



## "مقاله پژوهشی"

# مدل سازی بارش-رواناب به منظور پیش بینی حداکثر جریان روزانه در شرایط تغییر اقلیم

محمد بشیر گنبد

استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، (نویسنده مسوول: mbgonbad@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۳۱

صفحه: ۱۱۵ تا ۱۲۴

## چکیده مبسوط

**مقدمه و هدف:** یکی از مهم ترین چالش ها در سال های اخیر مساله تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آبی است که به عنوان یکی از اصلی ترین زمینه های تحقیقاتی در سراسر جهان محسوب می شود. دو نشانه بارز و مشخص تغییر اقلیم در میانگین و مقادیر حدی متغیرهای اقلیمی است که می تواند احتمال بروز سیلاب ها را افزایش دهد و آثار زیانباری را در پی داشته باشد. به همین دلیل لازم است تا اثر تغییر اقلیم بر سیلاب حوضه ها در دوره های آتی بررسی گردد.

**مواد و روش ها:** در این تحقیق با استفاده از داده های روزانه بارش و دمای مشاهده شده در دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۱ ایستگاه های سینوپتیک و کلیماتولوژی داخلی و اطراف حوزه آبخیز بختیاری اثر تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. برای پیش بینی بارش و دما در آینده از داده های مدل گردش عمومی canESM2 تحت سناریوهای حدی RCP۲/۶ و RCP۵/۵ برای متغیرهای اقلیمی در دوره های ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ استفاده شد. معیارهای مؤثر در ریزمقیاس نمایی با توجه به میزان همبستگی متغیرهای پیش بینی کننده و پیش بینی شونده پایگاه NCEP انتخاب شد. سپس از مدل نیمه توزیعی MORDOR-SD برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب استفاده شد. این مدل با استفاده از داده های روزانه بارش و دما و دبی های مشاهده ای در ایستگاه تنگ پنج بختیاری در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۶ واسنجی و اعتباریابی شد. اعمال نتایج تغییرات داده های بارش و دمای به دست آمده از مدل SDSM تحت دو سناریوی ذکر شده و بازتولید آن ها به تعداد بسیار زیاد به روش بوت استرپ ناپارامتری و جایگزینی رویدادهای حداکثر روزانه حاصل از آن در مدل هیدرولوژیکی دستیابی به حداکثر جریان روزانه و احتمال مربوط به آن را ممکن ساخت. پس از پایان شبیه سازی و محاسبه تابع توزیع تجمعی رویدادهای شبیه سازی شده مقادیر حداکثر دبی های روزانه در دوره بازگشت های مختلف محاسبه شد.

**یافته ها:** نتایج نشان داد که پارامترهای دما و بارش تحت سناریوهای RCP۲/۶ و RCP۵/۵ با متوسط معیارهای ارزیابی  $MAE=1/29$ ،  $RMSE=1/96$  و  $NASH=-0/56$  برای بارش به طور متوسط  $5/4$  تا  $11$  درصد کاهش نسبت به دوره پایه و برای دما با معیارهای ارزیابی  $MAE=2/27$ ،  $RMSE=2/71$  و  $NASH=-0/92$  از  $6/5$  تا  $10/4$  درصد افزایش نسبت به دوره پایه را به دنبال دارد. نتایج معیارهای ارزیابی نش-ساتکلیف و کلینگ-گوپتا به ترتیب  $0/76$  و  $0/83$  است که نشان از توانایی قابل قبول مدل هیدرولوژیکی در شبیه سازی است.

**نتیجه گیری:** نتایج نهایی تحقیق نشان داد که حداکثر دبی های روزانه شبیه سازی شده با استفاده از داده های سناریوی  $8/5$  در دوره بازگشت های مختلف، مقادیر بیشتری را نسبت به حداکثر دبی های روزانه در سناریوی  $2/6$  نشان می دهد اما نسبت به داده های حداکثر روزانه در دوره پایه تغییر قابل توجهی وجود ندارد.

**واژه های کلیدی:** تغییر اقلیم، ریزمقیاس نمایی، مدل canESM2، مدل هیدرولوژیکی MORDOR-SD

## مقدمه

در چند دهه اخیر به دلیل صنعتی شدن جوامع غلظت گازهای گلخانه ای افزایش یافته است، افزایش گازهای گلخانه ای موجب افزایش دمای کره زمین و تغییر در دیگر متغیرهای اقلیمی شده است (۱۴). تغییر در دما و بارش سبب تغییر در چرخه آب بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک می شود. تحقیقات نشان داده است این مناطق شرایط مستعدتری نسبت به مناطق مرطوب جهت بروز پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم دارند (۲۳). مرطوب تر شدن مناطق مرطوب جهان و خشک تر شدن مناطق خشک، با بررسی متوسط بارش در تحقیقات ونت و همکاران (۲۶)، ژانگ و همکاران (۳۱)، آلان و همکاران (۱) و وینسنت و همکاران (۲۵) مشهود است، هرچند نتایج تحقیقات گریو و همکاران (۱۰) چالشی جدی بر این نظریه وارد کرده است. در سال های اخیر اثرات ناشی از تغییرات اقلیمی بر چرخه آب و حوزه های آبخیز توسط بسیاری از محققان و جوامع علمی بررسی شده و نتایج این تحقیقات نشان دهنده اثر این تغییرات آب و هوایی روی خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه ها در مناطق مختلف است (۲۱، ۵). طبق گزارش های ای پی سی سی (IPCC) تغییر اقلیم می تواند باعث ایجاد تغییر در رژیم هیدرولوژی در سطح جهان شود به گونه ای که احتمال مواجهه با رخداد های حداکثر

اقلیمی مانند سیلاب افزایش یابد (۷). افزایش شدت و فراوانی بارش های حدی در مشاهدات مقادیر ثبت شده ایستگاه ها مشهود است (۲۰، ۱۸). البته تحقیقاتی هم وجود دارد که این تغییر و افزایش را در مدل های گردش عمومی GCM اثبات می کند (۱۶، ۲). همچنین مدل های گردش عمومی افزایش شدت و فراوانی بارش های حدی را در دهه های آینده نشان می دهد (۲۴، ۱۷، ۱۶). از آنجا که افزایش این احتمال برای دوره های آتی می تواند آثار زیانباری را برای جوامع بشری در پی داشته باشد، لازم است تا وضعیت سیلاب حوضه ها در دوره های آتی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم مورد بررسی و پیش بینی قرار گیرد.

این پیش بینی ها بر اساس سناریوهای مختلفی صورت می گیرد که هر یک بیانگر وضعیتی از تولید گازهای گلخانه ای و عوامل مؤثر بر کنترل تولید این گازها است. هر کدام از این سناریوها بر مبنای فرضیات مختلفی راجع به رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، تحول فن آوری، سطح زندگی و گزینه های موجود تولید انرژی استوار می باشند که به آن ها سناریوی انتشار اطلاق می شود (۱۱). سناریوهای متفاوتی از ۱۹۹۲ تا به حال توسط IPCC ارائه شده است که برای پیش بینی اقلیم در مقیاس دهه تا سده بکار می روند که نمونه های آن هم اکنون در مراکز مختلف اقلیمی در حال اجرا است و اقلیم کره

زمین را تا ۲۳۰۰ میلادی با استفاده از همین مدل‌ها شبیه‌سازی نموده‌اند.

از مدل‌های گردش عمومی نمی‌توان به‌طور مستقیم برای پیش‌بینی منطقه‌ای استفاده کرد و همچنین نمی‌تواند برآورد درستی از پاسخ هیدرولوژیکی به تغییر اقلیم را فراهم سازد و نیازمند ریزمقیاس‌سازی هستند تا در مدل‌های هیدرولوژیکی قابل استفاده باشد (۸). علت این امر مربوط به مناسب نبودن مقیاس مدل‌های گردش عمومی و مدل هیدرولوژیکی است. مدل‌های هیدرولوژیکی در مقیاس‌های کوچک‌تر استفاده می‌گردند که نیازمند داده‌های ریزمقیاس مدل‌های گردش عمومی هستند (۱۳). خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی را به روش‌های آماری و دینامیکی ریزمقیاس نمایی می‌کنند. یکی از مدل‌های کامپیوتری مورد استفاده جهت ریزمقیاس نمایی، مدل SDSM است که توسط ویلبای و همکاران (۲۷) ارائه شده است. این مدل پیوند بین مدل رگرسیون خطی و تکنیک‌های تولید تصادفی آب و هوایی را بهتر شرح می‌دهد، چون از الگوهای ناحیه‌ای و متغیرهای رطوبت جوی در تولید متغیرهای محلی استفاده می‌کند که ارتباطات آماری بین متغیرهای بزرگ مقیاس مدل‌های جهانی اقلیم و متغیرهای هواشناسی محلی را برقرار می‌کند.

متغیرهای اقلیمی ریزمقیاس شده مدل‌های گردش عمومی می‌تواند به‌عنوان ورودی در مدل‌های هیدرولوژیکی وارد شده تا به نحو مطلوبی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدرولوژیکی به‌ویژه رواناب حوضه را در دوره‌های آینده شبیه‌سازی کند. در نقاط مختلف دنیا و ایران تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است (۲۸، ۱۶، ۶، ۲۹).

اثرات تغییر اقلیم و پوشش گیاهی بر رواناب در منطقه کوهستانی در حوضه‌های رودخانه‌ای شمال چین در ۵ دهه گذشته توسط لی و همکاران (۱۹) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مقدار دی‌اکسید کربن در این حوضه‌ها افزایش چشمگیری داشته است. نتایج مدل هیدرولوژیکی روند کاهش رواناب در بخش جنوبی و شمال شرقی منطقه و افزایش رواناب در بخش‌های شمالی به دلیل کاهش تابش و افزایش دما را نشان داد.

کاپیان و همکاران (۱۵)، به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر نوسانات دبی جریان در رودخانه هراز پرداختند. در این تحقیق ۶ مدل GCM برای ارائه تصویری مطلوب از وضعیت عوامل هواشناسی دما و بارندگی ماهانه تا سال ۲۰۳۰-۲۰۱۱ میلادی در حوزه آبخیز رودخانه هراز مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدل‌های اقلیمی نشان داد که متوسط حداقل و حداکثر دمای سالانه برای دوره آبی به ترتیب ۰/۶۳ و ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و متوسط بارندگی سالانه برای منطقه مورد مطالعه به میزان ۱۸ درصد کاهش خواهد یافت. با استفاده از داده‌های ماهانه بارندگی و آبدی رودخانه و همچنین با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT میزان آورد رودخانه برای افق مورد نظر برآورد گردید. برآوردها حاکی از کاهش آوردها به میزان ۱۴ درصد در دوره آبی بوده است. زمانی و همکاران (۳۰)، در حوضه رود زرد در جنوب غربی ایران و تحت دو سناریوی RCP۴/۵ و RCP۸/۵ اثر تغییر

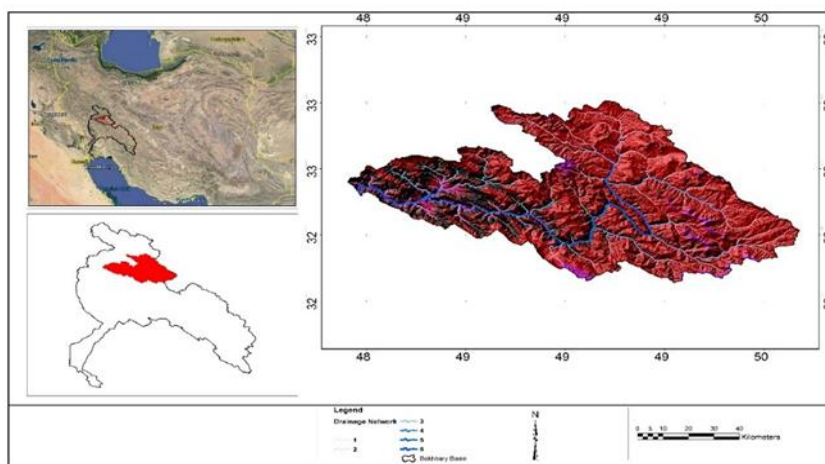
اقلیم بر رواناب در دوره ۲۰۴۵-۲۰۲۵ را با استفاده از مدل IHACRES و نتایج حاصل از ریزمقیاس نمایی مدل LARS-WG بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش میانگین دمای سالانه در سناریوهای ذکر شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی رواناب تحت تاثیر تغییر اقلیم در حالت کلی کاهش میانگین رواناب شبیه‌سازی شده برای دوره آینده نسبت به دوره پایه را نشان داد.

باغبانان و همکاران (۴)، در حوزه آبخیز حبله رود اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات هیدرولوژی را با استفاده از سناریوهای RCP۲/۶، RCP۴/۵ و RCP۸/۵ و مدل هیدرولوژیکی SWAT را در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده همبستگی قابل قبول بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی است، همچنین افزایش بارش در کلیه ماه‌های سال‌های آبی که ناشی از نتایج مدل HadGEMS2-ES و تحت سناریوهای یاده شده است افزایش رواناب را نشان می‌دهد.

بخش بزرگی از ایران زمین در اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع شده و بررسی روند تغییرات اقلیمی در آن از اهمیت زیادی برای مدیریت حوزه آبخیز برخوردار است. حوزه آبخیز کارون بزرگ نقش اساسی در تأمین منابع آبی جنوب غرب ایران دارد و بخش عمده‌ای از سدهای بزرگ در این حوضه واقع شده است. یکی از زیر حوضه‌های اصلی این منطقه حوزه آبخیز بختیاری است که خروجی آن خواستگاه سد بختیاری است که باهدف تأمین آب پایین‌دست در حال ساخت می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی اثرات تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل SDSM و شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از یک مدل پیوسته نیمه توزیعی است. بازتولید وقایع بارش با روش مونت کارلو و محاسبه رواناب ناشی از ذوب برف و در نتیجه کاهش عدم قطعیت اصلی‌ترین پارامترهای ورودی مدل هیدرولوژیکی، جز اهداف اصلی این پژوهش است. با توجه به اینکه سد بختیاری پس از بهره‌برداری به‌عنوان یکی از منابع آب پایدار در منطقه بوده و همچنین باهدف سازه تأخیری برای مدیریت و مهار سیلاب‌های منطقه طراحی شده است میزان حداکثر جریان و حجم آن‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز رودخانه بختیاری در جنوب غرب کشور و در محدوده مختصات جغرافیایی ۱۵-۴۸ تا ۲۰-۵۰ طول شرقی و ۳۰-۳۲ الی ۳۰-۳۳ عرض شمالی و در محدوده استان‌های چهارمحال و بختیاری، اصفهان، لرستان و خوزستان با مساحت ۶۳۹۰ کیلومتر مربع قرار گرفته است. این حوضه در بالادست حوزه آبخیز رودخانه دز واقع شده که حوزه آبخیز دز نیز در تقسیم‌بندی حوضه‌های کشور جزو حوزه آبخیز کارون بزرگ محسوب می‌شود. برخی خصوصیات و موقعیت حوضه مورد مطالعه در جدول (۱) و شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران زمین و حوضه کارون بزرگ

Figure 1. The location of the studied area in Iran and Karoon catchment

جدول ۱- خصوصیات کلی حوزه آبخیز بختیاری

Table1. Bakhtiary watershed characteristics

| آبوهوا                                                 |          | فیزیوگرافی                                 |
|--------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------|
| میانگین بارش سالیانه حوضه (میلی متر در سال)            | ۷۵۸/۱۴   | مساحت (کیلومتر مربع)                       |
| میانگین دمای بهمن ماه                                  | ۱۰/۲۸    | ارتفاع متوسط (متر از سطح دریا)             |
| میانگین دمای مردادماه                                  | ۳۸/۴۳    | بیشترین ارتفاع (متر از سطح دریا)           |
|                                                        |          | کمترین ارتفاع (متر از سطح دریا)            |
| وضعیت هیدرولوژی                                        |          | کاربری اراضی (درصد)                        |
| میانگین رواناب سالیانه (میلی متر در سال)               | ۷۱۰      | مرتع                                       |
| میانگین حداکثر سالیانه دبی ۲۴ ساعته (مترمکعب در ثانیه) | ۸۰۱/۰۸   | انواع جنگل شامل جنگل انبوه، متراکم و تنک   |
| حداکثر جریان روزانه مشاهده شده (مترمکعب در ثانیه)      | ۳۱۹۱     | بیرون زدگی سنگی                            |
| ماه حداکثر جریان سالانه مشاهده شده                     | اردیبهشت | کشاورزی                                    |
|                                                        |          | سایر کاربری ها شامل مناطق مسکونی و جاده ها |
|                                                        |          | آبندانها                                   |

### داده های مورد استفاده

در این تحقیق به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر حداکثر جریان روزانه حوزه آبخیز بختیاری از داده های بارش مربوط به ۱۶ ایستگاه هواشناسی منتخب در داخل و اطراف حوضه مورد مطالعه در طی سال های ۲۰۰۵-۱۹۶۱ و داده های دمای روزانه متعلق به ایستگاه تنگ پنج بختیاری استفاده شد. داده های مدل گردش عمومی canESM2 بر اساس گزارش پنجم IPCC تحت سناریوهای حدی RCP۲/۶ و RCP۸/۵ استفاده گردید. به منظور واسنجی و اعتباریابی مدل هیدرولوژیکی از داده های دبی مشاهده ای ایستگاه تنگ پنج بختیاری که در خروجی حوضه واقع شده در طول دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۶ استفاده شد.

### روش تحقیق

یکی از مهم ترین مراحل کار با داده های مدل های گردش عمومی مرحله ریزمقیاس نمایی است که در این مطالعه از روش آماری و به کمک نرم افزار SDSM مراحل شش گانه آن شامل کنترل کیفیت و تبدیل داده ها، انتخاب متغیرهای پیش بینی کننده غالب، واسنجی مدل، تولید داده های تاریخی و صحت سنجی مدل، تحلیل داده ها و تولید سناریوهای اقلیمی آینده انجام شد. در این مطالعه از خروجی های مدل canESM2 تحت سناریوهای RCP۲/۶ و RCP۸/۵ که به ترتیب حالت های خوش بینانه و بدبینانه وضعیت اقلیمی فرض

شده در دهه های آینده هستند استفاده شد. متغیرهای اقلیمی دما و بارش در دوره های ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ که با مدل SDSM ریزمقیاس نمایی شد مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب که پس از کنترل کیفی داده های دما و بارش در دوره پایه ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ با استفاده از پارامترهای ۲۶ گانه متغیرهای بزرگ مقیاس جوی داده های NCEP و برون داد مدل گردش عمومی جو و با توجه به میزان همبستگی متغیرهای پیش بینی کننده و پیش بینی شونده معیارهای مؤثر در ریزمقیاس نمایی مشخص شد. با توجه به اینکه خصوصیات پیش بینی کننده های مؤثر پایگاه NCEP در سلول های مختلف متفاوت است و ۱۶ ایستگاه باران سنجی منطقه مورد مطالعه نیز در سلول های یکسانی قرار ندارند، معیار مؤثر ریزمقیاس نمایی متناسب با سلولی که ایستگاه مربوطه در آن واقع شده است انتخاب شد. به این ترتیب که با استفاده از روش چندضلعی های تیسن مقادیر بارش متوسط منطقه ای برای ایستگاه های واقع در سلول های مشابه محاسبه و مراحل واسنجی و اعتباریابی انجام شد. پس از اعتباریابی مدل با استفاده از ۳۰ درصد داده های باقیمانده از مرحله واسنجی، داده های روزانه بارش و دما در دوره ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ و تحت دو سناریوی RCP۲/۶ و RCP۸/۵ شبیه سازی شد. در مرحله بعد داده های دما و بارش شبیه سازی شده در دوره آتی به تفکیک سناریوهای ذکر شده به عنوان ورودی به مدل هیدرولوژیکی که توسط پارامترهای

ورودی‌های مدل برای هر طبقه مطابق با روابط (۲ و ۳) محاسبه شد:

$$P_i(t) = p(t) \cdot \left(1 + \frac{gpz}{1000}\right) \cdot (z_i - \bar{z}) \quad (2)$$

$$T_i(t) = T(t) \cdot \left(1 + \frac{gtz}{100}\right) \cdot (z_i - \bar{z}) \quad (3)$$

که در آن gpz گرادیان بارش برحسب درصد در هر ۱۰۰۰ متر و gtz گرادیان دما برحسب سانتی‌گراد در هر ۱۰۰ متر تغییر ارتفاع و  $\bar{z}$  ارتفاع متوسط حوزه آبخیز است. ارزیابی مدل هیدرولوژیکی حاکی از کارایی آن در شبیه‌سازی جریان در مقابل جریان مشاهده شده است. در این تحقیق ارزیابی مدل با استفاده از ضریب کلاسیک نش- ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) و ضریب کلینگ-گوپتا (ling-Gupta) انجام شد. هر چه این ضرایب به یک نزدیک‌تر باشد به این معنی است که فرایند مدل‌سازی از کیفیت مناسبی برخوردار است (۱۲). این معیار مطابق معادله ۴ محاسبه شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (4)$$

که در آن  $Q_i$ : دبی حداکثر مشاهده‌شده،  $\hat{Q}_i$ : دبی حداکثر برآورد شده در دوره بازگشت  $N$ : تعداد مشاهدات یا برآوردها می‌باشد.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2} \quad (5)$$

که این ضریب توسط سه محتوای همبستگی، انحراف معیار و میانگین با توجه به موارد زیر تعریف می‌شود:

$$r = \frac{cov(X_{sim}, X_{obs})}{\sigma(X_{sim})\sigma(X_{obs})} \quad \beta = \frac{\mu(X_{sim})}{\mu(X_{obs})}$$

$$\gamma = \frac{\sigma(X_{sim})/\mu(X_{sim})}{\sigma(X_{obs})/\mu(X_{obs})}$$

که در آن  $cov(X_{sim}, X_{obs})$ : کوواریانس مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای متغیری است که ضریب کلینگ-گوپتا آن مدنظر است،  $\mu$  و  $\sigma$ : هم به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر مربوطه می‌باشد.

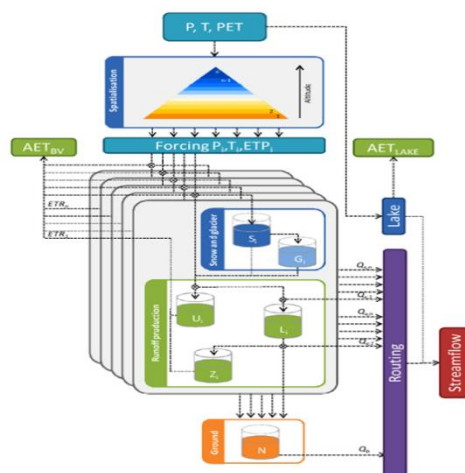
در مرحله آخر به منظور برآورد حداکثر دبی‌های روزانه در دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از یک رویکرد احتمالاتی و با توجه به الگوهای روزانه بارش، احتمالات تجمعی رویدادهای آن با استفاده از روش بوت استرپ ناپارامتری محاسبه شد. سپس با استفاده از توزیع احتمال پارامترهای بارش و مقادیر بارش پیشین، مقادیر حداکثر دبی‌های روزانه برای دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شد.

دوره پایه کالیبره و اعتبار سنجی شده است وارد شد. حوزه آبخیز بختیاری یک حوضه کوهستانی است و در بخش‌هایی از جنوب شرق با ارتفاعات استان چهارمحال و بختیاری بسته‌شده و دارای رژیم بارشی برفی- بارانی است. علاوه بر این مطابق جدول (۱) تغییرات ارتفاعی زیادی در این حوضه وجود دارد؛ بنابراین علاوه بر محاسبات مربوط به تجمع و ذوب برف، تقسیم حوضه به ۱۰ طبقه ارتفاعی با خصوصیات ویژه به‌طوری‌که هر طبقه بین پنج تا ۲۰ درصد مساحت کل حوضه را شامل می‌شود می‌تواند شبیه‌سازی شرایط ذوب برف را نیز مقدور سازد. تغییرات مکانی پارامترهای اقلیمی دما و بارش با استفاده از محاسبه گرادیان بارش و افتاهنگ دما در هر یک از ۱۰ طبقه ارتفاعی رویکردی برای پاسخ به تغییرپذیری پارامترهای اقلیمی دما و بارش و نقش آن‌ها در مدل‌سازی بارش-رواناب است.

مدل MORDOR-SD یک مدل نیمه توزیعی و مفهومی بارش-رواناب است. این مدل شبیه‌سازی پیوسته انجام می‌دهد و می‌تواند با فواصل زمانی ساعتی تا روزانه کار کند به همین دلیل به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی اثر تغییرات کاربری اراضی، تغییرپذیری پارامترهای اقلیمی و در حالت کلی توضیح هر چه دقیق‌تر و نزدیک به واقعیت تر سیستم هیدرولوژیک در نقاط مختلف دنیا در طی ۲۵ سال اخیر استفاده‌شده است (۹). ساختار کلی این مدل در شکل (۲) نشان داده شده است. در مرحله بعدی تحقیق، مدل هیدرولوژیکی با استفاده از داده‌های بارش، دما و دبی روزانه ایستگاه تنگ پنج بختیاری واسنجی و اعتباریابی شد. یک سال ابتدایی در فرایند واسنجی به‌عنوان دوره گرم کردن در نظر گرفته شد. واسنجی ۱۹ پارامتر مدل به‌صورت خودکار و به روش الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. این مدل برای زمانی که حوزه آبخیز به طبقات مختلف ارتفاعی تقسیم می‌شود دارای توضیحاتی به شرح زیر است: اگر هر طبقه  $i$  با استفاده از درصد مساحت نسبی  $S_i$  نمایش داده شود و میانه ارتفاع این طبقه برحسب متر  $z_i$  باشد، آنگاه:

$$\sum_{i=1}^{N_b} S_i = 1 \quad (1)$$

که در آن  $i$ : شاخص طبقه ارتفاعی و  $N_b$ : مجموع طبقات ارتفاعی خواهد بود. این مدل برای هر طبقه ارتفاعی  $i$  در هر گام زمانی  $t$  دارای ورودی‌هایی شامل بارش (میلی‌متر)، درجه حرارت (سانتی‌گراد) و تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر) است. در برخی موارد بارش منطقه‌ای  $P(t)$  درجه حرارت  $T(t)$  در دسترس است در این مورد با استفاده از گرادیان بارش و دما،



شکل ۲- ساختار کلی مدل هیدرولوژیکی موردور

Figure 2. General structure of MORDOR-SD hydrological model

## نتایج و بحث

نصف‌النهاری در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال و رطوبت نسبی در نزدیک سطح دارای اهمیت هستند.

نتایج مرحله واسنجی نشان می‌دهد که در هر دو سناریو معیارهای ارزیابی برآورد دما نسبت به بارش مقادیر قابل اطمینان‌تری را داراست و همبستگی بهتری با داده‌های مشاهده‌ای در مقایسه با داده‌های بارندگی دارد. پس از تعیین معیارهای پیش‌بینی‌کننده، واسنجی و اعتباریابی مدل SDSM مقادیر میانگین پارامترهای بارش و دما در دوره ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ تحت دو سناریوی RCP۲/۶ و RCP۸/۵ تولید شد که نتایج مربوط به آن در جدول (۲) آمده است.

میزان همبستگی متغیرهای پیش‌بینی کننده و پیش‌بینی شونده، تعیین‌کننده انتخاب معیار مؤثر در ریزمقیاس نمایی دما و بارش است. در این تحقیق پیش‌بینی کننده‌های مؤثر دما شامل میانگین فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت نسبی در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت ویژه در نزدیک سطح زمین و میانگین دما در ارتفاع دو متری است. در خصوص متغیرهای پیش‌بینی کننده بارش پارامترهای، مؤلفه سرعت نصف‌النهاری نزدیک سطح زمین، سرعت جریان هوا در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال، مؤلفه سرعت

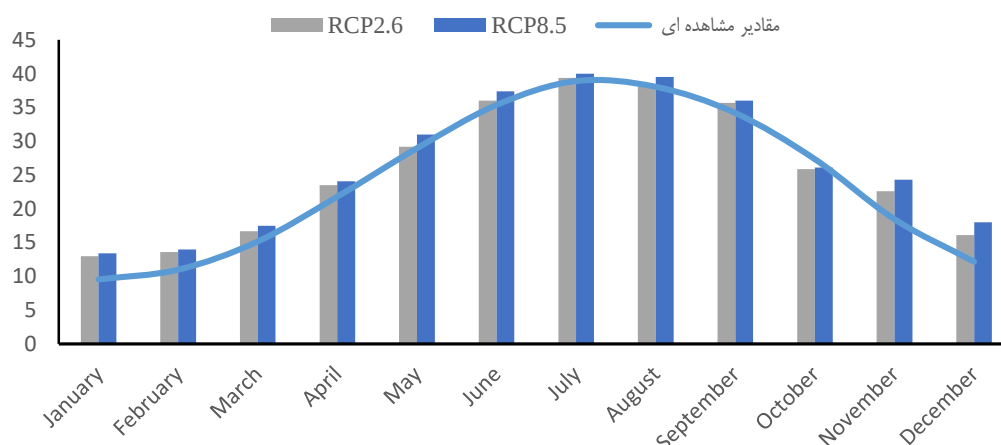
جدول ۲- مقادیر میانگین بارش و دما در دوره پایه و دوره آتی تحت دو سناریو

Table 2. Mean values of precipitation and temperature in the base period and the future period under two scenarios

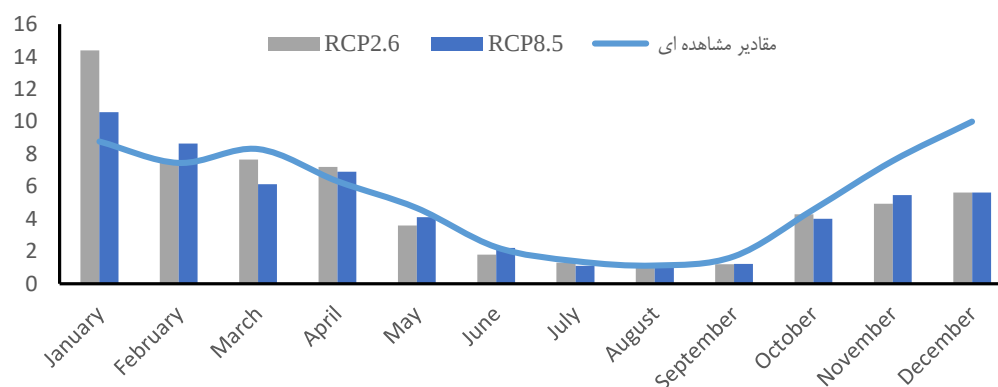
| تفاضل و نسبت با دوره پایه |         |           |         | دوره آینده ۲۰۰۶-۲۱۰۰ |         |         |         | دوره پایه   |         |              |         |
|---------------------------|---------|-----------|---------|----------------------|---------|---------|---------|-------------|---------|--------------|---------|
| تفاضل دما                 |         | نسبت بارش |         | دما                  |         | بارش    |         | میانگین دما |         | میانگین بارش |         |
| RCP 8.5                   | RCP 2.6 | RCP 8.5   | RCP 2.6 | RCP 8.5              | RCP 2.6 | RCP 8.5 | RCP 2.6 | RCP 8.5     | RCP 2.6 | RCP 8.5      | RCP 2.6 |
| ۳/۸۶                      | ۳/۴۶    | ۱/۲۱      | ۱/۶۴    | ۱۳/۴                 | ۱۳      | ۱۰/۵۸   | ۱۴/۳۹   | ۹/۵۳        | ۸/۷۶    | ۸/۷۶         | ۸/۷۶    |
| ۳/۰۲                      | ۲/۶۲    | ۱/۱۶      | ۱/۰۱    | ۱۴                   | ۱۳/۶    | ۸/۶۴    | ۷/۵۳    | ۱۰/۹۸       | ۷/۴۴    | ۷/۴۴         | ۷/۴۴    |
| ۲/۳۵                      | ۱/۵۵    | ۰/۷۴      | ۰/۹۲    | ۱۷/۵                 | ۱۶/۷    | ۶/۱۴    | ۷/۶۶    | ۱۵/۱۵       | ۸/۲۹    | ۸/۲۹         | ۸/۲۹    |
| ۲/۳۱                      | ۱/۷۱    | ۱/۰۹      | ۱/۱۴    | ۲۴/۱                 | ۲۳/۵    | ۶/۹     | ۷/۲۰    | ۲۱/۷۹       | ۶/۳۱    | ۶/۳۱         | ۶/۳۱    |
| ۲/۰۴                      | ۰/۲۴    | ۰/۸۸      | ۰/۷۷    | ۳۱                   | ۲۹/۲    | ۴/۱     | ۳/۶۰    | ۲۸/۹۶       | ۴/۶۶    | ۴/۶۶         | ۴/۶۶    |
| ۲/۰۳                      | ۰/۶۶    | ۰/۹۷      | ۰/۸     | ۳۷/۴                 | ۳۶/۳    | ۲/۲     | ۱/۸     | ۳۵/۳۶       | ۲/۲۶    | ۲/۲۶         | ۲/۲۶    |
| ۱/۱۱                      | ۰/۵     | ۰/۷۹      | ۰/۹۳    | ۴۰/۰۱                | ۳۹/۴    | ۱/۱     | ۱/۳۰    | ۳۸/۹        | ۱/۴     | ۱/۴          | ۱/۴     |
| ۱/۴۵                      | ۰/۰۵    | ۰/۸۹      | ۰/۹۷    | ۳۹/۵                 | ۳۸/۱    | ۱/۰۱    | ۱/۱۰    | ۳۸/۰۵       | ۱/۱۲    | ۱/۱۲         | ۱/۱۲    |
| ۱/۸۳                      | ۱/۵۳    | ۰/۷۳      | ۰/۷۱    | ۳۶                   | ۳۵/۷    | ۱/۲۳    | ۱/۲     | ۳۴/۱۷       | ۱/۶۹    | ۱/۶۹         | ۱/۶۹    |
| -۱/۲۰                     | -۱/۴۴   | ۰/۸۷      | ۰/۹۳    | ۲۶/۱۳                | ۲۵/۹    | ۴       | ۴/۲۷    | ۲۷/۳۳       | ۴/۵۷    | ۴/۵۷         | ۴/۵۷    |
| ۵/۸۵                      | ۴/۱۵    | ۰/۷۲      | ۰/۶۵    | ۲۴/۳                 | ۲۲/۶    | ۵/۴۶    | ۴/۹۴    | ۱۸/۴۴       | ۷/۵۷    | ۷/۵۷         | ۷/۵۷    |
| ۵/۸۴                      | ۳/۹۴    | ۰/۵۶      | ۰/۵۶    | ۱۸                   | ۱۶/۱    | ۵/۶۳    | ۵/۶۳    | ۱۲/۱۶       | ۹/۹۸    | ۹/۹۸         | ۹/۹۸    |

پایه افت محسوسی در دوره آتی خواهد داشت ولی دما در دو سناریوی موردبررسی در اغلب ماه‌ها نسبت به دوره پایه افزایش نشان داد که این افزایش در سناریوی RCP۸/۵ شدیدتر است. افزایش دما در ماه‌های نخستین بهار سبب ذوب ذخایر برف انباشته در حوضه و تجمع آن با بارش‌های فراگیر فصل بهار سبب افزایش خطر وقوع سیل‌های ناگهانی در منطقه خواهد شد که یکی دیگر از اثرات افزایش متوسط دما در دوره‌های آینده است.

جدول (۳) معیارهای ارزیابی میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب نش (NASH) را نشان می‌دهد که نتایج حاکی از کارایی بهتر مدل CanESM2 در برآورد دقیق‌تر داده‌های دما نسبت به بارش در دو سناریوی مذکور است. مطابق شکل‌های (۳ و ۴) نتایج نشان می‌دهد که بارش روند نامنظمی داشته ولی در برخی ماه‌ها بخصوص اوایل زمستان افزایش محسوس نسبت به دوره پایه دارد و در ماه‌های آخر فصل پاییز نسبت به دوره



شکل ۳- مقایسه متوسط دمای مشاهده شده و شبیه سازی شده در دوره آبی ایستگاه تنگ پنج بختیاری  
Figure 3. Comparison of the average temperature observed and simulated in the future period of Tang Panj Bakhtiary station



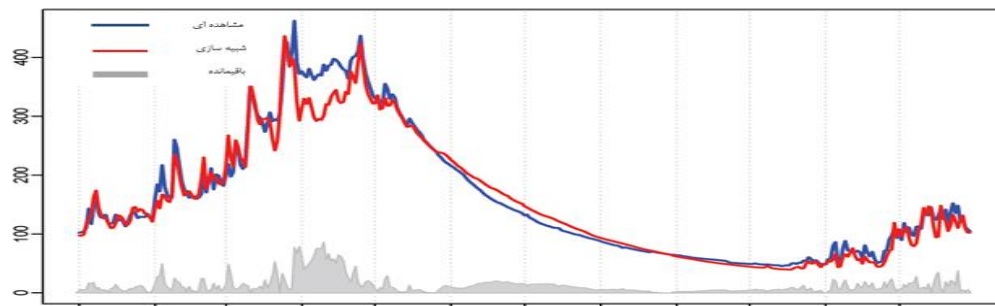
شکل ۴- مقایسه متوسط بارش مشاهده شده و شبیه سازی شده در دوره آبی ایستگاه تنگ پنج بختیاری  
Figure 4. Comparison of the average temperature observed and simulated in the future period of Tang Panj Bakhtiary station

جدول ۳- معیارهای ارزیابی کارایی مدل CanESM2

| دما     |         | بارش    |         | معیار ارزیابی |
|---------|---------|---------|---------|---------------|
| RCP 8.5 | RCP 2.6 | RCP 8.5 | RCP 2.6 |               |
| ۲/۷۳    | ۱/۸۱    | ۱/۱۹    | ۱/۳۹    | MAE           |
| ۳/۱۵    | ۲/۲۷    | ۱/۶۸    | ۲/۲۴    | RMSE          |
| ۰/۹     | ۰/۹۵    | ۰/۶۸    | ۰/۴۴    | NSE           |

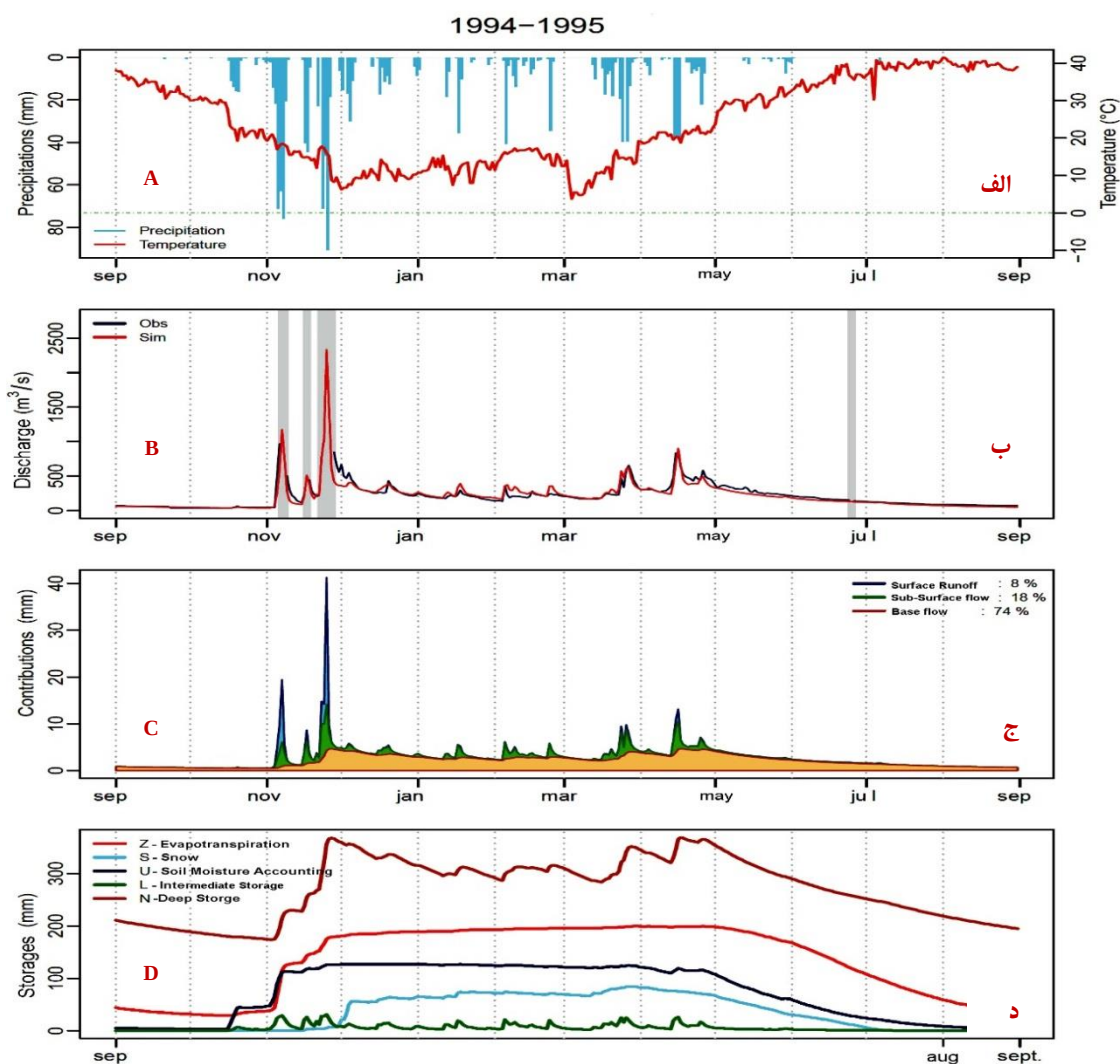
(۶) نتایج مقادیر جریان روزانه شبیه سازی شده را همراه با مقادیر بارش و دمای مشاهده شده، محتوای هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه شامل درصد مشارکت اجزای هیدرولوژیکی حوضه و میزان نگهداشت حوضه را در یک سال از فرایند مدل سازی در دوره اعتبار یابی نشان می دهد.

**نتایج مدل سازی هیدرولوژیکی**  
برای انتخاب مدلی که هم خوانی بیشتری با شرایط حوضه و هدف تحقیق داشته باشد اقدام به ارزیابی مدل هیدرولوژیکی MORDOR-SD شد. شکل (۵) نتایج شبیه سازی جریان متوسط ماهانه در دوره واسنجی مدل را نشان می دهد و شکل



شکل ۵- شبیه‌سازی جریان ماهانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی در طول دوره اعتبار سنجی مدل

Figure 5. Monthly flow simulation using the hydrological model during the model validation period



شکل ۶- مقادیر مشاهده‌شده بارش و دما (الف)، جریان روزانه شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده (ب)، سهم مشارکت رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و آب‌پایه در محتوای هیدرولوژیکی (ج) و میزان ذخایر حوضه (د) در یک سال از فرایند شبیه‌سازی در دوره اعتبار یابی مدل هیدرولوژیکی

Figure 6. Observed Temperature and Precipitation (A), Observed and Simulated Daily Flow (B), Contribution of Surface Runoff, Subsurface Flow and Base Flow to Hydrological Content (C) and Watershed Storages (D) in one year of the Simulation Process in Validation Period of the Hydrological Model

است که نشان از توانایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی در مقیاس روزانه و ماهانه است.

نتایج حاصل از اجرای مدل هیدرولوژیکی با توجه به معیارهای ارزیابی نش ساتکلیف و کلینگ گوپتا به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۸۳

سناریوی ۲/۶ نشان می‌دهد اما نسبت به داده‌های حداکثر جریان روزانه در دوره پایه تغییر قابل توجهی وجود ندارد. مقادیر حداکثر جریان روزانه در دوره پایه و نتایج حاصل از اجرای مدل با پارامترهای برآورد شده دوره آینده در جدول (۴) آورده شده است.

استفاده از مدل هیدرولوژیکی اعتبار یابی شده با ورودی‌های دما و بارش شبیه‌سازی شده در دوره ۲۱۰۰-۲۰۰۶ و مقایسه نتایج آن با مقادیر حداکثر جریان روزانه برآورد شده با استفاده از اطلاعات دوره پایه نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های سناریوی ۸/۵ در دوره بازگشت‌های مختلف، مقادیر بیشتری را نسبت به حداکثر جریان روزانه در

جدول ۴- حداکثر دبی‌های روزانه برآورد شده در دوره پایه و دوره آتی با توجه به سناریوهای ۲/۶ و ۸/۵ در دوره بازگشت‌های مختلف  
Table 4. Maximum daily discharges calculated in the base period and the future period according to the 2.6 and 8.5 scenarios in the different returns period

| متغیر          | حداکثر جریان روزانه (مترمکب در ثانیه) |           | دوره بازگشت |
|----------------|---------------------------------------|-----------|-------------|
|                | ۲۰۰۶-۲۱۰۰                             | ۲۰۰۶-۲۱۰۰ |             |
| دوره شبیه‌سازی | RCP 8.5                               | RCP 2.6   | دوره پایه   |
| ۱۰             | ۱۸۹۹                                  | ۱۷۷۴      | ۲۰۵۱        |
| ۲۰             | ۲۵۶۵                                  | ۲۴۲۹      | ۲۶۸۹        |
| ۵۰             | ۳۵۲۶                                  | ۳۳۷۶      | ۳۵۸۲        |
| ۱۰۰            | ۴۲۸۹                                  | ۴۱۲۵      | ۴۲۹۲        |
| ۳۰۰            | ۵۵۴۸                                  | ۵۳۸۲      | ۵۴۶۳        |
| ۱۰۰۰           | ۷۰۱۴                                  | ۶۸۳۹      | ۶۸۱۲        |

قابل قبول به دست آمده حاکی از این است که این مدل هیدرولوژیکی می‌تواند با استفاده از معادلات ساختاری خود متغیرهای مختلفی که مهم‌ترین آن‌ها تبخیر و تعرق و برف هستند را در شبیه‌سازی جریان لحاظ کند. یکی دیگر از مزیت‌های این مدل محاسبه اغلب پارامترها ساختاری به صورت مکانی است که این مدل را به یک مدل نیمه توزیعی تبدیل کرده است. نتایج شبیه‌سازی حداکثر جریان روزانه نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های سناریوی ۸/۵ در دوره بازگشت‌های مختلف، مقادیر بیشتری را نسبت به حداکثر جریان روزانه در سناریوی ۲/۶ نشان می‌دهد که یافته‌های اسدیه و همکاران (۲) و زمانی و همکاران (۳۰) نیز این نتایج را تأیید می‌کند.

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر حداکثر جریان روزانه در آینده بیشتر خواهد شد و خطر افزایش سیلاب بخصوص در زمستان بیشتر است. از دلایل آن می‌توان به افزایش بارش در اوایل زمستان اشاره کرد که عدم وجود پوشش گیاهی می‌تواند در تشدید سیل‌های مخرب نقش داشته باشد. از طرف دیگر کاهش مقادیر بارش و افزایش دما در فصل تابستان سیاست‌های بهره‌برداری و تخصیص منابع آب در حوزه آبخیز بختیاری را نیازمند بازنگری می‌داند. استان خوزستان به عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی در پایین دست این حوزه قرار دارد که این مطلب اعمال سیاست‌های تغییر الگوی کشت، کاهش تقاضا از طریق استفاده از روش‌های نوین آبیاری و حتی استفاده از آب‌های نامتعارف را توصیه می‌کند.

در این پژوهش به مدل سازی بارش-رواناب با هدف پیش بینی حداکثر جریان روزانه در شرایط تغییر اقلیم پرداخته شد. به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم از سناریوهای خوش بینانه و بدبینانه RCP با استفاده از مدل SDSM استفاده شد. نتایج مرحله واسنجی نشان می‌دهد که در هر دو سناریو معیارهای ارزیابی برآورد دما نسبت به بارش مقادیر قابل اطمینان تری را داراست و همبستگی بهتری با داده‌های مشاهده‌ای در مقایسه با داده‌های بارندگی دارد. این به دلیل تغییرپذیری کمتر دما نسبت به بارندگی است. با در نظر داشتن این مطلب که دما پارامتری با توزیع احتمالی نرمال و بارش یک متغیر گسسته است. این مساله مهم بایستی در توسعه مدل‌های اقلیمی آینده در نظر گرفته شود.

نتایج شبیه‌سازی بارش و دما در دوره ۲۱۰۰-۲۰۰۶ روند نامنظم بارش تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه را نشان داد در صورتی که دما در دو سناریوی مورد بررسی بخصوص در سناریوی بدبینانه مقادیر بیشتری را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که می‌تواند به دلیل افزایش واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای تا میزان ۸/۵ وات بر مترمربع تا سال ۲۱۰۰ میلادی ناشی از فرضیات این سناریو برای دوره آینده باشد، این موضوع با نتایج زبردست و همکاران (۲۹) در حوضه نکا رود و پورتویسرکانی و همکاران (۲۲) در حوضه راهدار فارس همخوانی دارد.

به منظور مد سازی جریان نیز از مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی MORDOR-SD که به صورت پیوسته فرایند شبیه‌سازی را انجام می‌دهد استفاده شد که معیارهای ارزیابی

## منابع

- Allan, R.P. and B.J. Soden. 2008. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. Science, 321(5895): 1481-1484.
- Asadieh, B. and N.Y. Krakauer. 2015. Global trends in extreme precipitation: Climate models versus observations. Hydrology and Earth System Sciences, 19(2): 877-891.
- Asadieh, B., N.Y. Krakauer and B.M. Fekete. 2016. Historical trends in mean and extreme runoff and streamflow based on observations and climate models. Water (Switzerland), 8(5).
- Baghbanan, P., A. Ahmad Abadi and A. Karimi. 2021. Investigating the effect of climate change on hydrological changes in Hablehrood catchment. Climate Change Research, 2(5): 27-40.

5. Bauwens, A., C. Sohler- and A. Degré. 2013. Impacts of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Meuse catchment. A review. *Impacts Du Changement Climatique Sur l'hydrologie et La Gestion Des Ressources En Eau Du Bassin de La Meuse (Synthèse Bibliographique)*, 17(1): 76-86.
6. Bermúdez, M., J.F. Farfán, P. Willems and L. Cea. 2021. Assessing the Effects of Climate Change on Compound Flooding in Coastal River Areas. *Water Resources Research*, 57(10): 1-19.
7. Curry, J. 2011. IPCC special reports on extreme events. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
8. Dibike, Y.B. and P. Coulibaly. 2005. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 307(1-4): 145-163.
9. Garavaglia, F., M. Le Lay, F. Gottardi, R. Garçon, J. Gailhard, E. Paquet, and T. Mathevet. 2017. Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: From a lumped to a semi-distributed approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8): 3937-3952.
10. Greve, P., B. Orlowsky, B. Mueller, J. Sheffield, M. Reichstein and S. I. Seneviratne. 2014. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, 7(10): 716-721.
11. Griggs, D.J. and M. Noguer. 2002. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Weather*, 57(8): 267-269.
12. Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz and G.F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80-91.
13. Hassan, Z., S. Shamsudin and S. Harun. (n.d.). Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature.
14. Hemmati, L., and M. Miryaghoubzadeh. 2021. Forecasting of Climate Variables in Future Periods Based on HadCM3 Data using Statistical Downscaling Model (SDSM) in Agh-Chay Basin (West Azarbaijan) *Jwmr*, 12(23): 95-107.
15. Kavian, A., M. Namdar, M. Golshan and M. Bahri. 2017. Hydrological modeling of Climate Changes Impact on flow discharge in Haraz River Basin. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(12): 89-104.
16. Kharin, V.V., F.W. Zwiers, X. Zhang and M. Wehner. 2013. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119(2): 345-357.
17. Khazaei, M.R., Hadis Khazaei and Bahram Saghafeian. 2020. Climate Change Impact on Extreme Rainfalls in Arid Region of Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(9): 31-42.
18. Lehmann, J., D. Coumou and K. Frieler. 2015. Increased record-breaking precipitation events under global warming. *Climatic Change*, 132(4): 501-515.
19. Lei, H., D. Yang and M. Huang. 2014. Impacts of climate change and vegetation dynamics on runoff in the mountainous region of the Haihe River basin in the past five decades. *Journal of Hydrology*, 511: 786-799.
20. Min, S.K., X. Zhang, F.W. Zwiers and G.C. Hegerl. 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470(7334): 378-381.
21. Parandin, F., A. Khorani and O. Bazrafshan. 2019. The Impacts of Climate Change on Maximum Daily Discharge in the Payab Jamash Watershed , Iran, 1035-1045.
22. Pourtouserkani, A. and G. Rakhshandehroo. 2014. Investigating climate change impact on extreme rainfall Events Case study: Chenar-Rahdar basin, Fars, Iran. *Scientia Iranica*, 21(3): 525-533.
23. Stout, G.E. 1990. Climate and water. *Eos, Transactions American Geophysical Union* (Vol. 71).
24. Toreti, A., P. Naveau, M. Zampieri, A. Schindler, E. Scoccimarro, E. Xoplaki, H.A. Dijkstra, S. Gualdi and J. Luterbacher. 2013. Projections of global changes in precipitation extremes from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 models. *Geophysical Research Letters*, 40(18): 4887-4892.
25. Vicente-Serrano, S.M., R. García-Herrera, D. Peña-Angulo, M. Tomas-Burguera, F. Domínguez-Castro, I. Noguera, N. Calvo, C. Murphy, R. Nieto, L. Gimeno, J.M. Gutierrez, C. Azorin-Molina and A. El Kenawy. 2021. Do CMIP models capture long-term observed annual precipitation trends? *Climate Dynamics*, (0123456789).
26. Wentz, F.J., L. Ricciardulli, K. Hilburn and C. Mears. 2007. How much more rain will global warming bring? *Science*, 317(5835): 233-235.
27. Wilby, R.L. 2007. Seasonal Forecasting of River Flows in the British Isles Using North Atlantic Pressure Patterns. *Water and Environment Journal*, 15(1): 56-63.
28. Wu, C.H., G.R. Huang and H.J. Yu. 2015. Prediction of extreme floods based on CMIP5 climate models: A case study in the Beijiang River basin, South China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3): 1385-1399.
29. Zabardast Rostami, H.A., M. Raeini Sarjaz and M.A. Gholami Sefidkouhi. 2021. Assessment of Climate Change Effects on River Flow of Gelevard Dam Basin. *Jwmr*, 12(24): 205-216.
30. Zamani, R. 2019. Assessment of Climate Change impacts on Runoff under Different Level of Probabilistic with Uncertainty Approach (Case Study: Zard River Basin). *Irrigation Sciences and Engineering*.
31. Zhang, X., F.W. Zwiers, G.C. Hegerl, F.H. Lambert, N.P. Gillett, S. Solomon, P.A. Stott and T. Nozawa. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448(7152): 461-465.

## Rainfall-Runoff Modeling to Predict Maximum Daily Flow under Climate Change Conditions

Mohammad Bashir Gonbad

Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Malayer University,  
(Corresponding author: mbgonbad@ut.ac.ir)

Received: 26 February, 2022 Accepted: 21 May, 2022

### Extended Abstract

**Introduction and Objective:** One of the most important challenges in recent years is the issue of climate change and its effects on water resources, which is considered one of the main areas of research around the world. Two obvious signs of climate change are changes in the mean and extreme values of climate variables that can increase the Probability of flood occurrence. Therefore, it is necessary to study the effect of climate change on floods in the future.

**Material and Methods:** In this study, using the observed daily data of precipitation and temperature in the period 1961-2005 synoptic and climatological stations inside and around the Bakhtiary catchment, the effect of climate change was investigated. To predict future precipitation and temperature, the data of the canESM2 general circulation model under RC 2.6 and RCP 8.5 scenarios for climate variables for the period 2006 to 2100 were used. The effective criteria in downscaling were selected according to the correlation between the predictor and predictands variables from the NCEP-NCAR reanalysis database. Then the MORDOR-SD semi-distributed models were used to evaluate the effects of climate change on runoff. This model was calibrated and validated using daily rainfall, temperature, and observation data at Tang-e-Panj Bakhtiary station for the period 1976-2006. Applying the results of changes in precipitation and temperature data obtained from the SDSM model under the two scenarios mentioned and reproducing them in large numbers by nonparametric bootstrap method and replacing the resulting maximum daily events in the hydrological model to achieve maximum daily flood and probability made it possible. At the end of the simulation and calculation of the cumulative distribution function (CDF) of the simulated events, the maximum daily discharge values in different return periods were calculated.

**Results:** The results showed that, temperature and precipitation parameters under RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios with average evaluation criteria MAE = 1.29, RMSE = 1.96 and NASH = 0.56 for precipitation decreased by an average of 5.4 to 11% compared to the base period for temperature with evaluation criteria of MAE= 2.27, RMSE= 2.71 and NASH 0.92 = from 6.5 to 10.4% increase compared to the base period. The results of the Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta evaluation criteria are 0.76 and 0.83, respectively, which shows the acceptable ability of the hydrological model in the simulation. The results of the study showed that the maximum daily discharges simulated using scenario 8.5 in different return periods show higher values than the maximum daily discharges in scenario 2.6 but there is no significant change compared to the maximum daily data in the base period.

**Conclusion:** In general, it can be said that the use of climate data in the future for planning in the field of integrated water resources management and prevention of natural hazards such as extreme floods and droughts can be a useful tool for planning managers.

**Keywords:** Climate change, Downscaling, Canesm2 model, MORDOR-SD hydrological model