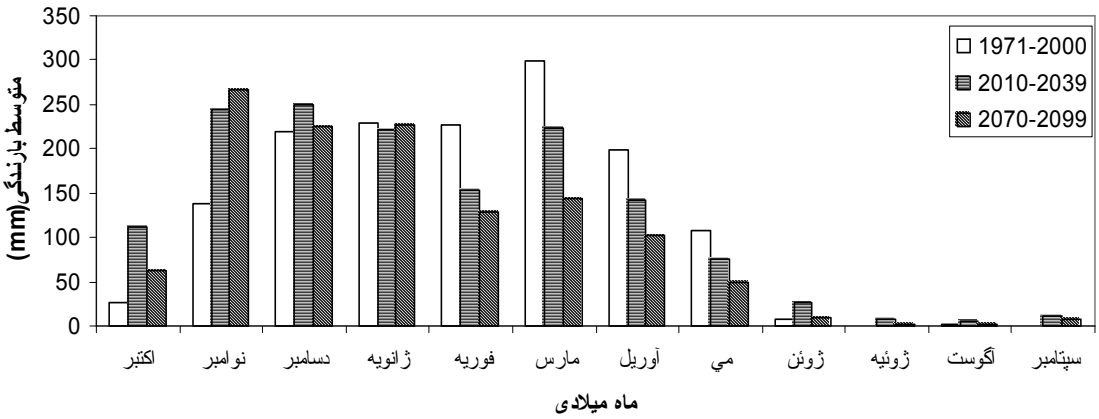
[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]

جدول ۲. عملکرد مدل‌های ورودی برای شبیه‌سازی بارش- رواناب در ورودی به سد چادگان

مدل	معماری	آموزش			صحت‌یابی		
		R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE
۱	۱-۱۵-۱	۰/۰۶	۷/۵۲	۶/۰۶	۰/۰۴	۸/۷۱	۸/۲۴
۲	۱-۳-۲	۰/۱۸	۴/۳۵	۴/۲۲	۰/۱۴	۴/۷۱	۴/۵۲
۳	۱-۵-۳	۰/۳۶	۳/۱۲	۳/۰۶	۰/۳۱	۳/۴۷	۳/۳۰
۴	۱-۳-۴	۰/۸۱	۱/۴۷	۰/۸۳	۰/۷۰	۱/۸۲	۱/۳۲
۵	۱-۲-۷	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۹۷	۰/۸۲

جدول ۳. پارامترهای آماری سالانه دما و بارندگی ایستگاه‌های دامنه فریدن و چهل‌گرد و دبی ورودی به سد چادگان تحت سناریوهای A2 و B2

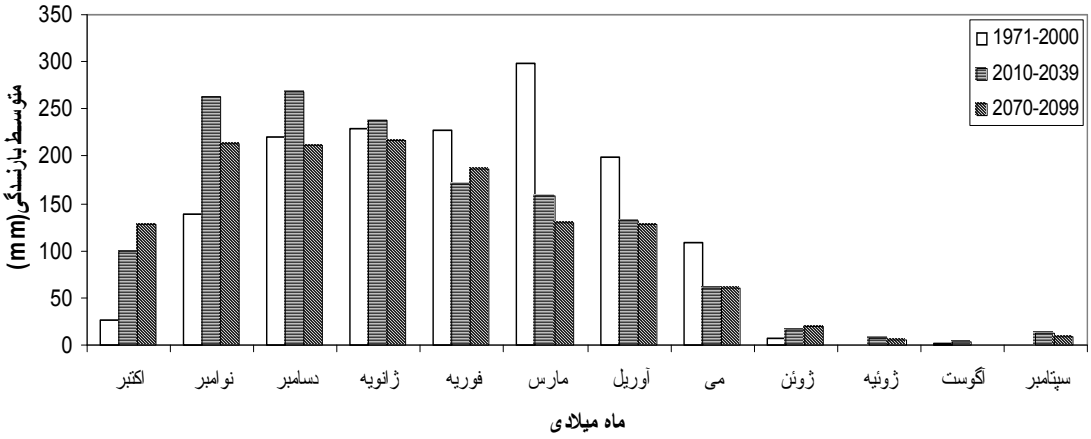
دوره	پارامتر آماری	بارندگی (mm)	درجه حرارت (ºc)	دبی (m3/s)	بارندگی (mm)	درجه حرارت (ºc)	دبی (m3/s)
۱۹۷۱-۲۰۰۰	میانگین	۱۴۵۸	۹/۹	۴۵/۳	۱۴۵۸	۹/۹	۴۵/۳
(اندازه‌گیری شده)	انحراف معیار	۳۷۱/۲	۰/۹	۱۴/۱	۳۷۱/۲	۰/۹	۱۴/۱
	ضریب تغییرات	۲۵/۵	۹/۱	۳۱/۱	۲۵/۵	۹/۱	۳۱/۱
سناریو		A2	A2	A2	B2	B2	B2
۲۰۱۰-۲۰۳۹	میانگین	۱۴۷۰	۱۱/۰	۴۴/۲	۱۴۲۷	۱۱/۱	۴۴/۶
	انحراف معیار	۵۳۸/۲	۰/۹	۳۰/۹	۳۶۱	۰/۶	۳۳/۷
	ضریب تغییرات	۳۶/۶	۸/۲	۶۹/۹	۲۵/۳	۵/۴	۷۵/۶
۲۰۷۰-۲۰۹۹	میانگین	۱۲۲۴	۱۴/۵	۴۲/۶	۱۳۰۹	۱۳/۱	۴۳/۴
	انحراف معیار	۳۷۷/۴	۱/۱	۳۱/۹	۴۴۲	۰/۶	۴۰/۲
	ضریب تغییرات	۳۰/۸	۷/۵۸	۷۴/۹	۳۳/۸	۴/۶	۹۲/۶



شکل ۲. توزیع ماهانه بارندگی دراز مدت، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی A2

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]



شکل ۳. توزیع ماهانه بارندگی دراز مدت، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی B2

گردید. نتایج نشان داد که تعداد سال‌های خشک متوالی در سناریوی A2 از ۳ سال در دوره ۲۰۰۰- ۱۹۷۱ به ۸ سال در دوره ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ و ۱۱ سال در دوره ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ افزایش یافته است. این مقادیر در سناریوی B2 برابر ۲ سال در دوره ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ و ۳ سال در دوره ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ می‌باشد.

بدین ترتیب انتظار می‌رود که میانگین دراز مدت بارندگی در دوره‌های ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ تغییرات محسوسی تحت دو سناریو مورد مطالعه نداشته باشد، ولی کاهش بارندگی در دوره ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ تحت هر دو سناریو قابل توجه می‌باشد. مقایسه سناریوی A2 و B2 نشان از وضعیت بحرانی‌تر سناریوی A2 در منطقه مورد مطالعه دارد.

تجزیه و تحلیل دما بر اساس داده‌های تغییر اقلیمی

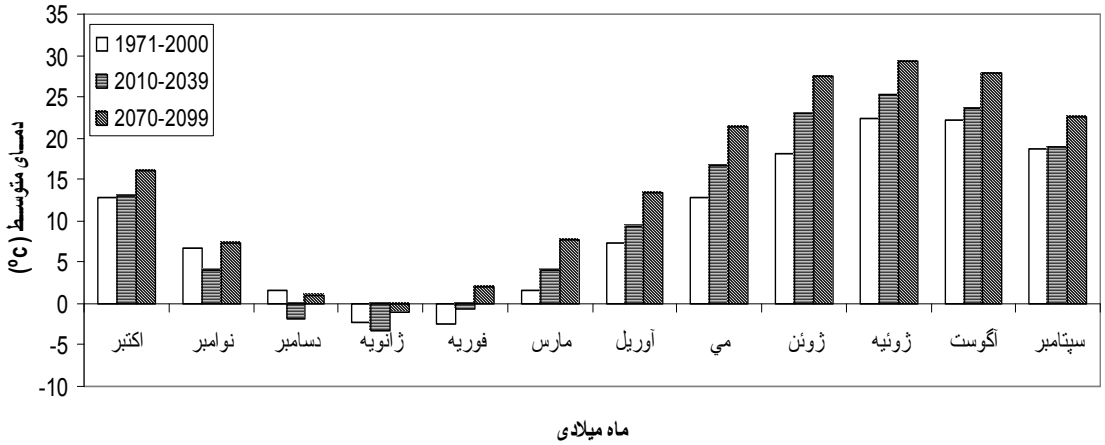
بررسی تغییرات دما برای منطقه طرح و بر اساس ایستگاه دامنه فریدن برای سناریوهای مختلف اقلیمی نشان از افزایش آن در دوره‌های آتی دارد. به گونه‌ای که دمای متوسط ماهانه دراز مدت در سناریوهای A2 و B2 به ترتیب ۱/۱ و ۱/۲ درجه سانتی‌گراد در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ نسبت به ۳۰ سال اطلاعات پایه مطالعات افزایش داشته است. این افزایش در دوره ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ برای سناریوهای A2 و B2 به ترتیب ۴/۶ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی می‌شود (جدول ۳). هم‌چنین توزیع دراز مدت دمای متوسط ماهانه نشان از افزایش دما در اکثر ماه‌ها دارد (شکل‌های ۴ و ۵). مجدداً برای سناریوی A2 شرایط بحرانی‌تری قابل پیش‌بینی می‌باشد.

برآورد جریان ورودی به مخزن سد چادگان بر اساس داده‌های تغییر اقلیمی

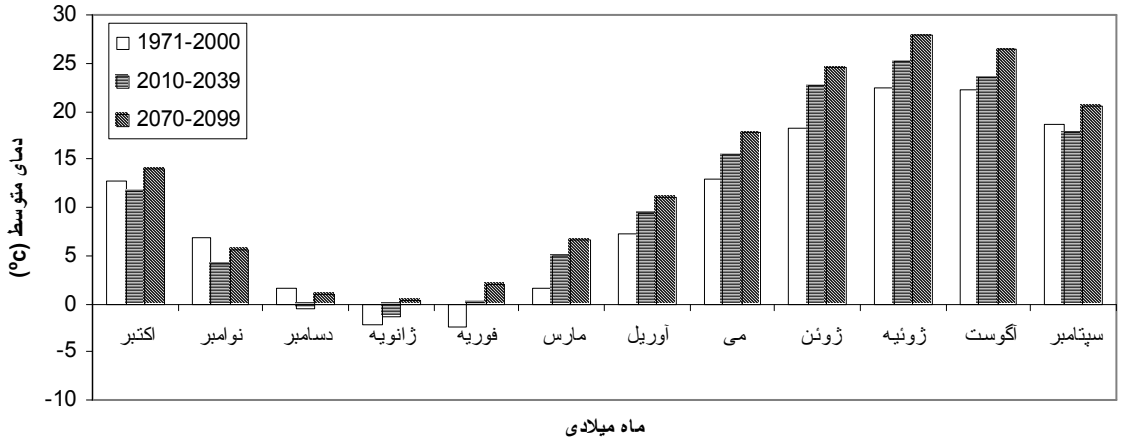
به منظور برآورد جریان ورودی به سد چادگان در دوره‌های ۲۰۱۰ – ۲۰۳۹ و ۲۰۷۰ – ۲۰۹۹ و تحت سناریوهای A2 و B2، ابتدا داده‌های مورد نیاز مدل ۵، از داده‌های تغییرات اقلیمی به‌طور جداگانه به مدل شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده معرفی شد و مقادیر ورودی به سد چادگان شبیه‌سازی گردیدند. نتایج نشان داد که متوسط دبی سالانه دراز مدت در دوره ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ به میزان ۱/۱ مترمکعب در ثانیه در A2 و ۰/۹مترمکعب در ثانیه در B2 نسبت به دوره ۲۰۰۰- ۱۹۷۱ کاهش نشان می‌دهد. این مقادیر در دوره ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ به ترتیب برابر ۲/۷ و ۱/۹ مترمکعب در ثانیه کاهش در سناریوهای A2 و B2 می‌باشد (جدول ۳). همان‌طور که انتظار می‌رفت میزان کاهش جریان رودخانه در دوره ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ بیش از دوره ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ و سناریو A2 وضعیت بدتری را نسبت به سناریوی B2 داراست. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که میزان ضریب تغییرات دبی نیز در دوره‌های آتی افزایش خواهد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

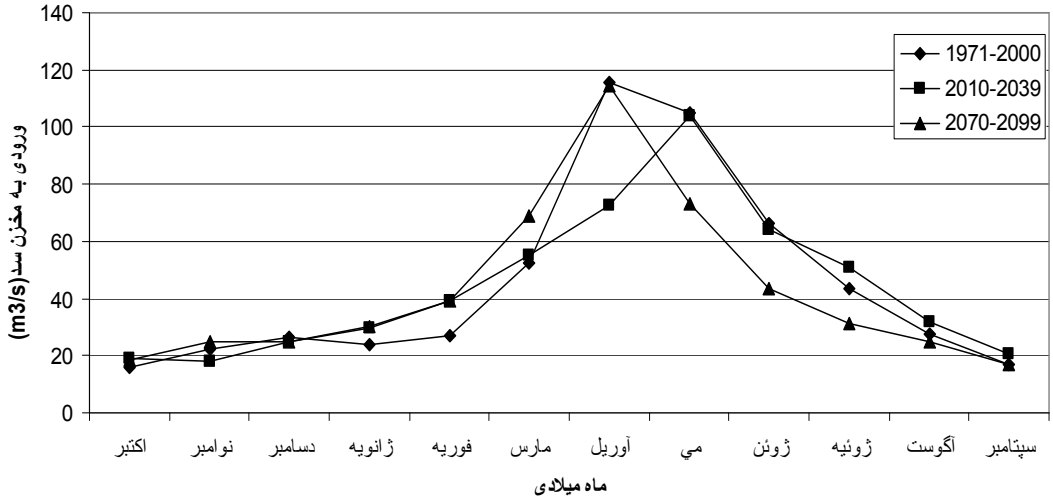
[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]



شکل ۴. توزیع ماهانه دمای دراز مدت، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی A2



شکل ۵. توزیع ماهانه دمای دراز مدت، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی B2



شکل ۶. میانگین متوسط ماهانه دراز مدت دبی ورودی به مخزن، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی A2

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]

شکل ۷. میانگین متوسط ماهانه دراز مدت دبی ورودی به مخزن، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی B2

یافت. به گونه‌ای کـه میـزان افـزایش آن در دوره ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ نسبت به دوره مشاهداتی برابر ۱۲۵ و ۱۴۳ درصد به ترتیـب در سناریوهای A2 و B2 می‌باشد. این مقدار در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰ و سناریوهای فوق برابر ۱۴۰ و ۱۹۷ درصد افزایش است.

از طرف دیگر تغییرات جریـان محـدود بـه میـانگین و ضـریب تغییرات نشده، بلکه توزیع سالیانه جریان را نیـز در بـر خواهـد گرفت که این مهم در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله آثار تغییر اقلیم روی منـابع آب حوضـه زاینـده‌رود اصفهان در دوره‌های ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ و ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ بـا اسـتفاده از مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریو تغییر اقلیمی A2 و B2 مربوط به SRES مورد تجزیه و تحلیل قـرار گرفـت. نتایج در مجموع نشان از کاهش میزان بارنـدگی و افـزایش دمـا دارد. بـه طـوری کـه انتظـار مـی‌رود، میـزان بارنـدگی در دوره ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ با مقدار ۰/۷ درصد افزایش تحـت سـناریوی A2 و ۲ درصـد کـاهش تحـت سـناریوی B2 و در دوره ۲۰۹۹- ۲۰۷۰، با مقدار ۱۶ و ۱۰ درصد کاهش به ترتیب تحـت سـناریوی A2 و B2 نسـبت بـه دوره پایـه مطالعـاتی (۲۰۰۰- ۱۹۷۱) مواجه باشد. تجزیه و تحلیل‌های داده‌هـای دمـا نشان از افزایش دما در هر دو دوره و تحت هر دو سـناریو دارد به طوری که بیشترین افزایش در دوره ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ و سـناریو A2، تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد مورد انتظار می‌باشد.

جهت شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب با اسـتفاده از مـدل شبکه عصـبی، داده‌هـای دمـا و تـابش خورشـیدی (مربـوط بـه ایستگاه دامنه‌فریدن)، بارندگی (مربوط به ایستگاه چهـل‌گـرد) و شبکه Elman بهترین نتایج را بـرای بـرآورد جریـان ورودی بـه سد چادگان ارائـه داد. کـاربرد داده‌هـای تولیـد شـده تغییـرات اقلیمی و مدل شبکه عصبی، کاهش ۲/۴ و ۱/۴ درصدی دبـی را در دوره ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ و کـاهش ۵/۸ و ۴/۱ درصـدی را بـرای ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ به ترتیـب در سـناریوهـای A2 و B2 نسـبت بـه دوره پایه این تحقیق نشان می‌دهد. علاوه بر کـاهش منـابع آب حوضه، افزایش در توالی سال‌های خشک در جریان رودخانه از دیگر تبعات منفی تغییر اقلیم در این حوضه خواهد بود.

نکته‌ای که می‌تواند جای نگرانی بیشتری داشـته باشـد، بـالا رفتن ضریب تغییرات جریان طی دوره‌های آتی است. در حـالی که برای آمار ثبت شده، ضریب تغییرات حدود ۳۱ درصد اسـت برای دو دوره ۲۰۳۹- ۲۰۱۰ و ۲۰۹۹- ۲۰۷۰ در سـناریوی A2 به ترتیب به ۷۰ و ۷۵ درصد و برای سـناریوی B2 بـه ۷۶ و ۹۳ درصد می‌رسد. از پیامدهای این افزایش نقصان در تأمین بهنگام

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]

و کافی آب کشاورزی و کاهش امنیت غذایی خواهد بود، یافته‌ای که مراجع (۱۱ و ۱۴) نیز بدان رسیده بوده و در مقدمه به آنها اشاره شد.

سپاسگزاری

نویسندگان لازم می‌دانند از همکاری و مساعدت سازمان‌های هواشناسی اصفهان و تهران، سازمان آب منطقه‌ای اصفهان و دفتر مطالعات پایه منابع آب تهران، به دلیل در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات لازم برای انجام این پژوهش قدردانی و تشکر به عمل آید.

منابع مورد استفاده

۱. سلطانی، س. ۱۳۸۱. ارزیابی شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی کوتاه مدت و میان مدت جریان رودخانه‌ها. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

2. Alcamo, J., P. Doll, F. Kaspar and S. Siebert. 1997. Global change and global scenarios of water use and availability: An application of Water GAP 1.0 Report A9701, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.
3. Allen, R.G. 1996. Self-Calibration method for estimating solar radiation from air temperature. J. Hydrol. 2(2):56-67.
4. Angel J. R. and F. A. Huff. 1997. Changes in heavy rainfall in Midwestern United States. ASCE, J. Water Resour. Plan. and Manag. 123(4): 246-249.
5. Coulibaly, P., F. Anctil and B. Bobee. 2000. Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. J. Hydrol. 230: 244-257.
6. Dawson, Ch. and R. Wilby. 1998. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modeling. Hydrol. Sci. J. 43(1): 47-66.
7. Duffie, J. A. and W. E. Beckman. 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley Pub., New York.
8. Elman, J. L. 1990. Finding structure in time. Cognitive Sci. 14: 179-211.
9. Gellens, D. and E. Roulin. 1998. Stream flow response of Belgian to IPCC climate change scenarios. J. Hydrol. 210: 242-258.
10. Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. ASCE, J. Irrig. Drain. Eng. 8(3): 205-230.
11. IPCC. 2001. The Scientific Basis of Climate Change, Contribution of Working Grop I to the Third Assesment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
12. IPCC-TGCIA, 1999. Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Intergovermental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, UK.
13. Kamga, F. M. 2001. Impact of greenhouse gas induced climate change on the runoff of the Upper Benue River (Cameroon). J. Hydrol. 252: 145-156.
14. Lane, M. E., P. H. Kirshen and R. M. Vogel. 1999. Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources. ASCE, J. Water Resour. Planning and Manag. 125(4): 194-204.
15. Morrison, J., M. C. Quick and M. G. G. Foreman. 2002. Climate change in the Fraser River watershed: flow and temperature projections. J. Hydrol. 263: 230-244.
16. Parry, M. 2002. Scenarios for climate impact and adaptation assessment. Global Environ. Change 12: 149-153.
17. Yates D. N. and K. M. Strzepek. 1998. Modeling the Nile basin under climate change. J. Hydrol. Eng. 3(2): 98-108.
18. Yu, Pao-Shan, Y. Tao-Chang and W. Chih-Kang. 2002. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. J. Hydrol. 260: 161-175.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1384.9.4.4.8]