

## ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی رواناب‌های بیشینه حوضه توسط شبیه‌سازی پیوسته جریان

محمد رضا خزائی<sup>\*۱</sup>

### چکیده

در این پژوهش، اثر تغییر اقلیم بر رواناب‌های بیشینه روزانه یکی از زیر حوضه‌های کارون ارزیابی شد. بدین منظور، فرایند بارش- رواناب پیوسته روزانه حوضه توسط مدل ARNO شبیه‌سازی شد. رویکردهای بزرگ مقیاس GCM، به روش عامل تغییرات برای حوضه ریزمقیاس شدند. با ورود سری‌های اقلیمی حال و رویکردهای آینده به مدل بارش- رواناب، جریان روزانه اقلیم حال و آینده شبیه‌سازی شد. بر جریان‌های بیشینه سالانه تولید شده اقلیم فعلی و اقلیم تغییر یافته آینده، توزیع گامبل برازش و با مقایسه توزیع فراوانی سیلاب‌های روزانه حداکثر سالانه اقلیم حال و اقلیم آتی، اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌ها ارزیابی شده است. شاخص‌های ضریب بازده و ضریب تعیین در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل بارش- رواناب، بیش از ۰/۸ به دست آمده و در جریان شبیه‌سازی شده جریان‌های حداکثر به خوبی تولید شد. نتایج نشان داد که با وجود عدم قطعیت رویکردهای انتشار، تحت همه رویکردهای انتشار مورد بررسی، اندازه سیلاب‌ها در اقلیم آینده نسبت به اقلیم فعلی به میزان قابل توجه بزرگ‌تر می‌شوند؛ بنابراین باید در طرح‌های آبی جدید، به اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌ها توجه شود.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر اقلیم، جریان روزانه، سیلاب، عامل تغییرات، مدل بارش- رواناب.

ارجاع: خزائی م. ر. ۱۳۹۷. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی رواناب‌های بیشینه حوضه توسط شبیه‌سازی پیوسته جریان. مجله پژوهش آب ایران. ۱۰۱-۹۳: ۲۸.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، ایران.

\* نویسنده مسئول: [m\\_r\\_khazaei@yahoo.com](mailto:m_r_khazaei@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۲

## مقدمه

تغییر اقلیم موجب تغییر متغیرهای اقلیمی از جمله بارش و دما می‌شود و در نتیجه آن، هنجار و روش جریان رودخانه‌ها و در نتیجه فراوانی وقوع و شدت سیلاب‌ها نیز در آینده تغییر می‌کند (کمال و مساح بوانی، ۱۳۹۰)؛ بنابراین برای برآورد احتمال وقوع و شدت سیلاب‌های آینده، باید آثار تغییر اقلیم بر آن‌ها ارزیابی شود. با توجه به آنکه با تغییر رژیم هنجار سیلاب، فرض ایستایی که مبنای روش‌های سنتی تحلیل فراوانی سیل است، نقض می‌شود، این روش‌ها برای تحلیل فراوانی سیل‌های اقلیم تغییر یافته آینده کفایت ندارند (تیگواراپو، ۲۰۱۲) و باید از روش‌هایی استفاده شود که در آنها اثر تغییر اقلیم در نظر گرفته می‌شود.

با وجود این‌که بارها ادعا شده که یکی از آثار بالقوه تغییر اقلیم، تغییر خطر سیل است؛ لیکن در مطالعات اندکی مستقیماً به این موضوع پرداخته شده است (APCC، ۲۰۰۱؛ پرودهوم و همکاران، ۲۰۰۳ و خزائی و همکاران، ۲۰۱۲). در گذشته مطالعات زیادی به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب پرداختند. مطالعه تغییر در رواناب سالانه یا ماهانه برای برنامه‌ریزی‌های دراز مدت منابع آب مهم است؛ اما چنین مطالعه‌ای، اطلاعات بسیار اندکی در خصوص تغییر در هنجار سیلاب‌ها در اختیار می‌گذارد. بررسی رواناب ماهانه و سالانه، می‌تواند توسط مدل‌های ساده ماهانه انجام شود؛ با این حال برای مدل‌سازی صحیح هنجار سیلاب، باید فرایند بارش - رواناب حوضه در مقیاس روزانه یا ساعتی به صورت پیوسته شبیه‌سازی شود و همچنین سیلاب‌ها نیز به خوبی شبیه‌سازی شوند (پرودهوم و همکاران، ۲۰۰۲؛ خزائی و همکاران، ۲۰۱۲).

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب شامل دو مرحله کلی است: اول فراهم کردن داده‌های مناسب اقلیمی برای وضعیت اقلیم تغییر یافته آینده و دوم شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب حوضه. پس از فراهم شدن داده‌های مناسب اقلیمی برای اقلیم حال و رویکردهای آینده، از این داده‌ها به عنوان ورودی‌های مدل بارش - رواناب استفاده می‌شود و جریان حال و محتمل آینده شبیه‌سازی می‌شود. البته باید مدل بارش - رواناب، ابتدا برای حوضه واسنجی و اعتبارسنجی شد، سپس با مقایسه ویژگی‌های جریان‌های آینده و حال، می‌توان آثار محتمل تغییر اقلیم را بر سیلاب‌ها در حوضه ارزیابی کرد.

در خصوص مدل‌سازی بارش - رواناب، انتخاب نوع مدل اهمیت دارد. در یک تقسیم‌بندی ساده، مدل‌ها می‌توانند از ۱- تک‌واقعه‌ای<sup>۱</sup> و یا ۲- پیوسته<sup>۲</sup> باشند. مدل‌های تک‌واقعه‌ای برای شبیه‌سازی سیلاب‌ها با استفاده از وقایع منفرد بارش طراحی شده‌اند؛ به عبارت دیگر هدف مدل‌های تک‌واقعه‌ای برآورد رواناب مستقیم است. در طراحی این نوع مدل‌ها، انتقال رطوبت بین دو واقعه بارش منفرد در نظر گرفته نمی‌شود (پونس، ۱۹۸۹)؛ در نتیجه در این مدل‌ها وضعیت اولیه رطوبت خاک که معمولاً نقش مهمی در محاسبه سیلاب دارد، شبیه‌سازی نمی‌شود و برای هر واقعه باید به عنوان یک پارامتر ورودی در نظر گرفته شود. در روش‌های سنتی شبیه‌سازی سیل توسط مدل‌های تک‌واقعه‌ای، از تغییر اقلیم صرف‌نظر شده و وضعیت اولیه رطوبت خاک از وضعیت اولیه سیلاب‌های تاریخی تخمین زده می‌شود. اما معلوم نبودن وضعیت رطوبت خاک در اقلیم تغییر یافته آینده، موجب محدودیت استفاده از این مدل‌ها برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب در وضعیت آینده می‌شود؛ با این حال به دلیل سادگی استفاده، تعدادی از پژوهشگران از جمله روی و همکاران (۲۰۰۱) و موزیک و همکاران (۲۰۰۲)، در مطالعه اثر تغییر اقلیم بر سیلاب، از این نوع مدل‌ها استفاده کردند.

در مدل‌های پیوسته همه مؤلفه‌های جریان شامل جریان سطحی، جریان بین لایه‌ای و جریان آب‌های زیر زمینی به صورت صریح محاسبه می‌شوند. این نوع مدل‌ها، جریان طولانی مدت هیدرولوژیکی چه در مدت بارش و چه در زمان‌های بدون بارش شبیه‌سازی می‌شود. در نتیجه در هنگام وقوع بارش، رطوبت اولیه خاک معلوم است (پونس، ۱۹۸۹). به این ترتیب با وجود دشواری استفاده از این نوع مدل‌ها در مطالعات اثر تغییر اقلیم بر سیلاب، باید از مدل‌های پیوسته استفاده شود (رینارد و همکاران، ۲۰۰۳). لوکاس و همکاران (۲۰۰۲)، رینارد و همکاران (۲۰۰۳)، پرودهوم و همکاران (۲۰۰۳)، کی و همکاران (۲۰۰۶ a, b)، و لیندر و همکاران (۲۰۰۷)، مارثویل و همکاران (۲۰۰۷)، کی و همکاران (۲۰۰۹) در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب از مدل‌های پیوسته استفاده کردند. مرحله دیگر چنین مطالعاتی، فراهم کردن داده‌های

اقلیمی را مطابق با رویکردهای GCM تغییر می‌دهد و رویکردهای آینده را تولید می‌کند. اگرچه نادیده گرفتن تغییر در نوسانات اقلیمی از موارد ضعف این روش است (فولر و همکاران، ۲۰۰۷)، علت انتخاب این روش اغلب سادگی استفاده، سادگی دسترسی به داده‌های اقلیمی مورد نیاز و حفظ همبستگی بین متغیرها و ایستگاه‌های مختلف حوضه در ریزمقیاس نمایی است.

در این مقاله، اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی رواناب‌های بیشینه روزانه یک حوضه آبریز در جنوب‌غربی ایران ارزیابی شده است. بدین منظور، جریان رودخانه توسط یک مدل مفهومی پیوسته روزانه به خوبی شبیه‌سازی شد؛ به گونه‌ای که هیدروگراف شبیه‌سازی شده، به ویژه در سیلاب‌ها، مطابقت خوبی با جریان مشاهداتی داشت. برای ارزیابی عدم قطعیت رویکردهای انتشار، از سه رویکرد A1B، A2 و B1 که دامنه ۸۰ درصدی رویکردهای انتشار را دربر می‌گیرند، استفاده شد. خروجی‌های مدل CGCM3 برای دوره آینده ۲۰۹۳-۲۰۶۷ برای حوضه ریزمقیاس شده و با ورود این رویکردها به مدل پیوسته بارش- رواناب، سری جریان روزانه برای هر یک از رویکردهای انتشار در دوره آینده (۲۰۹۳-۲۰۶۷) شبیه‌سازی شده و اثر تغییر اقلیم بر رواناب‌های بیشینه روزانه ارزیابی شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه پژوهش و داده‌ها

حوضه مورد مطالعه حوضه پاتاوه از زیرحوضه‌های مهم کارون با مساحت  $280 \text{ km}^2$  است. از ۲۷ سال داده‌های بارش روزانه، دمای حداقل و حداکثر روزانه ایستگاه یاسوج که حدوداً در مرکز حوضه واقع است و ۸ سال داده‌های با کیفیت جریان روزانه ایستگاه آب‌سنجی خروجی حوضه استفاده شد. داده‌های ۸ ساله جریان و داده‌های هم دوره بارش و دمای حوضه، به دو دوره مجزا تقسیم شد که یک دوره ۴ ساله برای واسنجی مدل بارش- رواناب و از دوره ۴ ساله دیگر برای اعتبارسنجی آن استفاده شد. استفاده از ۲ تا ۳ سال داده برای واسنجی مدل ARNO کافی است (تودینی، ۱۹۹۶).

برای پیش‌یابی وضعیت اقلیمی آینده از رویکردهای اقلیمی A1B، A2، و B1 مدل جهانی اقلیم CGCM3 برای سلول مربوط به حوضه استفاده شد. رویکردهای A2،

مناسب اقلیم آینده است. در حال حاضر معتبرترین وسیله شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی آینده، مدل‌های گردش عمومی (GCM<sup>۱</sup>) هستند (آی‌پی‌سی‌سی، ۲۰۰۱). البته به دلیل وضوح<sup>۲</sup> مکانی و زمانی کم خروجی GCMs، استفاده مستقیم از آن‌ها برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب مناسب نیست. برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌ها به روش شبیه‌سازی پیوسته جریان، باید خروجی GCMs ریزمقیاس شود و سری‌های داده‌های اقلیمی آینده با گام زمانی کوتاه مدت و در مقیاس حوضه آبریز فراهم شود (پرادهوم و همکاران، ۲۰۰۲). در این باره باید داده‌های دما و داده‌های بارش به عنوان ورودی‌های مدل بارش- رواناب ریزمقیاس شوند و مهم است که همبستگی بین این متغیرها پس از کاهش مقیاس حفظ شود. بیشتر روش‌های کاهش مقیاس، متغیرها را به صورت تک به تک ریزمقیاس می‌کنند و همبستگی بین آن‌ها را در نظر نمی‌گیرند. در میان روش‌های ریزمقیاس نمایی، روش‌های مولدهای استوکستیک داده‌های هواشناسی<sup>۳</sup> (WG)، RCMs<sup>۴</sup> و عامل تغییرات (CFs<sup>۵</sup>)، همبستگی متغیرها را در کاهش مقیاس حفظ می‌کنند (فولر و همکاران، ۲۰۰۷).

ضعف WG<sup>s</sup> در شبیه‌سازی صحیح بارش‌های حدی موجب محدودیت استفاده از این نوع مدل‌ها در مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب شده است (آی‌پی‌سی‌سی، ۲۰۰۱؛ سربکاندان و مکماهون، ۲۰۰۱؛ کیلسی و همکاران، ۲۰۰۷؛ کارون و همکاران، ۲۰۰۸). RCMs نیز علاوه بر محدودیت در شبیه‌سازی صحیح بارش‌های حدی و الگوهای زمانی و مکانی بارش (کیلسی و همکاران، ۲۰۰۷)، از نظر محاسباتی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است و خروجی‌های آن‌ها معمولاً در مواقع لزوم در دسترس نیست (پرادهوم و همکاران، ۲۰۰۳؛ فولر و همکاران، ۲۰۰۷)؛ در نتیجه در اغلب مطالعاتی که در آنها اثر تغییر اقلیم بر سیلاب ارزیابی، از روش عامل تغییرات استفاده شده است؛ از جمله می‌توان به مطالعات رینارد و همکاران (۲۰۰۱)، لوکاس و همکاران، (۲۰۰۲)، پرادهوم و همکاران (۲۰۰۳)، مارنویل و همکاران (۲۰۰۷) و کی و همکاران (۲۰۰۹) اشاره کرد. این روش میانگین‌های متغیرهای

1- General Circulation Model

2- Resolution

3- Weather Generators

4- Regional Climate Models

5- Change Factors

آینده مدل GCM است و  $T_j^{B,GCM}$  میانگین دمای ماه‌های j-ام مدل GCM در دوره پایه است.

### شبیه‌سازی بارش - رواناب

جریان روزانه رودخانه توسط مدل مفهومی پیوسته ARNO شبیه‌سازی شده است. ساختار و مؤلفه‌های اصلی این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل دارای دو مؤلفه جدا از هم است: مؤلفه بیلان آبی یا تابع تولید رواناب که تعادل آبی را بین مقدار آب در خاک، ریزش (ورودی آب)، تبخیر و تعرق و رواناب (خروجی آب) تشریح می‌کند و مؤلفه روندیابی که انتقال رواناب را به خروجی حوضه مدل می‌کند (شکل ۱). این مدل دارای ۸ پارامتر اصلی است که مقادیر آن‌ها از طریق واسنجی مدل توسط یک ابزار واسنجی خودکار به روش الگوریتم ژنتیک به دست آمده است (جدول ۱). داده‌های مورد نیاز مدل شامل سری‌های روزانه بارش، دما، تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه و مشخصات حوضه از جمله مساحت، کاربری اراضی و شیب متوسط است. جزئیات بیشتر را درباره این مدل، تودینی (۱۹۹۶) و خزائی و همکاران (۲۰۱۴) ارائه کرده‌اند. این مدل به صورت گسترده و با موفقیت در مطالعاتی همچون برنامه‌ریزی آب، تحلیل جریان‌های کم، تحلیل سیل‌های حدی، پیش‌بینی زمان واقعی سیل و مطالعات ارزیابی آثار تغییر اقلیم در مناطق مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است (ابدولا و همکاران، ۱۹۹۹؛ تودینی، ۱۹۹۶؛ فولر و همکاران، ۲۰۰۷).

برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص بازده<sup>۱</sup> (EC)، مربع ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌ها استفاده شده است. از این شاخص‌ها پژوهشگران زیادی استفاده کرده‌اند (خزائی و همکاران، ۲۰۱۴). راثو و هان (۱۹۸۷) و سروات و دزیتز (۱۹۹۱)، شاخص بازده را به عنوان بهترین معیار برای واسنجی مدل بارش رواناب معرفی کردند. EC و  $R^2$  به ترتیب در معادلات (۳) و (۴) تعریف می‌شوند:

$$EC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - Q_{Si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - \bar{Q}_O)^2} \quad (3)$$

A1B، و B1 به ترتیب نشان‌دهنده حالات غلظت زیاد، غلظت متوسط و غلظت کم گازهای گلخانه‌ای هستند و تقریباً در موقعیت‌های میانه و حدود ۸۰ درصد بالا و پایین رویکردهای انتشار قرار دارند و مبنای اجرای مدل CGCM3 بوده‌اند. رویکردهای مورد استفاده مربوط به دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۴ و دوره آینده ۹۳-۲۰۶۷ است.

### ریز‌مقیاس‌نمایی رویکردهای اقلیمی

خروجی‌های بزرگ مقیاس مدل GCM، به روش عامل تغییرات برای حوضه ریزمقیاس شده‌اند. از مزایای استفاده از این روش، حفظ همبستگی سری‌های اقلیمی در ریزمقیاس‌نمایی است. علاوه بر آن در این روش، برای ریزمقیاس‌نمایی سری‌های روزانه نیاز به رویکردهای اقلیمی روزانه نیست و از خروجی‌های ماهانه مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود که بیشتر در دسترس است. در این روش، عامل تغییرات تفاوت یا نسبت میانگین بین خروجی‌های GCM برای دوره کنترل و دوره آینده برای هر یک از ماه‌های سال محاسبه و سپس این مقادیر به هر داده روزانه سری مشاهداتی، وابسته به آنکه در کدام ماه سال قرار دارد، به صورت جمع یا ضرب اعمال می‌شود. به این ترتیب رویکردهای اقلیم آینده تولید می‌شوند. در این روش برای ریزمقیاس‌نمایی و تولید رویکردهای آینده بارش و دمای روزانه به ترتیب از معادلات (۱) و (۲) استفاده می‌شود:

$$P_{i,j}^F = \frac{P_j^{F,GCM}}{P_j^{B,GCM}} \times P_{i,j}^O \quad (1)$$

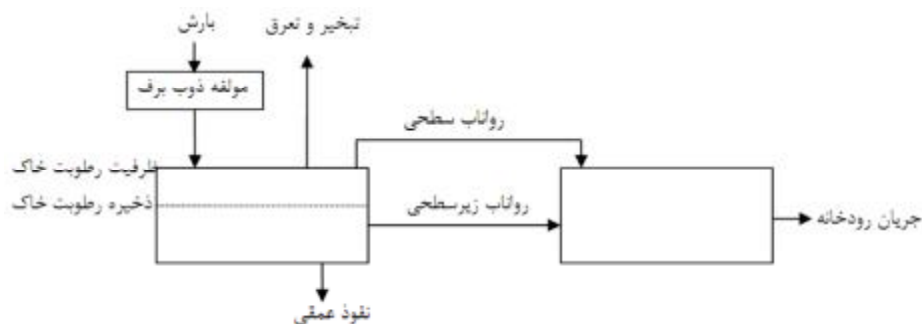
$$T_{i,j}^F = T_j^{F,GCM} - T_j^{B,GCM} + T_{i,j}^O \quad (2)$$

که در آن،  $P_{i,j}^F$  بارش روز i-ام از سری بارش رویکردی اقلیم آینده است که در ماه j از ماه‌های سال قرار دارد.  $P_{i,j}^O$  بارش روز i-ام از سری بارش مشاهداتی ثبت شده است که در ماه j از ماه‌های سال قرار دارد.  $P_j^{F,GCM}$  میانگین بارش ماه‌های ز رویکردی بارش آینده مدل GCM است و  $P_j^{B,GCM}$  میانگین بارش ماه‌های j-ام سری بارش مدل GCM در دوره پایه است.  $T_{i,j}^F$  دمای روز i-ام از سری دمای رویکردی اقلیم آینده است که در ماه j از ماه‌های سال قرار دارد.  $T_{i,j}^O$  دمای روز i-ام از سری دمای مشاهداتی ثبت شده است که در ماه j از ماه‌های سال قرار دارد.  $T_j^{F,GCM}$  میانگین دمای ماه‌های ز رویکردی دمای

جریان مشاهداتی و جریان شبیه‌سازی شده هستند. تغییرات این شاخص از  $-\infty$  تا  $+1$  بوده و هرچه شبیه‌سازی بهتر انجام گرفته باشد، مقدار آن به  $+1$  نزدیک‌تر است.

$$R^2 = \frac{(\sum(Q_{O_i} - \bar{Q}_O)(Q_{S_i} - \bar{Q}_S))^2}{\sum(Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2 \sum(Q_{S_i} - \bar{Q}_S)^2} \quad (4)$$

که در آن  $Q_{O_i}$  جریان مشاهداتی روز  $i$ -ام،  $Q_{S_i}$  جریان شبیه‌سازی شده روز  $i$ -ام و  $\bar{Q}_O$  و  $\bar{Q}_S$  به ترتیب میانگین



شکل ۱- نمایش کلی مؤلفه‌های مدل ARNO

جدول ۱- پارامترهای مدل ARNO

پارامتر	توصیف پارامتر
Is	حداکثر مقدار نفوذ عمقی
Wi	مقدار آستانه‌ای رطوبت خاک در فرایند نفوذ عمقی
c	توان در رابطه زهکشی
Wd	نسبتی از حداکثر زهکشی در حالتی که مقدار رطوبت خاک در یک حد آستانه‌ای است.
Dmin	پارامتر آستانه‌ای رطوبت خاک در فرایند زهکشی
Dmax	حداکثر مقدار زهکشی
b	ضریب شکل در منحنی سطح اشباع که مبین درجه همگنی مشخصات خاک است.
Wm	ظرفیت متوسط ذخیره رطوبت در خاک

## ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌ها

با ورود داده‌های بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل برای وضعیت فعلی و برای هر یک از رویکردهای آینده به مدل بارش-روناب، سری‌های جریان روزانه برای دوره‌ی حال و آینده شبیه‌سازی شده است. با استفاده از سری‌های ۲۷ ساله جریان شبیه‌سازی شده، توزیع فراوانی جریان‌های حداکثر سالانه برای وضعیت حال و هر یک از رویکردهای آینده استخراج و سپس با مقایسه توزیع فراوانی جریان‌های حداکثر رویکردهای آینده با توزیع فراوانی جریان‌های حداکثر اقلیم فعلی، اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌های روزانه، تحت هر یک از رویکردهای انتشار ارزیابی شد.

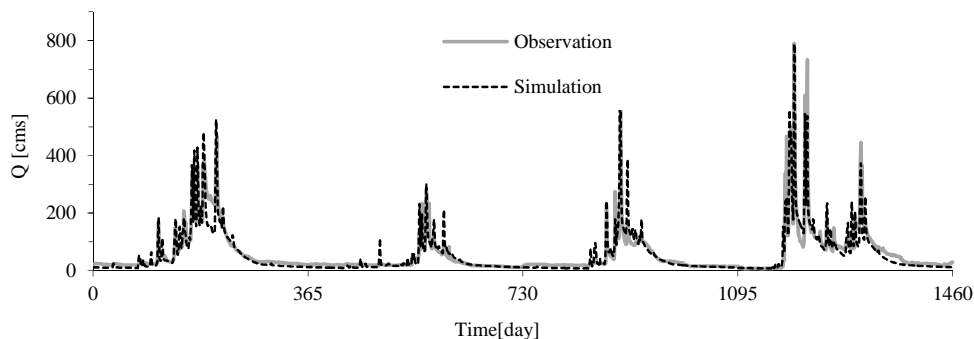
## نتایج و بحث

### شبیه‌سازی جریان روزانه

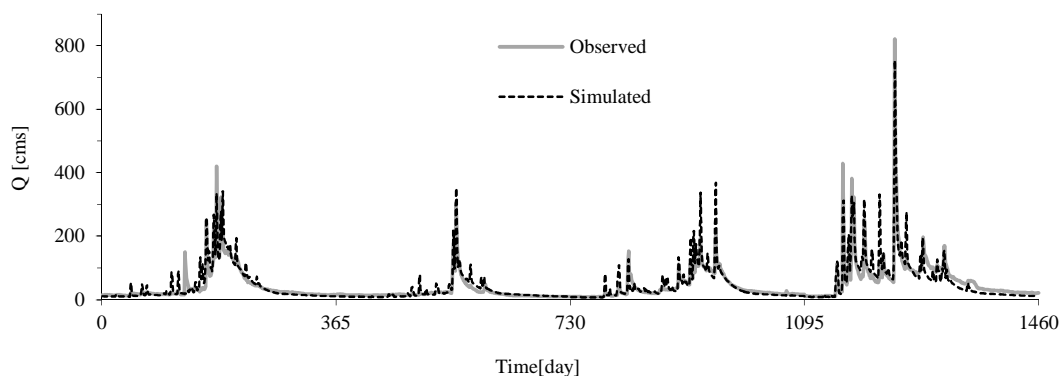
در نتیجه شبیه‌سازی، مقادیر شاخص بازده و ضریب تعیین روزانه به ترتیب  $0.87$  و  $0.85$  برای مرحله واسنجی به دست آمد. همچنین مقادیر شاخص بازده و ضریب تعیین روزانه در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب  $0.83$  و  $0.88$  بود. با توجه به اینکه اغلب، مقدار شاخص بازده قابل قبول برای تأیید عملکرد مدل‌های روزانه بارش-روناب، مقادیر بزرگ‌تر از  $0.7$  (کمالی و همکاران ۲۰۰۷) و  $0.6$  (ژانگ و ساوانایچ، ۲۰۰۵) عنوان شده و دامنه این شاخص بین منفی بی‌نهایت و  $1$  است؛ بنابراین عملکرد مدل بارش-روناب در شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه خوب ارزیابی شد. در مقایسه مقادیر حداکثر سالانه، میانگین مقادیر مشاهداتی به مقدار  $5$  درصد از میانگین مقادیر شبیه‌سازی

موفقیت شبیه‌سازی جریان حوضه است (شکل‌های ۲ و ۳). همچنین جریان‌های بیشینه به‌خوبی شبیه‌سازی شده و عملکرد مدل هم در سال‌های خشک و هم در سال‌های پرآب قابل قبول بود. مقادیر بهینه پارامترهای مدل ARNO در جدول ۲ ارائه شده است.

شده بیشتر است و ضریب  $R^2$  بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره ۸ ساله واسنجی و اعتبارسنجی برابر ۰/۹۰ است. علاوه بر این، تطابق هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی، در همه قسمت‌های هیدروگراف حاکی از



شکل ۲- نتایج واسنجی مدل بارش - رواناب



شکل ۳- نتایج اعتبارسنجی مدل بارش - رواناب

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترهای مدل ARNO در حوضه مورد مطالعه

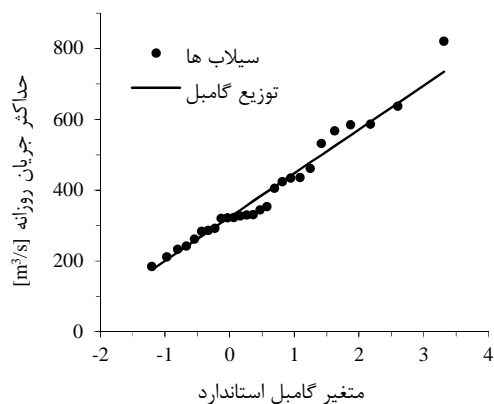
Wm	b	Dmax	Dmin	Wd	c	Is	Wi	پارامتر
mm	-	mm/day	mm/day	mm	-	mm/day	mm	واحد
۵۵۸/۱	۰/۳۱	۹/۲۵	۲/۴۲	۱۵۳/۴	۲/۷۵	۱/۹	۱۷/۶۵	مقدار بهینه

ایستگاه سینوپتیک یاسوج (واقع در مجاورت حوضه) با روش پنمن-مانتیس واسنجی شده بود (خزائی و همکاران، ۲۰۱۴).

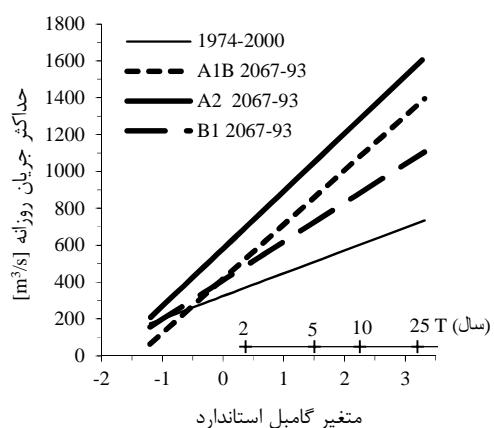
برای هر سری جریان روزانه، مقادیر حداکثر سالانه (سیلاب‌های حداکثر) استخراج و توزیع گامبل بر آنها برازش داده شد. در شکل ۴ برازش توزیع گامبل بر سیلاب‌های دوره تاریخی به‌عنوان نمونه نشان داده شده است. توزیع مقادیر سیلاب حوضه به‌خوبی در شیب و انحنا از توزیع گامبل برازش شده تبعیت می‌کند و

### ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌ها

رویکردهای تغییر اقلیم با استفاده از روش CFs ریزمقیاس و با استفاده از آن‌ها به‌عنوان ورودی مدل بارش-رواناب، سری ۲۷ ساله جریان روزانه برای وضعیت اقلیم حال (دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۴) و هر یک از رویکردهای اقلیم آینده (دوره ۲۰۹۳-۲۰۶۷) تولید شد. تبخیر و تعرق پتانسیل مورد نیاز را برای اجرای مدل ARNO، روش هارگریوز-سامانی تولید کردند. داده‌های مورد نیاز این روش دمای حداقل و حداکثر است. روش هارگریوز-سامانی قبلاً در



شکل ۴- برازش توزیع گامبل بر سیلاب‌های دوره ۱۹۷۴-۲۰۰۰



شکل ۵- اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی سیلاب‌ها

پراکندگی داده‌های حول توزیع گامبل می‌تواند طبیعتاً به علت عدم قطعیت کوتاهی طول دوره آماری باشد. با مقایسه توزیع فراوانی سیلاب‌های اقلیم آینده با توزیع فراوانی اقلیم تاریخی، اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌های حوضه پاتاوه ارزیابی شد. در شکل ۵ اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌های حوضه پاتاوه تحت رویکردهای انتشار مختلف نشان داده شده است. در این شکل، توزیع فراوانی سیلاب‌ها برای رویکردهای A1B، A2 و B1 خروجی مدل CGCM3 برای دوره آینده (دوره ۲۰۶۷-۲۰۹۳ یا دوره ۲۰۸۰-۲۰۰۰) با توزیع فراوانی سیلاب‌های تاریخی (دوره ۱۹۷۴) مقایسه شده است. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه بزرگی سیلاب‌ها در اقلیم آینده است که بیشترین افزایش مربوط به رویکردی A2 و کمترین آن مربوط به رویکردی B1 است. مقادیر سیلاب‌های تاریخی و آینده تحت رویکردهای A2، B1، و A1B و همچنین درصد تغییرات بزرگی سیلاب‌ها برای دوره بازگشت‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که بزرگی سیلاب‌ها تحت همه رویکردها افزایش قابل توجه داشتند؛ برای نمونه بزرگی سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰ سال تحت رویکردهای B1، A1B و A2، به ترتیب به مقدار ۴۷، ۸۰ و ۱۱۳ درصد افزایش یافت. همچنین انتظار می‌رود تحت این رویکردها، بزرگی سیلاب‌های ۲۵ ساله بین ۵۰ تا ۱۲۰ درصد افزایش یابد و از ۷۲۰ مترمکعب بر ثانیه در اقلیم فعلی به مقداری بین ۱۰۸۰ تا ۱۵۸۰ مترمکعب بر ثانیه در دوره ۲۰۸۰ برسد. این نتایج لزوم توجه به اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌ها را در طرح‌های آبی جدید این حوضه و به‌ویژه در خصوص سازه‌های بزرگ رودخانه‌ای آن، نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقدار سیلاب‌ها و درصد تغییرات آینده نسبت به دوره تاریخی

درصد تغییرات سیلاب‌های آینده نسبت به دوره تاریخی			مقادیر سیلاب‌های آینده (m <sup>3</sup> /s)			سیلاب‌های تاریخی (m <sup>3</sup> /s)	دوره بازگشت (سال)
A2	B1	A1B	A2	B1	A1B		
۸۸	۳۲	۴۲	۶۹۶	۴۸۷	۵۲۶	۳۶۹	۲
۱۱۳	۴۷	۸۰	۱۲۸۴	۸۸۳	۱۰۸۰	۶۰۲	۱۰
۱۲۰	۵۰	۸۹	۱۵۸۰	۱۰۸۰	۱۳۶۰	۷۲۰	۲۵
۱۲۶	۵۴	۹۹	۲۰۱۸	۱۳۷۷	۱۷۷۳	۸۹۳	۱۰۰
۱۲۸	۵۶	۱۰۲	۲۲۳۵	۱۵۲۴	۱۹۷۸	۹۷۹	۲۰۰

## نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر تغییر اقلیم بر رواناب‌های بیشینه روزانه در حوضه پاتاوه از زیرحوضه‌های مهم کارون ارزیابی شد. در این باره، جریان روزانه حوضه با مدل پیوسته ARNO که به خوبی برای حوضه واسنجی و اعتبارسنجی شده است، شبیه‌سازی شد. شاخص‌های ضریب بازده و ضریب تعیین در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی بیش از ۰/۸ به دست آمد و در جریان شبیه‌سازی شده، جریان‌های حداکثر به خوبی شبیه‌سازی و رویکردهای آینده مدل جهانی اقلیم CGCM3 به روش عامل تغییرات برای حوضه ریز مقیاس شد. با ورود این رویکردها به مدل بارش-رواناب، جریان روزانه حوضه برای رویکردهای آینده شبیه‌سازی شد. بر توزیع فراوانی سیلاب‌های اقلیم فعلی و اقلیم آینده، توزیع احتمالات گامبل که برازش خوبی داشت، برازش شد و با مقایسه توزیع فراوانی سیلاب‌های اقلیم حال و رویکردهای اقلیم تغییر یافته آینده (دوره ۲۰۸۰)، اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌های حوضه ارزیابی شد. بر اساس نتایج، تحت هر سه رویکردی انتشار A2، A1B و B1 بزرگی سیلاب‌های حوضه پاتاوه در آینده افزایش قابل توجه خواهد داشت. بر این مبنای انتظار می‌رود سیلاب ۲۵ ساله بین ۵۰ تا ۱۲۰ درصد افزایش یابد و از ۷۲۰ مترمکعب بر ثانیه در اقلیم فعلی به مقداری بین ۱۰۸۰ تا ۱۵۸۰ مترمکعب بر ثانیه در اقلیم آینده (۲۰۸۰) برسد. همچنین پیش‌یابی می‌شود اندازه سیلاب ۱۰۰ ساله اقلیم آینده (دوره ۲۰۸۰) نسبت به اقلیم فعلی، بین ۵۴ تا ۱۲۶ درصد افزایش داشته باشد. بر مبنای یافته‌های این پژوهش، ضروری است به اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌های آینده در طرح‌های آبی جدید و به ویژه در طراحی سازه‌های بزرگ رودخانه‌ای کارون توجه قرار شود.

## منابع

۱. کمال ع. و مساح بوانی ع. ۱۳۹۰. ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های AOGCM-AR4 و مدل‌های هیدرولوژی در تخمین دما، بارش و رواناب حوضه قره سو تحت تأثیر تغییر اقلیم. پژوهش آب ایران. ۵(۹): ۳۹-۵۰.
۲. Abdulla F. A. Lettenmaier D. P. and Liang Xu. 1999. Estimation of the ARNO model baseflow parameters using daily streamflow data. Journal of Hydrology. 222: 37-54.
3. Caron A. Leconte R. and Brissette F. 2008. An Improved Stochastic Weather Generator for Hydrological Impact Studies. Canadian Water Resources Journal. 33: 233-255.
4. Fowler H. J. Blenkinsop S. and Tebaldi C. 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. International Journal of Climatology. 27: 1547-1578.
5. IPCC. 2001. Climate change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press. 1032 p.
6. Kamali M. Ponnambalam K. and Soulis E. D. 2007. Computationally efficient calibration of WATCLASS hydrologic models using surrogate optimization. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 4: 2307-2321.
7. Kay A. L. Davies H. N. Bell V. A. and Jones R. G. 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. Climatic Change. 92: 41-63.
8. Kay A. L. Jones R. G. and Reynard N. S. 2006a. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. Journal of Hydrology. 318: 163-172.
9. Kay A. L. Reynard N. S. and Jones R. G. 2006b. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and validation. Journal of Hydrology. 318: 151-162.
10. Khazaei M. R. Zahabiyoun B. and Saghafian B. 2012. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. International Journal of Climatology. 32: 1997-2006.
11. Khazaei M. R. Zahabiyoun B. and Saghafian B. 2014. Development of an automatic calibration tool using genetic algorithm for the ARNO conceptual rainfall-runoff model, The Arabian Journal for Science and Engineering. 39: 2535-2549.
12. Kilsby C. G. Jones P. D. Burton A. Ford A. C. Fowler H. J. Harpham C. James P. Smith A. and Wilby R. L. 2007. A daily weather generator for use in climate change studies. Environmental Modelling and Software. 22: 1705-1719.
13. Leander R. and Buishand T. A. 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. Journal of Hydrology. 332(3-4): 487-496.
14. Loukas A. Vasilades L. and Dalezios N. R.



- Cambridge University Press, UK, London, 285 p.
27. Todini E. 1996. The ARNO rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*. 175: 339-382.
  28. Zhang G. P. and Savenije H. H. G. 2005. Rainfall-runoff modelling in a catchment with a complex groundwater flow system: application of the Representative Elementary Watershed (REW) approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 9: 243-261.
  2002. Potential climate change impacts on flood producing mechanisms in southern British Columbia, Canada using the CGCMA1 simulation results. *Journal of Hydrology*. 259: 163-188.
  15. Mareuil A. Leconte R. Brissette F. and Minville M. 2007. Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Chateauguay River basin, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 34: 1048-1060.
  16. Muzik I. 2002. A first-order analysis of the climate change effect on flood frequencies in a subalpine watershed by means of a hydrological rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*. 267: 65-73
  17. Ponce V. M. 1989. *Engineering hydrology: principles and practices*, Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall. 640 p.
  18. Prudhomme C. Jakob D. and Svensson C. 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of Hydrology*. 277: 1-23.
  19. Prudhomme C. Reynard N. and Crooks S. 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes*. 16: 1137-1150.
  20. Rao A. R. and Han J. 1987. Analysis of objective functions used in urban runoff models. *Advances in Water Resources*. 10: 205-211.
  21. Reynard N. S. Crooks S. M. Prudhomme C. Svensson C. and Kay. A. L. 2003. Impact of climate change on flood flows in river catchments. Interim report for Defra/ EA project W5-032. 49 p.
  22. Reynard N. S. Prudhomme C. and Crooks S. M. 2001. The flood characteristics of large UK Rivers: Potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*. 48: 343-359.
  23. Roy L. Leconte R. Brissette F. P. and Marche C. 2001. The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River Basin. *Hydrological Processes*. 15: 3167-3179.
  24. Servat E. and Dezetter A. 1991. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Sciences Journal*. 36(4/8): 307-330.
  25. Srikanthan R. and McMahon T. A. 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. *Hydrology and Earth System Sciences*. 5: 653-670.
  26. Teegavarapu RSV. 2012. Floods in Changing Climate: Extreme Precipitation,

