

اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان

علیرضا مساح بوانی و سعید مرید^۱

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 ۲۰۳۹-۲۰۶۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ میلادی، تجزیه و تحلیل می‌نماید. اطلاعات مورد نیاز از مدل گردش عمومی HadCM3 (GCM) 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 طوری که در طی این دوره‌ها میزان کاهش بارندگی ۱۰ و ۱۶ درصد و افزایش درجه حرارت به میزان ۴/۶ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد به ترتیب 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 ضربی 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

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

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

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

جريان رودخانه به میزان ۵ درصد ($150 \text{ m}^3/\text{s}$) افزایش و حداقل متوجه جریان به میزان ۱۸ درصد ($1600 \text{ m}^3/\text{s}$) کاهش خواهد داشت. در همین دوره متوجه دمای تابستانی آب ۱/۹ درجه سانتی گراد افزایش نشان داد که روی تخمگذاری این ماهی ها 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 دوره های طولانی مدت و تغییرات شدید در احتمال انتقال (transition probabilities) رخداد بارندگی روزانه بوده به طوری که برای اکثر ماه ها احتمال انتقال روز تر به تر کاهش یافته است (۱۸).

هدف از تحقیق حاضر بررسی آثار تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و جریان رودخانه زاینده رود اصفهان است. در این راستا دو سناریو اقلیمی برای دو دوره زمانی ۲۰۳۹-۲۰۱۰ (آینده نزدیک) و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ (آینده دور) میلادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این بررسی بخشی از طرح تحقیقاتی بین المللی تطبیق با تغییرات اقلیم (ADAPT) می باشد که هم زمان 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.

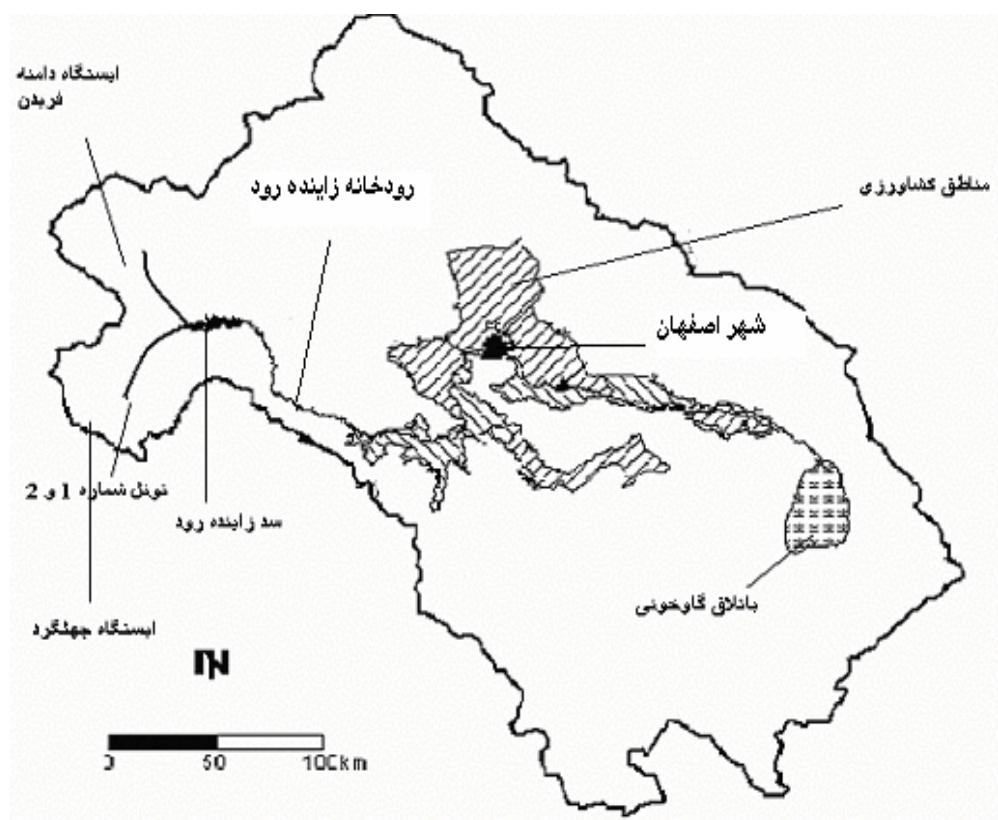
مواد و روش ها

منطقه مطالعه

حوضه زاینده رود با مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومترمربع در استان اصفهان واقع شده است. رودخانه اصلی این حوضه با مسیری غربی - شرقی از کوه های زاگرس سرچشم می گردد و به باطلاق گاوه خونی ختم می شود و در طی مسیر ضمن استفاده بخشی از صنایع منطقه و شهر اصفهان از آن، اراضی کشاورزی را نیز مشروب می سازد. سد چادگان روی این رودخانه قرار دارد که علاوه بر ذخیره آب نابهنجام رودخانه، جریان انتقالی از تونل های شماره ۱ و ۲ کوهنگ را در خود جای می دهد. (شکل ۱).

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

به دلیل اهمیت تغییر اقلیم و اثراتی که می تواند روی منابع آب داشته باشد، در سال های اخیر این مهم برای حوضه های آبریز مختلف در سطح کره زمین مد نظر قرار گرفته است. انگل و هاف (۱۹۹۷) در پژوهشی تغییرات توزیع بارش های شدید ($\geq 51 \text{ mm}$) در غرب آمریکا را مورد بررسی قرار دادند. بررسی ها نشان داد که ایستگاه های تحت مطالعه در سال های اخیر شناس بیشتری برای مواجهه با بارندگی شدید یک روزه (Non stationary) داشته اند که نشان از وقوع نوعی عدم ایستایی (Non stationary) در سری های زمانی بوده و برازش توزیع های آماری روی داده های گذشته بارندگی در این منطقه می تواند با اشکال همراه باشد (۴). گلنر و رولین (۱۹۹۸) تأثیر این پدیده را بر جریان رودخانه اصلی در حوضه بلژیک، تحت خروجی های شش مدل گردش عمومی (General circulation model، GCM) مورد بررسی قرار دادند. تمام مدل ها به جز دو مدل، افزایش فراوانی سیلاب را در ماه های 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 دوره های آتی نسبت به تغییر اقلیم حساس بوده و به خصوص مقادیر متوجه 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 می تواند شاهد افزایش بارندگی به میزان ۴ تا ۱۳ درصد، افزایش دما به میزان ۱ تا ۳ درجه سانتی گراد و تغییرات متوجه سالانه جریان به میزان ۳-۳ 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 ۲۰۹۹-۲۰۷۰ متوسط



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی و رودخانه زاینده‌رود

طور سه بعدی شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها با در نظر گرفتن یک شبکه سه بعدی، نوعاً با مقیاس افقی (طول جغرافیایی) $650 \times$ (عرض جغرافیایی) 250 کیلومتر، 10 تا 20 لایه عمودی در اتمسفر بخش خشکی زمین و بیش از 30 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, GFDT, HadCM3 و GISS UKMO, MPI, CCC, ECHAM4 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

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

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 $2/5^{\circ}$ (عرض جغرافیایی) $\times 3/75^{\circ}$ (طول جغرافیایی) به $0/5^{\circ} \times 0/5^{\circ}$ ارتقا یافته‌است.

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 استفاده شده است.

$$T'_{GCM,fut} = (\bar{T}_{obs} - \bar{T}_{GCM,his}) + T_{GCM,fut} \quad [1]$$

$$P'_{GCM,fut} = (\bar{P}_{obs}/\bar{P}_{GCM,his}) \times P_{GCM,fut} \quad [2]$$

در روابط بالا \bar{T}_{obs} و \bar{P}_{obs} به ترتیب برابر میانگین دما و $\bar{T}_{GCM,his}$ و $\bar{P}_{GCM,his}$ 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.

است که آنها را سناریوهای انتشار (Emission scenario) می‌نامند. IPCC در سال ۱۹۹۸ سری جدید سناریوهای انتشار (Special Report on Emission Scenarios) SRES را با نام این سناریوها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با رأیه داد. در این سناریوها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با توجه به پیش‌بینی محرک‌های (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 $2/5^{\circ}$ (عرض جغرافیایی) $\times 3/75^{\circ}$ (طول جغرافیایی) است (۱۱).

در سناریوی A2، جهان، دنیاگی 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 راه حل‌های منطقه‌ای برای تقویت مسایل اقتصادی، اجتماعی و محیط زیست می‌باشد. این یک دنیاگی 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 راه حل‌های 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

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

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

نتایج و بحث

عمله 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 تا 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.

$$Q(t) = f(R(t)) \quad (1)$$

$$Q(t) = f(R(t), T_{avg}(t)) \quad (2)$$

$$Q(t) = f(R(t), T_{min}(t), T_{max}(t)) \quad (3)$$

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 اینجا 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 برخی 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):

$$R_s = k_r (T_{max} - T_{min})^{1/2} R_a \quad [3]$$

در این رابطه R_s و R_a به ترتیب تابش خورشید رسیده به سطح زمین و بالای جو (انرژی) و T_{max} و T_{min} درجه حرارت حداقل و حداقل ($^{\circ}\text{C}$) تابش می‌باشد. k_r ضریب تجربی بوده که R_s را برای شرایط مختلف آب و هوایی تعديل می‌کند که محدوده‌ای بین $0/16$ تا $0/2$ داشته و با توجه به شرایط حوضه $0/19$ در نظر گرفته شده است (۳). هم‌چنین شرح محاسبه R_a در منبع ۸ آمده است.

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

اشارة شد که بنا بر روش‌شناسی طرح ADAPT، داده‌های بارندگی و دمای (متوسط، حداقل وحداکثر) ماهانه مربوط به مدل گردش عمومی HadCM3 برای دوره‌های B2 و ۲۰۱۰-۲۰۳۹ ۲۰۷۰-۲۰۹۹ تحت دو سناریوی A2 و مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بالا بردن دقت وضوح مکانی این داده‌ها با استفاده از روش کریجینگ (Kriging)، به ابعاد $0^{\circ} \times 0^{\circ}/5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 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 ۱۹۶۱-۱۹۹۰ 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 ۱۲ بارندگی در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ تحت سناریوی A2 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

$$Q(t) = f(R(t), T_{\min}(t), T_{\max}(t), R_s(t)) \quad (4)$$

$$Q(t) = f(R(t), R(t-1), T_{\min}(t), T_{\min}(t-1), T_{\max}(t), T_{\max}(t-1), R_s(t)) \quad (5)$$

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 می‌دهد 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.

$$R^* = \frac{\sum_{m=1}^K X_m Y_m}{\sqrt{\sum_{m=1}^K X_m^* \sum_{m=1}^K Y_m^*}} \quad [4]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^K (X_m - Y_m)^2}{K}} \quad [5]$$

$$MAE = \frac{\sum_{m=1}^K |X_m - Y_m|}{K} \quad [6]$$

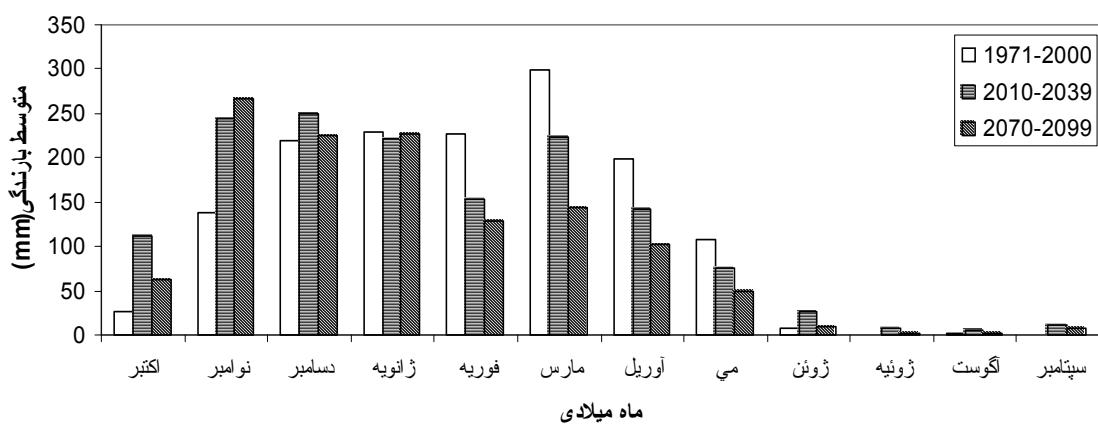
در روابط فوق X_m مقادیر مشاهداتی، Y_m مقادیر برآورد

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

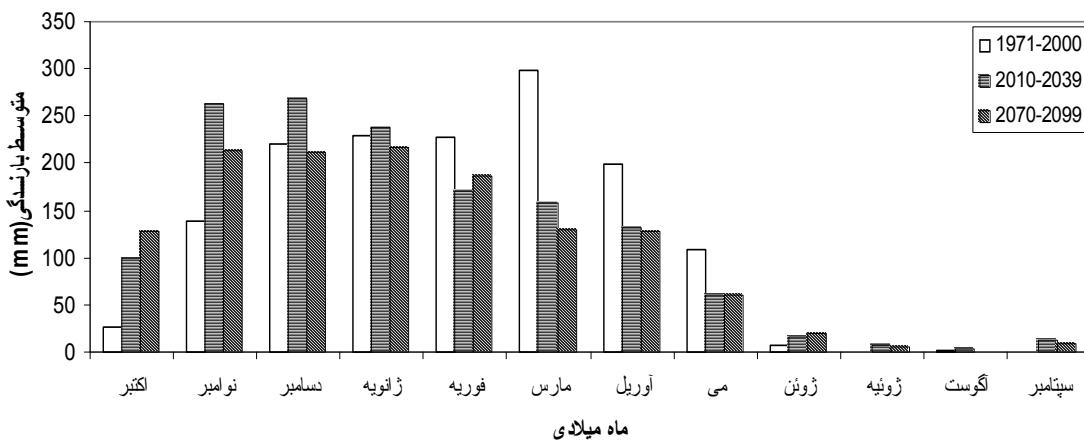
مدل	معماری	آموخته			صحبت‌یابی		
		R ²	RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE
۱	۱-۱۵-۱	۰/۰۶	۷/۵۲	۶/۰۶	۰/۰۴	۸/۷۱	۸/۲۴
۲	۲-۳-۱	۰/۱۸	۴/۳۵	۴/۲۲	۰/۱۴	۴/۷۱	۴/۵۲
۳	۳-۵-۱	۰/۰۳۶	۳/۱۲	۳/۰۶	۰/۰۳۱	۳/۴۷	۳/۳۰
۴	۴-۳-۱	۰/۰۸۱	۱/۴۷	۰/۰۸۳	۰/۰۷۰	۱/۸۲	۱/۳۲
۵	۷-۲-۱	۰/۰۸۸	۰/۹۵	۰/۰۷۱	۰/۰۸۵	۰/۰۹۷	۰/۰۸۲

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)	دبی (m ³ /s)	درجه حرارت (°c)	بارندگی (mm)	دبی (m ³ /s)	درجه حرارت (°c)	بارندگی (mm)	دبی (m ³ /s)	درجه حرارت (°c)
۱۹۷۱-۲۰۰۰	میانگین	۱۴۵۸	۴۵/۳	۹/۹	۱۴۵۸	۴۵/۳	۹/۹	۱۴۵۸	۴۵/۳	۹/۹
(اندازه‌گیری شده)	انحراف معیار	۳۷۱/۲	۱۴/۱	۰/۹	۳۷۱/۲	۱۴/۱	۰/۹	۳۷۱/۲	۱۴/۱	۰/۹
	ضریب تغییرات	۲۵/۵	۳۱/۱	۹/۱	۲۵/۵	۳۱/۱	۹/۱	۲۵/۵	۳۱/۱	۹/۱
B2	B2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	سناریو
۲۰۱۰-۲۰۳۹	میانگین	۱۴۷۰	۴۴/۶	۱۱/۱	۱۴۲۷	۴۴/۲	۱۱/۰	۱۴۷۰	۴۴/۶	۱۱/۱
	انحراف معیار	۵۳۸/۲	۳۳/۷	۰/۶	۳۶۱	۳۰/۹	۰/۹	۵۳۸/۲	۳۳/۷	۰/۶
	ضریب تغییرات	۳۶/۶	۷۵/۶	۵/۴	۲۵/۳	۶۹/۹	۸/۲	۳۶/۶	۷۵/۶	۵/۴
۲۰۷۰-۲۰۹۹	میانگین	۱۲۲۴	۴۲/۴	۱۳/۱	۱۳۰/۹	۴۲/۶	۱۴/۵	۱۲۲۴	۴۲/۴	۱۳/۱
	انحراف معیار	۳۷۷/۴	۴۰/۲	۰/۶	۴۴۲	۳۱/۹	۱/۱	۳۷۷/۴	۴۰/۲	۰/۶
	ضریب تغییرات	۳۰/۸	۹۲/۶	۴/۶	۳۳/۸	۷۴/۹	۷/۰۸	۳۰/۸	۹۲/۶	۴/۶



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



شکل ۲. توزیع ماهانه بارندگی دراز مدت، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی B2

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

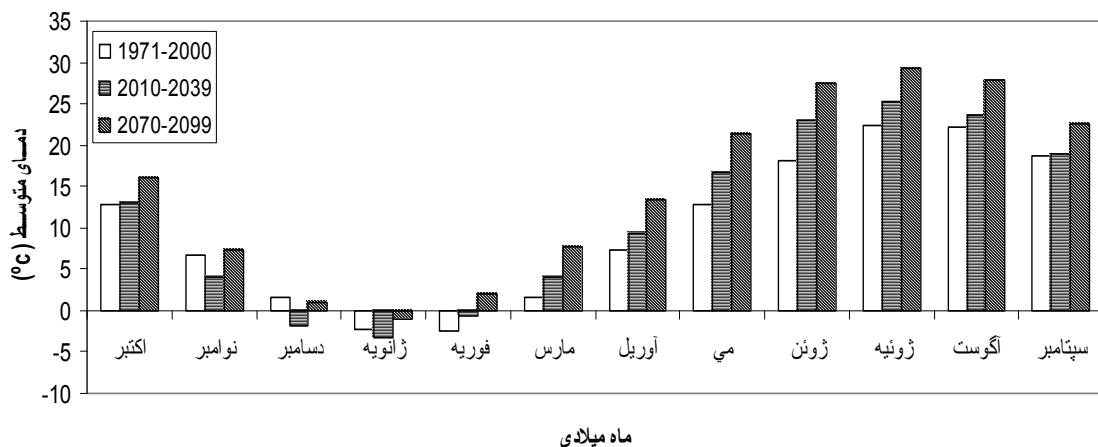
به منظور برآورد جریان ورودی به سد چادگان در دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ و تحت سناریوهای A2 و B2، ابتدا داده‌های مورد نیاز مدل ۵، از داده‌های تغییرات اقلیمی به طور جداگانه به مدل شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده معرفی شد و مقادیر ورودی به سد چادگان شبیه‌سازی گردیدند. نتایج نشان داد که متوسط دبی سالانه دراز مدت در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ به میزان ۱/۱ مترمکعب در ثانیه در A2 و ۰/۹ مترمکعب در ثانیه در B2 نسبت به دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به 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 ۲۰۷۰-۲۰۹۹ بیش از دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و سناریو A2 وضعیت بدتری را نسبت به سناریوی B2 دارد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که میزان ضربیت تغییرات دبی نیز در دوره‌های آتی افزایش خواهد

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

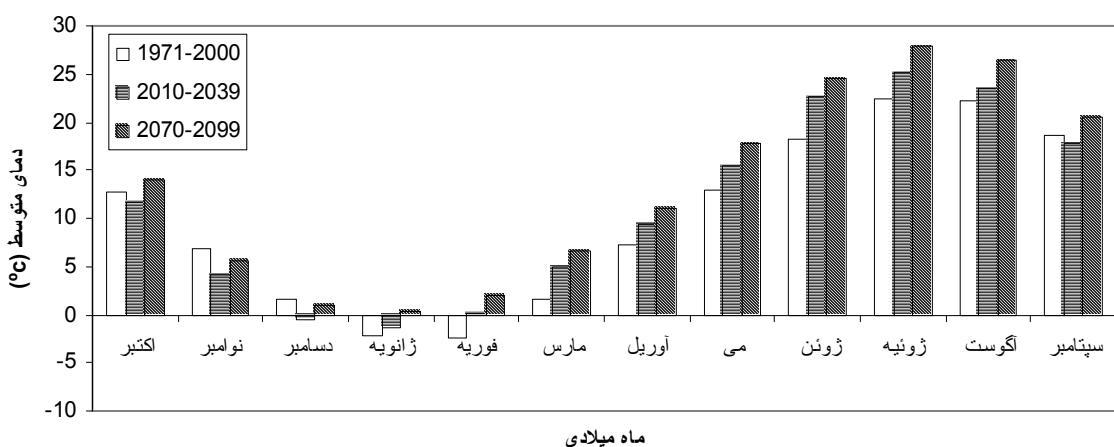
بدین ترتیب انتظار می‌رود که میانگین دراز مدت بارندگی در دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۹ تغییرات محسوسی تحت دو سناریو مورد مطالعه نداشته باشد، ولی کاهش بارندگی در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ تحت هر دو سناریو قابل توجه می‌باشد. مقایسه سناریوی A2 و B2 نشان از وضعیت بحرانی‌تر سناریوی A2 در منطقه مورد مطالعه دارد.

تجزیه و تحلیل دما بر اساس داده‌های تغییر اقلیمی

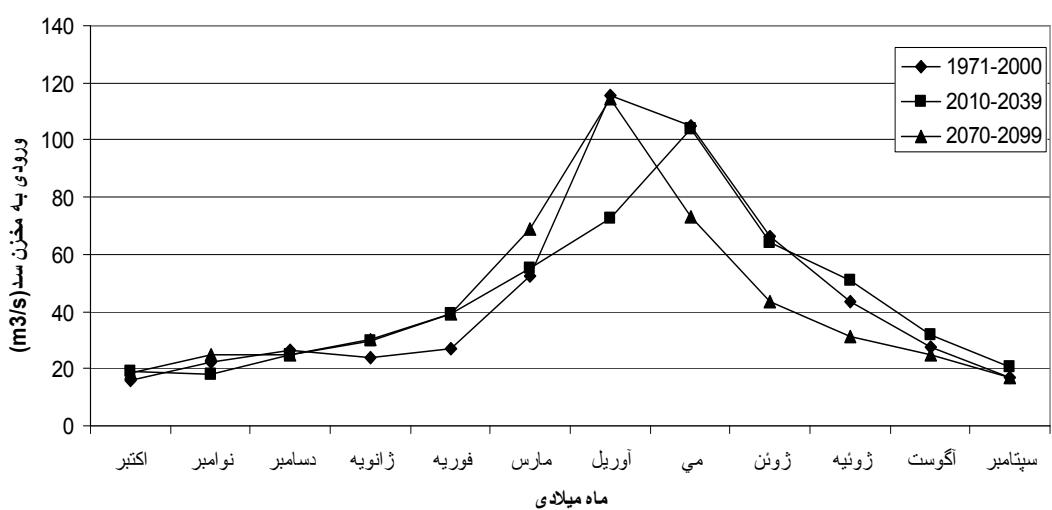
بررسی تغییرات دما برای منطقه طرح و بر اساس ایستگاه دامنه فریدن برای سناریوهای مختلف اقلیمی نشان از افزایش آن در دوره‌های آتی دارد. به گونه‌ای که دمای متوسط ماهانه دراز مدت در سناریوهای A2 و B2 به ترتیب ۱/۱ و ۱/۲ درجه سانتی‌گراد در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ نسبت به ۳۰ سال اطلاعات پایه مطالعات افزایش داشته است. این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



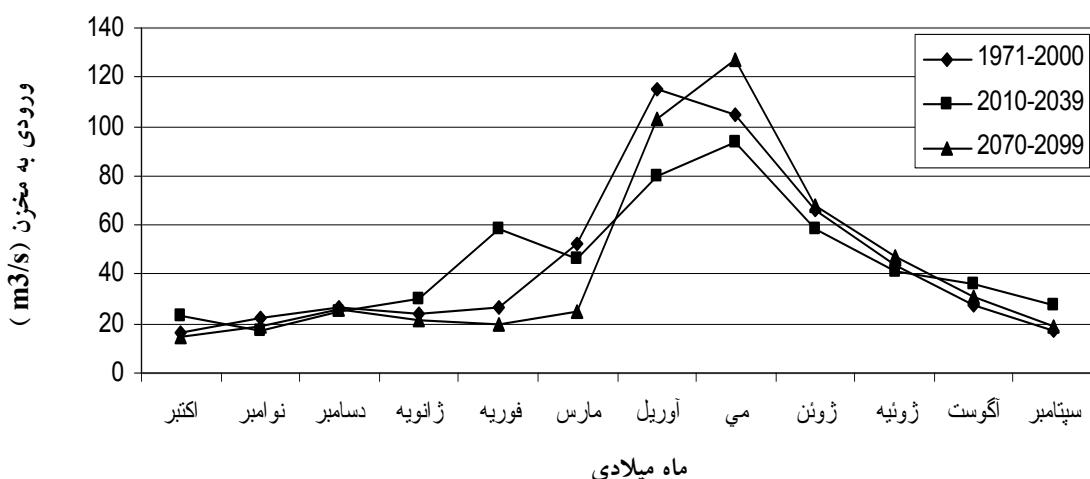
شکل ۴. توزیع ماهانه دمای دراز مدت، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی A2



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



شکل ۷. میانگین متوسط ماهانه دراز مدت دبی ورودی به مخزن، طی دوره مشاهده شده و دوره های تغییرات اقلیمی سناریوی 2

نشان از افزایش دما در هر دو دوره و تحت هر دو سناریو دارد به طوری که بیشترین افزایش در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰ و سناریو A2، تا ۴/۶ درجه سانتی گراد مورد انتظار می باشد.

جهت شبیه سازی فرایند بارش - رواناب با استفاده از مدل شبکه عصبی، داده های دما و تابش خورشیدی (مربوط به ایستگاه دامنه فربیدن)، بارندگی (مربوط به ایستگاه چهل گرد) و شبکه Elman بهترین نتایج را برای برآورد جریان ورودی به سد چادگان ارائه داد. کاربرد داده های تولید شده تغییرات اقلیمی و مدل شبکه عصبی، کاهش ۲/۴ و ۱/۴ درصدی دبی را در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ و کاهش ۵/۸ و ۴/۱ درصدی را برای ۲۰۷۰-۲۰۹۹ به ترتیب در سناریوهای A2 و B2 نسبت به دوره پایه این تحقیق نشان می دهد. علاوه بر کاهش منابع آب حوضه، افزایش در توالی سال های خشک در جریان رودخانه از دیگر تبعات منفی تغییر اقلیم در این حوضه خواهد بود.

نکته ای که می تواند جای نگرانی بیشتری داشته باشد، بالا رفتن ضریب تغییرات جریان طی دوره های آتی است. در حالی که برای آمار ثبت شده، ضریب تغییرات حدود ۳۱ درصد است برای دو دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ در سناریوی A2 به ترتیب به ۷۰ و ۷۵ درصد و برای سناریوی B2 به ۷۶ و ۹۳ درصد می رسد. از پیامدهای این افزایش نقصان در تأمین بهنگام

یافت. به گونه ای که میزان افزایش آن در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ نسبت به دوره مشاهداتی برابر ۱۴۳ درصد به ترتیب در سناریوهای A2 و B2 می باشد. این مقدار در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ از طرف دیگر تغییرات جریان محدود به میانگین و ضریب تغییرات نشده، بلکه توزیع سالیانه جریان را نیز در بر خواهد گرفت که این مهم در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده اند.

نتیجه گیری

در این مقاله آثار تغییر اقلیم روی منابع آب حوضه زاینده رود اصفهان در دوره های ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ با استفاده از مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریو تغییر اقلیمی A2 و B2 مربوط به SRES مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج در مجموع نشان از کاهش میزان بارندگی و افزایش دما دارد. به طوری که انتظار می رود، میزان بارندگی در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ با مقدار ۰/۷ درصد افزایش تحت سناریوی A2 و ۲ درصد کاهش تحت سناریوی B2 در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹، با مقدار ۱۶ و ۱۰ درصد کاهش به ترتیب تحت سناریوی A2 و B2 نسبت به دوره پایه مطالعاتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) مواجه باشد. تجزیه و تحلیل های داده های دما

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.

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

نویسنده‌گان لازم می‌دانند از همکاری و مساعدت سازمان‌های

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 Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental 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. Intergovernmental 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.