

## اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان

علیرضا مساح بوانی و سعید مرید<sup>۱</sup>

### 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 ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ 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 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 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

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 فوق‌باعدت 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

جریان رودخانه به میزان ۵ درصد ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) افزایش و حداکثر متوسط جریان به میزان ۱۸ درصد ( $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 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 ۲۰۳۹-۲۰۱۰ (آینده نزدیک) و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ (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 آمریکا، Syr Darya در آسیای مرکزی و Walawe در سریلانکا انجام رسیده است.

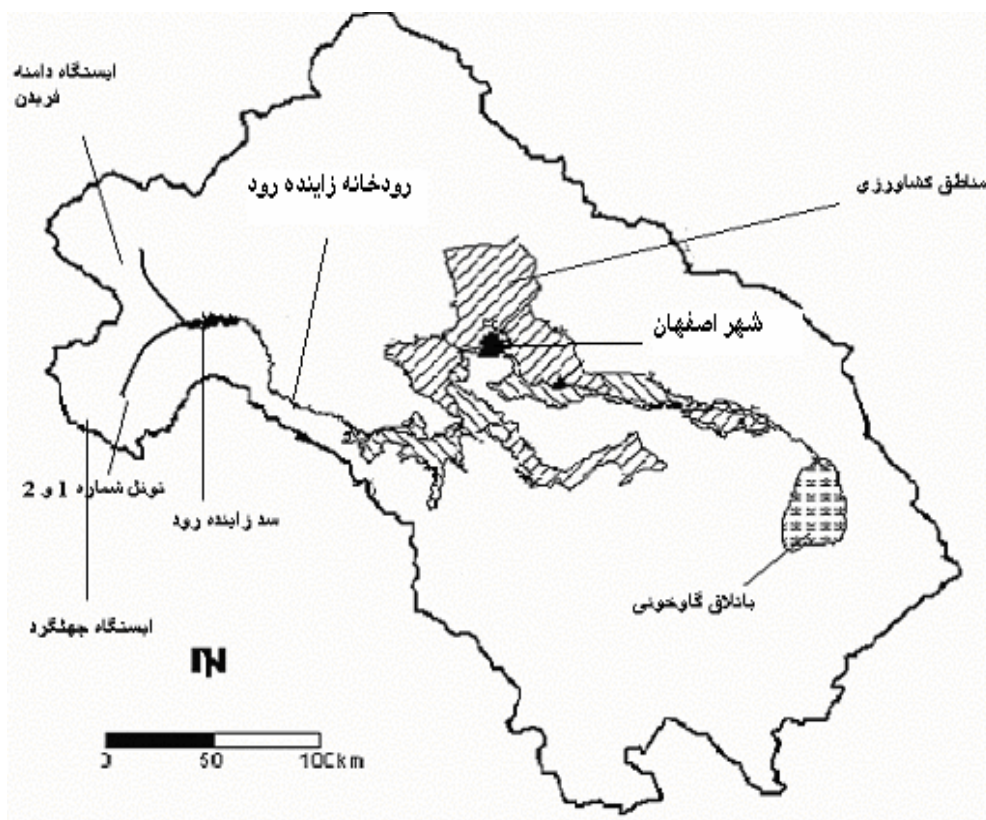
## مواد و روش‌ها

### 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).

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 ( $\geq 51 \text{ mm}$ ) 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 برآزش 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 (General circulation model, GCM) 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 استرزیک (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



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی و رودخانه زاینده رود

طور سه بعدی شبیه سازی می کنند. این مدل ها با در نظر گرفتن یک شبکه سه بعدی، نوعاً با مقیاس افقی (طول جغرافیایی)  $650 \times$  (عرض جغرافیایی) ۲۵۰ کیلومتر، ۱۰ تا ۲۰ لایه عمودی در اتمسفر بخش خشکی زمین و بیش از ۳۰ لایه در اقیانوس ها، پارامترهای اقلیمی را تولید می نمایند. تاکنون مدل های گردش عمومی مختلفی در مراکز مختلف تحقیقاتی تدوین و طراحی شده است. از آن جمله می توان به مدل های GFDL, GFDLT, HadCM3 و GISS UKMO, MPI, CCC, ECHAM4 اشاره کرد (۱۱ و ۱۷). از آنجا که مهم ترین ورودی این مدل ها میزان انتشار گازهای گلخانه ای در دوره های آتی بوده و از طرف دیگر محاسبه و تعیین انتشار این گازها در دوره های آتی به طور قطعی امکان پذیر نمی باشد، از این رو سناریوهای مختلفی که شامل چگونگی تغییرات این گازها در آینده می باشد، ارائه شده

مدل های تولید داده برای دوره های آتی با توجه به تغییر اقلیم بارندگی و دما، دو متغیر هواشناسی هستند که در بررسی تغییر اقلیم نقش تعیین کننده ای را ایفا می کنند. به منظور شبیه سازی آنها برای دوره های آتی تحت آثار این پدیده، از مدل های اقلیمی مختلفی استفاده می شود. این مدل ها به دو دسته مدل های آماری و مدل های گردش عمومی جو (GCM) تقسیم می شوند (۱۲). استفاده از مدل های GCM بیشتر مورد تایید و توجه بوده (۹، ۱۱، ۱۲، ۱۶ و ۱۷) و در این پژوهش از آن بهره گرفته شده است.

#### مدل های گردش عمومی جو (GCM)

مدل های GCM مدل های 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 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.

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

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

در روابط بالا  $\bar{T}_{obs}$  و  $\bar{P}_{obs}$  به ترتیب برابر میانگین دما و بارندگی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد نظر،  $\bar{T}_{GCM, his}$  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 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  $2/5^\circ$  (عرض جغرافیایی)  $\times$   $3/75^\circ$  (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

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

۱۹۹۰	A1	A2	B1	B2	خصوصیت سناریو
۵/۲۵۲	۷/۱	۱۵/۱	۷/۰	۱۰/۴	جمعیت جهان (میلیارد)
۳۵۴	۶۸۰	۸۳۴	۵۴۷	۶۰۱	غلظت CO <sub>2</sub> در اتمسفر زمین (PPM)
۲۱	۵۵۰	۲۴۳	۳۲۸	۲۳۵	شاخص رشد اقتصادی جهانی (GDP) (10 <sup>12</sup> \$/yr)

### 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.

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

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

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

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):

$$R_s = k_f (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{1/5} R_a \quad [3]$$

در این رابطه  $R_s$  و  $R_a$  به ترتیب تابش خورشید رسیده به سطح زمین و بالای جو (انرژی) و  $T_{\text{max}}$  و  $T_{\text{min}}$  درجه حرارت حداکثر و حداقل (°C) تابش می‌باشد.  $k_f$  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.

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 و حداکثر) 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  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  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 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

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

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

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.

$$R^2 = \frac{\sum_{m=1}^K X_m Y_m}{\sqrt{\sum_{m=1}^K X_m^2 \sum_{m=1}^K Y_m^2}} \quad [4]$$

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

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

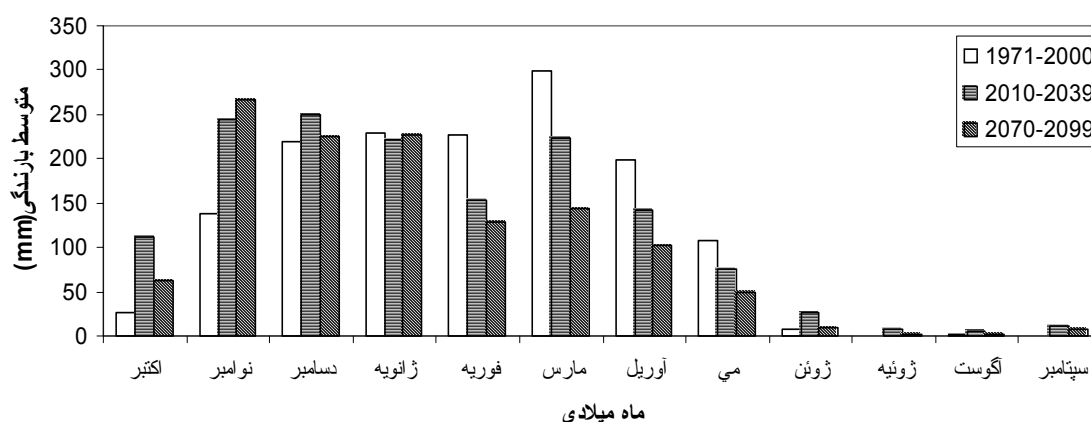
در روابط فوق  $X_m$  مقادیر مشاهداتی،  $Y_m$  مقادیر برآورد

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

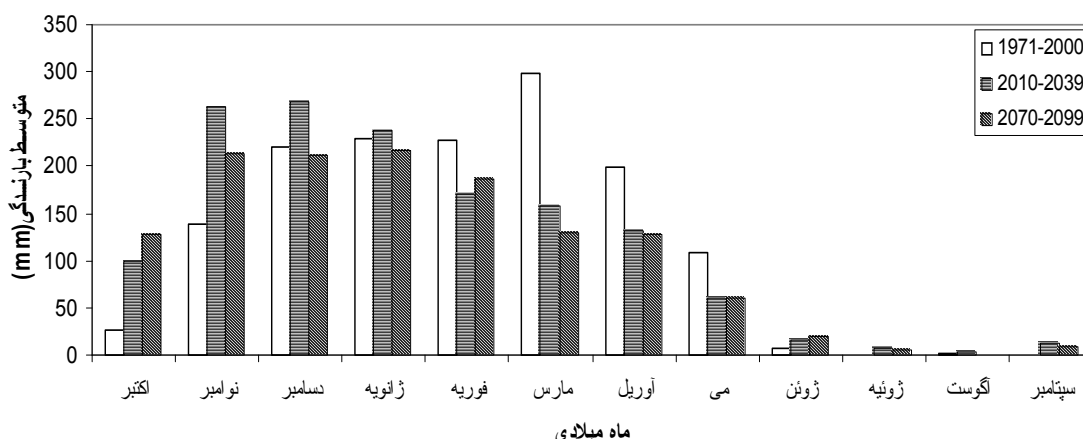
مدل	معماری	آموزش			صحت‌یابی		
		R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE
۱	۱-۱۵-۱	۰/۰۶	۷/۵۲	۶/۰۶	۰/۰۴	۸/۷۱	۸/۲۴
۲	۲-۳-۱	۰/۱۸	۴/۳۵	۴/۲۲	۰/۱۴	۴/۷۱	۴/۵۲
۳	۳-۵-۱	۰/۳۶	۳/۱۲	۳/۰۶	۰/۳۱	۳/۴۷	۳/۳۰
۴	۴-۳-۱	۰/۸۱	۱/۴۷	۰/۸۳	۰/۷۰	۱/۸۲	۱/۳۲
۵	۷-۲-۱	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۹۷	۰/۸۲

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

دبی (m3/s)	درجه حرارت (°C)	بارندگی (mm)	دبی (m3/s)	درجه حرارت (°C)	بارندگی (mm)	پارامتر آماری	دوره
۴۵/۳	۹/۹	۱۴۵۸	۴۵/۳	۹/۹	۱۴۵۸	میانگین	۱۹۷۱-۲۰۰۰
۱۴/۱	۰/۹	۳۷۱/۲	۱۴/۱	۰/۹	۳۷۱/۲	انحراف معیار	(اندازه‌گیری شده)
۳۱/۱	۹/۱	۲۵/۵	۳۱/۱	۹/۱	۲۵/۵	ضریب تغییرات	
B2	B2	B2	A2	A2	A2		سناریو
۴۴/۶	۱۱/۱	۱۴۲۷	۴۴/۲	۱۱/۰	۱۴۷۰	میانگین	۲۰۱۰-۲۰۳۹
۳۳/۷	۰/۶	۳۶۱	۳۰/۹	۰/۹	۵۳۸/۲	انحراف معیار	
۷۵/۶	۵/۴	۲۵/۳	۶۹/۹	۸/۲	۳۶/۶	ضریب تغییرات	
۴۳/۴	۱۳/۱	۱۳۰/۹	۴۲/۶	۱۴/۵	۱۲۲۴	میانگین	۲۰۷۰-۲۰۹۹
۴۰/۲	۰/۶	۴۴۲	۳۱/۹	۱/۱	۳۷۷/۴	انحراف معیار	
۹۲/۶	۴/۶	۳۳/۸	۷۴/۹	۷/۵۸	۳۰/۸	ضریب تغییرات	



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



شکل ۳. 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 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 ۲۰۱۰-۲۰۳۹ به میزان ۱/۱ مترمکعب در ثانیه در A2 و ۰/۹ مترمکعب در ثانیه در B2 نسبت به دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ کاهش نشان می‌دهد. این مقادیر در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ 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 ۲۰۱۰-۲۰۳۹ 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

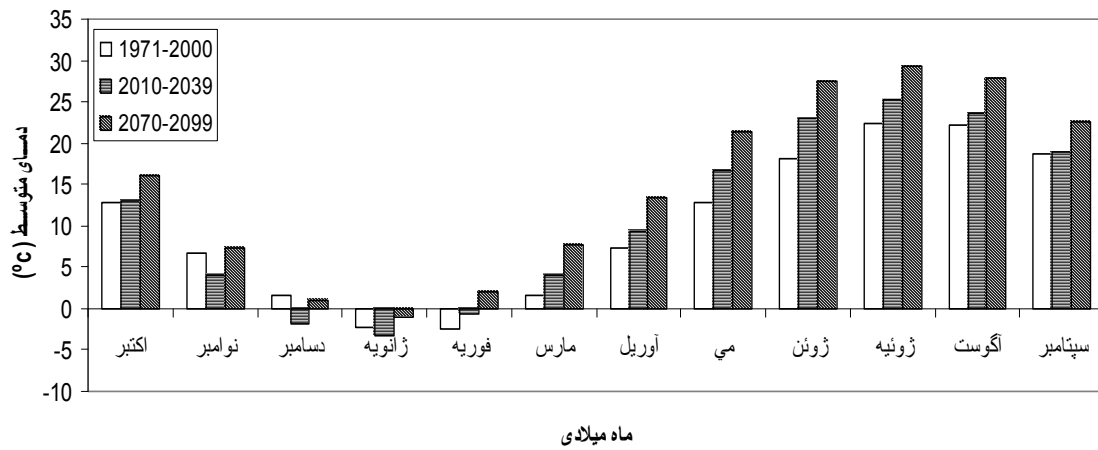
گردید. نتایج نشان داد که تعداد سال‌های خشک متوالی در سناریوی A2 از ۳ سال در دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به ۸ سال در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۱۱ سال در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ افزایش یافته است. این مقادیر در سناریوی B2 برابر ۲ سال در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۳ سال در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ می‌باشد.

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.

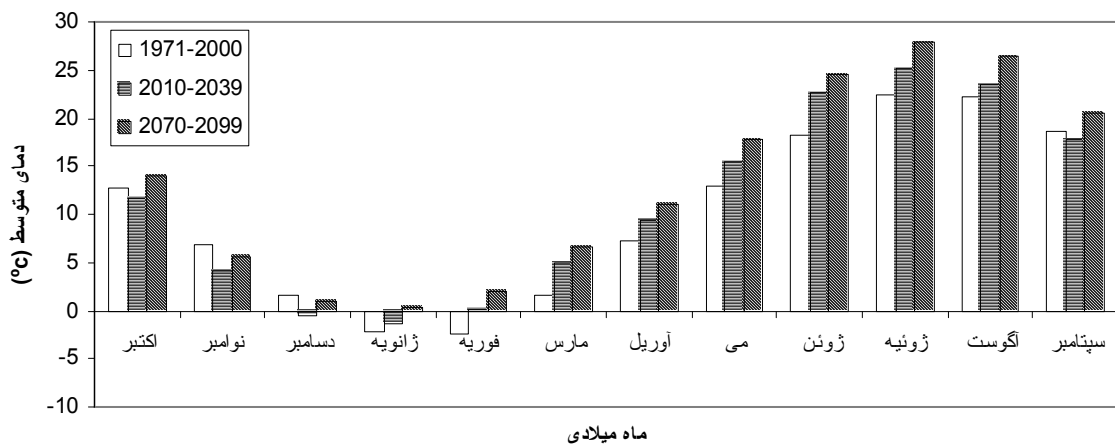
#### تجزیه و تحلیل دما بر اساس داده‌های تغییر اقلیمی

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 ۳/۲ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی می‌شود (جدول ۳). هم‌چنین توزیع

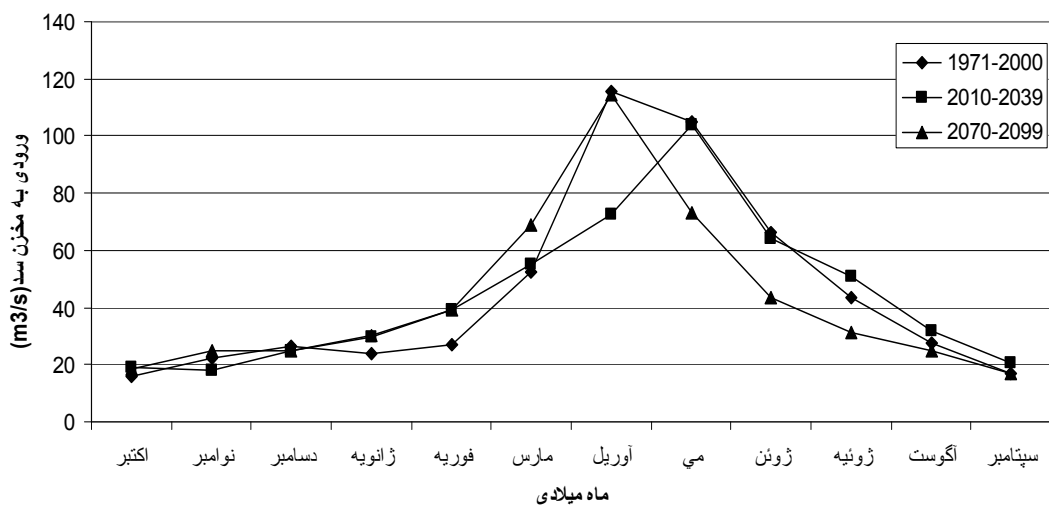




شکل ۴. توزیع ماهانه دمای دراز مدت، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی A2



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 دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی B2

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 می‌باشد.

جهت شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب با استفاده از مدل شبکه عصبی، داده‌های دما و تابش خورشیدی (مربوط به ایستگاه دامنه‌فریدن)، بارندگی (مربوط به ایستگاه چهل‌گرد) و شبکه Elman بهترین نتایج را برای برآورد جریان ورودی به سد چادگان ارائه داد. کاربرد داده‌های تولید شده تغییرات اقلیمی و مدل شبکه عصبی، کاهش ۲/۴ و ۱/۴ درصدی دبی را در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و کاهش ۵/۸ و ۴/۱ درصدی را برای ۲۰۹۹-۲۰۷۰ به ترتیب در سناریوهای A2 و B2 نسبت به دوره پایه این تحقیق نشان می‌دهد. علاوه بر کاهش منابع 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 داشته باشد، بالا رفتن ضریب تغییرات جریان طی دوره‌های آتی است. در حالی که برای آمار ثبت شده، ضریب تغییرات حدود ۳۱ درصد است برای دو دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ در سناریوی A2 به ترتیب به ۷۰ و ۷۵ درصد و برای سناریوی B2 به ۷۶ و ۹۳ درصد می‌رسد. از پیامدهای این افزایش نقصان در تأمین بهنگام

یافت. به گونه‌ای که میزان افزایش آن در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ نسبت به دوره مشاهداتی برابر ۱۲۵ و ۱۴۳ درصد به ترتیب 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 جریان محدود به میانگین و ضریب تغییرات نشده، بلکه توزیع سالیانه جریان را نیز در بر خواهد گرفت که این مهم در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله آثار تغییر اقلیم روی منابع آب حوضه زاینده‌رود اصفهان در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ 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 می‌رود، میزان بارندگی در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ با مقدار ۰/۷ درصد افزایش تحت سناریوی A2 و ۲ درصد کاهش تحت سناریوی B2 و در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰، با مقدار ۱۶ و ۱۰ درصد کاهش به ترتیب تحت سناریوی A2 و B2 نسبت به دوره پایه مطالعاتی (۲۰۰۰-۱۹۷۱) مواجه باشد. تجزیه و تحلیل‌های داده‌های 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

نویسندگان 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-TGCI, 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.