

اثر تغییر اقلیم بر فراوانی سیلاب حوضه کلاردشت با استفاده از تلفیق الگوریتم K-nn و مدل HadCM3

مجتبی خوش روش^{1*}، زهرا بائوج رضایی²

تاریخ دریافت: 94/04/02 تاریخ پذیرش: 95/03/18

¹- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

²- دانش آموخته مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: khoshravesh_m24@yahoo.com

چکیده

تغییر اقلیم می‌تواند منجر به تأثیرات جدی بر فراوانی، مقدار و مدت متغیرهای حدی هیدرولوژیکی شود. حدهای نهایی هیدرولوژیکی تغییر یافته، می‌تواند بر طراحی سازه‌های هیدرولیک در آینده، توسعه دشت‌های سیلابی و مدیریت منابع آب اثرگذار باشد. این پژوهش به بررسی تأثیرات تغییر اقلیم با استفاده از تلفیق روش تولید بارش K-nn و مدل HadCM3 از سری مدل‌های گردش عمومی جو سناریوی A2 و همچنین مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS می‌پردازد. ابتدا ریزمقیاس کردن داده‌های GCM با استفاده از مدل HadCM3 سناریوی A2 در روش نزدیک‌ترین همسایه (K-nn) که یک روش استوکاستیک است، انجام پذیرفت. سپس با تهیه نقشه‌های پوشش گیاهی و تهیه نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک و تعیین پارامترهای موردنیاز برای مدل HEC-HMS، اقدام به واسنجی مدل با استفاده از 4 واقعه سیلاب شد. نتایج RMSE، R و آزمون t-استیودنت نشان از همبستگی و تطابق بالای مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی دبی اوج داشت. نتایج تحلیل میزان بارندگی 2 ساعته با دوره بازگشت 100 ساله نشان داد که در دوره پایه (1980-2011) نسبت به دوره آینده (2040-2069)، 32 درصد کاهش داشته است. پس از تعیین منحنی شدت-مدت-فراوانی، مقادیر توزیع بارش برای ایستگاه نهالستان در مدل بارش-رواناب وارد شده و دبی پیک با دوره بازگشت‌های مختلف 2، 5، 10، 20، 50 و 100 ساله برای حوضه‌های مختلف در دوره پایه و آینده محاسبه شدند. نتایج تحلیل فراوانی سیل نشان داد که دبی سیل در دوره 2040-2069 با دوره بازگشت 25 ساله در کل حوضه، نسبت به دوره پایه، 21 درصد کاهش دارد.

واژه‌های کلیدی: تولید بارش، رودخانه سردآبرود، ریزمقیاس‌نمایی، مدل‌های استوکاستیک، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS

The Effect of Climate Change on Flood Frequency of Kelardasht Basin using K-nn and HadCM3 Model

M Khoshravesh^{*1}, Z Baoj-Rezaee²

Received: 23 June 2015 Accepted: 7 June 2016

¹ Assist. Prof. Dept. of Water Engin., Faculty of Agric. Engin., Sari Agric. Sciences and Natural Resources Univ., Iran

² Graduate of Water Engin., Faculty of Agric. Engin., Sari Agric. Sciences and Natural Resources Univ., Iran

*Corresponding Author, Email: khoshravesh_m24@yahoo.com

Abstract

Global climate change may have serious impacts on the frequency, magnitude and duration of hydrological extremes. Variation in the hydrologic ultimate limits can have impact on designing of hydraulic structures in future, development of flood-plain, and management of water resources. This research, investigated the potential impact of climate change using weather generator K-nn and HadCM3 models under A2 scenario and also the rainfall-runoff HEC-HMS model. First, downscaling of GCM data using HadCM3 model under scenario A2 in stochastic model called K-nn was carried out. Then, land use map and soil group map were prepared and required parameters were determined for the HEC-HMS model. Thereafter, and the model was calibrated and validated using 4 flood events. The results of RMSE, R and t-Student test indicated that simulated peak flow had significant correlation with observed peak flow. Results of storms analysis of 2 hours with 100- year return period showed that the base period (1980-2011) decreased by 32 percent as compared to future period (2040-2069). After determination of intensity-duration-frequency curve, distribution of precipitation values for Nahalestan station imported to the rainfall-runoff model and peak flow with different return periods 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years were calculated for sub-basins for the base and future periods. Results of the frequency analysis showed that peak flow in period 2040-2069 with 25 years return period would decrease by 21 percent as compared to the base period.

Keywords: Downscaling, HEC-HMS model, Production of precipitation, Sardabroud River, Stochastic model

مقدمه

این گاز در سال‌های پایانی سده 21 می‌تواند به بیش از 600 میلی‌گرم در لیتر برسد (بی‌نام 1998). پژوهش‌های علمی اخیر در ارتباط با تغییرات و نوسانات اقلیمی روی جریان رودخانه بسیار وسیع است (مک-کرچار و هندرسون 2003، پونگراز و همکاران 2003، پاتورل و همکاران 2003، لیندستروم و برگستروم 2004، واقفی و همکاران 2015، هندرسون و همکاران 2015). روندهای متفاوتی در میزان بارش در نقاط مختلف دنیا انتظار می‌رود به طوری که افزایش کلی، در نیمکره شمالی و در عرض‌های بالایی (به خصوص در زمستان و پاییز) و کاهش در هر دو نیمکره برای اقلیم‌های گرمسیری رخ داده است. فلاور و

رشد صنایع و کارخانه‌ها از آغاز انقلاب صنعتی و در پی آن افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی از یک سو و ویرانی جنگل‌ها و تغییر کاربری اراضی کشاورزی از سوی دیگر باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای، به ویژه گاز CO₂ در چند دهه اخیر شده است، به گونه‌ای که غلظت این گاز از 280 میلی‌گرم در لیتر در سال 1750 به 379 میلی‌گرم در لیتر در سال 2005 افزایش یافته است (بی‌نام 2007). تحقیقات نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند کنونی مصرف سوخت‌های فسیلی، غلظت

رودخانه زاینده‌رود اصفهان، برای دوره‌های 2010-2039 و 2009-2070 را بررسی کردند. یافته‌های این پژوهش گویای کاهش بارندگی و افزایش دما تا پایان سال 2100، به‌خصوص در نیمه دوم سده است. ذهبیون و همکاران (1389) اثر تغییر اقلیم را روی رواناب حوضه قره‌سو به‌وسیله شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی با مدل فیزیکی بارش-رواناب بررسی کردند. آنها از مدل هیدرولوژیکی SWAT⁴ برای شبیه‌سازی بارش-رواناب و همچنین از سناریوی انتشار A2 از مدل HadCM3 در دوره 2040-2069 برای حوضه قره‌سو استفاده کردند. مقایسه پارامترهای اقلیمی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره 2040-2069 نشان می‌دهد که دمای منطقه در ماه‌های مختلف بین 1 تا 4 درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه، گرم‌تر می‌شود. به‌جز در ماه‌های بدون بارش، بارندگی نیز تغییری بین 30- تا 30 درصد خواهد داشت. فرخی و ابریشمی (2009) با روش‌های طیفی و آماری، روندها را در سری‌های زمانی جریان رودخانه مشخص کردند. آنها با استفاده از آزمون‌های آماری من-کندال، روندهای کاهش را در ماه‌های کم آب (مرداد تا آبان) آشکار کردند که در ماه مهر، این روند معنی‌دار بوده است.

به‌طورکلی، با توجه به نتایج گرفته شده از مطالعات داخل و خارج از کشور، داده‌های هواشناسی و یافته‌های مدل‌های شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که میانگین دمای هوا روندی افزایشی دارد، که خود ممکن است سبب کاهش مقدار بارش تابستانه و تغییرات اقلیمی شود (چارت-زولاکیس و پساساس 2005). از سویی دیگر، انتظار می‌رود که پدیده تغییر اقلیم در سده 21 ادامه یابد (استیل-دون و همکاران 2008). بنابراین افزایش پیوسته انتشار گازهای گلخانه‌ای این اثرات را تشدید خواهد کرد. از این‌رو به رسمیت شناختن مدیریت منابع آب نقش قاطعی در حمایت از اقتصاد منطقه خواهد داشت (مئورر 2007). تلفیق KNN و GCM⁵ استفاده آن در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS⁶ می‌تواند ابزار بسیار

کیلسبی (2007) تغییرات اقلیمی را در 8 حوضه آبریز بحرانی شمال غرب انگلیس برای دو دوره زمانی 2010-2040 و 2010-2100 با استفاده از مدل منطقه‌ای HadCM3¹ ریزمقیاس نمایی کردند و اثرات هیدرواقلیمی آن را با دوره پایه 1990-1960 مقایسه کردند. یافته‌های مدل‌سازی آنها نشان داد که در دوره‌های آتی، جریان‌های بزرگ سیلابی تا 25 درصد در مقایسه با دوره پایه افزایش خواهند یافت. کوئیتانا و همکاران (2010) به‌منظور برآورد میزان عدم قطعیت در پیش‌بینی منابع آبی آینده در حوضه شمال مدیترانه، از دو روش آماری و دینامیکی برای ریزمقیاس نمایی متغیرهای هواشناسی در دوره 2010-2100 استفاده کردند. آنها نشان دادند که استفاده از روش‌های مختلف ریزمقیاس نمایی می‌تواند یافته‌های پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم در آینده را تغییر داده و عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد. این پژوهشگران با بررسی یافته‌های هر دو روش، نتیجه‌گیری کردند که بارش تابستانه در دهه‌های آینده با کاهش قابل ملاحظه‌ای مواجه خواهد شد که موجب کاهش دبی رودخانه‌های منطقه در این فصل می‌شود. هیرابایاشی و همکاران (2008) خطرپذیری رخداد سیل و خشکسالی را بر روی کره زمین با استفاده از برون‌داد مدل اقلیمی MIROC² با قدرت تفکیک 1/1 درجه تحت اثر پدیده گرمایش جهانی تا سال 2100 مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافته‌اند که تواتر رخداد سیل در بسیاری از نواحی کره زمین به استثنای آمریکای شمالی و مرکز تا غرب اروپا افزایش خواهد یافت. کاندلیک و سیمونویچ (2005) به بررسی وقایع حدی هیدرولوژیکی در رودخانه‌های اونتاریوی شمال غرب کانادا تحت سناریوهای اقلیمی با استفاده از روش مولد بارش K-nn³ و همچنین مدل بارش-رواناب توزیعی پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که مقدار دبی بیشینه آینده در محدوده مورد مطالعه بیشتر و از لحاظ بزرگی، متغیر خواهد بود. در ایران کمال و مساح بوانی (1391)، با بهره‌گیری از داده‌های مدل گردش عمومی HadCM3، اثرات این پدیده بر جریان

⁵- General circulation model

⁶- Hydrologic engineering center's - hydrologic modeling system

¹- Hadley center coupled model, version 3

²- Model for interdisciplinary research on climate

³- K - nearest neighbor

⁴- Soil and water assessment tool

ویلکز 1999، شنور و لتنمایر 1998). روش نزدیکترین همسایه (K-nn) یکی از روش‌های استوکاستیک برای تولید داده‌های اقلیمی می‌باشد که در این پژوهش داده‌های بارش روزانه با استفاده از این روش محاسبه شد (کاندرلیک و سیمونویچ 2005). الگوریتم نزدیکترین همسایه شامل تعدادی مشخص از بردار داده‌ها و سپس باز نمونه‌گیری تصادفی از آن مجموعه برای شبیه‌سازی دوره زمانی متعاقب با یک دوره معین می‌باشد. برای تولید بردار متغیرهای هواشناسی (x) برای روز t+1، در ابتدا روزهایی با شرایط مشابه با روز t از سری مشاهده شده انتخاب، سپس یکی از نزدیکترین همسایه‌ها برحسب توزیع احتمالاتی معین یا روش کرنل تعیین می‌شود و مقدار مشاهده شده‌ی متعاقب روز منتخب از سری زمانی اصلی، به‌عنوان مقدار شبیه‌سازی شده برای روز t+1 اتخاذ می‌شود.

روند گام به گام شبیه‌سازی به‌شرح زیر می‌باشد (قمقامی و همکاران 1390):

1. فراخوانی بردار $X_{p,t}$ از فایل داده‌های هواشناسی که $t=1.365*n$ که n تعداد سال‌های آماری و p معادل تعداد متغیرهای ورودی مدل می‌باشد.

2. تعیین عرض پنجره متحرک (mw^8) و طول ماتریس همسایگان روز t (L)، که این ماتریس دارای ابعاد $L*p$ می‌باشد.

3. محاسبه ماتریس کواریانس C_t برای هر روز و بر اساس ماتریس همسایگان

4. انتخاب اولیه مقادیر (فرضا یک ژانویه) و شروع فرایند شبیه‌سازی

5. محاسبه فاصله ماهالانویسی⁹ (دیویس 1986) براساس دو بردار x_i و x_j ، $i=1,L$:

$$d_i = \sqrt{(X_i - X_j) \text{INV} (C_t) T (X_i - X_j)} \quad [1]$$

که در آن INV علامت معکوس ماتریس و T ترانهاده بردار می‌باشد.

6. صعودی نمودن این فواصل و تعیین K تعداد از نزدیکترین بردارها.

مناسبی برای شبیه‌سازی وقایع آینده باشد که تاکنون در شرایط حوضه شمال کشور و در حوضه‌های شهری استفاده نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش اثرات تغییرات اقلیمی تحت سناریوی مدل‌های GCM با استفاده از الگوریتم مولد بارش K-nn و همچنین مدل بارش-رواناب روی سیلاب حوضه کلاردشت می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رودخانه سردآبرود با حوضه‌ای باریک از بلندی‌های برف‌گیر 4600 متری تخت‌سلیمان سرچشمه می‌گیرد، که دارای رژیم برفی، با دبی پایه نسبتاً زیاد است و دوره پرآب آن در بهار می‌باشد. رودخانه در بخش آغازین پرشیب است و در ارتفاع 1400 متری وارد دشت کوچک و بلندی به نام کلاردشت می‌شود. پس از گذر از دشت باز وارد منطقه کوهستانی و همچنین جنگلی شده و در آب‌های ساحلی سردآبرود به دریا می‌ریزد. پژوهش حاضر روی دو ایستگاه آب‌سنجی که بر روی شاخه اصلی سردآبرود وجود دارد، انجام شد. شکل 1 موقعیت منطقه و ایستگاه‌های آب‌نمود و هواشناسی را نشان می‌دهد. جدول 1 مشخصات فیزیوگرافی زیرحوضه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

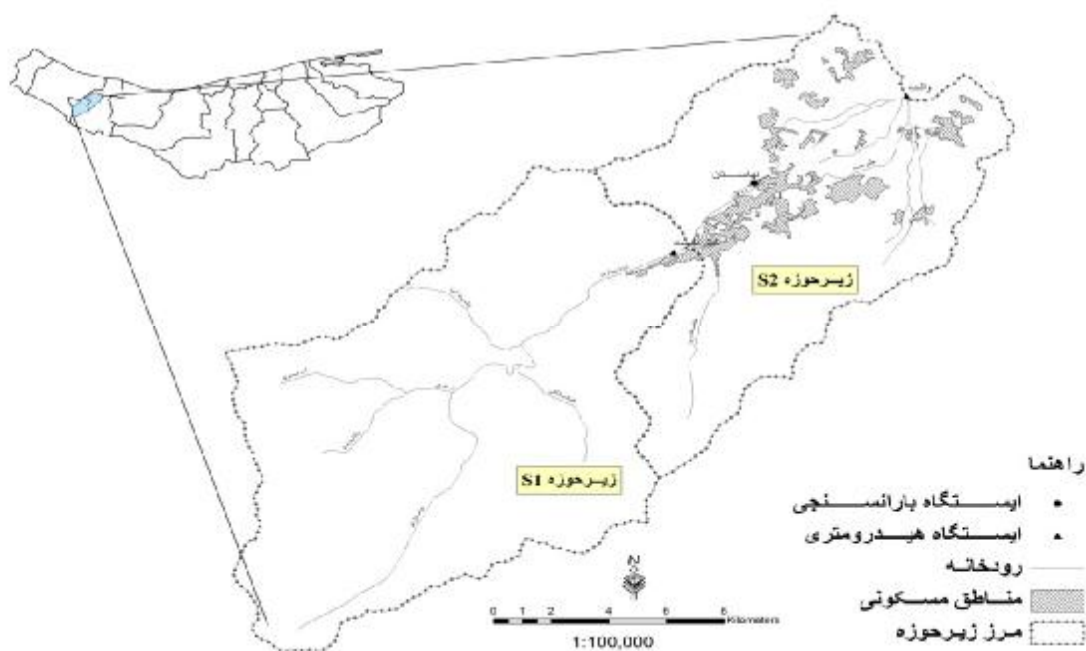
تولید داده‌های بارش با استفاده از الگوریتم K-nn

یکی از محدودیت‌های عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM⁷، بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی آن-ها است که به‌لحاظ مکانی و زمانی با دقت موردنیاز مدل‌های هیدرولوژیکی همخوانی ندارد. روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های AOGCM وجود دارد که به این روش‌ها، ریزمقیاس گفته می‌شود (ویل‌بای و هریس 2006، کانوی و جونز 1998). ریزمقیاس کردن به‌روش مولدهای بارش استوکاستیکی، یکی از روش‌های ریزمقیاس کردن می‌باشد که به‌صورت گسترده برای مناطق مختلف دنیا کاربرد دارد (یتز و همکاران 2003).

⁹- Mahalanobis

⁷- Atmospheric ocean general circulation model

⁸- Moving window



شکل 1- موقعیت حوضه کلاردشت و ایستگاه‌های آب‌سنجی و هواشناسی.

جدول 1- خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌های رودخانه سردآبرود.

نام زیرحوضه	مساحت (km ²)	طول رودخانه (km)	ارتفاع کمینه (m)	ارتفاع بیشینه (m)	شیب متوسط (%)
رودبارک	194/9	31/07	3070	4778	54/06
کلاردشت	132/3	19/1	1457	3617	30/18
کل حوضه	327/2	42/02	1457	4778	42/12

9. بردار شبیه‌سازی شده به‌عنوان ورودی مرحله 5 مدنظر است و مراحل 5 تا 8 برای تولید سری با طول مکفی تکرار می‌شود.

مدل اقلیمی و سناریوی انتشار مورد استفاده

در این پژوهش برای شبیه‌سازی‌های آینده (2069-2040) از خروجی‌های مدل HadCM3 زیر مجموعه‌ای از چهارمین گزارش ارزیابی IPCC (AR4) از مرکز پژوهش‌های پیش‌بینی اقلیم هادلی انگلستان با قدرت تفکیک اتمسفری 2/5° * 3/75° تحت سناریوی انتشار A2 از مجموع سناریوی SRES¹⁰ استفاده شد. در سناریوی A2 دنیا همگرا در نظر گرفته نمی‌شود. به‌عبارت دیگر مشخصات تحت این سناریو این است که 1) دنیا در کشورها به‌طور مستقل عمل

7. توزیع احتمالاتی گسسته در فرمول شماره 2 بر این مقادیر همسایه برآزش می‌یابد. قابل توجه است که هرچه مشابهت بین دو بردار اصلی و همسایه بیشتر باشد، بر اساس رابطه زیر وزن بیشتری هم به خود می‌گیرد:

$$W_i = \frac{1/j}{\sum_{i=1}^k 1/j} \quad [2]$$

$$P_j = \sum_{i=1}^j W_i \quad [3]$$

8. تولید یک عدد تصادفی (r) بین صفر و یک. اگر r < p_j باشد روز متناظر با اندیس j از سری زمانی اصلی انتخاب و بردار روز متعاقب آن به‌عنوان بردار xt+1 لحاظ می‌شود.

¹⁰- Special report on emissions scenarios

انجام گرفت. طی فرایند واسنجی مدل، تصحیح مکرر پارامترها و محاسبه بهترین برازش بین آب‌نمود محاسبه شده و مشاهده شده، تحت تابع هدف انجام گرفت (کریمی و همکاران 1390). در صورت برازش، مقدار پارامتر به‌دست آمده از واسنجی مدل قابل قبول تشخیص داده شده و در غیر این- صورت عملیات شبیه‌سازی برای دستیابی به نتایج بهتر تکرار شد. در نهایت اعتبارسنجی مدل از طریق اجرای مدل با پارامترهای بهینه شده برای دو رویداد دیگر بارش-رواناب انجام شد.

نتایج و بحث

اجرای مدل تولید بارش K-nm تحت سناریوی اقلیمی HadCM3

در این پژوهش مقادیر منحنی شدت-مدت-فراوانی از مقادیر روزانه بارش در طول 40 سال در ایستگاه نهالستان-کلاردشت به‌دلیل نبود ایستگاه سینوپتیک و یا آمار طولانی مدت در ایستگاه نهالستان-کلاردشت به-دست آمد. سپس با استفاده از ریزمقیاس کردن داده‌ها، مقادیر روزانه بارش برای ایستگاه نهالستان-کلاردشت در دوره 2040-2069 به‌دست آمد. نتایج حاصل از بررسی خصوصیات رگبار بر اساس مقادیر شدت-مدت-فراوانی در دوره پایه (1980-2011) نشان می‌دهد که توزیع گامبل برازش بهتری با اطلاعات رگبارها دارا می‌باشد. به‌طورکلی روش گامبل برای توزیع فراوانی مقادیر حدی یعنی تعیین فراوانی وقوع بالاترین یا پایین-ترین مقادیر یک متغیر مناسب می‌باشد (کریمی و همکاران 1392).

شکل‌های 2 و 3 به‌ترتیب منحنی شدت-مدت-فراوانی را برای ایستگاه نهالستان-کلاردشت در دوره پایه (1980-2011) و در دوره آینده (2040-2069) نشان می‌دهد. همان‌طوری که از شکل‌های زیر می‌توان استنباط نمود، میزان بارندگی 2 ساعته با دوره بازگشت 100 ساله در دوره پایه (1980-2011) نسبت به دوره آینده (2040-2069)، 32 درصد کاهش داشته است.

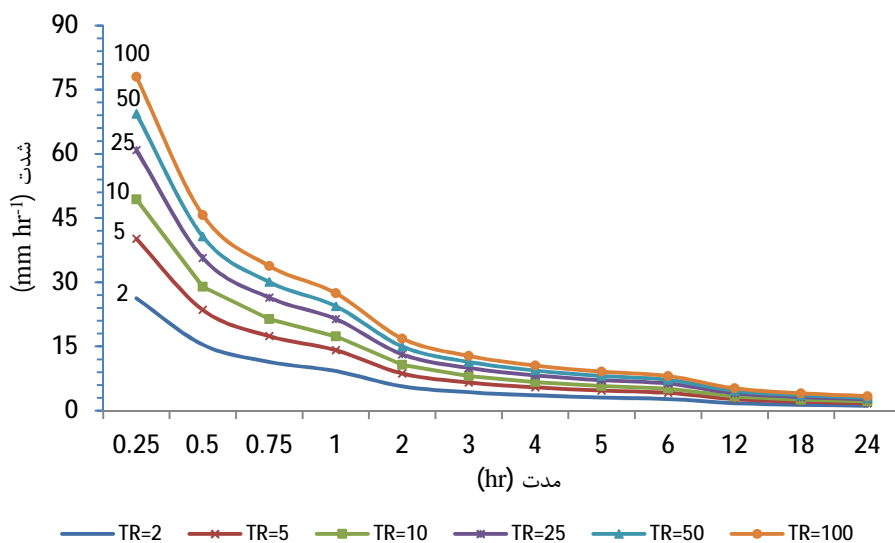
کرده و به خود متکی هستند (2) جمعیت دنیا به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد (3) توسعه اقتصادی منطقه محور است (بی‌نام 2007). با توجه به توضیحات بالا مشخص می‌شود که سناریوی A2 دارای بیشترین انتشار دی اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن می‌باشد. تراکم بیش از حد این گازها در جو، منجر به وقوع پدیده گلخانه‌ای می‌شود. این گازها توانایی جذب انرژی گرمایی بازتابی سطح زمین را دارند، لذا می‌توانند موجب افزایش جذب انرژی گرمایی در جو شوند و در نتیجه اثر گلخانه‌ای تشدید می‌شود (کاظمی‌زاد 1386). بنابراین سناریوی A2 با توجه به رشد جمعیت در آینده و توسعه اقتصادی پیشرو در کشورها، محتمل‌ترین سناریو برای آینده می‌باشد.

در مدل HEC-HMS ابتدا با استفاده از الحاقیه HEC-GeoHMS از طریق مدل ارتفاعی رقومی (DEM¹¹) به محاسبه پارامترهای فیزیکی حوضه اقدام شد. بعد از محاسبه پارامترهای فیزیکی، شبیه‌سازی رواناب با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS انجام شد. پس از معرفی عناصر هیدرولوژیکی، در هر زیرحوضه، سه بخش تلفات، رواناب مستقیم و آب پایه تعیین شد. بدین ترتیب برای محاسبه میزان تلفات، از روش شماره منحنی و برای رواناب مستقیم، از روش آب‌نمود مصنوعی SCS استفاده شد (محمد صالحی و همکاران 1386، کریمی و همکاران 1392). برای محاسبه دبی پایه از روش جداسازی آب‌نمود استفاده شد (علیزاده 1389). برای روندیابی سیلاب در مقطعی از رودخانه از روش روندیابی تأخیری استفاده شد (بنی‌هاشمی 1385).

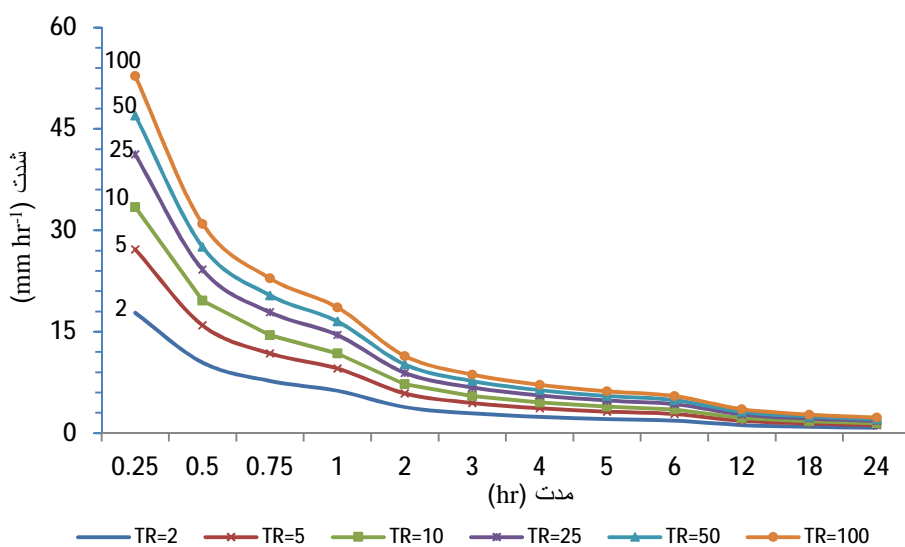
واسنجی و ارزیابی مدل

در این پژوهش از اطلاعات حوضه آبخیز، بارندگی، سیلاب و تجزیه و تحلیل آن‌ها استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا تعداد 5 مورد آب‌نمود سیلاب مشاهده شده و باران‌نمود مولد آن برای دو ایستگاه الوت و کلاردشت انتخاب داده‌های آن‌ها از روی نمودار استخراج شد. جهت شبیه‌سازی رواناب، ابتدا پارامترهای موردنیاز، محاسبه شده و بعد از پایان مرحله شبیه‌سازی، جهت تعیین مقدار بهینه این پارامترها عملیات واسنجی مدل برای 3 رویداد بارش-رواناب

¹¹- Digital elevation model



شکل 2- منحنی‌های شدت مدت فراوانی ایستگاه نهالستان کلاردشت در دوره پایه (1980-2011).



شکل 3- منحنی‌های شدت مدت فراوانی ایستگاه نهالستان کلاردشت در دوره آینده (2040-2069).

اولیه بیشتر از پارامتر زمان تاخیر است که نشان می‌دهد، مدل حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات تلفات اولیه دارد. اگر شیب منحنی کم باشد، تغییرات زیاد در مقدار پارامتر مربوطه، اثر کمی روی مقدار جواب مدل خواهد داشت و مدل را نسبت به آن پارامتر غیرحساس می‌گویند (تلوری 1375).

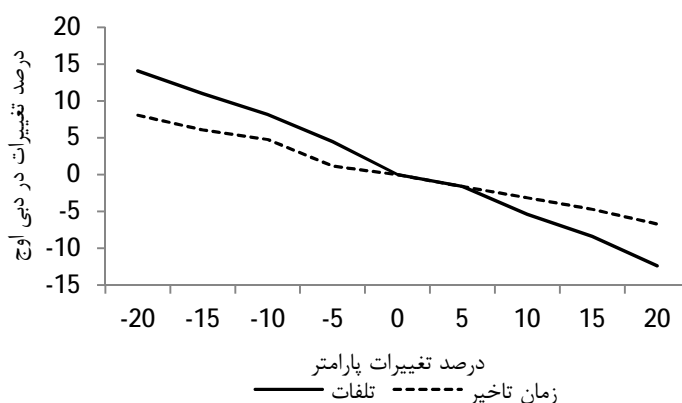
اهمیت هر مدل تا حدودی به صحت و پایایی (اطمینان-پذیری) خروجی آن بستگی دارد. با این حال، چون همه مدل‌ها، الگوهای ناقصی از واقعیت می‌باشند و چون داده‌های ورودی

شبیه‌سازی مدل بارش- رواناب

بررسی پارامترهای مدل HEC-HMS (شکل 4) نشان می‌دهد که پارامتر زمان تاخیر و مقدار تلفات اولیه دارای حساسیت بالایی می‌باشد که در این بین، تلفات اولیه از اولویت بیشتری جهت واسنجی مدل برخوردار است. به طوری که در بازه 20- تا 20+ درصد تغییر پارامتر تلفات اولیه، مقدار حساسیت پارامتر از 0/71 تا 0/62- تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، شیب منحنی برای پارامتر تلفات

قطعیت آن افزایش یافت به طوری که مقدار RMSE برای تلفات اولیه در 20- درصد برابر 15/6 مترمکعب بر ثانیه و در 20+ درصد برابر 11/4 مترمکعب بر ثانیه شد. همچنین مقدار RMSE برای زمان تاخیر در 20- درصد آن برابر 24/1 مترمکعب بر ثانیه و در 20+ درصد برابر 12/8 مترمکعب بر ثانیه به دست آمد.

دقیق بسیار نادر هستند، همه مقادیر خروجی در معرض دقت پایین قرار دارند. خطاهای داده‌های ورودی و عدم قطعیت‌های مدل‌سازی، مستقل از هم‌دیگر نمی‌باشند و به هم وابسته هستند که به شیوه‌های مختلف با هم اثر متقابل دارند. در این پژوهش تغییرات پارامترهای موردنظر (زمان تاخیر و تلفات اولیه) از 20- تا 20+ درصد، اعمال شد که در نتیجه میزان عدم



شکل 4- تغییرات خروجی مدل به ازای تغییرات پارامترهای ورودی.

اعتبارسنجی، نشان‌دهنده کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه می‌باشد.

پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژی، مقادیر توزیع بارش در مدل بارش-رواناب وارد شده و دبی پیک با دوره بازگشت‌های مختلف 2، 5، 10، 20، 50، 100 ساله برای دو زیرحوضه S1 و S2 و حوضه St در دوره پایه و آینده محاسبه شدند. نتایج فراوانی سیل با دوره بازگشت‌های مختلف برای زیرحوضه‌های مختلف رودخانه سردآبرود در جدول‌های 3 و 4 نشان داده شده است. نتایج تحلیل فراوانی سیل نشان داد که دبی دوره آینده (2040-2069) با دوره بازگشت 25 ساله در زیرحوضه S1، نسبت به دوره پایه (1980-2011) حدود 19 درصد کاهش داشته است. همچنین نتایج تحلیل فراوانی سیل نشان داد که دبی دوره آینده (2040-2069) با دوره بازگشت 25 ساله در زیرحوضه S2 و St، نسبت به دوره پایه (1980-2011)، به ترتیب حدود 22 و 21 درصد کاهش داشته است.

در عملیات واسنجی به لحاظ اهمیت دبی اوج در وقایع سیل، مقادیر بیشینه دبی به‌عنوان شاخص واسنجی مدنظر قرار گرفت. شاخص جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^{12}$) و ضریب همبستگی (r^{13}) و همچنین آزمون t-استیودنت برای ارزیابی آماری نتایج مدل استفاده شده است. همچنین داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای در مرحله واسنجی (3) واقعه سیلاب) همبستگی بالایی دارد ($P < 0.001$; $r > 0.9$) (جدول 2). با بهره‌گیری از آزمون مقایسه میانگین‌ها، آزمون t-استیودنت، تفاوت معنی‌داری میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی دیده نشد. بنابراین، با احتمال 99 درصد اعتماد می‌توان گفت که مدل، داده‌های واقعی را در مرحله واسنجی بازسازی می‌کند. همچنین در مرحله اعتبارسنجی برای دو واقعه سیلاب، مدل با استفاده از آزمون مقایسه میانگین‌ها و آزمون t-استیودنت نشان داد که تفاوت معنی‌داری میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود ندارد ($r > 0.9$; $P < 0.001$). مقادیر کوچک RMSE برای مرحله واسنجی و

¹³- Coefficient of correlation

¹²- Root mean square error

جدول 2- مقادیر مربوط به ارزیابی نتایج پیش‌بینی شده و مشاهداتی وقایع مختلف ایستگاه‌های والت و کلاردشت.

مرحله	تاریخ	دبی مشاهده‌ای ($m^3 s^{-1}$)	دبی شبیه‌سازی شده ($m^3 s^{-1}$)	شرایط خاک	P-Value	R	RMSE
واسنجی (کلاردشت)	11 خرداد 1369	1/64	1/63	III	<0.001	0/97	0/44
واسنجی (کلاردشت)	24 خرداد 1370	5/6	5/68	II	<0.001	0/91	0/8
اعتبارسنجی (کلاردشت)	29 آذر 1386	33/8	34/14	III	<0.001	0/97	0/64
واسنجی (والت)	25 مرداد 1369	3/82	3/81	III	<0.001	0/94	0/78
اعتبارسنجی (والت)	7 مهر 1385	5/5	5/52	III	<0.001	0/91	1/1

جدول 3- مقادیر سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از مدل HEC-HMS در دوره پایه (1980-2011).

نام زیرحوضه	کد زیرحوضه	دوره بازگشت				
		2	5	10	25	50
رودبارک	S1	0/61	1/05	1/3	1/6	2/11
کلاردشت	S2	2/51	4/35	5/36	6/85	9/1
کل حوضه	St	3/05	5/3	6/52	8/28	11/09

جدول 4- مقادیر سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از مدل HEC-HMS در دوره آینده (2040-2069).

نام زیرحوضه	کد زیرحوضه	دوره بازگشت				
		2	5	10	25	50
رودبارک	S1	0/49	0/86	1/06	1/3	1/48
کلاردشت	S2	2/04	3/54	4/36	5/37	6/13
کل حوضه	St	2/48	4/31	5/3	6/54	7/46

نتیجه‌گیری کلی

به دوره آینده (2040-2069)، 32 درصد کاهش داشته است. نتایج شبیه‌سازی مدل هیدرولوژی HEC-HMS نشان می‌دهد که داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای در مرحله واسنجی (3 واقعه سیلاب) همبستگی بالایی دارد ($r > 0.9$); ($P < 0.001$). با بهره‌گیری از آزمون مقایسه میانگین‌ها، آزمون t -استیودنت، تفاوت معنی‌داری میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دیده نشد. بنابراین، با احتمال 99 درصد اعتماد می‌توان گفت که مدل داده‌های واقعی را در مرحله واسنجی، بازسازی می‌کند. همچنین در مرحله اعتبارسنجی برای دو واقعه سیلاب، مدل با استفاده از آزمون مقایسه میانگین‌ها و آزمون t -استیودنت نشان داد که تفاوت معنی‌داری میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود ندارد ($r > 0.9$; $P < 0.001$). مقادیر کوچک RMSE برای مرحله

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم روی سیلاب رودخانه سردآبرود با استفاده از سناریوی اقلیمی HadCM3 و مولد بارش استوکاستیک K-nn و همچنین مدل هیدرولوژی HEC-HMS، بررسی شد. نتایج حاصل از بررسی خصوصیات رگبار بر اساس مقادیر شدت-مدت-فراوانی در دوره پایه (1980-2011) نشان می‌دهد که توزیع گامبل برازش بهتری با اطلاعات رگبارها دارا می‌باشد. نتایج نشان داد که میزان بارندگی در دوره آینده (2040-2069) نسبت به دوره پایه (1980-2011) کاهش خواهد یافت که این نتایج با سایر مطالعات انجام گرفته همخوانی دارد (ذهبیون و همکاران 1389، دوستی و همکاران 1392). همچنین میزان بارندگی 2 ساعته با دوره بازگشت 100 ساله در دوره پایه (1980-2011) نسبت

به نتایج حاصل از مدل‌های مولد بارش نظیر K-nn همراه با مدل‌های اقلیمی GCM. ابزارهای مناسبی برای پیش‌بینی صحیح متغیرهای اقلیمی در دوره آتی می‌باشند که می‌توانند تغییرات متغیرهای اقلیمی را که در آینده رخ می‌دهند، پیش‌بینی کنند تا مسئولان و برنامه‌ریزان منطقه مورد مطالعه در بخش‌های کشاورزی، منابع آب، محیط زیست، صنعت و اقتصاد بتوانند راهکارهای لازم را برای کاهش پیامدها و سازگاری با شرایط آب و هوایی جدید اتخاذ کنند. همچنین در پژوهش‌های بعدی می‌توان با لحاظ کردن اثر تغییر اقلیم روی جریان‌های کم‌آب (خشکسالی‌ها)، اطلاعات مناسب‌تری برای بررسی این رویدادها ارائه داد که برای این کار نیاز به استفاده از مدل‌های پیوسته می‌باشد تا وقایع تر و خشک را شبیه‌سازی نماید.

واسنجی و اعتبارسنجی نشان‌دهنده کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه می‌باشد. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژی، مقادیر شدت-مدت-فراوانی ایستگاه مورد مطالعه در دوره پایه و همچنین دوره آینده به مدل داده شد که نتایج نشان داد، دبی دوره آینده (2069-2040) با دوره بازگشت 25 ساله در زیرحوضه S1 نسبت به دوره پایه (2011-1980) حدود 19 درصد کاهش داشته است. همچنین نتایج تحلیل فراوانی سیل نشان داد که دبی دوره آینده (2069-2040) با دوره بازگشت 25 ساله در زیرحوضه S2 و St نسبت به دوره پایه (2011-1980)، به ترتیب حدود 22 و 21 درصد کاهش داشته است. همین نتایج برای سایر سیل‌های با دوره بازگشت مختلف نیز با نتایج دیگر محققان همخوانی دارد (ذهبیون و همکاران 1389، دوستی و همکاران 1392). با توجه

منابع مورد استفاده

- بنی‌هاشمی م، 1385. مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز نکارود- زیرحوضه گلورد با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. طرح تحقیقات کاربردی. شرکت آب منطقه‌ای مازندران. 154 صفحه.
- تلوری ع، 1375. مدل‌های هیدرولوژی به زبان ساده. انتشارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، چاپ دوم، 120 صفحه.
- دوستی م، حبیب‌نژاد روشن م، شاهی ک و میریعقوب‌زاده مح. 1392. بررسی شاخص‌های اقلیمی حوضه آبخیز تهر، استان گلستان در شرایط تغییر اقلیم با کاربرد مدل LARS-WG. مجله فیزیک زمین و فضا، جلد 39، شماره 4، صفحه‌های 177 تا 189.
- ذهبیون ب، گودرزی مر و مساح بوانی عر. 1389. کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، جلد 1، شماره 3، صفحه‌های 45 تا 60.
- علیزاده، ا، 1389. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). چاپ بیست و هشتم، 800 صفحه.
- قمقماقی م، قهرمان ن و عراقی‌نژاد ش، 1390. ارزیابی عملکرد رهیافت توسعه یافته نزدیک‌ترین همسایه در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، جلد 42، شماره 1، صفحه‌های 45 تا 54.
- کاظمی‌زاد م. 1386. عوامل موثر بر گرمایش گلخانه‌ای زمین و نتایج آن. رشد آموزش زمین‌شناسی، شماره 49، صفحه‌های 22 تا 29.
- کریمی و، سلیمان ک، حبیب‌نژاد روشن م و شاهی ک، 1392. مقایسه برخی روش‌های تعیین الگوی توزیع زمانی بارش جهت برآورد سیلاب‌های شهری مطالعه موردی بابلسر. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال 4، شماره 13، صفحه‌های 102 تا 112.
- کمال ع و مساح بوانی عر، 1391. مقایسه عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم AOGCM-TAR و AOGCM-AR4 در تاثیر بر رواناب حوضه در دوره آتی. مجله فیزیک زمین و فضا، جلد 38، شماره 3، صفحه‌های 175 تا 188.
- محمد صالحی پ، رائینی سرجاز م و ضیاءتبار احمدی مخ، 1386. شبیه‌سازی بارش-رواناب با مدل ریاضی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی برای حوضه آبریز امامه. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد 15، شماره 1، صفحه‌های 162-171.
- Anonymous, 1998. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge.

- Anonymous, 2007. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Chartzoulakis K and Psarras G, 2005. Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case study of Greece. *Agriculture Ecosystems and Environment* 106: 147-157.
- Conway D and Jones PD, 1998. The use of weather types and air flow indices for GCM downscaling. *Journal of Hydrology* 213(1/4): 348-361.
- Cunderlik JM and Simonovic SP, 2005. Hydrological extremes in a southwestern Ontario river basin under future climate conditions. *Hydrological Sciences Journal* 50(4): 631-654.
- Davis J, 1986. *Statistics and data analysis in geology*, Wiley, New York.
- Farrokhi A and Abrishamchi A, 2009. Detection of stream flow trends and variability in Karun river, Iran as parts of climate change and climate variability. *World Environmental and Water Resources Congress*, pp. 1-12.
- Flower HJ and Kilsby CG, 2007. Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Journal of Climate Change* 80: 337-367.
- Henderson J, Rodgers C, Jones R, Smith J, Strzepek K and Martinich J, 2015. Economic impacts of climate change on water resources in the coterminous United States. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20(1): 135-157.
- Hirabayashi Y, Kanae S, Emori S, Oki T and Kimoto M, 2008. Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *Hydrological Sciences Journal* 53: 754-772.
- Lindström G and Bergström S, 2004. Runoff trends in Sweden: 1807-2002. *Hydrol. Sci. J., Special Section: Detecting Change in Hydrological Data* 49(1): 69-83.
- Maurer EP. 2007. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emission scenario. *Climatic Change* 82: 309-325.
- McKerchar AI and Henderson RD, 2003. Shifts in flood and low-flow regimes in New Zealand due to interdecadal climate variations. *Hydrological Sciences Journal* 48(4): 637-654.
- Paturel JE, Ouedraogo M, Servat E, Mahé G, Dezetter A and Boyer JF, 2003. The concept of rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal* 48(1): 125-137.
- Pongrácz R, Bogardi I and Duckstein L, 2003. Climatic forcing of droughts: a Central European example. *Hydrological Sciences Journal* 48(1): 39-50.
- Quintana P, Ribes A, Martin E, Habets F and Boe J, 2010. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology* 383: 111-124.
- Schnur R and Lettenmaier DP, 1998. A case study of statistical downscaling in Australia using weather classification by recursive partitioning. *Journal of Hydrology* 212/213(1/4): 362-379.
- Steele-Dunne S, Lynch P, McGrath R, Semmler T, Wang S, Hanafin J and Nolan P, 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology* 356: 28-45.
- Vaghefi SA, Mousavi SJ, Abbaspour KC, Srinivasan R and Yang H, 2015. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *Hydrological Processes* 28(4): 2018-2032.
- Wilby RL and Harris I, 2006. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research* 42(2): 1-10.
- Wilks DS, 1999. Interannual variability and extreme value characteristics of several stochastic daily precipitation models. *Agricultural and Forest Meteorology* 93: 153-169.
- Yates D, Gangopadhyay S, Rajagopalan B and Strzepek K, 2003. A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbour algorithm. *Water Resources Research* 39(7): 1199-1207.