

## مقایسه رویکردهای مختلف تفکیک آثار انسانی و اقلیمی بر تغییرات جریان حوضه‌های آبخیز

حامد احمدی<sup>۱</sup> و مجید دلاور<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲. استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۵/۳۱)

### چکیده

نوسانات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر منابع آب هستند و طی چند دهه گذشته، سهم زیادی در تغییرات جریان رودخانه‌ها داشته‌اند. بنابراین، بررسی سهم هر یک از این دو عامل در تغییرات جریان رودخانه می‌تواند به مدیریت منابع آب منطقه‌ای در سیاست‌گذاری و توسعه راهبردهای سازگار کمک کند. به منظور تعیین سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه، رویکردهای مختلفی وجود دارند که هر یک از این رویکردها دارای فرضیات و منابع عدم قطعیت مخصوص به خود در تعیین سهم هر یک از عوامل هستند. بر این اساس، در مطالعه حاضر با استفاده از سه رویکرد مرسوم مدل‌سازی داده‌محور، آماری و تحلیلی، سهم آثار انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان حوضه آبخیز سد کرخه و چهار زیرحوضه اصلی آن طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ به دست آمد و دامنه تغییرات نتایج و حساسیت و اطمینان‌پذیری آنها بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده حساسیت رویکردهای یادشده به طول دوره آماری و وقایع حدی موجود در آن و همچنین دامنه عدم قطعیت زیاد نتایج آنها در نسبت‌دهی سهم فعالیت‌های انسانی و نوسانات اقلیمی در کاهش جریان رودخانه است. به گونه‌ای که سهم فعالیت‌های انسانی در کاهش جریان رودخانه با توجه به این سه رویکرد در کل حوضه، حدود ۶۰ تا ۸۳ درصد و سهم نوسانات اقلیمی حدود ۱۷ تا ۴۰ درصد در دوره یادشده است.

**کلیدواژگان:** الاستیسیته اقلیمی، حوضه کرخه، شبکه عصبی مصنوعی، فعالیت‌های انسانی، نوسانات اقلیمی.

## مقدمه

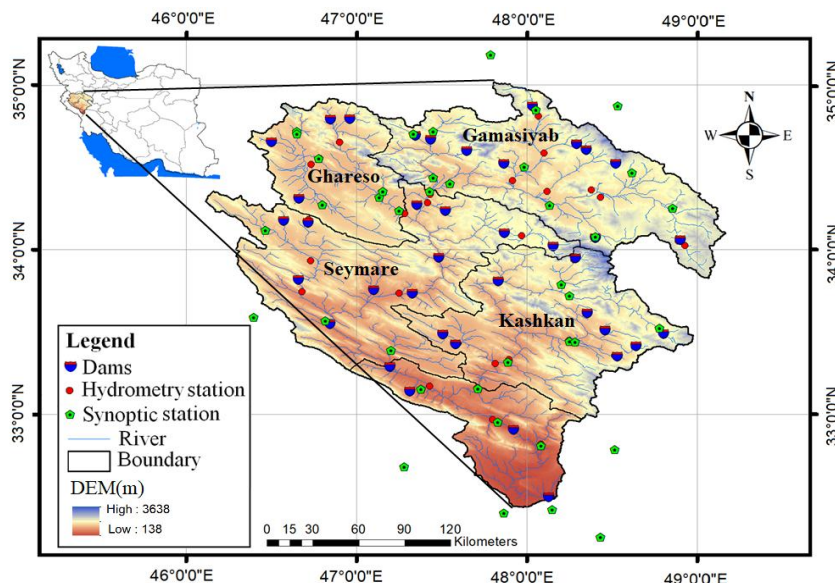
نوسانات اقلیمی از جمله عوامل تأثیرگذار بر جریان رودخانه‌هاست و می‌تواند جریان خروجی در حوضه آبخیز را تحت تأثیر خود قرار دهد [۱ و ۲]. در کنار عوامل اقلیمی، فعالیت‌های انسانی نیز می‌تواند سبب ایجاد تغییراتی در جریان رودخانه‌ها شود. برخی فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری اراضی، تأثیر غیرمستقیمی روی جریان رودخانه دارند و در بلندمدت تغییراتی را روی آن ایجاد می‌کنند و برخی دیگر مانند احداث سد به صورت مستقیم جریان رودخانه را تحت تأثیر قرار داده و در کوتاه‌مدت آن را تغییر می‌دهند [۳]. به طور مسلم، تغییرات جریان‌ات رودخانه‌ها بر الگوی مصرف آب در بخش‌های مختلفی مانند کشاورزی، شهری، صنعت، تولید برق آبی و ناوبری تأثیر درخور توجهی می‌گذارد. بنابراین، تعیین سهم آثار عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات جریان رودخانه، برای سیاستگذاران و تصمیم‌گیران بسیار اهمیت دارد و می‌تواند در برنامه‌ریزی برای استفاده از اراضی و مدیریت منابع آب استفاده شود [۴]. برای تعیین سهم عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه روش‌های مختلفی وجود دارد که این روش‌ها با توجه به فرضیات و روابط حاکم بر آنها در دسته‌های آماری (مانند روش‌های میزان تغییر شیب مقدار تجمعی و رگرسیون)، تحلیلی (مانند روش الاستیسیته اقلیمی) و مدل‌سازی قرار می‌گیرند [۴]. تا کنون محققان مختلفی از این روش‌ها برای تفکیک آثار انسانی و اقلیمی استفاده کرده‌اند. برای مثال، Wang [۵]، Kong [۶] و Huang [۷] سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه را با استفاده از روش میزان تغییر شیب مقدار تجمعی بررسی کردند. همچنین، Liu [۸]، Tang [۹] و Yan [۱۰] سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه را با استفاده از رویکرد مدل‌سازی حوضه بررسی کردند. به همین ترتیب، Chang [۱۱]، Tsai [۱۲] و Li [۱۳] سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه را با استفاده از روش الاستیسیته اقلیمی بررسی کردند. در مطالعات دیگری Wang [۲] و Xin [۱۴] نیز روش الاستیسیته اقلیمی را به عنوان روشی کارا برای تفکیک عوامل اقلیمی و انسانی بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز در شرایط کمبود داده‌های مرتبط با فعالیت‌های انسانی به کار گرفتند. با توجه به اینکه هر یک از این روش‌ها فرضیات و منابع عدم قطعیت

مختلفی در تعیین سهم هر یک از عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات جریان رودخانه‌ها دارند، استفاده از چندین روش به جای استفاده از یک روش می‌تواند نتایج دقیق‌تری از مقدار تأثیر هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه ارائه دهد. طی سال‌های اخیر، هر چند برخی محققان از چند روش به صورت هم‌زمان برای تفکیک آثار انسانی و اقلیمی استفاده کرده‌اند، اما با این وجود تمامی روش‌های یادشده در یک رویکرد قرار گرفته و اختلاف بین رویکردهای مختلف در برآورد نتایج بررسی نشده است. با توجه به موارد گفته‌شده، هدف از مطالعه حاضر، تعیین سهم عوامل انسانی و اقلیمی در کاهش جریان رودخانه در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و چهار زیرحوضه اصلی آن یعنی کشکان، سیمره، گاماسیاب و قره‌سو با استفاده از سه رویکرد مدل‌سازی، آماری و تحلیلی طی دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ و مقایسه و تحلیل حساسیت و عدم قطعیت نتایج به‌دست‌آمده از این سه رویکرد در تعیین سهم هر یک از عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات جریان رودخانه است.

## روش تحقیق

## منطقه مطالعاتی و داده‌ها

حوضه آبخیز رودخانه بالادست سد کرخه در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته‌کوه‌های زاگرس قرار گرفته و از چهار زیرحوضه اصلی کشکان، سیمره، گاماسیاب و قره‌سو تشکیل شده است. این حوضه آبخیز از نظر مختصات جغرافیایی بین  $۴۶^{\circ} ۶'$  تا  $۴۹^{\circ} ۱۰'$  درجه طول شرقی و  $۳۰^{\circ} ۵۸'$  تا  $۳۵^{\circ} ۴'$  درجه عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت این حوضه برابر ۴۲۲۶۷ کیلومترمربع است که حدود ۵۵/۵ درصد آن در مناطق کوهستانی و حدود ۴۴/۵ درصد آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل می‌دهند. به منظور انجام تحلیل‌های لازم در مطالعه حاضر، برای برآورد بارش و دما به ترتیب داده‌های روزانه ۳۹ و ۱۲ ایستگاه هواشناسی و برای بررسی روند جریان رودخانه، اطلاعات ۳۰ ایستگاه هیدرومتری طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ در حوضه آبریز بالادست سد کرخه استفاده شد. برای برآورد سهم هر یک از عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات جریان رودخانه نیز، در کل حوضه از اطلاعات ایستگاه هیدرومتری جلوگیری و برای هر یک از زیرحوضه‌های کشکان، سیمره، گاماسیاب و قره‌سو



شکل ۱. نقشه محدوده مطالعاتی

استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی)، آماری (با استفاده از روش میزان تغییر شیب مقدار تجمعی) و تحلیلی (با استفاده از روش الاستیسیته اقلیمی) سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه بررسی شد. در هر سه رویکرد، سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان برآورد می‌شود و سپس با توجه به اینکه کل تغییرات جریان رودخانه ناشی از نوسانات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است، سهم فعالیت‌های انسانی از اختلاف بین کل تغییرات جریان رودخانه و سهم نوسانات اقلیمی در این تغییرات برآورد می‌شود. روش‌شناسی هر یک از رویکردهای یادشده در این قسمت بررسی شده است.

#### رویکرد مدل‌سازی

در رویکرد مدل‌سازی، تعیین سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی بر مبنای شبیه‌سازی تغییرات جریان رودخانه تحت تأثیر نوسانات اقلیمی استوار است. در واقع، با استفاده از مدل‌سازی، جریان رودخانه به گونه‌ای شبیه‌سازی می‌شود که تنها عامل تأثیرگذار بر جریان رودخانه نوسانات اقلیمی بوده و فعالیت‌های انسانی تأثیر چندانی بر تغییرات جریان رودخانه نداشته باشد. به این ترتیب، سهم آثار نوسانات اقلیمی بر تغییرات جریان رودخانه با استفاده از مدل‌سازی برآورد می‌شود. کل تغییرات جریان رودخانه در شرایط طبیعی، ناشی از نوسانات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است. به این ترتیب،

به ترتیب از اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری پل دختر، نظرآباد، پل چهر و قورباغستان استفاده شد. موقعیت حوضه آبخیز، زیرحوضه‌های آن و ایستگاه‌های یادشده در شکل ۱ آمده است. از جمله موارد مهم در تفکیک آثار انسانی و اقلیمی، برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق واقعی در سطح حوضه است. به این منظور، در مطالعه حاضر تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش پنمن-مانتیث<sup>۱</sup> و با توجه به اطلاعات منطقه‌ای برآورد شد. تبخیر و تعرق واقعی نیز با استفاده از مدل SWAT ساخته‌شده توسط دلاور و همکارانش به دست آمد [۱۵].

#### آزمون‌های آماری

از موارد مهم در تعیین سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه، شناسایی نقطه تغییر در جریان رودخانه و همچنین بررسی روند تغییرات بارش، دما و جریان رودخانه است [۱۶]. به این منظور، در مطالعه حاضر از آزمون پتیت<sup>۲</sup> [۱۷] برای شناسایی نقطه تغییر در جریان رودخانه و از آزمون غیر پارامتری من-کندال<sup>۳</sup> [۱۸]، برای بررسی روند تغییرات بارش، دما و جریان رودخانه استفاده شده است.

تفکیک آثار انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه در مطالعه حاضر با استفاده از سه رویکرد مدل‌سازی (با

1. Penman-Monteith  
2. Pettitt  
3. Mann-Kendall

$$\Delta Q_c = \bar{Q}_b^{obs} - \bar{Q}_{ca} \quad (3)$$

$$\eta_c = \frac{\Delta Q_c}{\Delta Q} \times 100 \quad (4)$$

$$\eta_h = \frac{\Delta Q_h}{\Delta Q} \times 100 \quad (5)$$

که در رابطه ۱، مقادیر  $\Delta Q$ ،  $\bar{Q}_a^{obs}$  و  $\bar{Q}_b^{obs}$  به ترتیب کل تغییرات جریان رودخانه، میانگین جریان رودخانه در دوره بعد از نقطه تغییر و میانگین جریان رودخانه در دوره قبل از نقطه تغییر در شرایط طبیعی‌اند. در رابطه ۲،  $\Delta Q_c$  و  $\Delta Q_h$  به ترتیب سهم نوسانات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات جریان رودخانه (برحسب مترمکعب بر ثانیه) هستند. در رابطه ۳،  $\bar{Q}_{ca}$  میانگین جریان رودخانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی در دوره بعد از نقطه تغییر (برحسب مترمکعب بر ثانیه) است که فقط تحت تأثیر نوسانات اقلیمی قرار گرفته و فعالیت‌های انسانی بر آن تأثیری نداشته است. در رابطه ۴،  $\eta_c$  سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان (برحسب درصد) بوده و در رابطه ۵،  $\eta_h$  سهم فعالیت‌های انسانی در تغییرات جریان (برحسب درصد) است.

میزان تغییر شیب مقدار تجمعی<sup>۲</sup> (رویکرد آماری) یکی دیگر از روش‌های کمی به منظور تعیین سهم فعالیت‌های انسانی و نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه، روش میزان تغییر شیب مقدار تجمعی است [۵]. در این روش ابتدا میزان تغییر شیب جریان تجمعی رودخانه ( $R_{SQ}$  برحسب درصد)، میزان تغییر شیب تجمعی بارش ( $R_{SP}$  برحسب درصد) و میزان تغییر شیب تجمعی تبخیر و تعرق پتانسیل ( $R_{SPET}$  برحسب درصد) با استفاده از روابط ۶-۸ به دست می‌آیند:

$$R_{SQ} = 100 \times (S_{Q,a} - S_{Q,b}) / S_{Q,b} \quad (6)$$

$$R_{SP} = 100 \times (S_{P,a} - S_{P,b}) / S_{P,b} \quad (7)$$

$$R_{SPET} = 100 \times (S_{PET,a} - S_{PET,b}) / S_{PET,b} \quad (8)$$

که در این روابط،  $S_{Q,a}$  و  $S_{Q,b}$  به ترتیب شیب رگرسیون

با برآورد سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه، سهم فعالیت‌های انسانی از اختلاف بین کل تغییرات جریان رودخانه در شرایط طبیعی و سهم نوسانات اقلیمی در این تغییرات، برآورد می‌شود.

به منظور تفکیک آثار انسانی و اقلیمی در این روش، پس از شناسایی نقطه تغییر در جریان رودخانه، جریان رودخانه به دو دوره قبل و بعد از نقطه تغییر تقسیم می‌شود [۱۰]. در دوره قبل از نقطه تغییر با توجه به اینکه جریان رودخانه دچار تغییرات معناداری نشده است، فرض می‌شود که نوسانات اقلیمی تنها عامل تأثیرگذار بر جریان رودخانه بوده است و فعالیت‌های انسانی در این دوره تأثیری بر جریان رودخانه ندارد (بررسی اطلاعات منطقه‌ای نیز نشان دهنده صحیح بودن این فرض در منطقه مطالعه شده است، به گونه‌ای که بیشتر فعالیت‌های انسانی مانند سدسازی و تغییر کاربری اراضی منطقه در دوره بعد از نقطه تغییر صورت گرفته است) [۸]. به این ترتیب، مدل شبکه عصبی مصنوعی در دوره قبل از نقطه تغییر به گونه‌ای ساخته می‌شود که در آن جریان رودخانه با توجه به سه متغیر اقلیمی بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد شود و آن‌گاه داده‌های بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره بعد از نقطه تغییر که تحت تأثیر نوسانات اقلیمی قرار گرفته‌اند، درون مدل شبکه عصبی مصنوعی قرار می‌گیرد و جریان رودخانه در دوره بعد از نقطه تغییر با توجه به آن‌ها برآورد می‌شود. به این ترتیب، جریان رودخانه برآورد شده در دوره بعد از نقطه تغییر با توجه مدل شبکه عصبی مصنوعی، فقط تحت تأثیر نوسانات اقلیمی قرار می‌گیرد و عوامل انسانی بر آن تأثیری ندارد. در مطالعه حاضر به منظور تفکیک آثار انسانی و اقلیمی، از مدل شبکه عصبی مصنوعی پس‌انتشار خطا<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی رابطه بین لایه ورودی (بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل) و لایه خروجی (جریان رودخانه) استفاده شد. با توجه به این موارد، با استفاده از روابط ۱-۵ سهم هر یک از عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات جریان رودخانه تعیین می‌شوند [۸]:

$$\Delta Q = \bar{Q}_b^{obs} - \bar{Q}_a^{obs} \quad (1)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_c + \Delta Q_h \quad (2)$$

(۱۹۹۰) رابطه ارائه شده توسط Fu را توسعه داد و رابطه ۱۳ را به منظور تعیین سهم نوسانات اقلیمی ( $\Delta Q_c$ ) در تغییرات جریان رودخانه ارائه کرد [۲۰]:

$$\Delta Q_c = \frac{\partial Q}{\partial P}(\Delta P) + \frac{\partial Q}{\partial PET}(\Delta PET) = \varepsilon_p(\Delta P) + \varepsilon_{PET}(\Delta PET) \quad (13)$$

که در رابطه یاد شده، P بارش،  $\Delta P$  تغییرات بارش، PET تبخیر و تعرق پتانسیل،  $\Delta PET$  تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل،  $\varepsilon_p$  ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به تغییرات بارش و  $\varepsilon_{PET}$  ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل است [۲۱]. با توجه به فرضیه Budyko، ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به بارش ( $\varepsilon_p$ ) و تبخیر و تعرق پتانسیل ( $\varepsilon_{PET}$ ) با توجه به شاخص خشکی ( $\varphi = \frac{PET}{P}$ ) به صورت روابط ۱۴ و ۱۵ به دست می‌آیند:

$$\varepsilon_p = 1 + \frac{1 + \varphi F'(\varphi)}{1 - F(\varphi)} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{PET} = -\frac{\varphi F'(\varphi)}{1 - F(\varphi)} \quad (15)$$

که در روابط یاد شده،  $F(\varphi)$  تابع خشکی است و شکل‌های مختلفی از آن براساس فرضیه Budyko برای تجزیه و تحلیل آثار نوسانات اقلیمی روی جریان رودخانه وجود دارد که در مطالعه حاضر رابطه ارائه شده توسط Zhang و همکاران (۲۰۰۱) استفاده شده است (رابطه ۱۶) [۲۲].

$$F(\varphi) = \frac{1 + w\varphi}{(1 + w\varphi + \varphi)^2} \quad (16)$$

که در رابطه یاد شده، پارامتر W مشخصات حوضه از نظر پوشش گیاهی، خواص خاک و توپوگرافی است. با جای‌گذاری رابطه ۱۶ در روابط ۱۴ و ۱۵ ضرایب الاستیسیته جریان رودخانه به تغییرات بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روابط ۱۷ و ۱۸ به دست می‌آید و آن‌گاه با استفاده از رابطه ۱۳ سهم عامل اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه تعیین می‌شود.

$$\varepsilon_p = \frac{1 + 2\phi + 3w \cdot \phi}{(1 + \phi + w \cdot \phi)^2} \quad (17)$$

خطی جریان تجمعی رودخانه قبل و بعد از نقطه تغییر،  $S_{p,a}$  و  $S_{p,b}$  به ترتیب شیب رگرسیون خطی تجمعی بارش قبل و بعد از نقطه تغییر و  $S_{PET,a}$  و  $S_{PET,b}$  به ترتیب شیب رگرسیون خطی تجمعی تبخیر و تعرق پتانسیل قبل و بعد از نقطه تغییرند. به این ترتیب، سهم تأثیر بارش ( $\eta_p$ ) بر حسب درصد) و تبخیر و تعرق پتانسیل ( $\eta_{PET}$ ) بر حسب درصد) در تغییر جریان رودخانه به صورت روابط ۹ و ۱۰ به دست می‌آید [۵]:

$$\eta_p = \frac{R_{SP}}{R_{SQ}} \times 100 \quad (9)$$

$$\eta_{PET} = \frac{R_{SPET}}{R_{SQ}} \times 100 \quad (10)$$

با محاسبه سهم بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، سهم هر یک از عوامل اقلیمی ( $\eta_c$ ) بر حسب درصد) و انسانی ( $\eta_h$ ) بر حسب درصد) بر تغییر جریان رودخانه با توجه به روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\eta_c = \eta_p + \eta_{PET} \quad (11)$$

$$\eta_h = 100 - \eta_c = 100 - (\eta_p + \eta_{PET}) \quad (12)$$

در واقع، در روش یاد شده تعیین می‌شود که چند درصد تغییرات شیب تجمعی جریان رودخانه در شرایط طبیعی در دوره بعد از تغییر نسبت به دوره قبل از تغییر می‌تواند ناشی از تغییرات شیب تجمعی بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل باشد، آن‌گاه بقیه تغییرات شیب تجمعی جریان رودخانه به عامل دیگر که فعالیت‌های انسانی است، نسبت داده می‌شود.

#### الاستیسیته اقلیمی (رویکرد تحلیلی)

رویکرد تحلیلی براساس فرضیه Budyko استوار است. Budyko در سال ۱۹۷۴ فرض کرد که نسبت میانگین سالیانه تبخیر و تعرق واقعی به میانگین سالیانه بارش ( $\frac{AET}{P}$ ) تابعی از نسبت میانگین سالیانه تبخیر و تعرق پتانسیل به میانگین سالیانه بارش ( $\frac{PET}{P}$ ) و دیگر خصوصیات حوضه آبخیز است. Fu در سال ۱۹۸۱ با استفاده از این فرضیه، نوعی رابطه ریاضی توسعه داد که در آن نسبت ( $\frac{AET}{P}$ ) بر اساس نسبت ( $\frac{PET}{P}$ ) و برخی از خصوصیات حوضه آبخیز به دست می‌آید [۱۹]. Schaaake

مشاهده می‌شود، روند بارش در کل حوضه از بین ۳۹ ایستگاه بررسی شده، در ۲۷ ایستگاه دارای روند کاهشی و در ۴ ایستگاه دارای روند افزایشی معنادار است و در ۸ ایستگاه روند معناداری ندارد. نتایج بررسی روند دما در سطح حوضه نیز نشان‌دهنده روند افزایشی معنادار در ۱۱ ایستگاه و روند کاهشی معنادار در ۱ ایستگاه است و بررسی روند ایستگاه‌های هیدرومتری نیز روند کاهشی معنادار جریان رودخانه در تمامی ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این موارد، بارش در زیرحوضه‌های سیمره و قره‌سو کاملاً روند کاهشی دارد و در زیرحوضه‌های کشکان و گاماسیاب در بیشتر ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی بوده و در تعداد کمی از آنها دارای روند افزایشی است. دما نیز به‌جز در یک ایستگاه در زیرحوضه سیمره، در سایر مناطق روند افزایشی داشته و جریان رودخانه در تمامی زیرحوضه‌ها کاهش یافته است. همچنین، با استفاده از آزمون پتیت نقطه تغییر در جریان رودخانه در سطح معناداری ۵ درصد طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و هر یک از زیرحوضه‌های آن شناسایی شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و در تمامی زیرحوضه‌ها، جریان رودخانه در سال ۲۰۰۰ دچار تغییرات معناداری شده است. بنابراین، براساس نقطه تغییر به‌دست‌آمده در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و در تمامی زیرحوضه‌ها، بارش، دما و جریان رودخانه طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ به دو دوره قبل از نقطه تغییر (۱۹۸۰-۲۰۰۰) و بعد از نقطه تغییر (۲۰۰۱-۲۰۱۴) تقسیم شد و تغییرات آنها در دوره بعد از نقطه تغییر نسبت به دوره قبل از نقطه تغییر به دست آمد (جدول ۱).

بر این اساس، در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و در تمامی زیرحوضه‌ها، میانگین جریان رودخانه و بارش در دوره بعد از نقطه تغییر نسبت به دوره قبل از نقطه تغییر کاهش یافته است. به‌گونه‌ای که در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه بارش ۵۸ میلی‌متر کاهش، دما ۰/۵ درجه سلسیوس افزایش و جریان رودخانه ۴۷ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته است. در بین زیرحوضه‌ها نیز بارش در زیرحوضه قره‌سو (۹۴ میلی‌متر) و جریان در زیرحوضه سیمره (۲۱/۶ مترمکعب بر ثانیه) بیش از سایر زیرحوضه‌ها کاهش یافته است. به همین ترتیب، در حوضه آبخیز

$$\varepsilon_{PET} = -\frac{1+2w\phi}{(1+\phi+w\phi^2)^2} \quad (18)$$

از جمله موارد مهم در استفاده از روش الاستیسیته اقلیمی، برآورد پارامتر  $W$  است که برای این منظور، مقدار پارامتر  $W$  به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که مقدار تبخیر و تعرق واقعی به‌دست‌آمده از رابطه ۱۹ که توسط Zhang و همکاران (۲۰۰۱) ارائه شده، کمترین اختلاف با تبخیر و تعرق واقعی برآوردشده در منطقه را داشته باشد [۲۲]. در واقع، مقدار پارامتر  $W$  از طریق یک فرایند کالیبراسیون در منطقه برآورد می‌شود، به‌گونه‌ای که برای برآورد پارامتر  $W$ ، مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از رابطه ۱۹ با توجه به مقادیر مختلفی از  $W$  محاسبه می‌شود و در هر بار مقدار اختلاف تبخیر و تعرق واقعی محاسبه‌شده از این رابطه با مقدار تبخیر و تعرق واقعی برآوردشده در منطقه از طریق شاخص میانگین مربعات خطای نرمال<sup>۱</sup> شده به‌دست می‌آید. به این ترتیب، مقدار پارامتر  $W$  در هر منطقه به‌گونه‌ای برآورد می‌شود که مقدار میانگین مربعات خطای نرمال شده به ازای آن مقدار از پارامتر  $W$  در کمترین مقدار خود قرار گرفته باشد.

$$AET = \left( \frac{1+w\phi}{1+w\phi+(\phi)^{-1}} \right) \times P \quad (19)$$

که در رابطه یادشده  $P$  بارش و  $AET$  تبخیر و تعرق واقعی است. به این ترتیب، با استفاده از رابطه ۱۳ سهم عامل اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه به‌دست آمده و با فرض اینکه کل تغییرات جریان ناشی عوامل انسانی و اقلیمی است، سهم عامل انسانی در تغییرات جریان از اختلاف بین این دو از یکدیگر به دست می‌آید.

## نتایج

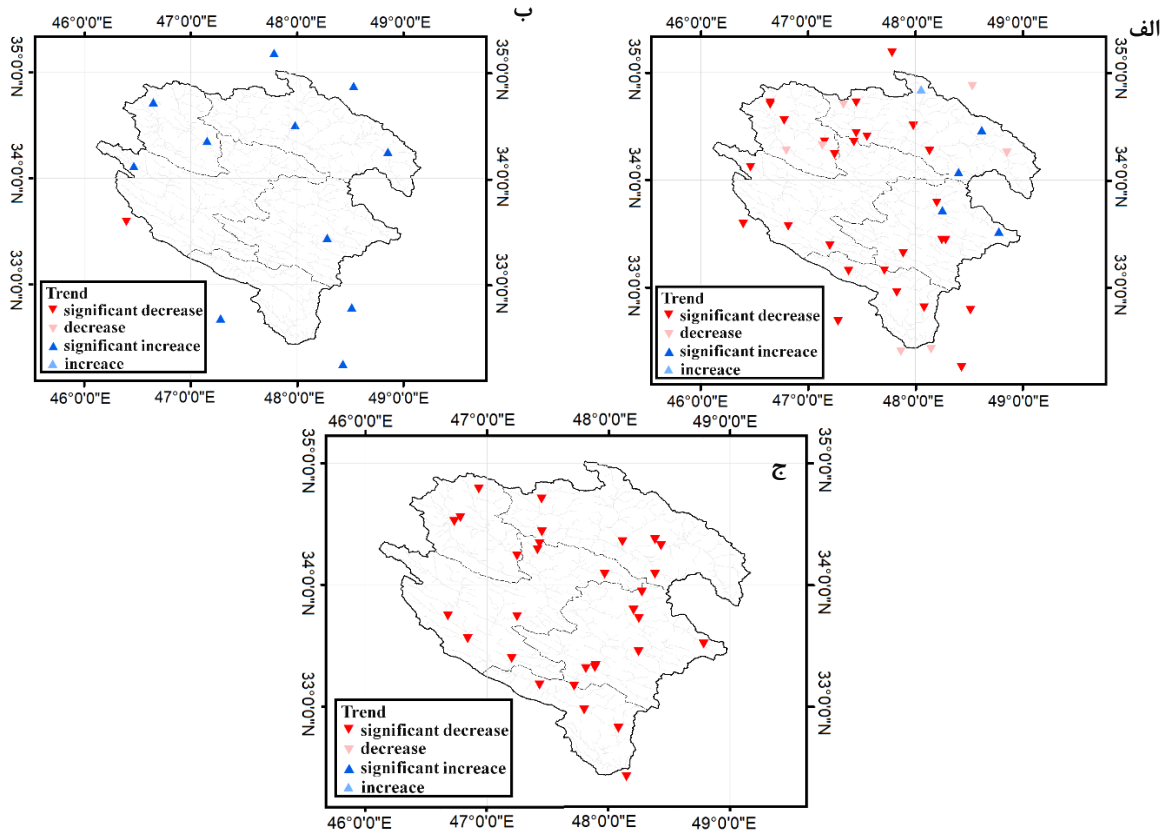
### آزمون‌های آماری

به منظور بررسی روند تغییرات بارش، دما و جریان سالیانه رودخانه در هر ایستگاه، آزمون روند من-کندال در سطح معناداری ۵ درصد طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. نتایج بررسی روند تغییرات بارش، دما و جریان سالیانه رودخانه در شکل ۲ آمده است. همان‌طور که در شکل ۲

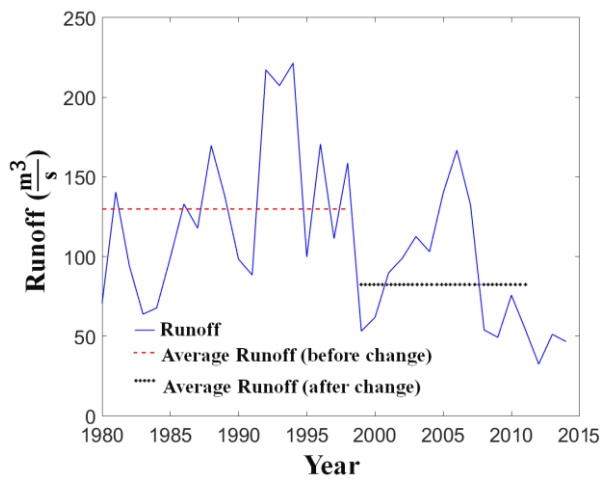
1. Normalised Root Mean Square Error (NRMSE)

دوره بعد از نقطه تغییر نسبت به دوره قبل از آن کاهش یافته است. روند تغییرات بارش و دما در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه در شکل ۳ و روند تغییرات جریان ورودی به سد کرخه در شکل ۴ آمده است.

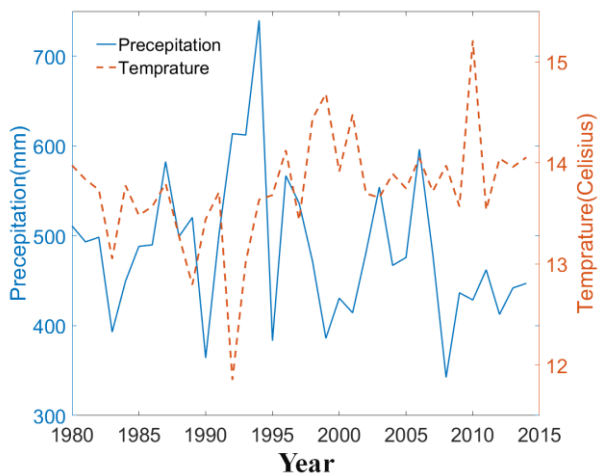
بالادست سد کرخه و هر یک از زیرحوضه‌های کشکان، گاماسیاب و قره‌سو میانگین دما در دوره بعد از نقطه تغییر، نسبت به دوره قبل از آن افزایش یافته، اما در زیرحوضه سیمره (درجه سلسیوس ۰/۴) میانگین دما در



شکل ۲. نتایج تحلیل روند الف) بارش، ب) دما و ج) جریان رودخانه



شکل ۴. روند تغییرات جریان ورودی به سد کرخه



شکل ۳. روند تغییرات بارش و دما

جدول ۱. تغییرات بارش، دما و رواناب

زیرحوضه	میانگین سالیانه رواناب <sup>(۱)</sup> (mm)		بارش (mm)		دما (°C)	
	۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰	تغییرات	۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴	تغییرات	۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴	تغییرات
کشکان	۴۳	۱۶	۵۲۷	۳۸/۳	۱۳/۹	۰/۷
سیمره	۷۳/۲	۲۱/۶	۴۲۴/۸	۸۵/۶	۱۵/۳	-۰/۴
گاماسیاب	۲۱	۷/۴	۴۵۹/۲	۱۴/۳	۱۰/۵	۰/۸
قره‌سو	۱۸/۲	۳/۸	۴۴۸	۹۴	۱۳/۶	۱
کل حوضه	۱۳۰	۴۷	۴۵۳/۶	۵۷/۸	۱۴	۰/۵

### تفکیک آثار انسانی و انسانی در تغییرات جریان رودخانه رویکرد مدل‌سازی

به منظور برآورد سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه از طریق شبکه عصبی مصنوعی، یک مدل شبکه عصبی مصنوعی برای کل منطقه در دوره قبل از نقطه تغییر (۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰) ساخته شد و سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه با استفاده از آن برآورد شد. سهم فعالیت‌های انسانی در تغییرات جریان رودخانه نیز از اختلاف بین کل تغییرات جریان رودخانه و سهم نوسانات اقلیمی در این تغییرات تعیین شد. برای هر یک از زیرحوضه‌ها نیز یک مدل شبکه عصبی مصنوعی مجزا ساخته شد و در هر یک از آنها نیز سهم هر یک از عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات جریان رودخانه به دست آمد.

در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و در تمامی زیرحوضه‌ها، تعداد لایه‌های پنهان در ساختار شبکه عصبی مصنوعی برابر ۳ در نظر گرفته شد و از تابع Log-Sigmoid به منظور تابع انتقال<sup>۱</sup> آنها استفاده شد. همچنین، از ۷۰ درصد داده‌ها برای کالیبراسیون مدل و از بقیه داده‌ها برای تست و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. با استفاده از ضریب کارایی نش-ساتکلیف<sup>۲</sup> نیز مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی ساخته شده ارزیابی شد. بر این اساس، مقدار ضریب نش-ساتکلیف در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و هر یک از زیرحوضه‌ها، در دوره کالیبراسیون مدل، حدود ۰/۸۱ تا ۰/۸۷ و در دوره اعتبارسنجی مدل، ۰/۸۵ تا ۰/۹۲ قرار گرفت (جدول ۲).

به منظور برآورد سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی، تغییرات جریان رودخانه در شرایط طبیعی و شبیه‌سازی محاسبه شد (جدول ۲). همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه تغییرات جریان در شرایط طبیعی ۴۷ و در شرایط شبیه‌سازی ۱۹ مترمکعب بر ثانیه بوده و بنابراین سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه ۱۹ مترمکعب بر ثانیه (۴۰ درصد) و سهم فعالیت‌های انسانی ۲۸ متر مکعب بر ثانیه (۶۰ درصد) است. در بین هر یک از زیرحوضه‌ها نیز تغییرات جریان در شرایط طبیعی حدود ۳/۸ تا ۲۱/۶ و در شرایط شبیه‌سازی، ۱ تا ۹/۳ مترمکعب بر ثانیه قرار گرفت. بنابراین، سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه در بین زیرحوضه‌ها حدود ۲۳/۴ تا ۴۳ و سهم فعالیت‌های انسانی، ۵۷ تا ۷۶/۶ درصد قرار گرفت. به این ترتیب، نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده سهم بیشتر فعالیت‌های انسانی نسبت به نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و هر یک از زیرحوضه‌های کشکان، سیمره، گاماسیاب و قره‌سو، با استفاده از رویکرد مدل‌سازی طی دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ است.

روش میزان تغییر شیب مقدار تجمعی (رویکرد آماری) به منظور تعیین سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه با استفاده از این روش، شیب رگرسیون خطی تجمعی جریان، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در دو دوره قبل و بعد از نقطه تغییر به دست آمد و مقدار تغییر هر یک از آنها در دوره بعد از نقطه تغییر نسبت به دوره قبل از آن محاسبه شد (جدول ۳). بر این اساس، شیب رگرسیون خطی تجمعی جریان رودخانه در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و در تمامی زیرحوضه‌ها با توجه

1. Transfer Function

2. Nash-Sutcliffe Coefficient



خطی تجمعی بارش بین ۳/۸ تا ۱۷ درصد کاهش یافته است. به همین ترتیب، شیب رگرسیون خطی تجمعی تبخیر و تعرق پتانسیل در تمامی مناطق با توجه به افزایش دما در دوره بعد از نقطه تغییر نسبت به دوره قبل از نقطه تغییر افزایش یافته اما در زیرحوضه سیمره به دلیل کاهش دما مقدار آن کاهش یافته است. به گونه‌ای که در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه مقدار شیب رگرسیون خطی تجمعی تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره قبل از نقطه تغییر برابر ۱۹۵۲ میلی‌متر در سال بوده و در دوره بعد از نقطه تغییر مقدار آن ۱/۷ درصد افزایش یافته و به ۲۰۴۳ میلی‌متر در سال رسیده است. در بین زیرحوضه‌ها نیز قره‌سو با ۴/۶ درصد، بیشترین مقدار افزایش شیب رگرسیون خطی تجمعی تبخیر و تعرق پتانسیل دارد و در زیرحوضه سیمره مقدار آن ۱ درصد کاهش یافته است. به این ترتیب، با توجه به میزان تغییر شیب تجمعی بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و جریان رودخانه، سهم بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در تغییرات جریان رودخانه برآورد شد (جدول ۳).

به کاهش جریان رودخانه در دوره بعد از نقطه تغییر نسبت به دوره قبل از آن کاهش یافته است. به گونه‌ای که شیب رگرسیون خطی تجمعی جریان رودخانه در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه در دوره قبل از نقطه تغییر برابر ۳/۸ میلیارد مترمکعب در سال بوده و در دوره بعد از نقطه تغییر ۴۹ درصد کاهش یافته و به مقدار ۱/۹ میلیارد مترمکعب در سال رسیده است. در بین زیرحوضه‌ها نیز، هر یک از زیرحوضه‌های کشکان و گاماسیاب به ترتیب با ۴۶ و ۴۲ درصد، بیشترین و کمترین مقدار کاهش شیب رگرسیون خطی تجمعی جریان رودخانه را دارند. همچنین، شیب رگرسیون خطی تجمعی بارش در دوره بعد از نقطه تغییر نسبت به دوره قبل از آن در تمامی مناطق کاهش یافته است. به گونه‌ای که در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه، شیب رگرسیون خطی تجمعی بارش در دوره قبل از نقطه تغییر برابر ۵۱۴ میلی‌متر بر سال بوده و در دوره بعد از نقطه تغییر، مقدار آن ۱۲ درصد کاهش یافته و به ۴۵۲ میلی‌متر بر سال رسیده است. در بین زیرحوضه‌ها نیز شیب رگرسیون

جدول ۲. سهم هر یک از عوامل در تغییرات رواناب با استفاده از رویکرد مدل سازی

فعالیت‌های انسانی	نوسانات اقلیمی		میانگین سالیانه رواناب (شبه‌سازی)		NSE		زیرحوضه
	(%)	( $\frac{m^3}{s}$ )	۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴	۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰	اعتبارسنجی	کالیبراسیون	
	(%)	( $\frac{m^3}{s}$ )					
	۷۶/۶	۳/۷	۳۹/۳	۴۳	۰/۸۶	۰/۸۶	کشکان
	۵۷	۹/۳	۶۳/۹	۷۳/۲	۰/۸۵	۰/۸۶	سیمره
	۷۴/۲	۱/۹	۱۹	۲۱	۰/۹۲	۰/۸۳	گاماسیاب
	۷۵	۱	۱۷/۲	۱۸/۲	۰/۹۱	۰/۸۱	قره‌سو
	۶۰	۱۹	۱۱۱	۱۳۰	۰/۸۵	۰/۸۷	کل حوضه

جدول ۳. سهم هر یک از عوامل در تغییرات رواناب با استفاده از رویکرد آماری

فعالیت‌های انسانی	سهم هر عامل در تغییرات (%)			پارامتر			زیرحوضه
	نوسانات اقلیمی	تبخیر و تعرق پتانسیل	بارش	R <sub>SPET</sub>	R <sub>SP</sub>	R <sub>SQ</sub>	
	۲۵	۳	۲۲	۱/۵	-۱۰/۱	-۴۶/۴	کشکان
	۳۸/۶	-۲/۴	۴۱	-۱	-۱۷/۷	-۴۳/۱	سیمره
	۱۴	۵	۹	۲/۳	-۳/۸	-۴۲/۴	گاماسیاب
	۴۶	۱۰	۳۶	۴/۶	-۱۶	-۴۵	قره‌سو
	۲۸	۳	۲۵	۱/۷	-۱۲/۱	-۴۹/۴	کل حوضه

مجموع مربعات خطای نرمال شده برای برآورد پارامتر  $W$  در منطقه حدود ۱۲ تا ۲۶ درصد شده است. پارامتر  $W$  معمولاً مقداری بین ۰/۵ تا ۲ دارد که مقادیر کمتر آن نشان دهنده واکنش کمتر جریان در حوضه به تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل است. با توجه به اینکه مقدار پارامتر  $W$  در سطح حوضه حدود ۰/۵۳ تا ۰/۶ است، بنابراین جریان رودخانه در سطح حوضه به تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل واکنش کمتری نسبت به سایر مؤلفه‌ها نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از مقدار ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در منطقه نیز نشان می‌دهد در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و همچنین در تمامی زیرحوضه‌ها، مقدار ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به بارش بیشتر از مقدار ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به تبخیر و تعرق پتانسیل است و جریان رودخانه با تغییرات بارش نسبت به تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل دچار تغییرات بیشتری می‌شود و این خود به معنای برآورد مناسب پارامتر  $W$  در منطقه است. به گونه‌ای که مقدار ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به بارش در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه برابر ۰/۰۹ بوده و در زیرحوضه‌ها بین ۰/۰۷ تا ۰/۱۶ شده است. مقدار ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به تبخیر و تعرق پتانسیل نیز در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه برابر ۰/۰۳- بوده و در زیرحوضه بین ۰/۰۶- تا ۰/۰۳- قرار گرفته است؛ بنابراین، مقدار ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به بارش در تمامی مناطق مثبت بوده و بنابراین جریان در تمامی مناطق با افزایش بارش افزایش یافته و با کاهش آن، کاهش می‌یابد. این در حالی است که مقدار ضریب الاستیسیته جریان رودخانه به تبخیر و تعرق پتانسیل در تمامی مناطق منفی است. بنابراین، جریان در تمامی مناطق با افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل کاهش یافته و با کاهش آن، افزایش می‌یابد. به این ترتیب، سهم بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در تغییرات جریان در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه به ترتیب برابر ۱۳/۸ و ۳/۲ درصد برآورد شد و بنابراین سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان ۱۷ و سهم فعالیت‌های انسانی ۸۳ درصد است. در میان هر یک از زیرحوضه‌ها نیز سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان حدود ۱۰ تا ۳۸ درصد و فعالیت‌های انسانی حدود ۶۲ تا ۹۰ درصد برآورد شده است.

همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد، در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه، با کاهش ۱۲ درصدی بارش، جریان رودخانه ۲۵ درصد کاهش یافته و با افزایش ۱/۷ درصدی تبخیر و تعرق پتانسیل، جریان رودخانه ۳ درصد کاهش یافته است. به این ترتیب، سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه برابر ۲۸ و سهم فعالیت‌های انسانی در تغییرات جریان رودخانه برابر ۷۲ درصد است. در زیرحوضه‌ها نیز نوسانات اقلیمی در زیرحوضه قره‌سو بیش از سایر زیرحوضه‌ها جریان رودخانه را کاهش داده است. با این وجود، نتایج به دست آمده نشان دهنده سهم بیشتر فعالیت‌های انسانی نسبت به نوسانات اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و هر یک از زیرحوضه‌های کشکان، سیمره، گاماسیاب و قره‌سو، با استفاده از رویکرد آماری در دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ است.

#### روش الاستیسیته اقلیمی (رویکرد تحلیلی)

به منظور تعیین سهم هر یک از عوامل در تغییرات جریان رودخانه با استفاده از این روش، سهم عامل اقلیمی در تغییرات جریان رودخانه با توجه به مقدار تغییرات بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل و ضریب الاستیسیته جریان به تغییرات این دو مؤلفه برآورد شده است. تغییرات بارش در قسمت تحلیل روند بررسی شد. تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در سطح حوضه نیز نشان می‌دهد مقدار آن در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه ۲/۱ درصد افزایش یافته و در بین زیرحوضه‌ها نیز به غیر از زیرحوضه سیمره، در سایر زیرحوضه‌ها روند افزایشی دارد (جدول ۴).

بر این اساس، شاخص خشکی در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه برابر ۳/۷ به دست آمد. در زیرحوضه‌ها نیز مقدار آن حدود ۲/۸ تا ۴ شد. با مقایسه مقادیر شاخص خشکی به دست آمده با طبقه‌بندی انجام شده توسط UNEP<sup>۱</sup> می‌توان دریافت که شرایط اقلیمی تمامی مناطق در دسته نیمه‌خشک قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از برآورد مقدار پارامتر  $W$  نیز نشان می‌دهد مقدار این پارامتر در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه برابر ۰/۵۳ بوده و در بین زیرحوضه‌ها مقدار آن بین ۰/۵۵ تا ۰/۶۲ قرار گرفته است. همچنین، با توجه به ارزیابی صورت گرفته، مقدار میانگین

1. United Nations Environment Programme (UNEP)

جدول ۴. سهم هر یک از عوامل در تغییرات رواناب با استفاده از رویکرد تحلیلی

زیرحوضه	تغییرات PET (%)	پارامتر				سهم هر عامل در تغییرات (%)			
		$\epsilon_P$	$\epsilon_{PET}$	W	$\phi$	بارش	تبخیر و تعرق پتانسیل	نوسانات اقلیمی	فعالیت‌های انسانی
کشکان	۲/۲	۰/۱۶	-۰/۰۶	۰/۱۶	۲/۸	۷/۸	۳/۲	۱۱	۸۹
سیمره	-۰/۸	۰/۰۷	-۰/۰۳	۰/۱۵۸	۴	۱۰/۲	-۰/۶۵	۱۰	۹۰
گاماسیاب	۲/۸	۰/۰۹۵	-۰/۰۳۵	۰/۶۲	۳/۶	۵/۷	۶/۹	۱۳	۸۷
قره‌سو	۵	۰/۱	-۰/۰۴	۰/۱۵۵	۳/۶	۲۸	۱۰/۳	۳۸	۶۲
کل حوضه	۲/۱	۰/۰۹	-۰/۰۳	۰/۱۵۳	۳/۷	۱۳/۸	۳/۲	۱۷	۸۳

بر این اساس، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و در تمامی زیرحوضه‌ها، طی دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴، با استفاده از رویکرد تحلیلی، فعالیت‌های انسانی عامل اصلی تغییرات جریان رودخانه بوده و نوسانات اقلیمی عاملی مکمل در تغییرات جریان رودخانه بوده است (جدول ۴).

#### نتیجه‌گیری

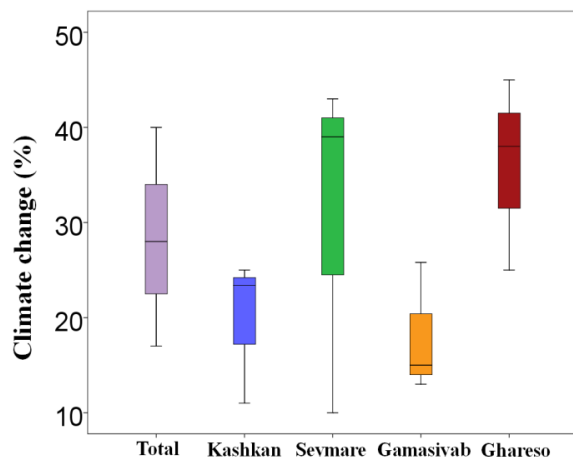
در مطالعه حاضر دامنه تغییرات نتایج به‌دست‌آمده از رویکردهای مختلف در تعیین سهم هر یک از عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات جریان رودخانه در حوضه آبخیز بالادست سد کرخه و چهار زیرحوضه اصلی آن یعنی کشکان، سیمره، گاماسیاب و قره‌سو طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۴ بررسی شد. به این منظور، پس از بررسی و تعیین نقطه تغییر دما، بارش و جریان در هر زیرحوضه، برآورد سهم هر یک از عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان با استفاده از سه رویکرد مدل‌سازی (شبکه عصبی مصنوعی)، آماری (میزان تغییر شیب مقدار جمعی) و تحلیلی (الاستیسیته اقلیمی) در نظر گرفته شد. بر این اساس، نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر به شرح زیر جمع‌بندی می‌شود:

• اقلیمی نیز با کاهش بارش و افزایش دما، عامل مکمل کاهش جریان در منطقه بوده است. به‌گونه‌ای که سهم نوسانات اقلیمی در کاهش جریان رودخانه در کل حوضه با توجه به هر سه رویکرد، حدود ۱۷ تا ۴۰ درصد بوده و بین زیرحوضه‌ها نیز نتایج به همین ترتیب بوده است (شکل ۶). مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از هر رویکرد در تعیین سهم هر عامل در تغییرات جریان رودخانه نیز نشان می‌دهد رویکرد تحلیلی سهم بیشتری نسبت به دو رویکرد دیگر به فعالیت‌های انسانی اختصاص می‌دهد و نتایج دو رویکرد مدل‌سازی و آماری، مقدار اختلاف کمتری در برآورد سهم هر عامل در تغییرات جریان رودخانه دارند. در این شرایط، به منظور حصول شرایط واقع‌بینانه و لحاظ عدم قطعیت مرتبط بر روش‌شناسی، استفاده از طیف متنوعی از رویکردهای مختلف به منظور تفکیک آثار انسانی و اقلیمی بر شرایط هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز توصیه می‌شود.

• هر چند رویکردهای مختلف سهم بیشتری را به اثر فعالیت‌های انسانی در دوره ۳۵ ساله (۱۹۸۰-۲۰۱۴) در کاهش جریان رودخانه‌های حوضه سد کرخه اختصاص می‌دهند. اما نکته درخور توجه در کاربرد نتایج به‌دست‌آمده از این رویکردها، وابستگی و حساسیت زیاد نتایج آنها به نقطه تغییر و به نوبه آن، طول دوره آماری و وقایع حدی دوره بررسی شده است. در این شرایط، به وجود آمدن وقایع حدی مانند سیلاب ۱۲ فرودین ۱۳۹۸ می‌تواند کارکرد مؤثری در افزایش سهم عوامل اقلیمی و نتایج رویکردهای یادشده داشته باشد.

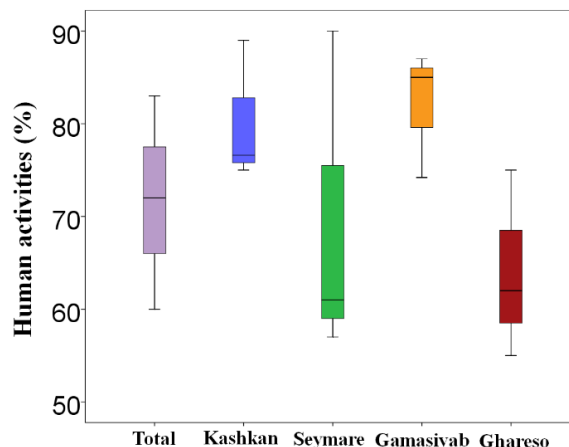
• دامنه تغییرات نتایج به‌دست‌آمده از رویکردهای مختلف مطابق شکل‌های ۵ و ۶ است و دامنه عدم قطعیت زیاد نتایج در تفکیک سهم عوامل اقلیمی و انسانی بر جریان رودخانه را نشان می‌دهد. به‌گونه‌ای که سهم فعالیت‌های انسانی در تغییرات جریان رودخانه با توجه به این سه رویکرد در حوضه آبخیز سد کرخه حدود ۶۰ تا ۸۳ درصد بوده و بین هر یک از زیرحوضه‌ها نیز فعالیت‌های انسانی عامل اصلی تغییرات جریان رودخانه بوده است (شکل ۵). نوسانات

نمی‌شود و به نوبه خود، نتایج مربوط به این رویکردها را با تردید مواجه می‌کند. در این خصوص، استفاده از مدل‌های مفهومی به منظور در نظر گرفتن تغییرات الگو و رژیم بارش بر فرایندهای هیدرولوژیک در کنار رویکردهای یادشده توصیه می‌شود.



شکل ۶. سهم نوسانات اقلیمی در تغییرات رواناب

از جمله عوامل مؤثر بر تعیین سهم عوامل اقلیمی بر تغییرات جریان رودخانه‌ها، تغییرات الگو و رژیم بارش در سطح حوضه است. این مهم در رویکردهای بررسی‌شده در مطالعه حاضر شامل رویکردهای مبتنی بر مدل‌های داده‌محور، آماری و تحلیلی لحاظ



شکل ۵. سهم فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب

#### منابع

- [1]. Seyoum, W.M., Milewski, A. M., and Durham, M.C., Understanding the relative impacts of natural processes and human activities on the hydrology of the Central Rift Valley lakes, East Africa. *Hydrological processes*, 2015; 29(19), 4312-4324.
- [2]. Wang, X., He, K., and Dong, Z., Effects of climate change and human activities on runoff in the Beichuan River Basin in the northeastern Tibetan Plateau, China. *Catena*, 2019; 176, 81-93.
- [3]. Du, J., He, F., Zhang, Z., and Shi, P., Precipitation change and human impacts on hydrologic variables in Zhengshui River Basin, China. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 2011; 25(7), 1013-1025.
- [4]. Dey, P., and Mishra, A., Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions. *Journal of Hydrology*, 2017; 548, 278-290.
- [5]. Wang, S., Yan, M., Yan, Y., Shi, C., and He, L., Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River. *Quaternary International*, 2012; 282, 66-77.
- [6]. Kong, D., Miao, C., Wu, J., and Duan, Q., Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River Basin from 1951 to 2012. *Ecological engineering*, 2016; 91, 566-573.
- [7]. Huang, S., Liu, D., Huang, Q., and Chen, Y., Contributions of climate variability and human activities to the variation of runoff in the Wei River Basin, China. *Hydrological Sciences Journal*, 2016; 61(6), 1026-1039.
- [8]. Liu, D., Chen, X., Lian, Y., and Lou, Z., Impacts of climate change and human activities on surface runoff in the Dongjiang River basin of China. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2010; 24(11), 1487-1495.
- [9]. Tang, J., Yin, X. A., Yang, P., and Yang, Z., Assessment of contributions of climatic variation and human activities to streamflow changes in the Lancang River, China. *Water resources management*, 2014; 28(10), 2953-2966.
- [10]. Yan, X., Bao, Z., Zhang, J., Wang, G., He, R., and Liu, C., Quantifying contributions of climate change and local human activities to runoff decline in the upper reaches of the Luanhe River basin. *Journal of Hydro-environment Research*, 2018.
- [11]. Chang, J., Zhang, H., Wang, Y., and Zhu, Y., Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow variation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016; 20(4), 1547-1560.

- [12]. Tsai, Y., The multivariate climatic and anthropogenic elasticity of streamflow in the Eastern United States. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017; 9, 199-215.
- [13]. Li, C., Wang, L., Wanrui, W., Qi, J., Linshan, Y., Zhang, Y, et al. An analytical approach to separate climate and human contributions to basin streamflow variability. *Journal of hydrology*, 2018; 559, 30-42.
- [14]. Xin, Z., Li, Y., Zhang, L., Ding, W., Ye, L., Wu, J, et al. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on seasonal streamflow. *Journal of Hydrology*, 2019; 574, 936-945.
- [15]. Delavar, M., Hajihosseiny, H., and Morid, S., Water and Agriculture Resource Modeling Report in Upper basin of Karkhe Dam. Khuzestan water and power authority, 2018.[Persian]
- [16]. He, Y., Qiua, H., Song, J., Zhao, Y., Zhang, L., Hu, S, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Bahe River watershed of the Qinling Mountains, China. *Journal of Hydrology*, 2019; In Press, Accepted Manuscript.
- [17]. Pettitt, A. N., A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 1979; 28(2), 126-135.
- [18]. Pohlert, T., Non-parametric trend tests and change-point detection, 2016; CC BY-ND, 4.
- [19]. Fu, B. P., On the calculation of the evaporation from land surface. *Sci. Atmos. Sin*, 1981; 5(1), 23-31.
- [20]. Schaake, J. C., and Liu, C., Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources. In *New Directions for Surface Water Modeling Proceedings of the Baltimore Symposium*, 1989, May.
- [21]. Wang, S., Wang, Y., Ran, L., and Su, T., Climatic and anthropogenic impacts on runoff changes in the songhua river basin over the last 56 years (1955–2010), Northeastern China. *Catena*, 2015; 127, 258-269.
- [22]. Zhang, L., Dawes, WR., and Walker, G.R., Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research*, 2001; 37(3), 701-708.